



Masterarbeit

*„Einfluss verschiedener Schwefelformen und -mengen auf die
Ertrags- und Qualitätsparameter des Winterweizens“*

Name:	Leoni Diederling
Studiengang:	Landwirtschaft (Master)
1. Gutachter:	Frau Prof. Dr. Annette Deubel
2. Gutachter:	Herr M.Sc. Ferenc Kornis

Bernburg, den 17.12.2025

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denen herzlich bedanken, die fachlich und persönlich zum Gelingen meiner Masterarbeit beigetragen haben.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, insbesondere meinen Eltern, die mich stets bedingungslos unterstützen und nur so dieses Studium überhaupt ermöglichen.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei Frau Prof. Dr. Annette Deubel für die Ermöglichung und Betreuung meiner Masterarbeit sowie die hilfreiche Unterstützung in der Endphase des Schreibprozesses.

Ein weiteres herzliches Dankeschön möchte ich der gesamten N.U. Agrar GmbH aussprechen. Dabei möchte ich mich besonders bei Ferenc Kornis für die Hilfe bei der Themenfindung sowie der Betreuung meiner Arbeit bedanken. Ein großer Dank gilt zudem den Mitarbeiterinnen des Versuchsgutes in Derenburg Kerstin Fischer und Corinna Mühlenberg, die mich von der Versuchsplanung bis hin zur Auswertung der Daten tatkräftig unterstützt haben.

Ganz herzlich möchte ich mich auch beim Förderkreis Agrarwissenschaften e.V. bedanken, die mich bei meinem Versuch finanziell unterstützt haben und die zahlreichen Probenahmen erst möglich gemacht haben.

Mein herzlicher Dank gilt auch Christian und Klaus Münchhoff für die Bereitstellung der Versuchsfläche.

Bibliographische Beschreibung

Name, Vorname: Diederich, Leoni
Thema: „Einfluss verschiedener Schwefelformen und -mengen auf die Ertrags- und Qualitätsparameter des Winterweizens“

2025/ 85 Seiten/ 9 Tabellen/ 30 Abbildungen

Bernburg: Hochschule Anhalt
Fachbereich Landwirtschaft, Ökotoxikologie und
Landschaftsentwicklung

Autorreferat:

In der vorliegenden Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit der N.U. Agrar GmbH der Einfluss verschiedener Schwefelformen und -mengen auf die Ertrags- und Qualitätsparameter des Winterweizens anhand eines im Jahr 2025 in Derenburg im Harz durchgeführten Feldversuches untersucht.

Dabei wurden die Wirkungen der Schwefeldüngemittel SSA, Kieserit, KaliSop und Schwefellinsen in verschiedenen Mengestufen einer unbehandelten Kontrolle gegenübergestellt. Als Ertrags- und Qualitätsparameter wurden die Ähren pro Quadratmeter, der Korntrag, das Tausendkorngewicht, das Hektolitergewicht, der Rohproteingehalt, der Klebergehalt, der Sedimentationswert sowie der Feuchtigkeitsgehalt herangezogen. Darüber hinaus wurden die Auswirkungen der Schwefeldüngung auf den Schwefelgehalt im Boden und in der Pflanze sowie auf das Bodenmikrobiom untersucht. Die daraus resultierenden Ergebnisse wurden anschließend im Vergleich mit dem vorher dargelegten Literaturstand diskutiert und in den Kontext aktueller Aspekte eingeordnet.

Ziel dieser Arbeit war es, vor dem Hintergrund aktueller Herausforderungen, Ansatzpunkte und Verbesserungsmöglichkeiten zur Prozessoptimierung und Steigerung der Effizienz im Bereich der Düngung von Winterweizen herauszuarbeiten. Die Schwefeldüngung zeigte gegenüber der Kontrolle positive Ertragseffekte. Die Trockenheit stellte sich im Versuch als ein Faktor heraus, der die Wirkung der Schwefeldüngung begrenzt. Für zukünftige Forschungsarbeiten stellt sich die Frage, wie eine bedarfsgerechte Schwefelversorgung unter der zunehmenden Frühjahrs- und Vorsommertrockenheit sichergestellt werden kann.

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis	III
1. Einleitung	1
2. Literatur	2
2.1 Winterweizen	2
2.1.1 Kulturportrait	2
2.1.2 Ansprüche an die Nährstoffversorgung und Düngung	5
2.1.3 Ertrags- und Qualitätsparameter	8
2.2 Schwefel	12
2.2.1 Grundlagen	12
2.2.2 Schwefelkreislauf	13
2.2.3 Funktionen in der Pflanze und Ernährungsstörungen	15
2.2.4 Düngemittel	18
3. Zielstellungen	22
4. Material und Methoden	23
4.1 Standortbeschreibung	23
4.2 Versuchsaufbau	25
4.3 Versuchsdurchführung	27
4.4 Bonituren, Bodenuntersuchungen und Analysen	31
4.5 Ermittlung der Ertrags- und Qualitätsparameter	32
4.6 Statistische Auswertung	34
5. Ergebnisse	35
5.1 S_{\min} - und N_{\min} -Werte	35
5.2 Pflanzenanalyse	38
5.3 Untersuchungen des Bodenmikrobioms	39
5.3.1 Boden-Bakterien	39
5.3.2 Enzyme	42
5.4 Ertrags- und Qualitätsparameter	44
6. Diskussion	52
7. Schlussfolgerungen	65
8. Zusammenfassung	66
Literaturverzeichnis	67
Anhang	74
Selbstständigkeitserklärung	79

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufnahme der Nährstoffe N, P, K und S durch die Weizenkultur (ganze Pflanze) auf der Grundlage eines Ertrages von 60 dt/ha und in Abhängigkeit des physiologischen Entwicklungsstadiums der Pflanze (AGROSCOPE, 2017, a, S.4)	5
Abbildung 2: Durchschnittlicher Ertrag von Winterweizen in dt/ha im Zeitraum 1990 bis 2025 (nach STATISTISCHES BUNDESAMT, 2025), modifiziert	9
Abbildung 3: Schwefelkreislauf im System Boden-Pflanze (DLG, 2012)	13
Abbildung 4: Ausreichend mit Schwefel versorgter Weizen (jeweils links) im Vergleich zu Schwefel-Mangel im Weizen (jeweils rechts) (YARA, o.J., b), modifiziert	17
Abbildung 5: Wetterdiagramm Derenburg 01.08.2024 bis 31.07.2025 (eigene Darstellung) .	23
Abbildung 6: Versuchsaufbau (eigene Darstellung)	26
Abbildung 7: Luftbildaufnahme des Feldversuches vom 04. April 2025 (eigene Aufnahme) .	26
Abbildung 8: Sortenprofil LG Optimist (LIMAGRAIN, 2025), modifiziert	27
Abbildung 9: Entwicklung des Winterweizens am Termin der Düngung am 06.03.2025 (eigene Aufnahme)	29
Abbildung 10: Entwicklung des Winterweizens am 14.04.2025 (eigene Aufnahme)	29
Abbildung 11: Entwicklung des Winterweizens am 05.05.2025 (eigene Aufnahme)	30
Abbildung 12: Entwicklung der Ähre am 05.05.2025 (eigene Aufnahme)	30
Abbildung 13: Entwicklung des Winterweizens am 12.05.2025 (eigene Aufnahme)	30
Abbildung 14: Entwicklung des Winterweizens am Termin der Ernte am 23.07.2025	30
Abbildung 15: Untersuchung des S_{\min} -Gehaltes vom 22. April 2025 in den Tiefen 0-15 und 15-30 cm in kg S/ha	35
Abbildung 16: Untersuchung des S_{\min} -Gehaltes vom 12. Mai 2025 in den Tiefen 0-15 und 15-30 cm in kg S/ha	36
Abbildung 17: N_{\min} -Gehalte des Bodens am 22. April 2025 und 12. Mai 2025 in den Varianten 1, 3 und 11 in einer Bodentiefe von 0 bis 15 cm in kg N/ha	37
Abbildung 18: Durchschnitt der relativen Häufigkeit der häufigsten Bakterien-Gattungen in den verschiedenen Varianten für den Termin der Probenahme am 22. April 2025 in Prozent (%)	39
Abbildung 19: Durchschnitt der relativen Häufigkeit der häufigsten Bakterien-Gattungen in den verschiedenen Varianten für den Termin der Probenahme am 12. Mai 2025 in Prozent (%)	40
Abbildung 20: Lage- und Streuungsmaße der relativen Häufigkeiten der Gattungen Streptomyces, Peribacillus und Tumebacillus in den verschiedenen Varianten für den Probenahmetermin am 12. Mai 2025	41
Abbildung 21: Durchschnittliche Substratumwandlungsrate des Enzyms Arylsulfatase in Nanomol je Gramm und Stunde (nmol/g/h) in den verschiedenen Varianten für beide Termine der Probenahme	42
Abbildung 22: Durchschnittliche Substratumwandlungsrate des Enzyms Polyphenol-Oxidase in Einheiten je Gramm (U/g) in den verschiedenen Varianten für beide Termine der Probenahme	43
Abbildung 23: Mittelwerte und Standardabweichungen der Ähren pro Quadratmeter in Abhängigkeit des Düngemittels und der gedüngten Schwefelmenge in absoluten Zahlen	44

Abbildung 24: Mittelwerte und Standardabweichungen des Ertrages in Abhängigkeit des Düngemittels und der gedüngten Schwefelmenge in Dezitonnen pro Hektar	45
Abbildung 25: Mittelwerte und Standardabweichungen des Tausendkorngewichtes in Abhängigkeit des Düngemittels und der gedüngten Schwefelmenge in Gramm.....	46
Abbildung 26: Mittelwerte und Standardabweichungen des Hektolitergewichtes in Abhängigkeit des Düngemittels und der gedüngten Schwefelmenge in Kilogramm je Hektoliter.....	47
Abbildung 27: Mittelwerte und Standardabweichungen des Rohproteingehaltes in Abhängigkeit des Düngemittels und der gedüngten Schwefelmenge in Prozent.....	48
Abbildung 28: Mittelwerte und Standardabweichungen des Klebergehaltes in Abhängigkeit des Düngemittels und der gedüngten Schwefelmenge in Prozent	49
Abbildung 29: Mittelwerte und Standardabweichungen des Sedimentationswertes in Abhängigkeit des Düngemittels und der gedüngten Schwefelmenge in Milliliter	50
Abbildung 30: Mittelwerte und Standardabweichungen des Feuchtigkeitsgehaltes in Abhängigkeit des Düngemittels und der gedüngten Schwefelmenge in Prozent.....	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Nährstoffentzug von Winterweizen in kg/dt Frischmasse, d.h. bei 86 % TS (TLL, 2015), modifiziert	6
Tabelle 2: Ertragsstruktur des Winterweizens (KROPF UND SCHÖNBERGER, 2021), modifiziert	9
Tabelle 3: Beeinflussung des Ertrags und verschiedener Qualitätsparameter von Getreide durch Makronährstoffe (K+S MINERALS AND AGRICULTURE, 2024), modifiziert	11
Tabelle 4: Auswahl schwefelhaltiger Mineraldünger (DLG, 2012), zugeschnitten	19
Tabelle 5: Variantenplan und Zusammensetzung der Düngemittel	25
Tabelle 6: Düngeplan, Ausbringung am 06.03.2025	28
Tabelle 7: Flankierende Pflanzenschutzmaßnahmen	29
Tabelle 8: Ergebnisse Pflanzenanalyse, Probenahme am 22. April 2025	38
Tabelle 9: Ergebnisse Pflanzenanalyse, Probenahme am 12. Mai 2025	38

Abkürzungsverzeichnis

amu	Atomare Masseneinheit
ATP	Adenosintriphosphat
CaCl₂	Calciumchlorid
CAL	Calcium-Acetat-Lactat
CaO	Caliumoxid
DenDF	Nenner-Freiheitsgrade
DM	Düngemittel
dt	Dezitonne
g	Gramm
ha	Hektar
hl	Hektoliter
i. TM	in der Trockenmasse
K	Kalium
kg	Kilogramm
K₂O	Kaliumoxid
M	Mol pro Liter Lösung
m	Meter
Ma.-% TS	Masseprozent in der Trockensubstanz
Mean Sq	Mittelquadrate
Mg	Magnesium
mg	Milligramm
MgO	Magnesiumoxid
ml	Milliliter
mm	Millimeter
m²	Quadratmeter
N	Stickstoff
NIR	Nahinfrarot
nm	Nanometer
N_{min}	Gehalt des Bodens an pflanzenverfügbaren mineralischen Stickstoff
NN	Normalnull (über dem Meeresspiegel)
NumDF	Zähler-Freiheitsgrade
P	Phosphor
P₂O₅	Phosphorpentoxid
S	Schwefel
S_{min}	Gehalt des Bodens an pflanzenverfügbaren mineralischen Schwefel
SSA	Schwefelsaures Ammoniak
Sum Sq	Summe der Quadrate
Temp.	Temperatur
TKG	Tausendkorngewicht
TS	Trockensubstanz
TSP	Triple Superphosphat
USA	United States of America
°C	Grad Celsius

1. Einleitung

Schwefel spielt in der Pflanzenernährung eine wichtige Rolle. So wird Schwefel in der Pflanze besonders für vielfältige Funktionen im Eiweiß-, Fett- und Kohlenhydratstoffwechsel benötigt. Schwefel ist für die Verwertung des aufgenommenen Stickstoffs und damit für die Eiweißsynthese von Bedeutung. Ein Mangel an Schwefel führt dazu, dass Eiweiße unzureichend gebildet werden, die Stickstoffverwertung deutlich sinkt und die Pflanzenentwicklung gehemmt wird. Auch bei der Bildung wichtiger Vitamine und sekundärer Inhaltsstoffe ist Schwefel unersetzlich. Mit diesen wichtigen Funktionen trägt Schwefel maßgeblich zur Sicherung des Ertrags und der Qualität des Ernteguts bei (IVA, 2024).

Lange Zeit war die Schwefeldüngung jedoch nur von geringer Bedeutung. Durch schwefelhaltige Emissionen aus anthropogenen Verbrennungsprozessen gelangte reichlich Schwefel in die Umwelt, der durch die Pflanzen genutzt werden konnte. Seit den 1970er und 1980er Jahren wurden Schwefelemissionen durch Änderungen der Gesetzgebung zum Umweltschutz erheblich vermindert. Neben gesundheitlichen Aspekten sollten so besonders Säureeinträge in sensible Ökosysteme reduziert werden (SCHUBERT, 2018). Nach Angaben des UBA (2025) ist von 1990 bis 2023 ein Rückgang der Schwefeldioxid-Emissionen von 5,5 auf 0,22 Millionen Tonnen (- 96 %) zu verzeichnen.

Seit den 1990er Jahren sind auch die gemessenen S_{min} -Gehalte im Boden deutlich gesunken. Damit ist die Schwefelnachlieferung aus tieferen Bodenschichten durch kapillaren Aufstieg limitiert oder sogar ausgeschlossen. Dies wirkt sich besonders auf leichten Standorten negativ aus, bei denen die Schwefelmineralisation aus der organischen Bodensubstanz begrenzt ist (SKW STICKSTOFFWERKE PIESTERITZ GMBH, 2020). Die N.U. AGRAR GMBH (2024) nennt als Gründe für den Rückgang der S_{min} -Gehalte zum einen den fehlenden Schwefel-Eintrag aus der Luft und zum anderen eine stärkere Auswaschung des Schwefels.

In der Folge traten in vielen Gebieten Europas Mangelsymptome an Kulturpflanzen auf (SCHUBERT, 2018). Aus diesem Grund gewann die Schwefeldüngung in der Vergangenheit zunehmend an Bedeutung. Die gängigen Düngemengen liegen aktuell zwischen 20 kg/ha Schwefel im Getreide und 40 kg/ha Schwefel im Raps (N.U. AGRAR GMBH, 2024).

Aktuelle Entwicklungen werfen allerdings vermehrt die Frage auf, ob diese Mengen noch ausreichend sind. Die Düngeverordnung wirkt sich einschneidend auf den Ackerbau aus und regt dazu an, die Stickstoffwirkung, besonders über die Versorgung mit anderen Nährstoffen, zu optimieren, um Ertrags- und Qualitätsminderungen in Grenzen zu halten (SCHÖNBERGER, 2024). Auch die seit einigen Jahren stetig sinkenden Rohproteinwerte der Ernte, die die Vermarktung erheblich erschweren, zählen zu den Herausforderungen des Weizenanbaus (ROMMELMANN, 2025). Die SKW STICKSTOFFWERKE PIESTERITZ GMBH (2020) sieht hier den direkten Zusammenhang mit der Schwefelversorgung.

Aus diesem Grund soll es das Ziel dieser Arbeit sein, vor dem Hintergrund aktueller Entwicklungen und Herausforderungen, Ansatzpunkte und Verbesserungsmöglichkeiten zur Prozessoptimierung und Steigerung der Effizienz im Bereich der Düngung von Winterweizen herauszuarbeiten, indem der Einfluss verschiedener Schwefelformen und -mengen auf die Ertrags- und Qualitätsparameter untersucht wird.

2. Literatur

2.1 Winterweizen

Um die Ergebnisse eines Düngeversuches einordnen zu können, ist es unabdingbar, sich ein Bild über die Kultur zu verschaffen und dabei einen besonderen Blick auf die Ansprüche dieser an ihre Nährstoffversorgung sowie die Ertrags- und Qualitätsparameter zu werfen.

Allgemein wird Weizen der Familie der Gräser (*Gramineae*) zugeordnet. Dabei werden unter dem Begriff „Weizen“ zahlreiche Weizenarten zusammengefasst. Die wichtigsten Vertreter stellen dabei der Weichweizen (*Triticum aestivum*) sowie der Hartweizen (*Triticum durum*) dar. Weltweit ist Weichweizen allerdings mit der umfangreichsten Anbaufläche vertreten. Beim Weichweizen werden Winterformen und Sommerformen unterschieden, wobei überwiegend die Winterform angebaut wird (GEISLER, 1991). Da der Düngeversuch in der Winterform des Weichweizens durchgeführt wurde, soll diese Form im Folgenden genauer betrachtet werden.

2.1.1 Kulturportrait

Seinen Ursprung findet der Weizen im fruchtbaren Halbmond im Vorderen Orient. Bereits vor mehr als 8.000 Jahren wurden dort domestizierte Formen angebaut. Die Evolution führte vom diploiden Einkorn über tetraploide Emmer bis hin zu unserem heutigen hexaploiden Weichweizen. Ab Beginn des 20. Jahrhunderts erfolgte eine intensive züchterische Bearbeitung, die zu den Sommer- und Winterformen führte. Aus diesen wurden wiederum an die verschiedenen ökologischen Gegebenheiten angepasste Sorten entwickelt. Gemessen an der Anbaufläche zählt Weizen heute, neben Reis und Mais, zu den bedeutendsten Nutzpflanzen weltweit (HANUS ET AL., 2008).

Nach Angaben der TLL (2015) gilt Winterweizen als Getreideart mit den höchsten Bodenansprüchen. Es werden Bodenpunkte über 35 empfohlen. Die LWK SCHLESWIG-HOLSTEIN (o.J.) beschreibt Böden mit Bodenpunkten zwischen 25 und 30 als Grenzstandorte, auf denen der Anbau bei ausreichender Wasserversorgung und mit ausgewählten Sorten möglich ist, aber oftmals Qualitätsprobleme auftreten können. Hohe und sichere Kornerträge können ab 50 Bodenpunkten erzielt werden. Dabei werden kalkhaltige, nährstoffreiche und tiefgründige Böden angeraten. DIEPENBROCK ET AL. (2016) beschreiben Löss-Lehmböden, kalkreiche Böden der Flussauen und Marschen sowie bessere Verwitterungsböden als typische Weizenböden.

Auch bezüglich des Wärme- und Wasserbedarfs kann Weizen den anspruchsvollen Getreidearten zugeordnet werden. Er schätzt warmes, trockenes Klima mit ca. 800 mm Niederschlag pro Jahr (LANDWIRTSCHAFTLICHES ZENTRUM LIEBEGG, 2024). Nach DIEPENBROCK ET AL. (2016) liegt die Frosthärte in Abhängigkeit von der Sorte zwischen - 15 und - 20 °C und ist damit zwischen Roggen und Gerste einzuordnen.

Durch die lange Vegetationszeit und die hohe Ertragsleistung ist der Wasserverbrauch höher als bei Sommergetreide. Allerdings ist auch auf niederschlagsarmen Standorten mit weniger als 600 mm Jahresniederschlag eine hohe Ertragsstabilität möglich, da der Winterweizen aufgrund seines frühzeitigen Wurzeltiefganges und der starken Wurzelbildung den Feuchtevorrat tieferer Bodenschichten besser als viele andere Fruchtarten ausnutzen kann (TLL, 2015). Der Hauptwasserbedarf besteht um den Zeitpunkt der Blüte, wenn die vegetative Masse am höchsten ist. Die kritischste Phase für Wassermangel liegt jedoch zu Beginn des Schossens.

Eine unzureichende Wasserversorgung führt in diesem Entwicklungsstadium zu einer verstärkten Reduktion von Nebentrieben, Ährchen und Blütenanlagen (HANUS ET AL., 2008).

Sowohl HANUS ET AL. (2008) als auch die TLL (2015) beschreiben den Weizen aus pflanzenbaulicher Sicht als gering selbstverträglich. Die wesentlichen Ursachen dafür liegen besonders in der zunehmenden Verungrasung und der Steigerung des Infektionspotenzials von Krankheitserregern, wie zum Beispiel Schwarzbeinigkeit oder Halmbruch. Bei der Beurteilung der Vorfruchteignung müssen die hohen Ansprüche des Weizens an den Nährstoffgehalt und die Gare des Bodens beachtet werden. Winterraps, Kartoffeln und Körnerleguminosen weisen deshalb eine gute Vorfruchteignung auf. Auch Zuckerrüben und Feldfutterpflanzen, wie Luzerne oder Klee gras, können sich als Vorfrüchte eignen, allerdings muss hier die nachteilig hohe Ausschöpfung des Bodenwasservorrates beachtet werden. Mais gilt als Infektionsquelle für Ährenfusariosen an Winterweizen und sollte bei pflugloser Bodenbearbeitung nicht als Vorfrucht eingesetzt werden. Sowohl Weizen selbst als auch die anderen Getreidearten gelten als weniger günstige Vorfrüchte. Eine Ausnahme hiervon bildet der Hafer (TLL, 2015). Dieser weist eine ausgeprägte Resistenz gegenüber der Schwarzbeinigkeit auf und kann so bei einer der wichtigsten Fruchtfolgekrankheiten von Weizen, Gerste und Triticale zu einer Unterbrechung der Infektion führen. Insgesamt werden je nach Standort und Stickstoffdüngung bei Winterweizen in Abhängigkeit von der direkten Vorfrucht Ertragseffekte von 10 bis 50 % beschrieben (HANUS ET AL., 2008).

Das Sortenbild des Weizens gruppiert sich in erster Linie nach seiner Backqualität in Eliteweizen (E-Weizen), Qualitätsweizen (A-Gruppe), Brotweizen (B-Gruppe) und sonstigen Weizen (C-Gruppe). Es muss beachtet werden, dass hohe Qualitätseigenschaften häufig mit einem geringeren Ertragspotential verbunden sind (DIEPENBROCK ET AL., 2016). Die Sortenwahl an sich wird besonders durch das Produktionsziel bestimmt, welches sich durch Absatz- und Verwertungsmöglichkeiten ergibt. Innerhalb der Qualitätsgruppen sind Ertragsleistung und Ertragsstabilität sowie die Qualitätssicherheit bedeutende Kriterien der Sortenwahl. Zudem sollten Winter- und Standfestigkeit sowie Resistenzen gegenüber Krankheiten in die Entscheidung einbezogen werden. In Abhängigkeit vom Anbauumfang des Winterweizens und von der Fruchtfolgegestaltung kann zudem die Reifezeit der Sorten zur Reife- und Erntestaffelung von Bedeutung sein (TLL, 2015).

Die TLL (2015) und DIEPENBROCK ET AL. (2016) beschreiben den Winterweizen als Getreide mit der höchsten Saatzeittoleranz. So können sowohl Frühsaaten ab Mitte September sowie Spätsaaten bis Mitte November zu guten Erträgen führen (TLL, 2015). Ab Dezember kann der Anbau als Wechselweizen erfolgen. Die Saattiefe beträgt 2 bis 3 cm. In Abhängigkeit des Standortes kann eine Saatmenge zwischen 300 und 500 Körnern je Quadratmeter gewählt werden. Bei Frühsaaten kann die Menge auf 180 Körner je Quadratmeter reduziert werden (DIEPENBROCK ET AL., 2016). Die TLL (2015) betont, dass bei der Wahl der Saatmenge neben dem Standort und der Saatzeit auch die Sorte zu beachten ist.

Die Keimung beginnt nach der Überwindung der natürlichen Keimruhe bei einem Wassergehalt von 30 bis 35 % und einer minimalen Keimtemperatur von 2 bis 4 °C (DIEPENBROCK ET AL., 2016). Nach dem Auflaufen entwickeln die Pflanzen die ersten Blätter. Vor dem Einsetzen des Winters sollten die Pflanzen mindestens drei Blätter voll entwickelt haben, da sie ab dem

sogenannten „Drei-Blatt-Stadium“ eine gute Winterfestigkeit aufweisen. Häufig wird über den Saattermin sogar eine Bestockung vor dem Winter angestrebt, da sich gut bestockte Pflanzen im Frühjahr schneller erholen können (LAND- UND FORSTWIRTSCHAFTLICHES VERSUCHSZENTRUM LAIMBURG, 2013). Es entwickeln sich nahezu gleichrangige Sprossachsen, die zunächst während der Bestockung kurz bleiben und an ihren oberen Enden Blattprimordien und schließlich die Ähre mit den Ährchenstufen anlegen. Nach der Überwinterung und einer ausreichenden Vernalisation geht die Pflanze im Frühjahr in das Streckungswachstum über. Die in der Jugendphase angelegten Blattprimordien entwickeln sich zu Blättern. Am Ende der Streckungsphase liegt die endständige Ähre mit den voll entwickelten Ährchen und Blüten vor. Die Gesamtentwicklung der Pflanze wird mit dem Ährenschieben und der Blüte abgeschlossen. Weizen ist ein Selbstbefruchter. Nach der Befruchtung entwickeln sich die Körner, in die Stärke und Eiweiße als Reservesubstanzen eingelagert werden (GEISLER, 1991).

Nach § 3 PflSchG hat die Durchführung des Pflanzenschutzes unter Einhaltung der Guten fachlichen Praxis, insbesondere der allgemeinen Grundsätze des Integrierten Pflanzenschutzes zu erfolgen (HALLMANN UND TIEDEMANN, 2019). Der pflegebedürftige Winterweizen dankt und ermöglicht eine intensive mechanische Pflege. Durch Walzen kann der Bodenschluss verbessert und die Bestockung gefördert werden. Im Frühjahr kann geeggt oder gestriegelt werden, um den Boden aufzulockern, Unkräuter zu beseitigen und die Bestandesdichte zu regulieren (TLL, 2015). Der Einsatz von Herbiziden orientiert sich am Schadschwellenprinzip und ist im Herbst im Voraufbau und bei Fröhsaaten im Nachaufbau möglich. Verbreitet ist jedoch der Fröhsahreinsatz. Nach dem Hauptaufreten bzw. dem Bekämpfungszeitpunkt können die wichtigsten pilzlichen Schaderreger in fröh (*Pseudocercospora*, *Erysiphe graminis*, *Puccinia striiformis*), mittel (*Septoria tritici*, *Puccinia triticina*) und spät (*Septoria nodorum*, *Puccinia triticina*, *Helminthosporium*) unterteilt werden. Die Bekämpfung kann durch Beizungen und die Bestandesbehandlung nach Bekämpfungsrichtwerten erfolgen. Im Bereich der tierischen Schaderreger können Brachfliegen, Getreideblattläuse und Getreidehähnchen bekämpfungswürdige Bedeutung erlangen (DIEPENBROCK ET AL., 2016).

In der Regel findet die Ernte von Winterweizen während der letzten Julidekade und in den ersten Augustwochen statt. Der Mähdrusch erfolgt bei 14 bis 17 % Kornfeuchte. Günstig ist die Ernte bei Kornfeuchten unter 16 %, weil das Erntegut in solchen Fällen lagersicher geerntet werden kann. Während eine weitere Austrocknung die Gefährdung durch Druschverletzungen steigert, wird bei höheren Kornfeuchten häufig eine technische Trocknung notwendig (DIEPENBROCK ET AL., 2016). Nach Angaben des LANDWIRTSCHAFTLICHEN ZENTRUMS LIEBEGG (2024) liegt der optimale Erntezeitpunkt bei einer Kornfeuchte von 14,5 %, wenn die Körner hart sind, das Stroh nicht mehr grün ist und sich die Ähren nach unten biegen.

Das BMEL (2024) bezieht sich auf Daten des Bundesinformationszentrums Landwirtschaft und gibt für das Wirtschaftsjahr 2023/24 eine Inlandsverwendung von Weichweizen von rund 18 Millionen Tonnen bei einem Selbstversorgungsgrad von 118 % an. Etwa 37 % entfielen dabei auf die Futtermittel- und 33 % auf die Nahrungsmittelproduktion. Weitere 22 % flossen in die energetische und industrielle Nutzung.

2.1.2 Ansprüche an die Nährstoffversorgung und Düngung

Nach HANUS ET AL. (2008) besitzt Weizen aufgrund der hohen Trockenmassebildung und seiner Ertragsleistung von allen Getreidearten den höchsten Nährstoffbedarf. Neben der optimalen Versorgung mit den Makronährstoffen kommt dem Kalkversorgungszustand des Bodens sowie der ausreichenden Mikronährstoffversorgung der Pflanzen Bedeutung zu (TLL, 2015).

Die untenstehende Abbildung 1 von AGROSCOPE (2017, a) veranschaulicht die Aufnahme der Nährstoffe Stickstoff, Phosphor, Kalium und Schwefel in Abhängigkeit des physiologischen Entwicklungsstadiums des Weizens. Dabei wird ein Ertrag von 60 dt/ha unterstellt. Je nach Nährstoff wird eine unterschiedliche Dynamik der Aufnahme deutlich. Die Aufnahme von Kalium, das in großen Mengen in den Blättern vorkommt, nimmt frühzeitig in der Pflanzenentwicklung zu und verlangsamt sich dann während der Kornfüllung und Kornreifung. Im Gegensatz dazu werden Stickstoff, Phosphor und Schwefel über das gesamte Wachstum regelmäßig aufgenommen (AGROSCOPE, 2017, a).

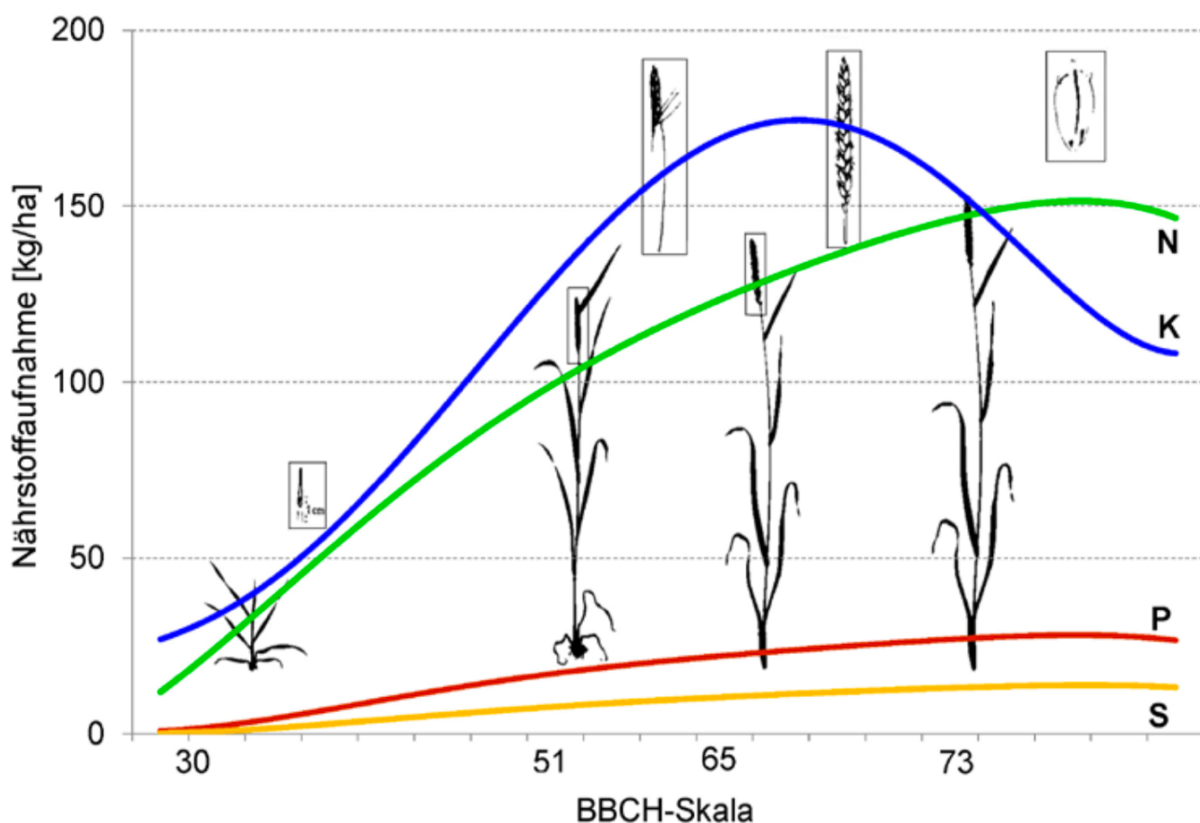


Abbildung 1: Aufnahme der Nährstoffe N, P, K und S durch die Weizenkultur (ganze Pflanze) auf der Grundlage eines Ertrages von 60 dt/ha und in Abhängigkeit des physiologischen Entwicklungsstadiums der Pflanze (AGROSCOPE, 2017, a, S.4)

Grundsätzlich erfolgt die Ermittlung des Nährstoffbedarfs für einen bestimmten Ertrag auf der Basis verschiedener Standort- und Einflussfaktoren und im Besonderen auf der Basis von Bodenuntersuchungsergebnissen. Das Prinzip der Grunddüngung besteht mittelfristig im Ersatz des Nährstoffentzuges bzw. der Nährstoffabfuhr mit dem Erntegut des Feldes. Der Nährstoffentzug des Winterweizens ist in der untenstehenden Tabelle 1 veranschaulicht (TLL, 2015).

Tabelle 1: Nährstoffentzug von Winterweizen in kg/dt Frischmasse, d.h. bei 86 % TS (TLL, 2015), modifiziert

Nährstoff		Korn	Stroh	Korn und Stroh ¹⁾
N	11 % Rohprotein ²⁾	1,66	0,50	2,06
	12 % Rohprotein ²⁾	1,81	0,50	2,21
	13 % Rohprotein ²⁾	1,96	0,50	2,36
	14 % Rohprotein ²⁾	2,11	0,50	2,51
	15 % Rohprotein ²⁾	2,26	0,50	2,66
	16 % Rohprotein ²⁾	2,41	0,50	2,81
P / P₂O₅		0,35 / 0,80	0,13 / 0,30	0,45 / 1,04
K / K₂O		0,50 / 0,60	1,16 / 1,40	1,43 / 1,72
Mg / MgO		0,12 / 0,20	0,12 / 0,20	0,22 / 0,36
1) Rechnerischer Wert für Haupternteprodukt inkl. Nebenernteprodukt, unterstelltes Masseverhältnis von Korn : Stroh = 1 : 0,8				
2) Gehalt in der Korntrockenmasse				

Nach Angaben der K+S MINERALS AND AGRICULTURE GMBH (2024) muss für eine zielgerichtete Düngung bei einer Bodenversorgung in der anzustrebenden Gehaltsklasse C dem Acker mindestens dieser Nährstoffentzug zugeführt werden. Zudem ist die Grunddüngung so zu bemessen, dass die Verluste im Boden durch Auswaschung oder Fixierung ausgeglichen werden. Die TLL (2015) betont allerdings, dass Winterweizen bei vorliegendem Grunddüngerbedarf häufig nicht besonders zu berücksichtigen ist. Das bedeutet, dass die Nährstoffzufuhr auch zur Vorfrucht als Vorratsdüngung zu Winterweizen erfolgen kann. Bei sehr niedriger bis niedriger Phosphorversorgung des Bodens ist eine Düngung mit Phosphor vorteilhaft (TLL, 2015).

Nach DIEPENBROCK ET AL. (2016) ist die Handhabung der Stickstoffdüngung allerdings von ertragsentscheidender Bedeutung. Die Pflanzenbestände decken ihren Stickstoffbedarf aus verschiedenen Quellen. Dazu zählen der Stickstoffgehalt des Bodens zu Vegetationsbeginn (N_{\min} -Gehalt), die Stickstoffnachlieferung aus dem Bodenvorrat während der Vegetationsperiode sowie der mineralischen und organischen Stickstoffdüngung. Bei der Ermittlung des Stickstoff-Düngebedarfs muss der Beitrag des Bodenstickstoffs möglichst genau abgeschätzt werden, da nur die verbleibende Differenz gedüngt werden muss. Auf diese Weise kann die Stickstoffdüngung bedarfsgerecht erfolgen, was sowohl ökonomisch sinnvoll als auch ökologisch unerlässlich ist. Die Düngeverordnung verlangt die Ermittlung des Stickstoff-Düngebedarfs für jeden Schlag bzw. jede Bewirtschaftungseinheit nach einer bundesweiten Berechnungsmethodik. Ausgangspunkt für die Ermittlung sind festgelegte Bedarfswerte, die in Abhängigkeit von der Kultur und des Ertrages angesetzt werden. Von diesem Ausgangswert werden bei der weiteren Berechnung Korrekturen in Form von Zu- und Abschlägen vorgenommen, sodass sich am Ende ein maximal erlaubter Stickstoff-Düngebedarfswert ergibt (LWK NORDRHEIN-WESTFALEN, 2025).

Zur Bestandesetablierung im Herbst bedarf es in der Regel keiner gesonderten Stickstoffzufuhr über organische oder mineralische Düngung für die Pflanzen. Der geringe Bedarf wird zu diesem Zeitpunkt allgemein durch den N_{\min} -Gehalt des Bodens und die Stickstoffnachwirkung der Vorfrucht abgedeckt (TLL, 2015). Zudem werden die Möglichkeiten einer

Stickstoffdüngung im Herbst nach Angaben der LWK NORDRHEIN-WESTFALEN (2025) durch die Düngeverordnung stark eingeschränkt.

Die Zeitpunkte und die Aufteilung der Stickstoffgaben im Frühjahr werden in Abhängigkeit des Standortes und des Produktionsziels festgelegt (TLL, 2015). Grundsätzlich lassen sich Startgabe, Schossergabe und Spätgabe unterscheiden. Die LWK SCHLESWIG-HOLSTEIN (o.J.) verortet die Startgabe zum Zeitpunkt des Vegetationsbeginns mit 35 bis 40 %, die Schossergabe in BBCH 30 bis 32 ebenfalls mit 35 bis 40 % und die Spätgabe in BBCH 39 bis 47 mit 20 bis 30 % der gesamten Stickstoffmenge. Die Startgabe ist stark abhängig vom Bestand im Frühjahr und verfolgt das Ziel, ausreichend kräftige Triebe zu erzeugen. Die Schossergabe dient dazu, die Triebe erster und zweiter Ordnung zu fördern und die Kornzahl pro Ähre abzusichern. Mit der Spätgabe sollen hohe Erträge und hohe Proteinwerte bewirkt werden. Dabei fördert eine frühe Spätgabe in BBCH 39 bis 49 die Kornfüllung, während eine späte Spätgabe die Qualität verbessert (YARA, o.J., a).

