

Hochschule Anhalt
Fachbereich Landwirtschaft, Ökotrophologie und Landschafts-
entwicklung



Bachelorarbeit

„Einfluss der Stickstoffdüngung auf Ertrag und Qualität bei Quinoa, Amarant und Chia als ausgewählte Pseudogetreidekulturen“

Name, Vorname: Schmidt, Linus Benedikt

Matrikelnummer: [REDACTED]

Geburtsdatum: [REDACTED]

Studiengang: Bachelor Landwirtschaft

1. Gutachter: Dr. Michael Schenk

2. Gutachter: Dr. Bastian Sander

Bernburg (Saale), den 10.10.2025

Inhalt

I. Tabellenverzeichnis.....	I
II. Abbildungsverzeichnis.....	I
III. Formelverzeichnis	III
IV. Abkürzungsverzeichnis	IV
1. Einleitung	1
2. Literatur	2
2.1 Pseudogetreide.....	2
2.1.1 Historie von Quinoa	3
2.1.2 Agronomische Eigenschaften von Quinoa	3
2.1.3 Inhaltsstoffe und Verwendung von Quinoa	4
2.1.4 Historie von Amaranth	6
2.1.5 Agronomische Eigenschaften von Amaranth	6
2.1.6 Inhaltsstoffe von Amaranth	7
2.1.7 Historie von Chia	8
2.1.8 Agronomische Eigenschaften von Chia	9
2.1.9 Inhaltsstoffe und Verwendung von Chia	10
2.2 Bedeutung von Stickstoff in der Pflanzenernährung.....	11
2.2.1 Funktion von Stickstoff in der Pflanze	11
2.2.2 Stickstoffaufnahmewege der Pflanze.....	12
2.2.3 Stickstoffformen im Ackerbau	13
2.3 Stand von durchgeföhrten Untersuchungen	14

2.3.1 Quinoa.....	14
2.3.2 Amarant.....	18
2.3.3 Chia.....	21
3. Zielstellung	25
4. Material und Methode.....	27
4.1 Beschreibung des Feldversuches	27
4.1.1 Standort.....	27
4.1.2 Witterungsverlauf.....	27
4.1.3 Versuchsaufbau	30
4.2 Datenerhebung	36
4.2.1 Ertrag	36
4.2.2 Rohprotein.....	38
4.2.3 Tausendkorngewicht	39
4.3 Datenauswertung.....	39
5. Ergebnisse	42
5.1 Ergebnisse von Quinoa.....	42
5.1.1 Ergebnisse von Quinoa aus den Jahren 2022 und 2023.....	42
5.1.2 Ergebnisse von Quinoa aus dem Jahr 2024	44
5.2 Ergebnisse von Amarant aus den Jahren 2022, 2023 und 2024	49
5.3 Ergebnisse von Chia aus den Jahren 2022, 2023 und 2024	52
6. Diskussion.....	54
6.1 Diskussion Quinoa	54

6.1.1 Diskussion Ertrag von Quinoa	54
6.1.2 Diskussion Proteingehalt von Quinoa	58
6.1.3 Diskussion Tausendkorngewicht von Quinoa	59
6.1.4 Bearbeitung der Forschungsfragen für Quinoa	60
6.2 Diskussion Amarant	62
6.2.1 Diskussion Ertrag von Amarant	62
6.2.2 Diskussion Proteingehalt von Amarant	64
6.2.3 Diskussion Tausendkorngewicht Amarant	65
6.2.4 Bearbeitung der Forschungsfragen für Amarant	66
6.3 Diskussion Chia	67
6.3.1 Diskussion Ertrag von Chia	67
6.3.2 Diskussion Proteingehalt von Chia	70
6.3.3 Diskussion Tausendkorngewicht von Chia.....	71
6.3.4 Bearbeitung der Forschungsfragen für Chia	72
7. Schlussfolgerung	74
8. Zusammenfassung	76
9. Literaturverzeichnis	77
10. Anhang.....	89
11. Selbstständigkeitserklärung.....	93

I. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: ausgezählte Bestandesdichte 2024 (eigene Zählung)	33
Tabelle 2: Bonituren 2024 (eigene Beobachtungen)	34
Tabelle 3: Übersicht von vorhandenen auswertbaren Daten (eigene Darstellung)	36
Tabelle 4: Arithmetisches Mittel des Ertrags mit Standardabweichung sowie Variationskoeffizient, Proteingehalt und Tausendkorngewicht von Quinoa je nach Düngestufe in den Jahren 2022 und 2023	42
Tabelle 5: Arithmetisches Mittel des Ertrags mit Standardabweichung sowie Variationskoeffizient, Proteingehalt und Tausendkorngewicht von drei Quinoasorten je nach Düngestufe im Erntejahr 2024	44
Tabelle 6: Arithmetisches Mittel des Ertrags mit Standardabweichung sowie Variationskoeffizient, Proteingehalt und Tausendkorngewicht von Amarant je nach Düngestufe in den Jahren 2022, 2023 und 2024	49
Tabelle 7: Arithmetisches Mittel des Ertrags mit Standardabweichung sowie Variationskoeffizient, Proteingehalt und Tausendkorngewicht von Chia je nach Düngestufe in den Jahren 2022, 2023 und 2024	52

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Quinoapflanzen in unterschiedlichen Entwicklungsstadien (eigene Aufnahmen)	4
Abbildung 2: Samenkopf von Amarant während der Blüte (eigene Aufnahme)	7
Abbildung 3: Chiabestand kurz vor der Blüte (eigene Aufnahme)	9
Abbildung 4: Einfluss von Stickstoff auf den Quinoaertrag aus durchgeföhrten Untersuchungen von (Schulte auf'm Erley et al. 2005; Geren 2015; Almadini et al. 2019) (eigene Darstellung)	16

Abbildung 5: Einfluss von Stickstoff auf den Proteingehalt von Quinoa bei durchgef�hrten Untersuchungen von (Geren 2015; Almadini et al. 2019) (eigene Darstellung).....	17
Abbildung 6: Einfluss von Stickstoff auf das Tausendkorngewicht bei Quinoa von durchgef�hrten Untersuchungen von (Geren 2015; Almadini et al. 2019) (eigene Darstellung).....	18
Abbildung 7: Einfluss von Stickstoff auf den Amarantertrag in durchgef�hrten Untersuchungen von (Myers 1998; Pospisil et al. 2006; Schulte auf'm Erley et al. 2005) (eigene Darstellung).....	19
Abbildung 8: Einfluss von Stickstoff auf das Tausendkorngewicht von Amarant bei durchgef�hrten Untersuchungen von (Myers 1998; Pospisil et al. 2006) (eigene Darstellung).....	20
Abbildung 9: Einfluss von Stickstoff auf den Chiaertrag bei durchgef�hrten Untersuchungen von (Mary 2018; Grimes et al. 2019; Mohanty et al. 2021) (eigene Darstellung).....	22
Abbildung 10: Einfluss von Stickstoffdungung auf den Proteingehalt von Chia bei durchgef�hrten Untersuchungen von (Mary 2018) (eigene Darstellung).....	23
Abbildung 11: Einfluss von Stickstoff auf das Tausendkorngewicht von Chia bei durchgef�hrten Untersuchungen von (Mary 2018; Grimes et al. 2019) (eigene Darstellung).....	23
Abbildung 12: Vergleich der langjährigen Jahresniederschlagsmenge und langjährigen Jahresdurchschnittstemperatur am Standort Bernburg (Saale) von 1991 bis 2020 mit der Niederschlagsmenge und Durchschnittstemperatur im Jahr 2022 (eigene Darstellung nach (Deutscher Wetterdienst 2025)).....	28
Abbildung 13: Vergleich der langjährigen Jahresniederschlagsmenge und langjährigen Jahresdurchschnittstemperatur am Standort Bernburg (Saale) von 1991 bis 2020 mit der Niederschlagsmenge und Durchschnittstemperatur im Jahr 2023 (eigene Darstellung nach (Deutscher Wetterdienst 2025)).....	29
Abbildung 14: Vergleich der langjährigen Jahresniederschlagsmenge und langjährigen Jahresdurchschnittstemperatur am Standort Bernburg-Strenzfeld von 1991 bis 2020 mit der Niederschlagsmenge und Durchschnittstemperatur im Jahr 2024 (eigene Darstellung nach (Deutscher Wetterdienst 2025)).....	30

Abbildung 15: Boxplots der Ertragsmengen der Quinoasorten 2024 unterteilt nach Düngestufen.....	46
Abbildung 16: Streudiagramm der Proteingehalte der Quinoasorten 2024 unterteilt nach Düngestufen.....	47
Abbildung 17: Streudiagramm der TKG-Werte der Quinoasorten 2024 unterteilt nach Düngestufen.....	48
Abbildung 18: Boxplots zum Ertrag von Amarant der Jahre 2022, 2023 und 2024 unterteilt nach Düngestufen	50
Abbildung 19: Streudiagramm der TKG-Werte von Amarant der Jahre 2022, 2023 und 2024 unterteilt nach Düngestufen.....	51
Abbildung 20: Geografische Karte des mitteldeutschen Trockengebietes nach (Fabig 2007)	89
Abbildung 21: Versuchsaufbau 2022 nach (Dallmann et al. 2022).....	90
Abbildung 22: Versuchsaufbau 2023 nach (Dallmann et al. 2023).....	90
Abbildung 23: Versuchsaufbau 2024 nach (Dallmann et al. 2024).....	91
Abbildung 24: Temperaturverlauf am Standort Bernburg (Saale) vom 06.04.2024 bis 31.05.2024 dargestellt von (Wetter Kontor 2025; Deutscher Wetterdienst 2025).....	91
Abbildung 25: Niederschlagsverteilung am Standort Bernburg (Saale) vom 06.04.2024 bis 31.05.2024 dargestellt von (Wetter Kontor 2025; Deutscher Wetterdienst 2025).....	92

III. Formelverzeichnis

Formel 1: Ertragsberechnung ohne Berücksichtigung der Trockensubstanz	37
Formel 2: Trockensubstanzberechnung	38
Formel 3: Ertragsberechnung mit Berücksichtigung der Trockensubstanz.....	38

IV. Abkürzungsverzeichnis

nFK	nutzbare Feldkapazität
AS	Aminosäuren
Kö/m ²	Körner pro Quadratmeter
TKG	Tausendkorngewicht
Pfl/m ²	Pflanzen pro Quadratmeter
VK	Variationskoeffizient
SiG.	Signifikanzgruppe

1. Einleitung

Die Landwirtschaft steht zunehmend unter Druck, sich an die Folgen des Klimawandels anzupassen. Insbesondere die steigende Variabilität von Temperatur und Niederschlag stellt den Ackerbau in Deutschland vor neue Herausforderungen. Trockenperioden im Frühjahr und Sommer häufen sich, während Starkniederschläge in kurzer Zeit zu Erosionsereignissen führen können. Gleichzeitig wächst der gesellschaftliche und politische Druck, Ressourcen effizienter zu nutzen und die Umweltbelastung durch Düng- und Pflanzenschutzmittel zu minimieren (Kabir et al. 2024). Global betrachtet wächst die Weltbevölkerung, was zusätzlich die aktuelle Ernährungsunsicherheit verstärkt (Valenzuela Zamudio et al. 2024).

Vor diesem Hintergrund rücken alternative Kulturen in den Fokus, die mit widrigen Standortbedingungen besser zuretkommen als klassische Getreidearten. Hierzu zählen sogenannte Pseudogetreide wie Quinoa (*Chenopodium quinoa*), Amaranth (*Amaranthus spp.*) und Chia (*Salvia hispanica L.*), die ursprünglich aus Südamerika stammen und sich durch ihre Nährstoffdichte sowie eine hohe Toleranz gegenüber Trockenheit auszeichnen (Manoharan et al. 2025). Ihr Anbau wird derzeit in Mitteleuropa verstärkt auf seine Anbaueignung, Ertragsleistung und Qualitätseigenschaften untersucht (Graziano et al. 2022).

Ziel dieser Arbeit ist es, die Wirkung unterschiedlicher Stickstoffdüngestufen auf den Kornertrag und Tausendkorngewicht (TKG) sowie dem Qualitätsparameter Rohproteininhalt von Quinoa, Amaranth und Chia zu untersuchen. Anhand vorliegender Feldversuchsdaten aus drei Jahren von einem Standort im mitteldeutschen Trockengebiet soll geprüft werden, wie stark die Kulturen auf Stickstoffgaben reagieren. Des Weiteren wird hinterfragt, ob sich sortenspezifische Unterschiede bei Quinoa zeigen und in welchem Maße sich Ertrag und Qualität gegenseitig bei allen Pseudogetreidekulturen beeinflussen. Die Ergebnisse sollen mit Literaturwerten verglichen und in Bezug auf ihre pflanzenbauliche Relevanz bewertet werden. Daraus sollen mögliche Anbauperspektiven im mitteldeutschen Trockengebiet aufgezeigt werden. Außerdem wird eine Stickstoffdüngempfehlung anhand der Ergebnisse für den Standort formuliert.

2. Literatur

2.1 Pseudogetreide

Die Arbeit befasst sich mit Quinoa, Amarant und Chia als Vertreter der Pseudogetreide. Quinoa, Amarant und Chia sind per se nicht mit den gängigen Getreidearten wie Weizen, Roggen, Reis oder Mais verwandt. Während die klassischen Getreidearten zu den monokotylen Pflanzen gehören, zählen Pseudogetreide zu den dikotylen Pflanzen. Botanisch betrachtet sind Pseudogetreide deshalb keine echten Getreidearten (Alvarez-Jubete et al. 2010). Des Weiteren sind die Pseudogetreidekulturen untereinander ebenfalls selten verwandt (Shewry 2002). Die Getreidekulturen gehören zur Familie der Süßgräser, wohingegen die Pseudocerealien krautige Pflanzen sind und unterschiedlicher Pflanzenfamilien angehören (Bundesinformationszentrum Landwirtschaft 2024). Warum Quinoa, Amarant und Co. als Pseudogetreide bezeichnet werden, liegt an der ähnlichen Verwendung der Samen wie Getreide (Industrieverband Agrar 2025). Streng eingegrenzt gehören die Hauptkulturen Quinoa, Amarant und Buchweizen zum Begriff Pseudogetreide (Alvarez-Jubete et al. 2010). Chia wird in einzelnen Quellen auch als Pseudogetreide benannt (Bundesinformationszentrum Landwirtschaft 2024). Die Begriffe Pseudogetreide, Pseudocerealien oder Pseudozerealien werden als Synonyme genutzt.

Diese ausgewählten Kulturen weisen höhere Inhaltsstoffe als Weizen, Reis oder Mais auf. Insbesondere überzeugen Quinoa, Amarant und Chia mit höheren Protein- und Fettgehalten im Vergleich zu den generellen Getreidearten. Neben der außergewöhnlich guten Zusammensetzung der Aminosäuren und Fettsäuren enthalten die Pseudogetreide eine Vielzahl von Vitaminen und anderen essentiellen Mineralien. Außerdem sind die Kulturen glutenfrei, was sie von den üblichen Getreidearten abhebt (Alvarez-Jubete et al. 2010; Bundesinformationszentrum Landwirtschaft 2024).

Ferner werden die Kulturen auch als Superfood bezeichnet (Bundesinformationszentrum Landwirtschaft 2024; Mordor Intelligence 2024). Der Superfood-Trend dauert bereits einige Jahre an, wodurch die Nachfrage steigt. Diese Produkte haben ernährungsphysiologisch wichtige Nähr- und Funktionswerte (Mordor Intelligence 2024).

2.1.1 Historie von Quinoa

Quinoa (*Chenopodium quinoa*) ist eine einjährige krautige Kulturpflanze aus der Familie der Gänsefußgewächse (*Chenopodiaceae*) und zählt zu den bedeutendsten Pseudogetreiden (Sosa-Zuniga et al. 2017). Die Pflanze wurde bereits vor 5000 bis 7000 Jahren im Andenhochland, insbesondere in Peru und Bolivien kultiviert, oftmals in Höhenlagen bis zu 4000 m ü. NN (Lim et al. 2020). Aufgrund ihrer hohen Nährstoffdichte war Quinoa ein zentrales Grundnahrungsmittel für die indigene Bevölkerung. Hervorzuheben sind der hohe Proteingehalt, die essentiellen Aminosäuren sowie eine Vielzahl von Vitaminen und Mineralstoffen (Jacobsen 2003; Gonzalez et al. 2012).

Mit der Kolonialisierung durch die europäischen Eroberer im 16. Jahrhundert wurde Quinoa gezielt unterdrückt. Das Verbot war Teil einer Strategie zur Schwächung der einheimischen Bevölkerung (Repo-Carrasco et al. 2003). Eine Renaissance erlebte Quinoa ab dem 20. Jahrhundert, als sie durch internationale Forschungsinitiativen wieder in das Blickfeld rückte. Erste Versuche zur Etablierung in Europa erfolgten in den 1970er Jahren (Galwey 1992). Mit dem von der FAO ausgerufen „Internationalen Jahr des Quinoa“ im Jahr 2013 wurde die Pflanze schließlich international als Beitrag zur globalen Ernährungssicherung gewürdigt (FAO 2013).

