

Untersuchungen zur Sulfatabtrennung mit dem Ziel der Gewinnung von Ammoniumsulfatdünger

Teilprojekt 1.5

Autoren: Kieschnik, Lennart; Lünich, Kathleen; Zönnchen, Claudia

Bearbeiter des Versuchs/der Methodik: Versuchsstation Nossen des Referats 77 der multifunktionalen Versuchsbasis Pflanzenbau am LfULG/Dr. Michael Grunert

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



Freistaat
SACHSEN

Berichtszeitraum: Januar – Juni 2020

Berichtsabschluss: 15.06.2020

Gefördert durch den europäischen Fonds für Regionalentwicklung



Europäische Union. Europäischer
Fonds für regionale Entwicklung.
Evropská unie. Evropský fond pro
regionální rozvoj.



Ahoj sousede. Hallo Nachbar.
Interreg V A / 2014 – 2020

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	II
TABELLENVERZEICHNIS	III
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	IV
1 EINFÜHRUNG UND HINTERGRUND	1
1.1 EINFÜHRUNG UND ZIELSTELLUNG	1
1.2 DAS RODOSAN VERFAHREN UND SEINE ABPRODUKTE	2
1.3 RECHTLICHER RAHMEN	4
1.4 BISHERIGE UNTERSUCHUNGEN	5
1.5 AUSGEWÄHLTE GRUNDLEGENDE AUSSAGEN ZUR PFLANZENPHYSIOLOGIE	5
2 VERSUCHSAUFBAU UND METHODIK DER GEFÄßVERSUCHE	6
2.1 VERWENDETE DÜNGEMITTEL	6
2.2 VERSUCHSAUFBAU	8
2.3 METHODIK DER ANALYSE	11
3 ERGEBNISSE	13
3.1 AUSWERTUNG DER KORNTROCKENMASSE	16
3.1.1 BESCHREIBENDE STATISTIK UND VISUALISIERUNG	16
3.1.2 PRÜFUNG DER VARIANZHOMOGENITÄT – LEVENE-TEST	18
3.1.3 KRUSKAL-WALLIS-TEST ZUR PRÜFUNG AUF SIGNIFIKANTE UNTERSCHIEDE	18
3.1.4 NEMENYI-TEST ZUR SPEZIFIKATION DER UNTERSCHIEDE	19
3.2 AUSWERTUNG DES STICKSTOFFENTZUGS	24
3.2.1 BESCHREIBENDE STATISTIK UND VISUALISIERUNG	24
3.2.2 PRÜFUNG DER VARIANZHOMOGENITÄT – LEVENE-TEST	26
3.2.3 KRUSKAL-WALLIS-TEST ZUR PRÜFUNG AUF SIGNIFIKANTE UNTERSCHIEDE	26
3.2.4 NEMENYI-TEST ZUR SPEZIFIKATION DER UNTERSCHIEDE	26
4 DISKUSSION	31
4.1 DISKUSSION ZUR DÜNGEWIRKUNG	31
4.2 DISKUSSION DER UNTERSCHIEDE INNERHALB DER UNTERSUCHTEN DÜNGEMITTEL/KONZENTRATE	32
4.3 FEHLERANALYSE	33
5 ZUSAMMENFASSUNG	34
LITERATURVERZEICHNIS	V

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<i>Abbildung 1: Wirkungsweise des RODOSAN-Verfahrens</i>	<i>3</i>
<i>Abbildung 2: Gefäße mit Sommerweizen (unten) aus den Gefäßversuchen im Glashaus (oben) ohne Temperatursteuerung am LfJULG in Nossen. Die unten dargestellten Gefäße entsprechen Prüfglieder, alle aus dem Jahr 2016, entsprechen: 173 - Kontrolle, 176 - 0,5 g N NH₄NO₃, 180 - 1,0 g N NH₄NO₃, 183 - 1,5 g N NH₄NO₃, 190 - 2,0 g N NH₄NO₃. (Fotos: Dr. Michael Grunert, LfJULG)</i>	<i>8</i>
<i>Abbildung 3: Aufbau der Gefäßversuche je Jahr im Zeitraum 2016-2018 am LfJULG in Nossen. Konzentrat 1 konnte im Jahr 2018 nicht geprüft werden, da Konzentrat 1 mehr vorrätig war.</i>	<i>9</i>
<i>Abbildung 4: Schematisches Vorgehen für die statistische Analyse zur Fragestellung bzw. Entscheidungsübersicht</i>	<i>12</i>
<i>Abbildung 5: Mittelwerte und Standardabweichung der Untersuchungsparameter Korntrockenmasse (oben) und Stickstoffentzug (unten) des Sommerweizens bei verschiedenen Stickstoffzugaben (N) der Düngemittel/Konzentrate für alle Versuchsjahre (Anzahl der Stichproben = 4; keine Werte für Konzentrat 1 in 2018)</i>	<i>14</i>
<i>Abbildung 6: Korntrockenmassen des Sommerweizens der mit Düngemitteln/Konzentraten behandelten Gefäße sowie der unbehandelten Kontrollen über die gesamte Versuchsdauer von 2016-2018. Mittelwerte sind als schwarzes Kreuz dargestellt.</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 7: Stickstoffentzüge von Körnern des Sommerweizens der mit Düngemittel/Konzentraten behandelten Gefäße sowie der unbehandelten Kontrollen über die gesamte Versuchsdauer von 2016-2018. Mittelwerte sind als schwarzes Kreuz dargestellt.</i>	<i>25</i>



TABELLENVERZEICHNIS

<i>Tabelle 1: Übersicht zu den verwendeten Düngemitteln/Konzentraten</i>	7
<i>Tabelle 2: Analyseergebnisse der verwendeten aufbereiteten Konzentrate aus dem RODOSAN-Verfahren nach (Friedrich, Zschornack, & Viehweger, 2017). Fehlende Angaben sind mit (-) gekennzeichnet</i>	7
<i>Tabelle 3: Ausgewählte Eigenschaften des verwendeten Bodensubstrats</i>	10
<i>Tabelle 4: Mittelwerte und Standardabweichung der Untersuchungsparameter Korntrockenmasse und Stickstoffentzug (in g/Gefäß) der Gefäßversuche mit verschiedenen Stickstoffzugaben (N) an Düngemittel/Konzentrat für alle Jahre (n* = 4; keine Werte für Konzentrat 1 in 2018)</i>	15
<i>Tabelle 5: Ergebnistabelle des Levene-Tests für die Korntrockenmassen</i>	18
<i>Tabelle 6: Ergebnis des Kruskal-Wallis-Test für die Ertragsmenge aller Düngemittelstufen über die gesamte Versuchsdauer</i>	19
<i>Tabelle 7: Ergebnisse des Nemenyi-Tests für die Korntrockenmasse für das Jahr 2016. Rote Zahlen zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen den Vergleichsgrößen an.</i>	21
<i>Tabelle 8: Ergebnisse des Nemenyi-Tests für die Korntrockenmasse für das Jahr 2017. Rote Zahlen zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen den Vergleichsgrößen an.</i>	22
<i>Tabelle 9: Ergebnisse des Nemenyi-Tests für die Korntrockenmasse für das Jahr 2018. Rote Zahlen zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen den Vergleichsgrößen an.</i>	23
<i>Tabelle 10: Ergebnistabelle des Levene-Tests für die Stickstoffentzüge</i>	26
<i>Tabelle 11: Ergebnis des Kruskal-Wallis-Test für die Stickstoffentzüge aller Düngemittelstufen über die gesamte Versuchsdauer</i>	26
<i>Tabelle 12: Ergebnisse des Nemenyi-Tests für die Kornstickstoffentzüge für das Jahr 2016. Rote Zahlen zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen den Vergleichsgrößen an.</i>	28
<i>Tabelle 13: Ergebnisse des Nemenyi-Tests für die Kornstickstoffentzüge für das Jahr 2017. Rote Zahlen zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen den Vergleichsgrößen an.</i>	29
<i>Tabelle 14: Ergebnisse des Nemenyi-Tests für die Kornstickstoffentzüge für das Jahr 2018. Rote Zahlen zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen den Vergleichsgrößen an.</i>	30



ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ÄTH	Ähre tragende Halme
BfUL	Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft
CAL	Calcium-Acetat-Lactat-Auszug
DüMV	Düngemittelverordnung
H ₀	Nullhypothese
IKTS	Institut für Keramische Technologien und Systeme
Konz.	Konzentrat
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

1 EINFÜHRUNG UND HINTERGRUND

1.1 EINFÜHRUNG UND ZIELSTELLUNG

Durch den Bergbau in Sachsen wurde, unter anderem, massiv in den Wasserhaushalt und die Wasserqualität eingegriffen. Spätestens seit Verabschiedung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie ist es eine Priorität des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), einen Beitrag zur Verbesserung des Beschaffenheitszustands der Gewässer zu leisten. Die Wasserrahmenrichtlinie fordert die Schaffung und Einhaltung des guten ökologischen und chemischen Zustands/Potentials aller Gewässer und beinhaltet ein Verschlechterungsverbot. Dies zu erreichen, ist oft ohne technische Maßnahmen nicht möglich. Das zeigt sich besonders im Fall von hohen Eisen- und Sulfatkonzentrationen in Gewässern der Braunkohleregionen der Lausitz und im Leipziger Raum. Während Eisen sich mit technischen Maßnahmen gut aus den Gewässern entfernen lässt, gibt es derzeit für Sulfat kein adäquates Verfahren. Bei den meisten Sulfatreinigungsverfahren verhindert die Wirtschaftlichkeit und der aktuelle Stand der Technik einen großräumigen Einsatz. Deshalb wird den hohen Sulfatkonzentrationen in Gewässern in den meisten Fällen mit Verdünnung entgegengewirkt.

Ein Verfahren, das sich der Sulfateliminierung aus Gewässern widmet, ist das RODOSAN-Verfahren. Das RODOSAN-Verfahren ist ein elektrochemisches Verfahren, das wie alle derartigen Verfahren, von den klassischen Prozessen der Elektrolyse, Elektrodialyse und der Wanderung von Ionen in einem elektrischen Feld abgeleitet ist (Friedrich, Zschornack, & Viehweger, 2017). Das Verfahren war primär dazu angedacht, die Sulfatkonzentrationen in Wasserkörpern zu reduzieren. Es ist zu beachten, dass das RODOSAN-Verfahren nach aktuellem Stand (2020) bisher nur im Labormaßstab zufriedenstellende Ergebnisse hinsichtlich der Abtrennleistung lieferte. Im Pilotmaßstab und für einen großflächigen Einsatz muss es weiter qualifiziert werden.

Das Verfahren steht daher vor erheblichen technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen, um ein verhältnismäßiges Werkzeug für die Reinigung von Wasserkörpern zu werden. Zum einen liegt die Abreinigungsleistung im Pilotmaßstab für große Volumenströme derzeit lediglich bei bis zu 60 % (Friedrich, Zschornack, & Viehweger, 2017). Diese Abreinigung ist bei Sulfatkonzentrationen von über 2000 mg/l in den ostsächsischen Fließgewässern und Orientierungswerten von 250 mg/l nach der Oberflächengewässerverordnung 2016 nicht ausreichend. Zum anderen verursachte das Verfahren im Pilotmaßstab hohe Kosten. Diese haben ihren Ursprung, neben dem hohen Stromverbrauch, in den Entsorgungskosten der im Reinigungsprozess entstandenen Abprodukte. Um die hohen Verfahrenskosten in einem gewissen Umfang wirtschaftlich zu kompensieren, wurde vom Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Studien (IKTS) vorgeschlagen, die Abprodukte einer Aufbereitung zu unterziehen, um sie anschließend als Düngemittel verkaufen zu können (Friedrich, Zschornack, & Viehweger, 2017). Aus dem vorgeschlagenem Ansatz ergaben sich drei Hauptfragen, um die Umsetzbarkeit und den Erfolg dieser Strategie einschätzen zu können:

- (1) Ist das Inverkehrbringen als Düngemittel der aufbereitenden Abprodukte rechtlich („ohne weiteres“) möglich bzw. unter welchen Bedingungen und mit welchem Aufwand?

- (2) Welchen Effekt haben die aufbereitenden Abprodukte auf Agrarpflanzen generell und im Vergleich zu konventionellen, mineralischen Düngemitteln? Ist die Wirkung hinsichtlich des Ertrages im Vergleich zu konventionellen, mineralischen Düngern gleichwertig?
- (3) Wie ändert sich die Kostenrechnung für das RODOSAN-Verfahren tatsächlich durch den Verkauf der aufbereiteten Abprodukte als Düngemittel?

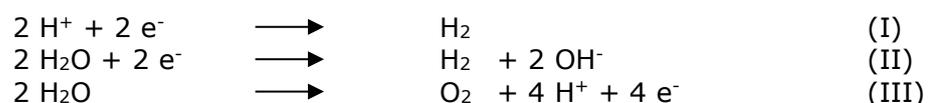
Anfang 2017 legten Friedrich et al. vom IKTS im Auftrag des LfULG eine Studie zur Bewertung der Fragen (1) und (2) vor. Dabei nutzte das IKTS die Ergebnisse von Gefäßversuchen zur Düngewirkung aufbereiteter Konzentrate aus den Abprodukten am LfULG aus dem Jahr 2016. Friedrich et al. (2017, Seite 2) kamen zu dem Schluss, „[..], dass die durch Elektrolyse und nachfolgendes thermisches Aufkonzentrieren erzeugten Ammoniumsulfatlösungen über ein konventionelles Düngemittel mindestens gleichwertige Düngewirkung verfügen“. Weiterhin ergab ein Abgleich mit den gesetzlichen Anforderungen an Düngemittel, „[...], dass ein Inverkehrbringen sowohl nach EU-Recht als auch nach Düngemittelverordnung ohne weiteres möglich ist, sofern das zu behandelnde Wasser als Abwasser deklariert ist“.

Nach einer internen Bewertung des von Friedrich (2017) vorgelegten Berichts ergaben sich für das LfULG einige Unklarheiten bzw. blieben Fragen weiterhin unbeantwortet. Im Rahmen des europäisch geförderten Projekts „Vita-Min“, in dem die Weiterführung der Arbeiten am RODOSAN-Verfahren geplant war, wurde weiter an den oben genannten Fragen gearbeitet. In dieser vorliegenden Studie (Teilprojekt 1.5) wurden zusätzlich zu den Ergebnissen der Gefäßversuche von 2016 auch die der Jahre 2017 und 2018 ausgewertet, um vor allem der Frage (2) nach der Düngewirkung weiter nachzugehen. Nach den ersten Auswertungen, die in Friedrich et al. (2017) gemacht worden sind, wird nun eine umfassende statistische Analyse der Gefäßversuche vorgenommen, um belastbarere Aussagen zu gewinnen.

1.2 DAS RODOSAN VERFAHREN UND SEINE ABPRODUKTE

Die Kenntnis der Wirkungsweise des Verfahrens ist entscheidend, um die Zusammensetzung der anfallenden Abprodukte zu verstehen, aus denen schließlich die Konzentrate gewonnen werden. Dies ist nicht nur für spätere wirtschaftliche Bewertungen wichtig, sondern auch für die Interpretation der Wirkungsweise der aufbereiteten Abprodukte auf die Pflanzen. Im Folgenden wird das RODOSAN-Verfahren gemäß Friedrich et al. (2017) kurz beschrieben.

Abbildung 1 zeigt die Wirkungsweise des RODOSAN-Verfahrens. Das zu reinigende, sulfatreiche Wasser wird durch den Kathodenraum (blau markiert) einer Membranelektrolysezelle geleitet. Wird an die Elektroden einer solchen Zelle eine ausreichend hohe Gleichspannung angelegt, folgt eine Elektrolyse oder elektrochemische Wasserzersetzung, bei der an der Kathode Wasserstoff (Gleichung I und II aufgrund der Anwesenheit freier Ladungsträger) und an der Anode Sauerstoff (Gleichung III) freigesetzt werden.