Auch der Versorgung der Pflanze mit Schwefel sollte besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden, da dieser nachweislich die Ausnutzung von Stickstoff verbessert. Besonders auf leichteren Standorten und nach dem Anbau von Getreide oder stark zehrenden Kulturen wie Silomais oder Zuckerrübe konnten in jüngster Zeit immer häufiger positive Effekte einer Schwefeldüngung zu Winterweizen beobachtet werden (LWK NORDRHEIN-WESTFALEN, 2025). Nach SCHÖNBERGER (2024) liegt die Schwefelaufnahme von Getreide bei 25 bis 45 kg/ha (angenommenes Ertragsniveau von 70 bis 100 dt/ha). Daraus wird bei einer Ausnutzung des Angebotes von 60 % ein Schwefelbedarf von 40 bis 70 kg/ha abgeleitet.

Bei der Schwefelernährung der Kulturpflanzen spielt die Nachlieferung aus dem Bodenvorrat eine entscheidende Rolle. Diese wird durch verschiedene Faktoren, wie die Bodengüte, den Humusgehalt, die Winterwitterung, das Ertragsniveau sowie die organische und mineralische Düngung beeinflusst (LWK NORDRHEIN-WESTFALEN, 2025). Laut SKW STICKSTOFFWERKE PIESTERITZ GMBH (2022) ist die Schwefelversorgung allerdings so weit zurückgegangen, dass sie nur noch auf den wenigsten Standorten aus dem Bodenvorrat gedeckt werden kann.

Zur Bemessung der Schwefeldüngung wird vorzugsweise eine Bodenuntersuchung im Frühjahr oder gegebenenfalls eine Pflanzenanalyse vom schossenden Pflanzenbestand empfohlen (TLL, 2015). Grundsätzlich liegt der Schwefeldüngebedarf des Winterweizens nach Angaben der LWK NORDRHEIN-WESTFALEN (2025), abhängig von der Fruchtfolge und der Bodenart, zwischen 15 und 20 kg/ha Schwefel. Auch die N.U. AGRAR GMBH (2024) bestätigt gängige Düngemengen von 20 kg/ha Schwefel im Getreide, stellt sich jedoch vor dem Hintergrund abnehmender Schwefeleinträge und sinkenden S_{\min} -Gehalten im Boden auch die Frage, ob diese Mengen noch ausreichend sind. Die TLL (2015) empfiehlt hingegen bei S_{\min} -Gehalten unter 40 kg/ha eine Schwefeldüngung von 20 bis 30 kg/ha Schwefel.

Die obenstehende Abbildung 1 hat bereits gezeigt, dass die Aufnahme von Schwefel parallel zur Stickstoff-Aufnahme abläuft. Aus diesem Grund ist es zu empfehlen, die Schwefel-Gabe möglichst mit der ersten oder zweiten Stickstoff-Gabe zu bringen. Um den Proteingehalt beim Qualitätsweizenanbau zu verbessern, kann eine zusätzliche Schwefel-Düngung zur Spätgabe erfolgen. Es bieten sich Düngemittel in Sulfatform an, da diese Form direkt pflanzenverfügbar

ist (YARA, o.J., a). Auch die TLL (2015) empfiehlt die Schwefeldüngung im Zuge der Stickstoff-Startgabe über sulfathaltige Stickstoff- und Mehrnährstoffdünger.

Der optimale pH-Wert für Weizen liegt in einem Bereich bis 6,0 auf lehmigem Sand, bis 6,5 auf sandigem Lehm und bis 7,0 auf Lehm-/Tonböden. Zu niedrige pH-Werte begünstigen die Festlegung von Phosphor, Bor und Molybdän sowie die Freisetzung von Aluminium-Ionen, die für Pflanzen schädigend sind. Im Gegensatz dazu fördern überzogene pH-Werte wiederum die Festlegung von Phosphor und Bor sowie Kupfer, Zink und Mangan (ICL, o.J.). Bei Bedarf kann direkt zu Winterweizen gekalkt werden, falls nicht noch kalkbedürftigere Pflanzen, wie Gerste, Rüben, Mais, Klee oder Luzerne, in der Fruchtfolge stehen (TLL, 2015).

Wie bereits erwähnt, ist die Versorgung des Weizens mit Mikronährstoffen unerlässlich. Diese greifen umfassend in Enzymprozesse des Energie- und Stoffhaushaltes der Pflanze ein. Ein Mangel führt zu Ertragseinbußen, Qualitätsverlusten und einem höheren Krankheitsdruck. Winterweizen weist einen hohen Bedarf an Mangan (Entzug 800 g/ha), Zink (Entzug 600 g/ha) und Kupfer (Entzug 90 g/ha) auf. Die Verfügbarkeit der Mikronährstoffe kann durch Nährstoffantagonismen, langanhaltende Trockenheit oder zu hohe pH-Werte begrenzt werden (YARA, 2010). Laut TLL (2015) sollte die Düngung der Mikronährstoffe nur auf der Basis vorliegender Boden- bzw. Pflanzenanalyseergebnisse bei Unterschreitung der entsprechenden Werte erfolgen. Nach YARA (o.J., a) sollte im Frühjahr zum BBCH 25-37 über kulturspezifische Blattdünger gedüngt werden. Bei früh gesättem Weizen ist aber auch im Herbst ab BBCH 12 eine Düngung mit Mikronährstoffen möglich (YARA, o.J., a).

2.1.3 Ertrags- und Qualitätsparameter

Seit den 1950er Jahren sind die Hektarerträge des Winterweizens deutlich gestiegen. Im Vergleich der 10-Jahres-Zeiträume 1950 bis 1959 und 2011 bis 2020 sind die durchschnittlichen Hektarerträge um 165 Prozent gewachsen. Die Gründe für diese Entwicklungen sind unter anderem in dem Fortschritt der Züchtung, der Düngung, des Pflanzenschutzes sowie der Landtechnik zu finden (BLE, 2020).

Die untenstehende Abbildung 2 basiert auf Angaben des STATISTISCHEN BUNDESAMTES (2025) und veranschaulicht den durchschnittlichen Ertrag von Winterweizen im Zeitraum 1990 bis 2025. Nach vorläufigen Angaben beläuft sich der durchschnittliche Ertrag von Winterweizen im Jahr 2025 in Deutschland auf 73,5 dt/ha. Dies bedeutet einen Anstieg von 1,8 dt/ha zum Vorjahr 2024. Die Abbildung 2 zeigt aber auch, dass der durchschnittliche Ertrag nicht stetig wächst, sondern zwischen den Jahren schwankt. Während im Jahr 2015 ein durchschnittlicher Ertrag von 86,8 dt/ha erreicht werden konnte, wurde nur drei Jahre später ein Ertrag von 67,7 dt/ha verzeichnet (STATISTISCHES BUNDESAMTES, 2025).

Diese Schwankungen lassen sich durch die zahlreichen Einflüsse auf den Weizenertrag begründen. Die Ertragshöhe ist stark witterungsabhängig. Dabei können zum Beispiel die Dauer der Vegetationsperiode, die Temperatur, der Niederschlag und Extremwetterereignisse Einfluss auf die Erträge nehmen. Darüber hinaus können auch züchterische und technische Aspekte, wie Sortenwahl, Aussaatbedingungen, Pflegemaßnahmen, Düngung und Pflanzenschutz, Auswirkungen auf die Ertragshöhe haben (HLNUG, 2025).

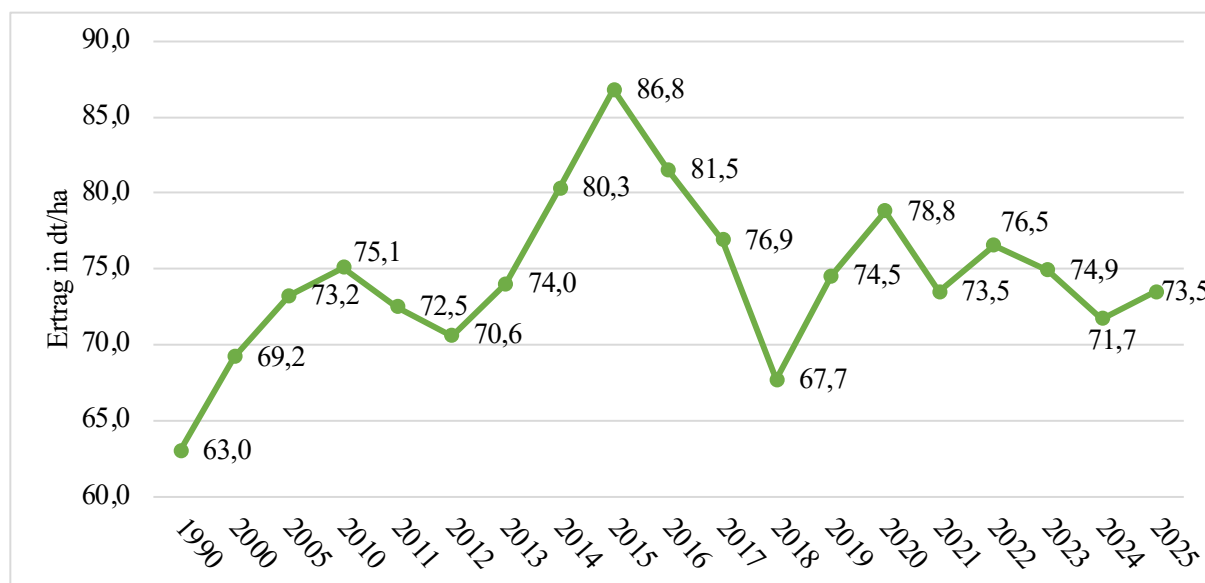


Abbildung 2: Durchschnittlicher Ertrag von Winterweizen in dt/ha im Zeitraum 1990 bis 2025 (nach STATISTISCHES BUNDESAMT, 2025), modifiziert

Nach KROPF UND SCHÖNBERGER (2021) setzt sich die Ertragsstruktur des Getreides aus den Ertragsparametern Pflanzenzahl je Quadratmeter, Zahl der Ähren je Pflanze, Anzahl der Körner je Ähre und dem Tausendkorngewicht zusammen. Die untenstehende Tabelle 2 nach KROPF UND SCHÖNBERGER (2021) ordnet die wichtigsten Werte genauer ein.

Tabelle 2: Ertragsstruktur des Winterweizens (KROPF UND SCHÖNBERGER, 2021), modifiziert

Pflanzen je m ²	Ähren je m ²	Körner je Ähre	Körner je m ²	TKG (g)	Einzelähren-ertrag (g)
150 - 350	450 - 600	36 - 50	15.000 - 25.000	38 - 60	1,6 – 2,5

Der Ertragsaufbau ist über die verschiedenen Sorten genetisch verankert und wird durch den Hormonhaushalt gesteuert. Da jeder produktionstechnische Eingriff den Hormonstatus der Pflanze beeinflusst, muss die Bestandesführung darauf ausgerichtet sein, die sortenspezifischen Ertragsanlagen zu fördern (N.U. AGRAR GMBH, 2015). In Abhängigkeit der Reaktion der Ertragsparameter auf Faktoren wie Aussaatzeitpunkt, Vorwinterentwicklung, Vegetationsbeginn, Trockenstress und Abreifebedingungen lassen sich die Sorten in vier verschiedene Ertragstypen einteilen (LIMAGRAIN, 2019).

Für die Ausschöpfung des Ertragsvermögens des Einzelährentyps ist die Realisierung hoher Einzelährengewichte über hohe TKG und überdurchschnittliche Kornzahlen je Ähre bei geringen bis mittleren Ährenzahlen wesentlich. Der Korndichtetyp zeichnet sich durch hohe Kornzahlen pro Quadratmeter aus. Dies wird durch überdurchschnittliche Bestandesdichten und hohe Kornzahlen je Ähre erreicht. Gegenüber allen anderen Typen ist der Ertragsaufbau des Bestandesdichtetypen eng mit der Realisierung hoher Ährenzahlen pro Quadratmeter verknüpft. Die Kornzahl je Ähre ist hier meist unterdurchschnittlich und die Kornausbildung ist in der Regel durch ein stabiles TKG gekennzeichnet. Der Kompensationstyp wird als flexibelster Ertragstyp bezeichnet, da er die Schwäche eines Ertragsparameters durch eine bessere Ausbildung eines anderen weitestgehend kompensieren kann (LIMAGRAIN, 2019).

Hinsichtlich der qualitativen Bewertung des Weizens bedient man sich sowohl direkten technologischen Qualitätsgrößen als auch indirekten Qualitätsparametern. Die direkten technologischen Qualitätsgrößen beziehen sich auf die Vermahlungs- und Backeigenschaften einer Handelspartie und spielen bei der Preisbildung eine untergeordnete Rolle oder werden von der allgemeinen Sortenbeschreibung abgeleitet. Im Gegensatz dazu kommen die indirekten Qualitätsparameter bei der Bewertung der Getreidepartien zwischen Landwirt und Aufkäufer zum Tragen. Dazu zählen der Rohproteingehalt, der Sedimentationswert, die Fallzahl, das Hektolitergewicht und der Feuchtigkeitsgehalt (MEYER, 2011).

Der Rohproteingehalt wird aus dem Stickstoffgehalt des Kornmaterials multipliziert mit dem Faktor 5,7 ermittelt (DIEPENBROCK ET AL., 2016). Ein hoher Rohproteingehalt wirkt sich positiv auf die Backeigenschaften aus. Er kann in hohem Maße durch das Klima, den Boden, die Sorte und die Düngung, besonders mit Stickstoff, beeinflusst werden. In der Regel werden für E-Weizen mehr als 14 % i.TM, für A-Weizen mehr als 13 % i.TM und für B-Weizen mehr als 12 % i.TM gefordert (RAIFFEISEN, o.J.).

Der Rohproteingehalt ist eng mit dem Klebergehalt korreliert, der die im Mehl auswaschbaren Proteine bezeichnet. Klebermenge und Kleberqualität bestimmen das Quell- und Gashaltvermögen sowie die Elastizität und die Wasseraufnahme des Teiges (DIEPENBROCK ET AL., 2016). Je höher der Klebergehalt und je besser seine Beschaffenheit, desto größer ist die Teigausschüttung und das zu erwartende Gebäckvolumen. Für Brotweizen sollte ein Klebergehalt von 28 % und für Qualitätsweizen von 30 % überschritten werden. Während die Klebermenge maßgeblich von der Stickstoffdüngung und der Umwelt bestimmt wird, ist die Kleberqualität sortenabhängig und spiegelt sich in der Zusammensetzung der hochmolekularen Gluteningfraktionen bzw. in der Höhe des Sedimentationswertes wider (HÜSKEN, 2020).

Der Sedimentationswert ist ein Maß für die Quellfähigkeit der Kleberproteine und korreliert sowohl mit dem Proteingehalt als auch mit dem Backvolumen (ROEB, 2023). Beim Sedimentationswert nach Zeleny wird das Volumen des Bodensatzes einer Mehlaufschwemmung in Milchsäure bestimmt (DIEPENBROCK ET AL., 2016). RAIFFEISEN (o.J.) gibt eine Spanne der Sedimentationswerte von 8 ml bei kleberarmen Mehlen mit niedrigem Proteingehalt und 78 ml bei kleberstarken Mehlen mit sehr hohem Proteingehalt an. Demnach führen sowohl ein höherer Klebergehalt als auch eine bessere Kleberqualität zu einer langsameren Sedimentation und folglich zu höheren Sedimentationswerten. Laut BUNDESSORTENAMT (2024) sollte der Sedimentationswert für A-Weizen mindestens zwischen 30 und 36 ml liegen.

Die Fallzahl charakterisiert die Struktur und die Beschädigung der in das Reservegewebe eingelagerten Stärke. Bei der Methode nach Hagberg wird mittels eines Fallstabes in einem Mehkleister die Viskositätsabnahme der Weizenpartie bestimmt (DIEPENBROCK ET AL., 2016). Mit Hilfe der Fallzahl lassen sich Rückschlüsse auf den Polymerisationsgrad der Inhaltsstoffe, den enzymatischen Zustand der Probe, das zu erwartende Backvolumen sowie den Auswuchsgrad ziehen. Die Fallzahl wird besonders durch die Witterung im Reife- und Erntezeitraum beeinflusst. Der Handel verlangt Fallzahlen von 220 Sekunden (RAIFFEISEN, o.J.). Nach DIEPENBROCK ET AL. (2016) kennzeichnen Werte von weniger als 100 Sekunden stark auswuchsgeschädigte Partien und Werte über 300 Sekunden eine Triebarmut des Teiges.

Das Hektolitergewicht wird definiert als Korngewicht, das ein bestimmtes Volumen füllt. Es ergibt sich aus der Korndichte und der Kornform. Besonders die Umweltfaktoren, wie dauerhaft hohe Temperaturen während der Kornfüllungsphase, Niederschläge vor der Ernte oder ein hoher Krankheitsdruck, können Einfluss auf das Hektolitergewicht nehmen. Aber auch die Genetik lässt das Hektolitergewicht über die Kornform schwanken (KLEIJER, 2007). Nach ROEB (2023) wird für A-Weizen ein Hektolitergewicht von mehr als 77 kg und für B-Weizen von mehr als 76 kg gefordert. Auch wenn das Hektolitergewicht die Mahl- und Backeigenschaften nur geringfügig beeinflusst, wird es im Handel als wichtiges Qualitätskriterium bewertet.

Darüber hinaus wird allgemein für Getreide eine Kornfeuchte von $< 14,5\%$ gefordert. Zudem sollten Bruch- und Schmachtkorn zu $< 5,0\%$, Fremdstoffe zu $< 2,0\%$ sowie Fremdgetreide und Auswuchs zu $< 2,0\%$ enthalten sein (ROEB, 2023).

Nach ROEB (2023) lassen sich die Qualitätsparameter insgesamt besonders durch den Standort, die Sortenwahl sowie die Kulturführung beeinflussen. Laut K+S MINERALS AND AGRICULTURE GMBH (2024) spielt besonders die Düngung eine entscheidende Rolle. Die untenstehende Tabelle 3 zeigt, dass sowohl Stickstoff als auch Phosphor, Kalium, Magnesium und Schwefel sowie zunehmend auch Mikronährstoffe einen Einfluss auf den Ertrag und die Ausprägung verschiedener Qualitätsparameter haben.

Tabelle 3: Beeinflussung des Ertrags und verschiedener Qualitätsparameter von Getreide durch Makronährstoffe (K+S MINERALS AND AGRICULTURE, 2024), modifiziert

	Stickstoff	Phosphor	Kalium	Magnesium	Schwefel
Ertrag	+++	++	++	++	++
Protein	+++	+	++	++	++
Sedimentationswert	++		++	++	++
Tausendkorngewicht	++	+	++	++	+
Hektoliter-Gewicht	++	+	++	++	+
+ = von Bedeutung ++ = wichtig +++ = sehr wichtig					

2.2 Schwefel

2.2.1 Grundlagen

Schwefel ist im „Periodensystem der Elemente“ mit der Ordnungszahl 16 versehen und wird den Nichtmetallen zugeordnet. Die relative Atommasse beträgt 32,06 amu. Reiner Schwefel weist bei Raumtemperatur eine zitronengelbe Farbe und einen leicht die Atemwege reizenden, charakteristischen Geruch auf. Sowohl die Wärmeleitfähigkeit als auch die elektrische Leitfähigkeit gelten als schlecht. Schwefel ist nicht löslich in Wasser (SEILNACHT, o.J.).

Schwefel kommt teils frei, teils chemisch gebunden in Sulfiden und Sulfaten vor. In gebundener Form ist Schwefel als Bestandteil zahlreicher Eiweißstoffe für alle höheren Organismen lebensnotwendig (SCHRÖTER ET AL., 2002). Schwefel gilt als wichtiger Rohstoff in der chemischen und pharmazeutischen Industrie. Ein großer Anteil des Schwefels wird zur Herstellung von Schwefelsäure und damit zur Herstellung von Düngemitteln eingesetzt (SEILNACHT, o.J.).

Pflanzennährstoffe sind alle die chemischen Elemente, die für das Wachstum und die Entwicklung der Pflanze notwendig sind, und die in ihrer Funktion von keinem anderen chemischen Element ersetzt werden können. Sie werden fast ausschließlich als Ionen oder ungeladene anorganische Moleküle aufgenommen. Um ein Element als Pflanzennährstoff einstufen zu können, müssen allerdings drei Kriterien erfüllt sein: Bei einem Mangel kann die Pflanze ihren Lebenszyklus nicht beenden, der Mangel ist für das betreffende Element spezifisch und es muss mindestens eine spezifische Funktion des Elementes in der Pflanze nachgewiesen sein. Schwefel kann alle drei Kriterien erfüllen und wird deshalb als Pflanzennährstoff anerkannt. Zudem zählt Schwefel zu den Makronährstoffen, da es in einer Menge von mehr als 0,5 g/kg TM von der Pflanze benötigt wird (SCHUBERT, 2018).

Neben der Einteilung der Pflanzennährstoffe nach ihrem mengenmäßigen Vorkommen in der Pflanze ist außerdem eine Unterscheidung nach den physiologischen Eigenschaften und Funktionen der Elemente möglich. Auch wenn eine Zuordnung im Einzelfall nicht immer eindeutig ist, kann eine grobe Einteilung in vier Gruppen erfolgen. SCHUBERT (2018) unterscheidet assimilierte Nährstoffe, Ester bildende Nährstoffe, freie und sorbierte Nährstoffe sowie Nährstoffe in prosthetischen Gruppen.

Neben Kohlenstoff, Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff wird Schwefel dabei der Gruppe der assimilierten Nährstoffe zugeordnet. Charakteristisch für diese Nährstoffgruppe ist, dass die Nährstoffe aus der Atmosphäre oder dem Boden aufgenommen und assimiliert werden müssen. Im Gegensatz zu einer einfachen Bindung des Nährstoffs setzt die Assimilation eine chemische Umwandlung voraus, die auf enzymatische Aktivitäten angewiesen ist und direkt oder indirekt mit einer Oxidation oder Reduktion in Verbindung steht. Schwefel kommt in der Pflanze sowohl in oxidiert als auch in reduzierter Form vor. Eine besondere Bedeutung kommt dem reduzierten Schwefel in der Thiolgruppe zu. Diese stellt in vielen Enzymen eine wichtige Komponente des katalytischen Zentrums dar. In oxidiert Form ist Schwefel in Sulfolipiden am Aufbau biologischer Membranen beteiligt (SCHUBERT, 2018).

2.2.2 Schwefelkreislauf

Ähnlich wie Kohlenstoff und Stickstoff durchläuft auch Schwefel einen Kreislauf, der durch Oxidations- und Reduktionsprozesse gekennzeichnet ist. Während die globalen jährlichen Stickstoff-Flüsse etwa drei Größenordnungen kleiner sind als die Kohlenstoff-Flüsse im Kohlenstoffkreislauf, sind die Schwefel-Flüsse im Schwefelkreislauf noch einmal eine Größenordnung kleiner als die Stickstoff-Flüsse im Stickstoffkreislauf (SCHUBERT, 2018). Die untenstehende Abbildung 3 der DLG (2012) veranschaulicht den Schwefelkreislauf im System Boden-Pflanze und die vielfältigen Umwandlungsprozesse des Schwefels.

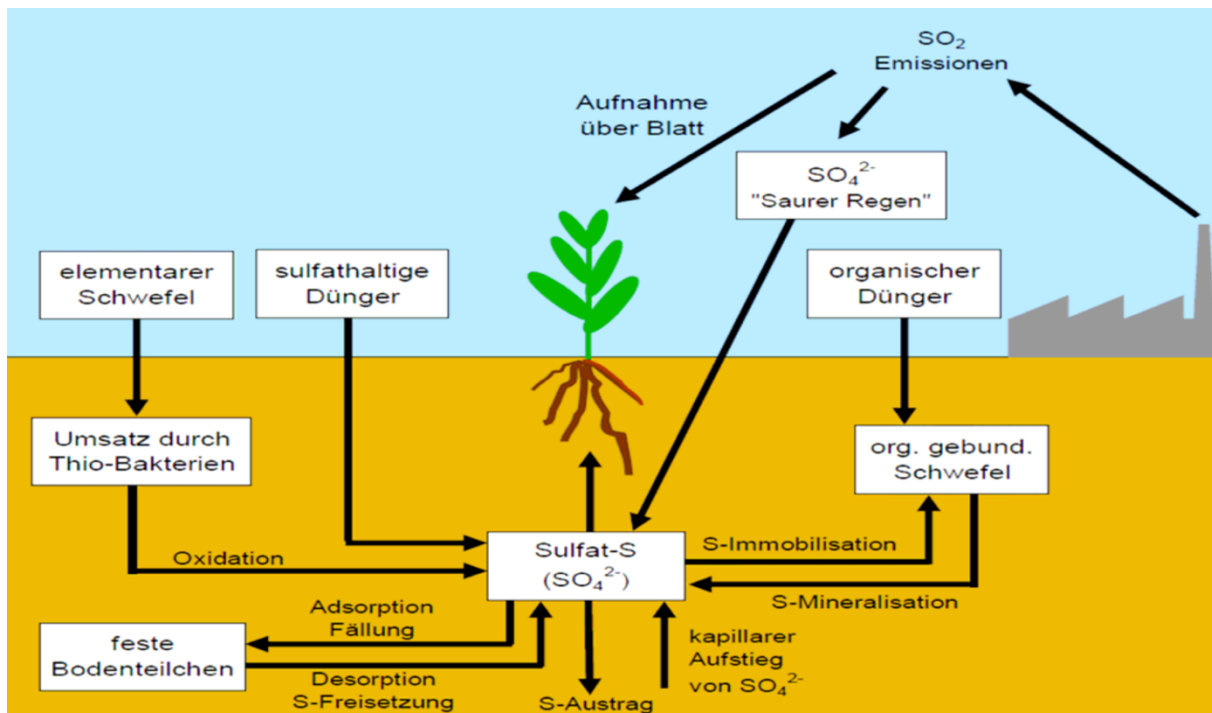


Abbildung 3: Schwefelkreislauf im System Boden-Pflanze (DLG, 2012)

Nach DLG (2012) enthalten Ackerböden in Abhängigkeit des Humusgehaltes zwischen 1.000 und 1.400 kg/ha Schwefel. Laut SCHERER UND WELP (2008) sind es allerdings lediglich 200 bis 1.000 kg/ha Schwefel. Der Schwefel im Boden setzt sich aus organischen und anorganischen Schwefel-Bindungsformen zusammen. Der Anteil des anorganisch gebundenen Schwefels liegt zwischen 2 und 40 %, in der Regel beträgt er allerdings weniger als 10 %. Innerhalb der anorganischen Fraktion stellt Sulfat die mengenmäßig bedeutendste Schwefelform dar. Sulfat kann sowohl frei in der Bodenlösung vorliegen als auch an Bodenteilchen gebunden vorkommen. Im Gegensatz dazu stellt der organisch gebundene Schwefel, der häufig 90 % des Gesamt-Schwefels ausmacht, die große Schwefel-Reserve der Böden dar. Auf Grund seiner Bedeutung für die Schwefel-Nachlieferung während der Vegetationsperiode muss diesem eine besondere Beachtung geschenkt werden (SCHERER UND WELP, 2008).

Der Schwefeleintrag in den Boden kann über verschiedene Wege erfolgen. Dazu zählen zum einen die Zufuhr über organisch gebundenen Schwefel in Form von Pflanzenresten, Wirtschaftsdüngern und anderen organischen Düngern und zum anderen die Zufuhr über Mineraldünger. Darüber hinaus war der Schwefeleintrag über den sogenannten „sauren Regen“ lange Zeit von Bedeutung (DLG, 2012).

„Saurer Regen“ entsteht hauptsächlich, wenn ausgestoßene Schadgase, wie das Schwefeldioxid, mit Wassermolekülen in der Atmosphäre reagieren. Über die Bildung Schwefliger Säure tragen die Schwefeloxide ausschlaggebend zur Versauerung des Regens bei (REITHMEIER UND SCHREINER, o.J.). Nach SCHUBERT (2018) sind gegenwärtig mehr als zwei Drittel der Schwefelgas-Immissionen in die Atmosphäre anthropogenen Ursprungs. Davon entstehen 90 % allein auf der Nordhalbkugel. Als wichtigste Quelle für Schwefeldioxid gilt die Verbrennung fossiler Brennstoffe. In geringen Mengen wird Schwefeldioxid und Schwefelwasserstoff auch in der Natur durch Vulkane, Sümpfe und Moore freigesetzt (SCHUBERT, 2018).

Seit den 1970er und 1980er Jahren ist man durch die Verbesserung der Gesetzgebung zum Umweltschutz bemüht, die Schwefeldioxid-Emissionen zu reduzieren. In Deutschland ist in diesem Zusammenhang beispielsweise die Technische Anleitung für die Reinerhaltung der Luft aus dem Jahr 1986 zu nennen. Neben gesundheitlichen Aspekten sollten auf dieser Weise Säureeinträge in sensible Ökosysteme, wie Wälder oder Seen, reduziert werden (SCHUBERT, 2018). Nach Angaben des UBA (2025) ist von 1990 bis 2023 ein Rückgang der Schwefeldioxid-Emissionen von 5,5 auf 0,22 Millionen Tonnen (- 96 %) zu verzeichnen. Nach SCHÖNBERGER (2024) entspricht dies einem Rückgang des Lufteintrages von früher 65 bis 100 kg S/ha auf heute unter 3 kg S/ha.

Die Pflanze ist in der Lage, Schwefel gasförmig als Schwefeldioxid oder Schwefeltrioxid über das Blatt aufzunehmen. Theoretisch können so 50 bis 70 % des Pflanzenbedarfs aus der Luft abgedeckt werden. Bei Gehalten von mehr als 1 mg Schwefeldioxid je Kubikmeter Luft können jedoch Pflanzenschäden entstehen (IVA, 2024). Nach SCHILLING (2000) verläuft die Schwefelaufnahme allerdings hauptsächlich durch die Wurzeln in Form von Sulfat-Ionen als aktiver Transport gegen einen elektrochemischen Gradienten. Die Konzentration der gelösten Sulfat-Ionen im Boden ist neben dem Eintrag mit den Niederschlägen von der Löslichkeit der Schwefel-haltigen Mineraldünger und von der mikrobiell bedingten Mineralisation organischer Verbindungen abhängig. Auch hoch anstehendes Grundwasser und kapillar aufsteigendes Wasser kann zur Sulfat-Versorgung der Pflanzen beitragen (DLG, 2012). Laut SCHERER UND WELP (2008) wird die Sulfat-Konzentration im Boden außerdem von den Bodeneigenschaften, der Bewirtschaftungsart sowie jahreszeitlichen Einflüssen, wie der Auswaschung oder dem Entzug durch angebaute Pflanzen, beeinflusst.

Organische Bindungsformen müssen über die Mineralisation erst in die Sulfat-Form überführt werden, bevor der in ihnen enthaltene Schwefel von den Pflanzen genutzt werden kann (SCHERER UND WELP, 2008). Nach DLG (2012) liegt die Schwefel-Mineralisation in einer Größenordnung von 10 kg/ha Schwefel im Laufe eines Jahres und ist stark abhängig von den Standort- und Mineralisationsbedingungen. Laut SCHERER UND WELP (2008) zählen dazu zahlreiche Faktoren, die die Aktivität der Mikroorganismen beeinflussen, wie zum Beispiel Temperatur, Bodenfeuchte und pH-Wert, aber auch die Zufuhr kohlenstoffreicher Verbindungen. Neben den Sulfaten (aus oxidiertem Schwefel) entstehen bei der Mineralisation des organischen Schwefels auch Sulfide (aus reduziertem Schwefel). Während die Sulfate für die Pflanzen verfügbar sind, können die Sulfide mit Zink und Eisen ausgefällt werden und sind als Sphalerit (ZnS) und Pyrit (FeS) nicht pflanzenverfügbar (SCHUBERT, 2018).

Neben der Freisetzung von Schwefel aus der organischen Substanz kann es auch zur Festlegung von Schwefel kommen. Bei der biologischen Immobilisierung nehmen Mikroorganismen Sulfat auf und bauen es in organische Substanzen ein. Die Immobilisierungsrate ist in hohem Maße von der Dichte der Mikroorganismen, der Zusammensetzung der organischen Substanz sowie dem Verhältnis von Kohlenstoff und Schwefel abhängig (SCHERER UND WELP, 2008).

Ähnlich wie der organisch gebundene Schwefel muss auch der elementare Schwefel aus Düngemitteln erst umgewandelt werden, um für die Pflanzen verfügbar zu werden. Unter aeroben Bedingungen wird elementarer Schwefel zu Sulfat oxidiert. Dieser Prozess wird als Sulfurikation bezeichnet und dient farblosen Schwefelbakterien (z.B. *Thiobacillus*, *Beggiatoa*) der Energiegewinnung. Es handelt sich um einen der Nitrifikation analogen Vorgang. Unter hohen Schwefelkonzentrationen im Boden und aeroben Verhältnissen können diese Organismen stark zur Bodenversauerung beitragen, da bei der Umwandlung Wasserstoff-Ionen freigesetzt werden (SCHUBERT, 2018). Nach BRUCKNER UND MACK (2025) ist die Aktivität der Schwefelbakterien besonders von der Temperatur und der Feuchtigkeit abhängig.

Umgekehrt kann Sulfat unter anaeroben Bedingungen zu Schwefelwasserstoff reduziert werden. Dieser der Denitrifikation analoge Prozess wird als Desulfurikation bezeichnet. Bakterien der Gattung *Desulfovibrio* nutzen die Sulfat-Ionen als Elektronenakzeptor in ihrer Atmungskette. Darüber hinaus kann auch elementarer Schwefel unter anaeroben Bedingungen zu Schwefelwasserstoff reduziert werden. Einige photoautotrophe Bakterien, wie die grünen Schwefelbakterien (*Chlorobiaceae*) und Purpurbakterien (*Rhodospirillaceae*), können Schwefelwasserstoff anstelle von Wasser als Elektronenquelle für die Photosynthese nutzen. In diesem Zusammenhang wird der Schwefelwasserstoff zu elementarem Schwefel oxidiert. Auf der anderen Seite kann der gasförmige Schwefelwasserstoff auch aus dem Boden entweichen, sodass volatile Schwefel-Verluste entstehen (SCHUBERT, 2018).

Ähnlich wie Nitrat ist auch Sulfat im Boden sehr mobil. Insbesondere in den Herbst- und Wintermonaten muss aus diesem Grund mit einer Verlagerung von Sulfat-Schwefel aus dem durchwurzelten Bodenraum gerechnet werden. Der Umfang dieser Auswaschung ist abhängig von der Bodenart und der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens, von der Niederschlagshöhe und von der Aufnahme der Pflanzen. Während der Vegetationszeit spielt die Auswaschung in der Regel eine untergeordnete Rolle, da durch den Wasserverbrauch der Pflanzenbestände kaum Sickerwasser entsteht (DLG, 2012).

2.2.3 Funktionen in der Pflanze und Ernährungsstörungen

Nach der Aufnahme in die Pflanze wird der Schwefel zunächst als Sulfat-Ion im Xylem mit dem Transpirationsstrom transportiert. Die rasche Bildung organischer Schwefelverbindungen ruft zudem eine erhöhte Phloembeweglichkeit hervor (SCHILLING, 2000).

Laut IVA (2024) benötigt die Pflanze Schwefel für vielfältige Funktionen, besonders im Eiweiß-, Fett- und Kohlenhydratstoffwechsel. Nach SCHILLING (2000) sind die Funktionen des Schwefels an die mannigfaltigen Veränderungen seiner Bindungsformen im Stoffwechsel gebunden. Ebenso wie der in Nitratform aufgenommene Stickstoff muss auch der Sulfat-schwefel erst reduziert und in eine physiologisch wirksame Form überführt werden, bevor er als Baustein verschiedener wichtiger organischer Verbindungen assimiliert wird. Im Gegensatz zum Stickstoff kann nicht benötigter Schwefel wieder zur Sulfatform aufoxidiert und so in eine

Speicherform überführt werden. Im Bedarfsfall kann die Schwefelreserve wiederum mobilisiert werden (BERGMANN, 1993).

Die Schwefel-Reduktion erfolgt fast ausschließlich in den Chloroplasten. Dies begründet sich durch den hohen Energieaufwand der Schwefel-Assimilation, der durch die photosynthetische Lichtreaktion in den Chloroplasten bedient werden kann (SCHUBERT, 2018). Im ersten Schritt der Schwefel-Assimilation wird das Sulfat durch ATP unter der Bildung von Adenosinphosphosulfat aktiviert. Nach weiterer Aktivierung durch ATP dient Adenosinphosphosulfat unter Bildung von Phosphoadenosinphosphosulfat der Erzeugung von Schwefelsäurederivaten, wie Glucosinolate, schwefelhaltigen Polysacchariden und Sulfolipiden. An das Adenosinphosphosulfat kann aber auch eine Reduktion unter Zuhilfenahme von Glutathion und Ferredoxin ansetzen, die zunächst zu Cystein führt. Von hier aus werden die weiteren, für den Pflanzenstoffwechsel essentiellen Schwefelverbindungen gebildet (SCHILLING, 2000).

Im pflanzlichen Metabolismus besteht eine enge Wechselwirkung von Schwefel und Stickstoff. Zusammen mit Stickstoff gilt Schwefel als wichtiger Baustein für den Aufbau von Aminosäuren und damit von Eiweiß. Etwa 90 % des Schwefels sind an Eiweißbausteine gebunden. Ein Mangel an Schwefel führt zur Hemmung der Proteinbiosynthese. In der Folge erhöht sich die Menge der löslichen Stickstoffverbindungen, zu denen auch Nitrat zählt. Aber auch Amide und weniger wertvolle Aminosäuren, wie zum Beispiel Alanin, Asparaginsäure und Glutaminsäure, reichern sich an. Schwefel spielt bei der Umwandlung des Nitrates eine entscheidende Rolle, da dieser auch für die Enzyme Nitrat- und Nitritreduktase benötigt wird. Fehlt die Nitrat-Umwandlung kommt es zum sogenannten Nitratstau. Der aufgenommene Stickstoff kann nicht mehr genutzt werden (IVA, 2024). THIEL UND CAKMAK (2016) gehen noch einen Schritt weiter und beschreiben, dass die Anreicherung der löslichen stickstoffhaltigen Bausteine im Pflanzengewebe ein negatives Feedback auslöst und in der Folge die Aufnahme weiteren Stickstoffs gehemmt wird.

Darüber hinaus ist Schwefel am Aufbau von Kohlenhydraten beteiligt und beeinflusst damit die Synthese von Stärke, Zucker und Geschmacksstoffen. Auch bei der Bildung wichtiger Vitamine, wie Biotin, Thiamin und Vitamin B, ist Schwefel unersetzlich. Bei Kreuzblütlern, wie Raps und Senf, und Liliengewächsen, wie Zwiebeln, Lauch und Knoblauch, wird Schwefel für die Bildung sekundärer Inhaltsstoffe, wie das Senföl oder Lauchöl benötigt (IVA, 2024).