2.1.2 Agronomische Eigenschaften von Quinoa

Quinoa weist aufgrund ihrer Herkunft und ihrer großen Anzahl an Genotypen eine außergewöhnlich hohe morphologische und phänotypische Plastizität gegenüber abiotischen Faktoren wie Frost, Dürre oder hohen Salzgehalt im Boden auf (Sosa-Zuniga et al. 2017; Angeli et al. 2020). (Zambrano et al. 2019) schreiben, dass die Pflanze eine große Temperaturspanne von - 8 bis 38 °C sowie Jahresniederschläge zwischen 200 und 2600 mm toleriert. Dadurch wird sie als klimawandelanpassungsfähige Kulturpflanze eingestuft. Nach (Sosa-Zuniga et al. 2017) liegt die ideale Wachstumstemperatur zwischen 15 und 20 °C. Eine besondere agronomische Herausforderung stellt die hohe Sensitivität gegenüber der Tageslänge dar (Jacobsen 2003). Die meisten Quinoasorten sind kurztagsabhängig und benötigen weniger als 12 Stunden Tageslicht zur Blüteninduktion (Ribitsch et al. 2011). Bei einer Aussaat im Frühjahr sind für mitteleuropäische Standorte daher tagesneutrale Sorten notwendig, um eine rechtzeitige Reife zu gewährleisten. Als Folge einer zunehmenden Tageslänge verlängert sich die vegetative Phase. Dabei werden vermehrt Blätter gebildet und die Anthese wird verzögert (Ribitsch et al. 2011). Einzelne Quellen weisen darauf hin, dass sich die Kultur an

unterschiedliche Photoperioden anpassen kann (Jaikishun et al. 2019). Hauptsächlich werden in Europa tageslängen neutrale Sorten angebaut, die in Europa gezüchtet wurden (Jacobsen 2017).

In Abbildung 1 sind Quinoapflanzen unterschiedlicher Jahre und Entwicklungsstadien abgebildet, um den Phänotyp der Kultur näherzubringen.



Abbildung 1: Quinoapflanzen in unterschiedlichen Entwicklungsstadien (eigene Aufnahmen)

Quinoapflanzen können zwischen 0,3 – 3 m hoch werden (siehe Abbildung 1) und besitzen ein Pfahlwurzelsystem (Jaikishun et al. 2019). Die Kultur wird als standfest beschrieben (Bundesverband Quinoa e. V. 2023). Laut (Jacobsen 2003; Valeri et al. 2022) kommt es nach 160 bis 180 Tagen zur physiologische Samenreife. Der Erntezeitpunkt lässt sich jedoch nicht exakt bestimmen, da die Abreife ungleichmäßig erfolgt.

2.1.3 Inhaltsstoffe und Verwendung von Quinoa

Wie schon von indigenen Völkern erkannt, liefert Quinoa alle essentiellen Aminosäuren (AS), die der menschliche Körper benötigt (Jaikishun et al. 2019). Andere Autoren wie (Repo-Carrasco et al. 2003) heben ebenfalls die ausgewogene Aminosäuren-Zusammensetzung hervor. Glutaminsäure, Asparaginsäure und Arginin sind zahlreich enthaltene AS. Mit einem Protein gehalt von bis zu 15 % kann Quinoa mit den Hauptnahrungsträger Reis und Weizen mithalten (Gonzalez et al. 2012). Quinoa kann einen Ölgehalt von 5,0 bis 7,2 % in den Samen enthalten (Kozioł 1992; Ribitsch et al. 2011). 52 % des Fettes sind ungesättigte Fettsäuren, wie Omega-

9-, Omega-6- und Omega-3-Fettsäuren, welche eine bedeutende Rolle im menschlichen Körper einnehmen (Repo-Carrasco et al. 2003). Des Weiteren enthalten die Quinoasamen einen Stärkegehalt von 58,1 bis 64,2 % (Bruin 1964). Außerdem verfügen die Samen über eine beachtenswerte Menge an Vitaminen wie Vitamin C, A, B1, B2, B3, B5, B7, E sowie Folsäure und Carotin (Kozioł 1992). Die Schalen der Körner enthalten Saponine. Dieser Stoff bietet der Pflanze einen natürlichen Schutz vor Krankheitserregern, Schädlingen oder Insekten (Jacobsen 2017).

Da die Kultur kein Gluten beinhaltet, ist sie in der gegenwärtigen Zeit eine attraktive Alternative zu den üblichen Getreidearten bei Krankheiten wie Zöliakie (Jacobsen 2003). Wie in der Begriffserklärung von Pseudogetreide bereits erwähnt, werden die Kulturen ähnlich wie die nicht verwandten Getreidearten verarbeitet. Die Quinoasamen können als geschältes Getreide, Mehl, für Teigwaren, Kekse, Frühstückscerealien, Bier oder Nudeln verwendet werden (Jacobsen 2003; FAO 2013). Quinoastärke findet Anwendung als Füllstoff in der Kunststoffindustrie, als Staubpulver sowie Fließverbesserer bei der Verarbeitung von Stärkemehlprodukten (Jacobsen 2003). Der antinutritive Stoff Saponin muss vor dem menschlichen oder tierischen Verzehr durch verschiedene Methoden behandelt werden. Die Saponine können in der Herstellung von Reinigungs- oder Körperpflegeprodukten verwendet werden (Ribitsch et al. 2011). Ferner hat dieser Stoff das Potenzial in der Pharmaindustrie als Insektizid, Fungizid oder Antibiotikum verarbeitet zu werden (Jacobsen 2003). Quinoapflanzen haben ähnliche Pflanzenfasern wie Hanf oder Flachs. Mit einer geeigneten Isolationsmöglichkeit der Fasern würden Anwendungsmöglichkeiten in der Textilindustrie oder anderen Industriezweigen entstehen (Ribitsch et al. 2011).

Neben der Humanernährung können die Körner an Tiere verfüttert werden. Nach (Jacobsen et al. 1997) führt die Zufütterung von Quinoa zu Wachstumsdepression und verschlechterter Futterverwertung. Jedoch preisen die Autoren an, dass Quinoa als Futterkomponente mit maximal 150 g/kg zu einer positiven Nährstoffbilanz führt, ohne dabei die Leistung der Masthähnchen negativ zu beeinflussen. Die Blätter und Stängel können für wiederkauende Nutztiere bedenkenlos hinsichtlich des Saponins verwendet werden, jedoch sollte in diesem Bereich weiter geforscht werden (Angeli et al. 2020). Außerdem kann die Silage als Gärsubstrat in Biogasanlagen genutzt werden (Jacobsen 2003).

2.1.4 Historie von Amarant

Amarant (*Amaratus spp.*) ist eine einjährige dikotyle Pflanze und gehört zur Familie der Fuchsschwanzgewächse (*Amarantaceae*). In der Gattung *Amarantus* sind ca. 60 Arten inbegriffen, darunter jedoch nur eine begrenzte Anzahl an nützlichen Sorten, da die meisten als Unkraut gelten (Stallknecht und Schulz-Schaeffer 1993). Die Kultur kann durch zwei morphologische Typen unterschieden werden, die als roter und grüner Amarant beschrieben werden (Managa und Nemadodzi 2023). Das Wort *Amarantus* hat seine Herkunft von dem griechischem Wort „*Anthos*“ (Blume) und bedeutet so viel wie unvergänglich (Rastogi und Shukla 2013). Es wird angenommen, dass die Pflanze schon 6700 v. Chr. in Mittelamerika angebaut wurde (LTZ 2015; Assad et al. 2017). Bereits in der präkolumbianischen Zeit war sie ein bedeutendes Grundnahrungsmittel der Azteken, Maya und Inka. Die Körner wurden insbesondere bei religiösen Zeremonien verwendet. Mit der spanischen Eroberung im 16. Jahrhundert wurde der Anbau von Amarant verboten, da die Kolonialherren sowohl die Religion als auch die Kultur der indigenen Völker systematisch unterdrücken wollten (Assad et al. 2017; Bojórquez-Velázquez et al. 2018). Erst in den 1970er Jahren erlebte die Pflanze eine Wiederentdeckung im Rahmen einer verstärkten Suche nach alternativen und nährstoffreichen Kulturpflanzen.

2.1.5 Agronomische Eigenschaften von Amarant

Amarant ist eine C₄-Pflanze, was sie von anderen Pseudogetreidekulturen abhebt. Die C₄-Photosynthese ermöglicht eine besonders effiziente Licht- und Wasserausnutzung und begünstigt den Anbau unter hohen Temperaturen sowie in trockenen Regionen (Stallknecht und Schulz-Schaeffer 1993; LfL 2014). Typische C₄-Pflanzen bei denen die Eigenschaften bekannt sind, wären Mais und Hirse. Amarant zeigt sich äußerst anpassungsfähig gegenüber anspruchsvollen Umweltbedingungen und gedeiht auch in Höhenlagen bis zu 3000 m über dem Meeresspiegel. Durch die Kombination als C₄-Pflanze, einem starken Wurzelsystem und der langen Erhaltung der Blattfläche wird die Kultur als trockenheitstolerant bezeichnet (Liu und Stützel 2002; Assad et al. 2017; Bojórquez-Velázquez et al. 2018). Diese Eigenschaft wird durch das Welken der Blätter erzielt, wodurch die Transpiration unterbunden wird. Bei wieder-einsetzender Feuchtigkeit ermöglicht das eine rasche Regeneration der Pflanze (Liu und Stützel 2002). Die ideale Wachstumstemperatur liegt über 25 °C, wohingegen unter 18 °C das Wachstum bereits eingestellt wird (Das 2016). Analog zu Quinoa ist die Photoperiode bei Amarant ebenso von Bedeutung. Der Autor erläutert, dass es neben kurztagsbedingten Amarantsorten auch tagesneutrale Sorten gibt. Diese tagesneutralen Sorten sind für den Anbau in Mitteleuropa geeignet. Amarant ist empfindlich gegenüber Frost (Stallknecht und Schulz-

Schaeffer 1993). Je nach Standort benötigt die Pflanze 100 bis 150 Tage bis zur physiologischen Kornreife (LTZ 2015).

Wie in Abbildung 2 zu erkennen, werden die Samenköpfe größer als bekannte Ähren oder Kolben. Aus den Blütenständen können sich bis zu 50.000 Körner je Pflanze entwickeln (LTZ 2015).



Abbildung 2: Samenkopf von Amaranth während der Blüte (eigene Aufnahme)

2.1.6 Inhaltsstoffe von Amaranth

Der Proteingehalt von Amarantkörnern kann zwischen 12 und 18 % betragen (Pospišil et al. 2006; Caselato-Sousa und Amaya-Farfán 2012; Assad et al. 2017). Außerdem enthalten die Samen zwischen 5,7 und 8,1 % Öl (Bojórquez-Velázquez et al. 2018). Sowohl die Samen als auch die Blätter weisen ungesättigte Fettsäuren wie Öl-, Linol- und Linolensäure auf. Der Anteil der ungesättigten Fettsäuren beträgt laut (Lorenz und Hwang 1985) 74 % des Gesamtölgehalts. Die Blätter der Pflanze haben 4 bis 6 % Protein, 0,2 bis 0,6 % Fett und 4 bis 7 % Kohlenhydrate. Geschmacklich werden die Blätter ähnlich wie Spinat beschrieben. Die Verarbeitung der Blätter läuft vergleichbar mit Spinat ab (Stallknecht und Schulz-Schaeffer 1993; Assad et al. 2017).

Aus der Geschichte geht hervor, dass jegliche Amarantrassen primär medizinische Anwendung fanden. Den Blättern wird eine heilende Wirkung bei Husten und Erkältung zugeschrieben. Zudem sollen sie bei Hautverletzungen, Magenbeschwerden und Lungenproblemen hilfreich

sein (Rastogi und Shukla 2013). Amarant wird aufgrund der Proteinzusammensetzung eine blutdrucksenkende Wirkung nachgesagt (Bojórquez-Velázquez et al. 2018).

Die Körner der Pflanze können gemahlen und als Mehlzutat für beispielsweise Kekse, Brot oder Nudeln verwendet werden. Da Amarant glutenfrei ist und somit die Klebereiweiße fehlen, eignet sich das Mehl nur begrenzt zum Backen (Gélinas und Seguin 2008; LTZ 2015). Aus diesem Grund wird das Amarantmehl mit Mehlen anderer Kulturen vermischt. Ferner können die Samen gepufft oder getoastet konsumiert werden. In der Lebensmittelindustrie ist häufig die qualitative Aufwertung von Produkten mithilfe der hohen Proteinkonzentration und günstigen Aminosäurezusammensetzung das Ziel (Pospišil et al. 2006). Die in Amarantkörnern enthaltene Stärke wird zur Spirituosenherstellung genutzt (Bhattarai 2019). Das Öl der Samen enthält ein Antioxidans namens Squalen. Antioxidantien schützen die Haut vor Alterung, da es Zellschäden verhindert (Joshi et al. 2018). In Amarant sind 7 bis 11 % Squalen nachzuweisen, welche in der Kosmetik und Medizin Verwendung finden. Olivenöl enthält vergleichsweise nur 1 % Squalen (Bhattarai 2019).

Neben der Körnernutzung kann die Ganzpflanze in Form von Silage als Gärsubstrat in Biogasanlagen verwendet werden. Untersuchungen der (LfL 2014) zeigen, dass Amarantpflanzen einen elffachen Kobaltgehalt im Vergleich zu Mais enthalten. Das beeinflusst den Gärprozess positiv und steigert die Methanausbeute in Biogasanlagen. Der Trockenmasseertrag liegt mit 9 t/ha allerdings unter dem von Mais (LfL 2014).

2.1.7 Historie von Chia

Chia (*Salvia hispanica L.*) ist eine einjährige Kultur aus der Familie der Lippenblütler (*Lamiaceae*), der Gattung Salbei (*Salvia*). Laut Forschungen haben die Azteken und Maya die Pflanze bereits 3500 v. Chr. in der Region von Guatemala und Mexico kultiviert (Ayerza und Coates 2005). Die indigenen Völker erkannten die Relevanz der Kultur und verwendeten die Samen als Grundnahrungsmittel, für Medikamente und Malerei (Muñoz et al. 2013). Außerdem benennen die Autoren, dass Chia zu der Zeit in religiösen Zeremonien eine Opfergabe an die Götter war. Das Wort „Chia“ stammt von einer spanischen Adaption von Chian, was „ölig“ bedeutet und aus der Sprache der Azteken stammt (Muñoz et al. 2013). Die Samen sind reich an Protein, Öl und ein- bzw. mehrfach ungesättigten Fettsäuren (Ayerza und Coates 2011). Wie viele Kulturpflanzen der indigenen Völker wurde Chia durch die spanische Eroberung verboten und durch europäische Getreidearten ersetzt (Ayerza und Coates 2005). Im 21. Jahrhundert erlebte Chia eine Wiederentdeckung, was maßgeblich am züchterischen Fortschritt

lag. Infolgedessen gewann Chia außerhalb ihrer ursprünglichen Verbreitung zunehmend an Bedeutung (Bochicchio et al. 2015).

2.1.8 Agronomische Eigenschaften von Chia

Chia stammt aus tropischer und subtropischer Umgebung auf Höhenlagen von 400 bis 2500 m ü. NN. Wachstum findet ab Temperaturen von 11 bis 36 °C statt, wohingegen die optimale Wachstumstemperatur im Bereich von 16 bis 26 °C liegt (Ayerza und Coates 2009a). Die Photoperiode ist der Umweltfaktor mit dem meisten Einfluss auf die Blütenentwicklung (Grimes et al. 2019). Dadurch benötigt die Kurztagspflanze Tageslängen von weniger als 12 Stunden, um in die Blütenbildung zu gelangen (Baginsky et al. 2016). Neue Züchtungen von Sorten eignen sich auch für mitteleuropäische Standorte mit Tageslängen von mehr als 12 Stunden (Jambpoonsri et al. 2012). Abbildung 3 zeigt den Phänotyp von Chia kurz vor der Blüte.



Abbildung 3: Chiabestand kurz vor der Blüte (eigene Aufnahme)

Chiapflanzen werden 1,0 bis 1,8 m hoch. Des Weiteren ist die Kultur frostempfindlich und wärmeeliebend (Top Agrar 2024). Laut (Grimes et al. 2018) sind die Samen nach 127 bis 170 Tagen nach der Aussaat erntereif.