Daraufhin steigt der pH-Wert im Kathodenraum an (da dem System Wasserstoff entzogen wird), sodass hydrolysierbare Kationen (Eisen, Aluminium, etc.) ausgefällt werden. Die

Sulfationen haben nun kein ihre Ladung kompensierendes Kation mehr und werden gemäß dem Gesetz der Elektroneutralität vom elektrischen Feld zur Wanderung durch die Ionenaustauschermembran (graue Barriere zwischen den Zellen in Abbildung 1) in den Anodenraum (rot markiert) gezwungen und dort angereichert. In der Folge bilden sie mit den in der Anodenreaktion entstandenen Protonen Schwefelsäure. Diese wird im Anolyten angereichert. Der Anolyt ist ein Teil des Elektrolyten, der in direktem Einfluss der Anode bei einer Elektrolyse steht. Analog ist der Katholyt definiert, der in diesem Fall das sulfatreiche, zu reinigende Wasser ist. Der Anolyt ist auch als Trägermedium für die späteren Abprodukte zu verstehen.

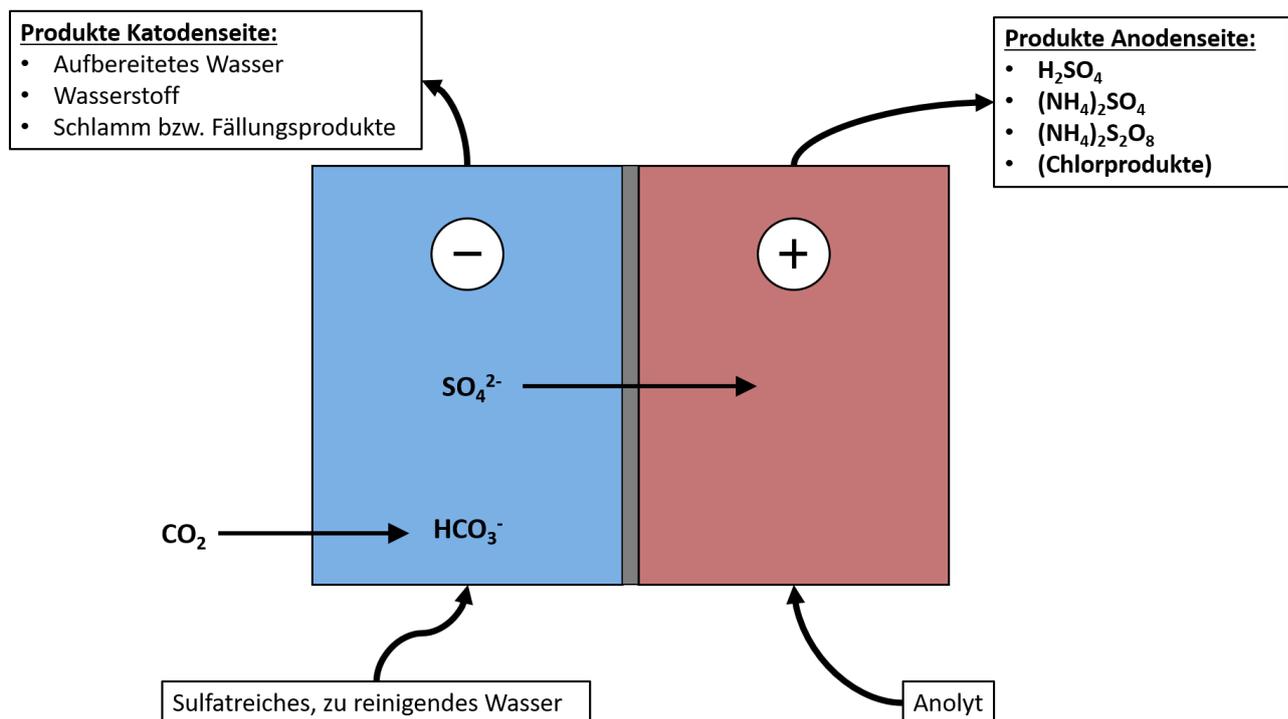
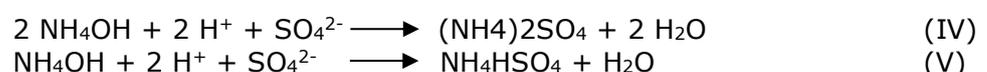


Abbildung 1: Wirkungsweise des RODOSAN-Verfahrens

Diesem grundlegenden Prinzip des Verfahrens folgend, entstehen zwei Arten von Abprodukten: (Schwer-)metallschlämme und Schwefelsäure. Beide sind hinsichtlich ihrer Wirkung auf Umwelt und Mensch problematisch, dementsprechend auch in ihrer Entsorgung. Während für Schwermetallschlämme gegenwärtig keine nachhaltigen Nutzungsfunktionen mit großem Mengenbedarf bekannt sind, haben Friedrich et al. (2017) eine Methodik zur Aufbereitung der Schwefelsäure vorgeschlagen, aus der letztendlich das Düngemittel hervorgeht. Hierfür sind zwei wesentliche Schritte nötig. Zunächst wird die Schwefelsäure-Lösung mit Ammoniumhydroxid behandelt, sodass unter anderem unter der folgenden Reaktionsgleichung (IV) bzw. (V) Ammoniumsulfat bzw. Ammoniumhydrogensulfat entstehen:



Gemäß den Gleichungen (IV) und (V) entstehen die Produkte in Lösung und müssen daher im zweiten Schritt aufkonzentriert werden. Es entsteht das sogenannte Konzentrat, dass von Friedrich et al. (2017) als potenzielles Düngemittel gesehen wird. Teile des gewonnenen Konzentrates wurden für den betrachteten Versuch aufkonzentriert, um ein mögliches „[...] Upgrade der Konzentratlösung zur Verbesserung der Düngeeigenschaften [...]“ (Friedrich et al., 2017, Seite 7) zu überprüfen. Aufkonzentrieren bedeutet, dass das Ammoniumsulfat aus der Flüssigkeit extrahiert wird und entsprechend in konzentrierter Form vorliegt. Dies erfolgte thermisch mittels Rotationsverdampfer vom Typ JULABO bei vermindertem Druck bis zur beginnenden Fällung (Friedrich, Zschornack, & Viehweger, 2017). Das eigentliche Konzentrat ist gelöstes, aufkonzentriertes Ammoniumsulfat.

1.3 RECHTLICHER RAHMEN

In der Europäischen Union schreibt die EU-Verordnung 2003/2003/EG über Düngemittel vor, welche Anforderungen mineralische EU-Düngemittel erfüllen müssen, um einsatzfähig zu sein. Dabei werden Mindestnährstoffgehalte festgelegt und auch Einzelheiten zur ordnungsgemäßen Kennzeichnung bestimmt.

In Deutschland regelt die Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung – DüMV), welche Substanzen als Düngemittel gehandelt werden dürfen. In ihr werden Düngemitteltypen definiert und ebenfalls festgelegt, welche Mindestgehalte für die einzelnen Nährstoffe einzuhalten sind. Außerdem bestimmt sie Kennzeichnungsschwellen und Obergrenzen für Schadstoffe, etwa für Schwermetalle, und welche Informationen für eine ordnungsgemäße Kennzeichnung sowie für eine sachgerechte Lagerung und Anwendung aufzuführen sind.

Friedrich et al. beschreiben in ihrer Studie von 2017, dass ein Inverkehrbringen „[...] sowohl nach EU- als auch nach deutschem Düngemittelrecht ohne weiteres möglich ist, wenn ein Aufstocken des Stickstoffgehalts vorgenommen wird [...] und das zu behandelnde (Gruben-)Wasser als Abwasser deklariert ist.“ (Friedrich, 2017, Seite 2). Dementsprechend müssen folgende grundlegende Punkte weiterhin aus Sicht des LfULG diskutiert werden:

- inwiefern das zu reinigende Wasser aus den verschiedensten Quellen (Seen, Flüsse, Grundwasser) vor der Behandlung/Reinigung ein Abwasser im Sinne von § 54 Abs. 1, Nr.1 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) ist,
- und ob unabhängig von dieser Einstufung das im Ergebnis der Behandlung der Wässer entstehende Abprodukt (auch) ein Abwasser im besagten Sinne (§ 54 Abs. 1, Nr.1 WHG) ist. In diesem Falle wäre die Herstellung eines Düngemittels eine Abwasserbehandlung

oder

- inwiefern es sich bei dem Analyten um Abfall im Sinne der Abfalldefinition nach § 3 Abs.1 in Verbindungen mit den Absätzen 2 bis 4 Kreislaufwirtschaftsgesetz handelt. In diesem Falle ist das Verfahren der Düngemittelherstellung und die Aufkonzentrierung selbst eine Abfallbehandlungsmaßnahme.

Die genaue rechtliche Situation ist aus Sicht des LfULG dementsprechend zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Berichts weiterhin ungeklärt.

1.4 BISHERIGE UNTERSUCHUNGEN

Die Studie von Friedrich et al. (2017), beauftragt durch und in Zusammenarbeit mit dem LfULG, hat erstmalig Ergebnisse von Gefäßversuchen mit Einsatz der aufbereiteten RODOSAN-Abprodukte am LfULG genutzt, um die Wirksamkeit dessen zu überprüfen. Die dreijährigen Gefäßversuche, die im Abschnitt 2.1 näher erläutert werden, starteten im Jahr 2016 in den Versuchsgewächshäusern des LfULG in Nossen. Zwar wurden bereits einige Aspekte aus der Arbeit von Friedrich et al. (2017) zitiert, doch sollen im Folgenden die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst werden:

- Die aus dem RODOSAN-Verfahren gewonnen und aufbereiteten Konzentrate sind herkömmlichen bzw. konventionellen, mineralischen Düngemitteln mindestens gleichwertig.
- Das gewonnene „Düngemittel“ ist „frei von Schadstoffen“.
- Ein Inverkehrbringen als Stickstoffdünger ist „ohne weiteres“ möglich, wenn eine Aufkonzentrierung vorgenommen wird.
- Ein Inverkehrbringen als Schwefeldünger ist ebenfalls möglich, sofern das zu behandelnde Wasser als Abwasser deklariert ist.
- Eine Antragstellung zur Zulassung der Produkte aus dem RODOSAN-Verfahren wird gegenwärtig für nicht erforderlich gehalten.
- Es gibt keine sonstigen Hinweise, die einer Verwertung der Abprodukte aus dem RODOSAN-Verfahren entgegenstehen.

In Friedrich et al. (2017) konnten zum damaligen Zeitpunkt nur die Ergebnisse der Gefäßversuche aus dem Jahr 2016 ausgewertet werden. Außerdem wurden die Ergebnisse lediglich grafisch dargestellt und visuell interpretiert, aber keine statistische Analyse durchgeführt. Es wurden die ausgewählten Parameter Kornmasse, Stickstoff- und Schwefelentzug ausgewertet. Insofern war es das Anliegen des LfULG, die Ergebnisse der Jahre 2017 und 2018 in eine neutrale, abschließende, weitergehende Auswertung einzubeziehen und ggf. die Aussagen aus Friedrich et al. (2017) stichhaltig belegen zu können. Das Ziel war es, eine endgültige auf statistischen Analysen basierende Aussage hinsichtlich der Wirkung und Vergleichbarkeit der aufbereiteten RODOSAN-Abprodukte (Konzentrate) zu konventionellen, mineralischen Düngemitteln treffen zu können.

1.5 AUSGEWÄHLTE GRUNDLEGENDE AUSSAGEN ZUR PFLANZENPHYSIOLOGIE

Für den Versuchsaufbau sowie die Durchführung und Interpretation der Ergebnisse ist das Verständnis der Funktionsweise von Düngemitteln und der Pflanzenphysiologie sowie der Pflanze-Boden-Wechselwirkung wichtig.

Die für die Düngeversuche verwendeten Konzentrate des RODOSAN-Verfahrens enthalten unterschiedliche Konzentrationen an Schwefel und Stickstoff (vgl. Tabelle 2). Sowohl Schwefel als auch Stickstoff sind Makronährstoffe für Pflanzen, da sie Bestandteile von Aminosäuren sind (Maathuis, 2009). Für Pflanzen spielt es sowohl eine Rolle wann und wie häufig gedüngt wird, als auch in welcher Zusammensetzung. Die Konzentration in der Bodenlösung beeinflusst letztlich die Fähigkeit der Pflanze zur Aufnahme von Nährstoffen aus der Bodenlösung (Hayward & Winifred, 1944).

Sommerweizen hat gemäß den Angaben der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalens einen Mindestbedarf von 190 kg/ha Stickstoff (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen

N. W., 2015) und profitiert von Schwefel in einem Optimal-Bereich von 15-30 kg/ha über seine Lebensdauer (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2015). Im Rahmen des Versuches wurden je nach Düngemittelstufen zwischen 130 kg/ha und 500 kg/ha Stickstoff zugegeben, allerdings ist zu beachten, dass die Umrechnung der Zugaben der Düngemittelstufen, auf denen diese Angaben basieren (siehe Kapitel 2), aufgrund des verfügbaren Bodenvolumens und Durchwurzelungstiefe nicht auf die Praxis übertragbar ist.

Für Stickstoffdünger gibt es eine Reihe von Verbindungen, die als Düngemittel in Frage kommen, allen voran Nitrat, Ammonium und Harnstoff. Nitrat und Ammonium haben beide assoziierte limitierende Prozesse, die ihre Bioverfügbarkeit letztendlich ähnlich macht (Cox & Reisenauer, 1973). Ammonium wirkt mit steigender Zunahme zunehmend toxisch, während Nitrat durch die mikrobielle Nitrat-Reduzierung an der Wurzel limitiert wird.

2 VERSUCHSAUFBAU UND METHODIK DER GEFÄßVERSUCHE

Es wurden Gefäßversuche zur Untersuchung der Wirkung von verschieden konzentriertem Ammoniumsulfat(-lösungen) aus dem RODOSAN-Verfahren (Konzentrate) im Vergleich zu konventionellen, mineralischen Düngern durchgeführt. Im vorliegenden Gefäßversuch handelt sich bei den Konzentraten um eine Stickstoff-Schwefel-Düngung (N/S), wobei jedoch nur auf Stickstoff (N) getestet und dementsprechend auf gleiche Massenzugaben an Stickstoff geachtet wurde. Neben den Konzentraten als Abprodukte des RODOSAN-Verfahrens wurden konventionelle, mineralische Dünger für die Gefäßversuche verwendet. Dem konventionellen, mineralischen Dünger wurde für eine Düngemittelstufe ein Schwefelausgleich beigelegt. Da in allen drei Konzentraten aus dem RODOSAN-Verfahren Schwefel vorhanden war und Schwefel ein wichtiger Nährstoff ist, könnte dies Vorteile hinsichtlich bestimmter Parameter, z. B. der Ertragsmenge mit sich bringen. Durch den Schwefelausgleich bei dem mineralischen Dünger kann bei der Interpretation möglicher Unterschiede zwischen Konzentraten und mineralischem Dünger der Schwefel berücksichtigt werden. Die Gefäßversuche wurden in den drei Jahren 2016-2018 durchgeführt. Untersucht wurden der Ertrag und die Kornqualität am Beispiel des Sommerweizens. Im Folgenden wird auf die Details des Vorgehens eingegangen.