In der Praxis haben sich einige Szenarien herausgestellt, in denen vermehrt mit Schwefelmangel zu rechnen ist. Dies gilt besonders für leichte, flachgründige, umsetzungsträge oder humusarme sorptionsschwache Böden. Eine warme und niederschlagsreiche Witterung im Herbst und Winter führt dazu, dass Schwefel aus der organischen Bodensubstanz mineralisiert und anschließend ausgewaschen wird. Auch nasse Witterung im Frühjahr mit vermindertem kapillarem Aufstieg von Bodenwasser in den Wurzelraum kann Schwefelmangel begünstigen. Darüber hinaus führt ein unzureichendes Wurzelwerk im Frühjahr generell zu einer unbefriedigenden Nährstoffaufnahme. Des Weiteren spielen Faktoren wie eine geringe organische Bodensubstanz, Strukturschäden, ein hoher Anteil Schwefel-zehrender Kulturen in der Fruchtfolge sowie eine Vernachlässigung der Schwefeldüngung in der Vergangenheit eine wichtige Rolle (IVA, 2024).

Bei einem Mangel an Schwefel sinkt der Chlorophyllgehalt in Folge einer verminderten Chloroplastenbildung. Die Pflanzen werden in ihrem Wachstum gehemmt und zeigen eine helle gelblich-grüne Färbung an den jüngeren Blättern, da Schwefel in einer Mangelsituation nicht aus alten Blättern in jüngere Pflanzenteile verlagert werden kann (IVA, 2024). BERGMANN (1993) ergänzt zudem speziell für die Familie der Gräser Symptome wie Starrtracht, eine schwache Bestockung, eine Verzögerung der Ähren-, Rispen-, Kolben- und Blütenbildung sowie Nekrosen bei starkem Schwefel-Mangel. In der Praxis wird Schwefelmangel aufgrund ähnlicher Symptome häufig mit Stickstoffmangel verwechselt. Allerdings kann der mobile Stickstoff, im Gegensatz zum Schwefel, in Mangelsituationen aus den älteren Blättern in die jüngeren Pflanzenteile verlagert werden (THIEL UND ÇAKMAK, 2016). Die untenstehende Abbildung 4 nach YARA (o.J., b) verdeutlicht die typischen Schwefelmangel-Symptome im Vergleich zu einem ausreichend mit Schwefel versorgten Weizen.



Abbildung 4: Ausreichend mit Schwefel versorgter Weizen (jeweils links) im Vergleich zu Schwefel-Mangel im Weizen (jeweils rechts) (YARA, o.J., b), modifiziert

Nach BERGMANN (1993) wird über Pflanzenschäden durch Schwefelüberschuss im Boden bisher nur selten berichtet. Bei Zitruspflanzen konnten Vergilbungen festgestellt werden, die sich vom Blattrand aus in die Interkostalflächen übergreifend ausbreiten. Die Früchte reifen vorzeitig ab. Andere Kulturen wie Zuckerrübe, Tomate, Baumwolle und Luzerne blieben in der Wuchshöhe zurück. Bei allen Pflanzen war die Blattgröße reduziert (BERGMANN, 1993). Im Gegensatz dazu ist ein Schwefelüberschuss in Gestalt einer Schwefeldioxid-Vergiftung von Bedeutung. Die Blätter verfärben sich gelb bis weißlich und in akuten Fällen treten Nekrosen auf. Als besonders empfindlich erweisen sich Nadelbäume, die ihre Nadeln als Reaktion auf die Überversorgung abwerfen (SCHILLING, 2000).

2.2.4 Düngemittel

Natürliches Vorkommen und Herstellungsverfahren

Schwefel macht in der Erdhülle einen Anteil von rund 0,05 Massenprozent aus. In der Natur kommt Schwefel in seiner elementaren Form in mächtigen Lagerstätten, beispielsweise auf Sizilien, in Polen, dem Irak, den USA und Mexiko, vor. Auch bei den vulkanischen Solfataren auf Island oder in Italien lagert sich Schwefel ab. Wichtige Minerale, die Schwefelverbindungen enthalten, sind beispielsweise Gips (Calciumsulfat) und Pyrit (Eisensulfid). Größere Schwefelmengen sind auch in den fossilen Brennstoffen Kohle, Erdöl und Erdgas enthalten (SEILNACHT, o.J.).

Schwefel ist die Hauptquelle für die Herstellung von Schwefelsäure, die als Zwischenprodukt in vielen Prozessen der chemischen und verarbeitenden Industrie eingesetzt wird. Besonders die Düngemittelindustrie nutzt die Schwefelsäure zur Herstellung von Phosphor-, Stickstoff-, Kalium- und Sulfatdüngern (TSI, o.J.).

Lange Zeit wurde elementarer Schwefel aus den natürlichen Lagerstätten nach dem im Jahre 1891 entwickelten Frasch-Verfahren gewonnen. Hierbei wird durch ein Rohr heißes Wasser unter Druck in das schwefelhaltige Gestein hineingedrückt. Der unterirdische Schwefel schmilzt und wird anschließend mit heißer Pressluft nach oben befördert (ZLOKARNIK, 2016; SEILNACHT, o.J.). Nach SEILNACHT (o.J.) wird dabei Schwefel mit einer Reinheit von 99,5 bis 99,8 % gewonnen. Aus wirtschaftlichen Gründen wurden viele mit dem Frasch-Verfahren arbeitenden Anlagen bereits stillgelegt (ZLOKARNIK, 2016).

Auch durch das Rösten von Pyrit kann Schwefel gewonnen werden. Beim Erhitzen des Erzes entsteht Schwefeldioxid, das anschließend mit Kohlenstoff oder Koks reduziert wird (SEILNACHT, o.J.). Heute stellen jedoch Erdöl und Erdgas die bedeutendsten Quellen für elementaren Schwefel dar (ZLOKARNIK, 2016). Die Entschwefelung von Erdöl und Erdgas nach dem Claus-Verfahren erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird der enthaltene Schwefelwasserstoff zu etwa einem Drittel mit Sauerstoff in einer Brennkammer zu Schwefeldioxid verbrannt. Dieses wird dann zusammen mit den restlichen zwei Dritteln Schwefelwasserstoff in Gegenwart eines Bauxitkatalysators bei etwa 300 °C umgesetzt (SEILNACHT, o.J.).

Zur Gewinnung von Schwefelsäure können das Bleikammerverfahren oder das Kontaktverfahren genutzt werden. Praktisch findet heute jedoch nur noch das Doppelkontaktverfahren Anwendung. Dieses Verfahren wurde in den 1950er Jahren von der Firma BAYER entwickelt und gilt als wirtschaftlicher und umweltverträglicher (ZLOKARNIK, 2016).

Weitergehend entstehen bei Produktionsverfahren der Industrie schwefelhaltige Verbindungen als Nebenprodukt oder Abfall, die in der Landwirtschaft als Schwefeldünger angeboten werden. Bekannt sind Ammoniumsulfat-Lösungen oder auch Produkte aus der Rauchgas-Entschwefelung. Für den Einsatz in der Landwirtschaft müssen die Bestimmungen des Düngemittelrechts eingehalten werden (IVA, 2024).

Düngerformen

Schwefel und andere Nährstoffe können der Pflanze sowohl über organische als auch über mineralische Düngemittel zugeführt werden. Da sich der Feldversuch auf die mineralischen Düngemittel beschränkt, sollen diese im Folgenden spezieller beleuchtet werden.

In den mineralischen Düngemitteln liegen die Pflanzennährstoffe in anorganischer Form vor. Mit Ausnahme von Chelatoren, mit denen die Verfügbarkeit bestimmter Nährstoffe gesteigert wird, enthalten sie in der Regel keine organischen Moleküle. Grundsätzlich lässt sich zwischen Einnährstoffdüngern und Mehrnährstoffdüngern differenzieren. Der Vorteil der Einnährstoffdünger ist eine gezielte und auf den Bedarf abgestimmte Applikation. Im Gegensatz dazu zählen das auf die Kulturart abgestimmte Verhältnis der Nährstoffe zueinander und ein geringerer Aufwand bei der Ausbringung zu den Vorteilen der Mehrnährstoffdünger (SCHUBERT, 2018).

Grundsätzlich stehen für die Schwefeldüngung eine Vielzahl an mineralischen Düngemitteln zur Verfügung. Der Schwefel ist entweder produktionsbedingt enthalten oder wird gezielt zugesetzt. Die Düngemittel unterscheiden sich hinsichtlich der Form der Schwefelbindung, des Schwefelgehaltes und der Kopplung mit anderen Nährstoffen (IVA, 2024). Die untenstehende Tabelle der DLG (2012) zeigt eine Auswahl schwefelhaltiger Mineraldünger.

Tabelle 4: Auswahl schwefelhaltiger Mineraldünger (DLG, 2012), zugeschnitten

Dünger	S-Gehalt (%)	S-Bindungsform	Weitere Nährstoffe	Beispiele Handelsware
Ammoniumsulfat	24	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	21 % N	SsA, AS, Domogran
Ammonsulfatsalpeter	13	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	26 % N	ASS 26, ENTEC 26
Ammoniumsulfat-Harnstoff	5 – 12	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	30 – 38 % N	PIAMON 33-S, Urea-S
Ammoniumnitrat mit S	6	$(\text{Ca})\text{SO}_4$	24 % N	YaraBela Sulfan
N-Düngerlösung mit S	3 – 6	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ + (ATS)	15 – 27 % N	PIASAN-S 25/6, ALZON flüssig-S 25/6, Domamon, NTS
Ammonsulfat-Lösung	6 – 9	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	5 – 8 % N	ASL
Kaliumsulfat	18	K_2SO_4	50 % K_2O	KALISOP
Patentkali	17	K_2SO_4 , MgSO_4	30 % K_2O 10 % MgO	Patentkali
Korn-Kali	4	MgSO_4	40 % K_2O 6 % MgO 3 % Na	Korn-Kali
Magnesia-Kainit	4	MgSO_4	11 % K_2O 5 % MgO 20 % Na	
Kieserit (granuliert)	20	MgSO_4	25 % MgO	ESTA Kieserit gran
Bittersalz	13	MgSO_4	16 % MgO	EPSO Top
Elementarer Schwefel	60 – 98	S		Schwefellinsen/-suspensionen
Superphosphat	12	CaSO_4	18 % P_2O_2	
div. NPK mit S	2 – 12	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$		
Kalkdünger mit S	≥ 2	CaSO_4	≥ 80 % CaO	Kohlensaurer Kalk mit S Magnesiumkalk mit S

Grundsätzlich liegt der Schwefel in den Düngemitteln in Form von Sulfat, Thiosulfat oder als elementarer Schwefel vor. In Abhängigkeit dieser Nährstoffformen lässt sich die Wirkung der verschiedenen Produkte beurteilen (IVA, 2024).

Das sehr gut wasserlösliche Sulfat ist dabei die einzige Form, in der die Pflanze den Schwefel direkt aufnehmen kann. Die Sulfate sind in den Düngemitteln in verschiedensten Bindungsformen, zum Beispiel als Ammonium-, Kalium-, Magnesium- oder Calciumsulfat, enthalten. Die Freisetzung von Schwefel aus dem Calciumsulfat ist im Vergleich zu anderen Sulfatverbindungen aufgrund der etwas geringeren Wasserlöslichkeit verzögert und wirkt über einen längeren Zeitraum anhaltend (DLG, 2012; IVA, 2024). Der Einsatz von Kalium- und Magnesiumsulfaten ermöglicht eine Schwefeldüngung unabhängig von der Stickstoffgabe. Neben der Vielzahl von Schwefel-haltigen Feststoffdüngern stehen alternativ auch Flüssigdünger auf Basis von Ammoniumsulfat und Ammoniumthiosulfat, häufig in Mischung mit Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung, zur Verfügung. Auch der im Ammoniumthiosulfat gebundene Schwefel wird über Zwischenstufen vergleichsweise schnell in die pflanzenverfügbare Sulfatform umgewandelt (DLG, 2012). Nach Angaben der IVA (2024) sind die Wirkungen aller Sulfate vergleichbar, solange die erforderliche Schwefelmenge rechtzeitig ausgebracht wird und Kationenantagonismen beachtet werden.

Elementarer Schwefel wird auf dem Markt als Pulver, Mikrogranulat, Schwefellinsen und in Suspensionen angeboten. Als Netzschwefel oder in Suspensionen erfolgt die Boden- oder Blatt-düngung über die Pflanzenschutzspritze. Bei den Schwefellinsen wird der Schwefel fein vermahlen, mit Bentonit vermischt und zu Linsen gepresst. Die Schwefellinsen können mit dem Düngerstreuer alleinig oder in Mischungen ausgebracht werden (IVA, 2024).

Elementarer Schwefel ist praktisch nicht löslich in Wasser (SEILNACHT, o.J.). Während sulfatischer Schwefel den Pflanzen direkt zur Verfügung steht, muss elementarer Schwefel erst durch die Tätigkeit schwefeloxidierender Bakterien umgesetzt werden. Die Geschwindigkeit der Umsetzung ist vom Vermahlungsgrad des Schwefels, der Bodentemperatur sowie der Bodenfeuchte abhängig (IVA, 2024). Nach DLG (2012) und IVA (2024) kann sich diese Umwandlung im Frühjahr bei Temperaturen unter 10 °C über einen längeren Zeitraum hinziehen. SCHILLING (2000) berichtet von Versuchen, in denen pulverförmiger elementarer Schwefel nach sieben Wochen bei einer Bodentemperatur von 14 °C zu etwa 50 % oxidiert war und bei 7 °C nur zu 34 %. Aufgrund der geringen Kalkulierbarkeit der mikrobiellen Umwandlung sind Düngemittel mit elementarem Schwefel nicht geeignet, um Schwefelmangel kurzfristig zu beheben. Aber auch eine Vorratsdüngung mit elementarem Schwefel wird nicht empfohlen, da die Umwandlung zu Sulfat auch dann erfolgen kann, wenn kein Schwefelbedarf besteht. Dieser Schwefel ist dann auswaschungsgefährdet. Auf der anderen Seite ist es möglich, dass in Phasen hohen Schwefelbedarfs nicht ausreichend pflanzenverfügbarer Schwefel durch die mikrobielle Umsetzung zur Verfügung gestellt werden kann (IVA, 2024).

Der Schwefel beziehungsweise die Umwandlungsprozesse im Boden wirken kalkzehrend und senken damit den pH-Wert des Bodens. Dies gilt besonders für elementaren Schwefel, da die schwefeloxidierenden Bakterien bei der Umsetzung Schwefelsäure bilden (IVA, 2024). YARA (2013) gibt hier eine Kalkzehrung von 1,9 kg CaO/kg S an. In Abhängigkeit von begleitend gedüngten Nährstoffen und Nebenbestandteilen kann dieser Effekt jedoch ganz unterschiedlich

ausgeprägt sein oder sogar neutralisiert werden. Aus diesem Grund sind Schwefel-haltige Düngemittel hinsichtlich ihres Kalkverbrauches unterschiedlich zu bewerten (IVA, 2024). Nach Angaben der N.U. AGRAR GMBH (2018) wirken besonders SSA, ASS und Piamon 33-S stark versauernd. Die Versauerung durch das SSA resultiert aus der direkten Versauerung durch den Schwefel in Form der schwefligen Säure sowie der physiologischen Versauerung in der Wurzelzone durch die Aufnahme des Ammoniums durch die Wurzel gegen die Abgabe von Wasserstoff-Ionen. Darüber hinaus wirkt auch das Superphosphat versauernd. Im Gegensatz dazu wirken Gips, Kieserit, Kornkali und Patentkali neutral (N.U. AGRAR GMBH, 2018).

Auswirkungen der Schwefeldüngung auf die Umwelt

Nach GERSON UND HINCKLEY (2023) hat sich die Forschung lange Zeit lediglich mit den Auswirkungen der Stickstoff- und Phosphordüngung beschäftigt. Jahrelange Studien haben gezeigt, dass beide Elemente im Überschuss erhebliche Folgen für die Umwelt hervorrufen können. Allerdings sind Stickstoff und Phosphor nicht die einzigen Elemente, die bei der Entwicklung nachhaltiger Bewirtschaftungspraktiken berücksichtigt werden müssen. Im 19. und 20. Jahrhundert wurden deutliche negative Auswirkungen der Schwefeldioxid-Emissionen aus industriellen Aktivitäten auf sensible Ökosysteme deutlich, was darauf hindeutet, dass auch eine steigende Schwefeldüngung mit negativen Folgen für die Umwelt und das Agrarsystem verbunden sein kann. Dazu zählen zum Beispiel die Versauerung von Gewässern und die Kationenverarmung des Bodens (GERSON UND HINCKLEY, 2023). Dabei ist besonders zu beachten, dass in einigen Regionen der Welt heute mehr Schwefel in Böden und Gewässer gelangt als zum Höhepunkt des sauren Regens (GERSON UND HINCKLEY, 2023). Mit Verweis auf eine Studie der Universität von Colorado benennt das IGB (2021) die Landwirtschaft als bislang unterschätzte Schwefelquelle. Demnach macht der Einsatz als Bestandteil von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln weltweit rund 50 % des jährlich in die Umwelt eingetragenen Schwefels aus.

EULENSTEIN (2011) betrachtet den Schwefelesinsatz unter dem Aspekt der Bodengesundheit. Demnach führt eine Überdüngung mit Schwefel zu einer Versauerung und Entkalkung der Ackerböden. In Folge der sinkenden pH-Werte steigt die Mobilität von Schwermetallen. Zudem kommt es zum Zerfall von Tonmineralen und dabei zur Freisetzung von Aluminium-Ionen in der Bodenlösung. Aluminium verdrängt wichtige Pflanzennährstoffe wie Calcium und Magnesium an den Pflanzenwurzeln. Folglich kommt es zu Wachstumsdepressionen und krankhaften Veränderungen im Wurzelsystem der Pflanzen sowie zum Absterben symbiontisch mit Pflanzen zusammenlebenden Mikroorganismen (EULENSTEIN, 2011).

Nach EULENSTEIN (2011) muss sich die Schwefelzufuhr zu landwirtschaftlichen Kulturen deshalb am jeweiligen Bedarf der Kulturen ausrichten. Auch der IVA (2024) verweist in diesem Zusammenhang auf die Düngeverordnung und empfiehlt, Nährstoffüberschüsse so gering wie möglich zu halten. Nach GERSON UND HINCKLEY (2023) ist es sogar notwendig, nachhaltige Managementpläne zu entwickeln, die den Anforderungen an Pflanzengesundheit, Ertrag und Qualität gerecht werden, und gleichzeitig aber negative Auswirkungen auf die Umwelt reduzieren.

3. Zielstellungen

Um den Einfluss der verschiedenen Schwefelformen und -mengen auf die Ertrags- und Qualitätsparameter des Winterweizens herauszuarbeiten, wurde am Standort Derenburg im nördlichen Harz ein Feldversuch zum Vergleich der Wirkung verschiedener Düngemittel und -mengen durchgeführt. In der Auswertung der Versuchsergebnisse sollten folgende Fragestellungen beantwortet werden:

1. Wie wirkt sich die Schwefeldüngung im Vergleich zu der ungedüngten Kontrolle auf die Ertrags- und Qualitätsparameter des Winterweizens aus?
2. Welchen Einfluss haben die verschiedenen Schwefelformen und Schwefelmengen auf die Ertrags- und Qualitätsparameter des Winterweizens?
3. Welche Auswirkungen der Schwefeldüngung lassen sich auf den Schwefelgehalt im Boden und in der Pflanze beobachten?
4. Welchen Einfluss zeigt der Einsatz von elementarem Schwefel in Form von Schwefellinsen auf das Bodenmikrobiom?
5. Welche Empfehlungen können für den Standort Derenburg unter den betrachteten Versuchsbedingungen bezüglich der Schwefeldüngung des Winterweizens abgeleitet werden?

4. Material und Methoden

4.1 Standortbeschreibung

Der dieser Arbeit zugrundeliegende Feldversuch wurde im Jahr 2025 auf dem Versuchsstandort der N.U. Agrar GmbH in Derenburg angelegt und durchgeführt. Derenburg liegt etwa 10 km westlich von Halberstadt im nördlichen Harzvorland im Regenschatten des Harzes. Die Flächen des Versuchsstandortes liegen zwischen 140 und 185 m über NN. 68 % der Böden sind tiefgründige Löss-Böden, 15 % Diluvial-Böden, 12 % flachgründige Verwitterungsböden und 5 % Alluvial-Böden. Die Schläge sind größtenteils eben bis leicht wellig, ein geringer Anteil ist als stark hängig zu beschreiben. Der pH-Wert der Böden bewegt sich zwischen 6,1 und 7,4. Die Gehalte an P, K und Mg liegen überwiegend im B-/C-Bereich. Die Versorgung mit Spurenelementen schwankt abhängig von der Bodenentstehung und der früheren Bewirtschaftung. Die nutzbare Feldkapazität beträgt 100 bis 250 mm (N.U. AGRAR GMBH, 2024).

Der Versuch selbst wurde auf dem Schlag „Welle“ im Versuchsblock 2 durchgeführt. Als schluffiger Lehm (uL) wird dem Boden die Bodengruppe 4 zugeordnet. Die Bonität des Schlages beläuft sich auf 78 Bodenpunkte.

Das Klima am Standort Derenburg kann allgemein als gemäßigt kontinental bezeichnet werden. Im Mittel der letzten 25 Jahre wird der Vegetationsbeginn auf den 10.03. und das Vegetationsende auf den 17.11. datiert. Es ergibt sich eine Vegetationsperiode von 253 Tagen. Im 25-jährigen Mittel beträgt die Jahresdurchschnittstemperatur 10 °C. Die Temperaturextreme reichen dabei von - 13,6 °C bis + 39,2 °C. Der Jahresniederschlag beträgt im 25-jährigen Mittel 523 mm. Die Jahreswitterung ist geprägt durch häufige Frühjahrs- und Vorsommertrockenheit (N.U. AGRAR GMBH, 2024).

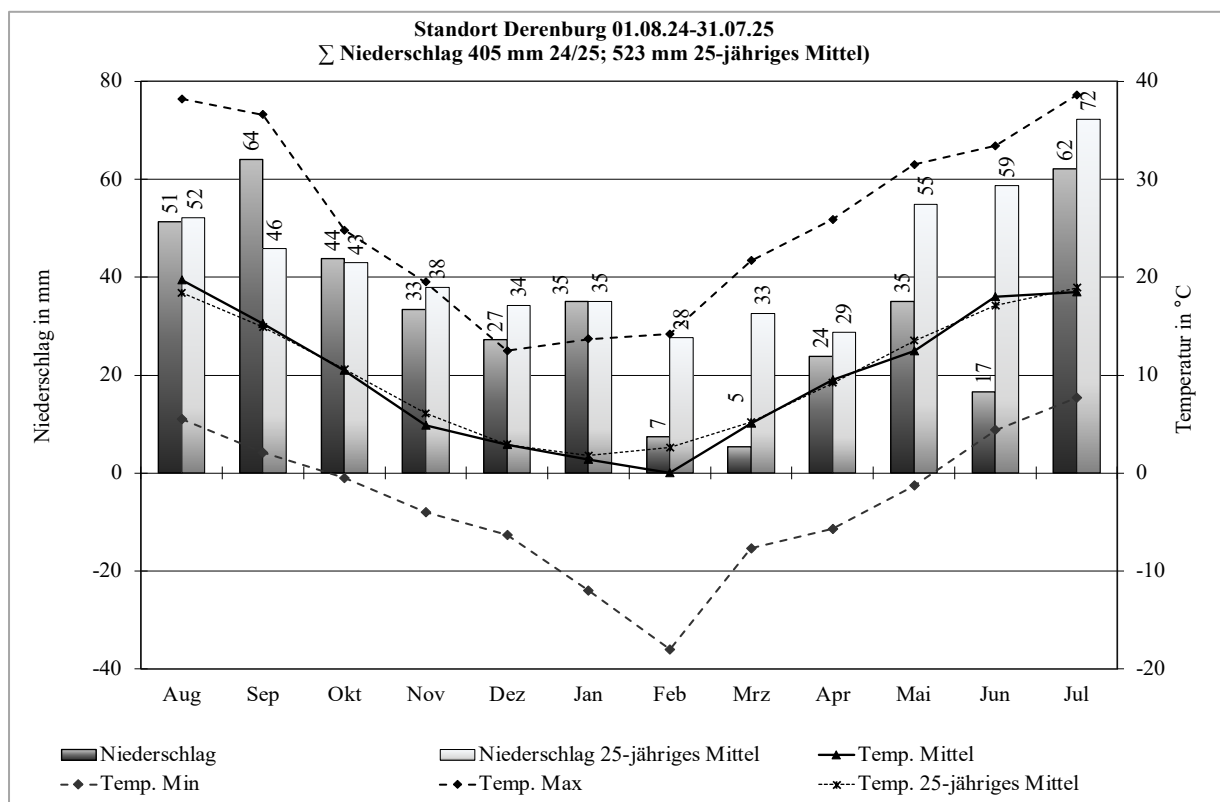


Abbildung 5: Wetterdiagramm Derenburg 01.08.2024 bis 31.07.2025 (eigene Darstellung)

Die obenstehende Abbildung 5 basiert auf Daten der Wetterstation der N.U. Agrar GmbH in Derenburg und verdeutlicht die Witterung für den Zeitraum vom 01.08.2024 bis 31.07.2025. Die Station befindet sich etwa 200 m von der Versuchsfläche entfernt. Für jeden Monat wird der Niederschlag als absolute Menge in mm abgebildet und dem Mittel des Niederschlages der letzten 25 Jahre gegenübergestellt. Darüber hinaus wird ebenso für jeden Monat des Zeitraumes die durchschnittliche Lufttemperatur in Bodennähe in °C veranschaulicht und dem Mittel der letzten 25 Jahre entgegengesetzt. Zudem wird für jeden Monat die entsprechende minimale und maximale Temperatur gezeigt.

Der August 2024 kann in Hinblick auf das Mittel der letzten 25 Jahre als relativ warm bezeichnet werden. Für den abgebildeten Zeitraum konnte hier die höchste Durchschnittstemperatur von 19,7 °C erfasst werden. Teilweise wurden Temperaturen von mehr als 38 °C erreicht. Der Niederschlag lag jedoch im Durchschnitt der letzten 25 Jahre. Besonders im September, aber auch im Oktober fielen überdurchschnittliche Niederschlagsmengen. Mit 64 mm konnte im September die höchste Niederschlagsmenge des Betrachtungszeitraumes gemessen werden. Die Temperaturen lagen im Herbst etwa im Mittel der letzten 25 Jahre. Der November war jedoch etwas kälter als das langjährige Mittel. Die späte Herbst- und Winterzeit waren teilweise durch hohe Tagestemperaturen und vergleichsweise niedrige Nachttemperaturen gekennzeichnet. Generell verlief der Winter relativ kühl mit geringen Niederschlägen. In den vier Monaten November bis Februar fielen 103 mm Niederschlag. Besonders kalt und trocken war der Februar. Die durchschnittliche Temperatur lag mit 0,0 °C um 2,6 °C unter dem langjährigen Mittel. Es wurden Tiefstwerte von bis zu -18,0 °C erreicht. Auch der Niederschlag lag in diesem Monat mit 7 mm deutlich unter dem Mittel der letzten 25 Jahre. Der Vegetationsbeginn konnte auf den 10. März datiert werden. Auch wenn an diesem Tag Temperaturen von bis zu 17,6 °C erreicht wurden, folgten noch einige kühle Nächte. Anfang und Ende April traten nochmals Bodenfröste auf. Das Frühjahr und der frühe Sommer waren durch eine starke Trockenheit gekennzeichnet. Von März bis Juli lag die Niederschlagsmenge stets deutlich unter dem langjährigen Mittel. Im März wurde die geringste Niederschlagsmenge des Betrachtungszeitraumes mit 5 mm gemessen. Zur Monatswende Mai/Juni konnten einige regnerische Tage erfasst werden. Im Frühjahr und frühen Sommer stiegen die Temperaturen kontinuierlich an, lagen aber stets auf dem Niveau des Mittels der letzten 25 Jahre. Ende Mai wurde erstmalig eine Temperatur von 30 °C erreicht. Auch wenn der Juli, entgegen des langjährigen Mittels, nicht als niederschlagsreichster Monat erfasst werden konnte, regnete es häufig in die Ernte hinein. Insgesamt fielen zwischen dem 01.08.2024 und 31.07.2025 am Versuchsstandort 405 mm Niederschlag. Dies entspricht einem Minus von 118 mm gegenüber dem langjährigen Mittel.

4.2 Versuchsaufbau

Um die beschriebenen Versuchsfragen beantworten zu können, wurde ein Feldversuch mit zwölf verschiedenen Varianten entworfen. Eine Variante verkörpert jeweils eine Ausprägung der Kombination der Prüffaktoren „Schwefelmenge“ und „Schwefelform“. Die untenstehende Tabelle 5 zeigt die zwölf Varianten des Versuches und die Zusammensetzung der jeweiligen Düngemittel. Die Zusammensetzung beruht auf den jeweiligen Angaben der Hersteller.

Tabelle 5: Variantenplan und Zusammensetzung der Düngemittel

Variante	Menge kg S/ha	Düngemittel	Zusammensetzung
1	0	Kontrolle	
2	25	SSA	<i>Ammoniumsulfat</i> 24 % S + 21 % N
3	50	SSA	
4	25	Kieserit	<i>Magnesiumsulfat</i> 20,8 % S + 15,1 % Mg
5	50	Kieserit	
9	100	Kieserit	
6	25	KaliSop	<i>Kaliumsulfat</i> 17,6 % S + 41,5 % K
7	50	KaliSop	
8	100	KaliSop	
10	25	Schwefellinsen	<i>Elementarer Schwefel</i> 90 % S
11	50	Schwefellinsen	
12	100	Schwefellinsen	

Die Variante 1 stellt die ungedüngte Kontrolle dar. Hier kam folglich kein Schwefel-haltiges Düngemittel zum Einsatz. In den Varianten 2 bis 8 wurden die Sulfatdüngemittel SSA, Kieserit und KaliSop jeweils in Mengen von 25, 50 und 100 kg S/ha eingesetzt. Eine Ausnahme bildet das SSA. Hier wurde auf die höchste Menge von 100 kg S/ha verzichtet. In den Varianten 10 bis 12 wurde elementarer Schwefel in Form von Schwefellinsen in den Mengen 25, 50 und 100 kg S/ha eingesetzt.

Der Feldversuch wurde als Parzellenversuch angelegt. Bei Parzellenversuchen gilt der Grundsatz, dass alle Einflussfaktoren, die nicht untersucht werden sollen, möglichst gleich sein sollten. Der Boden gilt dabei als wesentlicher Einflussfaktor. Um diesen Einfluss gering zu halten, bedient man sich im Versuchswesen Maßnahmen, wie der Wiederholung und der Randomisierung. Außerdem sollte eine möglichst homogene Versuchsfläche gewählt und die Fläche pro Parzelle für ein Prüfglied möglichst klein gehalten werden (SCHMIDT, 2017).

Das Versuchsgut der N.U. Agrar GmbH in Derenburg arbeitet in enger Kooperation mit den ortsansässigen Landwirtschaftsbetrieben. Aus diesem Grund konnte der Parzellenversuch in eine landwirtschaftliche Produktionsfläche integriert werden, sodass der Versuch, besonders die Aussaat und Pflegemaßnahmen des Weizens, möglichst praxisüblichen Bedingungen unterlag. Mit Hilfe des Düngeversuches soll der Einfluss verschiedener Schwefelmengen und -formen auf die Ertrags- und Qualitätsparameter des Winterweizens untersucht werden. Dafür wurde der Versuch als randomisierte Blockanlage mit vierfacher Wiederholung angelegt. Jeder Block besteht dabei aus zwölf Parzellen, wobei jeder Block jede Variante genau einmal enthält. Aus

den zwölf Varianten und den vier Wiederholungen ergeben sich 48 Parzellen. Eine Parzelle ist 2,5 m breit und 9 m lang, sodass sich eine Parzellengröße von 22,5 m² ergibt.

Die untenstehende Abbildung 6 zeigt den schematischen Aufbau des Versuches. Um mögliche Randwirkungen gering zu halten, werden häufig Randparzellen genutzt. In diesem Fall konnte auf Randparzellen verzichtet werden, da der Versuch in einem Versuchsblock eingebettet ist und sowohl auf der linken als auch auf der rechten Seite an andere Versuche angrenzt. Dazwischen befinden sich die Parzellen in den vier Blöcken, die als Wiederholungen der Varianten angelegt werden. In der Abbildung kann die obere zweistellige Zahlenkombination als eindeutige Bezeichnung verstanden werden. So bezeichnet die Zahlenkombination „3/5“ beispielsweise die fünfte Parzelle im dritten Block. Die einfache Zahl darunter steht für die jeweilige Variante.

D25 WW 151	1/1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8	1/9	1/10	1/11	1/12	D25 WW 153
	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
	2/1	2/2	2/3	2/4	2/5	2/6	2/7	2/8	2/9	2/10	2/11	2/12	
	6	5	4	3	2	1	12	11	10	9	8	7	
	3/1	3/2	3/3	3/4	3/5	3/6	3/7	3/8	3/9	3/10	3/11	3/12	
	8	7	9	10	12	11	2	1	3	4	6	5	
	4/1	4/2	4/3	4/4	4/5	4/6	4/7	4/8	4/9	4/10	4/11	4/12	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	

Abbildung 6: Versuchsaufbau (eigene Darstellung)

Die untenstehende Luftbildaufnahme (Abbildung 7) vom 04. April 2025 zeigt noch einmal die Anlage des Versuches mit den einzelnen Parzellen sowie die Lage des Versuches auf der Fläche.

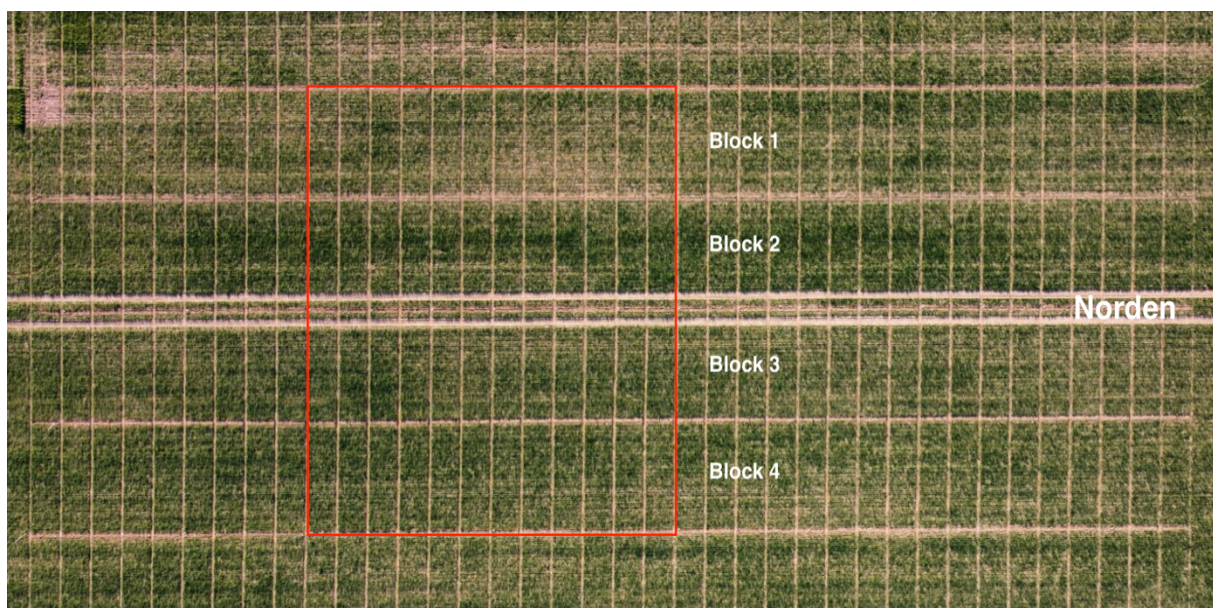


Abbildung 7: Luftbildaufnahme des Feldversuches vom 04. April 2025 (eigene Aufnahme)

4.3 Versuchsdurchführung

Der Düngerversuch wurde auf dem Schlag „Welle“ im Versuchsblock 2 durchgeführt. Als Vorfrucht wurde dort im Jahr 2024 Sommergerste angebaut. Zwischen der Sommergerste und dem Winterweizen erfolgten mehrere Arbeitsgänge mit dem Grubber.

Die Aussaat des Winterweizens erfolgte am 22. Oktober 2024 mit einer Saatstärke von 290 Körner/m². Der Feldaufgang konnte auf den 15. November 2024 datiert werden. Der gesamte Schlag wurde mit der Sorte LG Optimist von Limagrain bestellt. Die untenstehende Abbildung von LIMAGRAIN (2025) zeigt die wichtigsten Eigenschaften dieser Sorte.

ANBAU- UND SORTENHINWEISE

Sortentyp

Sortentyp Qualitätsweizen

Verkaufsqualität

Fallzahl +++
Rohprotein o
Sedimentationswert ++

Ertragsaufbau/Ertragstyp

Ertragstyp Kompensationstyp
Bestandsdichte mittel
Kornzahl/Ähre mittel
Tausendkorngewicht hoch - mittel
Korntrag ■ ■ ■ ■ ■

Agronomische Eigenschaften

Reife früh - mittel
Winterhärte sehr gut - gut
Bestockungsvermögen mittel
Pflanzenlänge mittel - kurz
Standfestigkeit mittel

Saatzeit/Saatstärke¹

Früh 270-300
Mittel 310-350
Spät 360-400

CTU-Herbizidverträglichkeit

CTU-Herbizidverträglichkeit Ja

Wachstumsreglerbedarf

Tendenz zu Ortsüblich hoch - mittel

Krankheitsresistenzen

Pseudocercospora ++
Mehltau o
Blattseptoria +
DTR o
Gelbrost +++
Braunrost +++
Ährenfusarium ++

Insektenresistenz

Orangerote Nein
Weizengallmücke

Anbaueignung für

Frühsaat ■ ■ ■ ■ ■
Spätsaat ■ ■ ■ ■ ■
Stoppelweizen ■ ■ ■ ■ ■
Mulchsaat ■ ■ ■ ■ ■
Trockengebiete ■ ■ ■ ■ ■

[1] keimfähige Körner je m² bei normalen Bestellbedingungen

++++ sehr gut +++ sehr gut bis gut ++ gut + gut bis mittel o mittel - mittel bis gering -- gering

■ ■ ■ ■ ■ sehr gut / sehr hoch ■ ■ ■ ■ ■ gut / hoch ■ ■ ■ ■ ■ mittel ■ ■ ■ ■ ■ ausreichend / mittel bis gering ■ gering

Abbildung 8: Sortenprofil LG Optimist (LIMAGRAIN, 2025), modifiziert

Um die wichtigsten Pflanzennährstoffe im Boden sowie den pH-Wert zu Versuchsbeginn beurteilen zu können, wurden im Herbst am 26. September 2024 und im Frühjahr am 04. März 2025 Bodenproben für die Grundbodenuntersuchung in der Versuchsfläche gezogen. Dabei wurden in einer Schichttiefe von 0 bis 30 cm mit Hilfe des Bohrstocks etwa 20 bis 25 Einzelproben gezogen. Diese wurden anschließend vereinigt und vermischt. Die Analysen wurden im Prüfzeitraum vom 27. September bis 01. Oktober 2024 bzw. 17. März bis 28. März 2025 im Labor der Eurofins Agraranalytik Deutschland GmbH in Jena durchgeführt. Die

Extraktion von Kalium und Phosphor erfolgte durch die CAL-Methode. Für den pH-Wert sowie die Quantifizierung des Magnesiums wurde die Extraktion mit 0,01 M CaCl₂ herangezogen. Neben den Angaben zu den Nährstoffgehalten und des pH-Wertes erfolgte die Ausgabe der Ergebnisse inklusive der Einordnung in die jeweilige Gehaltsklasse, um den Versorgungszustand des Bodens widerzuspiegeln. Im Rahmen des Versuches wurden außerdem weitere Bodenproben gezogen, auf die im folgenden Kapitel näher eingegangen werden soll.