2.1.9 Inhaltsstoffe und Verwendung von Chia

Die Azteken und Maya erkannten das Potenzial von Chia und nutzten die Kultur als Grundnahrungsmittel. Nach (Amato et al. 2015) kann Chia einen Proteingehalte von 17,0 bis 25,0 % enthalten. Laut den Autoren (Ayerza und Coates 2011) soll der Proteingehalt mit steigender Temperatur abnehmen, was (Grimes et al. 2018) bestätigen. Wie der Ursprung des Wortes Chia schon andeutet, haben Chiasamen Ölgehalte von 29,4 bis 33,4 % (Grimes et al. 2018). Das hängt unter anderem vom Herkunftsgebiet der Samen, den klimatischen Bedingungen und der Extraktionsmethode ab (Ayerza und Coates 2009a). Laut (Busilacchi et al. 2013) sind durch die Forschung Ölgehalte von bis zu 40 % möglich. Nach (Baginsky et al. 2016) steigt der Ölgehalt mit zunehmender Anbauhöhe an. Zudem beeinflusst die Temperatur die im Öl enthaltenen Fettsäuren. Eine Erhöhung der Temperatur während der Kornentwicklung führt zu einer verringerten Produktion von mehrfach ungesättigten Fettsäuren. Daraus ist zu schließen, dass die Umwelt den Ölgehalt und die Öl Zusammensetzung verändert.

Das Chiaöl überzeugt mit einem hohen Gehalt an mehrfach ungesättigten Fettsäuren. Hauptsächlich ist es die α-Linolensäure (C18:3), welche laut (Amato et al. 2015) die ernährungsphysiologisch wichtigste ω-3-Quelle darstellt. Omega-3-Fettsäuren kann der menschliche Organismus nicht synthetisieren und müssen daher über die Nahrung aufgenommen werden (Grimes et al. 2018). Demnach ist das ω6:ω3-Verhältnis wichtig, da bei einem idealen Verhältnis von 1:1 die Möglichkeit besteht, Adipositas und koronare Herzkrankheiten vorzubeugen und zu behandeln (Ayerza und Coates 2005; Simopoulos 2006). Zu der Omega-6-Fettsäure zählt die Linolsäure. Nach (Grimes et al. 2018) passt Chia vorzüglich in die aktuelle Ernährungssituation, denn in der westlichen modernen Ernährung dominieren die ω6-Fettsäuren. Chia könnte zu einer ausgewogenen Fettsäureaufnahme beitragen, sodass ein ω6:ω3-Verhältnis von 10 bzw. 20:1 auf 5 bzw. 3:1 gesenkt wird.

Chia wird häufig für Müsli-Mischungen, Müsliriegel oder zur Dekorierung von Muffins, Kuchen oder Kekse genutzt. Eingeweichte Samen werden als Ei- oder Puddingersatz verzehrt. Aufgrund des hohen Ölgehalts bietet die Speiseölherstellung eine weitere Nutzungsmöglichkeit. Chiasprossen erweitern die Verzehrmöglichkeiten (Top Agrar 2024).

Neben Öl- und Proteingehalt ist ein weiteres Qualitätsmerkmal der Schleimgehalt. Dieser Schleim entsteht durch die Polysaccharide, die in der Samenschale enthalten sind. Bei Kontakt mit Wasser bilden die Polysaccharide eine schleimige Kapsel um den Samen, welcher extrahiert werden kann. In der Lebensmittelindustrie wird dieser Schleim als Verdickungsmittel, Emulgator, Klebstoff oder Bindemittel genutzt (Muñoz et al. 2013). (Grimes et al. 2019) nennen

Schleimgehalte von 10,20 bis 13,74 %. Der Schleimgehalt wurde bei erhöhter Düngung niedriger. Je höher der Schleimgehalt ist, desto mehr Ausbeute ist zu erwarten.

(Sharifi-Rad et al. 2018) berichten, dass die Pflanzengattung Silvia bekannt für ihre enthaltene ätherischen Öle ist. Da Chia dieser Gattung angehört, werden die ätherischen Öle der Blätter und Stängel in der Pharma- und Kosmetikindustrie verwendet (Future Market Insights 2023).

Zusätzlich können Chiasamen für tierische Futtermittel eingesetzt werden. Die ungesättigten Fettsäuren kommen ebenfalls den Tieren zugute. Somit wurde Chia in der Geflügelfütterung zur Ei- und Fleischproduktion verwendet (Ayerza und Coates 2001). Die Eigewichte haben sich durch die Zufütterung von Chia nicht verändert, jedoch stieg der Gesamtanteil der ω -3-Fettsäure im Eigelb an. Geschmacklich habe sich laut den Autoren nichts verändert. Außerdem erläutern sie, dass mit der Zugabe von Chia oder Leinsamen, wobei beide Samen reich an Omega-3-Fettsäure sind, zu geringeren Körpergewichten der Masthähnchen aber höheren Fettsäurequalität im Fleisch führt. Ferner kann über die Fütterung von Chia in der Milchproduktion bei Kühen berichtet werden (Ayerza und Coates 2006). Die Milchmenge wurde durch Chiazusatz im Futter nicht gesteigert, jedoch konnte der Omega-3-Fettsäuregehalt in der Milch gesteigert werden. Weiterhin wird von (Coates und Ayerza 2009) berichtet, dass bei der Mastschweinfütterung durch die Zugabe von 10 bzw. 20 % Chia die gesättigten Fettsäuren signifikant reduziert wurden. Dabei stieg der Gehalt der essentiellen ω -3-Fettsäure signifikant an. Auf das Körpergewicht, Gewichtszunahme und Futterverwertung hatten die Chiasamen keinen negativen Einfluss. Nach Geschmacksprobenbewertung hat das Fleisch mit Chiafütterung aromatisch und geschmacklich besser abgeschnitten als die Kontrollgruppe.

2.2 Bedeutung von Stickstoff in der Pflanzenernährung

2.2.1 Funktion von Stickstoff in der Pflanze

Stickstoff (N) gehört zu den wichtigsten mineralischen Pflanzennährstoffen. Nach Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff ist N das quantitativ bedeutendste Element in der pflanzlichen Trockenmasse und spielt eine zentrale Rolle im Wachstum und in der Ertragsbildung von Kulturpflanzen. Demnach zählt Stickstoff zu der Gruppe der Makronährstoffe in der Pflanzenernährung (Schubert 2018). Makronährstoffe sind essentielle Bausteine im Stoffwechsel der Pflanzen. Die Verfügbarkeit dieser Nährstoffe, insbesondere Stickstoff, bestimmen regelrecht die Ertragsleistung von Pflanzenbeständen (Schubert 2018). Deshalb wird Stickstoff als „Hauptmotor der Pflanzenproduktion“ bezeichnet (Finck 1992).

Stickstoff übernimmt eine Schlüsselrolle bei der Zellteilung und Biomasseproduktion. Als bedeutendes Makromolekül ist Stickstoff an der Chlorophyllsynthese beteiligt. Chlorophyll ist in der Pflanze notwendig um Photosynthese zu betreiben (Libbert 1973; Schubert 2018; Estela 2025). Zusätzlich ist N ein elementarer Bestandteil vieler Enzyme und somit für die Aminosäure- und Proteinproduktion essentiell. Dabei wird Stickstoff in Struktur-, Enzym- und Speicherproteine eingebaut (Schilling 2000; Bruckner und Mack 2025). Diese Speicherproteine befinden sich vor allem in den Samen der Pflanzen und lassen sich letztendlich im Erntegut messen. Eine Stickstoffzugabe führt meist zu stärkerem vegetativen Wachstum, was durch größerer Blattfläche und höherer Biomasse führt. Des Weiteren kann dadurch die Ertragsleistung gesteigert werden (Dong et al. 2022). Außerdem kann Stickstoff die Blatt- und Pflanzensesenz verzögern, wodurch es zu einer verlängerten Vegetationszeit und einer späteren Reife kommt (Schubert 2018; Lu et al. 2024).

2.2.2 Stickstoffaufnahmewege der Pflanze

Damit Pflanzen Nährstoffe aus dem Boden aufnehmen können, kommt es zu Interaktionen zwischen den Pflanzenwurzeln und dem Boden. Dies geschieht auf drei unterschiedlichen Wegen: Interzeption, Massenfluss und Diffusion.

Bei der Interzeption wächst die Wurzel aktiv zum Nährstoff hin und kommt in direkten Kontakt mit diesem. Dabei ist das Volumen, das die Wurzel durch ihr Wachstum im Vergleich zum gesamten Bodenvolumen erschließt, relativ gering. Jedoch wird durch die Interzeption nur ein geringer Teil der Nährstoffe zur Wurzel transportiert (Schilling 2000; Schubert 2018).

Der Massenfluss beschreibt den Transport von Nährstoffen mit dem Wasserstrom zur Wurzel. Er ergibt sich aus der Menge an Wasser, die infolge der Transpiration der Pflanze zur Wurzel transportiert wird, multipliziert mit der Konzentration der gelösten Nährstoffe in diesem Wasser. Demzufolge gelangen Nährstoffe, die in hoher Konzentration in der Bodenlösung vorliegen, verstärkt zur Wurzeloberfläche. Je höher die Transpiration der Pflanze ist, desto stärker ist der Nährstofftransport zur Wurzel. Da jedoch nicht alle antransportierten Nährstoffe zwingend aufgenommen werden, kann es in der Rhizosphäre zu einer Anreicherung von Nährstoffen kommen. Mit dem Massenfluss werden z.B. Calcium, Magnesium und teilweise Nitrat transportiert (Schilling 2000; Schubert 2018).

Der dritte Weg ist die Diffusion, bei der die Nährstoffe zur Wurzeloberfläche gelangen, die nur in geringer Konzentration in der Bodenlösung vorliegen. Dabei handelt es sich um die Bewegung von Ionen entlang eines Konzentrationsgefälles. Hierbei diffundieren die Ionen von

Bereichen mit höherer Konzentration in Richtung der Wurzel, wo eine niedrige Konzentration vorliegt. Das beruht auf der Brownschen Bewegung der Ionen, wodurch die Bodenlösung einen Konzentrationsausgleich anstrebt. Die Geschwindigkeit der Diffusion wird zum einen durch das Niveau der verfügbaren Nährstoffe im Boden, das den Konzentrationsgradienten beeinflusst, und zum anderen durch den Abstand der Nährstoffionen zur Wurzel bestimmt. Eine intensive Durchwurzelung verringert den mittleren Abstand und begünstigt damit den Diffusionstransport. Nährstoffe in Form von Ammonium, Phosphat und Kalium gelangen durch Diffusion zur Wurzelloberfläche (Schilling 2000; Schubert 2018).

2.2.3 Stickstoffformen im Ackerbau

Stickstoff liegt im Boden und in Düngemitteln in verschiedenen chemischen Formen vor, die sich hinsichtlich ihrer Mobilität, Verfügbarkeit, Aufnahme und Wirkung deutlich unterscheiden. Die drei grundlegenden Stickstoffformen sind Nitrat (NO_3^-), Ammonium (NH_4^+) und Harnstoff ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) (Schilling 2000; Schubert 2018).

Nitrat kann aufgrund der hohen Mobilität in der Bodenlösung schnell zur Wurzel transportiert werden. Gleichzeitig ist NO_3^- aus diesem Grund stark auswaschungsgefährdet. In der Pflanze wird Nitrat zunächst reduziert. Über die Nitratreduktase entsteht Nitrit (NO_2^-), welches anschließend durch die Nitritreduktase zu Ammonium (NH_4^+) umgesetzt wird. Erst in dieser reduzierten Form kann Stickstoff in Aminosäuren und Proteine eingebaut werden. Physiologisch führt die Nitraternährung zu einer alkalischen Wirkung in der Rhizosphäre, da bei der Aufnahme und Reduktion Protonen verbraucht werden (Schilling 2000; Schubert 2018).

Ammonium ist im Gegensatz zu Nitrat im Boden weniger beweglich, da es als Kation stärker an Tonminerale und organische Substanz gebunden wird. Dadurch ist es weniger auswaschungsgefährdet. Pflanzen assimilieren Ammonium unmittelbar über Enzyme in Aminosäuren, sodass keine Reduktionsschritte notwendig sind. Allerdings kann eine hohe Ammoniumkonzentration im Boden für Pflanzen toxisch wirken, weshalb eine Balance zwischen NH_4^+ - und NO_3^- -Versorgung günstig ist. Die Ammoniumernährung verursacht eine physiologisch saure Wirkung in der Rhizosphäre, da bei der Aufnahme Protonen in den Boden abgegeben werden (Schilling 2000; Schubert 2018).

Harnstoff durchläuft im Boden eine hydrolytische Spaltung durch das Enzym Urease, bei der Ammonium entsteht. Diese Umsetzung ist temperaturabhängig und verläuft im Vergleich zu Nitrat langsamer, weshalb Harnstoff als langsam wirkender Stickstoffdünger gilt. Durch den Zusatz von Urease-Inhibitoren kann die Umsetzung gezielt verzögert und Stickstoffverluste

reduziert werden. Harnstoff wird von den Wurzeln im Vergleich zu den anderen Stickstoffformen weniger effizient aufgenommen. Dagegen zeigt dieser bei einer Blattapplikation eine schnelle Wirkung, da er direkt über das Blattgewebe aufgenommen werden kann (Schilling 2000; Schubert 2018).

Neben der gezielten mineralischen N-Düngung befindet sich permanent mineralischer Stickstoff im Boden. Dieser wird als N_{min} bezeichnet und besteht aus den Stickstoffformen Nitrat und Ammonium. Die Bezeichnung des mineralischen Stickstoffs entspringt aus der mikrobiellen Mineralisation organischer Substanz, bei der durch Abbauprozesse stickstoffhaltige Verbindungen zum Teil in pflanzenverfügbarer Form freigesetzt werden. Zunächst entsteht Ammonium durch die Ammonifikation, was anschließend durch Nitrifikation in Nitrat überführt werden kann. Die Freisetzung von mineralischem Stickstoff ist stark abhängig von bodenphysikalischen und -chemischen Bedingungen. Als wesentliche Einflussfaktoren auf die Geschwindigkeit der Stickstoffmineralisierung gelten die Bodentemperatur, der Wassergehalt sowie der pH-Wert. Kalte und trockene Bedingungen sowie pH-Werte außerhalb von 6-7 hemmen die Mineralisation. Der N_{min} -Gehalt wird zu Beginn der Vegetationsperiode durch Bodenproben bestimmt, in denen der Nitrat- und Ammoniumstickstoff analysiert wird. Die Bodenprobenentnahme erfolgt auf definierten Tiefen (0-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm) (Schubert 2018).

2.3 Stand von durchgeführten Untersuchungen

2.3.1 Quinoa

In Saudi-Arabien (Al-Hassa-Gebiet) wurde in den Jahren 2016 und 2017 von (Almadini et al. 2019) ein Stickstoffdüngerversuch mit 0 kg N/ha, 80 kg N/ha und 160 kg N/ha bei einer Bestandessdichte von 30 Pflanzen/m² durchgeführt. Die 80 kg N/ha wurden in zwei gleichen Gaben und 160 kg N/ha in drei gleichen Gaben in Form von Harnstoffdünger (49 % N) ausgebracht. Dabei wurde jeweils die erste Gabe 20 Tage, die zweite 40 Tage und die dritte 60 Tage nach der Saat appliziert. Erfasst wurden morphologische und physiologische Parameter wie Pflanzenhöhe, Blattfläche, Stängeldurchmesser, Biomasse, Chlorophyllgehalt (SPAD-Werte) sowie Ertragskomponenten (Kornanzahl und Korngewicht pro Pflanze, TKG, Körnertrag pro Hektar). Darüber hinaus wurden die Inhaltsstoffe Protein, Stärke, Fett und Asche in den Körnern analysiert.

(Almadini et al. 2019) empfehlen, für ökonomische und ökologische Bedingungen insbesondere mittlere Stickstoffgaben (80 kg N/ha) in Betracht zu ziehen, da diese zwar geringere Gesamterträge, jedoch eine höhere Stickstoffeffizienz gewährleisten.

Von (Präger et al. 2018) wurde in Südwestdeutschland an der Universität Hohenheim im Jahr 2015 und 2016 ein Quinoa-Sortenversuch mit vier europäischen Sorten (Puno, Titicaca, Jessie und Zeno) durchgeführt. Hierbei sollten die Sorten auf Anbauwürdigkeit hinsichtlich der Photoperiode in Süddeutschland untersucht werden. Die Stickstoffdüngung wurde auf 80 kg N/ha und 100 kg N/ha mit Abzug von N_{min} festgelegt. Als Dünger wurde Calciumammoniumnitrat (27 % N) in zwei gleichen Gaben gedüngt. Die erste Gabe erfolgte zur Aussaat und die zweite vier Wochen nach Feldaufgang. Die Aussaatstärke lag bei 230 Kö/m² und wurde in beiden Jahren am 29.04. durchgeführt. Erfasst wurden Ertragseigenschaften (Kornertrag, Tausendkornge wicht), Inhaltsstoffe (Protein, Aminosäuren, Rohfett, Fettsäuren, Saponine) sowie Stickstoff gehalte in Samen und Boden. Die vorliegende Bodenart ist lehmiger Tonboden.