2.1 VERWENDETE DÜNGEMITTEL

Entsprechend den unter 1.2 beschriebenen Prozessen wurden Konzentrate aus den Abprodukten des RODOSAN-Verfahrens vom IKTS in Kooperation mit dem LfULG erzeugt. Insgesamt wurden drei Konzentrate geliefert, die mit zwei konventionellen, mineralischen Düngemitteln verglichen wurden. Um den Herstellungsprozess der Konzentrate im Detail nachvollziehen zu können, sei an dieser Stelle an Friedrich et al. (2017) verwiesen. Ausgangsstoff für die Elektrolyseversuche und damit die Herstellung der Konzentrate waren Wasser des Bockwitzer Sees. Folgende in Tabelle 1 aufgeführten Düngemittel/Konzentrate wurden in den Gefäßversuchen eingesetzt und verglichen.

Das Konzentrat 1 stand aufgrund mangelnder Verfügbarkeit nur in den Jahren 2016 und 2017 bereit, was bei der statistischen Analyse und Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen war.

Tabelle 1: Übersicht zu den verwendeten Düngemitteln/Konzentraten

Mineralische Dünger	1) Düngung mit Ammoniumnitrat (NH₄NO₃) 2) Düngung mit NH₄NO₃ und Schwefel-Ausgleich
Konzentrate aus den Abprodukten des RODOSAN-Verfahrens	3) Düngung mit Ammoniumsulfat-Lösung: erzeugt durch Neutralisation des Anolyts mit Ammoniumhydroxid (NH ₄ OH) und anschließender thermischer Aufkonzentrierung (Konzentrat 1) 4) Düngung mit Ammoniumsulfat-Lösung: erzeugt durch Neutralisation des Anolyts mit Ammoniumhydroxid (NH ₄ OH) (Konzentrat 2) 5) Düngung mit Ammoniumsulfat-Lösung: erzeugt durch Reaktion des Anolyts mit Harnstoff und anschließender thermischer Aufkonzentrierung (Konzentrat 3)

Die Tabelle 2 zeigt ausgewählte Analyseergebnisse der verwendeten aufbereiteten Konzentrate aus dem RODOSAN-Verfahren (Friedrich, Zschornack, & Viehweger, 2017). Der wesentliche Unterschied zwischen den drei hergestellten RODOSAN-Düngemitteln besteht im Stickstoff- und Schwefelanteil, wobei Konzentrat 1 prozentual die höchsten Werte aufweist.

Tabelle 2: Analyseergebnisse der verwendeten aufbereiteten Konzentrate aus dem RODOSAN-Verfahren nach (Friedrich, Zschornack, & Viehweger, 2017). Fehlende Angaben sind mit (-) gekennzeichnet

Parameter	Konzentrat 1	Konzentrat 2	Konzentrat 3
Nährstoffanalytik			
Dichte [kg/m ³]	1239	1028	1151
Chlorid [%]	0,3	<0,10	0,54
Carbamidstickstoff [%]	0	0	3
Ammoniumstickstoff [%]	8,4	1,3	4,1
Gesamtstickstoff [%]	8,4 [104,1 g/l]	1,3 [13,4 g/l]	7,1 [81,7 g/l]
Schwefel gesamt [%]	9,3 [115,2 g/l]	1,5 [15,4 g/l]	4,9 [56,4 g/l]
Natrium [g/kg]	k. A.	1,0	9,5
Calcium [%]	k. A.	<0,1	<0,1
Spuremetalle			
Selen [mg/kg]	k. A.	<0,2	<0,2
Arsen [mg/kg]	k. A.	<2,0	<2,0
Blei [mg/kg]	k. A.	<1,0	<1,0
Cadmium [mg/kg]	k. A.	<0,20	<0,20
Chrom [mg/kg]	k. A.	<5	<5
Nickel [mg/kg]	k. A.	<5	<5
Quecksilber [mg/kg]	k. A.	<0,05	<0,05
Thallium [mg/kg]	k. A.	<0,1	<0,1

2.2 VERSUCHSAUFBAU

Es wurden Gefäßversuche durchgeführt (Abbildung 2), bei dem in jedem Gefäß eine definierte Menge Samen Sommerweizen ausgesät und unter gleichen Bedingungen im Glashaus ohne Temperatursteuerung gepflegt und geerntet wurden.



Abbildung 2: Gefäße mit Sommerweizen (unten) aus den Gefäßversuchen im Glashaus (oben) ohne Temperatursteuerung am LfULG in Nossen. Die unten dargestellten Gefäße entsprechen Prüfglieder, alle aus dem Jahr 2016, entsprechen: 173 - Kontrolle, 176 - 0,5 g N NH_4NO_3 , 180 - 1,0 g N NH_4NO_3 , 183 - 1,5 g N NH_4NO_3 , 190 - 2,0 g N NH_4NO_3 . (Fotos: Dr. Michael Grunert, LfULG)

Zunächst ist zu beachten, dass es sich hier um einen Stickstoffdünger-Versuch handelte. Alle Gewichtsangaben zur Düngemittelzugabe beziehen sich also auf die Masse Stickstoff, die den Gefäßen zugegeben wurde, nicht die Masse an Düngemittelprodukt/Konzentrat. Aufgrund der unterschiedlichen Stickstoffkonzentration in den Konzentraten (vergleiche auch Tabelle 2) mussten zum Teil sehr unterschiedliche Mengen zugegeben werden, um auf die gleiche Masse Stickstoff im Gefäß zu kommen.

Für die Versuchsanordnung wurden zunächst vier Gefäße ohne Düngzugabe, als sogenannte Kontrollreihe, angelegt. Die Düngewirkung der fünf genannten Konzentrate/Düngemittel (vgl. Tabelle 1) wurde in 0,5 g Schritten bis zu einer Menge von 2,0 g geprüft (sogenannte Düngemittelstufen). Daraus ergeben sich pro Konzentrat/Düngemittel vier Stufen. Dementsprechend resultieren für alle fünf Konzentrate/Düngemittel 20 Gefäße. Zur Erhöhung der Robustheit der Ergebnisse wurden für jedes Düngemittel/Konzentrat vier Wiederholungen angelegt. Somit gibt es neben den vier Gefäßen der Kontrollreihe insgesamt 80 Gefäße mit Dünger.

Die Abbildung 3 zeigt schematisch den Aufbau der Versuche je Jahr. In jedem Jahr wurden 84 Gefäße angelegt. Ausnahme bildet, wie bereits erwähnt, das Jahr 2018.

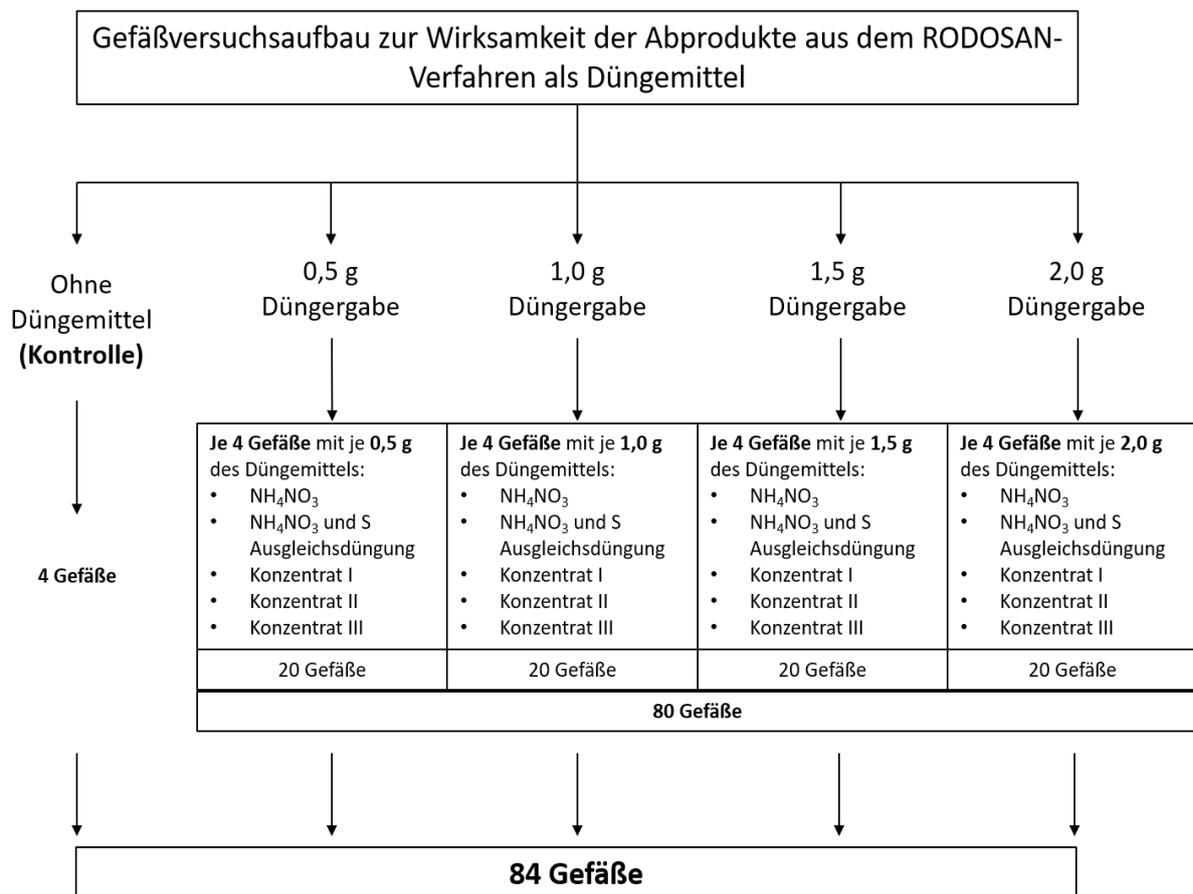


Abbildung 3: Aufbau der Gefäßversuche je Jahr im Zeitraum 2016-2018 am LfULG in Nossen. Konzentrat 1 konnte im Jahr 2018 nicht geprüft werden, da Konzentrat 1 mehr vorrätig war.

In allen Gefäßen wurden je 6,5 kg des gleichen Bodensubstrats, Sandboden aus Sprotta von 2012, verwendet. Tabelle 3 fasst die Informationen zum verwendeten Bodensubstrat zusammen. Alle Gefäße wurden optimal mit Magnesium, Phosphor und Kalium gedüngt.

Tabelle 3: Ausgewählte Eigenschaften des verwendeten Bodensubstrats

Sandboden aus Sprotta (2012)	
pH-Wert	6,0
P-Gehalt(CAL)*	6,1 mg / 100 g
K-Gehalt (CAL)*	6,0 (mg / 100 g)
Mg-Gehalt (CaCl₂)	11,1 (mg / 100 g)

* CAL: Bestimmung mit Calcium-Acetat-Lactat-Auszug

Die Saat des Sommerweizens wurde jeweils im Frühjahr des Jahres gesetzt. Es ist für die Interpretation der Ergebnisse zu beachten, dass für jedes Jahr eine andere Sorte Sommerweizen zum Einsatz kam:

- Im Jahr **2016: Scirocco** (Qualitätsgruppe E)
- Im Jahr **2017: Mistral** (Qualitätsgruppe A)
- Im Jahr **2018: Sonett** (Qualitätsgruppe E)

Die Ernte erfolgte zum agrotechnisch angezeigten Termin entsprechend Reifestadium zum gleichen Zeitpunkt des jeweiligen Jahres. Im Anschluss erfolgte eine Korn- und Strohertragsermittlung je Gefäß. Dabei wurden Stickstoff und Schwefel in Korn und Stroh bestimmt.

Die Bewässerung der Gefäße erfolgte automatisiert und identisch für jedes Gefäß.

Folgende Parameter wurden insgesamt bestimmt:

- Tausendkorngewicht
- Bonituren
- Korntrockenmasse [g/Gefäß]
- Stroh [g/Gefäß]
- ährentragende Halme (ÄTH)
- Tausendkornmasse
- Kornzahl/Ähre
- Stickstoffentzüge relativ und absolut [g/Gefäß] im Korn und im Stroh
- Schwefelentzüge relativ und absolut [g/Gefäß] im Korn und im Stroh

Für die statistische Analyse wurden die Parameter Korntrockenmasse je Gefäß und Stickstoffentzüge im Korn absolut je Gefäß betrachtet. Mit den Stickstoffentzügen im Korn sind die Massen (Gehalt) von Stickstoff in der Korntrockenmasse gemeint, die nach der Ernte in den Pflanzen je Gefäß bestimmt werden konnten. Nach dem Trocknen und Wiegen der Körner wurden sie von der Staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL) chemisch analysiert. Gemäß den Erläuterungen in Kapitel 1.5 ist davon auszugehen, dass bei höheren Stickstoffgehalten im Korn von einer besseren Kornqualität auszugehen ist. Auf diese Art und Weise wird die Quantität und Qualität des Ertrags und der Pflanze bewertet.

2.3 METHODIK DER ANALYSE

Wie eingangs erwähnt, galt es folgende Frage zu beantworten: *Welchen Effekt haben die aufbereitenden Abprodukte des RODOSAN-Verfahrens (Konzentrate) auf Agrarpflanzen generell und im Vergleich zu konventionellen, mineralischen Düngemitteln?*

Um diese Frage fundiert beantworten zu können, wurden die o. g. ausgewählten Parameter einer stufenweisen statistischen Analyse unterzogen, die im Folgenden erläutert wird. Sofern nicht anders angegeben, sind die folgenden Details zum statistischen Vorgehen Köhler et al. (2002) entnommen.

Ausgehend von der Untersuchungsfrage handelt es sich aus statistischer Sicht, um die Prüfung/Vergleich mehrerer Mittelwerte von mehreren unabhängigen Stichproben (Konzentrate/Düngemittel) einer oder mehrerer unbekannter Grundgesamtheiten. Zur Beantwortung der Fragen nach der Wirkung der Düngemittel bzw. Konzentrate, liegen vor allem die abhängigen Variablen Korntrockenmasse pro Gefäß und die jeweiligen Entzüge von Stickstoff und Schwefel nahe, wobei hier nur der Stickstoffentzug analysiert wird. Gemäß Abbildung 3 wurden verschiedene Stufen der Konzentrat-/Düngemittelzugabe bezogen auf die Masse Stickstoff eingesetzt. Die Jahre wurden einzeln betrachtet, um Witterungsbedingungen und Sortenunterschiede zu berücksichtigen. Dementsprechend wurden für jedes Jahr und Stufe die vier Wiederholungen gemittelt. Der Einfluss der Witterungsbedingungen wird durch den Einsatz der Glashäuser nicht vollständig ausgeschlossen. Es handelt sich um Glashäuser ohne Temperatursteuerung, bei denen das Dach und die Seitenwände geöffnet werden (siehe Abbildung 2) und nur bei Regen oder starkem Wind verschlossen sind. Die Temperaturverhältnisse sollen möglichst nah an denen einer Freifläche liegen. Damit entstanden gewollt Jahreswirkungen.

Die Düngewirkung der etablierten, konventionellen, mineralischen Düngemittel ist zwar bekannt, dennoch wurde die Düngewirkung für alle eingesetzten Düngemittel/Konzentrate in einem ersten Schritt überprüft. In der Folge wurde geklärt, ob sich die Kenngrößen von Ertrag (Korntrockenmasse) und Qualität (Stickstoffentzug) der Pflanzen in den Gefäßen mit den Konzentraten des RODOSAN-Verfahrens untereinander und im Vergleich zu den konventionellen, mineralischen Düngern statistisch signifikant unterscheiden.