Vor der Ausbringung der Düngemittel wurde unter Einbeziehung der Ergebnisse der Grundbodenuntersuchung ein Düngeplan erstellt. Dieser ist in der unten dargestellten Tabelle 6 veranschaulicht. Aus dem Düngeplan wird ersichtlich, dass neben den Schwefel-Düngemitteln weitere Düngemittel ausgebracht wurden, um die Nährstoffbilanz des Bodens auszugleichen. So wurden alle Varianten über Kalkammonsalpeter (KAS) auf 70 kg N/ha und über Kali60 auf 120 kg K₂O aufgedüngt. Zusätzlich wurden einheitlich 60 kg P₂O₅ über Triple Superphosphat (TSP) ausgebracht. Auf eine Aufdüngung mit Magnesium wurde aufgrund der hohen Bodenversorgung verzichtet.

Tabelle 6: Düngeplan, Ausbringung am 06.03.2025

Var.	EC 21 06.03.25	S	SSA N	KAS N	60 Kali K ₂ O	KaliSop K ₂ O	Kieserit MgO	TSP P ₂ O ₅
	S-Dünger	in kg/ha						
1	Kontrolle	0	0	70	120	0	0	60
2	SSA	25	22	48	120	0	0	60
3	SSA	50	44	26	120	0	0	60
4	Kieserit	25	0	70	120	0	31	60
5	Kieserit	50	0	70	120	0	62	60
9	Kieserit	100	0	70	120	0	124	60
6	KaliSop	25	0	70	50	70	0	60
7	KaliSop	50	0	70	0	140	0	60
8	KaliSop	100	0	70	0	280	0	60
10	Schwefellinsen	25	0	70	120	0	0	60
11	Schwefellinsen	50	0	70	120	0	0	60
12	Schwefellinsen	100	0	70	120	0	0	60

Die Düngung des Versuches selbst erfolgte in EC 21 des Winterweizens am 06. März 2025 mit Hilfe des Parzellen-Düngerstreuers. Aufgrund der geringen auszubringenden Menge mussten die Schwefellinsen allerdings per Hand ausgebracht werden. Dafür wurde die entsprechende Düngemenge pro Parzelle für jede der drei Varianten berechnet und abgewogen. Bei der Ausbringung der Schwefellinsen musste auf eine gleichmäßige Verteilung innerhalb der abgesteckten Parzelle geachtet werden.

Sowohl die nachfolgende Stickstoffdüngung als auch die Pflanzenschutzmaßnahmen wurden über alle Varianten einheitlich durch den landwirtschaftlichen Betrieb durchgeführt. Die zweite Stickstoffgabe fiel am 23. April 2025 in EC 31/32 und die dritte Gabe am 05. Mai 2025 in EC 37. An beiden Terminen wurden jeweils 50 kg N/ha über Piagran Pro (Harnstoff) ausgebracht, sodass im Frühjahr insgesamt 170 kg N/ha gedüngt wurden. Die flankierenden Pflanzenschutzmaßnahmen sind in der Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Flankierende Pflanzenschutzmaßnahmen

Datum	EC	Herbizid	Fungizid /W.-Regler	Insektizid / Blattdüngung
30.10.24	VA	2,0 Boxer 0,4 Herold 0,15 Cadou SC		
02.04.25	29			10 g/ha Molybdän
24.04.25	31		0,4 CCC + 0,3 Moddus 0,5 Proline + 0,4 Azbany	3,0 NPK 5-20-5 1,0 Mangan-Nitrat
26.05.25	53		1,5 Univoq	

Die Ernte des Versuches erfolgte am 23. Juli 2025 mit Hilfe des Parzellen-Mähdreschers der Firma Wintersteiger. Die integrierte Waage des Mähdreschers erfasst für jede Parzelle das Gewicht der jeweils geernteten Menge. Während der Mähdrescherfahrt wird von jeder Parzelle eine Probe von etwa 500 g in wasserdichte Behälter abgefüllt und mit der entsprechenden Parzellenummer beschriftet. Nach der Ernte wurden die Proben in Kisten zum Hof des Versuchsgutes der N.U. Agrar GmbH transportiert und bis zur Bestimmung der Ertrags- und Qualitätsparameter dort eingelagert.

Die untenstehenden Abbildungen 9 bis 14 zeigen zusammenfassend die Entwicklung der Weizenpflanzen zu unterschiedlichen Terminen während des Versuchszeitraumes.



Abbildung 9: Entwicklung des Winterweizens am Termin der Düngung am 06.03.2025 (eigene Aufnahme)



Abbildung 10: Entwicklung des Winterweizens am 14.04.2025 (eigene Aufnahme)



Abbildung 11: Entwicklung des Winterweizens am 05.05.2025 (eigene Aufnahme)



Abbildung 12: Entwicklung der Ähre am 05.05.2025 (eigene Aufnahme)



Abbildung 13: Entwicklung des Winterweizens am 12.05.2025 (eigene Aufnahme)



Abbildung 14: Entwicklung des Winterweizens am Termin der Ernte am 23.07.2025

4.4 Bonituren, Bodenuntersuchungen und Analysen

Bei Versuchen sind nicht allein die Ertrags- und Qualitätsparameter von Bedeutung. Aus diesem Grund wurden im Rahmen der Versuchsdurchführung zahlreiche weitere Daten erfasst. In diesem Zusammenhang wurden zwei Termine ausgewählt, an denen verschiedene Proben aus dem Versuch gezogen wurden. Der Fokus lag hier auf Untersuchungen hinsichtlich des Schwefelgehaltes im Boden und in der Pflanze sowie des Bodenmikrobioms. Der erste Beprobungstermin fand am 22. April 2025 im EC 31/32 und der zweite Termin am 12. Mai 2025 im EC 39 statt.

Mit Hilfe von S_{\min} -Proben kann der im Boden leichtlösliche, pflanzenverfügbare Schwefel bestimmt werden (TLLLR, 2024). An beiden Terminen wurden in allen Varianten in einer Tiefe von 0 bis 15 cm sowie 15 bis 30 cm S_{\min} -Proben gezogen. In den Varianten 1,3 und 12 wurden zusätzliche Proben aus einer Tiefe von 30 bis 60 cm gezogen. Aufgrund der anhaltenden Trockenheit wurde bei den anderen Varianten auf diese Tiefe verzichtet. Für jede Variante und jede Tiefe wurde eine Mischprobe über die vier Wiederholungen hinweg erstellt. Dafür wurden mit Hilfe des Bohrstocks für jede Tiefe etwa 20 bis 25 Einstiche in jeder Variante vorgenommen. Das Probematerial wird für jede Probe in einem Eimer gesammelt, gut durchmischt, anschließend in die Probenverpackung des Labors umgefüllt und mit der Variantenummer sowie der Einstichtiefe beschriftet. Die Proben wurden über Nacht im Kühlschrank bei 4 °C eingelagert und am nächsten Tag in einer Thermobox aus Styropor an das Labor der Eurofins Agraranalytik Deutschland GmbH in Jena versendet. Die Proben des ersten Termins wurden dort im Prüfzeitraum vom 05. bis 06. Mai 2025 und die Proben des zweiten Termins im Prüfzeitraum vom 14. bis 22. Mai 2025 nach VDLUFA-Methode (Extraktion mit 0,0125 M CaCl_2) analysiert. In den Varianten 1,3 und 11 wurde neben dem S_{\min} -Gehalt auch der N_{\min} -Gehalt nach VDLUFA-Methode (Extraktion mit 0,0125 M CaCl_2) bestimmt. Die Messergebnisse wurden in kg/ha, mg/100 g TS und mg/l ausgegeben. Es ist zu beachten, dass nach Angaben des Labors bei den Proben des zweiten Termins im Mai die vorgegebene Maximaltemperatur überschritten wurde, weshalb hier Abweichungen zum Realwert möglich sind.

Zur Ermittlung der Nährstoffgehalte in der Pflanze wurden an beiden Terminen Komplexe Pflanzenanalysen durchgeführt. Dafür wurde in jeder Parzelle aus der oberen linken Ecke etwa eine Handvoll Pflanzen ohne Wurzeln aus dem Bestand geschnitten. Aus den vier Wiederholungen einer jeden Variante wurde anschließend für jede Variante eine Mischprobe hergestellt. Die Proben wurden einzeln in Küchenpapier eingewickelt, mit der jeweiligen Varianten-Nummer beschriftet und noch am Tag der Probennahme an das Labor der Eurofins Agraranalytik Deutschland GmbH in Jena versendet. Die Proben des ersten Termins wurden dort im Prüfzeitraum vom 25. bis 30. April 2025 und die Proben des zweiten Termins im Prüfzeitraum vom 14. bis 19. Mai 2025 analysiert. Neben den Nährstoffgehalten erfolgte die Ausgabe der Ergebnisse inklusive der Einordnung in die entsprechenden Gehaltsklassen A bis E, um die Nährstoffversorgung der Pflanze widerzuspiegeln. Zudem wurden bestimmte Nährstoffverhältnisse berechnet.

Bei der Untersuchung des Bodenmikrobioms wurde eng mit der Soilytix GmbH aus Hamburg zusammengearbeitet. Die Soilytix GmbH hat sich auf die Analyse des Bodenmikrobioms über Hochdurchsatzsequenzierung spezialisiert. Nach Angaben des Unternehmens ist die

biologische Betrachtung des Bodens unerlässlich, um fundierte Rückschlüsse auf Nährstoffkreisläufe, Bodenstruktur und Pflanzengesundheit ziehen zu können (SOILYTIX GMBH, 2025). Das Bodenmikrobiom wurde an beiden Terminen lediglich in der Kontrolle (Variante 1) und in den Varianten mit Schwefellinsen (Varianten 10 bis 12) untersucht, um im Besonderen Erkenntnisse hinsichtlich der mikrobiellen Schwefelumwandlung zu gewinnen. In der Standardanalyse werden neben verschiedenen Bakteriengattungen auch die Aktivitäten einzelner Enzyme mikrobiellen Ursprungs in der Probe bestimmt, die die Schlüsselprozesse des Bodens beeinflussen und damit Rückschlüsse auf die Aktivität und Vitalität des Bodenmikrobioms liefern können. Bei der Probenahme wurden keine Mischproben über die Varianten angefertigt, sondern jede Parzelle wurde einzeln beprobt. Die Proben wurden aus einer Tiefe von 15 cm mit Hilfe eines Bohrstocks gezogen. In jeder Parzelle wurden mehrere Einstiche vorgenommen, bis die Proben ein Gewicht von etwa 200 Gramm aufwiesen. Zwischen den Parzellen wurde der Bohrstock von grobem Besatz befreit, um die Gefahr von Kontaminationen zu verringern. Die Proben wurden in luftdichte Plastiktüten gefüllt, welche mit der entsprechenden Variantenummer und Parzellenummer beschriftet worden sind. Über Nacht wurden die Proben im Kühlschrank bei 4 °C eingelagert und am nächsten Tag gekühlt per Express-Versand an die Soilytix GmbH nach Hamburg geschickt. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgte nach etwa drei Wochen über das kundenspezifische Soilytix-Dashboard. Je nach Fragestellung lassen sich über zahlreiche Funktionen die Ergebnisse bezüglich Taxonomie, einzelnen Mikroorganismen, Enzymaktivitäten und Korrelationen umfassend darstellen. Auch der durchschnittliche pH-Wert wurde in den untersuchten Varianten ermittelt (Vgl. Anhang).

4.5 Ermittlung der Ertrags- und Qualitätsparameter

Im Rahmen der Ertrags- und Qualitätsparameter wurden die Ähren pro Quadratmeter, der Kornertag, das Tausendkorngewicht, das Hektolitergewicht, der Rohproteingehalt, der Klebergehalt, der Sedimentationswert sowie der Feuchtigkeitsgehalt ermittelt.

Die Ähren pro Quadratmeter wurden bereits am 27. Mai 2025 vor der Ernte gezählt. Zur Bestimmung der Ährenzahl kam ein Zählrahmen zum Einsatz. Dieser besitzt eine rundliche Form und umfasst 0,2 m². Um Ungenauigkeiten zu vermeiden, wurde der Zählrahmen jeweils einmal im oberen und einmal im unteren Bereich der Parzelle in den Bestand gelegt. Die durch den Rahmen erfassten Ähren werden ausgezählt und notiert. Anschließend wird aus den beiden Werten pro Parzelle ein Mittelwert gebildet. Dieser wird mit dem Faktor 5 auf einen Quadratmeter aufgerechnet, sodass für jede Parzelle eine Ährenzahl pro Quadratmeter rechnerisch bestimmt werden kann.

Die Bestimmung der weiteren Ertrags- und Qualitätsparameter des Winterweizens erfolgte im Labor der N.U. Agrar GmbH am 28. August 2025. Zuvor wurden die Proben mit Hilfe einer Reinigungsmaschine von grobem Fremdbesatz befreit. Vor und nach der Reinigung wurde das Gewicht der jeweiligen Probe mit Hilfe einer Waage erfasst.

Der Ertrag für eine Parzelle errechnet sich aus der jeweils beernteten Fläche und dem bei der Ernte bereits durch die integrierte Waage des Mähdreschers erfassten Gewicht der geernteten Menge. Die beerntete Fläche ergibt sich dabei für jede Parzelle aus der Schneidwerksbreite von 1,5 m und der Parzellenlänge. Die Parzellenlänge wurde am Tag der Ernte mit Hilfe eines

Maßbandes gemessen und notiert, nachdem der Parzellen-Mähdrescher die Ränder des Versuches freigedroschen hatte. Um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde der Kornertrag auf eine Standardfeuchte von 14,5 % umgerechnet und rechnerisch von dem vorher bereits ermittelten Fremdbesatz bereinigt.

Bei der Ermittlung des Tausendkorngewichtes (TKG) kam ein Kornzählgerät der Firma Pfeuffer zum Einsatz. Ein Teil der Probe wird in den Zuführbehälter für Getreide gegeben. Mit Hilfe optischer Verfahren kann eine am Gerät vorgewählte Kornzahl separiert werden. Hier wurde eine Kornzahl von 250 gewählt. Diese 250 Körner werden dem Gerät nach der Zählung entnommen und mit Hilfe einer Waage gewogen. Um größere Schwankungen zu vermeiden, werden für jede Probe zwei Messungen vorgenommen. Aus den beiden Werten wird anschließend der Mittelwert bestimmt und dieser wird mit dem Faktor 4 auf 1.000 Körner aufgerechnet. Um auch hier eine bessere Vergleichbarkeit zu schaffen, wird auch das Tausendkorngewicht auf eine Standardfeuchte von 14,5 % umgerechnet.

Das Hektolitergewicht und der Feuchtigkeitsgehalt wurden mit Hilfe des „Granomat plus“ der Firma Pfeuffer bestimmt. Eine Ganzkornprobe von etwa 600 ml wird in den Einfülltrichter des Gerätes gefüllt. Die Einstellungen für die Messung sowie der Start der Messung werden am Touchscreen vorgenommen. Nach dem Start entriegelt ein Elektromotor die Klappen und die Probe fällt in die rechteckige Messzelle. Dadurch wird sie homogen verdichtet. Eine Bürste entfernt überschüssiges Material über der Messzelle. Die Reflexion und die Masse der Probe werden gemessen. Anschließend fällt die Probe in einen herausnehmbaren Behälter. Die Ergebnisse werden auf dem Bildschirm angezeigt und ausgedruckt. Die Angabe der Feuchtigkeit erfolgt in Prozent (%) und stellt einen geeichten Wert dar. Die Ausgabe des Hektolitergewichtes erfolgt bereits umgerechnet auf die Standardfeuchte. Das Hektolitergewicht wird in Kilogramm (kg) angegeben (PFEUFFER, o.J., a).

Der Sedimentationswert, der Rohproteingehalt und der Klebergehalt wurden mit Hilfe des „Granolyser“ der Firma Pfeuffer bestimmt. Bei dem „Granolyser“ handelt es sich um ein NIR-Analysegerät für Getreide, Ölsaaten und Leguminosen, welches sich der Diodenarray-Technologie bedient. Die Bedienung des Gerätes ähnelt der Bedienung des „Granomat plus“. Auch hier wird eine Ganzkornprobe von etwa 600 ml in das Gerät eingefüllt. Die Einstellungen für die Messung sowie der Start der Messung werden am Touchscreen vorgenommen. Nach dem Start wird die Probe im Gerät an einem Detektor vorbei gefördert und die Reflexion der Probe im NIR-Bereich gemessen. Das eingebaute Spektrometer scannt im Bereich von 950 bis 1540 nm. Anschließend wird die Probe in einen herausnehmbaren Behälter überführt. Die Messergebnisse werden auf dem Bildschirm angezeigt und ausgedruckt. Die Angaben des Sedimentationswertes erfolgen in Milliliter (ml), die Angaben des Rohproteingehaltes und des Klebergehaltes in Prozent (%). Das Gerät erfasst zusätzlich noch einmal den Feuchtigkeitsgehalt, sodass die Ausgabe der Parameter bereits umgerechnet auf die Standardfeuchte erfolgt (PFEUFFER, o.J., b).

Bei der Betrachtung der Ertrags- und Qualitätsparameter in den folgenden Kapiteln ist zu beachten, dass während der Mähdrescher-Fahrt ein Fehler geschehen ist. Für gewöhnlich muss der Mähdrescher nach jeder Parzelle stoppen, um das Gewicht der Erntemenge parzellen-spezifisch bestimmen und die Reinheit der gezogenen Proben gewährleisten zu können.

Zwischen der Parzelle 2/11 (KaliSop 100 kg S/ha) und 1/11 (SSA 25 kg S/ha) wurde zu spät gestoppt. Aus diesem Grund sind die ermittelten Ertragsdaten für diese beiden Parzellen verfälscht und müssen verworfen werden. Zudem ist davon auszugehen, dass die in Parzelle 2/11 gezogene Probe mit Körnern der Parzelle 1/11 verunreinigt wurde, sodass die Daten dieser Parzelle für alle Parameter aus der Auswertung genommen wurden. Für die Probe aus der Parzelle 1/11 gilt dies jedoch nicht. Die Ergebnisse der KaliSop-Variante mit 100 kg S/ha basieren für alle Ertrags- und Qualitätsparameter deshalb nur auf drei Wiederholungen. Die Ergebnisse bezüglich der Ähren pro Quadratmeter bleiben von diesem Fehler unberührt.

4.6 Statistische Auswertung

Um die Aussagekraft von Versuchen beurteilen zu können, spielt die statistische Auswertung im Versuchswesen eine besondere Rolle. Die Grundlage der statistischen Auswertung bilden die Wiederholungen. Das Resultat der statistischen Auswertung ist die Aussage, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass eine Differenz der Zielvariable (z.B. Ertrags- und Qualitätsparameter) zwischen zwei Prüfgliedern tatsächlich auf den untersuchten Faktor (z.B. Schwefelmenge, Schwefelform) zurückgeführt werden kann. Sind die Unterschiede bei der Zielvariablen signifikant, können diese auf den Faktor zurückgeführt werden. Ergibt sich allerdings keine Signifikanz, sind die Unterschiede höchstwahrscheinlich zufällig (SCHMIDT, 2017).

Für die Auswertung der aus dem Schwefel-Düngeversuch gewonnenen Datengrundlage sind deskriptiv-statistische Verfahren angewendet worden. Die Erstellung der Tabellen und Diagramme erfolgte mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogrammes Microsoft Excel. Darüber hinaus erfolgte mit diesem Programm die Berechnung der arithmetischen Mittelwerte und der Standardabweichungen. Auch die Umrechnung der Ergebnisse auf die Standardfeuchte erfolgte auf der Grundlage der gewonnenen Daten in Excel.

Die statistische Verrechnung erfolgte mit der Statistiksoftware „R“. Anhand einer einfaktoriellen Varianzanalyse wurden die unterschiedlichen Schwefelmengen des elementaren Schwefels als Einflussfaktoren auf die Parameter des Bodenmikrobioms untersucht. Darüber hinaus wurden die Schwefeldüngemittel und Schwefelmengen als Einflussfaktoren auf die Ertrags- und Qualitätsparameter des Winterweizens mittels einer zweifaktoriellen Varianzanalyse analysiert. Anhand der zweifaktoriellen Varianzanalyse sollte überprüft werden, ob signifikante Haupteffekte der beiden Faktoren sowie mögliche Interaktionen zwischen den Faktoren auf die Zielvariablen bestehen. Es ist anzumerken, dass die Haupteffekte der Schwefelmenge nur eingeschränkt bewertet werden können, da nicht alle Kombinationsmöglichkeiten aus Schwefeldüngemittel und Schwefelmenge im Versuch realisiert wurden. Das Signifikanzniveau wurde sowohl für die einfaktorielle als auch für die zweifaktorielle Varianzanalyse auf 5 % ($p < 0,05$) festgesetzt. Nach der Feststellung signifikanter Unterschiede im Rahmen der Varianzanalyse wurde der LSD-Test nach Fisher zur genaueren Identifizierung zwischen den Faktorstufen durchgeführt. Die Statistiktabeln können im Anhang eingesehen werden.

5. Ergebnisse

5.1 S_{\min} - und N_{\min} -Werte

Die untenstehende Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse der S_{\min} -Untersuchung der Probenahme am 22. April 2025 für die 12 verschiedenen Varianten. Es werden die Tiefen von 0 bis 15 cm und 15 bis 30 cm abgebildet. Die Werte sind in kg S/ha angegeben.

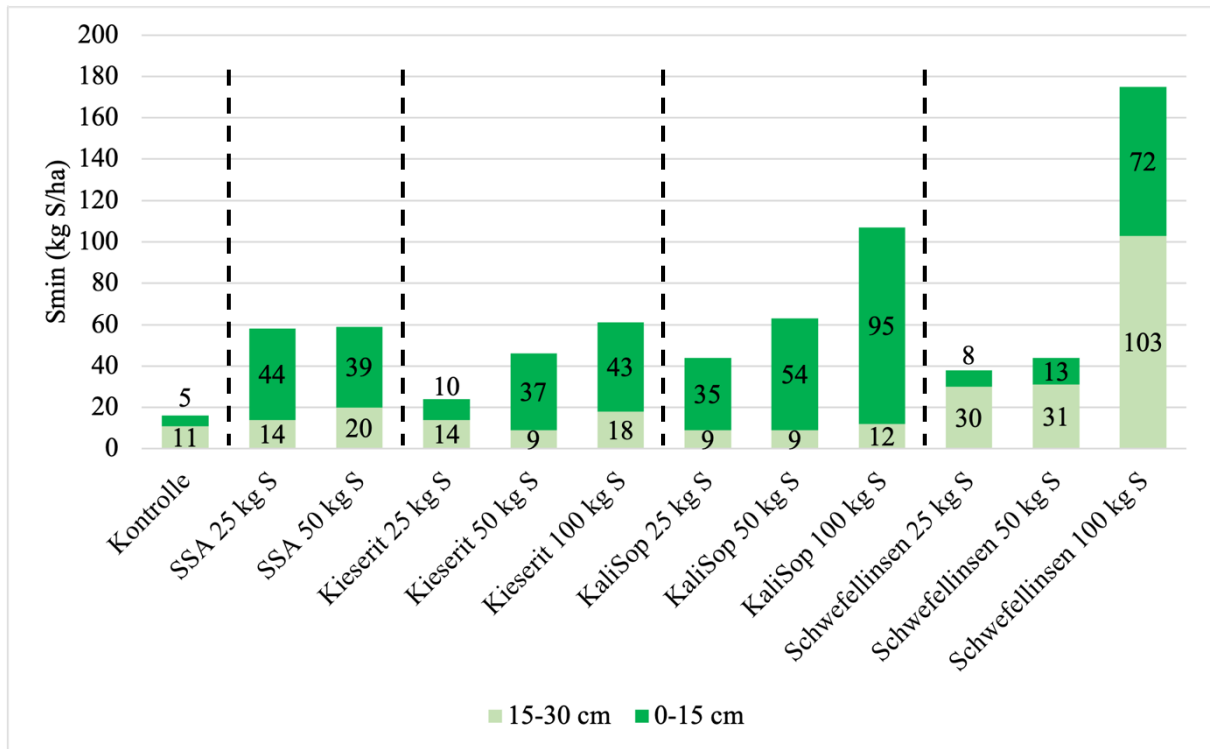


Abbildung 15: Untersuchung des S_{\min} -Gehaltes vom 22. April 2025 in den Tiefen 0-15 und 15-30 cm in kg S/ha

Bei der Betrachtung des Diagrammes wird deutlich, dass die S_{\min} -Gehalte, bis auf einige Ausnahmen, in der oberen Bodenschicht von 0 bis 15 cm höher sind als in der tieferen Bodenschicht von 15 bis 30 cm. Zu den Ausnahmen zählen besonders die Kontrolle sowie die Varianten mit Schwefellinsen. Aber auch in der Kieserit-Variante mit 25 kg S/ha übersteigt der S_{\min} -Gehalt der unteren Bodenschicht den der oberen leicht. In der oberen Bodenschicht von 0 bis 15 cm wurde der geringste S_{\min} -Gehalt von 5 kg S/ha in der Kontrolle und der höchste S_{\min} -Gehalt von 95 kg S/ha in der KaliSop-Variante mit 100 kg S/ha gemessen. Im Gegensatz dazu wurde in der unteren Bodenschicht von 15 bis 30 cm der geringste S_{\min} -Gehalt von 9 kg S/ha in der Kieserit-Variante mit 50 kg S/ha sowie in den beiden KaliSop-Varianten mit 25 und 50 kg S/ha gemessen. Die Betrachtung des Bodenprofils als Ganzes (Tiefe 0 bis 30 cm) zeigt, dass die Erhöhung der Schwefelmenge eines Düngemittels stets die Erhöhung des S_{\min} -Gehaltes im Boden nach sich zieht. Besonders deutlich wird dies bei den Varianten mit Kieserit und KaliSop. Über die gesamte Tiefe bis 30 cm wurde der geringste S_{\min} -Gehalt von 16 kg S/ha in der Kontrolle und der höchste S_{\min} -Gehalt von 175 kg S/ha in der Schwefellinsen-Variante mit 100 kg S/ha erfasst.

Die untenstehende Abbildung 16 veranschaulicht die Ergebnisse der S_{\min} -Untersuchung der Probenahme am 12. Mai 2025 für die 12 verschiedenen Varianten. Auch hier werden die Tiefen von 0 bis 15 cm und 15 bis 30 cm abgebildet. Die Werte sind in kg S/ha angegeben.

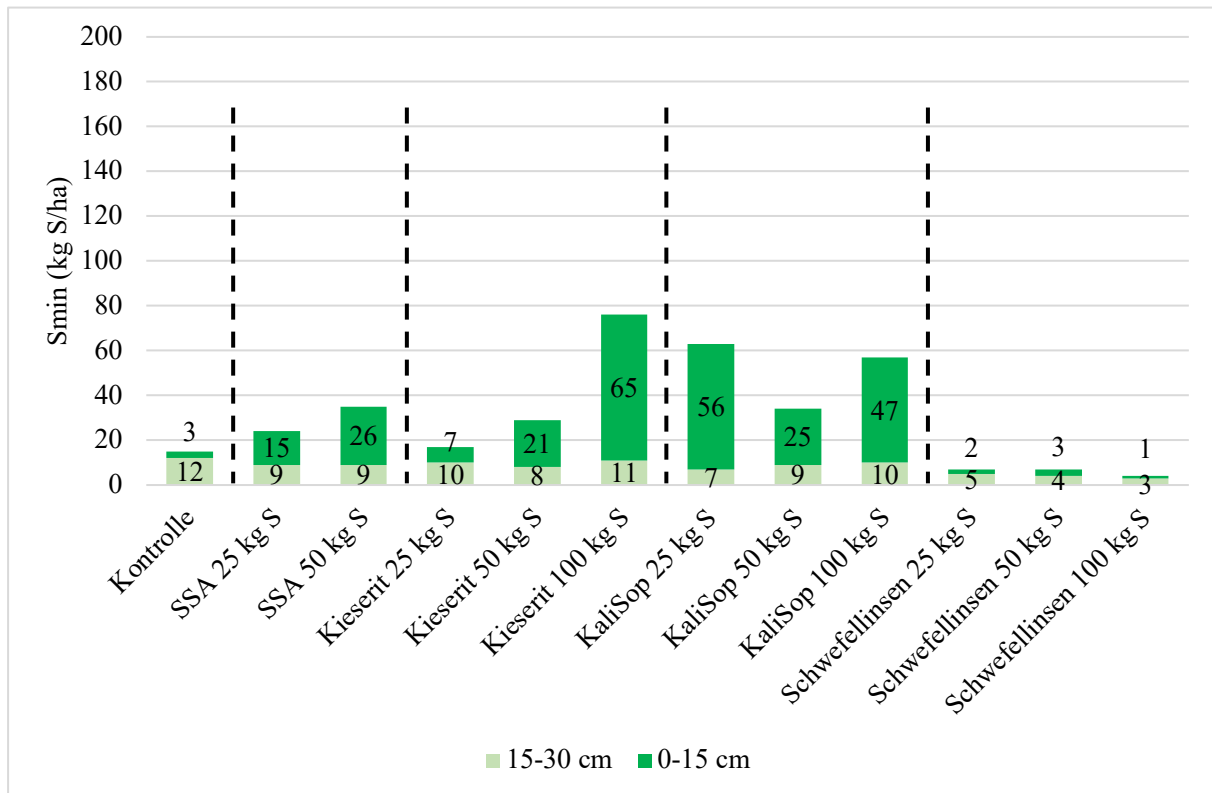


Abbildung 16: Untersuchung des S_{\min} -Gehaltes vom 12. Mai 2025 in den Tiefen 0-15 und 15-30 cm in kg S/ha

Auch bei der Betrachtung der Ergebnisse der zweiten Probenahme am 12. Mai 2025 zeigt sich, dass die S_{\min} -Gehalte in der oberen Bodenschicht von 0 bis 15 cm grundsätzlich höher sind als in der tieferen Bodenschicht von 15 bis 30 cm. Es zeigen sich die gleichen Ausnahmen wie in der Darstellung der ersten Probenahme (Kontrolle, Schwefellinsen und Kieserit 25 kg S/ha). In der oberen Bodenschicht von 0 bis 15 cm wurde der geringste S_{\min} -Gehalt von 1 kg S/ha in der Schwefellinsen-Variante mit 100 kg S/ha und der höchste S_{\min} -Gehalt von 65 kg S/ha in der Kieserit-Variante mit 100 kg S/ha gemessen. Auch in der unteren Bodenschicht von 15 bis 30 cm wurde der geringste S_{\min} -Gehalt von 3 kg S/ha in der Schwefellinsen-Variante mit 100 kg S/ha gemessen. Der höchste S_{\min} -Gehalt der unteren Bodenschicht von 12 kg S/ha in der Kontrolle übersteigt den S_{\min} -Gehalt der Kieserit-Variante mit 100 kg S/ha um 1 kg S/ha. Bei der Betrachtung des gesamten Bodenprofils (Tiefe 0 bis 30 cm) zeigen die Varianten mit SSA und Kieserit, dass die Erhöhung der Schwefelmenge des Düngemittels eine Erhöhung des S_{\min} -Gehaltes im Boden hervorruft. In den Varianten mit KaliSop und Schwefellinsen ist dies nicht der Fall. In Bezug auf das gesamte Bodenprofil von 0 bis 30 cm fallen besonders die Varianten mit den Schwefellinsen auf. Der S_{\min} -Gehalt dieser liegt deutlich unter der Kontrolle. In der Variante der Schwefellinsen mit 100 kg S/ha wurden bis in eine Tiefe von 30 cm nur 4 kg S/ha gemessen. Der höchste S_{\min} -Gehalt von 76 kg S/ha über die gesamte Tiefe bis 30 cm wurde in der Kieserit-Variante mit 100 kg S/ha erfasst.

In der Kontrolle (Variante 1), der SSA-Variante mit 50 kg S/ha (Variante 3) sowie der Schwefellinsen-Variante mit 50 kg S/ha (Variante 11) sind zusätzlich die N_{\min} -Gehalte des Bodens bestimmt worden. Die untenstehende Abbildung 17 stellt für diese drei Varianten die Ergebnisse der beiden Probenahme-Termine gegenüber. Die Werte beschränken sich auf eine Bodentiefe von 0 bis 15 cm und sind in kg N/ha angegeben.

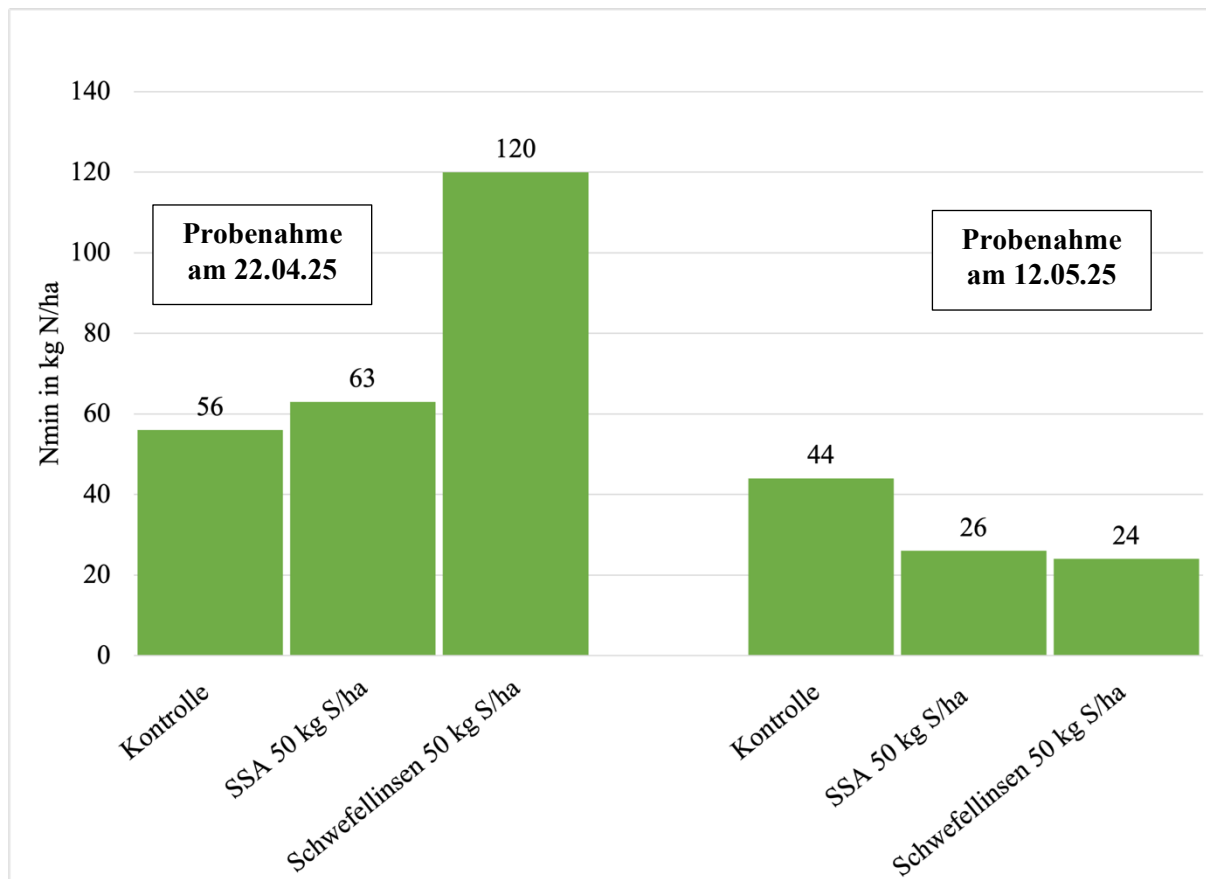


Abbildung 17: N_{\min} -Gehalte des Bodens am 22. April 2025 und 12. Mai 2025 in den Varianten 1, 3 und 11 in einer Bodentiefe von 0 bis 15 cm in kg N/ha

Für den ersten Termin der Probenahme am 22. April 2025 wurde der geringste N_{\min} -Gehalt des Bodens von 56 kg N/ha in der Kontroll-Variante gemessen. In der Schwefellinsen-Variante konnte der höchste N_{\min} -Gehalt von 120 kg N/ha erfasst werden. Die SSA-Variante liegt mit 63 kg N/ha zwischen diesen beiden Werten. Auch wenn die N_{\min} -Gehalte grundsätzlich geringer sind, zeigen die Ergebnisse des zweiten Termins am 12. Mai 2025 ein spiegelverkehrtes Bild des ersten Termins. Hier wurde in der Variante mit den Schwefellinsen der geringste Wert von 24 kg N/ha gemessen. Die SSA-Variante folgt knapp mit 26 kg N/ha. Der höchste N_{\min} -Gehalt des zweiten Termins von 44 kg N/ha konnte in der Kontroll-Variante ermittelt werden.

5.2 Pflanzenanalyse

Die untenstehenden Tabellen 8 und 9 zeigen die Ergebnisse der Pflanzenanalysen für die Probenahmen am 22. April 2025 und 12. Mai 2025 für die verschiedenen Versuchsvarianten. In Bezug auf die Einordnung in die verschiedenen Klassen wird vom Labor für beide Termine ein Optimum für Schwefel von 0,3 bis 0,55 Ma.-% TS angegeben.

Tabelle 8: Ergebnisse Pflanzenanalyse, Probenahme am 22. April 2025

Variante	S-Gehalt in Ma.-% TS	Klasse	N:S-Verhältnis
Kontrolle	0,22	A	14,14
SSA 25 kg S/ha	0,24	A	15,33
SSA 50 kg S/ha	0,22	A	13,68
Kieserit 25 kg S/ha	0,24	A	14,08
Kieserit 50 kg S/ha	0,26	A	14,38
Kieserit 100 kg S/ha	0,27	B	13,96
KaliSop 25 kg S/ha	0,26	A	14,38
KaliSop 50 kg S/ha	0,25	A	13,80
KaliSop 100 kg S/ha	0,27	B	14,37
Schwefellinsen 25 kg S/ha	0,24	A	14,71
Schwefellinsen 50 kg S/ha	0,24	A	14,63
Schwefellinsen 100 kg S/ha	0,25	A	14,92

Bei der Betrachtung der Ergebnisse des ersten Termins am 22. April 2025 (Tabelle 8) wird deutlich, dass sich der Schwefelgehalt in der Pflanze zwischen 0,22 Ma.-% TS in der Kontroll-Variante und der SSA-Variante mit 50 kg S/ha und 0,27 Ma.-% TS in der Kieserit-Variante mit 100 kg S/ha und der KaliSop-Variante mit 100 kg S/ha bewegt. Diese beiden zuletzt genannten Varianten sind zudem die einzigen, die in die Klasse B eingeordnet werden können. Alle anderen Varianten werden der Klasse A zugeordnet. Das N:S-Verhältnis liegt zwischen 13,68 in der SSA-Variante mit 50 kg S/ha und 15,33 in der SSA-Variante mit 25 kg S/ha.