Die Zweijahresmittelwerte des Kornertrages von (Präger et al. 2018) zeigen, dass Zeno mit 2,43 Mg/ha (t/ha) signifikant mehr Ertrag als die restlichen Sorten mit ca. 1,73 t/ha bis 1,98 t/ha produzierte. Des Weiteren bildete die Sorte Zeno bei dem TKG die Spitze mit 2,5 g (2015) bzw. 3,4 g (2016). Neben dem Ertrag nahm auch das TKG von Zeno zu den Sorten Titicaca, Jessie und Puno auf bis zu 1,4 g ab. Der Proteingehalt von Jessie stach 2015 stark hervor mit 16,1 % und der schwächste Gehalt von Zeno mit 12,0 %. Im Jahr 2016 schwankten die Proteingehalte lediglich von 12,1 % (Zeno) bis 12,5 % Jessie und Puno. (Präger et al. 2018) beschreiben Zeno als beste standortangepasste Sorte für die Anbauregion, da dieser das größte Ertragspotenzial bei jedoch nicht bester Proteinqualität liefert.

1994 und 1995 haben (Schulte auf'm Erley et al. 2005) die Stickstoffnutzungseffizienz und Ertragsreaktion von Amarant, Quinoa und Buchweizen auf unterschiedliche Stickstoffgaben untersucht. Der Versuch wurde an der Universität Hohenheim in Deutschland auf lehmigen Tonboden durchgeführt. Als N-Düngung bei Quinoa waren die Stufen 0, 80 und 120 kg/ha vorgesehen, wobei 80 kg N/ha in den gedüngten Varianten zum 4- bis 6-Blatt-Stadium und bei der höchsten Düngestufe zusätzlich 40 kg N/ha zur Blüte gedüngt wurde. Die Düngung erfolgte mit Kalkammonsalpeter (27 % N). Die Saatstärke lag bei 30 Pflanzen je Quadratmeter. Als Resümee empfehlen die Autoren eine N-Düngung von 120 kg/ha.

In den Jahren 2013 und 2014 hat (Geren 2015) in Bornova (Türkei) mit Quinoa N-Düngerversuche durchgeführt. Dabei wurden die Stickstoffstufen auf 0, 50, 75, 100, 125, 150, 175 kg N/ha festgelegt. 50 % der Düngung erfolgte mit Harnstoff vor der Saat und die anderen 50 % mit Ammoniumnitrat im 7- bis 10-Blatt-Stadium. Außerdem wurden die Versuche auf schluffigen Ton-Lehm Boden und unter Bewässerung durchgeführt. Ziel war es unter mediterranen Klimabedingungen den höchsten Kornertrag und die beste Qualität (Proteingehalt und TKG) von Quinoa zu erzielen. Der Autor empfiehlt in seinem Fazit eine Düngung von 150 kg N/ha für einen maximalen Ertrag und hohem Proteingehalt.

In Abbildung 4, Abbildung 5 und Abbildung 6 sind einzelne Messwerte sowie teilweise Mittelwerte aus den obigen durchgeföhrten Untersuchungen visualisiert, um einen klaren Überblick über die Ergebnisse der Versuche zu erhalten. Diese Abbildungen dienen zur besseren Einordnung der Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung in die Literatur.

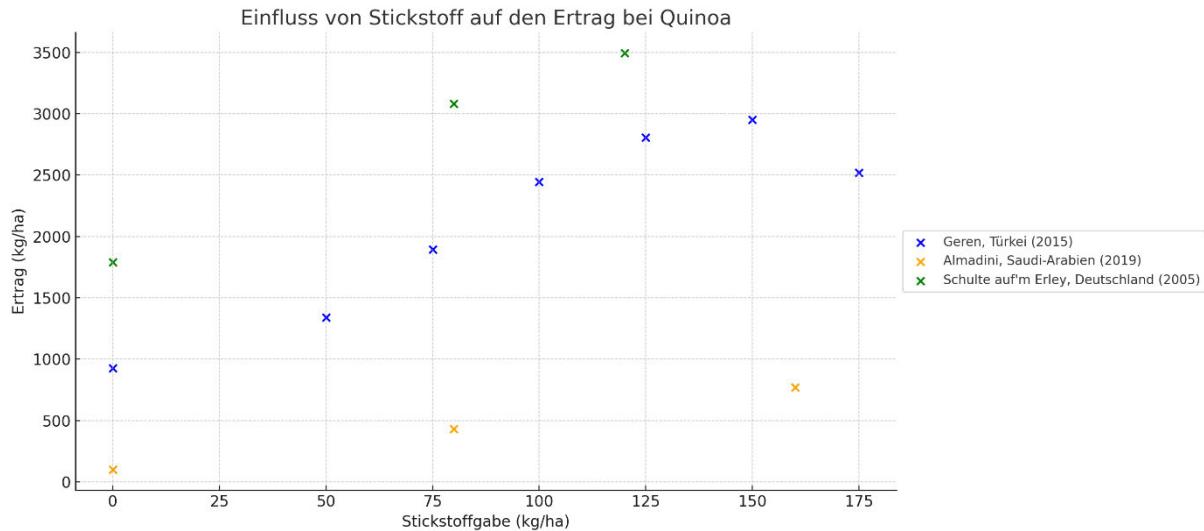


Abbildung 4: Einfluss von Stickstoff auf den Quinoaeertrag aus durchgeföhrten Untersuchungen von (Schulte auf'm Erley et al. 2005; Geren 2015; Almadini et al. 2019) (eigene Darstellung)

Die drei ausgewerteten Studien in Abbildung 4 zeigen übereinstimmend, dass Stickstoffdüngung einen deutlichen Einfluss auf den Körnertrag von Quinoa hat. In allen Untersuchungen stieg der Ertrag mit zunehmender Stickstoffgabe an, jedoch in unterschiedlichem Ausmaß. Das könnte auf regionale Bedingungen sowie verschiedene Versuchsdurchführungen und Standortfaktoren zurückzuföhren sein. In der Türkei stieg der Ertrag mit zunehmender Stickstoffdüngung kontinuierlich an und erreichte bei 150 kg N/ha das Maximum mit etwa 2953 kg/ha. Bei einer weiteren Erhöhung auf 175 kg N/ha fiel der Ertrag leicht ab (Geren 2015). Die Ergebnisse von (Almadini et al. 2019) aus Saudi-Arabien zeigen zwar den gleichen positiven Trend, jedoch auf deutlich niedrigerem Ertragsniveau. Der Ertrag stieg von 101 kg/ha (0 kg N/ha) auf etwa 770 kg/ha bei 160 kg N/ha. Die höchsten Erträge wurden von (Schulte auf'm Erley et al. 2005) in Deutschland erzielt. Bereits bei 80 kg N/ha lag der Ertrag bei 3083 kg/ha, bei 120 kg N/ha sogar bei 3495 kg/ha. Auch die gewählte Sorte „Faro“ zeigte offenbar ein hohes Ertragspotenzial unter den Bedingungen Mitteleuropas.

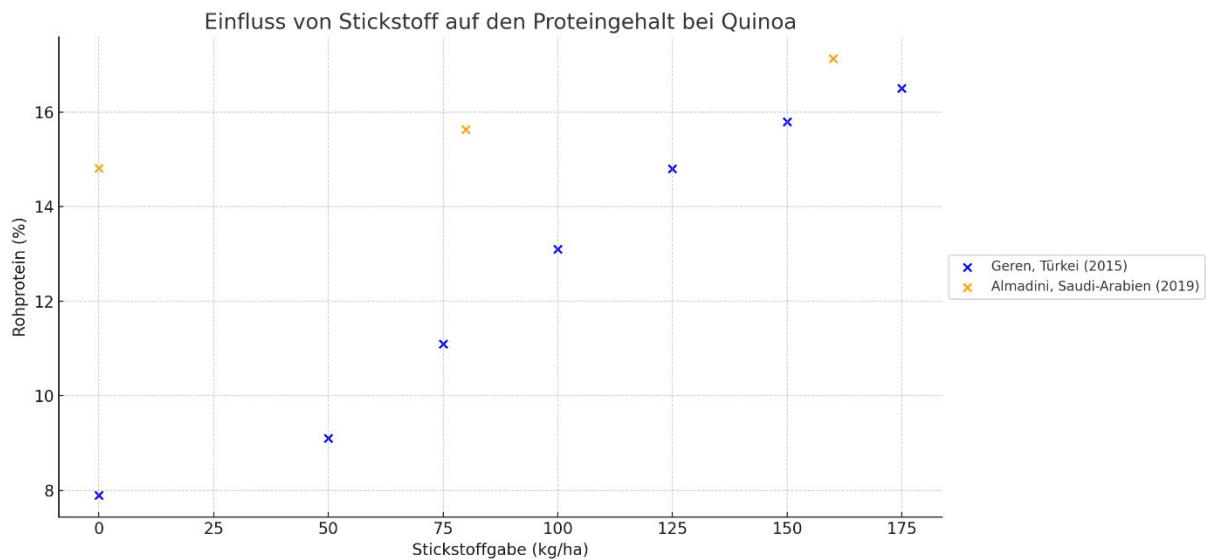


Abbildung 5: Einfluss von Stickstoff auf den Proteingehalt von Quinoa bei durchgeföhrten Untersuchungen von (Geren 2015; Almadini et al. 2019) (eigene Darstellung)

Abbildung 5 zeigt, dass in den Studien von (Geren 2015; Almadini et al. 2019) mit zunehmender N-Düngung der Proteingehalt stieg. In den Kontrollvarianten war eine enorme Differenz zwischen den Studien, jedoch gleichen sich die Werte bei erhöhtem N-Einsatz an. Es war kein Einbruch bei erhöhter Düngung zu verzeichnen. In der Kontrollvariante von (Geren 2015) lag der Proteingehalt bei 7,9 % und stieg bei 175 kg N/a auf 16,5 % an. Der Proteinanstieg flachte mit jeder Erhöhung der N-Gabe etwas ab. In der Studie von (Almadini et al. 2019) lag der Proteingehalt in der unbehandelten Variante bei 14,8 % und stieg bei der höchsten Düngestufe mit 160 kg N/ha auf 17,1 % an. Es ist ein flacherer Anstieg des Proteingehalts als in der anderen Studie zu erkennen.

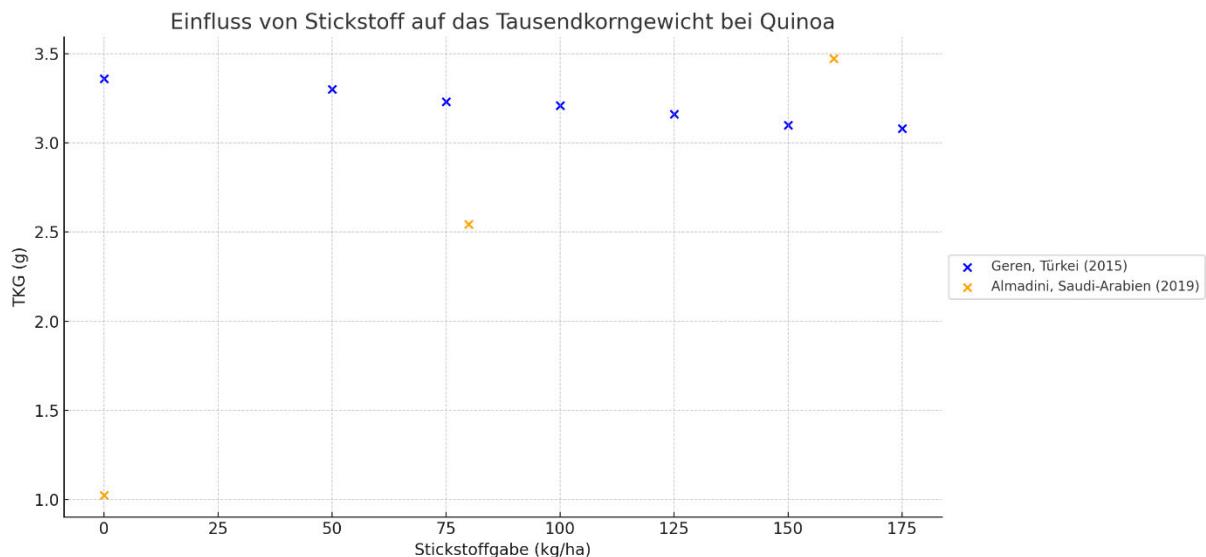


Abbildung 6: Einfluss von Stickstoff auf das Tausendkorngewicht bei Quinoa von durchgeföhrten Untersuchungen von (Geren 2015; Almadini et al. 2019) (eigene Darstellung)

Abbildung 6 zeigt gegenläufige Trends zwischen den Untersuchungen von (Geren 2015; Almadini et al. 2019), worin der Effekt von der N-Düngung auf das TKG visualisiert wird. Bei (Geren 2015) lässt sich eine leichte Abnahme des TKGs von 3,36 g in der Kontrollvariante auf 3,08 g in der höchsten Düngestufe beobachten. Im Gegensatz dazu zeigte sich bei (Almadini et al. 2019) ein deutlich positiver Einfluss der Stickstoffgabe auf das Tausendkorgewicht. Bei 0 kg N/ha lag das TKG bei nur 1,03 g, stieg jedoch mit zunehmender Stickstoffgabe stark an und erreichte bei 160 kg N/ha einen Maximalwert von 3,47 g.

2.3.2 Amaranth

(Pospišil et al. 2006) führten in den Jahren 2002 bis 2004 einen Amarantsorten- sowie einen Stickstoffdüngerversuch in Zagreb (Kroatien) durch. In dem Versuch wurden zwei Sorten (G6 und 1008) und N-Düngemengen von 0 kg N/ha, 50 kg N/ha und 100 kg N/ha in Form von Ammoniumnitrat (27 % N) untersucht. Zur Ernte betrug die Bestandesdichte 40 Pflanzen/m². Ziel war es den Einfluss der N-Düngung auf den Samenertrag, die Konzentration des Samenproteins, das TKG, den Trockensubstanzgehalt in der Blüte, die Pflanzenhöhe und die Länge des Blütenstandes bei zwei Amarantarten zu bestimmen. Nach dem Ergebnis raten die Autoren zu einer ausbleibenden Düngung auf guten Böden und günstigen klimatischen Jahren. Ein Kompromiss von (Pospišil et al. 2006) wäre 50 kg N/ha.

In den Jahren 1994 und 1995 haben (Schulte auf'm Erley et al. 2005) mit Amaranth den gleichen Versuch durchgeführt wie mit Quinoa. Auch da wurde bei der höchsten Düngestufe von 120 kg N/ha der höchste Ertrag festgestellt.

1991 und 1992 hat (Myers 1998) in Missouri, USA einen Stickstoffdüngerversuch an Amarant durchgeführt. Es wurde der Körnertrag, der Proteingehalt, das TKG und die Pflanzendichte sowie -höhe erhoben. Die N-Düngestufen wurden auf 0, 45, 90, 135 und 180 kg N/ha festgelegt. Als Dünger wurde Ammoniumnitrat vor der Saat appliziert. Die effektivste Düngestufe war bei 90 kg N/ha. Der Autor empfiehlt daher eine N-Düngung in Höhe von 90 kg/ha. Außerdem wurde beobachtet, dass in den Varianten mit höherer N-Gabe, die Kornfeuchte zur Ernte höher war.

Analog zu Quinoa sind Abbildung 7 und Abbildung 8 zur Visualisierung der Daten von den durchgeföhrten Studien von Amarant abgebildet. Diese Abbildungen enthalten Messwerte sowie teilweise Mittelwerte und dienen zur Einordnung in die Literatur, welchen Einfluss Stickstoff auf die zu untersuchenden Parameter hat.