Die Versuchsergebnisse wurden als Box Plots dargestellt und auf Basis mathematischer Tests statistisch analysiert. Die Wahl des statistischen Tests zur Untersuchung der Parameter hängt vom statistischen Verhalten der Daten ab, insbesondere von deren Varianzhomogenität und Verteilung. Für die Untersuchung der Varianzen wurde der Levene Test eingesetzt. Der Test ist robust und setzt weder Normalverteilung noch eine gleiche Zahl von Wiederholungen voraus, was auch den Fall des Konzentrat 1 nicht ausschließt, für den es keine Daten im Jahr 2018 gibt. Das Ergebnis des Tests wird über die festgelegte Nullhypothese ermittelt. Die Nullhypothese H_0 des Tests besagt, dass die Varianzen der Gruppen gleich sind. Wird diese im Rahmen des Tests abgelehnt, muss von der Alternative ausgegangen werden, also, dass die Varianzen signifikant unterschiedlich sind.

Für den Fall das die Varianzen inhomogen sind, wird für den Mittelwertvergleich der Kruskal-Wallis-Test (H-Statistik) durchgeführt. Der Test führt die nichtparametrische Alternative zur einfaktoriellen Varianzanalyse durch. Er stellt fest, ob zwischen den Düngemittelstufen für eine abhängige Variable (einen Parameter) signifikante Unterschiede auftreten, oder ob davon auszugehen ist, dass alle Stichproben aus der gleichen Grundgesamtheit stammen. Die Nullhypothese H_0 des Tests besagt, dass die Mittelwerte der Gruppen gleich sind (und der

gleichen Grundgesamtheit entstammen). Wird diese im Rahmen des Tests abgelehnt, muss von der Alternative ausgegangen werden, also, dass die Mittelwerte signifikant unterschiedlich sind (und unterschiedlichen Grundgesamtheiten entstammen). Für den Fall, dass der Kruskal-Wallis-Test signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Düngemittelvarianten aufzeigt, kann durch multiple Vergleiche geprüft werden, welche Düngemittelvarianten sich voneinander unterscheiden. Hierfür wurde der Nemenyi-Test angewandt. Der Nemenyi-Test verlangt die Verwendung der Einzel- statt der Mittelwerte der Wiederholungen. Vorausgesetzt wird die gleiche Anzahl von Wiederholungen, da hier mit einem Rangsummensystem gearbeitet wird, aus denen die Beziehungen zwischen den Prüfgliedern abgeleitet wird. Bei der Auswertung ist zu beachten, dass aufgrund der fehlenden Werte für Konzentrat 1 im Jahr 2018 vier Wiederholungen weniger eingehen als für die Jahre 2016 und 2017. Die Schranken für Nemenyi wurden nach (Sachs, 2013) berechnet.

Alle Tests wurden mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ durchgeführt.

Die folgende Abbildung 4 zeigt den Entscheidungsprozess bei der Wahl der statistischen Analysewerkzeuge für die vorliegende Studie.

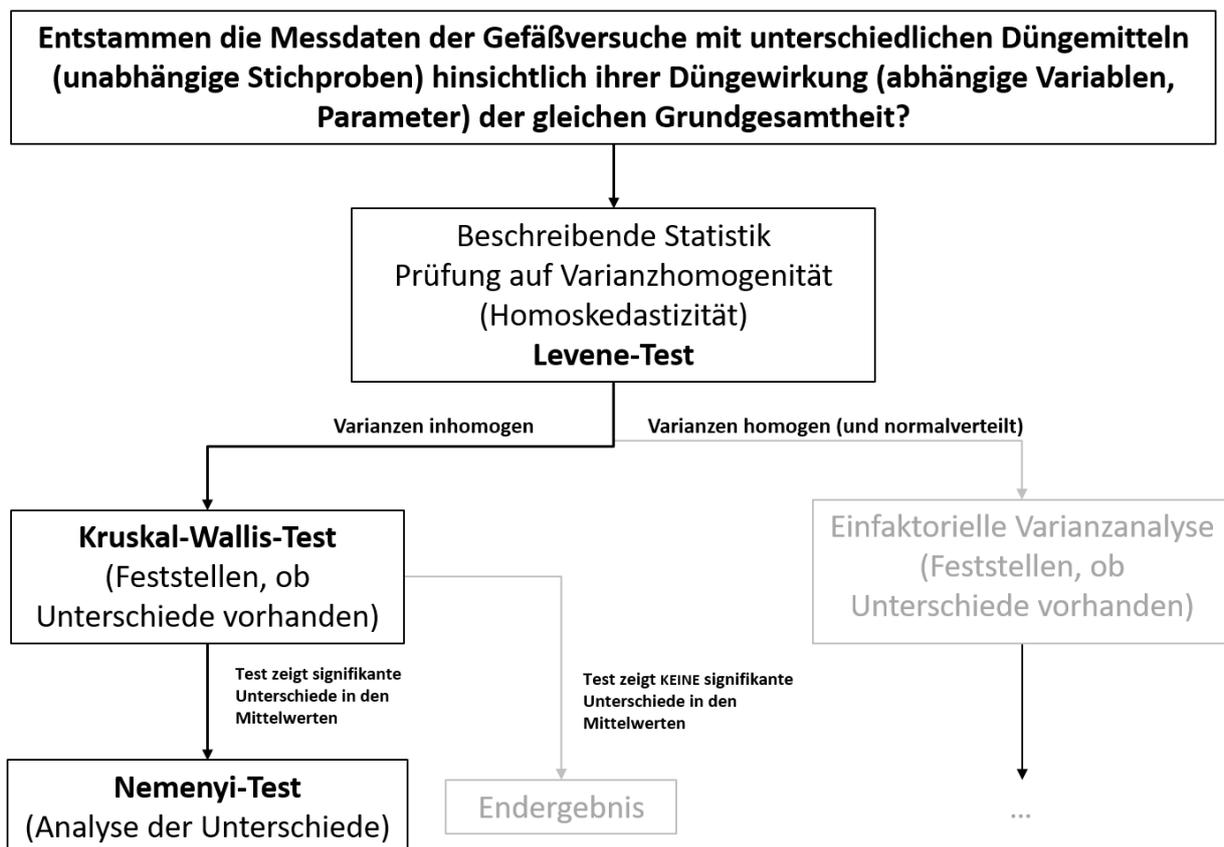


Abbildung 4: Schematisches Vorgehen für die statistische Analyse zur Fragestellung bzw. Entscheidungsübersicht

3 ERGEBNISSE

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Gefäßversuche für die Parameter Korntrockenmasse und Stickstoffentzug grafisch dargestellt und statistisch analysiert.

Die folgende Abbildung 5 veranschaulicht zunächst die Mittelwerte der Korntrockenmassen und des Stickstoffentzugs von Sommerweizen. Für alle Parameter weist die Kontrolle die niedrigsten Werte auf. Alle Zugaben von Düngemittel/Konzentraten verursachen sowohl für Korntrockenmasse als auch Stickstoffentzug selbst bei 0,5 g N-Zugabe höhere Werte als bei der Kontrolle. Innerhalb der Düngemittel/Konzentrate steigen die Korntrockenmassen und Stickstoffentzüge mit zunehmender Düngemittelzugabe. Zwischen den Düngemitteln/Konzentraten zeigen sich keine wesentlichen Unterschiede mit Ausnahme von Konzentrat 1, das in allen Jahren die höchsten Werte für Korntrockenmasse und Stickstoffentzug hervorbringt, und dabei teilweise deutlich über den anderen Düngemitteln/Konzentraten liegt. Tabelle 4 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der genannten Untersuchungsparameter für alle Düngemittelstufen und Jahre. Die Standardabweichung weist für einige Parameter zwischen den Zugaben eine große Spannweite auf, was sich in der Analyse auf Varianzhomogenität zeigen müsste.

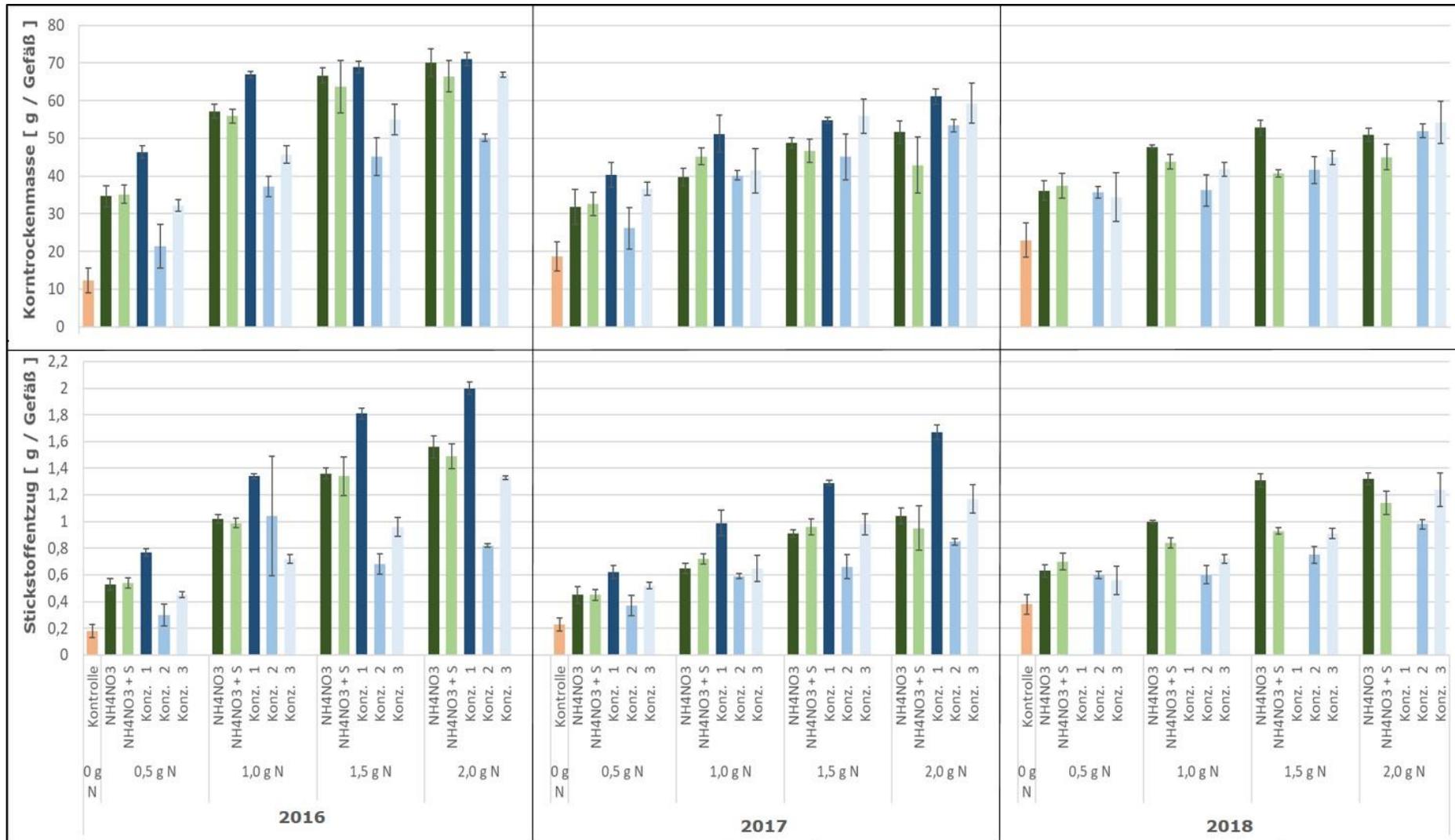


Abbildung 5: Mittelwerte und Standardabweichung der Untersuchungsparemeter Kornrockenmasse (oben) und Stickstoffentzug (unten) des Sommerweizens bei verschiedenen Stickstoffzugaben (N) der Düngemittel/Konzentrate für alle Versuchsjahre (Anzahl der Stichproben = 4; keine Werte für Konzentrat 1 in 2018)

Tabelle 4: Mittelwerte und Standardabweichung der Untersuchungsparameter Korntrockenmasse und Stickstoffzug (in g/Gefäß) der Gefäßversuche mit verschiedenen Stickstoffzugaben (N) an Düngemittel/Konzentrat für alle Jahre (n*= 4; keine Werte für Konzentrat 1 in 2018)

Düngemittel/ Konzentrat	Jahr	Korntrockenmasse [g/Gefäß]		Stickstoffzug [g/Gefäß]	
		Mittelwert	Standard- abweichung	Mittelwert	Standard- abweichung
0 g N	2016	12,3	3,2	0,18	0,05
	2017	18,7	3,9	0,23	0,05
	2018	23,0	4,5	0,38	0,07
NH ₄ NO ₃ 0,5 g N	2016	34,7	2,8	0,53	0,04
	2017	31,8	4,6	0,45	0,07
	2018	36,1	2,6	0,63	0,04
NH ₄ NO ₃ 1,0 g N	2016	57,2	1,8	1,02	0,03
	2017	39,7	2,3	0,65	0,04
	2018	47,7	0,5	1,00	0,01
NH ₄ NO ₃ 1,5 g N	2016	66,7	2,0	1,36	0,04
	2017	48,8	1,4	0,91	0,03
	2018	52,8	2,0	1,31	0,05
NH ₄ NO ₃ 2,0 g N	2016	70,1	3,6	1,56	0,08
	2017	51,7	3,0	1,04	0,06
	2018	51,0	1,7	1,32	0,04
NH ₄ NO ₃ + S 0,5 g N	2016	35,2	2,5	0,54	0,04
	2017	32,6	3,1	0,45	0,04
	2018	37,5	3,3	0,70	0,06
NH ₄ NO ₃ + S 1,0 g N	2016	55,9	1,9	0,99	0,03
	2017	45,2	2,2	0,72	0,04
	2018	43,8	1,9	0,84	0,04
NH ₄ NO ₃ + S 1,5 g N	2016	63,7	6,9	1,34	0,14
	2017	46,7	3,0	0,96	0,06
	2018	40,7	0,9	0,93	0,02
NH ₄ NO ₃ + S 2,0 g N	2016	66,5	4,1	1,49	0,09
	2017	42,9	7,5	0,95	0,17
	2018	45,0	3,4	1,14	0,09
Konz. 1 0,5 g N	2016	46,4	1,7	0,77	0,03
	2017	40,4	3,3	0,62	0,05
	2018	-	-	-	-
Konz. 1 1,0 g N	2016	66,9	0,9	1,34	0,02
	2017	51,2	4,9	0,99	0,10
	2018	-	-	-	-
Konz. 1 1,5 g N	2016	68,9	1,6	1,81	0,04
	2017	54,8	0,7	1,29	0,02
	2018	-	-	-	-
Konz. 1 2,0 g N	2016	71,1	1,7	2,00	0,05
	2017	61,1	2,0	1,67	0,05
	2018	-	-	-	-
Konz. 2 0,5 g N	2016	21,3	5,8	0,30	0,08
	2017	26,2	5,5	0,37	0,08
	2018	35,7	1,6	0,60	0,03
Konz. 2 1,0 g N	2016	37,3	2,7	1,04	0,45
	2017	40,2	1,3	0,59	0,02
	2018	36,2	4,1	0,60	0,07
Konz. 2 1,5 g N	2016	45,1	5,0	0,68	0,08
	2017	45,1	6,1	0,66	0,09
	2018	41,6	3,6	0,75	0,07
Konz. 2 2,0 g N	2016	50,2	0,9	0,82	0,01
	2017	53,4	1,6	0,85	0,03
	2018	52,0	1,8	0,98	0,03
Konz. 3 0,5 g N	2016	32,2	1,6	0,45	0,02

		2017	36,6	1,7	0,52	0,02
		2018	34,4	6,5	0,56	0,11
Konz. 3	1,0 g N	2016	45,7	2,3	0,72	0,04
		2017	41,4	5,9	0,65	0,10
		2018	41,8	1,9	0,72	0,03
Konz. 3	1,5 g N	2016	55,0	4,0	0,96	0,07
		2017	55,9	4,6	0,98	0,08
		2018	44,9	1,8	0,91	0,04
Konz. 3	2,0 g N	2016	66,9	0,7	1,33	0,01
		2017	59,3	5,3	1,17	0,10
		2018	54,3	5,6	1,24	0,13

* n = Anzahl der Stichproben

3.1 AUSWERTUNG DER KORNTROCKENMASSE

3.1.1 BESCHREIBENDE STATISTIK UND VISUALISIERUNG

Die Korntrockenmassen je Gefäß werden als Maß für die Ertragsmenge herangezogen.