Tabelle 9: Ergebnisse Pflanzenanalyse, Probenahme am 12. Mai 2025

Variante	S-Gehalt in Ma.-% TS	Klasse	N:S-Verhältnis
Kontrolle	0,13	A	15,23
SSA 25 kg S/ha	0,16	A	12,06
SSA 50 kg S/ha	0,16	A	11,63
Kieserit 25 kg S/ha	0,14	A	13,79
Kieserit 50 kg S/ha	0,17	A	11,71
Kieserit 100 kg S/ha	0,15	A	13,87
KaliSop 25 kg S/ha	0,14	A	12,50
KaliSop 50 kg S/ha	0,17	A	11,41
KaliSop 100 kg S/ha	0,21	A	10,33
Schwefellinsen 25 kg S/ha	0,15	A	12,93
Schwefellinsen 50 kg S/ha	0,17	A	13,41
Schwefellinsen 100 kg S/ha	0,13	A	13,38

Die Tabelle 9 zeigt, dass die Schwefelgehalte in der Pflanze am zweiten Termin am 12. Mai 2025 unter denen des ersten Termins liegen. In der Kontrolle und der Schwefellinsen-Variante mit 100 kg S/ha wurde der geringste Schwefelgehalt von 0,13 Ma.-% TS ermittelt. Der höchste Schwefelgehalt von 0,21 Ma.-% TS wurde in der KaliSop-Variante mit 100 kg S/ha gemessen. Alle Varianten werden für den zweiten Termin ohne Ausnahme in die Klasse A eingeordnet. Die KaliSop-Variante mit 100 kg S/ha weist zudem das geringste N:S-Verhältnis von 10,33 auf. Das höchste N:S-Verhältnis von 15,23 wurde in der Kontrolle erfasst.

5.3 Untersuchungen des Bodenmikrobioms

Für die Kontroll-Variante sowie die Varianten mit Schwefellinsen wurden verschiedene Parameter im Bereich der Bodenbakterien und Enzyme untersucht. Im Rahmen der Analyse des Bodenmikrobioms konnten umfangreiche Daten erfasst werden. Für die vorliegende Arbeit wurde jedoch eine gezielte Auswahl der zentralen, thematisch relevanten Ergebnisse vorgenommen.

5.3.1 Boden-Bakterien

Für jede der vier untersuchten Varianten wurden die häufigsten Bakterien-Gattungen ermittelt. Die untenstehende Abbildung 18 zeigt den Durchschnitt (über die vier Wiederholungen) der relativen Häufigkeit der häufigsten Bakterien-Gattungen in den verschiedenen Varianten für den ersten Termin am 22. April 2025 in Prozent (%).

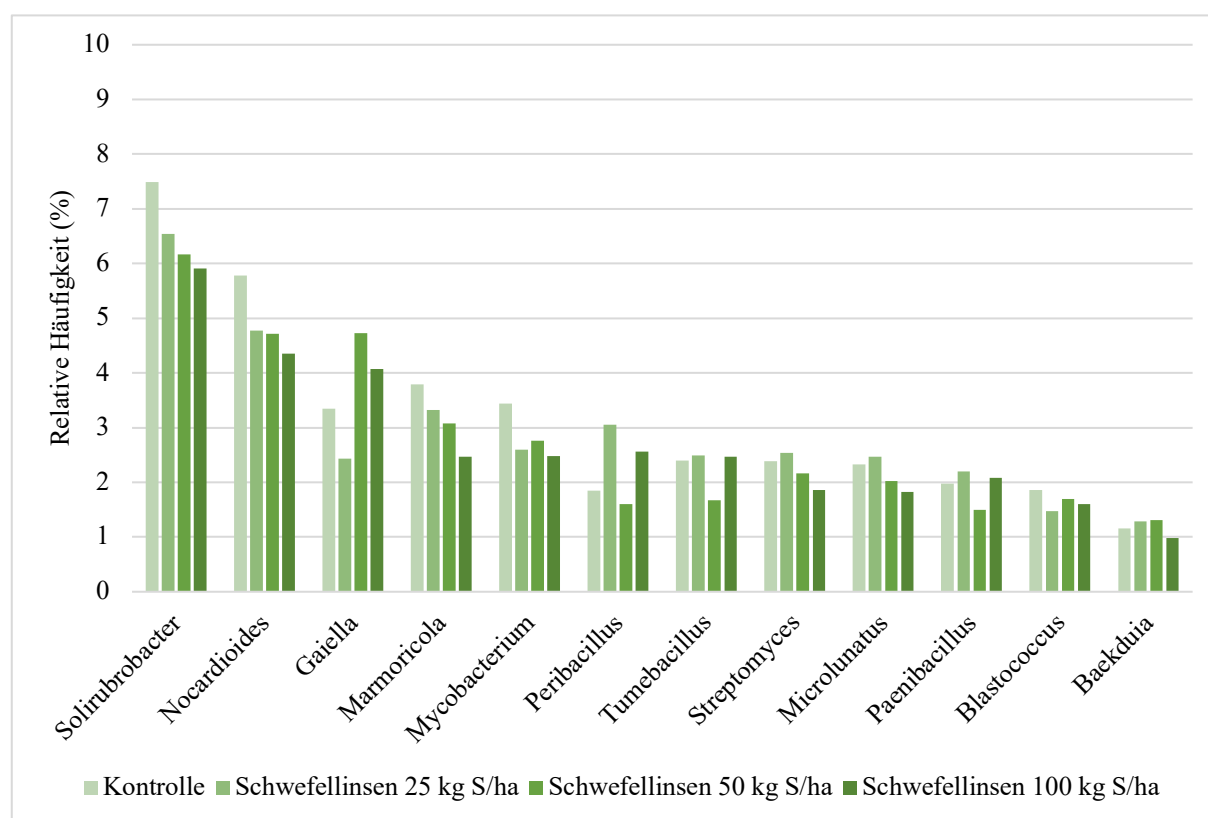


Abbildung 18: Durchschnitt der relativen Häufigkeit der häufigsten Bakterien-Gattungen in den verschiedenen Varianten für den Termin der Probenahme am 22. April 2025 in Prozent (%)

Es wird deutlich, dass sich die Zusammensetzung der Bakterien-Gesellschaft zwischen den Varianten ähnelt. Dies wird besonders unter dem Aspekt deutlich, dass eine Vielzahl an Gattungen erfasst werden konnte und der Pool der 12 wichtigsten Gattungen für jede Variante weitestgehend übereinstimmt. Die Reihenfolge der häufigsten Gattungen unterscheiden sich jedoch zwischen den Varianten. In allen Varianten konnten die *Solirubrobacter* jedoch als häufigste Gattung bestimmt werden.

Die untenstehende Abbildung 19 zeigt den Durchschnitt (über die vier Wiederholungen) der relativen Häufigkeit der häufigsten Bakterien-Gattungen in den verschiedenen Varianten für den zweiten Termin am 12. Mai 2025 in Prozent (%).

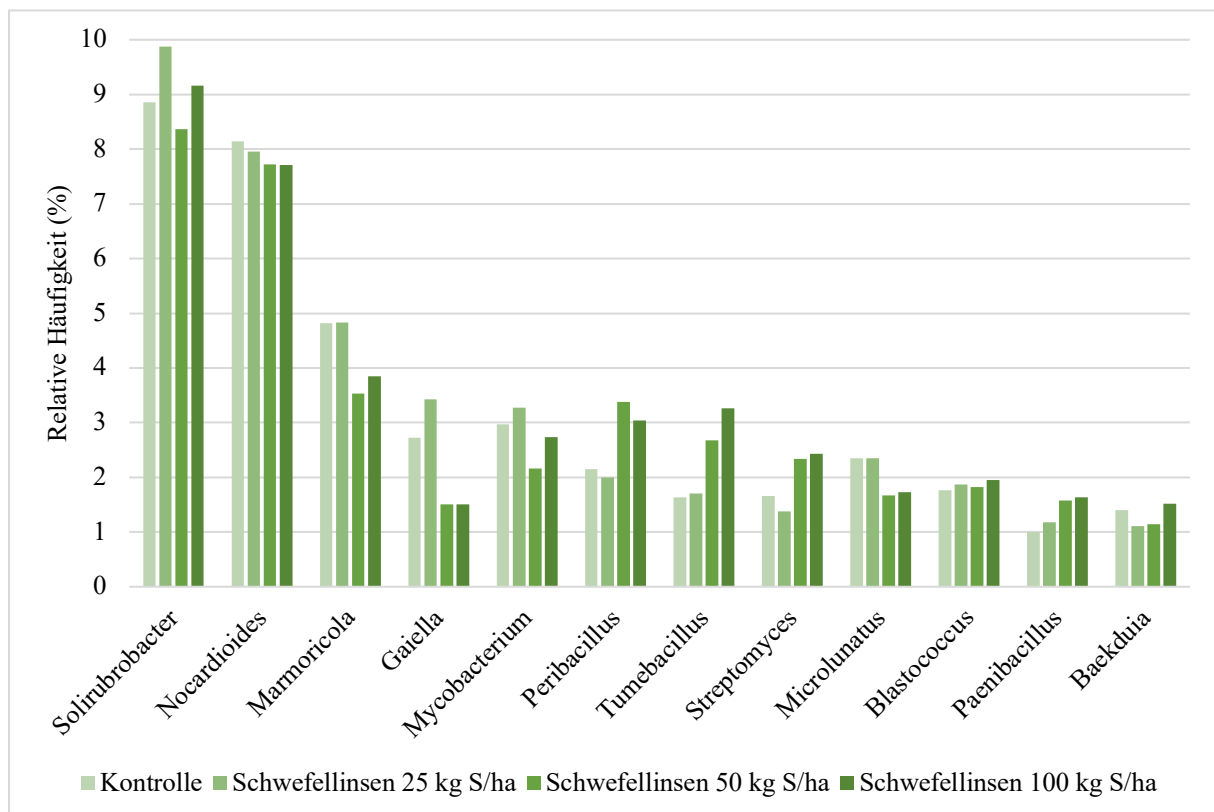


Abbildung 19: Durchschnitt der relativen Häufigkeit der häufigsten Bakterien-Gattungen in den verschiedenen Varianten für den Termin der Probenahme am 12. Mai 2025 in Prozent (%)

Es zeigt sich, dass sich im Pool die gleichen Bakterien-Gattungen befinden wie am ersten Termin. Auch hier ist die Zusammensetzung der Bakterien-Gesellschaft zwischen den Varianten sehr ähnlich. Ohne eine Ausnahme stimmt der abgebildete Pool der 12 wichtigsten Gattungen für jede Variante überein. Die Reihenfolge der wichtigsten Gattungen ist aber auch am zweiten Termin für jede Variante unterschiedlich. Die Gattung der *Solirubrobacter* konnte jedoch auch hier wieder als häufigste Gattung in allen Varianten bestimmt werden.

Bei der Betrachtung der Abbildung des zweiten Termins wird deutlich, dass sich die Schwefel-linsen-Varianten mit 50 kg S/ha und 100 kg S/ha im Hinblick auf einige Bakterien-Gattungen deutlich von den anderen beiden Varianten abgrenzen. So liegen die Durchschnitte der relativen Häufigkeiten dieser beiden Varianten beispielsweise in der Gattungen *Marmoricola*, *Gaiella* und *Microlunatus* deutlich unter denen der Kontrolle und der Variante mit 25 kg S/ha. Bei den Gattungen *Peribacillus*, *Tumebacillus* und *Streptomyces* übersteigen die durchschnittlichen relativen Häufigkeiten der höher gedüngten Varianten die Kontrolle und die Variante mit 25 kg S/ha jedoch.

Um diesen Effekt der Düngung ab einer Schwefelmenge von 50 kg/ha genauer zeigen zu können, sind die Lage- und Streuungsmaße der relativen Häufigkeiten der Gattungen *Streptomyces*, *Peribacillus* und *Tumebacillus* in den verschiedenen Varianten für den zweiten Probenahmetermin am 12. Mai 2025 in Form von Boxplots in der untenstehenden Abbildung 20 dargestellt. Besonders bei den Gattungen *Streptomyces* und *Tumebacillus* wird der beschriebene Effekt deutlich. Die Signifikanz der Gattung *Peribacillus* kann mit einem p-Wert von 0,05 diskutiert werden.

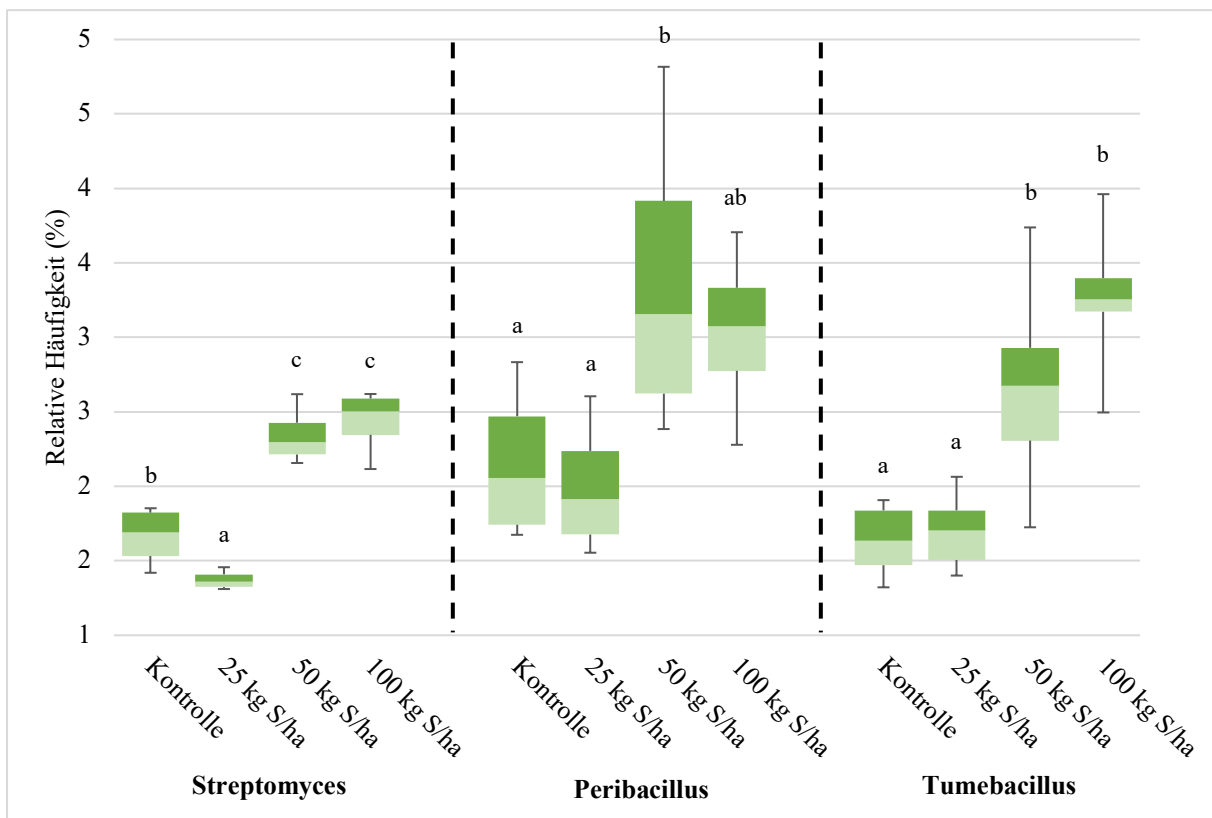


Abbildung 20: Lage- und Streuungsmaße der relativen Häufigkeiten der Gattungen *Streptomyces*, *Peribacillus* und *Tumebacillus* in den verschiedenen Varianten für den Probenahmetermin am 12. Mai 2025

5.3.2 Enzyme

Arylsulfatase

Die untenstehende Abbildung 21 zeigt die durchschnittliche Substratumwandlungsrate des Enzyms Arylsulfatase in Nanomol je Gramm und Stunde (nmol/g/h) in den verschiedenen Varianten für beide Termine der Probenahme. Es wird deutlich, dass die Umwandlungsrate am ersten Termin grundsätzlich auf einem höheren Niveau liegt als am zweiten Termin. An beiden Terminen sticht die Variante mit 100 kg S/ha durch besonders hohe Umwandlungsraten hervor. Für die einzelnen Termine konnten signifikante Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden.

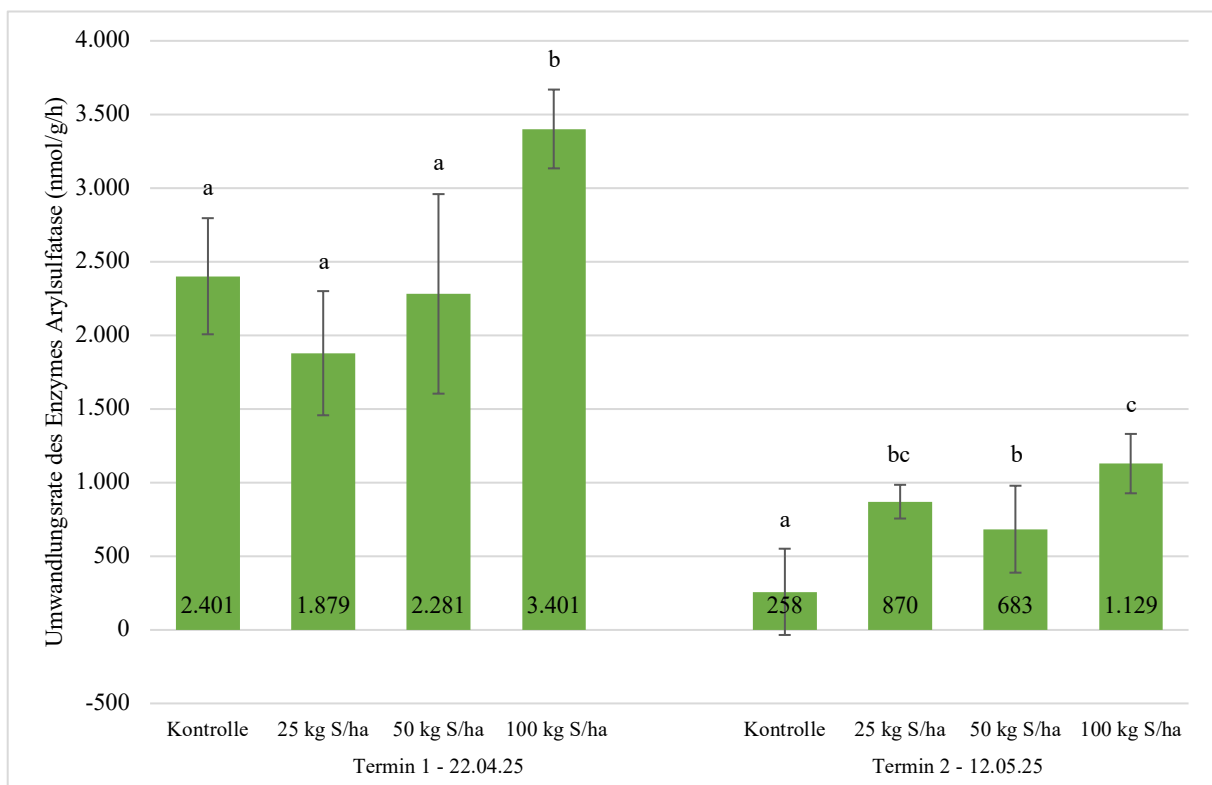


Abbildung 21: Durchschnittliche Substratumwandlungsrate des Enzyms Arylsulfatase in Nanomol je Gramm und Stunde (nmol/g/h) in den verschiedenen Varianten für beide Termine der Probenahme

Polyphenol-Oxidase

Die untenstehende Abbildung 22 veranschaulicht die durchschnittliche Substratumwandlungsrate des Enzyms Polyphenol-Oxidase in Einheiten je Gramm (U/g) in den verschiedenen Varianten für beide Termine der Probenahme. Das Diagramm zeigt, dass die Umwandlungsrate zum Zeitpunkt des ersten Termins im April grundsätzlich auf einem deutlich höheren Niveau liegt als zum Zeitpunkt des zweiten Termins im Mai. Für beide Termine gilt, dass die Umwandlungsrate mit steigender Düngemenge tendenziell sinkt. Für den ersten Termin konnten jedoch zwischen den Varianten keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden. Für den zweiten Termin wird das Signifikanzniveau von $p < 0,05$ jedoch erreicht.

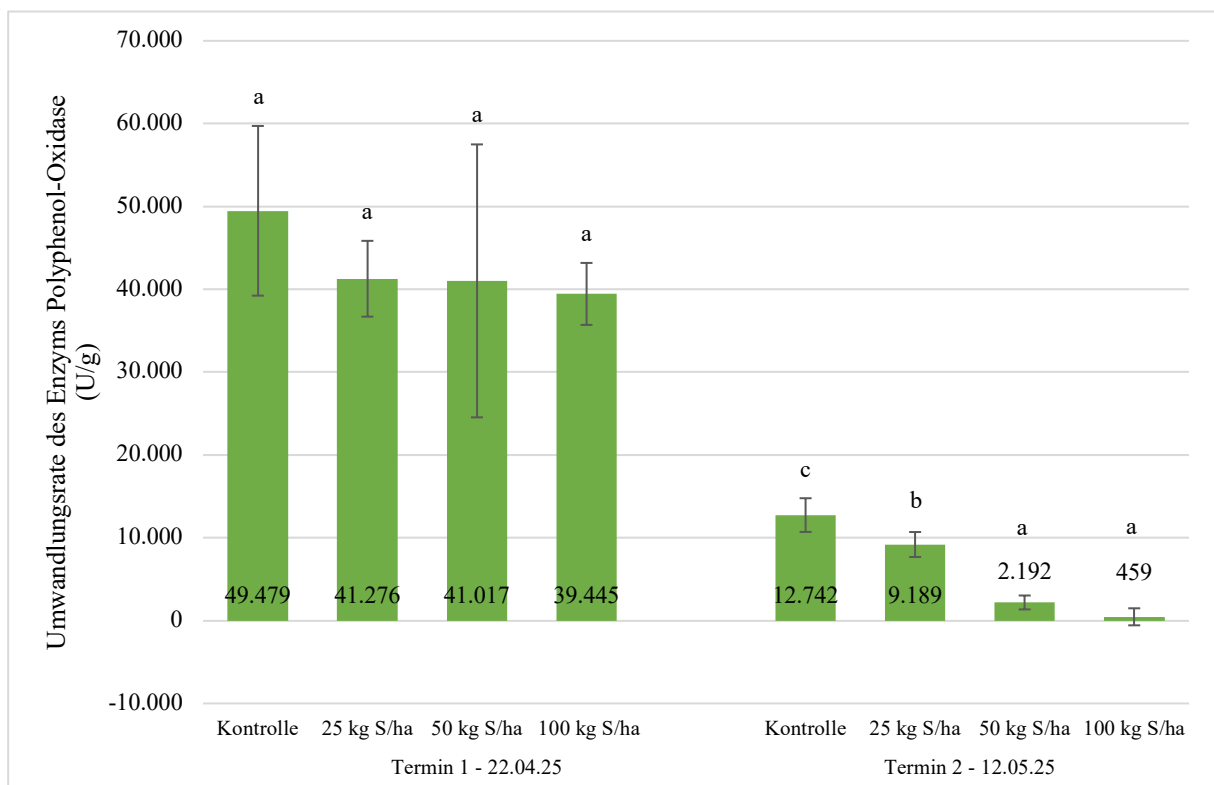


Abbildung 22: Durchschnittliche Substratumwandlungsrate des Enzyms Polyphenol-Oxidase in Einheiten je Gramm (U/g) in den verschiedenen Varianten für beide Termine der Probenahme

5.4 Ertrags- und Qualitätsparameter

Ähren pro Quadratmeter

Die untenstehende Abbildung 23 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der gezählten Ähren pro Quadratmeter in Abhängigkeit des Düngemittels und der gedüngten Schwefelmenge in absoluten Zahlen. Mit einer durchschnittlichen Anzahl von 461 Ähren pro Quadratmeter erreichte die Schwefellinsen-Variante mit 25 kg S/ha den höchsten Mittelwert, die Kontrolle mit 406 Ähren pro Quadratmeter im Gegensatz dazu den geringsten. Zwischen dem höchsten und dem geringsten Mittelwert liegt folglich eine Differenz von 55 Ähren. Auffällig sind die hohen Standardabweichungen, besonders in den Kieserit-Varianten mit 25 kg S/ha und 100 kg S/ha (Vgl. Anhang).

Bei der Überprüfung der Signifikanz, welche nach der im vorausgehenden Abschnitt 4.6. beschriebenen statistischen Methode durchgeführt wurde, konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten ermittelt werden.

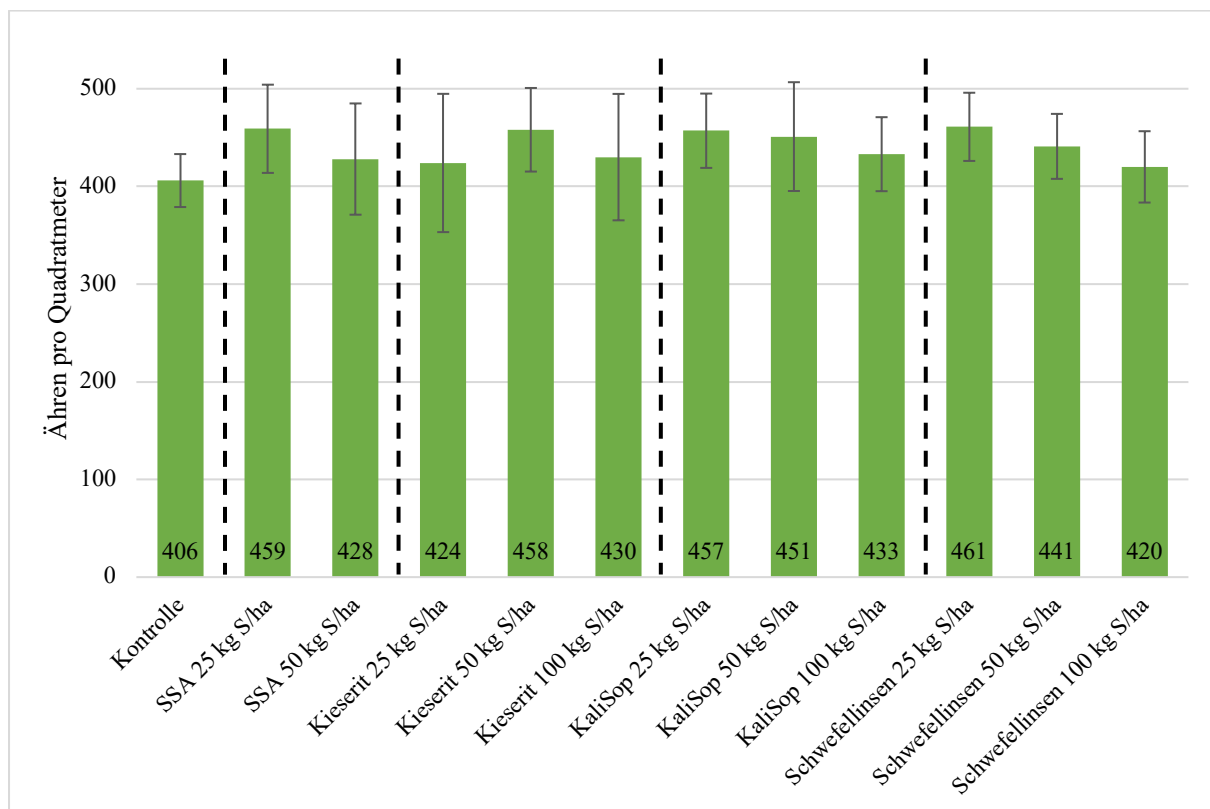


Abbildung 23: Mittelwerte und Standardabweichungen der Ähren pro Quadratmeter in Abhängigkeit des Düngemittels und der gedüngten Schwefelmenge in absoluten Zahlen

Kornertrag

Die Abbildung 24 veranschaulicht die Mittelwerte und Standardabweichungen des Kornertrages in Abhängigkeit des Düngemittels und der gedüngten Schwefelmenge in Dezitonnen pro Hektar (dt/ha). Der Kornertrag bezieht sich dabei auf eine Standardfeuchte von 14,5 %. Die Kieserit-Variante mit 100 kg S/ha und die KaliSop-Variante mit 50 kg S/ha erreichen den höchsten Mittelwert von 88,2 dt/ha. In der Kontrolle liegt der geringste Mittelwert von 78,8 dt/ha vor. Die SSA-Variante mit 50 kg S/ha liegt auf einem ähnlichen Niveau. Die Varianten mit Kieserit zeigen, dass der Kornertrag mit einer steigenden Schwefelmenge tendenziell auch steigt. Die Varianten mit SSA und Schwefellinsen zeigen eher das Gegenteil. Die Standardabweichungen bewegen sich zwischen 7,09 dt/ha in der Schwefellinsen-Variante mit 50 kg S/ha und 15,26 dt/ha in der Kieserit-Variante mit 25 kg S/ha (Vgl. Anhang).

Bei der Überprüfung der Signifikanz konnte unabhängig von der gedüngten Schwefelmenge ein signifikanter Einfluss des Düngemittels auf den Kornertrag ermittelt werden. Dabei unterscheidet sich der durchschnittliche Kornertrag der unbehandelten Kontrolle signifikant von dem durchschnittlichen Kornertrag der Düngemittel Kieserit, KaliSop und Schwefellinsen. Zudem unterscheiden sich der durchschnittliche Kornertrag der Düngemittel SSA und KaliSop signifikant.

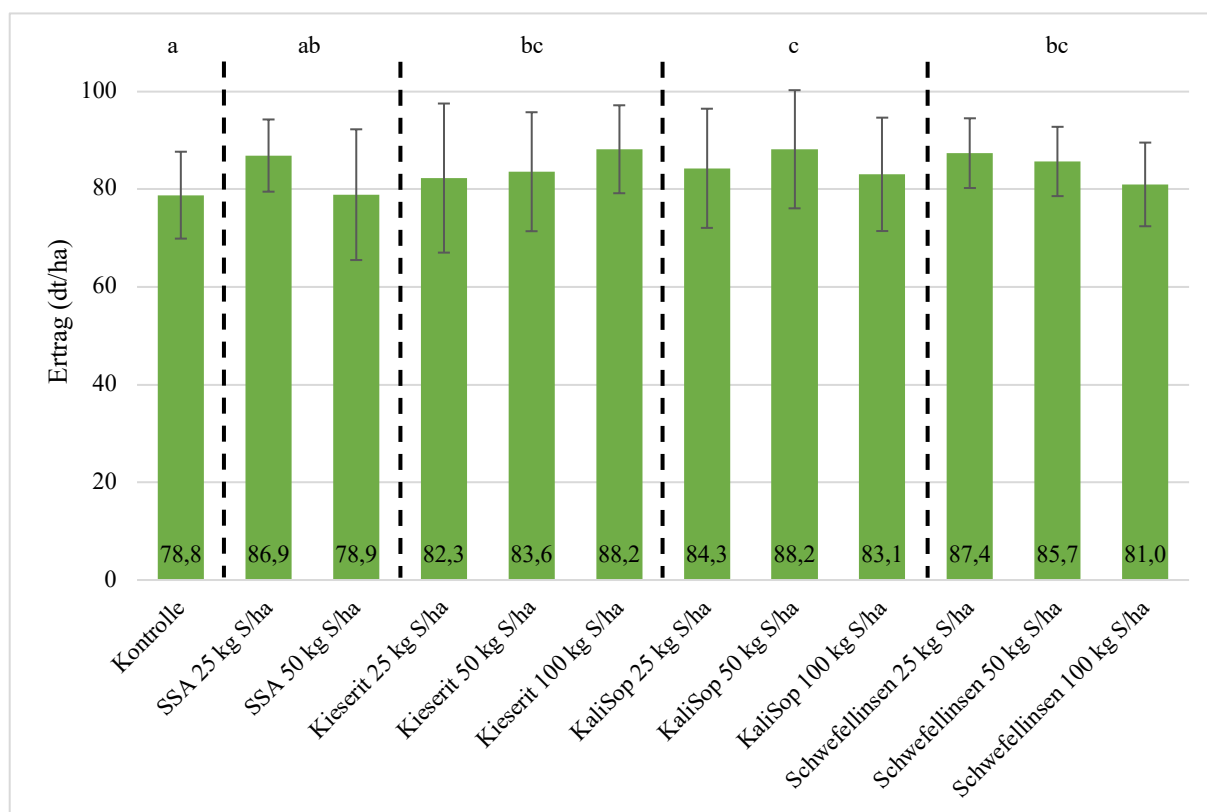


Abbildung 24: Mittelwerte und Standardabweichungen des Ertrages in Abhängigkeit des Düngemittels und der gedüngten Schwefelmenge in Dezitonnen pro Hektar

Tausendkorngewicht

Die Mittelwerte und Standardabweichungen des Tausendkorngewichtes in Abhängigkeit des Düngemittels und der gedüngten Schwefelmenge sind in Abbildung 25 dargestellt. Das Tausendkorngewicht wird in Gramm (g) angegeben. In der SSA-Variante mit 50 kg S/ha wurde das geringste mittlere Tausendkorngewicht von 47,5 g ermittelt. Im Gegensatz dazu erreichte die Kieserit-Variante mit 50 kg S/ha das höchste mittlere Tausendkorngewicht von 50,4 g. Aber auch die beiden Schwefellinsen-Varianten mit 25 kg S/ha und 50 kg S/ha konnten einen Mittelwert von etwas mehr als 50 g erreichen. Die Standardabweichung bewegt sich zwischen 0,53 g in der KaliSop-Variante mit 100 kg S/ha und 3,36 g in der KaliSop-Variante mit 50 kg S/ha (Vgl. Anhang).

Bezüglich des Tausendkorngewichtes konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten nachgewiesen werden.

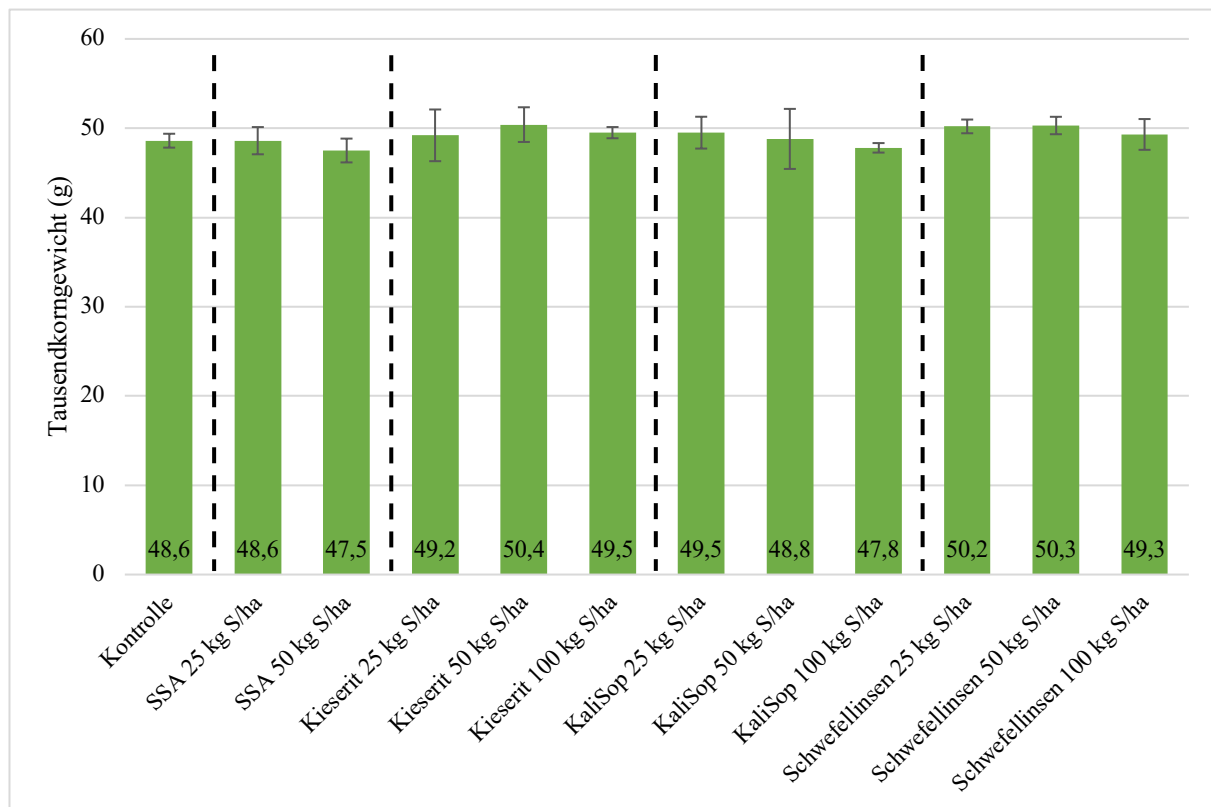


Abbildung 25: Mittelwerte und Standardabweichungen des Tausendkorngewichtes in Abhängigkeit des Düngemittels und der gedüngten Schwefelmenge in Gramm

Hektolitergewicht

Die untenstehende Abbildung 26 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen des Hektolitergewichtes in Abhängigkeit des Düngemittels und der gedüngten Schwefelmenge in Kilogramm je Hektoliter (kg/hl). Das durchschnittliche Hektolitergewicht bewegt sich zwischen den verschiedenen Varianten auf einem ähnlichen Niveau. In der Kontrolle und der KaliSop-Variante mit 100 kg S/ha liegt der geringste Mittelwert von 79,6 kg/hl und in der Schwefellinsen-Variante mit 50 kg S/ha der höchste Mittelwert von 80,3 kg/hl vor. Bis auf die Kieserit-Variante mit 25 kg S/ha und die KaliSop-Variante mit 50 kg S/ha weisen alle anderen Varianten eine Standardabweichung von weniger als 1 kg/ha auf (Vgl. Anhang).

Auch hier konnte bei der Überprüfung der Signifikanz die Signifikanzgrenze nicht erreicht werden, sodass auch hier keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Varianten nachgewiesen werden können.