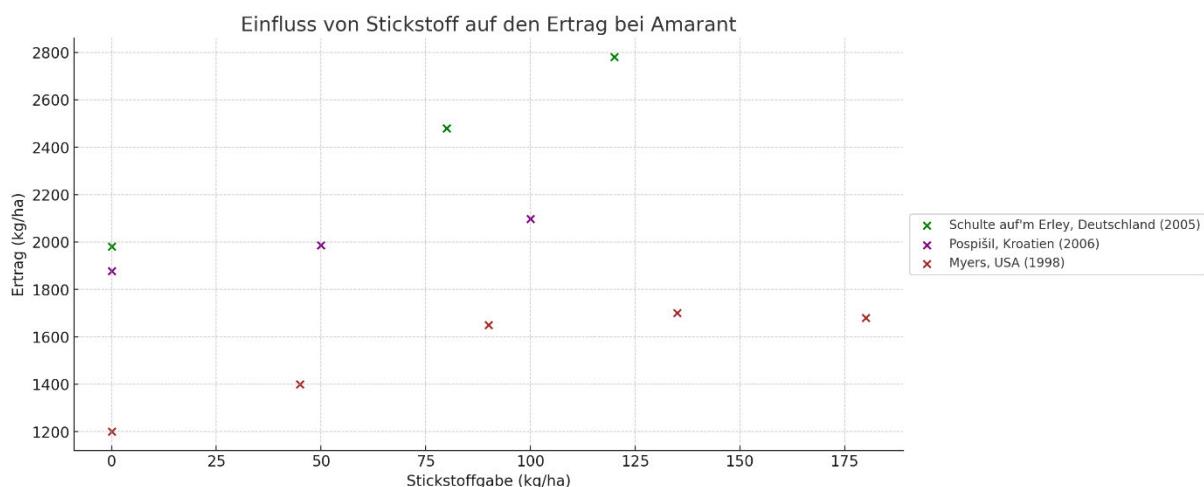


Abbildung 7: Einfluss von Stickstoff auf den Amarantertrag in durchgeföhrten Untersuchungen von (Myers 1998; Pospišil et al. 2006; Schulte auf'm Erley et al. 2005) (eigene Darstellung)

In Abbildung 7 zeigen alle drei Studien einen klaren Zusammenhang zwischen der Stickstoffgabe und der Ertragsbildung. Die höchsten Erträge wurden in der deutschen Studie von (Schulte auf'm Erley et al. 2005) erzielt, in der die Erträge von 1986 kg/ha, in der Kontrollvariante, auf 2767 kg/ha bei 120 kg N/ha stiegen. Auch in der US-amerikanischen Studie von (Myers 1998) war ein deutlicher Ertragsanstieg von der Kontrollvariante mit 1204 kg/ha bis zur Variante mit 90 kg N/ha und einem Ertrag von 1575 kg/ha zu verzeichnen. Darüber hinaus flachte die Ertragskurve ab, was auf eine abnehmende Stickstoffeffizienz bei höheren Gaben, bzw. abnehmenden Grenzertrag hindeutet. Die Studie von (Pospišil et al. 2006) aus Kroatien zeigt einen gleichmäßig geringen Anstieg des Ertrags bei gesteigerter N-Düngung. Die Kontrollvariante hatte im Mittel einen Ertrag von 1877 kg/ha und stieg in der höchsten N-Variante (100 kg N/ha) auf 2098 kg/ha an. Insgesamt verdeutlicht Abbildung 7, dass Stickstoff zwar

grundlegend die Körnertragsbildung fördert, die tatsächliche Ertragsleistung jedoch stark standort- und jahresabhängig ist.

Die Zahl der Untersuchungen des Proteingehalts von Amarant in Bezug auf die Stickstoffdüngung ist bisher begrenzt. In der Studie von (Pospišil et al. 2006) ist der Proteingehalt über alle Düngungsstufen hinweg nahezu konstant geblieben. Sowohl in der unbehandelten Kontrollvariante als auch bei 50 und 100 kg N/ha bewegte sich der Rohproteingehalt zwischen 16,2 und 16,9 %. Die von (Thanapornpoonpong 2004) untersuchten Amarantsorten wiesen Proteingehalte von 10,90 bis 15,81 % auf.

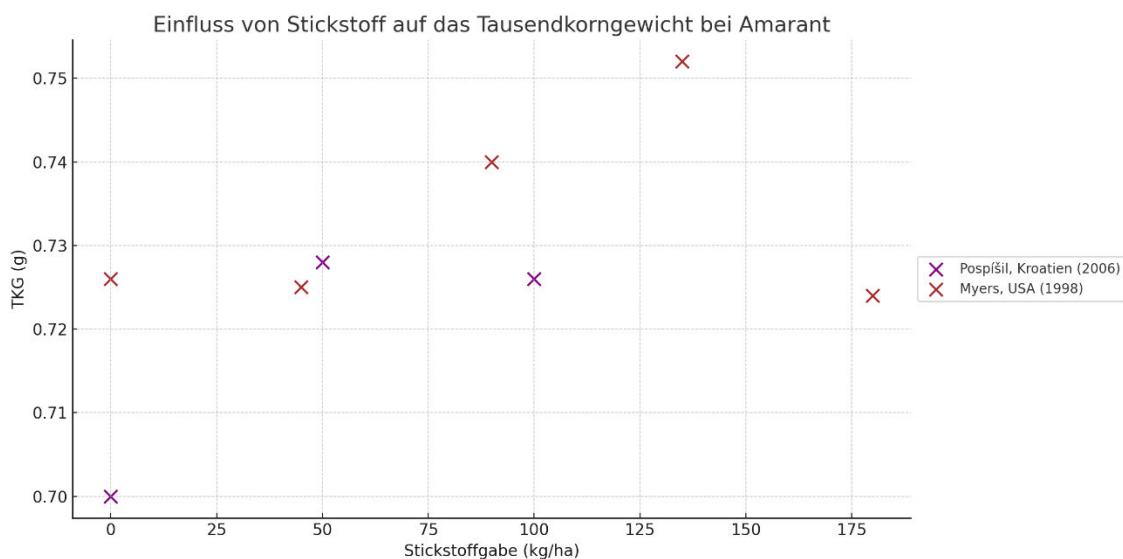


Abbildung 8: Einfluss von Stickstoff auf das Tausendkorngewicht von Amarant bei durchgeföhrten Untersuchungen von (Myers 1998; Pospišil et al. 2006) (eigene Darstellung)

In Abbildung 8 wurde die Entwicklung des Tausendkorngewichts der Studien von (Myers 1998) und (Pospišil et al. 2006) dargestellt. Die Untersuchung von (Pospišil et al. 2006) zeigt einen Anstieg um 0,02 g von der Kontrollvariante auf die Düngestufe mit 50 kg N/ha. Mit weiterem N-Einsatz sank das TKG minimal. In der Studie von (Myers 1998) stieg das TKG bis zu einer Stickstoffmenge von 135 kg N/ha auf rund 0,75 g an, fiel jedoch bei 180 kg N/ha leicht ab. Es lässt sich ableiten, dass eine steigernde N-Düngung tendenziell zu höheren Tausendkornge wichten führt.

2.3.3 Chia

(Grimes et al. 2019) führten 2016 und 2017 eine zweijährige Feldstudie an der Universität Hohenheim zum Thema Chiaanbau unter klimatischen Bedingungen in Südwestdeutschland durch. Es sollte der Einfluss von Reihenweite (35, 50 und 75 cm), Aussaatdichte (1, 1,5 und 2 kg/ha) und N-Düngemenge (0, 20 und 40 kg N/ha) auf den Ertrag und Qualität (Protein- Öl- und Schleimgehalt) überprüft werden. 2016 wurde zehn Tage und 2017 15 Tage nach der Aussaat Calciumammoniumnitrat (27 % N) ausgebracht. Ein Ergebnis der Untersuchung von (Grimes et al. 2019) war, dass der Reihenabstand keinen signifikanten Einfluss auf den Ertrag sowie TKG hat. Es wird jedoch darauf hingedeutet, dass bei 75 cm Reihenabstand der Ertrag am geringsten ist. Die geringste Saatstärke von 1 kg/ha lieferte signifikant geringere Erträge im Vergleich zur Saatstärke mit 1,5 kg/ha. Der Rohproteingehalt korrelierte negativ mit dem Chiaertrag, während der Schleimgehalt und Rohölgehalt positiv korrelieren. Außerdem wurde festgestellt, dass der Rohproteingehalt mit zunehmender Düngemenge anstieg. Gleichzeitig sank der Schleimgehalt bei steigender Düngung. Die Autoren empfehlen eine Düngemenge von 20 bis 40 kg N/ha, eine Saatstärke von 1,5 kg/ha und einen Reihenabstand von 50 cm für Standorte wie in Südwestdeutschland. Aus der Studie ist zu entnehmen, dass eine erhöhte N-Düngung zu höheren Erträgen, was zu einer leichten Abnahme des Rohproteingehalts und damit zu einer Erhöhung der Schleim- und Rohölgehalte führt.

Der Feldversuch von (Mohanty et al. 2021) wurde im Jahr 2020 durchgeführt und hatte das Ziel, die Auswirkungen unterschiedlicher Stickstoffdüngermengen auf das Wachstum, den Ertrag und die Qualität von Chia zu analysieren. Der Versuch fand in Bhubaneswar (Indien) statt. Der Boden der Versuchsfläche wird als nährstoffarm und sauer beschrieben. Es wurden vier Stickstoffstufen getestet (40, 60, 80 und 100 kg N/ha). Als Optimum empfehlen die Autoren eine N-Düngung von 100 kg/ha.

Der Feldversuch von (Mary 2018) zur Untersuchung der Wirkung von Stickstoff auf Chia wurde in den Jahren 2017 und 2018 durchgeführt. Der Standort des Versuchs befand sich in Coimbatore (Indien). Die Studie hatte das Ziel, die Auswirkungen verschiedener Stickstoffdüngestufen auf wichtige Parameter wie Ertrag, Proteingehalt und Ölgehalt bei Chia-Pflanze zu untersuchen. Es wurden unterschiedliche Mengen Stickstoff (30, 60 und 90 kg N/ha) in Form von Mehrnährstoffdünger-NPK ausgebracht. Die Bodenart wurde als Lehmboden beschrieben. Der Autor zieht das Fazit, dass die höchste Düngestufe von 90 kg N/ha den meisten Ertrag lieferte.

Abbildung 9, Abbildung 10 und Abbildung 11 visualisieren die Ergebnisse der obigen Untersuchungen als Einzelmesswerte sowie teilweise Mittelwerte, welche in Abschnitt 6.3 als Referenzwerte genutzt werden.

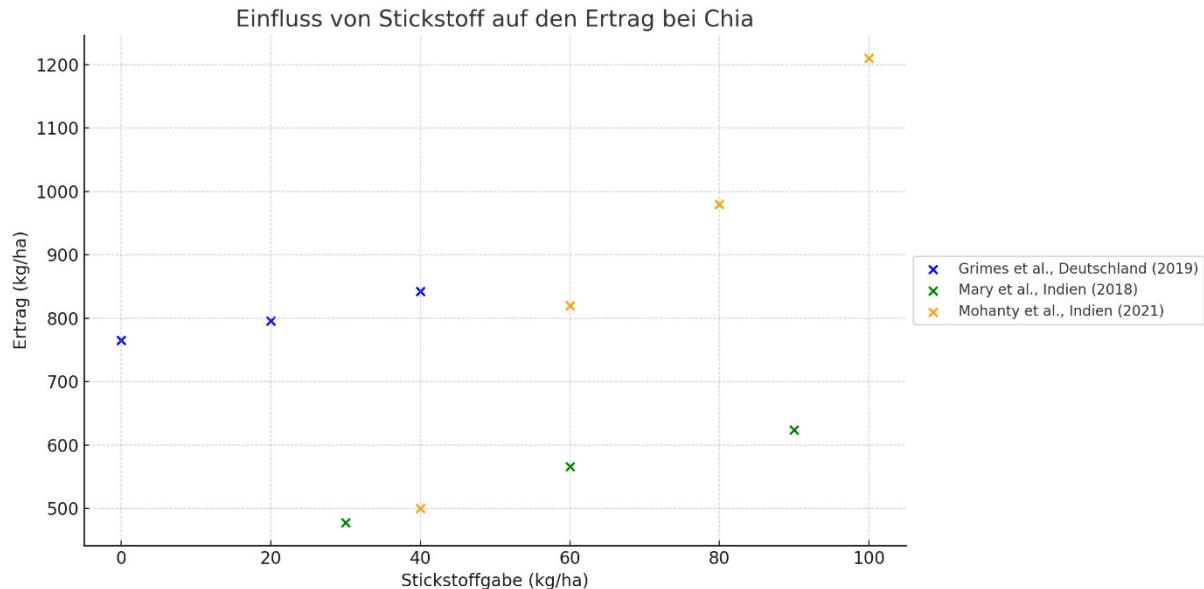


Abbildung 9: Einfluss von Stickstoff auf den Chiaertrag bei durchgeföhrten Untersuchungen von (Mary 2018; Grimes et al. 2019; Mohanty et al. 2021) (eigene Darstellung)

Abbildung 9 veranschaulicht die Ertragsreaktion von Chia auf unterschiedliche Stickstoffdün gestufen. In der Studie von (Grimes et al. 2019) zeigte sich ein moderater Anstieg des Ertrags bei vergleichsweise niedrigen Stickstoffgaben. Der Körnertrag stieg von 765 kg/ha bei 0 kg N/ha auf 842 kg/ha mit 40 kg N/ha auf den Höchstwert. Insgesamt fiel in der Studie die Ertragsreaktion flach aus. Mit zunehmender Stickstoffgabe von 30 auf 90 kg N/ha stieg der Ertrag bei Chia in der Studie von Mary et al. (2018) kontinuierlich an. Der Ertrag nahm dabei von 477,95 kg/ha (30 kg N/ha) auf 565,88 kg/ha (60 kg N/ha) zu und betrug schließlich 623,60 kg/ha bei 90 kg N/ha. Insgesamt zeigte sich ein gleichmäßig moderater Zuwachs, der stärker als bei (Grimes et al. 2019) ist. In der Studie von (Mohanty et al. 2021) war der Ausgangsertrag 497 kg/ha bei einer Düngung von 40 kg N/ha. Mit zunehmender Stickstoffgabe stieg der Ertrag jedoch stark an und lag schließlich auf 1210 kg/ha bei 100 kg N/ha. Das war die stärkste Ertragsreaktion auf eine N-Steigerung im Vergleich zu den anderen Studien. Zusammenfassend zeigen die Studien, dass die Stickstoffdüngung einen positiven Einfluss auf den Körnertrag von Chia hatte, wobei die Ausprägung jedoch unterschiedlich waren.

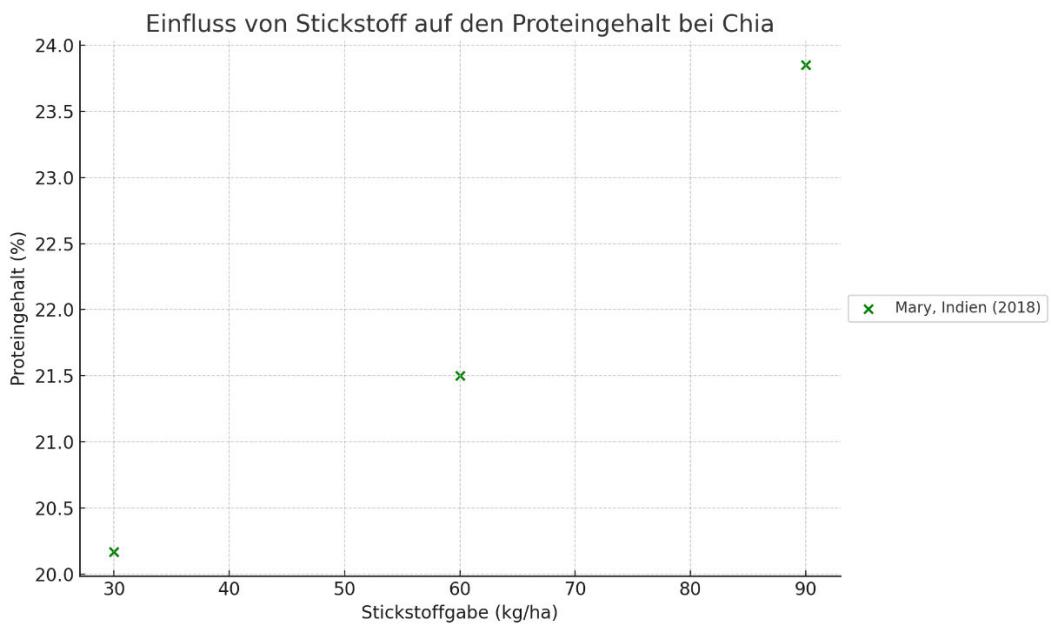


Abbildung 10: Einfluss von Stickstoffdüngung auf den Proteingehalt von Chia bei durchgeföhrten Untersuchungen von (Mary 2018) (eigene Darstellung)

Die Studie von (Mary 2018) zeigt in Abbildung 10, dass mit steigendem N-Einsatz der Proteingehalt von 20,2 % bei 30 kg N/ha auf 23,8 % bei 90 kg N/ha anstieg. In der Untersuchung von (Grimes et al. 2019) wurden Proteingehalte von 18,1 bis 23,1 % gemessen. Dabei führte eine zunehmende N-Düngung zu einem Anstieg des Proteingehalts. Es konnte jedoch nicht signifikant sichergestellt werden.