In der Abbildung 6 sind die Messwerte der Korntrockenmassen für alle N-Zugaben und Jahre in Form von Box Plots dargestellt. Es zeigt sich ein erster visueller Unterschied zwischen den Konzentraten. Bei allen Konzentraten ist ein deutlicher Einfluss auf die Korntrockenmasse gegenüber der Kontrollreihe ohne Dünger erkennbar. Dabei scheint Konzentrat 1 gegenüber Konzentrat 2 und Konzentrat 3, zumindest für niedrigere Zugaben als 2,0 g N, höhere Korntrockenmassen hervorzubringen. Der Unterschied zwischen Konzentrat 1 und 3 fällt aber deutlich geringer aus, als der zwischen Konzentrat 1 und 2. Die Erhöhung der Düngemittel- bzw. Konzentratzugaben von 1,0 g N auf 2,0 g N zeigt eine deutlich geringere Wirkung auf die Korntrockenmasse als die Ertragssteigerung des Sommerweizens ohne Düngung im Vergleich zur 1,0 g N-Zugabe für manche Konzentrate/Düngemittel (besonders Konzentrat 1).

Allerdings ist der Unterschied in der Korntrockenmasse bei 2,0 g N-Zugabe zwischen den Konzentraten nicht so stark ausgeprägt wie bei 1,0 g N-Zugabe. Denkbar wäre, dass bei 1,0 g N-Zugabe das Maximum der potentiellen Ertragsmasse für Konzentrat 1 bereits fast erreicht ist. Dementsprechend fällt mit 2,0 g N-Zugabe der Mehrertrag geringer aus als der Sprung von keinem Düngemittel/Konzentrat zu 1,0 g. Dies führt bei weniger stark aufkonzentrierten Konzentraten (Konzentrat 2, vgl. Tabelle 2) dazu, dass sie mit einer höheren Zugabe die Differenz zu Konzentrat 1 verringern, wodurch sich interessante Fragestellungen zur ökonomisch optimalen Düngemittelzugabe für die einzelnen Konzentrate ergeben.

Zwischen den Jahren gibt es zum Teil erhebliche Unterschiede. Besonders im Jahr 2016 scheinen für einige Düngemittel/Konzentrate besonders hohe Korntrockenmassen hervorzubringen, während für Konzentrat 2 und 3 sich das Jahr 2016 nicht so deutlich hervorhebt.

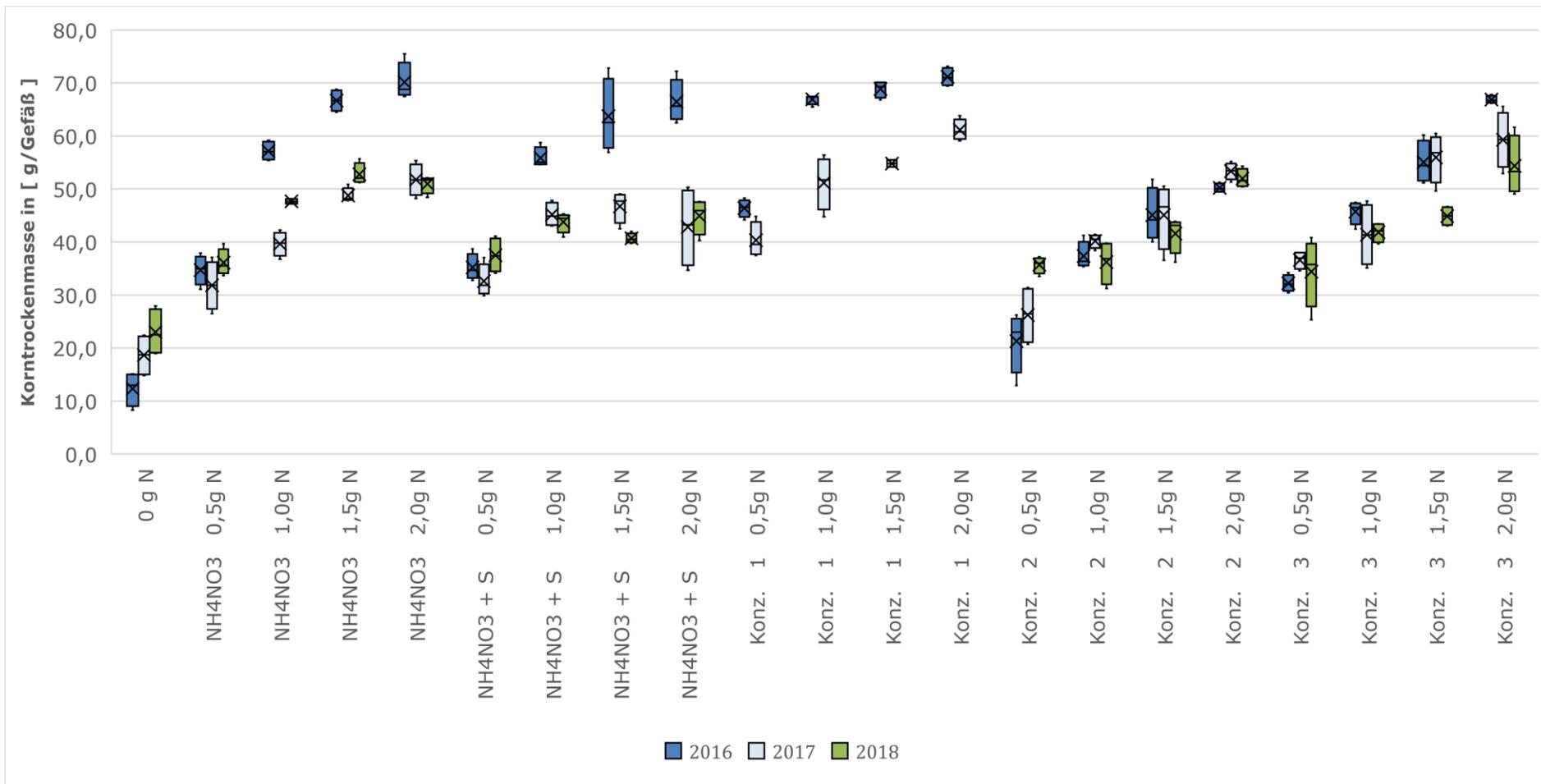


Abbildung 6: Korn trockenmassen des Sommerweizens der mit Düngemitteln/Konzentraten behandelten Gefäße sowie der unbehandelten Kontrollen über die gesamte Versuchsdauer von 2016-2018. Mittelwerte sind als schwarzes Kreuz dargestellt.

Wie im Abschnitt ‚Methodik‘ erläutert, wird im Folgenden eine umfassende statistische Analyse durchgeführt, um belastbare Aussagen zu den Fragestellungen dieses Berichts zu erzeugen, die über eine beschreibende oder visuelle Betrachtung hinausgehen. Dabei werden die Ergebnisse der Korntrockenmasse detailliert dargestellt, um statistische Zusammenhänge, besser nachvollziehen zu können. Für den Ergebnisparameter Stickstoffzug (vgl. Kapitel 2) wird die Ergebnisdarstellung in Kapitel 3.2 allerdings auf das Wesentliche, die Ergebnisse der statistischen Tests, reduziert.

3.1.2 PRÜFUNG DER VARIANZHOMOGENITÄT – LEVENE-TEST

Der in diesem Abschnitt durchgeführte Levene-Test prüft die Varianzen des Parameters Korntrockenmasse auf Homogenität.

Da es sich hier um einen mehrstufigen Versuch handelt (d. h. mehr als zwei Gruppen werden verglichen), ist zunächst eine Zwischentabelle für alle Jahre zu bilden, in der der Betrag der Differenz zwischen Messwert und Mittelwert (innerhalb des Jahres) der jeweiligen Düngemittelstufe gebildet wird. Auf diese berechneten Differenzen der Zwischentabelle (hier nicht dargestellt) wird mit dem Levene-Test eine einfaktorische Varianzanalyse angewandt, deren Ergebnisse in der folgenden Tabelle 5 zu finden sind.

Tabelle 5: Ergebnistabelle des Levene-Tests für die Korntrockenmassen

Streuungsursache	Quadratsummen (SS)	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quadratsumme (MS)	Prüfgröße (F)	P-Wert	Kritischer F-Wert
2016	112,78428	20	5,63921	1,99802	0,01972	1,73942
2017	189,34175	20	9,46709	3,10564	0,00032	1,73942
2018	156,86336	20	7,84317	4,17375	0,00001	1,73942

Zur Ermittlung der Varianzhomogenität wird der aus den Daten berechnete Prüfwert P mit dem Signifikanzniveau 0,05 verglichen. Wie oben beschrieben, wird die Nullhypothese geprüft. Es gilt: ist der P-Wert größer als das Signifikanzniveau wird die Nullhypothese angenommen. Damit wäre die Varianz der Stichprobe homogen. Tabelle 5 zeigt einen P-Wert von deutlich unter dem Signifikanzniveau für alle Jahre. Damit wird die Nullhypothese H_0 abgelehnt und es kann davon ausgegangen werden, dass die Varianzen für alle Jahre jeweils inhomogen sind.

3.1.3 KRUSKAL-WALLIS-TEST ZUR PRÜFUNG AUF SIGNIFIKANTE UNTERSCHIEDE

Bei inhomogenen Varianzen kommt der Kruskal-Wallis-Test zur Anwendung. Dieser zeigt, ob die Mittelwerte der Korntrockenmassen der Düngemittelstufen signifikant unterschiedlich sind oder nicht, das heißt, ob sie der gleichen Grundgesamtheit entstammen könnten. Die folgende Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse des Tests.

Tabelle 6: Ergebnis des Kruskal-Wallis-Test für die Ertragsmenge aller Düngemittelstufen über die gesamte Versuchsdauer

2016	
Prüfwert	79,13
kritischer Wert	31,41
2017	
Prüfwert	74,45
Kritischer Wert	31,41
2018	
Prüfwert	60,72
Kritischer Wert	31,41

Die Nullhypothese für diesen Test besagt, dass keine Unterschiede zwischen den Mittelwerten vorliegen, wenn der Prüfwert kleiner als der kritische Wert ist. Da der Prüfwert im konkreten Fall allerdings für alle Jahre größer ist als der kritische Wert, ist diese Hypothese abzulehnen. Es sind also signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Düngemittelstufen in allen Jahren vorhanden. Damit ist anhand des Nemenyi-Tests zu klären, wo die Unterschiede im Detail liegen.

3.1.4 NEMENYI-TEST ZUR SPEZIFIKATION DER UNTERSCHIEDE

Tabelle 7, Tabelle 8 und Tabelle 9 zeigen die Ergebnisse des Nemenyi-Tests für die Jahre 2016, 2017 und 2018. In den Tabellenköpfen horizontal und vertikal befinden sich die gleichen Beschriftungen in der gleichen Reihenfolge. Betrachtungen in bzw. unterhalb der Diagonale wurden nicht getestet, da die Unterschiede einer Düngemittelstufe gegen sich selbst bzw. die gleichen Düngemittelstufen wie oberhalb geprüft werden würden. Die roten Zahlen der Tabelle zeigen an, dass für diese Gegenüberstellung der Düngemittelstufen (horizontale und vertikale) ein signifikanter Unterschied vorliegt. Der Unterschied wird signifikant, wenn die Differenz der Rangsummen (Rangsummen zu finden in der zweiten Zeile bzw. Spalte des Tabellenkopfes) die Schranke ND (links oben im Tabellenkopf) überschreitet. Beispielsweise zeigt die letzte Spalte der ersten Zeile für das Jahr 2016 (Tabelle 7), dass für die Kombination 0 g N-Zugabe und 2,0 g N des Konzentrat 1 ein signifikanter Unterschied der Korntrockenmassen vorliegt. Bei einem Blick auf die Horizontale fällt auf, dass die häufigsten signifikanten Unterschiede (17 von 49 für 2016, 17 von 44 für 2017 und 12 von 28 für 2018; jeweils bezogen auf alle „roten Zahlen“, also Unterschiede) für die Gefäße ohne Düngemittel/Konzentrat (Kontrolle) und 0,5 g N des Konzentrats 2 vorliegen, was die visuelle Auswertung der Abbildung 5 bestätigt, in der zumindest Hinweise auf eine vergleichsweise schwache Wirkung des Konzentrats 2 deutlich werden. Tatsächlich zeigt sich für 2016, dass selbst bei 2,0 g N-Zugabe und im Jahr 2018 bis 1,5 g N-Zugabe des Konzentrats 2 keine signifikanten Unterschiede der Korntrockenmassen im Vergleich zur Kontrolle vorhanden sind.

Wesentlich ist weiterhin die Zeile, ab der die rote Markierung nicht mehr auftritt. Ab diesem Punkt unterscheiden sich die Düngemittel nicht mehr signifikant. Der Nemenyi-Test zeigt zwei wesentliche Dinge:

- (1) Ab einer bestimmten Zugabemenge scheinen alle Düngemittel/Konzentrate – für Konzentrat 1 ab 1,0 g N, Konzentrat 2 ab 2,0 g N (mit Ausnahme von 2016) und

Konzentrat 3 ab 2,0 g N – eine Düngewirkung bezogen auf die Korntrockenmasse zu haben, da sie sich ab diesem Punkt von der Stufe „ohne Düngemittel“ unterscheiden.

- (2) Es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen Düngemitteln/Konzentraten gleicher Zugabemengen in keinem der Jahre. Dies ist dadurch zu erkennen, dass bei jedem Vergleich von Konzentraten/Düngemitteln gleicher Zugabe die Schranke ND nicht überschritten wird, die Zahlen also nicht rotgefärbt sind. Tabelle 8 zeigt dies selbst für die Gegenüberstellung von Konzentrat 2 (geringste mittlere Korntrockenmasse) und Konzentrat 1 (höchste mittlere Korntrockenmasse) im Jahr 2016. Allerdings ist bei der Interpretation dieses Ergebnisses zu beachten, dass die Schranke nur knapp unterschritten wurde. Gleiches gilt für die Kombination Konzentrat 1 2,0 g N und $\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{S}$ 2,0 g N im Jahr 2017.