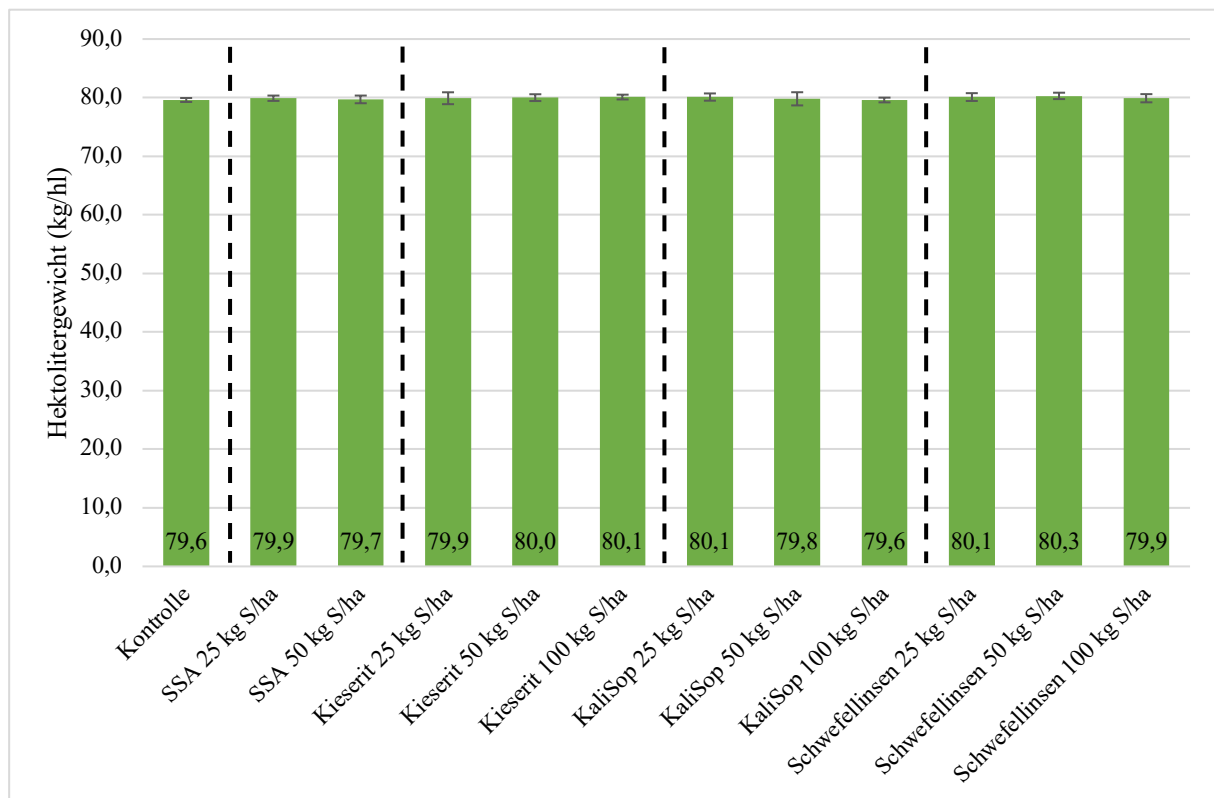


Abbildung 26: Mittelwerte und Standardabweichungen des Hektolitergewichtes in Abhängigkeit des Düngemittels und der gedüngten Schwefelmenge in Kilogramm je Hektoliter

Rohproteingehalt

Ähnlich wie das Hektolitergewicht bewegen sich die Mittelwerte des Rohproteingehaltes zwischen den verschiedenen Varianten auf einem ähnlichen Niveau. Der geringste Mittelwert von 11,5 % liegt in der Schwefellinsen-Variante mit 25 kg S/ha vor. Die beiden SSA-Varianten erreichen den höchsten Mittelwert von 11,9 %. Folglich erreicht keine der Varianten einen mittleren Rohproteingehalt von mindestens 12 %. Die Standardabweichung bewegt sich zwischen 0,15 % in der Kontrolle und 0,54 % in der Kieserit-Variante mit 25 kg S/ha (Vgl. Anhang). Die Ergebnisse werden in der untenstehenden Abbildung 27 veranschaulicht. Die Werte werden in Prozent (%) angegeben.

Bezüglich des Rohproteingehaltes konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden.

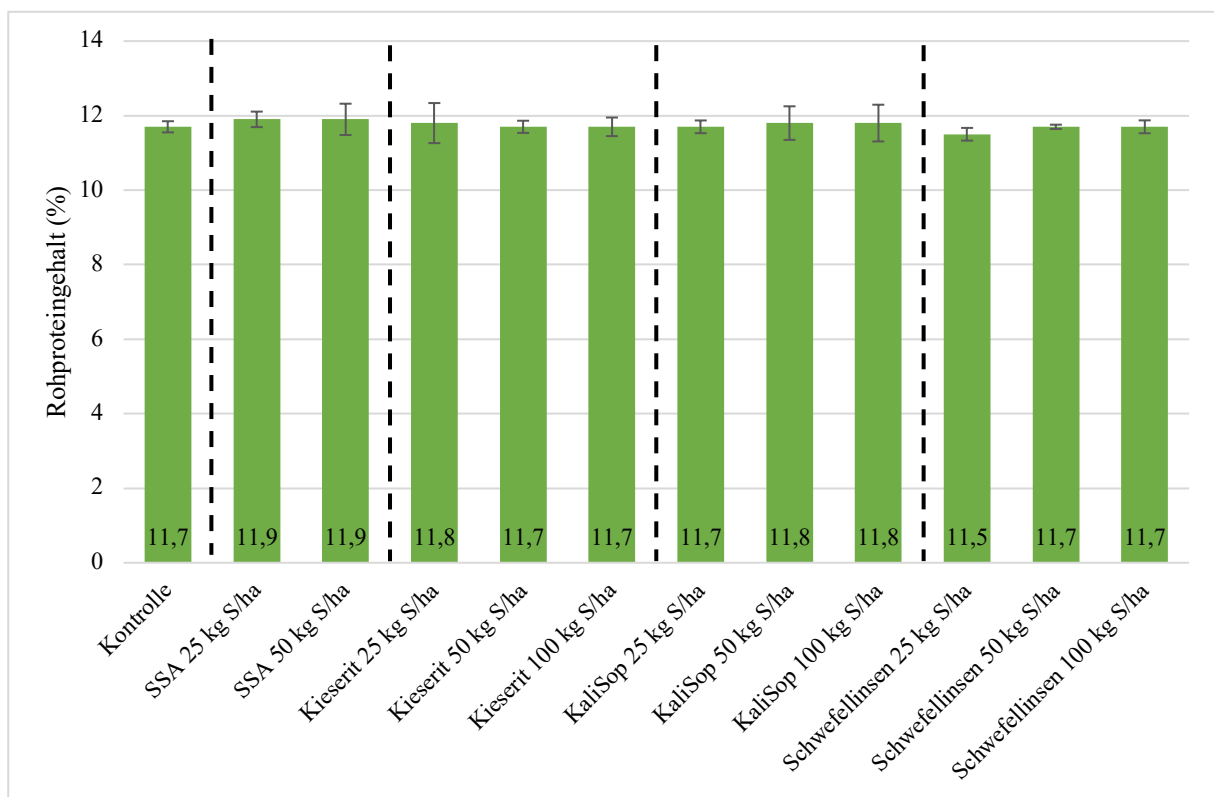


Abbildung 27: Mittelwerte und Standardabweichungen des Rohproteingehaltes in Abhängigkeit des Düngemittels und der gedüngten Schwefelmenge in Prozent

Klebergehalt

Die Mittelwerte und Standardabweichungen des Klebergehaltes in Abhängigkeit des Düngemittels und der gedüngten Schwefelmenge werden in der Abbildung 28 gezeigt. Die Werte werden in Prozent (%) angegeben. Die Schwefellinsen-Variante mit 25 kg S/ha liegt als einzige Variante unter einem Mittelwert von 23 %. Der höchste Mittelwert von 23,6 % wird sowohl in der SSA-Variante mit 25 kg S/ha als auch in der KaliSop-Variante mit 100 kg S/ha erreicht. Zwischen dem höchsten Mittelwert und dem geringsten Mittelwert liegt eine Differenz von 1,0 %. Die Standardabweichung ist in der Schwefellinsen-Variante mit 50 kg S/ha mit einem Wert von 0,22 % am geringsten und in der KaliSop-Variante mit 100 kg S/ha mit einem Wert von 1,57 % am größten (Vgl. Anhang).

Zwischen den verschiedenen Varianten konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

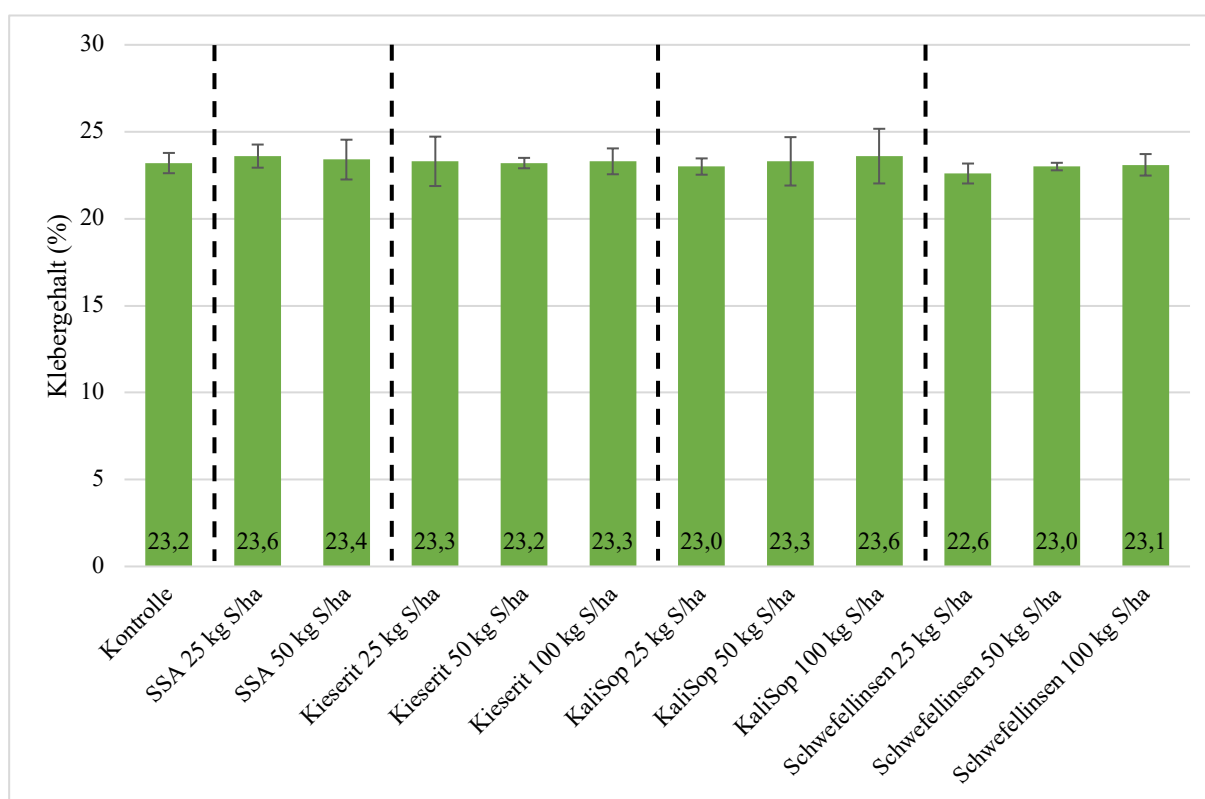


Abbildung 28: Mittelwerte und Standardabweichungen des Klebergehaltes in Abhängigkeit des Düngemittels und der gedüngten Schwefelmenge in Prozent

Sedimentationswert

Die untenstehende Abbildung 29 veranschaulicht die Mittelwerte und Standardabweichungen des Sedimentationswertes in Abhängigkeit des Düngemittels und der gedüngten Schwefelmenge in Milliliter (ml). Der geringste Mittelwert von 37,1 ml liegt in der Kontrolle vor. Die SSA-Variante mit 25 kg S/ha erreicht den höchsten mittleren Sedimentationswert von 39,4 ml. Auch die KaliSop-Variante mit 100 kg S/ha erreicht einen mittleren Wert von 39 ml. In dieser Variante fällt auch die hohe Standardabweichung von 3,74 ml auf. Die Standardabweichung der anderen Varianten liegt zwischen 0,41 ml in der Schwefellinsen-Variante mit 50 kg S/ha und 2,22 ml in der KaliSop-Variante mit 50 kg S/ha (Vgl. Anhang).

Auch bei der Betrachtung des Sedimentationswertes konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden.

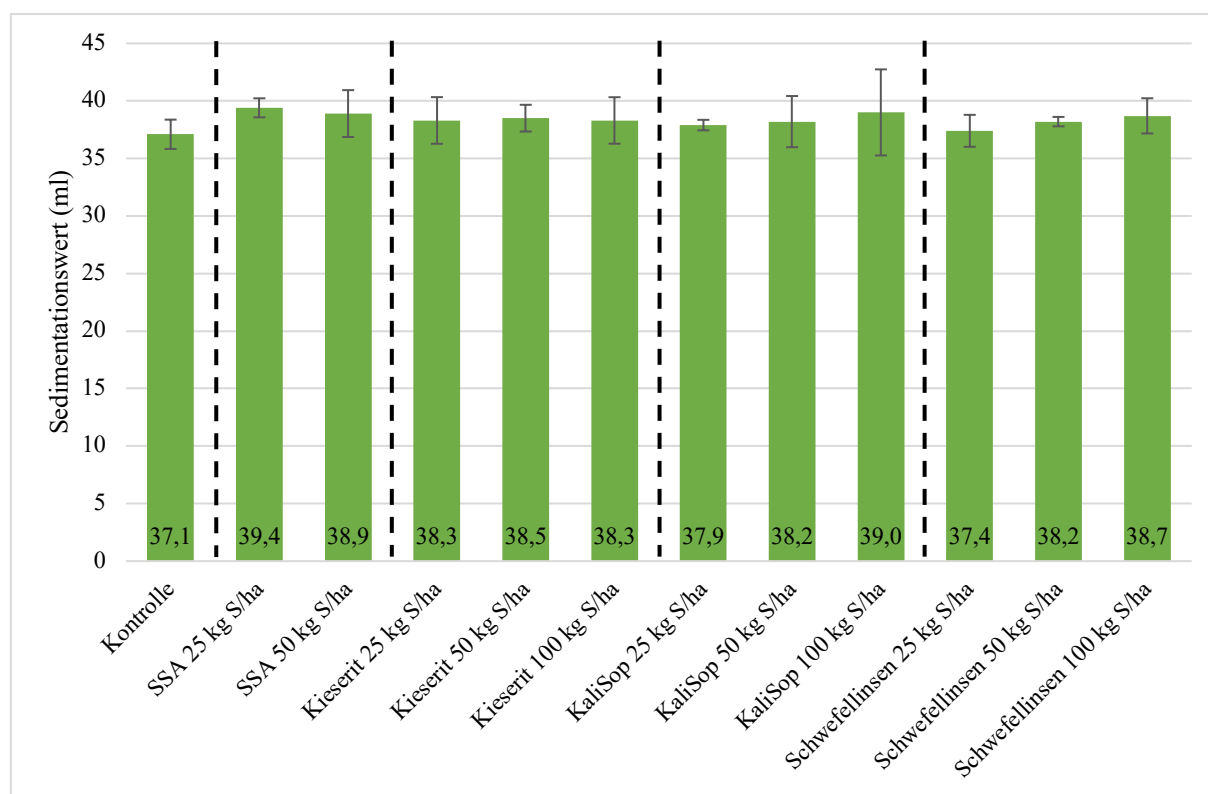


Abbildung 29: Mittelwerte und Standardabweichungen des Sedimentationswertes in Abhängigkeit des Düngemittels und der gedüngten Schwefelmenge in Milliliter

Feuchtigkeitsgehalt

Die Abbildung 30 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen des Feuchtigkeitsgehaltes in den verschiedenen Varianten in Prozent (%). Auffällig ist auch hier, dass die Mittelwerte zwischen den verschiedenen Varianten auf einem ähnlichen Niveau liegen. Zwischen dem geringsten Mittelwert von 16,8 % in der Kontroll-Variante und der SSA-Variante mit 25 kg S/ha und dem höchsten Mittelwert von 17,1 % in der KaliSop-Variante mit 25 kg S/ha liegt eine Differenz von 0,3 %. In der Schwefellinsen-Variante mit 25 kg S/ha liegt eine Standardabweichung von 0,00 % vor. Die höchste Standardabweichung von 0,29 % wurde in der SSA-Variante mit 50 kg S/ha sowie in der Kieserit-Variante mit 25 kg S/ha bestimmt (Vgl. Anhang).

Auch bei der Betrachtung des Feuchtigkeitsgehaltes konnten zwischen den verschiedenen Varianten keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden.

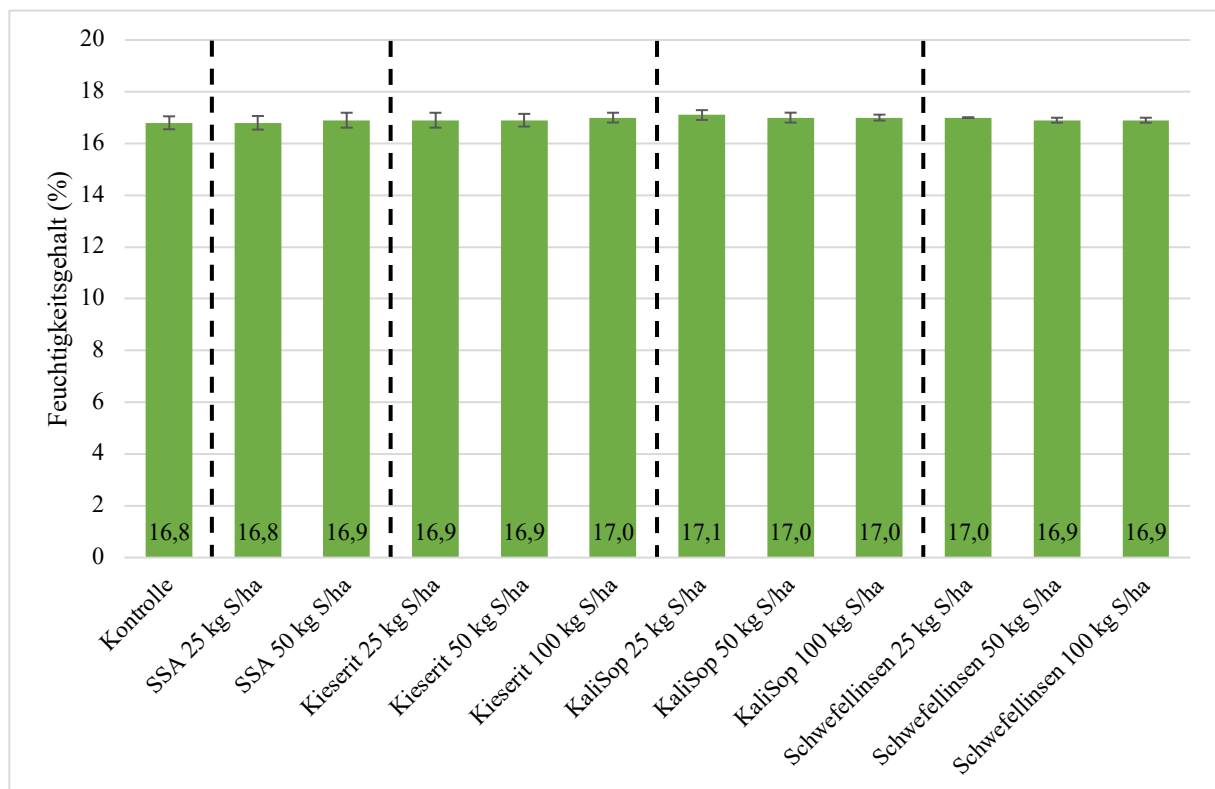


Abbildung 30: Mittelwerte und Standardabweichungen des Feuchtigkeitsgehaltes in Abhängigkeit des Düngemittels und der gedüngten Schwefelmenge in Prozent

6. Diskussion

S_{min}- und N_{min}-Werte

Um den Gehalt an mineralisierten pflanzenverfügbaren Schwefel im Boden einschätzen zu können, wurden am 22. April (EC 31/32) sowie am 12. Mai 2025 (EC 39) S_{min}-Untersuchungen in den verschiedenen Varianten durchgeführt. Dabei wurden die Bodenschichten in den Tiefen 0 bis 15 cm und 15 bis 30 cm beprobt. Bei der Betrachtung der Ergebnisse ist zu beachten, dass nach Angaben des Labors bei den Proben des zweiten Termins im Mai die vorgegebene Maximaltemperatur überschritten wurde, weshalb Abweichungen zum Realwert möglich sind. Nach DLG (2012) steht die Konzentration der gelösten Sulfat-Ionen im Boden in einem Zusammenhang mit der Löslichkeit schwefelhaltiger Mineraldünger. Aus diesem Grund kann die Untersuchung des S_{min}-Gehaltes Rückschlüsse auf die Wirkung der Düngungsmaßnahmen in den verschiedenen Varianten liefern.

Die Untersuchungen des ersten Termins am 22. April 2025 zeigen, dass in der unbehandelten Kontrolle in der gesamten Tiefe von 0 bis 30 cm über alle Varianten der geringste S_{min}-Gehalt von 16 kg S/ha vorliegt. Diese Messung untermauert den bereits durch die DLG (2012) beschriebenen Einfluss der Düngung auf den S_{min}-Gehalt. Zudem wird deutlich, dass die Erhöhung der Schwefelmenge eines Düngemittels stets zur Steigerung des S_{min}-Gehaltes im Boden führt. Betrachtet man die beiden beprobten Bodenschichten separat, zeigt sich, dass die S_{min}-Gehalte in der oberen Bodenschicht von 0 bis 15 cm bei der Düngung mit den sulfatischen Düngemitteln, bis auf wenige Ausnahmen, höher als in der tieferen Schicht von 15 bis 30 cm sind. Daraus lässt sich ableiten, dass die Düngung mit sulfatischen Düngemitteln besonders in der oberen Bodenschicht angekommen sein muss. Bestätigt wird dies wieder durch die unbehandelte Kontrolle, bei der ein höherer S_{min}-Gehalt in der tieferen Schicht gemessen wurde. Aber auch in den drei Schwefellinsen-Varianten liegt in der tieferen Bodenschicht ein höherer S_{min}-Gehalt als in der oberen Bodenschicht vor.

Nach IVA (2024) muss elementarer Schwefel, wie er in den Schwefellinsen vorliegt, im Gegensatz zu sulfatischem Schwefel erst durch die Tätigkeit schwefeloxidierender Bakterien umgesetzt werden, bevor er den Pflanzen zur Verfügung steht. Sowohl IVA (2024) als auch DLG (2012) betonen, dass sich diese Umwandlung im Frühjahr bei Temperaturen unter 10 °C über einen längeren Zeitraum hinziehen kann. In diesem Zusammenhang berichtet SCHILLING (2000) von Versuchen, in denen pulverförmiger elementarer Schwefel nach sieben Wochen bei einer Bodentemperatur von 7 °C zu etwa 34 % oxidiert war. In dem dieser Arbeit zugrundeliegende Versuch liegt zwischen der Ausbringung der Schwefellinsen am 06. März und dem ersten Probenahme-Termin am 22. April ebenfalls ein Zeitraum von etwa sieben Wochen. Die durchschnittliche Temperatur lag im März bei 5,1 °C und im April bei 9,5 °C. Folglich ist anzunehmen, dass der elementare Schwefel am ersten Termin nicht vollständig umgesetzt worden war. Die S_{min}-Gehalte in den Schwefellinsen-Varianten liegen jedoch über dem Niveau der unbehandelten Kontrolle, sodass scheinbar eine Wirkung von den Schwefellinsen ausgegangen sein muss. Besonders sticht die Schwefellinsen-Variante mit 100 kg S/ha hervor, die mit einem S_{min}-Gehalt von 175 kg S/ha in der gesamten Bodenschicht von 0 bis 30 cm alle anderen Varianten deutlich übersteigt.

Bei der Betrachtung des zweiten Termins am 12. Mai 2025 wird deutlich, dass die S_{\min} -Gehalte grundsätzlich auf einem niedrigeren Niveau liegen als die Gehalte des ersten Termins. Die möglichen Gründe hierfür werden im Zusammenhang mit der N_{\min} -Untersuchung noch einmal genauer beleuchtet. Lediglich die Kieserit-Variante mit 100 kg S/ha und die KaliSop-Variante mit 25 kg S/ha konnten gegenüber dem ersten Termin einen Anstieg des S_{\min} -Gehaltes in der gesamten Tiefe von 0 bis 30 cm verzeichnen. Auch am zweiten Termin zeigen sich bei dem Einsatz sulfatischer Düngemittel höhere S_{\min} -Gehalte in der oberen Bodenschicht als in der tieferen Bodenschicht. Die S_{\min} -Gehalte der Kontrolle liegen für beide Termine auf einem ähnlichen Niveau, sodass ein Zusammenhang zwischen der Düngung und der Entwicklung des S_{\min} -Gehaltes angenommen werden kann. Im Vergleich mit den sulfatischen Düngemitteln weist die unbehandelte Kontrolle auch für den zweiten Termin den geringsten S_{\min} -Gehalt von 15 kg S/ha in der gesamten Tiefe von 0 bis 30 auf. Somit bestätigt sich die Annahme einer positiven Wirkung der Schwefeldüngung auf den S_{\min} -Gehalt auch am zweiten Termin. Auch das Muster der steigenden S_{\min} -Gehalte mit steigender Düngemenge lässt sich am zweiten Termin erneut erkennen. Eine Ausnahme davon bildet wieder die KaliSop-Variante mit 25 kg S/ha. Bis in die Tiefe von 30 cm wurden hier 63 kg S/ha gemessen, was den Gehalt in der zweiten Düngestufe (KaliSop 50 kg S/ha) um 29 kg S/ha und in der dritten Düngestufe (KaliSop 100 kg S/ha) um 6 kg S/ha übersteigt. Dieser Wert in der KaliSop-Variante mit 25 kg S/ha kann als Ausreißer betrachtet werden. Nach DLG (1997) können die Nährstoffgehalte in landwirtschaftlich genutzten Böden innerhalb weniger Zentimeter stark variieren. Die Ursachen unzutreffender Messergebnisse liegen demnach häufig in einer fehlerhaften Probenahme. Auch wenn in jeder Parzelle mehrere Einstiche vorgenommen wurden, ist es möglich, dass durch die punktuelle Probenahme mit Hilfe des Bohrstocks der Schwefelgehalt des Bodens nicht der Realität entsprechend abgebildet wurde.

Ein vollkommen anderes Bild zeigt sich am 12. Mai 2025 wieder für die Varianten mit Schwefellinsen. Bei der Betrachtung der gesamten Bodentiefe von 0 bis 30 cm wird deutlich, dass die S_{\min} -Gehalte der Schwefellinsen-Varianten unter dem Niveau der Kontrolle ohne Schwefeldüngung und damit weit unter den sulfatischen Varianten liegen. Im Gegensatz zu den Varianten mit sulfatischem Schwefel liegen in den Schwefellinsen-Varianten in der oberen Bodenschicht von 0 bis 15 cm geringere S_{\min} -Gehalte als in der unteren Bodenschicht von 15 bis 30 cm vor. Auch das typische Muster der steigenden S_{\min} -Gehalte mit steigender Düngung ist in diesen Varianten nicht zu erkennen. Besonders im Vergleich mit den gemessenen Werten des ersten Termins zeigen sich die Varianten mit Schwefellinsen besonders auffällig. Während am 22. April in der Schwefellinsen-Variante mit 100 kg S/ha der höchste S_{\min} -Gehalt von 175 kg S/ha in der gesamten Schicht von 0 bis 30 cm gemessen wurde, lag dieser Wert am 12. Mai bei 4 kg S/ha. Das entspricht einer Veränderung von 171 kg S/ha innerhalb von drei Wochen. Auch die S_{\min} -Gehalte der anderen beiden Schwefellinsen-Varianten sind in diesem Zeitraum enorm gesunken.

GRUBER & WEGNER (2017) beschreiben einen mehrjährigen Düngerversuch mit verschiedenen Schwefelformen auf sandigen Böden in Nordostdeutschland in Körnererbse und Lupine auf ökologisch bewirtschafteten Flächen. In diesem Versuch wurde der S_{\min} -Gehalt vor und acht bis zehn Wochen nach der Düngung in einer Bodentiefe von 0 bis 30 cm in den verschiedenen Varianten gemessen. Die Düngung von 50 kg S/ha führte zu einem Anstieg des S_{\min} -Gehaltes

in den sulfatisch gedüngten Varianten. Bei der Düngung mit den langsam wirkenden Schwefellinsen war der Bodengehalt ähnlich gering wie in der ungedüngten Kontrolle. Der Termin der S_{\min} -Probe des beschriebenen Versuches stimmt etwa mit dem Termin am 12. Mai 2025 überein und spiegelt ähnliche Ergebnisse wider.

SCHÖNBERGER (2024) beziffert die Schwefelaufnahme von Getreide für ein Ertragsniveau von 80 dt/ha, welches in diesem Versuch von den meisten Varianten deutlich überschritten worden ist, auf etwa 30 kg S/ha. Daraus wird bei einer grundsätzlich angenommenen Ausnutzung des Angebotes von 60 % ein Schwefelbedarf von 50 kg/ha abgeleitet. Laut GIGOS (2024) verläuft die Schwefelaufnahme dabei parallel zur Stickstoffaufnahme und erfolgt damit im Wesentlichen während des Schossens. Betrachtet man in diesem Zusammenhang die erreichten S_{\min} -Werte, wird deutlich, dass am ersten Probenahmetermin zum Beginn des Schossens, bis auf die SSA-Variante, keine der mit 25 kg S/ha gedüngten Varianten diesen Bedarf von 50 kg S/ha aus den oberen 30 cm des Bodens abdecken kann. Bei dem Einsatz von Kieserit und Schwefellinsen konnte dieser Wert nicht einmal mit einer Düngung von 50 kg S/ha erreicht werden. Am zweiten Probenahmetermin am Ende des Schossens ist die Schwefelaufnahme nach OCI AGRO (2023) etwa zur Hälfte abgeschlossen. Der verbleibende Schwefelbedarf von 25 kg S/ha kann in keiner der mit 25 kg S/ha gedüngten Varianten mehr aus den oberen 30 cm des Bodens gedeckt werden. Der S_{\min} -Wert der Variante mit SSA liegt allerdings nur knapp unter dem Bedarf. Die Variante mit KaliSop wird als Ausreißer nicht in die Betrachtung mit einbezogen. Bis auf die Variante mit Schwefellinsen können die mit 50 kg S/ha gedüngten Varianten den Bedarf zum Ende des Schossens gut decken. Es lässt sich schlussfolgern, dass die in der Praxis gängigen Düngemengen von 15 bis 20 kg S/ha (LWK NORDRHEIN-WESTFALEN, 2025) bzw. 20 kg S/ha (N.U. AGRAR GMBH, 2024) unter den vorliegenden Versuchsbedingungen nicht ausreichen, um den Schwefelbedarf des Weizens aus den oberen 30 cm des Bodens über die gesamte Vegetationszeit zu decken.

Neben dem S_{\min} -Gehalt wurde in den Varianten 1 (Kontrolle), 3 (SSA mit 50 kg S/ha) und 11 (Schwefellinsen mit 50 kg S/ha) auch der N_{\min} -Gehalt am 22. April und 12. Mai 2025 in der oberen Bodenschicht bestimmt und für die Bodentiefe von 0 bis 15 cm abgebildet, um den Gehalt an mineralisiertem pflanzenverfügbarem Stickstoff einschätzen zu können. Es ist zu beachten, dass die Varianten mit der gleichen Menge an Stickstoff gedüngt wurden. Bei der Betrachtung der Ergebnisse wird deutlich, dass die N_{\min} -Gehalte am ersten Termin grundsätzlich auf einem höheren Niveau liegen als am zweiten Termin. Das gleiche Bild hat sich bereits bei der Betrachtung der S_{\min} -Gehalte gezeigt. SCHÖNBERGER (2024) bestätigt einen engen positiven Zusammenhang zwischen N_{\min} -Werten und S_{\min} -Werten. Nach SCHUBERT (2018) durchläuft Schwefel genau wie Stickstoff einen Kreislauf und unterliegt damit ähnlichen Umwandlungsprozessen im Boden. ENGEL (1991) charakterisiert den N_{\min} -Wert als statische Größe, die den Gehalt des Bodens lediglich am Tag der Probenahme widerspiegelt. Während des Zeitraums zwischen den beiden Terminen der Probenahme ist demzufolge mit Veränderungen der gemessenen Werte zu rechnen. Die LFL BAYERN (o.J.) beschreibt zahlreiche Einflüsse auf den N_{\min} -Gehalt des Bodens. Gleiches ist für die S_{\min} -Werte anzunehmen. Faktoren wie die Immobilisierung im Boden, die Aufnahme durch die Pflanzen sowie die Auswaschung wirken sich negativ auf die S_{\min} - und N_{\min} -Werte des Bodens aus und kommen als Ursache für die geringeren Werte des zweiten Termins in Betracht (LFL BAYERN, o.J.). Da

das Frühjahr im Vergleich mit dem langjährigen Mittel überdurchschnittlich trocken war und zwischen den beiden Terminen keine starken Niederschläge verzeichnet werden konnten, ist jedoch davon auszugehen, dass die Auswaschung eine eher untergeordnete Rolle bei der Veränderung der N_{\min} - und S_{\min} -Werte gespielt hat. Allerdings führt die Trockenheit nach YARA (2025) auch dazu, dass die Mineralisation im Boden gebremst wird.

In diesem Zusammenhang ist besonders die Variante mit den Schwefellinsen wieder auffällig. Ähnlich wie bei der Betrachtung der S_{\min} -Werte ist zwischen dem ersten Termin am 22. April und dem zweiten Termin am 12. Mai ein extremes Absinken der N_{\min} -Werte von 120 kg N/ha auf 24 kg N/ha (- 80 %) zu verzeichnen. Die Variante mit SSA, die mit der gleichen Stickstoffmenge gedüngt wurde, weist am zweiten Termin zwar auch einen geringeren N_{\min} -Gehalt auf, ist im Vergleich mit der Schwefellinsen-Variante allerdings weniger abgefallen (- 58 %). Die Beobachtungen hinsichtlich der S_{\min} -Werte und der N_{\min} -Werte bei den Schwefellinsen ähneln sich stark. Ein möglicher Interpretationsansatz ist, dass die Schwefellinsen zum ersten Termin und damit im früheren Verlauf der Schwefelumwandlung einen positiven Einfluss auf verschiedene Umsetzungsprozesse im Boden zeigen, die sich positiv auf den mineralisierten pflanzenverfügbaren Schwefel und Stickstoff auswirken. Im Laufe der Zeit kehrt sich dieser Einfluss jedoch in eine negative Richtung. Ebenso möglich ist jedoch, dass ein Versuchsfehler vorliegt. Im Gegensatz zu den sulfatischen Düngemitteln wurden die Schwefellinsen per Hand ausgebracht, weshalb die Verteilung der Düngerkörner innerhalb der Parzelle ungleichmäßiger ausgefallen sein kann. Auch wenn etwa 20 bis 25 Einstiche pro Variante vorgenommen worden sind, ist es besonders vor dem Hintergrund der geringen Löslichkeit der Schwefellinsen möglich, dass die räumliche Verteilung und damit der Nährstoffgehalt des Bodens nicht der Realität entsprechend abgebildet werden konnten. In einem extremen Maße würde sich der Fehler in der Schwefellinsen-Variante mit 100 kg S/ha am 22. April 2025 widerspiegeln. Zudem wurden die S_{\min} - und N_{\min} -Werte an den jeweiligen Terminen im gleichen Extrakt gemessen, woraus sich die parallele Entwicklung der beiden Werte erklären lassen könnte. Bei einer erneuten Versuchsdurchführung würde sich die Anlage von Wiederholungen anbieten, um aussagekräftige und fundierte Ergebnisse zu erzeugen.

Im Gegensatz zu den S_{\min} -Werten weist die Kontrolle für den zweiten Termin am 12. Mai höhere N_{\min} -Werte auf als die beiden mit Schwefel gedüngten Varianten, obgleich alle Varianten mit 70 kg N/ha angedüngt wurden. Laut THIEL UND CAKMAK (2016) kann die in der Kontrolle durch Schwefelmangel ausgelöste Anreicherung von löslichen stickstoffhaltigen Bausteinen im Pflanzengewebe ein negatives Feedback auslösen und in der Folge die Aufnahme weiteren Stickstoffs hemmen. Aus diesem Grund könnte die Stickstoffaufnahme durch die Pflanzen, die bereits als ein Faktor für die sinkenden N_{\min} -Werte beschrieben wurde, gehemmt sein.

Pflanzenanalysen

Neben den Bodenproben wurden auch Pflanzenproben an beiden Probenahmeterminen gezogen und im Rahmen der Komplexen Pflanzenanalyse untersucht. Auf diese Weise lässt sich nachvollziehen, inwiefern der gedüngte Schwefel in den verschiedenen Varianten in der Pflanze ankommt. Die Eurofins Agraranalytik Deutschland GmbH selbst verweist auf BERGMANN (1993) und gibt für beide Termine einen optimalen Schwefelgehalt von 0,3 bis 0,55 Ma.-% TS an. Für den ersten Termin erreichen die Kieserit-Variante mit 100 kg S/ha sowie die KaliSop-Variante mit 100 kg S/ha den höchsten Schwefelgehalt von 0,27 Ma.-% TS. Allein diese beiden Varianten werden damit in die Gehaltsklasse B eingeordnet, welche einer leichten Unterversorgung entspricht. Die übrigen Varianten werden der Gehaltsklasse A zugeordnet und weisen damit einen Schwefelmangel auf. Die geringsten Schwefelgehalte liegen mit jeweils 0,22 Ma.-% TS in der Kontrolle sowie in der SSA-Variante mit 50 kg S/ha vor. Folglich erreicht keine Variante das vorgegebene Optimum, obwohl teilweise 100 kg S/ha gedüngt wurden. Der Schwefelmangel verstärkt sich jedoch am zweiten Termin der Probenahme. Die KaliSop-Variante mit 100 kg S/ha erreicht den höchsten Schwefelgehalt von 0,21 Ma.-% TS. Die Kontrolle sowie die Schwefellinsen-Variante mit 100 kg S/ha erreichen nur einen Schwefelgehalt von 0,13 Ma.-% TS. Damit werden alle Varianten ausnahmslos der Gehaltsklasse A zugeordnet. Im Gegensatz zur S_{\min} -Untersuchung lassen sich keine klaren Muster hinsichtlich der eingesetzten Schwefelmenge oder des Düngemittels erkennen.