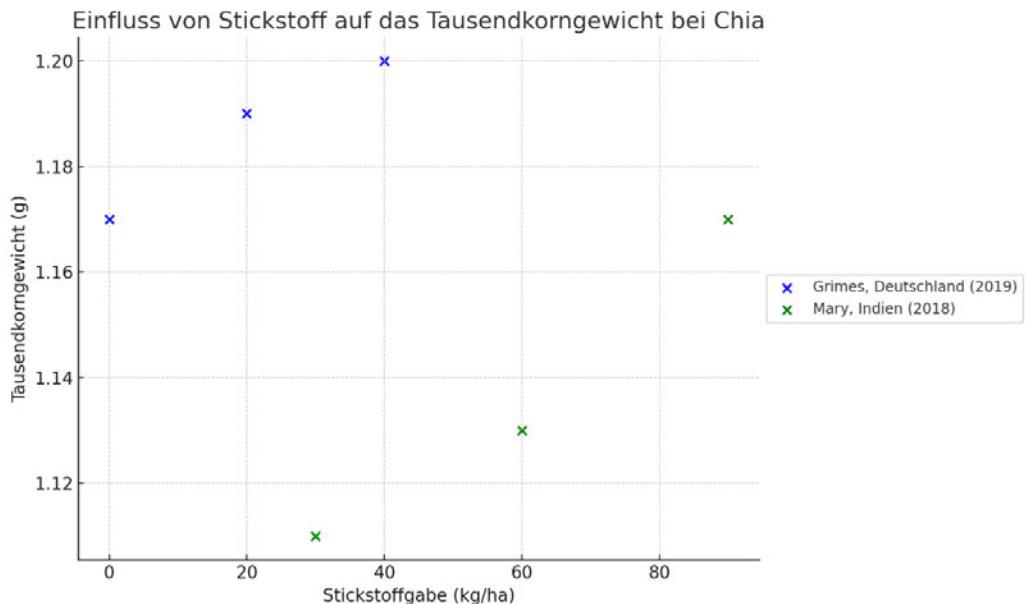


Abbildung 11: Einfluss von Stickstoff auf das Tausendkorngewicht von Chia bei durchgeföhrten Untersuchungen von (Mary 2018; Grimes et al. 2019) (eigene Darstellung)

In der Studie von Grimes (2019) zeigte sich ein kontinuierlicher Anstieg des Tausendkorngewichts mit zunehmender Stickstoffdüngung (Abbildung 11). Bei einer Stickstoffgabe von

0 kg N/ha lag das TKG bei 1,17 g und bei 40 kg N/ha bei 1,20 g. Dies weist auf eine moderate, aber gleichmäßige Zunahme hin, wobei der Effekt der Stickstoffzufuhr auf das TKG insgesamt als gering einzustufen ist. Die Messungen von (Mary 2018) zeigen ebenso einen ansteigenden Verlauf. Bei 30 kg N/ha lag das TKG bei 1,11 g und stieg auf 1,17 g bei 90 kg N/ha an. Grundlegend sind die Werte niedriger als die von (Grimes et al. 2018), jedoch zeigen beide Studien, dass eine erhöhte N-Düngung das TKG von Chia positiv beeinflusst.

3. Zielstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss unterschiedlicher Stickstoffdüngestufen auf den Ertrag sowie die ausgewählten Qualitätsmerkmale von Quinoa, Amarant und Chia als ausgewählte Pseudogetreidekulturen unter den Standortbedingungen des mitteldeutschen Trockengebiets zu untersuchen. Im Rahmen eines dreijährigen Feldversuches werden drei Düngestufen (0, 50 und 100 kg N/ha) miteinander verglichen.

Im Mittelpunkt steht die systematische Analyse des Körnertrags, des Rohproteingehalts sowie des Tausendkorngewichts (TKG) als ausgewählte Ertrags- und Qualitätskriterien. Die Arbeit zielt darauf ab, artspezifische Reaktionen auf die Stickstoffversorgung zu erfassen und daraus empirisch fundierte Düngeempfehlungen für den nachhaltigen Anbau dieser alternativen Kulturen abzuleiten. Ergänzend wird im Erntejahr 2024 ein Sortenversuch mit drei Quinoasorten ausgewertet, um potenzielle Unterschiede im Ertrag und Qualität innerhalb der Art zu identifizieren und eine Sortenempfehlung zu schlussfolgern. Darüber hinaus beschreibt die Arbeit die grundlegende Bedeutung von Stickstoff in Pflanzen.

Im genaueren sollen folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

1. Wie wirkt sich die Höhe der Stickstoffdüngung (0, 50, 100 kg N/ha) auf den Körnertrag von Quinoa, Amarant und Chia aus?
2. In welchem Maße beeinflusst die Stickstoffdüngung den Rohproteingehalt der Körner der drei Pseudogetreidearten?
3. Welchen Einfluss haben unterschiedliche Stickstoffdüngestufen auf das Tausendkorn-gewicht der Pseudogetreidekulturen?
4. Welche artspezifischen Empfehlungen lassen sich zur Stickstoffdüngung für den Anbau von Pseudogetreide im mitteldeutschen Trockengebiet ableiten?
5. Unter welchen Wetterbedingungen liefern die unterschiedlichen Kulturen den höchsten Ertrag?
6. Welche Quinoasorte hat im Erntejahr 2024 den besten Körnertrag sowie Proteingehalt geliefert?

Aus den Forschungsfragen lassen sich systematisch folgende Hypothesen formulieren. Dabei wird die Nullhypothese (H_0) gegenteilig zur Vermutung formuliert. Die Alternativhypothese (H_1) ist die Verneinung der Nullhypothese. Kann das Ergebnis von H_0 nicht gehalten werden, wird diese Hypothese verworfen und H_1 wird angenommen, bzw. als gültig erklärt.

Forschungsfrage 1

Nullhypothese ($H_{0,1}$): Die Höhe der Stickstoffdüngung hat in keinem Jahr einen signifikanten Einfluss auf den Körnertrag der drei Pseudogetreidearten.

Alternativhypothese ($H_{1,1}$): Die Höhe der Stickstoffdüngung hat in mindestens einem Jahr einen signifikanten Einfluss auf den Körnertrag der drei Pseudogetreidearten.

Forschungsfrage 2

$H_{0,2}$: Die Stickstoffdüngung hat keinen signifikanten Einfluss auf den Rohproteingehalt der Körner von Quinoa, Amarant und Chia.

$H_{1,2}$: Die Stickstoffdüngung hat einen signifikanten Einfluss auf den Rohproteingehalt der Körner von Quinoa, Amarant und Chia.

Forschungsfrage 3

$H_{0,3}$: Unterschiedliche Stickstoffdüngestufen beeinflussen das Tausendkorngewicht der Pseudogetreidearten nicht signifikant.

$H_{1,3}$: Unterschiedliche Stickstoffdüngestufen beeinflussen das Tausendkorngewicht der Pseudogetreidearten signifikant.

Forschungsfrage 5

$H_{0,5}$: Die Witterungsbedingungen haben keinen signifikanten Einfluss auf den Ertrag der untersuchten Kulturen.

$H_{1,5}$: Die Witterungsbedingungen haben einen signifikanten Einfluss auf den Ertrag der untersuchten Kulturen.

Forschungsfrage 6

$H_{0,6}$: Es bestehen keine signifikanten Unterschiede im Ertrag und Proteingehalt zwischen den drei untersuchten Quinoasorten.

$H_{1,6}$: Es bestehen signifikante Unterschiede im Ertrag und/oder Proteingehalt zwischen den drei untersuchten Quinoasorten.

4. Material und Methode

4.1 Beschreibung des Feldversuches

4.1.1 Standort

Die Feldversuche wurden in den Jahren 2022, 2023 und 2024 von der Hochschule Anhalt am Standort Bernburg (Saale) durchgeführt. Bernburg befindet sich am südlichen Randausläufer der Magdeburger Börde im nordöstlichen Regenschatten des Harzes auf einer Höhe von 80 m ü. NN (Dallmann et al. 2024). Die Lee-Wirkung des Harzes führt dazu, dass feuchte Luftmassen aus westlicher Richtung gezwungen werden, an dem Mittelgebirge aufzusteigen. Dabei wird ein Großteil der feuchten Luftmassen auf der Westseite des Harzes als Niederschlag abgegeben. Infolgedessen gelangen deutlich trockenere Luftmassen in das östliche Gebiet des Mittelgebirges. Bernburg gehört zum mitteldeutschen Trockengebiet (siehe Abbildung 20 im Anhang), was durch Jahresniederschläge von weniger als 500 mm geprägt ist (Fabig 2007). Als Bodentyp hat sich Lößschwarzerde auf Kalkstein ausgebildet, mit der Bodenart schluffiger Lehm (uL). Mit einer Bodenzahl von 86 bis 100 zählt der Standort zu den besten Ackerbauregionen Deutschlands. Die nutzbare Feldkapazität beträgt 220 mm auf 1 m Tiefe. Die Gehaltsklassen der Hauptnährstoffe liegen überwiegend im mittleren bis hohen Bereich: Kalium in C/D, Phosphor in B/C, Magnesium in C, Kupfer, Zink, Bor, und Mangan sind jeweils der höchsten Gehaltsklasse E zuzuordnen. Der Humusgehalt beträgt 2,7 %, das C/N-Verhältnis liegt bei 10:1, was auf eine stabile organische Substanz hindeutet. Mit einem Boden-pH-Wert von 7,5 liegen neutrale bis leicht alkalische Bedingungen vor (Dallmann et al. 2024).

4.1.2 Witterungsverlauf

In Bernburg herrscht gemäßigtes Klima mit zunehmend wärmeren und niederschlagsreicherem Bedingungen. Die Wetterdaten (siehe Abbildung 12, Abbildung 13 und Abbildung 14) sind vom Deutschen Wetterdienst der Station Bernburg (Saale). Das 30-jährige Mittel der Jahresniederschläge stieg von 468 mm (1961 – 1990) auf 515 mm (1991 – 2020). Gleichzeitig erhöhte sich die durchschnittliche Jahrestemperatur von 9,1 °C auf 10,1 °C (Dallmann et al. 2024). Vergleichsweise lässt sich das Klima als warm und trocken beschreiben.

Abbildung 12 visualisiert den Witterungsverlauf im Jahr 2022 im Vergleich zum langjährigen Mittel.

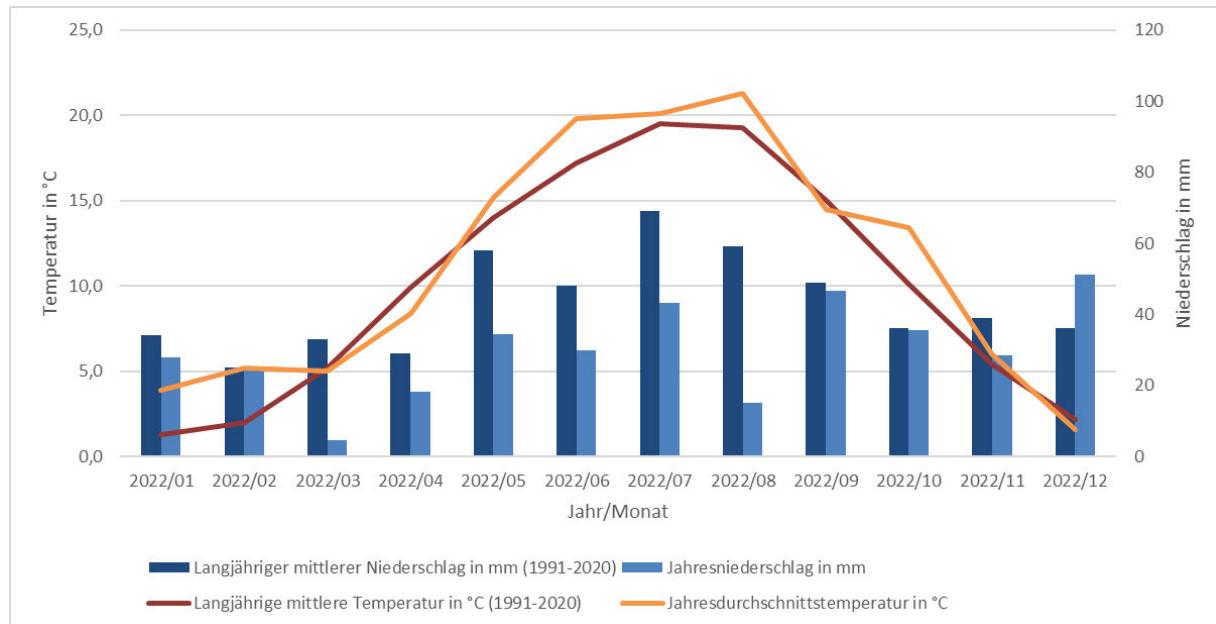


Abbildung 12: Vergleich der langjährigen Jahresniederschlagsmenge und langjährigen Jahresdurchschnittstemperatur am Standort Bernburg (Saale) von 1991 bis 2020 mit der Niederschlagsmenge und Durchschnittstemperatur im Jahr 2022 (eigene Darstellung nach (Deutscher Wetterdienst 2025))

Wie die Abbildung 12 zeigt, lässt sich das Jahr 2022 als warm und deutlich zu trocken beschreiben. Die Jahresdurchschnittstemperatur von 11.2 °C ist wärmer als das langjährige Mittel (1991-2020) mit 10,1 °C. Jedoch wies das Jahr mit 360 mm ein starkes Niederschlagsdefizit im Vergleich zum langjährigen Mittel von 515 mm auf. Obwohl im mitteldeutschen Trockengebiet geringe Niederschläge üblich sind, verzeichnete das Jahr 2022 in den Monaten März bis August ein Niederschlagsmangel von 150 mm gegenüber dem langjährigen Durchschnitt. Die Trockenheit von April bis August traf bei den Pseudogetreiden in die Hauptwachstumsphase ein. Die knappen Niederschläge in Kombination mit den warmen Sommermonaten verschärften das Problem der Wasserversorgung und führte damit zu einer Einschränkung des Ertragspotenzials.

Abbildung 13 stellt den Witterungsverlauf im Jahr 2023 im Vergleich zum langjährigen Mittel dar.

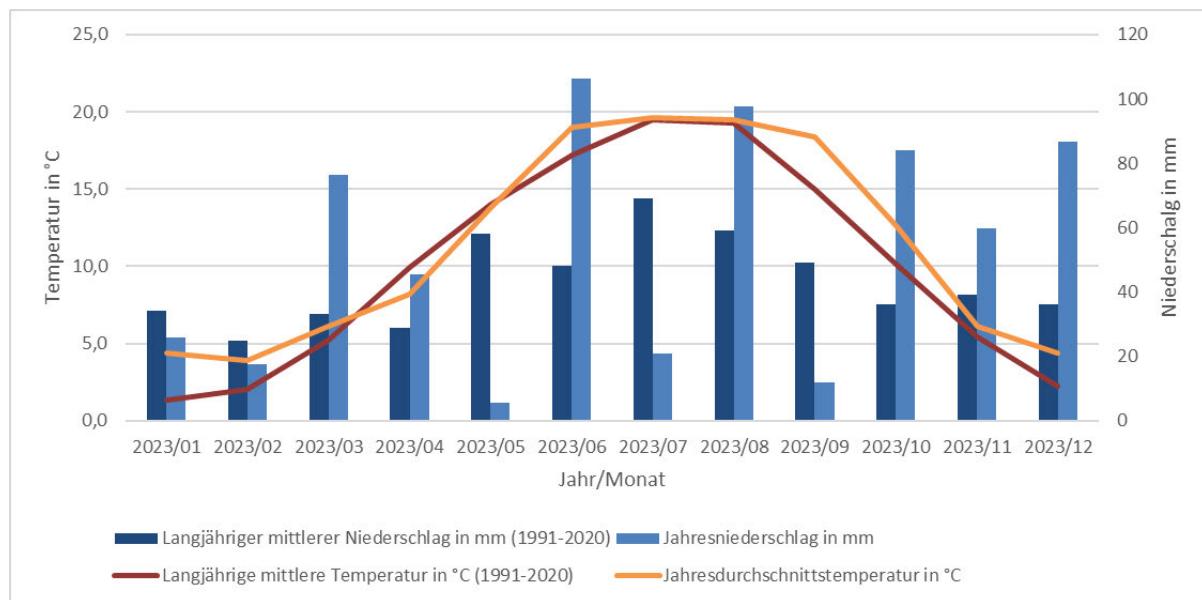


Abbildung 13: Vergleich der langjährigen Jahresniederschlagsmenge und langjährigen Jahresdurchschnittstemperatur am Standort Bernburg (Saale) von 1991 bis 2020 mit der Niederschlagsmenge und Durchschnittstemperatur im Jahr 2023 (eigene Darstellung nach (Deutscher Wetterdienst 2025))

Mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von 11,3 °C ist das Jahr 2023 ähnlich warm wie 2022 und somit desgleichen über dem langjährigen Mittel. Wie in Abbildung 13 zu erkennen, fiel in dem Jahr unverkennbar mehr Niederschlag. Mit 638 mm im Vergleich zum langjährigen Mittel von 515 mm ist das ein Mehrniederschlag von 123 mm. Hauptsächlich waren das die Monate März, Juni, August und die Herbst- bzw. Wintermonate Oktober, November, Dezember. Die Sommerniederschläge sind den Kulturen hervorragend zunutze gekommen. Zudem bezweckten die warmen Temperaturen ideale Wachstumsbedingungen für die Pseudogetreidekulturen. Die zwischenzeitlichen Monate, in denen weniger Niederschlag gefallen ist, haben die Pflanzen nicht beeinträchtigt, aufgrund der guten Wasserversorgung und hohen nFK des Bodens. Allgemein war das Jahr 2023 warm und sehr feucht.