Die Effizienz der Mittel hinsichtlich der Korntrockenmasse und damit der Ertragsmenge und der dafür benötigten absoluten N-Zugabemenge scheint sich zu unterscheiden. Interessanter Weise gibt es einen signifikanten Unterschied zwischen Konzentrat 1 1,5 g N und Konzentrat 2 bei 1,0 g N-Zugabe im Jahr 2016, was für kein anderes Düngemittel/Konzentrat bei 1,5 g N im Vergleich mit 1,0 g N Konzentrat 2 der Fall ist. Die Schranke wird für die Zugabe von 1,0 g N dieser beiden Konzentrate nur knapp unterschritten, wobei in diesem Fall Konzentrat 1 im Mittel mit 66,9 g eine deutlich höhere Korntrockenmasse als Konzentrat 2 mit 37,3 g hervorbringt. Dieser große Unterschied reduziert sich jedoch bei einer Zugabe von 2,0 g N (71,1 g vs. 50,9 g). Aus Tabelle 7 und Tabelle 8 wird deutlich, dass Konzentrat 1 unabhängig der Zugabemenge in den Jahren 2016 und 2017 (2018 war kein Konzentrat 1 vorhanden) den ersten Rang der jeweiligen Zugabemenge belegt und damit die größte Korntrockenmasse erbringt. Nur Konzentrat 3 im Jahr 2016 bzw. Ammoniumnitrat ohne Schwefelausgleich im Jahr 2017 kann bei Einsatz von 2,0 g Stickstoff eine ähnliche Korntrockenmasse erreichen, wie Konzentrat 1 mit 1,0 g N. Dadurch bestätigt sich der aus den Box Plots gewonnene Eindruck, dass Konzentrat 1 die beste Wirkung hinsichtlich der Korntrockenmasse erzielt und das Konzentrat 2 bei zunehmender Stickstoffzugabe zu den anderen Düngemitteln/Konzentraten aufschließt.

Tabelle 7: Ergebnisse des Nemenyi-Tests für die Korntrockenmasse für das Jahr 2016. Rote Zahlen zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen den Vergleichsgrößen an.

ND = 174,2	0 g N	Konz. 2 0,5g N	Konz. 3 0,5g N	NH4NO 3 0,5g N	NH4NO3 + S 0,5g N	Konz. 2 1,0g N	Konz. 2 1,5g N	Konz. 3 1,0g N	Konz. 1 0,5g N	Konz. 2 2,0g N	Konz. 3 1,5g N	NH4NO3 + S 1,0g N	NH4NO 3 1,0g N	NH4NO3 + S 1,5g N	NH4NO3 + S 2,0g N	Konz. 1 1,0g N	NH4NO 3 1,5g N	Konz. 3 2,0g N	Konz. 1 1,5g N	NH4NO 3 2,0g N	Konz. 1 2,0g N
	328	316	294	274	272	255	219	217	214	189	158	157	145	98	85	82	81	74	48	40	24
0 g N	328	12,0	34,0	54,0	56,0	73,0	109,0	111,0	114,0	139,0	170,0	171,0	183,0	230,0	243,0	246,0	247,0	254,0	280,0	288,0	304,0
Konz. 2 0,5g N	316		22,0	42,0	44,0	61,0	97,0	99,0	102,0	127,0	158,0	159,0	171,0	218,0	231,0	234,0	235,0	242,0	268,0	276,0	292,0
Konz. 3 0,5g N	294			20,0	22,0	39,0	75,0	77,0	80,0	105,0	136,0	137,0	149,0	196,0	209,0	212,0	213,0	220,0	246,0	254,0	270,0
NH4NO3 0,5g N	274				2,0	19,0	55,0	57,0	60,0	85,0	116,0	117,0	129,0	176,0	189,0	192,0	193,0	200,0	226,0	234,0	250,0
NH4NO3 + S 0,5g N	272					17,0	53,0	55,0	58,0	83,0	114,0	115,0	127,0	174,0	187,0	190,0	191,0	198,0	224,0	232,0	248,0
Konz. 2 1,0g N	255						36,0	38,0	41,0	66,0	97,0	98,0	110,0	157,0	170,0	173,0	174,0	181,0	207,0	215,0	231,0
Konz. 2 1,5g N	219							2,0	5,0	30,0	61,0	62,0	74,0	121,0	134,0	137,0	138,0	145,0	171,0	179,0	195,0
Konz. 3 1,0g N	217								3,0	28,0	59,0	60,0	72,0	119,0	132,0	135,0	136,0	143,0	169,0	177,0	193,0
Konz. 1 0,5g N	214									25,0	56,0	57,0	69,0	116,0	129,0	132,0	133,0	140,0	166,0	174,0	190,0
Konz. 2 2,0g N	189										31,0	32,0	44,0	91,0	104,0	107,0	108,0	115,0	141,0	149,0	165,0
Konz. 3 1,5g N	158											1,0	13,0	60,0	73,0	76,0	77,0	84,0	110,0	118,0	134,0
NH4NO3 + S 1,0g N	157												12,0	59,0	72,0	75,0	76,0	83,0	109,0	117,0	133,0
NH4NO3 1,0g N	145													47,0	60,0	63,0	64,0	71,0	97,0	105,0	121,0
NH4NO3 + S 1,5g N	98														13,0	16,0	17,0	24,0	50,0	58,0	74,0
NH4NO3 + S 2,0g N	85															3,0	4,0	11,0	37,0	45,0	61,0
Konz. 1 1,0g N	82																1,0	8,0	34,0	42,0	58,0
NH4NO3 1,5g N	81																	7,0	33,0	41,0	57,0
Konz. 3 2,0g N	74																		26,0	34,0	50,0
Konz. 1 1,5g N	48																			8,0	24,0
NH4NO3 2,0g N	40																				16,0
Konz. 1 2,0g N	24																				

Tabelle 8: Ergebnisse des Nemenyi-Tests für die Korntrockenmasse für das Jahr 2017. Rote Zahlen zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen den Vergleichsgrößen an.

ND = 174,2	0 g N	Konz. 2 0,5g N	NH4NO 3 0,5g N	NH4NO3 + S 0,5g N	Konz. 3 0,5g N	NH4NO 3 1,0g N	Konz. 2 1,0g N	Konz. 3 1,0g N	Konz. 1 0,5g N	NH4NO3 + S 2,0g N	NH4NO3 + S 1,0g N	Konz. 2 1,5g N	NH4NO3 + S 1,5g N	NH4NO 3 1,5g N	Konz. 1 1,0g N	NH4NO 3 2,0g N	Konz. 2 2,0g N	Konz. 1 1,5g N	Konz. 3 1,5g N	Konz. 3 2,0g N	Konz. 1 2,0g N
	327	311	288	286	254	222	218	213	212	188	172	166	148	131	102	93	75	58	55	34	17
0 g N	327	16,0	39,0	41,0	73,0	105,0	109,0	114,0	115,0	139,0	155,0	161,0	179,0	196,0	225,0	234,0	252,0	269,0	272,0	293,0	310,0
Konz. 2 0,5g N	311		23,0	25,0	57,0	89,0	93,0	98,0	99,0	123,0	139,0	145,0	163,0	180,0	209,0	218,0	236,0	253,0	256,0	277,0	294,0
NH4NO3 0,5g N	288			2,0	34,0	66,0	70,0	75,0	76,0	100,0	116,0	122,0	140,0	157,0	186,0	195,0	213,0	230,0	233,0	254,0	271,0
NH4NO3 + S 0,5g N	286				32,0	64,0	68,0	73,0	74,0	98,0	114,0	120,0	138,0	155,0	184,0	193,0	211,0	228,0	231,0	252,0	269,0
Konz. 3 0,5g N	254					32,0	36,0	41,0	42,0	66,0	82,0	88,0	106,0	123,0	152,0	161,0	179,0	196,0	199,0	220,0	237,0
NH4NO3 1,0g N	222						4,0	9,0	10,0	34,0	50,0	56,0	74,0	91,0	120,0	129,0	147,0	164,0	167,0	188,0	205,0
Konz. 2 1,0g N	218							5,0	6,0	30,0	46,0	52,0	70,0	87,0	116,0	125,0	143,0	160,0	163,0	184,0	201,0
Konz. 3 1,0g N	213								1,0	25,0	41,0	47,0	65,0	82,0	111,0	120,0	138,0	155,0	158,0	179,0	196,0
Konz. 1 0,5g N	212									24,0	40,0	46,0	64,0	81,0	110,0	119,0	137,0	154,0	157,0	178,0	195,0
NH4NO3 + S 2,0g N	188										16,0	22,0	40,0	57,0	86,0	95,0	113,0	130,0	133,0	154,0	171,0
NH4NO3 + S 1,0g N	172											6,0	24,0	41,0	70,0	79,0	97,0	114,0	117,0	138,0	155,0
Konz. 2 1,5g N	166												18,0	35,0	64,0	73,0	91,0	108,0	111,0	132,0	149,0
NH4NO3 + S 1,5g N	148													17,0	46,0	55,0	73,0	90,0	93,0	114,0	131,0
NH4NO3 1,5g N	131														29,0	38,0	56,0	73,0	76,0	97,0	114,0
Konz. 1 1,0g N	102															9,0	27,0	44,0	47,0	68,0	85,0
NH4NO3 2,0g N	93																18,0	35,0	38,0	59,0	76,0
Konz. 2 2,0g N	75																	17,0	20,0	41,0	58,0
Konz. 1 1,5g N	58																		3,0	24,0	41,0
Konz. 3 1,5g N	55																			21,0	38,0
Konz. 3 2,0g N	34																				17,0
Konz. 1 2,0g N	17																				

Tabelle 9: Ergebnisse des Nemenyi-Tests für die Korntrockenmasse für das Jahr 2018. Rote Zahlen zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen den Vergleichsgrößen an.

ND = 141,2		0 g N	Konz. 2 0,5g N	NH4NO3 0,5g N	Konz. 3 0,5g N	Konz. 2 1,0g N	NH4NO3 + S 0,5g N	NH4NO3 + S 1,5g N	Konz. 3 1,0g N	Konz. 2 1,5g N	NH4NO3 + S 1,0g N	Konz. 3 1,5g N	NH4NO3 + S 2,0g N	NH4NO3 1,0g N	NH4NO3 2,0g N	Konz. 2 2,0g N	Konz. 3 2,0g N	NH4NO3 1,5g N
		264	219	218	217	215	202	164	149	147	118	111	108	78	41	36	30	29
0 g N	264		45,0	46,0	47,0	49,0	62,0	100,0	115,0	117,0	146,0	153,0	156,0	186,0	223,0	228,0	234,0	235,0
Konz. 2 0,5g N	219			1,0	2,0	4,0	17,0	55,0	70,0	72,0	101,0	108,0	111,0	141,0	178,0	183,0	189,0	190,0
NH4NO3 0,5g N	218				1,0	3,0	16,0	54,0	69,0	71,0	100,0	107,0	110,0	140,0	177,0	182,0	188,0	189,0
Konz. 3 0,5g N	217					2,0	15,0	53,0	68,0	70,0	99,0	106,0	109,0	139,0	176,0	181,0	187,0	188,0
Konz. 2 1,0g N	215						13,0	51,0	66,0	68,0	97,0	104,0	107,0	137,0	174,0	179,0	185,0	186,0
NH4NO3 + S 0,5g N	202							38,0	53,0	55,0	84,0	91,0	94,0	124,0	161,0	166,0	172,0	173,0
NH4NO3 + S 1,5g N	164								15,0	17,0	46,0	53,0	56,0	86,0	123,0	128,0	134,0	135,0
Konz. 3 1,0g N	149									2,0	31,0	38,0	41,0	71,0	108,0	113,0	119,0	120,0
Konz. 2 1,5g N	147										29,0	36,0	39,0	69,0	106,0	111,0	117,0	118,0
NH4NO3 + S 1,0g N	118											7,0	10,0	40,0	77,0	82,0	88,0	89,0
Konz. 3 1,5g N	111												3,0	33,0	70,0	75,0	81,0	82,0
NH4NO3 + S 2,0g N	108													30,0	67,0	72,0	78,0	79,0
NH4NO3 1,0g N	78														37,0	42,0	48,0	49,0
NH4NO3 2,0g N	41															5,0	11,0	12,0
Konz. 2 2,0g N	36																6,0	7,0
Konz. 3 2,0g N	30																	1,0
NH4NO3 1,5g N	29																	

3.2 AUSWERTUNG DES STICKSTOFFENTZUGS

3.2.1 BESCHREIBENDE STATISTIK UND VISUALISIERUNG

Um die Qualität der Erträge einschätzen zu können, wurden die Stickstoff-entzüge im Korn betrachtet. Die folgende Abbildung 7 zeigt die Stickstoffentzüge aller N-Zugabemengen und Jahre in Form von Box Plots, wobei die Kontrolle ohne Düngemittel als Vergleich geplottet wurde. Zunächst ist der Unterschied der Stickstoffentzüge der Gefäße mit Düngemittel/Konzentrat zu den Stickstoffentzügen der Gefäße ohne Düngemittel offensichtlich. Es zeigt sich ein Unterschied zwischen den konventionellen, mineralischen Düngemitteln und Konzentrat 2 und 3 auf der einen Seite und dem Konzentrat 1 auf der anderen Seite. Konzentrat 1 erreicht dabei höhere Stickstoffentzüge als die anderen Düngemittel/Konzentrate. Die konventionellen, mineralischen Düngemittel erreichen wiederum höhere Stickstoffentzüge als die Konzentrate 2 und 3. Auffällig ist außerdem, dass Konzentrat 2 am schwächsten zu wirken scheint, auch wenn hier der Unterschied weniger deutlich ausfällt als bei Konzentrat 1 im Vergleich zum Rest.

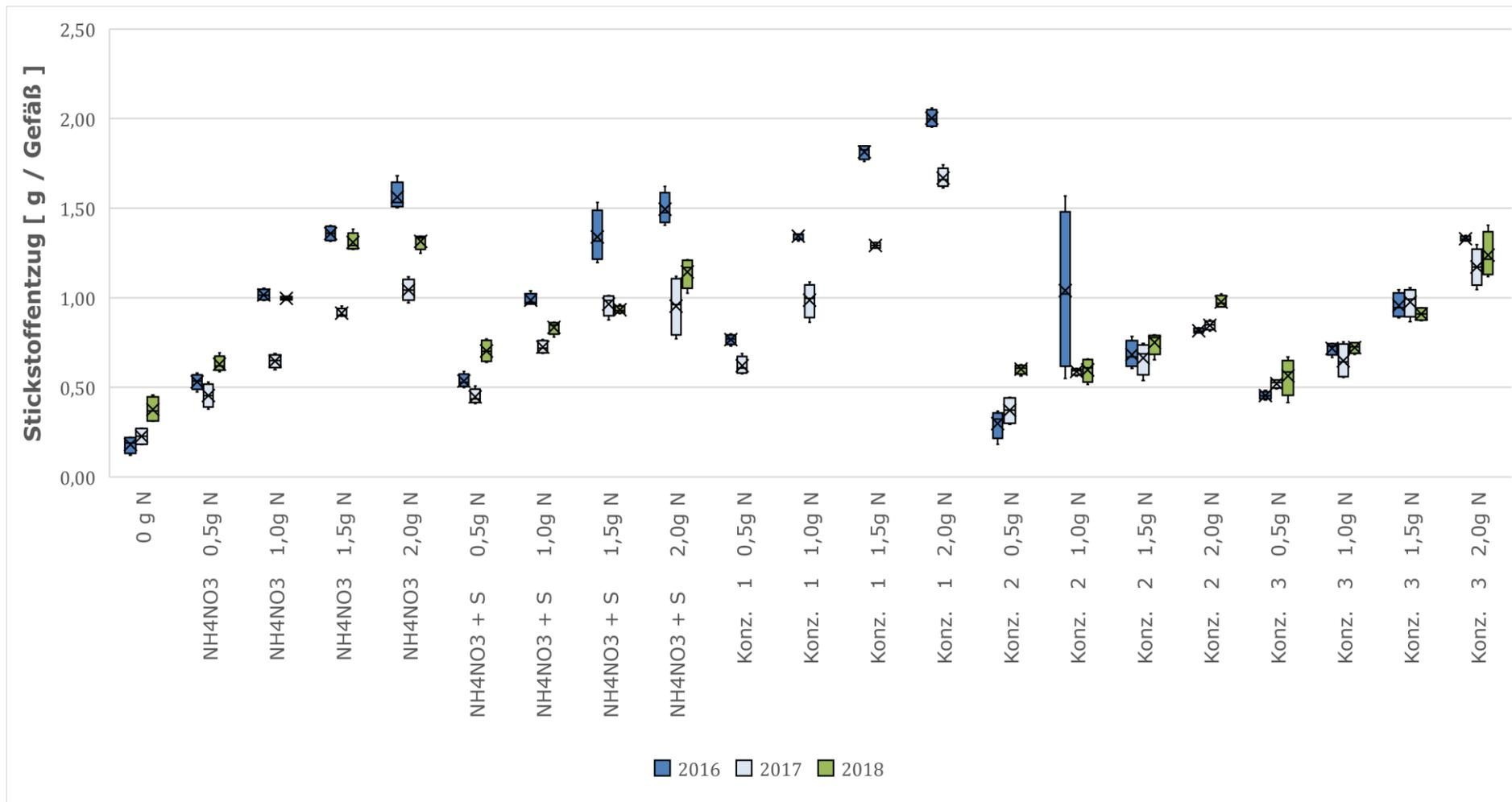


Abbildung 7: Stickstoffentzüge von Körnern des Sommerweizens der mit Düngemittel/Konzentraten behandelten Gefäße sowie der unbehandelten Kontrollen über die gesamte Versuchsdauer von 2016-2018. Mittelwerte sind als schwarzes Kreuz dargestellt.