Die derzeit genutzten Zielwerte für Pflanzenanalysen basieren nach ERB-BRINKMANN UND KLAGES (2024) im Wesentlichen auf Arbeiten aus den 1990er Jahren. Aufgrund geänderter Rahmenbedingungen, wie zum Beispiel Klimawandel oder Verminderung von Immissionen, ist eine Validierung und gegebenenfalls eine Aktualisierung der Zielbereiche sinnvoll. Das Projekt „ANAPLANT“ (2022 bis 2024) widmete sich dieser Aufgabe für den Raum Sachsen-Anhalt in verschiedenen Kulturen. Bei der Untersuchung des Schwefels lagen die gemessenen Werte im Winterweizen durchweg unterhalb des unteren Wertes des Literaturzielbereiches von 0,3 bis 0,5 Ma.-% TS, auch bei hohen Erträgen. Dies kann als Hinweis auf in der Vergangenheit zu hoch angesetzte Zielwerte interpretiert werden. Da nach Literaturangaben für den gesamten Entwicklungsverlauf derselbe Zielbereich ausgewiesen wird, wurde eine Nährstoff-Ertragskurve über alle Entwicklungsstadien erstellt. Der so ermittelte Zielbereich liegt bei 0,2 bis 0,3 Ma.-% TS und damit unter den Literaturwerten. Die Berechnung der Nährstoff-Ertragskurven getrennt nach Entwicklungsstadien ergibt für EC 31 einen Zielbereich von 0,29 bis 0,36 Ma.-% TS und für EC 39 bis 41 von 0,14 bis 0,16 Ma.-% TS. Vor diesem Hintergrund wäre auch die Einführung einer Unterteilung der Schwefelkonzentrationen nach Entwicklungsstadium diskutabel (ERB-BRINKMANN UND KLAGES, 2024). In diesem Zusammenhang wird deutlich, dass die Versuchsergebnisse mit den nach ERB-BRINKMANN UND KLAGES (2024) aktualisierten Zielbereichen deutlich besser übereinstimmen als mit den auch durch das Labor ausgegebenen Literaturwerten. Dabei stimmen besonders die im EC 39 erfassten Werte mit dem aktualisierten Zielbereich überein. Die in EC 31/32 gemessenen Werte liegen allerdings immernoch etwas unter dem aktualisierten Zielbereich.

Nach BERGMANN (1993) gibt der Schwefelgehalt der Pflanzen jedoch keinen zuverlässigen Hinweis für Schwefelmangel, da jährliche Gehaltsschwankungen auf demselben Standort oft größer sind als Unterschiede zwischen Pflanzen mit Schwefel-Mangel und ausreichend mit

Schwefel versorgten Pflanzen und die Schwefelgehalte der Gesamtpflanze im Verlauf des Wachstums abnehmen. Auch AGROSCOPE (2017, b) berichten von dem Verdünnungseffekt, bei dem der Gesamtgehalt an Nährstoffen kontinuierlich abnimmt, während die Pflanze an Biomasse zulegt. Demnach muss bei der Interpretation der Ergebnisse der Pflanzenanalyse dieser Variabilität des Nährstoffgehaltes Rechnung getragen werden, indem die Pflanzenart, die untersuchten Pflanzenteile sowie das Entwicklungsstadium bei der Probenahme berücksichtigt werden (AGROSCOPE, 2017, b). Für den vorliegenden Versuch bedeutet dies, dass die Entwicklung der Biomasse nicht ausreichend berücksichtigt worden ist. Laut BERGMANN (1993) vermittelt jedoch das N:S-Verhältnis einen sicheren Anhaltspunkt hinsichtlich eines Schwefelmangels. Für Gräserarten wird in diesem Zusammenhang ein kritisches N:S-Verhältnis von 12,0 bis 14,0 beschrieben. Für den ersten Termin der Probenahme lässt sich hier noch kein klar erkennbares Muster beschreiben. Für den zweiten Termin der Probenahme dagegen überschreitet lediglich die ungedüngte Kontrolle mit einem Wert von 15,23 das kritische N:S-Verhältnis. Daraus lässt sich ableiten, dass die Schwefeldüngung zum Ende des Schossens im Vergleich zur ungedüngten Variante im Versuch einen positiven Einfluss auf das N:S-Verhältnis aufzeigt. Zu diesem Zeitpunkt liegen die Schwefelgehalte, wie bereits beschrieben, auch im aktualisierten Zielbereich nach ERB-BRINKMANN UND KLAGES (2024).

Es muss beachtet werden, dass Unterschiede zwischen den Varianten hinsichtlich der Ergebnisse der Pflanzenanalyse, ähnlich wie die Ergebnisse der S_{\min} - und N_{\min} -Untersuchungen, aufgrund der fehlenden Wiederholungen nicht auf Signifikanzen untersucht werden konnten. Dennoch lässt sich festhalten, dass sich im Versuch kein eindeutiger Einfluss des Düngemittels oder der gedüngten Schwefelmenge auf den Schwefelgehalt in der Pflanze abgezeichnet hat. Besonders deutlich wird dies bei der Betrachtung der mit 100 kg S/ha gedüngten Varianten. Während diese Menge heute die gängigen Schwefelgaben deutlich übersteigt, waren vor der Überarbeitung der Gesetzgebung zum Umweltschutz nach SCHÖNBERGER (2024) Lufteträge von bis zu 100 kg S/ha möglich. Der aus dieser Zeit stammende Schwefel-Zielwert von 0,3 bis 0,5 Ma.-% TS konnte jedoch von diesen Varianten zu keinem der Probenahmeterminen sicher erreicht werden. Die Vermutung liegt nahe, dass der gedüngte Schwefel nicht vollständig in der Pflanze angekommen ist. Die Bodenwasservorräte konnten in Derenburg im Winter nicht vollständig aufgefüllt werden. Zudem lagen die Niederschlagsmengen während des gesamten Frühjahrs deutlich unter dem langjährigen Mittel. In diesem Zusammenhang sieht das BZL (2025) die Trockenheit als mögliche Ursache für Nährstoffmangel, da die Wurzel die Nährstoffe als im Wasser gelöste Ionen aufnimmt. Auch könnte die unvollständige Lösung der eingesetzten Düngemittel zu einer Einschränkung der Nährstoffaufnahme geführt haben (DLG, 2012). Speziell für Schwefel beschreibt SCHÖNBERGER (2024), dass unter trockenen Bedingungen freier Kalk mit dem Kapillarwasser aufsteigen und mit Sulfaten zu Gips reagieren kann. In der Folge werden die Sulfate festgelegt und temporärer Schwefelmangel kann auftreten. Auch die N.U. AGRAR GMBH (2024) berichtet in eigenen Versuchen von dieser Gipsbildung unter trockenen Bedingungen. Nach ABRAM UND AMELINGMEIER (2009) weist Gips eine Wasserlöslichkeit von 2,1 g/l auf. Wenn sich Gips in den Bodenproben befunden hat, ist es möglich, dass sich dieser während der Extraktion im Rahmen der S_{\min} -Untersuchung zumindest teilweise gelöst hat. Damit würden die S_{\min} -Ergebnisse einen Schwefelgehalt im Boden ausgeben, der wahrscheinlich nicht in voller Höhe für die Pflanzen verfügbar ist.

Bodenmikrobiom

Nach BAUM (2025) hat die Düngung sowohl einen Einfluss auf die Nährstoffversorgung der Pflanzen als auch auf das Bodenmikrobiom, das aus Bakterien, Pilzen, Archaeen und anderen Mikroorganismen besteht. Art, Menge und Zeitpunkt der Düngung können die Biomasse und Aktivität der Mikroorganismen gezielt beeinflussen und weiter die Bodenstruktur und pflanzenverfügbare Nährstoffmenge nachhaltig verbessern (BAUM, 2025). Wie bereits erwähnt, spielt das Bodenmikrobiom besonders im Bereich des Einsatzes von elementarem Schwefel eine Schlüsselrolle, da dieser erst durch die Tätigkeit schwefeloxidierender Bakterien zu Sulfat umgesetzt werden muss. Vor diesem Hintergrund wurde in dem dieser Arbeit zugrundeliegende Versuch das Bodenmikrobiom in den Schwefellinsen-Varianten sowie in der Kontrolle untersucht.

Die Zusammensetzung der Bakterien-Gesellschaft wies grundsätzlich an beiden Terminen der Probenahme keine großen Unterschiede zwischen den vier verschiedenen Varianten auf. Für den zweiten Termin wurden jedoch leichte Veränderungen der relativen Häufigkeiten einiger Bakteriengattungen ab einer Schwefelmenge von 50 kg S/ha deutlich. Für die Bakteriengattungen *Peribacillus*, *Tumebacillus* und *Streptomyces* wurde in den Varianten mit 50 und 100 kg S/ha ein Anstieg und für die Bakteriengattungen *Gaiella* und *Microtholus* ein Abstieg der relativen Häufigkeiten gegenüber der Kontrolle und der Variante mit 25 kg S/ha ersichtlich. Bei den Bakteriengattungen *Peribacillus*, *Tumebacillus* und *Streptomyces* konnten signifikante Unterschiede zwischen den Varianten erfasst werden. Die Gattung der *Streptomyces* ist bereits weit erforscht und wurde in diesem Zusammenhang genauer betrachtet. Die Gattung wirkt sich nach NAZARI ET AL. (2023) förderlich auf das Pflanzenwachstum aus und ist in der Lage, Schädlinge, Krankheiten, Unkräuter und phytophage Mikroorganismen durch die Produktion von Phytohormonen, Enzymen, Antibiotika und andere sekundäre Metaboliten zu regulieren. Zudem können sie die Bioverfügbarkeit von Nährstoffen verbessern und abiotische Belastungen durch Salz, Trockenheit und Bodenverunreinigungen reduzieren. Unter diesem Aspekt betrachten NAZARI ET AL. (2023) die Förderung der *Streptomyces* als Ansatzpunkt für eine nachhaltigere Landwirtschaft. Auch der Gattung *Peribacillus* wird nach LEE ET AL. (2024) eine antibiotische Wirkung sowie positive Effekte auf das Pflanzenwachstum zugeschrieben. Die Gattung der *Streptomyces* wird mit der Produktion des Enzyms Arylsulfatase in Verbindung gebracht (CREGUT ET AL., 2012). Laut STROBL ET AL. (1993) sind Sulfatasen bei der Mineralisation schwefelhaltiger Verbindungen im Boden von Bedeutung. Sie hydrolysieren organische Sulfate und stellen dadurch Schwefel in pflanzenverfügbarer Form bereit. Die Arylsulfatasen selbst katalysieren die Hydrolyse des Arylsulfats durch Spaltung der Sauerstoff-Schwefel-Bindung (Vgl. KNAUFF UND SCHERER, 1998). Der Gattung der *Streptomyces* kann damit eine Rolle im Schwefelkreislauf zugeschrieben werden. Für die anderen aufgeführten Bakteriengattungen konnte keine Beziehung zu den Schwefelflüssen im Boden hergestellt werden.

Sowohl der positive Einfluss auf die relative Häufigkeit einiger Bakteriengattungen als auch der negative Einfluss auf die relative Häufigkeit anderer Gattungen durch die Schwefelanwendung konnten bereits in Studien nach LIANG ET AL. (2025) beobachtet werden. Die Ergebnisse sind allerdings unter dem Aspekt zu betrachten, dass laut JIAO ET AL. (2020) die Erde von einer enormen Vielfalt von Mikroben bewohnt wird, von denen die meisten noch

unkultiviert und deren ökologischen Funktionen damit noch wenig bekannt sind. Auch IQBAL ET AL. (2025) bestätigen, dass die Auswirkungen vieler Mikroorganismen im Boden auf ihren Lebensraum noch unzureichend erforscht sind. Vor dem Hintergrund der Vielzahl der erfassten Bakteriengattungen kann somit nicht ausgeschlossen werden, dass der Anstieg positiv wirkender Bakterien auch mit dem Rückgang anderer positiv wirkender Bakterien oder dem Anstieg negativ wirkender Bakterien verbunden sein kann. Die Beobachtungen bieten aber einen Ansatzpunkt für weiterführende Forschungsarbeiten.

Laut RANADEV ET AL. (2023) zählen *Thiobacillus*, *Sulfolobus*, *Thermothrix*, *Beggiatoa* und *Thiothrix* zu den dominantesten und effektivsten schwefeloxidierenden Bakteriengattungen im Boden. In der vorliegenden Arbeit konnte keine dieser Gattungen detektiert werden. Dies lässt sich dadurch begründen, dass die Gattungen entweder nicht in den Proben vorlagen oder aber sich unterhalb der Detektionsgrenze bewegt haben. Schwefeloxidierende Bakterien kommen im Boden nicht so häufig vor, ihre Anzahl erhöht sich jedoch bei der Zugabe schwefelreicher Substanzen (Vgl. PATEL ET AL., 2024). Nach IVA (2024) ist die Schwefeloxidation zudem mit einem Absinken des pH-Wertes verbunden. Dies konnte in keiner der Schwefellinsen-Varianten festgestellt werden (Vgl Anhang). Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, inwiefern ein Bodenkontakt bestanden hat und der elementare Schwefel im Versuch überhaupt umgesetzt wurde. Für zukünftige Forschungsarbeiten lassen sich weitere Probenahmen zu späteren Terminen empfehlen.

Neben den Bodenbakterien wurden zusätzlich einige Enzyme analysiert. Nach BECK UND BECK (2014) sind die im Boden vorliegenden Enzyme überwiegend mikrobieller Herkunft und katalysieren eine Vielzahl von Stoffumsetzungen.

Die Funktion des Enzyms Arylsulfatase wurde bereits im Zusammenhang mit der Gattung der *Streptomyces* beschrieben. Grundsätzlich lag die Umwandlungsrate der Arylsulfatase am ersten Termin auf einem höheren Niveau als am zweiten Termin. Wie bereits erwähnt, könnte nach YARA (2025) die Trockenheit eine bremsende Wirkung auf die Mineralisation haben. Dennoch konnten signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ermittelt werden. Es zeigt sich, dass der Einsatz von Schwefellinsen gegenüber der Kontrolle einen positiven Einfluss auf die Umwandlungsrate der Arylsulfatase am zweiten Termin zeigt, was in gewissem Maße mit den Beobachtungen bezüglich der Gattung der *Streptomyces* übereinstimmt. Dies deutet darauf hin, dass die Mineralisation unter den trockenen Bedingungen in den mit elementarem Schwefel gedüngten Varianten besser aufrechterhalten werden kann als in der ungedüngten Kontrolle. Dieser positive Einfluss des elementaren Schwefels auf die Mineralisation deckt sich nicht mit den S_{min} -Ergebnissen in diesen Varianten, sodass zwischen der Entwicklung der S_{min} -Gehalte und der Mineralisation wahrscheinlich ein geringer Zusammenhang besteht.

Darüber hinaus wurde die Umwandlungsrate des Enzyms Polyphenol-Oxidase untersucht. Nach SINSABAUGH (2010) sind sowohl Mikroorganismen als auch Pflanzen in der Lage, Phenoloxidasen zu produzieren. Pflanzen nutzen Phenoloxidasen zur Synthese von Lignin und anderen sekundären Verbindungen. Viele Pilze nutzen Phenoloxidasen zur Synthese von Schutzstoffen wie zum Beispiel Melanin. Einige Organismen nutzen Phenoloxidasen zum Abbau von Lignin und Humus, um Kohlenstoff und andere Nährstoffe zu gewinnen. Generell werden Phenoloxidasen sowohl von Pilzen als auch von Bakterien eingesetzt, um die Toxizität

von Phenolmolekülen und Metallionen zu mildern und die antimikrobielle Abwehr zu unterstützen (SINSABAUGH, 2010). Geringe Umwandlungsraten der Polyphenol-Oxidase können in diesem Zusammenhang als Hinweis auf einen gesünderen und stärkeren Boden verstanden werden. Die Umwandlungsrate der Polyphenol-Oxidase sinkt an beiden Terminen mit steigendem Schwefeleintrag. Für den zweiten Termin konnten signifikante Unterschiede ermittelt werden. Zu diesem Zeitpunkt zeigt der Einsatz des elementaren Schwefels gegenüber der Kontrolle einen positiven Einfluss auf die Bodengesundheit.

Obwohl im Rahmen des Versuches nur wenig Aussagen über die schwefeloxidierenden Bakterien getroffen werden konnten, hat die Analyse des Bodenmikrobioms gezeigt, dass der Einsatz der Schwefellinsen vielfältige Auswirkungen auf den Boden und das Bodenmikrobiom hat, die weit über die Schwefeloxidation hinausgehen. Vor diesem Hintergrund stellt sich aber die Frage, ob mögliche Effekte der Schwefellinsen auf die beschriebene Entwicklung der S_{min} -Werte, der Schwefelgehalte in der Pflanze sowie die Ertrags- und Qualitätsparameter tatsächlich auf die Wirkung als reines Nährelement und damit verbunden den Prozess der Schwefeloxidation oder vielmehr auf anderweitige bodenbeeinflussende Wirkungen zurückzuführen sind. Für zukünftige Forschungsarbeiten stellt in diesem Zusammenhang auch die vergleichende Betrachtung der Wirkung verschiedener sulfatischer Düngemittel auf das Bodenmikrobiom einen interessanten Ansatz dar.

Ertrags- und Qualitätsparameter

Die Anzahl der Ähren pro Quadratmeter bewegt sich zwischen einem Durchschnitt von 406 in der Kontrolle und einem Durchschnitt von 461 in der Schwefellinsen-Variante mit 25 kg S/ha. KROPF UND SCHÖNBERGER (2021) beschreiben die Anzahl der Ähren pro Quadratmeter als wichtigen Ertragsparameter und nennen eine durchschnittliche Anzahl von 450 bis 600 Ähren pro Quadratmeter. Dieser Bereich kann im Versuch nicht von allen Varianten sicher erreicht werden. Die Sorte LG Optimist wurde bereits im Vorjahr auf einem vergleichbaren Boden nach Winterraps im Rahmen eines Sortenversuches in Derenburg angebaut. Im Durchschnitt konnte die Sorte laut N.U. AGRAR GMBH (2024) einen durchschnittlichen Wert von 652 erreichen. Nach Versuchen von STRICKHOF (2024) kann die Saattiefe tendenziell eine Rolle in Bezug auf die Ausbildung der Ähren pro Quadratmeter spielen. Bei der Betrachtung der durch den Züchter LIMAGRAIN (2025) für eine späte Aussaat empfohlene Aussaatstärke von 360 bis 400 Körner/m² wird deutlich, dass dieser Richtwert durch die tatsächliche Aussaatstärke von 290 Körner/m² unterschritten wird. STRICKHOF (2024) betont in diesem Zusammenhang aber auch, dass die Pflanzen in der Lage sind, bei einer geringen Saattiefe stärker zu bestocken und einen Großteil zu kompensieren. Nach BÖSE (2020) kann vielmehr die Frühjahrrestrockenheit als limitierender Faktor auf die Bestandesdichte gewirkt haben. Laut LIMAGRAIN (2019) ist besonders der LG Optimist als Kompensationstyp in der Lage, die Schwäche eines Ertragsparameters durch die Ausbildung eines anderen weitestgehend zu kompensieren. Die geringen Werte müssen deshalb auch im Kontext mit den anderen Ertragsparametern betrachtet werden. Bezüglich der Ähren pro Quadratmeter konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden.

Im Zusammenhang mit dem Parameter „Ähren pro Quadratmeter“ muss noch einmal auf die Methodik der Datenerfassung eingegangen werden. Zur Bestimmung der Ährenzahl kam ein Zählrahmen zum Einsatz, welcher eine rundliche Form aufweist und eine Fläche von 0,2 m²

erfasst. Dieser wurde in jeder Parzelle einmal im oberen und einmal im unteren Bereich der Parzelle in den Bestand gelegt. Anschließend wurden die Ähren innerhalb des Zählrahmens ausgezählt. Unter dem Aspekt, dass eine Parzelle eine Größe von 22,5 m² beträgt und lediglich 0,4 m² dieser Fläche ausgezählt werden, lässt sich schlussfolgern, dass der Bestand in der jeweiligen Parzelle nicht vollumfänglich abgebildet werden kann. Außerdem ist der menschliche Fehler zu beachten. Dazu zählen Fehler bei der Zählung oder das unbewusste Auswählen von besonders dichten oder weiten Stellen des Bestandes. Für künftige Versuche sollte diese Methodik kritisch hinterfragt und möglichst verbessert werden.

Das geringste mittlere Tausendkorngewicht von 47,5 g wurde in der SSA-Variante mit 50 kg S/ha ermittelt. Im Gegensatz dazu erreichte die Kieserit-Variante mit 50 kg S/ha mit 50,4 g das höchste mittlere Tausendkorngewicht. Nach KROPF UND SCHÖNBERGER (2021) ist auch das Tausendkorngewicht ein wichtiger Ertragsparameter und sollte sich zwischen 38 und 60 g bewegen. Zwar stimmen die im Versuch erzielten Ergebnisse mit diesem Bereich überein, dennoch liegen diese unter dem nach N.U. AGRAR GMBH (2024) im letzten Jahr im Rahmen des Sortenversuches erzielten durchschnittlichem Tausendkorngewicht von 55,6 g. ROSCHER (2025) beschreibt anhand des Sommergetreides, dass sich besonders die Nährstoff- und Wasserversorgung sowie die Blattgesundheit auf die Höhe des Tausendkorngewichtes auswirken. In diesem Zusammenhang lässt sich vermuten, dass sich die Trockenheit während der Kornfüllung im Gegensatz zum Vorjahr negativ auf das Tausendkorngewicht ausgewirkt haben könnte. Nach K+S MINERALS AND AGRICULTURE (2024) ist auch die Schwefelversorgung für die Ausprägung des Tausendkorngewichtes von Bedeutung. Bei der statistischen Untersuchung konnten jedoch keine signifikanten Einflüsse des Schwefeldüngemittels bzw. der Interaktion von Düngemittel und Schwefelmenge auf das Tausendkorngewicht festgestellt werden. Die Unterschiede zwischen den Varianten könnten aus Bodenunterschieden, wie einem ungleichen Niveau der Nährstoffversorgung resultieren. Laut YARA (o.J., c) können Studien in der Gerste besonders einen starken Einfluss der Mikronährstoffe Zink, Kupfer, Mangan und Bor auf das Tausendkorngewicht nachweisen.

Der Kornertrag selbst bewegt sich zwischen einem Mittelwert von 78,8 dt/ha in der Kontrolle und 88,2 dt/ha in der Kieserit-Variante mit 100 kg S/ha und der KaliSop-Variante mit 50 kg S/ha. Damit liegen die Kornerträge zwar über dem durch das STATISTISCHE BUNDESAMT (2025) ausgegebenen bundesweiten Durchschnitt von 73,5 dt/ha, aber deutlich unter dem Ergebnis des Sortenversuches aus dem Vorjahr. Die Sorte LG Optimist konnte hier nach N.U. AGRAR GMBH (2024) einen durchschnittlichen Ertrag von 105,2 dt/ha erzielen. Dieser Unterschied wurde durch die geringere Ährenanzahl sowie das geringere Tausendkorngewicht angedeutet, lässt sich aufgrund der zahlreichen Einflüsse auf den Weizenertrag allerdings nur schwer begründen. Nach HLNUG (2025) können sowohl die Witterung als auch technische Aspekte wie die Aussaatbedingungen, die Düngung und der Pflanzenschutz erhebliche Auswirkungen auf die Ertragshöhe haben. Es lässt sich annehmen, dass die Trockenheit auch hinsichtlich des Ertrages negative Auswirkungen hatte. Im Rahmen der statistischen Untersuchung konnte unabhängig von der gedüngten Schwefelmenge ein signifikanter Einfluss des Schwefeldüngemittels auf den Ertrag ermittelt werden. Dabei unterscheidet sich der durchschnittliche Kornertrag der unbehandelten Kontrolle signifikant von den durchschnittlichen Kornerträgen der Düngemittel Kieserit, KaliSop und Schwefellinsen. In der Kontrolle konnte ein durchschnittlicher Ertrag von

78,8 dt/ha erfasst werden. Im Vergleich dazu war der Ertrag mit durchschnittlich 84,7 bis 85,3 dt/ha bei den genannten Düngemitteln signifikant höher. Zudem konnte ein signifikanter Unterschied zwischen dem durchschnittlichen Kornertag von SSA und KaliSop festgestellt werden. Der durchschnittliche Ertrag von 85,3 dt/ha des KaliSops ist damit signifikant höher als der durchschnittliche Ertrag von 81,0 dt/ha des SSA.

Die Ergebnisse stehen damit im Gegensatz zu früheren Schwefeldüngungsversuchen. In dem durch GRUBER & WEGNER (2017) beschriebenen Versuch in Körnererbse und Lupine ließen sich keine Ertragseffekte durch den Einsatz von Düngemitteln sulfatischer oder elementarer Form feststellen. Auch in zweijährigen Versuchen nach HAGEL (2000) konnte weder die Düngung mit Elementarschwefel noch mit Magnesiumsulfat gegenüber der ungedüngten Kontrolle einen signifikanten Einfluss auf den Kornertag von ökologischem Weizen zeigen. Ähnliches berichtet VOCKINGER (2016) von Sulfatdüngungsmaßnahmen in Winterweizen und Luzerne im niederösterreichischen Trockengebiet auf Schwarzerdeböden.

Das Hektolitergewicht bewegt sich zwischen einem Durchschnitt von 79,6 kg/hl in der Kontrolle sowie der KaliSop-Variante mit 100 kg S/ha und 80,3 kg/hl in der Schwefellinsen-Variante mit 50 kg S/ha und liegt damit über alle Varianten auf einem ähnlichen Niveau. Ebenso liegen die Werte auf einem ähnlichen Niveau mit dem durchschnittlichen Hektolitergewicht von 80,2 kg/hl, welches der LG Optimist nach N.U. AGRAR GMBH (2024) im Vorjahr im Sortenversuch in Derenburg erzielen konnte. In jeder Variante kann der von ROEB (2023) beschriebene Zielwert von mehr als 77 kg/hl für A-Weizen im Durchschnitt sicher erreicht werden. Obwohl die K+S MINERALS AND AGRICULTURE (2024) einen Zusammenhang zwischen der Schwefelversorgung und dem Hektolitergewicht beschreibt, können keine signifikanten Einflüsse des Schwefeldüngemittels bzw. der Interaktion von Düngemittel und Schwefelmenge auf das Hektolitergewicht festgestellt werden.

Der geringste durchschnittliche Rohproteingehalt von 11,5 % wurde in der Schwefellinsen-Variante mit 25 kg S/ha und der höchste durchschnittliche Rohproteingehalt von 11,9 % in den beiden Varianten mit SSA ermittelt. Der Rohproteingehalt in der Kontrolle liegt bei einem Durchschnitt von 11,7 %. Damit liegt der durchschnittliche Rohproteingehalt in allen Varianten unter den nach RAIFFEISEN (o.J.) geforderten 13 % für A-Weizen. Ein ähnliches Bild zeigte der LG Optimist bereits in dem im Vorjahr durchgeführten Sortenversuch in Derenburg. Laut N.U. AGRAR GMBH (2024) konnte auch dort mit einem Durchschnitt von 11,4 % der geforderte Rohproteingehalt nicht erreicht werden. Nach RAIFFEISEN (o.J.) spielt die Genetik hinsichtlich des Rohproteingehaltes eine wichtige Rolle. LIMAGRAIN (2025) selbst bewertet den LG Optimist hinsichtlich des Qualitätsparameters Rohprotein als eher mittelmäßig. Die SKW STICKSTOFFWERKE PIESTERITZ GMBH (2020) beschreibt darüber hinaus einen entscheidenden Einfluss von Schwefel auf den Rohproteingehalt des Winterweizens. Dennoch konnte im Versuch kein signifikanter Einfluss des Schwefeldüngemittels bzw. der Interaktion von Düngemittel und Schwefelmenge auf den Rohproteingehalt ermittelt werden. Es lässt sich vermuten, dass ein signifikanter Einfluss aufgrund der Genetik verhindert wird.

Der Klebergehalt bewegt sich im Versuch zwischen einem Durchschnitt von 22,6 % in der Schwefellinsen-Variante mit 25 kg S/ha und 23,6 % in der SSA-Variante mit 25 kg S/ha und der KaliSop-Variante mit 100 kg S/ha. Damit unterschreiten auch alle Varianten den laut

HÜSKEN (2020) häufig geforderten Wert von mindestens 30 %. Auch im Vorjahr erreichte der LG Optimist nach Angaben der N.U. AGRAR GMBH (2024) lediglich einen durchschnittlichen Klebergehalt von 22,6 %. Die Ergebnisse untermauern die von DIEPENBROCK ET AL. (2016) sowie HÜSKEN (2020) beschriebene enge Beziehung zwischen Rohproteingehalt und Klebergehalt. Ähnlich wie bei der Betrachtung des Rohproteingehaltes konnte im Versuch kein signifikanter Einfluss des Schwefeldüngemittels bzw. der Interaktion von Düngemittel und Schwefelmenge auf den Klebergehalt ermittelt werden. Nach HÜSKEN (2020) spielt die Stickstoffversorgung sowohl für den Rohprotein- als auch für den Klebergehalt eine wichtige Rolle. In der Folge könnten sich die feinen Unterschiede zwischen den Varianten durch Bodenunterschiede in Bezug auf die Stickstoffversorgung erklären lassen.

Der geringste durchschnittliche Sedimentationswert von 37,1 ml liegt in der Kontrolle vor. Die SSA-Variante mit 25 kg S/ha erreicht den höchsten durchschnittlichen Sedimentationswert von 39,4 ml. Aber auch die KaliSop-Variante mit 100 kg S/ha erreicht einen Durchschnitt von 39,0 ml. Damit liegt der durchschnittliche Sedimentationswert aller Varianten über den Mindestanforderungen für A-Weizen, die sich nach Angaben des BUNDESSORTENAMTES (2024) auf 30 bis 36 ml belaufen. Nach ROEB (2023) deutet dies auf eine gute Quellfähigkeit der Kleberproteine hin. Der Sedimentationswert ist laut ROEB (2023) als sortenspezifisches Maß zu betrachten. Im Sortenversuch des Vorjahres erreichte der LG Optimist nach N.U. AGRAR GMBH (2024) ein etwas geringeres Niveau mit einem Durchschnitt von 35,1 ml. Sowohl das BUNDESSORTENAMT (2024) als auch ROEB (2023) beschreiben eine positive Korrelation mit dem Proteingehalt sowie dem Backvolumen, sodass sich der etwas höhere Sedimentationswert im Vergleich zu dem Ergebnis des Vorjahres aus dem etwas höheren Proteingehalt erklären lässt. Die K+S MINERALS AND AGRICULTURE (2024) beschreibt einen Einfluss von Schwefel auf den Sedimentationswert. In der statistischen Auswertung konnte kein signifikanter Einfluss des Schwefeldüngemittels bzw. der Interaktion von Düngemittel und Schwefelmenge auf den Sedimentationswert erfasst werden.

Auch der Feuchtigkeitsgehalt liegt mit durchschnittlichen Werten zwischen 16,8 % in der Kontrolle und der SSA-Variante mit 25 kg S/ha und 17,1 % in der KaliSop-Variante mit 25 kg S/ha auf einem sehr ähnlichen Niveau. Nach ROEB (2023) wird allgemein für Getreide eine Kornfeuchte von weniger als 14,5 % gefordert. Dieser Wert wird in allen Varianten im Durchschnitt überschritten. Nach DWD (2024) besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Kornfeuchte und der Witterung. Demnach verringert sich die Kornfeuchte während der Reife, kann jedoch durch ungünstige Witterungsbedingungen wieder ansteigen. In diesem Zusammenhang spielen die relative Luftfeuchte, Niederschläge und Benetzungsdauer eine entscheidende Rolle (DWD, 2024). Am Tag der Ernte wurde die Kornfeuchte im Bestand stichprobenartig gemessen. Nach Angaben des Betriebes lag diese unter 14,5 %. Daraus lässt sich schließen, dass die Proben nach der Ernte noch etwas Feuchtigkeit aufgenommen haben müssen. Aufgrund des starken Zusammenhangs zwischen der Kornfeuchte und der Witterung war kein signifikanter Einfluss der Schwefeldüngung auf die Kornfeuchte zu erwarten, was sich in der statistischen Auswertung bestätigte.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Ausprägungen der einzelnen Ertrags- und Qualitätsparameter des Weizens durch eine Vielzahl an Faktoren beeinflusst werden. Besonders die Trockenheit hatte im Versuch einen starken Einfluss auf die Ergebnisse. Insgesamt fielen

zwischen dem 01.08.2024 und 31.07.2025 am Versuchsstandort lediglich 405 mm Niederschlag. Dies entspricht einem Minus von 118 mm gegenüber dem langjährigen Mittel. Unter diesen Bedingungen ist anzunehmen, dass die Nährstoffaufnahme der Pflanzen aufgrund von Trockenstress und unvollständiger Lösung der Düngemittel eingeschränkt worden ist. Speziell für Schwefel besteht bei Trockenheit das Risiko, dass freier Kalk mit dem Kapillarwasser aufgestiegen ist und mit den Sulfaten zu Gips reagiert hat. In der Folge wird der gedüngte Schwefel im Boden festgelegt und steht für die Pflanzen nicht mehr ausreichend zur Verfügung. Die reduzierte Schwefelaufnahme spiegelte sich im Versuch in der relativ geringen Schwefelversorgung der Pflanzen wider. Vor diesem Hintergrund der Trockenheit lassen sich vermutlich auch die geringen Auswirkungen der Schwefeldüngung auf die Ertrags- und Qualitätsparameter erklären. Die geringen Unterschiede zwischen der Kontrolle und den mit Schwefel gedüngten Varianten könnten sich auch aus den Niederschlägen zur Monatswende Mai/Juni erklären lassen, die zu einer Schwefelfreisetzung aus dem Boden geführt haben könnten. Für zukünftige Forschungsarbeiten stellt sich dennoch die Frage, wie eine bedarfsgerechte Schwefelversorgung unter der zunehmenden Frühjahrs- und Vorsommertrockenheit sichergestellt werden kann.

7. Schlussfolgerungen

Im Folgenden sollen die wichtigsten Erkenntnisse, die sich aus den Ergebnissen des im Jahr 2025 im Harz durchgeführten Feldversuches sowie deren Analyse ergeben haben, über den Einfluss der verschiedenen Schwefelformen und -mengen auf die Ertrags- und Qualitätsparameter des Winterweizens zusammengestellt werden.

- Die Schwefeldüngung spiegelt sich in den S_{\min} -Werten wider und kommt bei den sulfatischen Düngemitteln besonders in der oberen Bodenschicht an. Weiterführend haben die S_{\min} -Untersuchungen gezeigt, dass aktuell gängige Schwefeldüngemengen im Versuch nicht ausreichend gewesen wären, um den Pflanzenbedarf aus der Bodenschicht von 0 bis 30 cm über die gesamte Vegetationszeit sicher abdecken zu können.
- Im Gegensatz dazu zeigte die Schwefeldüngung nur einen geringen Einfluss auf den Schwefelgehalt und die Schwefelversorgung der Pflanzen, die im Rahmen der Komplexen Pflanzenanalyse untersucht wurden. Im späteren Versuchsverlauf zeichnete sich jedoch gegenüber der Kontrolle ein positiver Einfluss der Schwefeldüngung auf das Verhältnis von Stickstoff zu Schwefel in der Pflanze ab, welches als wichtiger Indikator für den Schwefelversorgungszustand betrachtet werden kann. Aufgrund der fehlenden Wiederholungen kann dieses Ergebnis jedoch nicht statistisch abgesichert werden.
- Obwohl bei der Betrachtung des Bodenmikrobioms die vorherrschenden Gattungen der schwefeloxidierenden Bakterien nicht detektiert werden konnten, zeigte der Einsatz von elementarem Schwefel in Form von Schwefellinsen im Rahmen des Versuches gegenüber den sulfatischen Düngemitteln keinen Rückstand in seiner Wirkung auf die Ertrags- und Qualitätsparameter. Gegenüber der Kontrolle kristallisierte sich vielmehr ein positiver Einfluss des elementaren Schwefels auf die Bodengesundheit und das Bodenleben heraus. Damit geht seine Wirkung weit über die Funktion als reines Nährelement hinaus. Dieses Ergebnis kann als Ansatzpunkt für tiefergehende Forschungsarbeiten dienen.
- Die Trockenheit während des Versuchszeitraumes hat einen weitreichenden Einfluss auf den Versuch gezeigt. Es ist anzunehmen, dass unter den trockenen Versuchsbedingungen die Schwefelaufnahme der Pflanzen stark eingeschränkt worden ist. Vor diesem Hintergrund lassen sich die geringen Auswirkungen der Schwefeldüngung auf die Ertrags- und Qualitätsparameter erklären. Für zukünftige Forschungsarbeiten stellt sich die Frage, wie eine bedarfsgerechte Schwefelversorgung unter der zunehmenden Frühjahrs- und Vorsommertrockenheit sichergestellt werden kann.
- Trotz der Trockenheit führte eine Düngung mit den Düngemitteln KaliSop, Kieserit und Schwefellinsen gegenüber der Kontrolle zu positiven Ertragseffekten. Außerdem konnte mit dem Einsatz von KaliSop gegenüber dem von SSA signifikant höhere Erträge erzielt werden. Innerhalb der Düngemittel konnte dabei kein Einfluss der Schwefelmenge statistisch abgesichert werden.

8. Zusammenfassung

Schwefel spielt in der Pflanzenernährung eine wichtige Rolle und wird in der Pflanze für vielfältige Funktionen benötigt. Aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen zwingen uns, alte Muster zu überdenken und Ansatzpunkte zur Prozessoptimierung und Steigerung der Effizienz im Bereich der Düngung unserer Kulturpflanzen herauszuarbeiten.

Um den Einfluss verschiedener Schwefelformen und -mengen auf die Ertrags- und Qualitätsparameter des Winterweizens untersuchen und genauer beleuchten zu können, wurde im Jahr 2025 ein Feldversuch auf dem Standort Derenburg im Harz in der Sorte LG Optimist von Limagrain angelegt. Dabei wurden die Wirkungen der Schwefeldüngemittel SSA, Kieserit, KaliSop und Schwefellinsen in verschiedenen Mengenstufen einer unbehandelten Kontrolle gegenübergestellt. Als Ertrags- und Qualitätsparameter wurden die Ähren pro Quadratmeter, der Kornertrag, das Tausendkorngewicht, das Hektolitergewicht, der Rohproteingehalt, der Klebergehalt, der Sedimentationswert sowie der Feuchtigkeitsgehalt herangezogen. Darüber hinaus wurden umfangreiche Untersuchungen der S_{min} - und N_{min} -Werte, der Pflanzen-nährstoffgehalte sowie des Bodenmikrobioms durchgeführt. Anhand der Ergebnisauswertung des Versuches konnten die eingangs in der Zielstellung formulierten Fragestellungen vor dem Hintergrund aktueller Aspekte diskutiert und weitestgehend beantwortet werden.

Im Allgemeinen hat sich gezeigt, dass die Trockenheit während des Versuchszeitraumes einen weitreichenden Einfluss auf den Versuch und die damit verbundenen Ergebnisse hatte. Es ist anzunehmen, dass die Nährstoffaufnahme der Pflanzen aufgrund von Trockenstress und unvollständiger Lösung der Düngemittel eingeschränkt worden ist. Speziell für Schwefel besteht bei Trockenheit das Risiko, dass freier Kalk mit dem Kapillarwasser aufgestiegen ist und mit den Sulfaten zu Gips reagiert hat. Die reduzierte Schwefelaufnahme spiegelte sich im Versuch in der Schwefelversorgung der Pflanzen wider. Vor diesem Hintergrund lassen sich die geringen Auswirkungen der Schwefeldüngung auf die Ertrags- und Qualitätsparameter erklären. Lediglich für den Kornertrag konnten signifikante Unterschiede zwischen den Düngemitteln ermittelt werden. Für zukünftige Forschungsarbeiten stellt sich die Frage, wie eine bedarfsgerechte Schwefelversorgung unter dem Aspekt der zunehmenden Frühjahrs- und Vorsommertrockenheit sichergestellt werden kann.