Abbildung 14 visualisiert den Witterungsverlauf vom Jahr 2024 und des langjährigen Mittels.

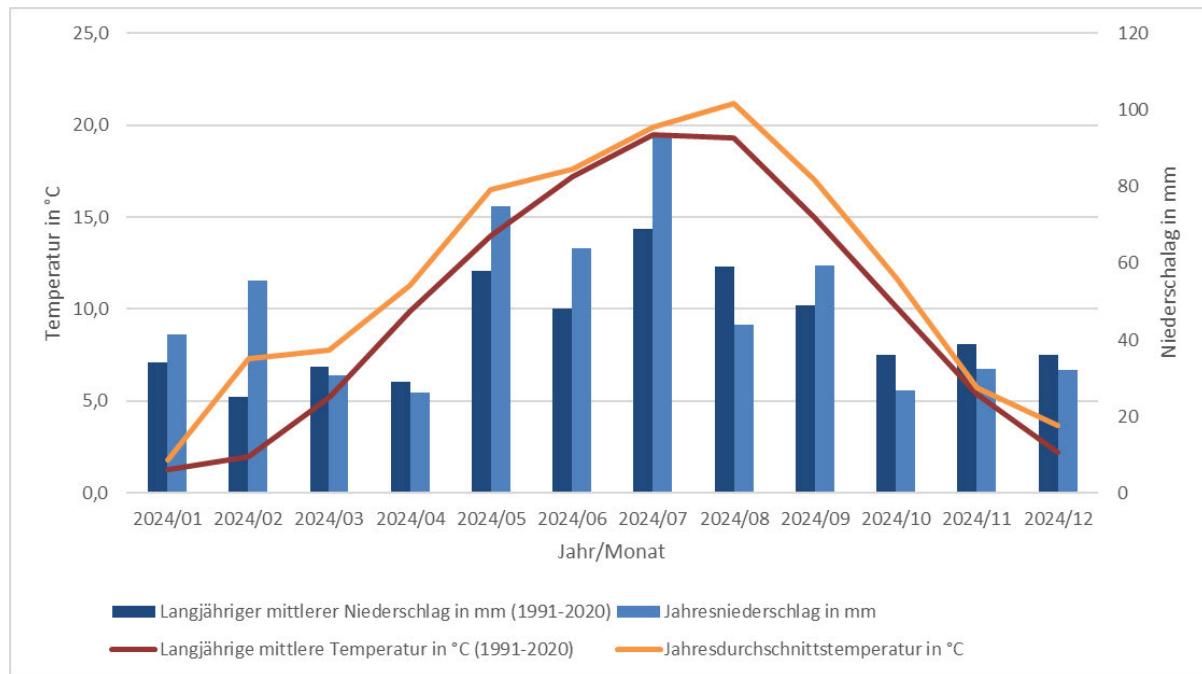


Abbildung 14: Vergleich der langjährigen Jahresniederschlagsmenge und langjährigen Jahresdurchschnittstemperatur am Standort Bernburg-Strenzfeld von 1991 bis 2020 mit der Niederschlagsmenge und Durchschnittstemperatur im Jahr 2024 (eigene Darstellung nach (Deutscher Wetterdienst 2025))

Das Jahr 2024 war insgesamt überdurchschnittlich warm. Die Jahresdurchschnittstemperatur betrug 11,8 °C und lag somit 1,7 °C über dem langjährigen Mittel von 10,1 °C. Die Temperaturerhöhung ist durch einen milden Winter und warmes Frühjahr begründet (siehe Abbildung 14). Des Weiteren waren die Sommer- und Herbstmonate wärmer. Die Monate Februar, Mai und August stechen in Abbildung 14 deutlich hervor, welche wesentlich wärmer als im langjährigen Mittel sind. Mit 581 mm war das Jahr ebenfalls überdurchschnittlich feucht. Beachtlich sind die hohen Niederschläge im Februar, Mai, Juni und Juli.

4.1.3 Versuchsaufbau

Die Versuche der Hochschule Anhalt wurden unter dem Titel „Einfluss der N-Düngung auf Ertrag und Qualität bei ausgewählten Pseudogetreiden“ durchgeführt. Es handelt sich um einen nicht randomisierten Parzellenfeldversuch mit vierfacher Wiederholung. Die Wiederholungen wurden in Form von Blöcken von A bis D realisiert. Auf eine Randomisierung wurde aufgrund von Einfachheit zur Bewirtschaftung gewählt. Darüber hinaus wird dadurch die Gefahr von Fehler bei der Etablierung und Bestandesführung des Versuches verringert. Jedoch steigt aufgrund der fehlenden Randomisierung die Gefahr von zufälligen Effekten, was die Reproduzierbarkeit des Versuches verringert. Zur Eingrenzung von Randeffekten wurden

Randparzellen angelegt. Mit den Maßen 8 x 1,5 m sind die Parzellen 12 m² groß. Die Parzel-lendrillmaschine hat eine Arbeitsbreite von 1,375 m mit einem Reihenabstand von 12,5 cm. Damit ergibt sich eine Nettoparzellengröße von 11 m². Die Abfolge der Versuche erfolgte in jedem Jahr gleich. Von links nach rechts stand Quinoa, Chia und Amarant als Variable a1 bis a3 und die Stickstoffdüngung je Kultur mit b1 als Kontrollvariante mit 0 kg N/ha, sowie b2 mit 50 kg N/ha und b3 mit 100 kg N/ha. Die Stickstoffdüngung wurde mit dem Dünger Piagan Pro als Einmalgabe durchgeführt. Piagan Pro ist ein Harnstoffdünger (46 % N) mit Ureaseinhibitor. Die Bewirtschaftung des Versuches erfolgte mittels parzellengenauer Technik für die Aussaat, Düngung und Ernte. Als Vorfrucht stand in jedem Versuchsjahr Winterraps. Der Boden wurde nach dem standortüblichen Stoppelsturz mit dem Pflug im September des vorangegangenen Jahres bearbeitet. In dem gepflügten Zustand blieb der Boden bis kurz vor der Aussaat liegen. Am Tag der Aussaat wurde mittels Sattbettkombination der Boden bearbeitet um Feinerde und ein entsprechendes Saatbett zu erzeugen. Pflanzenschutzmaßnahmen wurden lediglich bei Notwendigkeit durchgeführt. Herbizide, Insektizide und Fungizide wurden nicht verwendet.

Abbildung 21 im Anhang zeigt den Versuchsaufbau im Erntejahr 2022. Die Aussaat im Früh-jahr 2022 erfolgte am 09.05.2022 mit anschließendem Walzengang am 10.05.2022, der für ausreichenden Bodenschluss der kleinen Samen sorgte. Der Feldaufgang von Amarant wurde am 20.05.2022 und der von Chia am 22.05.2022 bonitiert. Bei Quinoa kam es am 25.05.2022 zur Neuansaat, da dort der Feldaufgang zu gering und letztlich der Bestand nicht zukunftsfähig war. Als Quinoasorte wurde Jessie angebaut. Bei Chia wurde Juana gewählt und bei dem Rotem Amarant die Sorte Anna. Die Aussaatstärke von Quinoa und Chia betrug 150 Kö/m². Für Amarant lag die Saatstärke bei 80 Kö/m². Die N-Düngung wurde am 15.06.2022 durchge-führt.

Der Aufbau des Versuches im Erntejahr 2023 ist identisch zu dem von 2022 (siehe Abbildung 22 im Anhang). In dem Jahr erfolgte die Aussaat und Walzdurchgang am 12.05.2023. Der Feldaufgang war am 21.05.2023. Es wurden in dem Versuchsjahr die gleichen Sorten wie 2022 angebaut. Am 06.06.2023 erfolgte die Stickstoffdüngung.

Im Erntejahr 2024 wurde der Versuch ausgeweitet (siehe Abbildung 23 im Anhang). Es wurde neben dem N-Düngungsversuch ein Quinoasortenversuch angelegt. Demnach sind 3 neue Sorten in dem Versuch eingegangen, darunter die Sorten ST 240011, ST 240102 und Quipu. Diese Sorten fallen unter dem Kürzel a1.1, a1.2 und a1.3. Die Chiasorte Juana wurde in dem Jahr von Pablo ersetzt. A3 blieb die Sorte Anna für den roten Amarant. Die Aussaat und Walzdurchgang wurden am 14.05.2024 durchgeführt. Bei a1.1 und a1.2 wurde für 15 m² - Parzellen Saatgut eingewogen, sodass die Saatstärke auf 188 Körner pro m² angehoben wurde. Die Parzellen zur Sorte a1.3 wurden mit 150 Kö/m² ausgesät, analog zu Chia. Der rote

Amarant wurde für 0,75 kg/ha abgewogen, was bei einem TKG von rund 0,75 g und einer Keimfähigkeit von 80 % eine Aussaatstärke von 80 Kö/m² ergibt. In der Parzelle a1.2 b1 A wurde die doppelte Saatstärke ausgesät und Parzelle a1.2 b3 D wurde am 15.05.2024 aufgrund von Saatgutmangel später gesät. Der Feldaufgang von den Kulturen war am 21.05.2024. Des Weiteren wurde am 29.08.2023 auf der gesamten Versuchsfläche eine Phosphor Grunddüngung mit 150 kg/ha Triplesuperphosphat (46 % P₂O₅) durchgeführt. Die N-Düngung erfolgte am 25.06.2024. Am 26.06.2024 wurde mechanisch per Hand eine Unkrautbekämpfung bewerkstelligt, da sonst die Entwicklung der Pseudogetreidekulturen nachhaltig beeinträchtigt wäre.

4.1.4 Bonituren

Am 08.06.2024 erfolgte eine Bonitur zur Bestandesdichte. Dabei wurde 14-mal zufällig ein Meter in den Parzellen ausgemessen, um die Anzahl Pflanzen innerhalb einer Reihe auszu-zählen. Anschließend wurden die gezählten Pflanzen je Versuchssorte durch den Reihenab-stand von 12,5 cm dividiert.

In Tabelle 1 wird diese Messreihe sowie den Mittelwert der Bestandesdichte mit entsprechen-der Standardabweichung veranschaulicht. Die Auswertung erfolgte durch das Tabellenkalku-lationsprogramm Microsoft Excel. Die Standardabweichung wurde an den Stichprobenumfang angepasst. Es fällt auf, dass die bonitierten Bestandesdichten stark von den ausgesäten Kör-nern je Quadratmeter abweichen. Grundsätzlich ist ein verzettelter/heterogener Feldaufgang beobachtet wurden.

Tabelle 1: ausgezählte Bestandesdichte 2024 (eigene Zählung)

Messung Anzahl Pflanzen/lfd. m	a1.1	a1.2	a1.3	a2	a3
1	48	64	40	8	8
2	48	224	104	8	72
3	88	56	96	16	96
4	40	24	16	32	16
5	128	8	24	80	16
6	152	168	152	96	32
7	8	8	64	16	64
8	104	56	48	48	32
9	104	32	16	40	48
10	80	96	24	8	24
11	8	184	8	72	80
12	16	16	120	56	32
13	48	112	88	80	8
14	112	88	72	24	48
Standardabweichung Pflanzen/m ²	44,35	66,51	42,99	29,50	26,85
mittlere Bestandesdichte Pflanzen/m ²	70,29	81,14	62,29	41,71	41,14

Im Juni 2024 wurden zahlreiche Bonituren in den Parzellen durchgeführt, welche in Tabelle 2 beschrieben sind. Es ist anzunehmen, dass das Fraßbild vom 02.06.2024 und 13.06.2024 auf die Ackerschnecke zurückzuführen ist. Am 13.06.2024 kam bei a1.1 Lochfraß hinzu, was auf Rapserdfloh vermuten lässt. Dieser hat im weiteren Vegetationsverlauf vermehrt Schaden hinterlassen.

Tabelle 2: Bonituren 2024 (eigene Beobachtungen)

Boniturdatum	Bemerkung
02.06.2024	a1.1, a1.2, a1.3: BBCH 11, a1.3 leichte Fraßschäden am 1. Laubblattpaar (10%)
	a2 & a3: BBCH 11
13.06.2024	a1.1: BBCH 13 (3 Laubblattpaare sichtbar), leichte Lochfraßschäden am 1. und 2. Laubblattpaar (1-2 Fraßlöcher)
	a1.2 & a1.3: BBCH 14 (4 Laubblattpaare voll entfaltet)
	a2: BBCH 12 (2 Laubblattpaare voll entfaltet)
	a3: BBCH 12 (2 Laubblattpaare voll entwickelt), starke Fraßschäden am 1. und 2. Laubblattpaar (15%)
17.06.2024	a1.1: BBCH 28 (8 Seitentriebe sichtbar)
	a1.2 & a1.3: BBCH 29 (9 Seitentriebe sichtbar)
	a2: BBCH 28 (8 Seitentriebe sichtbar)
	a3: BBCH 13/14 (3 Laubblattpaare voll entwickelt, 4. Paar sichtbar)
26.06.2024	a1.1: BBCH 55 (Blütenstand teilweise ausgebildet und noch von Blättern umgeben), mittlere Wuchshöhe ca. 65 cm, Pflanzen haben die Reihen geschlossen, Gelbfärbung der unteren zwei Laubblattpaaren, einzelnstehende Pflanzen haben mehr Verzweigungen und Blütenstände
	a1.2: BBCH 55, verstärkt Blattläuse am Blattwerk gefunden, mittlere Wuchshöhe ca. 68 cm, Pflanzen haben die Reihen geschlossen, Gelbfärbung der unteren 2 Laubblattpaaren, einzelnstehende Pflanzen haben mehr Verzweigungen und Blütenansätze
	a1.3: BBCH 57 (Blütenansatz weiter ausgebildet, hebt sich von Blättern ab) mittlere Wuchshöhe ca. 70 cm, Pflanzen haben die Reihen geschlossen, Gelbfärbung der unteren 2 Laubblattpaaren, einzelnstehende Pflanzen haben mehr Verzweigungen und Blütenansätze
	a2: BBCH 50 (Blütestand vorhanden, aber noch mit Blättern umschlossen), mittlere Wuchshöhe ca. 30 cm, ungleichmäßige Bestandesdichte, vereinzelt Kartoffelkäferlarven gefunden, teilweise Lochfraß durch Rapserdfloh (1 - 2 Blätter mit 1-2 Fraßlöcher) bonitiert
	a3: BBCH 15 (5 Laubblattpaare sichtbar), mittlere Wuchshöhe ca. 60 cm, Gelbfärbung der unteren 2 Laubblattpaaren, verstärkter Lochfraß auf den Blättern (Durchschnitt 2 Blätter/Pflanze mit 5 - 10 Fraßlöcher), vereinzelt liegen rote und gelbe Blätter auf dem Boden

Zur Bestimmung der BBCH-Stadien wurden die Ausarbeitungen von (Sosa-Zuniga et al. 2017; Brandán et al. 2019; Martínez-Núñez et al. 2019) genutzt. Die Biologische Bundesanstalt, das Bundessortenamt und die Chemische Industrie (BBCH) schlugen ein Skalensystem zur einheitlichen Kodierung phänologischer Wachstumsstadien von Kulturpflanzen vor. Entwickelt wurde sie ursprünglich, um die Beschreibung von Entwicklungsphasen verschiedener mono- und dikotyler Pflanzenarten zu standardisieren, vergleichbar und reproduzierbar zu machen (Meier et al. 2009; Brandán et al. 2019). Die Skala basiert auf einem dezimalen Kodiersystem, bei dem die Entwicklungsstadien einer Pflanze in zehn Hauptphasen (Stadien 0–9) gegliedert werden. Diese Hauptstadien reichen von der Keimung (Stadium 0) über Blattentwicklung (1), Seitentriebbildung (2), Sprosswachstum (3), Entwicklung der Ernteorgane (4), Bildung der Blütenstände (5), Blüte (6), Frucht- und Samenentwicklung (7–8) bis hin zur Seneszenz (9). Jedes Hauptstadium ist wiederum in Nebenkategorien (Sekundärstadien) unterteilt, die eine noch detailliertere Beschreibung erlauben. Hier zeigt sich die Bedeutung der BBCH-Skala, da sie die phänologischen Ereignisse auch für bislang wenig untersuchte Kulturen präzise beschreibt (Sosa-Zuniga et al. 2017; Brandán et al. 2019; Martínez-Núñez et al. 2019).