3.2.2 PRÜFUNG DER VARIANZHOMOGENITÄT – LEVENE-TEST

Gemäß dem Vorgehen für die Korntrockenmassen wurde der Levene-Test durchgeführt, um das weitere Vorgehen der Analyse abzuklären. Tabelle 10 zeigt die Ergebnisse des Tests. Der P-Wert unterschreitet auch hier für alle Jahre das Signifikanzniveau von 0,05 deutlich, sodass von inhomogenen Varianzen ausgegangen werden kann. Dies ermöglicht es, den Kruskal-Wallis-Test durchzuführen.

Tabelle 10: Ergebnistabelle des Levene-Tests für die Stickstoffzüge

Streuungs- ursache	Quadrat- summen (SS)	Freiheits- grade (df)	Mittlere Quadratsum- me (MS)	Prüf- größe (F)	P- Wert	Kri- tischer F-Wert
2016	0,422	20	0,021	8,463	$2,8 \times 10^{-11}$	1,739
2017	0,071	20	0,004	3,799	$2,6 \times 10^{-5}$	1,739
2018	0,056	20	0,003	3,990	$1,3 \times 10^{-5}$	1,739

3.2.3 KRUSKAL-WALLIS-TEST ZUR PRÜFUNG AUF SIGNIFIKANTE UNTERSCHIEDE

Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests für alle Jahre. Erneut wird der kritische Wert durch den Prüfwert in jedem Fall überschritten, sodass man von signifikanten Unterschieden zwischen den Düngemittelstufen hinsichtlich der Stickstoffzüge ausgehen kann. Anschließend wird mit dem Nemenyi-Test geprüft, wo die Unterschiede im Detail liegen.

Tabelle 11: Ergebnis des Kruskal-Wallis-Test für die Stickstoffzüge aller Düngemittelstufen über die gesamte Versuchsdauer

2016	
Prüfwert	78,91
kritischer Wert	31,41
2017	
Prüfwert	79,21
Kritischer Wert	31,41
2018	
Prüfwert	64,45
Kritischer Wert	31,41

3.2.4 NEMENYI-TEST ZUR SPEZIFIKATION DER UNTERSCHIEDE

Tabelle 12, Tabelle 13 und Tabelle 14 zeigen die Ergebnisse des Nemenyi-Tests für die Stickstoffzüge für die Jahre 2016, 2017 und 2018. Die Gefäße ohne Düngemittel/Konzentrat heben sich, wie bei der Korntrockenmasse, am deutlichsten ab. Alle Düngemittelzugaben kleiner 1,0 g N zeigen keinen signifikanten Unterschied zur Kontrolle (ohne Dünger) für alle Jahre. Ein Effekt (in der Form eines signifikanten Unterschieds zur

Kontrolle) eines der Düngemittel/Konzentrate ist erst ab 1,0 g N Zugabe zu erkennen. Für die Jahre 2016 und 2017 gilt dies ausschließlich für Konzentrat 1 und für das Jahr 2018 ausschließlich für Ammoniumnitrat ohne Schwefelausgleich. Alle anderen Düngemittel/Konzentrate weisen erst ab 1,5 g N bzw. 2,0 g N einen signifikanten Unterschied zur Kontrolle auf. Ausnahme bildet das Konzentrat 2 im Jahr 2016, das sich auch nicht bei Zugabe von 2,0 g N signifikant von der Kontrolle unterscheidet, und im Jahr 2017 nur knapp die Schranke überschreitet.

Das Konzentrat 1 wirkt sich am deutlichsten auf die Stickstoffentzüge aus. Dennoch kann kein signifikanter Unterschied zu konventionellen, mineralischen Düngern bei gleicher Zugabe festgestellt werden. Der optische Eindruck aus den Box Plots bestätigt sich hier nicht., Insbesondere bei höheren Zugaben kann ebenfalls oft kein signifikanter Unterschied zwischen den Düngemitteln/Konzentraten bei gleicher Zugabe mehr festgestellt werden. Dies betrifft alle Vergleiche identischer N-Zugabemengen, also auch die mineralischen Dünger untereinander, als auch jeden Vergleich von mineralischem Dünger und Konzentrat aus dem RODOSAN-Verfahren mit wenigen Ausnahmen. Diese betreffen vor allem den Vergleich von Konzentrat 1 und 2. Die Mittelwerte der Zugabe von 1,5 g N des Konzentrats 1 und die der Zugabe von 1,5 g N des Konzentrats 2 sind signifikant unterschiedlich für die Jahre 2016 und 2017. Bei einer Zugabe von 2,0 g N unterscheiden sich die Konzentrate für das Jahr 2016 signifikant. Das Konzentrat 1 bringt dabei deutlich höhere Stickstoffentzüge hervor. Dies könnte die Bedeutung der thermischen Aufbereitung oder möglicherweise die Unterschiede der chemischen Behandlung und damit der qualitativen Zusammensetzung aufzeigen. Auch im Jahr 2018 zeichnet sich das vergleichsweise schwache Wirken des Konzentrats 2 ab. Die Zugabe von 1,0 g N Konzentrat 2 unterscheidet sich deutlich von 1,0 g N Ammoniumnitrat ohne Schwefelausgleich.

Tabelle 12: Ergebnisse des Nemenyi-Tests für die Kornstickstoffzüge für das Jahr 2016. Rote Zahlen zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen den Vergleichsgrößen an.

	0 g N	Konz. 2 0,5g N	Konz. 3 0,5g N	NH ₄ NO ₃ 0,5g N	NH ₄ NO ₃ + S 0,5g N	Konz. 2 1,5g N	Konz. 3 1,0g N	Konz. 1 0,5g N	Konz. 2 2,0g N	Konz. 3 1,5g N	NH ₄ NO ₃ + S 1,0g N	Konz. 2 1,0g N	NH ₄ NO 3 1,0g N	Konz. 3 2,0g N	NH ₄ NO ₃ + S 1,5g N	Konz. 1 1,0g N	NH ₄ NO 3 1,5g N	NH ₄ NO ₃ + S 2,0g N	NH ₄ NO 3 2,0g N	Konz. 1 1,5g N	Konz. 1 2,0g N
		328	316	297	274	273	238	233	219	197	169	165	158	152	109	100	99	96	61	50	26
0 g N	328	12,0	31,0	54,0	55,0	90,0	95,0	109,0	131,0	159,0	163,0	170,0	176,0	219,0	228,0	229,0	232,0	267,0	278,0	302,0	318,0
Konz. 2 0,5g N	316		19,0	42,0	43,0	78,0	83,0	97,0	119,0	147,0	151,0	158,0	164,0	207,0	216,0	217,0	220,0	255,0	266,0	290,0	306,0
Konz. 3 0,5g N	297			23,0	24,0	59,0	64,0	78,0	100,0	128,0	132,0	139,0	145,0	188,0	197,0	198,0	201,0	236,0	247,0	271,0	287,0
NH ₄ NO ₃ 0,5g N	274				1,0	36,0	41,0	55,0	77,0	105,0	109,0	116,0	122,0	165,0	174,0	175,0	178,0	213,0	224,0	248,0	264,0
NH ₄ NO ₃ + S 0,5g N	273					35,0	40,0	54,0	76,0	104,0	108,0	115,0	121,0	164,0	173,0	174,0	177,0	212,0	223,0	247,0	263,0
Konz. 2 1,5g N	238						5,0	19,0	41,0	69,0	73,0	80,0	86,0	129,0	138,0	139,0	142,0	177,0	188,0	212,0	228,0
Konz. 3 1,0g N	233							14,0	36,0	64,0	68,0	75,0	81,0	124,0	133,0	134,0	137,0	172,0	183,0	207,0	223,0
Konz. 1 0,5g N	219								22,0	50,0	54,0	61,0	67,0	110,0	119,0	120,0	123,0	158,0	169,0	193,0	209,0
Konz. 2 2,0g N	197									28,0	32,0	39,0	45,0	88,0	97,0	98,0	101,0	136,0	147,0	171,0	187,0
Konz. 3 1,5g N	169										4,0	11,0	17,0	60,0	69,0	70,0	73,0	108,0	119,0	143,0	159,0
NH ₄ NO ₃ + S 1,0g N	165											7,0	13,0	56,0	65,0	66,0	69,0	104,0	115,0	139,0	155,0
Konz. 2 1,0g N	158												6,0	49,0	58,0	59,0	62,0	97,0	108,0	132,0	148,0
NH ₄ NO ₃ 1,0g N	152													43,0	52,0	53,0	56,0	91,0	102,0	126,0	142,0
Konz. 3 2,0g N	109														9,0	10,0	13,0	48,0	59,0	83,0	99,0
NH ₄ NO ₃ + S 1,5g N	100															1,0	4,0	39,0	50,0	74,0	90,0
Konz. 1 1,0g N	99																3,0	38,0	49,0	73,0	89,0
NH ₄ NO ₃ 1,5g N	96																	35,0	46,0	70,0	86,0
NH ₄ NO ₃ + S 2,0g N	61																		11,0	35,0	51,0
NH ₄ NO ₃ 2,0g N	50																			24,0	40,0
Konz. 1 1,5g N	26																				16,0
Konz. 1 2,0g N	10																				

Tabelle 13: Ergebnisse des Nemenyi-Tests für die Kornstickstoffzüge für das Jahr 2017. Rote Zahlen zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen den Vergleichsgrößen an.

ND = 174,2	0 g N	Konz. 2 0,5g N	NH4N O3 + S 0,5g N	NH4NO 3 0,5g N	Konz. 3 0,5g N	Konz. 2 1,0g N	Konz. 1 0,5g N	Konz. 3 1,0g N	NH4NO 3 1,0g N	Konz. 2 1,5g N	NH4NO3 + S 1,0g N	Konz. 2 2,0g N	NH4NO 3 1,5g N	NH4NO3 + S 1,5g N	NH4NO3 + S 2,0g N	Konz. 3 1,5g N	Konz. 1 1,0g N	NH4NO 3 2,0g N	Konz. 3 2,0g N	Konz. 1 1,5g N	Konz. 1 2,0g N		
	330	306	293	292	267	233	223	211	210	205	180	146	118	104	103	97	95	73	46	28	10		
0 g N	330	24,0	37,0	38,0	63,0	97,0	107,0	119,0	120,0	125,0	150,0	184,0	212,0	226,0	227,0	233,0	235,0	257,0	284,0	302,0	320,0		
Konz. 2 0,5g N	306		13,0	14,0	39,0	73,0	83,0	95,0	96,0	101,0	126,0	160,0	188,0	202,0	203,0	209,0	211,0	233,0	260,0	278,0	296,0		
NH4NO3 + S 0,5g N	293			1,0	26,0	60,0	70,0	82,0	83,0	88,0	113,0	147,0	175,0	189,0	190,0	196,0	198,0	220,0	247,0	265,0	283,0		
NH4NO3 0,5g N	292				25,0	59,0	69,0	81,0	82,0	87,0	112,0	146,0	174,0	188,0	189,0	195,0	197,0	219,0	246,0	264,0	282,0		
Konz. 3 0,5g N	267					34,0	44,0	56,0	57,0	62,0	87,0	121,0	149,0	163,0	164,0	170,0	172,0	194,0	221,0	239,0	257,0		
Konz. 2 1,0g N	233						10,0	22,0	23,0	28,0	53,0	87,0	115,0	129,0	130,0	136,0	138,0	160,0	187,0	205,0	223,0		
Konz. 1 0,5g N	223							12,0	13,0	18,0	43,0	77,0	105,0	119,0	120,0	126,0	128,0	150,0	177,0	195,0	213,0		
Konz. 3 1,0g N	211								1,0	6,0	31,0	65,0	93,0	107,0	108,0	114,0	116,0	138,0	165,0	183,0	201,0		
NH4NO3 1,0g N	210									5,0	30,0	64,0	92,0	106,0	107,0	113,0	115,0	137,0	164,0	182,0	200,0		
Konz. 2 1,5g N	205										25,0	59,0	87,0	101,0	102,0	108,0	110,0	132,0	159,0	177,0	195,0		
NH4NO3 + S 1,0g N	180											34,0	62,0	76,0	77,0	83,0	85,0	107,0	134,0	152,0	170,0		
Konz. 2 2,0g N	146														28,0	42,0	43,0	49,0	51,0	73,0	100,0	118,0	136,0
NH4NO3 1,5g N	118															14,0	15,0	21,0	23,0	45,0	72,0	90,0	108,0
NH4NO3 + S 1,5g N	104																1,0	7,0	9,0	31,0	58,0	76,0	94,0
NH4NO3 + S 2,0g N	103																6,0	8,0	30,0	57,0	75,0	93,0	
Konz. 3 1,5g N	97																	2,0	24,0	51,0	69,0	87,0	
Konz. 1 1,0g N	95																		22,0	49,0	67,0	85,0	
NH4NO3 2,0g N	73																			27,0	45,0	63,0	
Konz. 3 2,0g N	46																				18,0	36,0	
Konz. 1 1,5g N	28																					18,0	
Konz. 1 2,0g N	10																						

Tabelle 14: Ergebnisse des Nemenyi-Tests für die Kornstickstoffzüge für das Jahr 2018. Rote Zahlen zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen den Vergleichsgrößen an.