Im Rahmen des Versuches wurde der Einsatz von elementarem Schwefel genauer betrachtet. Obwohl in der Untersuchung des Bodenmikrobioms keine schwefeloxidierenden Bakterien detektiert werden konnten, wurde gegenüber den sulfatischen Düngemitteln kein Rückstand des elementaren Schwefels in seiner Wirkung auf die Ertrags- und Qualitätsparameter deutlich. Vielmehr zeigte sich, dass der Einsatz von elementarem Schwefel gegenüber der Kontrolle die Bodengesundheit und das Bodenleben stärken kann. Damit geht seine Wirkung weit über die Funktion als reines Nährelement hinaus.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Durchführung und Auswertung des Versuches dazu beitragen konnten, das Verhalten und die Wirkung von Schwefel im Boden und in der Pflanze besser verstehen zu können. Zudem konnten neue Forschungsfragen aufgedeckt werden, die weitere Ansatzpunkte zur Prozessoptimierung und Steigerung der Effizienz im Bereich der Düngung unserer Kulturpflanzen darstellen können.

Literaturverzeichnis

- Abram, U., & Amelingmeier, E. (Dezember 2009). *Gips*. Abgerufen am 17. Dezember 2025 von Thieme RÖMPP: <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-07-01106>
- Agroscope. (Juni 2017 a). *Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD) - Modul 8: Düngung von Ackerkulturen*. Schweiz.
- Agroscope. (Juni 2017 b). *Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD) - Modul 3: Pflanzenanalysen*. Schweiz.
- Böse, S. (14. Oktober 2020). *Getreideanbau im Klimawandel: Ertragsbildung bei Trockenheit und Hitze*. Abgerufen am 22. November 2025 von praxisnah: <https://www.praxisnah.de/index.cfm/article/10552.html>
- Baum, C. (14. Januar 2025). *Das macht Dünger mit Mikroben*. Abgerufen am 23. November 2025 von BW agrar: <https://www.bwagrar.de/article-8074095-162925/das-macht-duenger-mit-mikroben-.html>
- Beck, T., & Beck, R. (2014). Bodenenzyme. In H.-P. Blume, P. Felix-Henningsen, H.-G. Frede, G. Guggenberger, R. Horn, & K. Stahr, *Handbuch der Bodenkunde*.
- Bergmann, W. (1993). *Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen (3. Auflage)*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag Jena.
- Bruckner, A., & Mack, R. (01. Juli 2025). *Schwefel (S)*. Abgerufen am 03. September 2025 von NutriNet: <https://www.nutrinet.agrarpraxisforschung.de/naehrstoffmanagement/naehrstoffe/schwefel-s>
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). (2020). *Wie stark sind die Erträge von Nutzpflanzen seit 1950 gestiegen?* Abgerufen am 21. August 2025 von <https://www.praxis-agrar.de/service/infografiken/hektarertraege>
- Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (BZL). (08. April 2025). *Wie Trockenheit der Landwirtschaft schadet*. Abgerufen am 14. Dezember 2025 von <https://www.landwirtschaft.de/umwelt/klimawandel/auswirkungen-auf-die-landwirtschaft/wie-trockenheit-der-landwirtschaft-schadet>
- Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (BMEL). (2024). *Getreidebilanz 2023/24: Inlandsverbrauch leicht gestiegen, Selbstversorgungsgrad leicht gesunken*. Abgerufen am 13. August 2025 von Versorgungsbilanzen Getreide: <https://www.bmel-statistik.de/ernaehrung/versorgungsbilanzen/getreide>
- Bundessortenamt. (2024). *Beschreibende Sortenliste Getreide, Mais Öl- und Faserpflanzen Leguminosen Rüben Zwischenfrüchte 2024*. Hannover.
- Cregut, M., Piutti, S., Slezack-Deschaumes, S., & Benizri, E. (August 2012). Compartmentalization and regulation of arylsulfatase activities in *Streptomyces* sp., *Microbacterium* sp. and *Rhodococcus* sp. soil isolates in response to inorganic sulfate limitation. *Microbiological Research* 168(1):12-21.

- Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V. (DLG) (Fachbereich Landtechnik). (1997). DLG-Merkblatt 305. *Einsatz von Bodenproben-Entnahmegeräten*. Frankfurt am Main.
- Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V. (DLG) (Fachzentrum Land- und Ernährungswirtschaft). (Mai 2012). DLG-Merkblatt 373. *Schwefel-Düngung effizient gestalten*. Frankfurt am Main.
- Deutscher Wetterdienst (DWD). (Mai 2024). *Erläuterungen zur Kornfeuchte*. Abgerufen am 16. November 2025 von https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/dokumentationen/allgemein/basis_kornfeuchte_doku.html
- Diepenbrock, W., Ellmer, F., & Leon, J. (2016). *Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung (4., überarbeitete Auflage)*. Stuttgart (Hohenheim): Eugen Ulmer KG.
- Engel, T. (1991). Simulation der N-Dynamik im Ackerboden als Grundlage für standortgerechte Düngungsstrategien. In J. Pohlmann, *Bilanzmodell Ackerbau, Agrarinformatik 22* (S. 52 - 69).
- Erb-Brinkmann, M., & Klages, S. (31. Dezember 2024). *ANAPLANT: Aktualisierung von Zielwerten für die Pflanzenanalyse zur Ermittlung des Ernährungszustandes von Kulturpflanzen unter den Bedingungen in Sachsen-Anhalt - Abschlussbericht*.
- Eulenstein, F. (2011). Zuviel Schwefel kann schädlich und teuer sein. *effizient düngen (Newsletter August 2011)*.
- Geisler, G. (1991). *Farbatlas Landwirtschaftliche Kulturpflanzen*. Stuttgart (Hohenheim): Eugen Ulmer GmbH & Co.
- Gerson, J., & Hinckley, E.-L. (09. November 2023). It Is Time to Develop Sustainable Management of Agricultural Sulfur. *Earth's Future (Volume 11)*.
- Gigos, M. (2024). Schwefelmangel braucht keiner im Getreide. *UFA-Revue (2-2024)*, 14-15.
- Gruber, H., & Wegner, C. (7.-10. März 2017). 14. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Campus Weihenstephan, Freising-Weihenstephan. *Pflanzenbau - Erbsen und Lupinen: Schwefeldüngung zu Körnererbsen und Blauen Lupinen auf einem Sandstandort*, 22-25.
- Hüsken, A. (2020). Getreide Mehl und Brot 2/2020. *Qualitätsweizenanbau in Deutschland: Zum Verhältnis des Rohprotein- und Feuchtklebergehaltes zur Volumenausbeute*.
- Hagel, I. (2000). *Auswirkungen einer Schwefeldüngung auf Ertrag und Qualität von Weizen schwefelmangelgefährdeter Standorte des Ökologischen Landbaus*. Sonderheft 220. Landbauforschung Völkenrode.
- Hallmann, J., & Tiedemann, A. (2019). *Phytomedizin (3., vollständig überarbeitete Auflage)*. Stuttgart (Hohenheim): Eugen Ulmer KG.

- Hanus, H., Heyland, K.-U., & Keller, E. (2008). *Handbuch des Pflanzenbaues 2 - Getreide und Futtergräser*. Stuttgart (Hohenheim): Eugen Ulmer KG.
- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG). (2025). *Ertragsschwankungen von Winterweizen und Silomais*. Abgerufen am 25. August 2025 von <https://www.hlnug.de/themen/nachhaltigkeit-indikatoren/indikatorensysteme/klimafolgenindikatoren-hessen/ertragsschwankungen-des-winterweizens>
- ICL Growing Solutions (ICL). (o.J.). *Weizen Kulturempfehlung*. Abgerufen am 18. August 2025 von <https://icl-growingsolutions.com/de-de/agriculture/crops/wheat/>
- Industrieverband Agrar e.V. (IVA). (April 2024). Schwefel – Baustein für eine nachhaltige Ertragsbildung. Frankfurt am Main.
- Iqbal, S., Begum, F., Nguchu, B. A., Claver, U. P., & Shaw, P. (25. März 2025). The invisible architects: microbial communities and their transformative role in soil health and global climate changes. *Environmental Microbiome*.
- Jiao, J.-Y., Liu, L., Hua, Z.-S., Fang, B.-Z., Zhou, E.-M., Salam, N., Hedlund, B.P., Li, W.-J. (08. Dezember 2020). Microbial dark matter coming to light: challenges and opportunities. *National Science Review*.
- K+S Minerals and Agriculture GmbH. (2024). *Getreidedüngung für Ertrag und Qualität*. Kassel.
- Kleijer, G., Levy, L., Schwaerzel, R., Fossati, D., & Brabant, C. (2007). Hektolitergewicht und Qualitätsparameter beim Weizen. *AgrarForschung Schweiz* 14 (11 - 12), S. 548-553.
- Knauff, U., & Scherer, H. (1998). Arylsulfatase-Aktivität im Kontaktraum Boden/Wurzeln bei Verschiedenen Landwirtschaftlichen Kulturpflanzen. In W. Merbach, *Pflanzenernährung, Wurzeleistung und Exsudation*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- Kropf, U., & Schönberger, H. (Oktober 2021). Getreide: Vom Zellhaufen zur Ähre. *Top Agrar*, S. 64 ff.
- Land- und Forstwirtschaftliches Versuchszentrum Laimburg. (2013). *Merkblätter zum Getreideanbau - Projekt Regiokorn*. Laimburg.
- Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) Bayern. (o.J.). *Verfügbare Stickstoffmenge im Boden (Nmin-Wert)*. Abgerufen am 10. November 2025 von <https://www.lfl.bayern.de/iab/duengung/225815/>
- Landwirtschaftliches Zentrum Liebegg. (Winter 2024). *Steckbrief Weizen*. Liebegg, Kanton Aargau.
- Landwirtschaftskammer (LWK) Schleswig-Holstein. (o.J.). *Winterweizen - Anbautechnik*.

- Lanwirtschaftskammer (LWK) Nordrhein-Westfalen. (2025). *Ratgeber Pflanzenbau und Pflanzenschutz*.
- Lee, S., Kim, Y., Han, J. A., Lee, H.-S., & Kim, E. Y. (10. Oktober 2024). Complete genome sequence of bacterium *Peribacillus simplex* strain IMGN11 from soil. *Microbiology Resource Announcements*.
- Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) im Forschungsverbund Berlin e.V. (28. Januar 2021). *Pressemitteilung: Saurer Regen war gestern?*
Abgerufen am 19. September 2025 von <https://www.igb-berlin.de/news/saurer-regen-war-gestern>
- Liang, X., Zhang, Y., Wan, S., Xia, L., Li, P., Wang, S., Yang, Y., Zhu, W., Zhou, M., Wang, M., Zhang, Y. (02. Mai 2025). Impacts of sulfur application on microbial communities and functional attributes in rubber plantation soil. *BMC Microbiology*.
- Limagrain. (Februar 2019). Weizenanbau - Erfolg säen und ernten. Edemissen.
- Limagrain. (2025). LG Optimist. Edemissen.
- Meyer, L. (22. Juni 2011). Produktion von Qualitätsweizen in Mitteldeutschland - Untersuchung und Bewertung der Qualitätseigenschaften von Weizen. *Fachtagung anlässlich des 100-jährigen Jubiläums des Forschungsstandortes Dornburg*. Dornburg.
- N.U. Agrar GmbH. (08. September 2015). Ertragsaufbau Winterweizen. *Agrarzeitung online*.
- N.U. Agrar GmbH. (18. September 2018). *Wirkung von S-Dünger auf den pH-Wert*.
Abgerufen am 17. September 2025 von <https://www.nu-agrar.de/aktuelles/wirkung-von-s-duenger-auf-den-ph-wert/>
- N.U. Agrar GmbH. (2024). *Versuchsberichte 2024 (37. Berichtsjahr)*. Schackenthal.
- Nazari, M. T., Schommer, V. A., Arenhart Braun, J. C., Franco dos Santos, L., Taixeira Lopes, S., Simon, V., Machado, B. S., Ferrari, V., Colla, L. M., Piccin, J. S. (September 2023). Using *Streptomyces* spp. as plant growth promoters and biocontrol agents. *Rhizosphere (Volume 27)*.
- OCI Agro. (August 2023). *NutriNorm*. Abgerufen am 11. November 2025 von Schwefelgabe bei Winterweizen: Notwendig nach einem nassen Winter:
<https://nutrinorm.de/duengemittel/schwefelgabe-bei-winterweizen/>
- Patel, K., Kapadia, C., Patel, N., Patel, D., Parmar, P., Datta, R., Alharbi, S. A., Ansari, M. J. (Juni 2024). Effect of supplementing Sulphur-oxidizing bacteria with different Sulphur sources on the growth and development of chickpea (*Cicer arietinum*). *Plant Stress (Volume 12)*.
- Pfeuffer GmbH. (o.J. a). *Granomat plus*. Abgerufen am 29. September 2025 von <https://www.pfeuffer.com/de/produkt/granomat-plus>

- Pfeuffer GmbH. (o.J. b). *Granolyser*. Abgerufen am 29. September 2025 von <https://www.pfeuffer.com/de/produkt/granolyser>
- Raiffeisen. (o.J.). *Informationsblatt Weizen*. Abgerufen am 31. August 2025 von <https://www.raiffeisen.com/pflanzen/ackermanager/weizen.html>
- Ranadev, P., Ashwin, R., Bagyaraj, D. J., & Shinde, A. (25. Juli 2023). Sulfur oxidizing bacteria in agro ecosystem and its role in plant productivity—a review. *Journal of applied microbiology*, Oxford Press.
- Reithmeier, D., & Schreiner, F. (o.J.). *Saurer Regen Entstehung, Auswirkungen, Gegenmaßnahmen*. Bayreuth: Universität Bayreuth.
- Roeb, J. (29. September 2023). Wintergetreide: Qualitätsanforderungen und Sortenwahl. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen.
- Rommelmann, C. (01. Juli 2025). *Weizenanbau in Zeiten schwacher Proteinwerte*. Abgerufen am 11. August 2025 von RAGT Saaten Deutschland GmbH: <https://ragt.de/weizenanbau-in-zeiten-schwacher-proteinwerte/>
- Roscher, E. (05. Februar 2025). *Sommergetreide in Kärnten - worauf es ankommt*. Abgerufen am 14. November 2025 von Landwirtschaftskammer Kärnten: <https://ktn.lko.at/sommergetreide-in-kaernten-worauf-es-ankommt+2400+4194506>
- Schönberger, H. (17. Dezember 2024). Schwefeldüngung - Ohne Schwefel wirkt auch Stickstoff schlecht. *Grünes Info Nr. 24/2024*. Schackenthal: N.U. Agrar GmbH.
- Scherer, W., & Welp, G. (2008). Kompost fördert S-Versorgung der Pflanzen. *Getreide Magazin (Sonderdruck)*.
- Schilling, G. (2000). *Pflanzenernährung und Düngung*. Stuttgart (Hohenheim): Eugen Ulmer GmbH & Co.
- Schmidt, A. (27. Juni 2017). *Über anerkannte Methoden des Versuchswesens in der Pflanzenproduktion*. Abgerufen am 23. September 2025 von EXAgT Nachrichten: <https://news.exagt.de/ueber-anerkannte-methoden-des-versuchswesens-in-der-pflanzenproduktion/>
- Schröter, W., Lautenschläger, K.-H., & Teschner, J. (2002). *Taschenbuch der Chemie. (19. Auflage)*. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch.
- Schubert, S. (2018). *Pflanzenernährung (3. vollständig überarbeitete Auflage)*. Stuttgart (Hohenheim): Eugen Ulmer KG.
- Seilnacht, T. (o.J.). *Periodensystem: Schwefel*. Abgerufen am 1. September 2025 von <https://www.seilnacht.com/Lexikon/16Schwef.htm>
- Sinsabaugh, R. L. (2010). Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil. In *Soil Biology & Biochemistry* (42) (S. 391-404).
- SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH. (05. Mai 2020). *Mit Stickstoff und Schwefel den Rohproteingehalt absichern*. Abgerufen am 11. August 2025 von [duengerfuchs.de](https://www.duengerfuchs.de):

- <https://www.duengerfuchs.de/newsletter-artikel/mit-stickstoff-und-schwefel-den-rohproteingehalt-absichern/>
- SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH. (15. März 2022). *Wochenbericht 11-2022*. Abgerufen am 19. August 2025 von [duengerfuchs.de](https://www.duengerfuchs.de/fachberatung/fachberater/fachberater-noerdliches-bayern/wochenbericht-11-2022/): <https://www.duengerfuchs.de/fachberatung/fachberater/fachberater-noerdliches-bayern/wochenbericht-11-2022/>
- Soilytix GmbH. (2025). *SOILYTIX*. Abgerufen am 10. Oktober 2025 von <https://www.soilytix.com>
- Statistisches Bundesamt. (2025). *Ernte-u.Betriebsbericht: Feldfrüchte und Grünland*. Abgerufen am 20. August 2025 von Genesis Online-Datenbank (41241): <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/statistic/41241/details>
- Strickhof. (19. Januar 2024). *Bestandeslenkung Winterweizen*. Abgerufen am 15. November 2025 von <https://www.strickhof.ch/publikationen/bestandeslenkung-winterweizen/>
- Strobl, W., Traunmüller, M., & Kandeler, E. (1993). Schwefelkreislauf. In F. Schinner, R. Öhlinger, E. Kandeler, & R. Margesin, *Bodenbiologische Arbeitsmethoden*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR). (01. März 2024). *Fachinformation: Durchführung der Bodenprobenahme zur Nmin- und Smin-Untersuchung*. Jena.
- Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL). (April 2015). *Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Winterweizen*. Jena.
- The Sulphur Institute (TSI). (o.J.). *About Sulphur: An Introduction to Sulphur*. Abgerufen am 20. September 2025 von <https://www.sulphurinstitute.org/about-sulphur/introduction-to-sulphur/>
- Thiel, H., & Cakmak, I. (2016). Schlüssel zur optimalen Stickstoffnutzung - Schwefel hat vielfältige Funktionen im Eiweißstoffwechsel. *GetreideMagazin Extra (1/2016)*.
- Umweltbundesamt (UBA). (10. Juli 2025). *Schwefeldioxid-Emissionen*. Abgerufen am 11. August 2025 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/schwefeldioxid-emissionen#entwicklung-seit-1990>
- Vockinger, F. (2016). Effect of sulphur fertilisation on yield, nodulation and N₂ fixation of lucerne and yield of winter wheat on organically managed fields in the Pannonian region of North-East Austria. *Masterarbeit*. BOKU - Universität für Bodenkultur Wien.
- YARA GmbH & Co. KG. (o.J. a). *Winterweizen*. Abgerufen am 16. August 2025 von [effizient düngen](https://www.effizientduengen.de/getreidekulturen/winterweizen/): <https://www.effizientduengen.de/getreidekulturen/winterweizen/>
- YARA GmbH & Co.KG. (2010). *Newletter Nr. 5/2010: Mikronährstoffe - kleine Mengen große Wirkung*. Dülmen.

- YARA GmbH & Co.KG. (12. März 2013). *Wie wirksam ist elementarer Schwefel?*
Abgerufen am 17. September 2025 von effizient düngen:
<https://www.effizientduengen.de/2013/schwefel-duengung-wie-wirksam-ist-elementarer-schwefel/>
- YARA GmbH & Co.KG. (o.J. b). *Pflanzenernährung: Schwefelmangel Weizen.*
Abgerufen am 10. September 2025 von
<https://www.yara.de/pflanzenernaehrung/weizen/naehrstoffmangel/schwefelmangel-weizen/>
- YARA GmbH & Co.KG. (12. Mai 2025). *Grünlanddüngung zum zweiten Schnitt: Der Trockenheit einen Schritt voraus.* Abgerufen am 10. November 2025 von
<https://www.yara.de/news-veranstaltungen/news/gruenland-der-trockenheit-einen-schritt-voraus/>
- YARA GmbH & Co.KG. (o.J. c). *Wie Sie das Tausendkorngewicht bei Gerste erhöhen.*
Abgerufen am 14. November 2025 von
<https://www.yara.de/pflanzenernaehrung/gerste/tausendkorngewicht-erhoehen/>
- Zlokarnik, M. (04. Mai 2016). *Schwefelsäure.* Abgerufen am 20. September 2025 von Austria-Forum: <https://austria-forum.org/af/Wissenssammlungen/Essays/Naturwissenschaften/Schwefelsäure>

Anhang

VAR	ZEI	ÄQM	Kornertrag	TKG	Hektoliter	Rohprotein	Kleber	SEDI	Feuchte	
1	1	1	402,5	71,3	48,8	79,4	11,8	23,8	36,6	16,5
		2	370,0	74,1	47,5	79,4	11,9	23,6	39,0	16,9
		3	420,0	78,5	49,1	79,5	11,6	22,7	36,5	16,8
		4	432,5	91,4	49,1	80,1	11,6	22,7	36,3	17,1
	MW		406,3	78,8	48,6	79,6	11,7	23,2	37,1	16,8
	STABW		27,1	8,9	0,8	0,3	0,2	0,6	1,3	0,3
2	1	1	412,5		47,2	79,5	11,9	23,8	39,9	16,4
		2	467,5	80,4	49,1	79,6	12,1	24,4	40,2	16,8
		3	437,5	85,4	47,4	80,0	11,8	23,5	38,4	16,9
		4	517,5	94,9	50,5	80,5	11,6	22,8	39,0	17,0
	MW		458,8	80,3	48,6	79,9	11,9	23,6	39,4	16,8
	STABW		45,2	6,9	1,6	0,5	0,2	0,7	0,8	0,3
3	1	1	355,0	62,9	45,8	78,9	12,3	24,5	39,1	16,5
		2	492,5	78,8	47,4	79,6	11,8	23,4	40,3	16,9
		3	442,5	78,1	48,0	79,7	12,0	23,8	40,1	16,8
		4	422,5	95,7	48,9	80,5	11,3	21,8	35,9	17,2
	MW		428,1	78,9	47,5	79,7	11,9	23,4	38,9	16,9
	STABW		56,9	13,4	1,3	0,7	0,4	1,1	2,0	0,3
4	1	1	320,0	60,7	45,2	78,4	12,5	25,2	40,9	16,5
		2	450,0	84,0	50,7	80,1	11,7	22,9	37,3	16,9
		3	450,0	88,0	48,9	80,3	11,7	23,1	38,7	16,9
		4	477,5	96,3	51,8	80,7	11,2	21,8	36,2	17,2
	MW		424,4	82,3	49,2	79,9	11,8	23,3	38,3	16,9
	STABW		70,8	15,3	2,9	1,0	0,5	1,4	2,0	0,3
5	1	1	422,5	67,8	47,8	79,1	11,9	23,5	38,5	16,7
		2	490,0	83,3	52,3	80,2	11,7	23,3	39,1	17,0
		3	500,0	85,9	50,0	80,1	11,7	23,1	36,8	16,7
		4	420,0	97,4	51,5	80,4	11,5	22,8	39,4	17,2
	MW		458,1	83,6	50,4	80,0	11,7	23,2	38,5	16,9
	STABW		42,8	12,2	2,0	0,6	0,2	0,3	1,2	0,2
6	1	1	400,0	67,4	47,2	79,2	11,9	23,6	38,5	16,8
		2	472,5	85,7	50,5	80,1	11,6	22,8	37,9	17,2
		3	480,0	87,4	49,1	80,4	11,7	23,1	37,8	17,1
		4	475,0	96,5	51,2	80,6	11,5	22,5	37,4	17,2
	MW		456,9	84,3	49,5	80,1	11,7	23,0	37,9	17,1
	STABW		38,0	12,2	1,8	0,6	0,2	0,5	0,5	0,2
7	1	1	375,0	70,1	44,1	78,1	12,4	25,2	41,3	16,7
		2	495,0	96,1	52,1	80,5	11,5	22,2	36,1	16,9
		3	490,0	93,0	49,8	80,3	11,7	23,3	38,2	17,1
		4	442,5	93,4	49,0	80,2	11,4	22,3	37,3	17,1
	MW		450,6	88,2	48,8	79,8	11,8	23,3	38,2	17,0
	STABW		55,7	12,1	3,4	1,1	0,5	1,4	2,2	0,2
8	1	1	387,5	70,2	48,4	79,2	12,4	25,4	43,3	16,9
		2	477,5							
		3	422,5	86,3	47,5	79,7	11,5	22,5	36,5	17,1
		4	445,0	92,7	47,5	80,0	11,6	22,9	37,2	16,9
	MW		433,1	88,8	48,3	79,8	11,8	23,6	39,1	17,0
	STABW		37,9	11,6	0,5	0,4	0,5	1,6	3,7	0,1
9	1	1	347,5	75,4	50,2	79,5	12,1	24,4	41,1	16,9
		2	465,0	89,5	49,0	80,3	11,6	22,9	37,8	16,9
		3	495,0	96,5	49,0	80,4	11,6	22,8	36,3	17,3
		4	412,5	91,3	49,9	80,2	11,6	23,1	37,9	17,0
	MW		430,0	88,2	49,5	80,1	11,7	23,3	38,3	17,0
	STABW		64,7	9,0	0,6	0,4	0,3	0,7	2,0	0,2
10	1	1	425,0	77,9	49,9	79,2	11,7	23,1	38,5	17,0
		2	505,0	90,4	51,0	80,7	11,6	22,9	38,1	17,0
		3	442,5	86,7	49,3	80,1	11,5	22,5	37,7	17,0
		4	470,0	94,6	50,6	80,5	11,3	21,8	35,4	17,0
	MW		460,6	87,4	50,2	80,1	11,5	22,6	37,4	17,0
	STABW		34,9	7,1	0,8	0,7	0,2	0,6	1,4	0,0
11	1	1	452,5	80,1	49,9	79,8	11,7	23,1	38,3	17,0
		2	467,5	82,2	49,8	80,3	11,6	23,0	37,6	17,0
		3	392,5	84,5	49,8	79,9	11,7	23,2	38,5	16,8
		4	452,5	96,0	51,7	81,0	11,6	22,7	38,4	16,9
	MW		441,3	85,7	50,3	80,3	11,7	23,0	38,2	16,9
	STABW		33,3	7,1	0,9	0,5	0,1	0,2	0,4	0,1
12	1	1	380,0	76,2	48,5	79,2	11,7	23,1	38,2	16,9
		2	440,0	76,5	47,5	80,0	11,8	23,6	40,1	16,8
		3	400,0	77,5	49,5	79,5	11,7	23,4	39,6	17,0
		4	460,0	93,8	51,6	80,8	11,4	22,2	36,7	16,8
	MW		420,0	81,0	49,3	79,9	11,7	23,1	38,7	16,9
	STABW		36,5	8,6	1,8	0,7	0,2	0,6	1,5	0,1

Anhang 1: Datengrundlage, sortiert nach Varianten

	Faktor	Sum Sq	Mean Sq	NumDF	DenDF	F value	Pr(>F)	Signifikanz
Kornertrag	FI_DM	244,7	61,17	4	28	4,12	0,009	**
	FI_DM:FII_S	242,8	34,68	7	28	2,34	0,052	.
Ähren pro Quadratmeter	FI_DM	1864,4	466,09	4	33	0,39	0,814	
	FI_DM:FII_S	9007,0	1286,72	7	33	1,08	0,400	
TKG	FI_DM	10,1	2,50	4	33	1,20	0,328	
	FI_DM:FII_S	10,6	1,50	7	33	0,70	0,653	
Hekolitergewicht	FI_DM	0,6	0,20	4	33	1,09	0,377	
	FI_DM:FII_S	0,7	0,10	7	33	0,76	0,626	
Proteingehalt	FI_DM	0,1	0,03	4	33	0,70	0,623	
	FI_DM:FII_S	0,1	0,01	7	33	0,30	0,925	
Klebergehalt	FI_DM	9,6	2,40	4	33	1,10	0,371	
	FI_DM:FII_S	6,5	0,90	7	33	0,40	0,876	
Sedimentationswert	FI_DM	0,5	0,10	4	33	0,30	0,844	
	FI_DM:FII_S	1,3	0,20	7	33	0,50	0,818	
Feuchtigkeitsgehalt	FI_DM	0,1	0,03	4	30	2,50	0,065	
	FI_DM:FII_S	0,1	0,02	7	30	1,80	0,122	

Anhang 2: Statistische Auswertung Ertrags- und Qualitätsparameter

Auswertung Faktor FI_DM – DTHA							
Anova							
Faktor	Sum Sq	Mean Sq	NumDF	DenDF	F value	Pr(>F)	Signifikanz
FI_DM	244,7	61,2	4	28,1	4,1	0,009	**
FI_DM:FII_S	242,8	34,7	7	28,1	2,3	0,052	.
Emmeans + CLD (adjust = 'none')							
FI_DM	emmean	SE	df	lower.CL	upper.CL	.group	
Kontrolle	78,80	5,37	4,46	64,47	93,14	a	
SSA	80,99	5,24	4,02	66,48	95,51	ab	
Kieserit	84,69	5,14	3,73	70,01	99,37	bc	
Schwefellinsen	84,71	5,14	3,73	70,03	99,39	bc	
KaliSop	85,31	5,16	3,78	70,66	99,96	c	
Paarvergleiche (adjust = 'none')							
contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value	Signifikanz	
KaliSop - Kieserit	0,6	1,6	28,1	0,4	0,7		
KaliSop - Kontrolle	6,51	2,26	28,03	2,88	0,01	**	
KaliSop - Schwefellinsen	0,60	1,63	28,06	0,37	0,71		
KaliSop - SSA	4,32	1,90	28,02	2,28	0,03	*	
Kieserit - Kontrolle	5,88	2,22	28,00	2,65	0,01	*	
Kieserit - Schwefellinsen	-0,02	1,57	28,00	-0,01	0,99		
Kieserit - SSA	3,69	1,86	28,10	1,98	0,06	.	
Kontrolle - Schwefellinsen	-5,90	2,22	28,00	-2,65	0,01	*	
Kontrolle - SSA	-2,19	2,44	28,06	-0,90	0,38		
Schwefellinsen - SSA	3,71	1,86	28,10	1,99	0,06	.	
LSD-Grenzdifferenz (alpha = 0.05)							
Grenzdifferenz	4,0						

Anhang 3: Statistiktabelle Kornertrag

Auswertung Streptomyces Termin 2							
Anova							
Faktor	Sum Sq	Mean Sq	NumDF	DenDF	F value	Pr(>F)	Signifikanz
FII_S	3,2	1,1	3	9,0	35,5	0,00003	***
Emmeans + CLD (adjust = 'none')							
FII_S	emmean	SE	df	lower.CL	upper.CL	group	
25	1,37	0,09	11,35	1,17	1,58	a	
0	1,66	0,09	11,35	1,46	1,87	b	
50	2,34	0,09	11,35	2,14	2,55	c	
100	2,43	0,09	11,35	2,23	2,64	c	
Paarvergleiche (adjust = 'none')							
contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value	Signifikanz	
FII_S0 - FII_S25	0,29	0,12	9,00	2,38	0,04	*	
FII_S0 - FII_S50	-0,68	0,12	9,00	-5,52	0,00	***	
FII_S0 - FII_S100	-0,77	0,12	9,00	-6,27	0,00	***	
FII_S25 - FII_S50	-0,97	0,12	9,00	-7,90	0,00	***	
FII_S25 - FII_S100	-1,06	0,12	9,00	-8,65	0,00	***	
FII_S50 - FII_S100	-0,09	0,12	9,00	-0,75	0,47		
LSD-Grenzdifferenz (alpha = 0.05)							
Grenzdifferenz	0,3						

Anhang 4: Statistiktabelle Streptomyces Termin 2

Auswertung Peribacillus Termin 2							
Anova							
Faktor	Sum Sq	Mean Sq	NumDF	DenDF	F value	Pr(>F)	Signifikanz
FII_S	5,4	1,8	3	9,0	3,7	0,05	.
Emmeans + CLD (adjust = 'none')							
FII_S	emmean	SE	df	lower.CL	upper.CL	group	
25	2,0	0,4	11,9	1,2	2,8	a	
0	2,2	0,4	11,9	1,4	2,9	a	
100	3,0	0,4	11,9	2,3	3,8	ab	
50	3,4	0,4	11,9	2,6	4,2	b	
Paarvergleiche (adjust = 'none')							
contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value	Signifikanz	
FII_S0 - FII_S25	0,16	0,49	9,00	0,32	0,76		
FII_S0 - FII_S50	-1,22	0,49	9,00	-2,49	0,03	*	
FII_S0 - FII_S100	-0,88	0,49	9,00	-1,78	0,11		
FII_S25 - FII_S50	-1,38	0,49	9,00	-2,81	0,02	*	
FII_S25 - FII_S100	-1,04	0,49	9,00	-2,10	0,06	.	
FII_S50 - FII_S100	0,35	0,49	9,00	0,70	0,50		
LSD-Grenzdifferenz (alpha = 0.05)							
Grenzdifferenz	2279,1						

Anhang 5: Statistiktabelle Peribacillus Termin 2

Auswertung Tumebacillus Termin 2							
Anova							
Faktor	Sum Sq	Mean Sq	NumDF	DenDF	F value	Pr(>F)	Signifikanz
FII_S	7,4	2,5	3	12,0	7,7	0,004	**
Emmeans + CLD (adjust = 'none')							
FII_S	emmean	SE	df	lower.CL	upper.CL	group	
0	1,63	0,28	12,00	1,02	2,25	a	
25	1,70	0,28	12,00	1,08	2,32	a	
50	2,68	0,28	12,00	2,06	3,29	b	
100	3,26	0,28	12,00	2,64	3,87	b	
Paarvergleiche (adjust = 'none')							
contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value	Signifikanz	
FII_S0 - FII_S25	-0,07	0,40	9,00	-0,17	0,87		
FII_S0 - FII_S50	-1,04	0,40	9,00	-2,60	0,03	*	
FII_S0 - FII_S100	-1,62	0,40	9,00	-4,05	0,00	**	
FII_S25 - FII_S50	-0,97	0,40	9,00	-2,43	0,04	*	
FII_S25 - FII_S100	-1,55	0,40	9,00	-3,88	0,00	**	
FII_S50 - FII_S100	-0,58	0,40	9,00	-1,45	0,18		
LSD-Grenzdifferenz (alpha = 0.05)							
Grenzdifferenz	0,9						

Anhang 6: Statistiktabelle Tumebacillus Termin 2

Auswertung Arylsulfatase Termin1							
Anova							
Faktor	Sum Sq	Mean Sq	NumDF	DenDF	F value	Pr(>F)	Signifikanz
FII_S	5023680,2	1674560,1	3	12,0	7,8	0,004	**
Emmeans + CLD (adjust = 'none')							
FII_S	emmean	SE	df	lower.CL	upper.CL	.group	
25	1878,64	232,39	12,00	1372,31	2384,97	a	
50	2281,44	232,39	12,00	1775,12	2787,77	a	
0	2401,34	232,39	12,00	1895,01	2907,66	a	
100	3401,49	232,39	12,00	2895,16	3907,81	b	
Paarvergleiche (adjust = 'none')							
contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value	Signifikanz	
FII_S0 - FII_S25	522,69	328,64	9,00	1,59	0,15		
FII_S0 - FII_S50	119,89	328,64	9,00	0,36	0,72		
FII_S0 - FII_S100	-1000,15	328,64	9,00	-3,04	0,01	*	
FII_S25 - FII_S50	-402,80	328,64	9,00	-1,23	0,25		
FII_S25 - FII_S100	-1522,84	328,64	9,00	-4,63	0,00	**	
FII_S50 - FII_S100	-1120,04	328,64	9,00	-3,41	0,01	**	
LSD-Grenzdifferenz (alpha = 0.05)							
Grenzdifferenz	743,4						

Abbildung 7: Statistiktabelle Arylsulfatase Termin 1

Auswertung Arylsulfatase Termin 2							
Anova							
Faktor	Sum Sq	Mean Sq	NumDF	DenDF	F value	Pr(>F)	Signifikanz
FII_S	1614578,0	538192,7	3	9,0	19,8	0,0003	***
Emmeans + CLD (adjust = 'none')							
FII_S	emmean	SE	df	lower.CL	upper.CL	.group	
0	257,88	119,04	6,62	-26,87	542,64	a	
50	683,29	119,04	6,62	398,53	968,05	b	
25	870,26	119,04	6,62	585,50	1155,02	bc	
100	1128,75	119,04	6,62	843,99	1413,51	c	
Paarvergleiche (adjust = 'none')							
contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value	Signifikanz	
FII_S0 - FII_S25	-612,38	116,61	9,00	-5,25	0,00	***	
FII_S0 - FII_S50	-425,40	116,61	9,00	-3,65	0,01	**	
FII_S0 - FII_S100	-870,86	116,61	9,00	-7,47	0,00	***	
FII_S25 - FII_S50	186,97	116,61	9,00	1,60	0,14		
FII_S25 - FII_S100	-258,48	116,61	9,00	-2,22	0,05	.	
FII_S50 - FII_S100	-445,46	116,61	9,00	-3,82	0,00	**	
LSD-Grenzdifferenz (alpha = 0.05)							
Grenzdifferenz	263,8						

Abbildung 8: Statistiktabelle Arylsulfatase Termin 2

Auswertung Faktor Polyphenol-Oxidase Termin 2							
Anova							
Faktor	Sum Sq	Mean Sq	NumDF	DenDF	F value	Pr(>F)	Signifikanz
FII_S	402961864,9	134320621,6	3	9,0	66,2	0,000002	***
Emmeans + CLD (adjust = 'none')							
FII_S	emmean	SE	df	lower.CL	upper.CL	.group	
100	458,68	714,88	12,00	-1098,93	2016,29	a	
50	2191,79	714,88	12,00	634,19	3749,40	a	
25	9188,71	714,88	12,00	7631,10	10746,31	b	
0	12741,53	714,88	12,00	11183,93	14299,14	c	
Paarvergleiche (adjust = 'none')							
contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value	Signifikanz	
FII_S0 - FII_S25	3552,83	1007,50	9,00	3,53	0,01	**	
FII_S0 - FII_S50	10549,74	1007,50	9,00	10,47	0,00	***	
FII_S0 - FII_S100	12282,85	1007,50	9,00	12,19	0,00	***	
FII_S25 - FII_S50	6996,91	1007,50	9,00	6,94	0,00	***	
FII_S25 - FII_S100	8730,03	1007,50	9,00	8,67	0,00	***	
FII_S50 - FII_S100	1733,11	1007,50	9,00	1,72	0,12		
LSD-Grenzdifferenz (alpha = 0.05)							
Grenzdifferenz	2279,1						

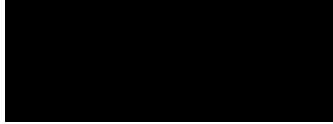
Abbildung 9: Statistiktabelle Polyphenol-Oxidase Termin 2

	Termin am 22.04.25	Termin am 12.05.25
Kontrolle	6,29	6,44
Schwefellinsen 25 kg S/ha	6,43	6,49
Schwefellinsen 50 kg S/ha	6,40	6,50
Schwefellinsen 100 kg S/ha	6,42	6,48

Anhang 10: Durchschnittlicher pH-Wert in der Kontrolle und den Varianten mit Schwefellinsen am 22.04. und 12.05.

Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht in einem anderen Studiengang als Prüfungsleistung vorgelegt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt habe.



Bernburg, den 17.12.2025