ND = 141,2		0 g	Konz. 3 0,5g	Konz. 2 0,5g	Konz. 2 1,0g	NH4NO3 0,5g	NH4NO3 + S 0,5g	Konz. 3 1,0g	Konz. 2 1,5g	NH4NO3 + S 1,0g	Konz. 3 1,5g	NH4NO3 + S 1,5g	Konz. 2 2,0g	NH4NO3 1,0g	NH4NO3 + S 2,0g	Konz. 3 2,0g	NH4NO3 1,5g	NH4NO3 2,0g
		264	231	228	224	213	183	173	163	139	116	110	88	78	53	38	23	22
0 g	264		33,0	36,0	40,0	51,0	81,0	91,0	101,0	125,0	148,0	154,0	176,0	186,0	211,0	226,0	241,0	242,0
Konz. 3 0,5g	231			3,0	7,0	18,0	48,0	58,0	68,0	92,0	115,0	121,0	143,0	153,0	178,0	193,0	208,0	209,0
Konz. 2 0,5g	228				4,0	15,0	45,0	55,0	65,0	89,0	112,0	118,0	140,0	150,0	175,0	190,0	205,0	206,0
Konz. 2 1,0g	224					11,0	41,0	51,0	61,0	85,0	108,0	114,0	136,0	146,0	171,0	186,0	201,0	202,0
NH4NO3 0,5g	213						30,0	40,0	50,0	74,0	97,0	103,0	125,0	135,0	160,0	175,0	190,0	191,0
NH4NO3 + S 0,5g	183							10,0	20,0	44,0	67,0	73,0	95,0	105,0	130,0	145,0	160,0	161,0
Konz. 3 1,0g	173								10,0	34,0	57,0	63,0	85,0	95,0	120,0	135,0	150,0	151,0
Konz. 2 1,5g	163									24,0	47,0	53,0	75,0	85,0	110,0	125,0	140,0	141,0
NH4NO3 + S 1,0g	139										23,0	29,0	51,0	61,0	86,0	101,0	116,0	117,0
Konz. 3 1,5g	116											6,0	28,0	38,0	63,0	78,0	93,0	94,0
NH4NO3 + S 1,5g	110												22,0	32,0	57,0	72,0	87,0	88,0
Konz. 2 2,0g	88													10,0	35,0	50,0	65,0	66,0
NH4NO3 1,0g	78														25,0	40,0	55,0	56,0
NH4NO3 + S 2,0g	53															15,0	30,0	31,0
Konz. 3 2,0g	38																15,0	16,0
NH4NO3 1,5g	23																	1,0
NH4NO3 2,0g	22																	

4 DISKUSSION

4.1 DISKUSSION ZUR DÜNGEWIRKUNG

Diese Studie konnte zeigen, dass eine Wirkung der Konzentrate aus dem RODOSAN-Verfahren hinsichtlich der untersuchten Parameter Korntrockenmasse pro Gefäß und Stickstoffentzug aus der Korntrockenmasse pro Gefäß vorhanden ist. Für beide Parameter zeigt der Mittelwertvergleich durch den Nemenyi-Test spätestens ab 2,0 g N Düngemittelzugabe einen signifikanten Unterschied zu 0 g N Düngemittelzugabe (Kontrolle) mit der Ausnahme von Konzentrat 2 (Korntrockenmasse 2016, Stickstoffentzug 2016) und Ammoniumnitrat mit Schwefelausgleich (Korntrockenmasse 2017).

Die Düngewirkung aller untersuchten Konzentrate für zumindest einzelne Jahre ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die Zusammensetzungen der mineralischen Düngemittel und der Konzentrate qualitativ, bezogen auf die düngewirksamen Stoffe, ähnlich sind. Hinsichtlich der Stickstoffkomponente finden sich sowohl in den konventionellen, mineralischen Düngemitteln als auch in den Konzentraten (mit Ausnahme von Konzentrat 3) Ammonium als Kation in Lösung, da zumindest im Fall von Konzentrat 1 und 2 Ammoniumhydroxid zur Neutralisation der Schwefelsäure im Rahmen der Aufbereitung eingesetzt wird und die konventionellen, mineralischen Düngemittel aus Ammoniumnitrat bestehen. Im Fall von Konzentrat 3 allerdings wurde Harnstoff eingesetzt, wodurch die Carbamidstickstoff-Konzentration im Konzentrat zu erklären ist. Der mineralische Dünger hat neben Ammonium als Kation weiterhin Nitrat als Anion. Dies scheint sich jedoch nicht wesentlich auf die Versuchsergebnisse auszuwirken, da die signifikanten Unterschiede in den meisten Fällen zwischen Konzentrat 1 und 2 bestehen und nicht zwischen Konzentraten und konventionellen, mineralischen Düngemitteln.

Es wird stets die gleiche Menge Stickstoff beigegeben, sodass ein Unterschied lediglich über die Bioverfügbarkeit der Stickstoffkomponente oder Wechselwirkungen mit sonstigen Bestandteilen des Düngemittels/Konzentrats zustande kommen könnte. Die Bioverfügbarkeit von Nitrat scheint ähnlich dem Ammonium und Harnstoff zu sein, allenfalls zeitlich unterschiedlich (Cox & Reisenauer, 1973). Dies wird vor allem dadurch gestützt, dass es zwischen Konzentrat 1 (Stickstoffträger: Ammonium) und 3 (Stickstoffträger: Harnstoff) bei gleicher Zugabe keine signifikanten Unterschiede für beide untersuchten Parameter gibt.

Für die Schwefelkomponente ist stets Sulfat in unterschiedlichen Konzentrationen vorhanden (mit Ausnahme des mineralischen Ammoniumnitratdüngers ohne Sulfatausgleich). Die konventionellen, mineralischen Dünger lagen als Feststoff vor und enthalten neben Ammoniumnitrat und Sulfat vermutlich höchstens in geringsten Spuren andere Stoffe. Insofern gibt die chemische Zusammensetzung einen möglichen Erklärungsansatz für die Düngewirkung (allerdings nicht die Unterschiede), die sowohl für die mineralischen Düngemittel als auch die Konzentrate festgestellt wurde.

4.2 DISKUSSION DER UNTERSCHIEDE INNERHALB DER UNTERSUCHTEN DÜNGEMITTEL/KONZENTRATE

Wesentlich für die Ergebnisse ist, dass wiederholt signifikante Unterschiede bei gleicher N-Zugabe zwischen Konzentrat 1 und 2 festgestellt werden konnten. Dies wurde für beide betrachteten Parameter nachgewiesen. Für die Korntrockenmasse betrifft dies das Jahr 2016 (signifikanter Unterschied für 1,5 g N) und für den Stickstoffentzug die Jahre 2016 (signifikanter Unterschied bei 1,5 g N und 2,0 g N) und 2017 (signifikanter Unterschied bei 1,5 g N).

Die Konzentrate 1 und 2 wurden mit Ammoniumhydroxid neutralisiert, wodurch Ammoniumsulfat in Lösung entstand. Neben der chemischen Zusammensetzung der Düngemittel bzw. Konzentrate ist allerdings auch die Konzentration für die Düngewirkung von Bedeutung. Da stets die gleiche absolute Menge Stickstoff zugegeben wird, muss die Ursache für diese Unterschiede in der Konzentration der Bestandteile der Konzentrate liegen. Die Analyse der Konzentrate ergab gemäß Tabelle 2 eine ähnliche chemische Zusammensetzung, aber unterschiedliche Konzentrationen der Bestandteile. Das Konzentrat 2 hat im Vergleich zu Konzentrat 1 und 3 aufgrund der fehlenden thermischen Aufbereitung im Verhältnis eine geringere Konzentration bei ähnlicher qualitativer Zusammensetzung. Für die Spurenmetalle ist festzuhalten, dass die Konzentrationen kleiner der analytischen Bestimmungsgrenze (Tabelle 2) angegeben wurden. Es ist davon auszugehen, dass Spurenmetalle in den aufkonzentrierten Konzentraten auch entsprechend höher konzentriert waren als in Konzentrat 2. Dies zeigt sich am Beispiel des Natriums, das in Konzentrat 3 um den Faktor 8 höher konzentriert ist als in Konzentrat 2.

Diese Konzentrationsunterschiede führten dazu, dass von Konzentrat 2 wesentlich mehr (Faktor 6,5) Konzentrat benötigt wurde, um mit der gleichen Stickstoffmenge zu düngen, als bei Konzentrat 1. Es ist möglich, dass es dadurch zu Wechselwirkungen von anderen Bestandteilen in Konzentrat 2 mit dem Bodensubstrat oder der Pflanze kam, was sich letztlich negativ auf das Pflanzenwachstum auswirken kann. Allerdings muss beachtet werden, dass trotz des Aufkonzentrierens von Konzentrat 1 durch die höhere Zugabemenge an Lösung von Konzentrat 2 letztlich auch die gleichen Mengen an Spurenelementen in den Gefäßen sein müsste. Der Unterschied sollte dann aus der unterschiedlichen Konzentration in der Bodenlösung hervorgehen. Denkbar wären allerdings auch andere Effekte, die durch die Aufkonzentrierung hinzukommen und die die Konzentrationen von Spurenelementen beeinflussen, die uns nicht bekannt sind. Hier besteht weiterer Untersuchungsbedarf. Außerdem ist unklar, welche anderen Substanzen möglicherweise in der Lösung vorhanden sind und entsprechend Wechselwirkungen verursachen könnten. Dies unterstreicht die Bedeutung der genauen Kenntnis der Zusammensetzung der Konzentrate sowie die Bedeutung der thermischen Aufkonzentrierung. In einer ökonomischen Betrachtung müssten die Wirkung des Düngemittels/Konzentrats der benötigten Menge und die damit einhergehenden Kosten gegenübergestellt werden.

Ebenso denkbar ist, dass es durch die Konzentrationsunterschiede von Stickstoff und Schwefel in Konzentrat 1 und 2 zu unterschiedlichen osmotischen Gleichgewichten an der Wurzel gekommen ist. Es wird davon ausgegangen, dass es für die Pflanze energetisch günstiger ist, Stickstoff aus einer höher konzentrierten Bodenlösung aufzunehmen als aus einer niedriger konzentrierten Bodenlösung (Cox & Reisenauer, 1973). Dies würde die Aufnahme der düngewirksamen Bestandteile aus der Bodenlösung durch die Pflanze bei Verwendung von Konzentrat 1 begünstigen. Hier kann es zu Unterschieden auch aufgrund der Verwendung

verschiedener Sommerweizen-Arten gekommen sein, die die Abweichungen zwischen den Jahren erklären könnten.

Die statistischen Analysen zeigen für alle Parameter oft auch dann keine signifikanten Unterschiede an, wenn unterschiedliche Zugaben an Stickstoff von unterschiedlichen Düngemitteln/Konzentrate verglichen werden. Dies ist vermutlich der Tatsache geschuldet, dass ab einer bestimmten Zugabemenge an Düngemittel/Konzentrat der Effekt auf die Pflanze nicht bedeutend größer wird oder sich sogar kontraproduktiv auf das Pflanzenwachstum und damit die betrachteten Parameter auswirkt. Dies hängt vermutlich auch mit der Tatsache zusammen, dass die Pflanze zunächst einen stabilen Pflanzenapparat mit leistungsfähiger (Blatt-)Oberfläche für die Assimilation aufbaut, bevor sie in das Korn investiert. Es wurden daher auch keine signifikanten Unterschiede zwischen 2,0 g Stickstoffzugabe und 1,5 g N oder sogar 1,0 g N-Zugabe für die meisten Vergleiche beider Parameter festgestellt.

Insgesamt konnten die folgenden Thesen zur möglichen Erklärung der nicht vorhandenen Unterschiede zwischen den konventionellen, mineralischen Düngern und den Konzentraten bzw. für den Unterschied innerhalb der Konzentrate erarbeitet werden:

- Die qualitative chemische Zusammensetzung war zwar zum Teil unterschiedlich, doch sie sorgte nicht für signifikante Unterschiede.
- Aufgrund von osmotischen Gleichgewichten entstanden die Unterschiede zwischen Konzentrat 1 und 2. Durch die verschiedenen Konzentrationen in diesen Konzentraten kam es auch zu entsprechend verschiedenen Konzentrationen in den Bodenlösungen und damit an der Wurzel, was die Wechselwirkung der Pflanze mit der Lösung beeinflusste. Die Spurenelemente spielen vermutlich eine untergeordnete Rolle, um die Unterschiede zu erklären.

4.3 FEHLERANALYSE

Es muss ausdrücklich darauf verwiesen werden, dass es durch die Verfügbarkeitsengpässe für das Konzentrat 1 zu Einschränkungen in der Interpretation gekommen sein kann. Das Jahr 2018 konnte für das Konzentrat 1 nicht zur Analyse herangezogen werden. Auch fehlende Daten zur chemischen Zusammensetzung von Konzentrat 1 bzw. generell eingeschränkte Informationen zu den genutzten Substanzen haben die Interpretation eingeschränkt.

Durch die variierenden Versuchsbedingungen (Witterungsbedingungen durch geöffnetes Glashaus ohne Temperatursteuerung sowie der Einsatz verschiedener Sorten) in den Jahren 2016 – 2018, konnten die Jahre nur bedingt miteinander verglichen werden, sodass die statistische Analyse innerhalb der Einzeljahre durchgeführt wurde. Dadurch waren für jede Düngemittelstufe, also jedes Prüfglied, nur 4 Werte vorhanden, was die Robustheit der Ergebnisse der statistischen Analyse beeinflusst haben könnte.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Folgende Kernaussagen können in Folge dieser Untersuchungen getroffen werden:

- Es ist eine Düngemittelwirkung aller drei betrachteten Konzentrate aus dem RODOSAN-Verfahren vorhanden. Dies zeigt sich für die betrachteten Parameter Korntrockenmasse und Stickstoffentzug im Vergleich zu den Prüfgefäßen ohne Düngemittel-/Konzentratbehandlung.
- Die Konzentrate aus dem RODOSAN-Verfahren unterscheiden sich bei gleicher Massenzugabe Stickstoff nicht von den eingesetzten mineralischen Düngemitteln in ihrer Wirkung auf Korntrockenmasse und Stickstoffentzug.
- Die Art der Aufbereitung der Abprodukte des RODOSAN-Verfahrens (speziell die thermische Aufkonzentrierung) hat einen signifikanten Einfluss auf Korntrockenmasse und Stickstoffentzug. Dies zeigt sich in den signifikanten Unterschieden zwischen Konzentrat 1 und 2 für beide Parameter. Obwohl Konzentrat 3 in den meisten Fällen geringere Massen hervorbrachte, ist keiner der Unterschiede zu den anderen Konzentraten signifikant.

Damit kann diese Studie einige der von Friedrich et al. (2017) getroffenen Aussagen im Rahmen dieses Versuchs bestätigen. Es bleibt weiterhin offen, ob die untersuchten Konzentrate aus dem RODOSAN-Verfahren bei 10 % Gesamtstickstoffgehalt und einem relativ aufwändigen Herstellungsprozess im Verhältnis zu den mineralischen Düngern wirtschaftlich wettbewerbsfähig sind. Außerdem scheinen weitere Untersuchungen zur Problematik ratsam, da einige der beobachteten Effekte (speziell der Unterschied zwischen Konzentrat 1 und 2) nicht mit Sicherheit erklärt werden konnten.

LITERATURVERZEICHNIS

- Cox, W. J., & Reisenauer, H. M. (April 1973). Growth and ion uptake by wheat supplied nitrogen as nitrate, or ammonium, or both. *Plant and Soil*, S. 363-380.
- Friedrich, H.-J., Zschornack, D., & Viehweger, K. (2017). „WRRL-unterstützte Wertstoffnutzung (Düngenutzung) aus potentiell wasserqualitätsmindernden Koppelprodukten der Wasseraufbereitung von Grubenwasserreinigungsanlagen (hier Ammonium, Sulfat) einschließlich Durchführung von Technikumsversuchen mit Ammonium. Dresden.
- Hayward, H. E., & Winifred, B. S. (Dezember 1944). Effects of Isosmotic Concentrations of Inorganic and Organic Substrates on Entry of Water into Corn Roots. *International Journal of Plant Sciences*, S. 131-139.
- Köhler, W., Schachtel, G., & Voleske, P. (2002). *Biostatistik*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, N. W. (1. Februar 2015). *Landwirtschaftskammer Nordrheinwestfalen*. Von <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/getreide/getreide-n-duengung-pdf.pdf> abgerufen
- Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, N.-W. (1. Februar 2015). *Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen*. Von <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/getreide/getreide-s-duengung-pdf.pdf> abgerufen
- Maathuis, F. J. (Juni 2009). Physiological functions of mineral macronutrients. *Current Opinion in Plant Biology*, S. 250-258.
- Sachs, L. (2013). *Angewandte Statistik: Anwendung statistischer Methoden*. Klausdorf: Springer-Verlag.