Der N_{min} -Wert für die Pseudogetreidekulturen wurde vor der Versuchsanlage nicht explizit gemessen. Deshalb wurde jedes Jahr von den Veröffentlichungen der Hochschule Anhalt (Dallmann et al. 2022, 2023, 2024) der mineralisierte Stickstoff im Boden mit der Vorfrucht Raps bei der Kultur Sommerdurum genutzt. Sommerdurum wurde gewählt, da dies ebenso eine Sommerkultur ist und im Frühjahr gesät wird. Am 10.02.2022 betrug der N_{min} -Wert 105 kg/ha (Dallmann et al. 2022). Im Jahr 2023 lag dieser am 12.02.2023 bei 158 kg/ha (Dallmann et al. 2023). 2024 wurde am 06.02.2024 48 kg N_{min} /ha gemessen (Dallmann et al. 2024). Diese Werte beziehen sich auf eine Bodentiefe von 0 bis 90 cm.

4.2 Datenerhebung

In Tabelle 3 sind die vorhandenen Daten zur Auswertung des vorliegenden Versuches übersichtlich dargestellt.

Tabelle 3: Übersicht von vorhandenen auswertbaren Daten (eigene Darstellung)

	Jahr 2022	Jahr 2023	Jahr 2024
Quinoa	Ertrag von vier Wiederholungen und eine TKG-Mischprobe bestehend aus den vier Wiederholungen	Ertrag von vier Wiederholungen, eine Proteingehalt-Mischprobe bestehend aus den vier Wiederholungen (Elementaranalyse) und selbiges beim TKG	Ertrag von vier Wiederholungen, eine Proteingehalt-Mischprobe bestehend aus den vier Wiederholungen (NIR-Analyse) und selbiges beim TKG von jeweils drei neuen Sorten
Amarant	Ertrag von vier Wiederholungen und eine TKG-Mischprobe bestehend aus den vier Wiederholungen	Ertrag von vier Wiederholungen, eine Proteingehalt-Mischprobe bestehend aus den vier Wiederholungen (Elementaranalyse) und selbiges beim TKG	Ertrag von vier Wiederholungen, eine Proteingehalt-Mischprobe bestehend aus den vier Wiederholungen (NIR-Analyse) und selbiges bei TKG
Chia	Ertrag von vier Wiederholungen und eine TKG-Mischprobe bestehend aus den vier Wiederholungen	Ertrag von vier Wiederholungen, eine Proteingehalt-Mischprobe bestehend aus den vier Wiederholungen (Elementaranalyse) und selbiges beim TKG	Ertrag von vier Wiederholungen, eine Proteingehalt-Mischprobe bestehend aus den vier Wiederholungen (NIR-Analyse) und selbiges bei TKG von einer neuen Sorte

4.2.1 Ertrag

Die Körnerernte der Kulturen wurde mit dem Parzellenmähdrescher der Hochschule Anhalt durchgeführt. Das Fabrikat war ein „Wintersteiger Quantum Core“ Baujahr 2005. Die geerntete Ware wurde parzellenweise in atmungsaktive Stoffsäcke abgesackt und mit den Parzellennummern beschriftet. Anschließend wurden die Säcke im Industrieofen Typ „TS AR 100“ 13,5 kW Baujahr 1966 vom „Industrieofenbau VEB Egeln“ für 48 Stunden bei 45 °C getrocknet. Quinoa wurde im Erntejahr 2022 auf ca. 14,5 % Feuchte getrocknet. In den folgenden Jahren erfolgte eine Trocknung auf 4,2 bzw. 8,5 % Feuchte. Nach dem (Bundesverband Quinoa e. V. 2023) wird eine Kornfeuchte nach der Ernte von 12 % angestrebt. Demnach wurde das Erntegut 2022 zu früh aus dem Trockner entnommen. Das Erntegut des roten Amarants wurde in den Versuchsjahren auf eine Feuchte von 7 bis 9 % getrocknet. (LTZ 2015) nennt eine maximale Kornfeuchte bei Amarant von 10 % zur problemlosen Einlagerung. Chia hatte im Jahr 2022 nach der Trocknung eine Feuchte von 12,5 %. In den anschließenden Erntejahren wurden die Chiasamen auf 6,8 bzw. 6,7 % Wassergehalt getrocknet. Laut (Top Agrar 2024) sollte

eine maximale Kornfeuchte von 8 % angestrebt werden. Die tatsächliche Erntefeuchte wurde vor der Trocknung nicht ermittelt. Das wäre von Bedeutung um die angesetzte Trocknungszeit bei unterschiedlicher Bestandesführung der Parzellen exakter zu planen. Eine intensive Trocknung spielt bei der Wirtschaftlichkeit eine große Rolle, da diese mit Kosten verbunden ist.

Das getrocknete Erntegut wurde anschließend in dem Probenreiniger „SLN3“ vom Baujahr 2016 der Pfeuffer GmbH gereinigt. Dabei wurden verschiedene Lochsiebe ausgewählt um den entsprechenden Fremdbesatz (Unkrautsamen und Pflanzenreste) zu beseitigen und die Ernteware sauber zu lagern. Neben der Abscheidung nach der Korngröße wurde mit Hilfe von Wind leichte Partikel wie Blütenrückstände aus der Probe abgesaugt. Die getrocknete und gereinigte Ware wurde mittels „Soehnle CW 7744“ gravimetrisch bestimmt.

Der Feuchtegehalt wurde mit einem NIR-Analysegerät „Granolyser HL“ Baujahr 2015 von der Pfeuffer GmbH bestimmt. Da dieses Gerät keine geeichte Analyse von Pseudogetreidekulturen durchführen kann, aufgrund fehlender geeichter Parameter, wurde als Alternativkultur Raps gewählt. Die Wahl fiel auf Raps, da die Korngrößen der Kulturen ähnlich denen von Raps sind. Zur Feuchteermittlung wurde eine durchschnittliche Feuchte auf alle Parzellen je Kultur bzw. Sorte analysiert und angenommen. Nach diesem Vorgehen wurden alle Varianten jedes Jahr analysiert sodass die möglichen Messfehler für alle Messungen identisch sind. Da eine differenzierte Menge der N-Düngung Einfluss auf die vegetative und generative Entwicklung der Pflanzen hat (siehe Abschnitt 2.2.1), würde eine Feuchteermittlung je Variante sinnvoll sein.

Zur Ertragsermittlung wurden die Parzellengröße auf 11 m² Nettofläche korrigiert. Die Ertragsberechnung erfolgte im Tabellenkalkulationsmodell Microsoft Excel. Dabei wurde das Netto Gewicht nach der Reinigung gewogen und auf einen Quadratmeter berechnet, indem das ermittelte Gewicht durch elf dividiert wurde. Anschließend mit 10000 multipliziert, um Angaben in Kilogramm je Hektar zu erhalten (siehe Formel 1).

Formel 1: Ertragsberechnung ohne Berücksichtigung der Trockensubstanz

$$\begin{aligned} \text{Nettogewicht der Parzelle [kg je Parzelle]} &\div 11 \text{ m}^2 \times 10000 \text{ m}^2 \\ &= \text{Nettogewicht je Hektar [kg je ha]} \end{aligned}$$

Um vergleichbare Ertragsgewichte zu konstruieren, muss die Kornfeuchte berücksichtigt werden. Zunächst wurden die Werte des gemessenen Wassergehaltes der Körner in Prozent-Trockensubstanz umgerechnet (siehe Formel 2).

Formel 2: Trockensubstanzberechnung

$$100 \% - Feuchte [\%] = \text{Trockensubstanz [\%]}$$

Im Anschluss wurde die berechnete Trockensubstanz durch die endgültige und einheitliche Trockensubstanz von 86 % dividiert, so dass der entstandene Faktor mit der vorangegangenen Berechnung für den Ertrag in Kilogramm je Hektar multipliziert wird. Im Endergebnis sind bereinigte Ertragswerte in kg/ha auf eine festgelegte Trockensubstanz von 86 % entstanden (siehe Formel 3).

Formel 3: Ertragsberechnung mit Berücksichtigung der Trockensubstanz

$$\frac{\text{berechnete Trockensubstanz [\%]}}{\text{einheitliche Trockensubstanz von 86 \%}} \times \text{Nettогewicht je Hektar [kg je ha]} \\ = \text{bereingigter Ertrag auf 86 \% Trockensubstanz [kg/ha]}$$

Im Jahr 2022 lagen keine Ertragsdaten aus den Parzellen a1b1 A, a2b1 A und a3b1 A vor. Das wurde bei der Auswertung berücksichtigt. Den Mittelwert aus den anderen drei Wiederholungen zu ermitteln und diesen als Wert für den A Block zu nutzen, wird ausgeschlossen, da eine Imputation von Mittelwerten die Varianz verzerrn, die Streuung reduzieren und Zusammenhänge abschwächen kann (Grace-Martin 2020). Bei drei Messwerten kann das einen enormen Effekt ausmachen. Im Erntejahr 2023 gab es bei der b3 Düngestufe in Chia eine starke Verunreinigung durch Amarant. Das traf für alle vier Wiederholungen der Variante zu. Demzufolge wurde das Erntegewicht der Parzellen rechnerisch durch die Mitarbeiter der Hochschule Anhalt ermittelt und die Verunreinigung durch Amarant prozentual rausgerechnet. Damit wird der Ertrag in kg/ha auf die reine Chiaernteware bezogen und die Werte lassen sich mit anderen Werten vergleichen. 2024 wurden die Parzellen im A Block aufgrund von Unkraut und sehr geringer Bestandesdichte gekürzt. Es wurden statt 8 m zwischen 5,6 und 7,2 m bearbeitet, wobei die exakte Parzellenlänge dokumentiert und in die Ertragsberechnung je Hektar eingeflossen ist.

4.2.2 Rohprotein

Der Rohproteingehalt wurde von einer Mischprobe der vier Wiederholungen der entsprechenden Varianten beprobt. Die Rohproteinbestimmung erfolgte im Erntejahr 2022 nicht und wird dementsprechend nicht zur Auswertung herangezogen. 2023 wurde die Analyse vom Prof. Hellriegel Institut e.V. am Standort Bernburg durchgeführt. Dabei wurde der Proteingehalt über die Elementaranalyse im Dumas-Verfahren bestimmt. Diese Methode beruht auf der

Verbrennung der Probe, wodurch über mehrere Zwischenschritte Stickstoffgas entsteht, das durch einen Wärmeleitfähigkeitsdetektor gemessen wird. Der gemessene Gesamtstickstoff wird mittels Proteinfaktor (6,25) in einen Proteingehalt [%] umgerechnet (Shea und Watts 1939). Im Jahr 2024 erfolgte die Proteinbestimmung durch das NIR-Analysegerät „Granolyser HL“ aus dem Jahr 2015 von der Pfeuffer GmbH. Das Prinzip der NIR-Analyse basiert darauf, dass Moleküle im nahen Infrarotbereich (ca. 700 bis 2500 nm) bestimmte Wellenlängen absorbieren oder reflektieren, abhängig von ihren chemischen Bindungen (z. B. CH, NH, OH). Der Proteingehalt beeinflusst das Absorptionsspektrum, da Aminogruppen (–NH) und andere funktionelle Gruppen in Proteinen spezielle Absorptionsbereiche aufweisen. Zuvor muss jedoch eine Kalibrierung mit bekannten Proteingehalten durchgeführt werden (Yu et al. 2022). Hierbei wurde durch die im Gerät hinterlegten Werte von Raps die Analyse an den Pseudogetreiden durchgeführt. Die Analysekultur Raps wurde aus demselben Grund wie bei der Feuchteanalyse gewählt.

4.2.3 Tausendkorngewicht

Das Tausendkorngewicht wurde durch ein optisches Körnerzählgerät „Contador“ der Firma Pfeuffer GmbH, welches 1000 Körner abgezählt hat und der Waage „PM2500 Delta Range“ der Firma Mettler gravimetrisch bestimmt. Bei diesem Qualitätsparameter wurde wie bei der Rohproteinanalyse eine Mischprobe der vier Wiederholungen jeder Variante untersucht.

4.3 Datenauswertung

Die Datenauswertung und Visualisierung erfolgte mit dem Statistikprogramm SPSS von IBM SPSS Statistics. Die Werte der Erträge, Rohproteingehalte und Tausendkorngewichte der Parzellen wurden vom Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel in SPSS eingepflegt. Als Variablen zur Auswertung des Versuches wurden Düngestufe, Sorte, Ertrag, Proteingehalt und TKG ausgewählt. Auf die Parzellenbezeichnung wurde verzichtet, da keine Auswertung der Parzellen durchgeführt werden soll. Grundsätzlich wurden diese Parameter als jeweils einzelne Variable in SPSS angelegt. Dabei ist es wichtig, auf welches Skalenniveau die Variable eingestuft wird. Die verschiedenen Skalen stellen den Informationsgehalt des Datenmaterials dar. Der Informationsgehalt ist relevant, um zu entscheiden, mit welcher Analyse die Auswertung der Daten erfolgt.

Die Variable Sorte (Quinoa 2024) wurde als nominales Skalenniveau eingestuft, da der Sortennamen die einzige konkrete Information enthält. Bei der Düngung wurde ebenso die Nominalskala gewählt, da die Dünge量 mit 0, 50 und 100 kg N/ha zwar metrisch ist, aber in Düngestufen b1, b2 und b3 kategorisiert bzw. heruntergebrochen wurden. Die Ertrags- und Qualitätsmerkmale wurden metrisch skaliert, da eine definierbare Differenz zwischen den Ausprägungen (Ertragsdaten, Rohproteingehalt und TKG) vorliegt.

Zur Visualisierung der Ertragsdaten wurde auf den Diagrammtyp Boxplot zurückgegriffen, weil dieser Diagrammtyp Zahlen kompakt darstellt und die Verteilungseigenschaften von metrisch skalierten Daten ermöglicht. Die Box bzw. auch Kasten genannt, ist der zentrale Bereich und repräsentiert den Interquartilsabstand, was den Bereich zwischen dem ersten und dritten Quartil beschreibt. In diesem Bereich sind immer die mittleren 50 % der Daten enthalten. Die Länge der Box lässt eine Aussage über die Streuung der Werte zu. Je kürzer die Box ist, desto kleiner ist die Streuung. Der Median ist eine Linie innerhalb der Box, was die Datenverteilung in zwei gleichgroße Hälften teilt. Oberhalb und unterhalb des Kastens sind Whisker bzw. Antennen, die je nach Datengrundlage den Minimum- (untere Antenne) bzw. Maximum-Wert (obere Antenne), oder alle Werte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstand zeigen. Als Ausreißer gelten Werte, die außerhalb der Antennen liegen (Universität Leipzig 2025).

Da bei der Auswertung der Qualitätsparameter jeweils Mischproben aus den vier Wiederholungen analysiert wurden, liegt hierbei nur ein Wert je Düngestufe vor. Dadurch kommt es zu keiner Variation bzw. Streuung der Daten je Düngestufe, wodurch ein Boxplot-Diagramm keinen Nutzen hat. Zur Visualisierung der Qualitätsdaten wurde ein Streudiagramm gewählt. Dabei entspricht jeder Punkt einem Untersuchungswert.

Das arithmetische Mittel, die Standardabweichung und der Variationkoeffizient der Erträge je Variante wurden im Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel analysiert. Die Standardabweichung und der Mittelwert wurden ausgehend von der Grundgesamtheit berechnet.

Um herauszufinden, ob die Düngestufen und Jahre einen signifikanten Einfluss auf den Ertrag, den Rohproteingehalt und auf das TKG haben, wurde mit SPSS eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt. Dabei wurde der Regressor Düngung auf einem Signifikanzniveau von 5 % untersucht.

Außerdem wurden die Variablen auf signifikante Korrelationen mittels Korrelationsanalyse durch SPSS überprüft. Das Signifikanzniveau lag bei 5 %. Anhand der Pearson-Korrelation konnte die Richtung der Korrelationen ermittelt werden. Es wurde festgestellt, dass jede Regressionsanalyse mit der Korrelationsanalyse gestützt wird, wobei die Richtung dabei eine

zusätzliche Angabe ist. Demnach ist die Regressionsanalyse-Ergebnisse nicht in den Wertetabellen angegeben.

Ferner wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit SPSS durchgeführt, um signifikante Mittelwertunterschiede im Ertrag in Abhängigkeit vom Jahr und Stickstoffdüngestufen zu prüfen. Gleichzeitig dient sie zur Überprüfung der zuvor aufgestellten Hypothesen. Für die paarweise Analyse der Mittelwertunterschiede wurde ein Tukey-HSD-Post-Hoc-Test angewendet. Das Signifikanzniveau wurde auf $\alpha = 0,05$ festgelegt. Diese Analyse konnte lediglich an den Ertragswerten angewendet werden, da die Protein- und Tausendkorgewicht-Werte als Mischprobe der vier Wiederholungen bereits Mittelwerte sind und dementsprechend keine Streuungen bzw. Standardabweichungen aufweisen.

5. Ergebnisse

5.1 Ergebnisse von Quinoa

5.1.1 Ergebnisse von Quinoa aus den Jahren 2022 und 2023

In Tabelle 4 sind die Mittelwerte des Körnerertrags, die zugehörigen Standardabweichungen ($\pm s$) und die Variationskoeffizienten dokumentiert. Außerdem sind in der Tabelle die Ergebnisse der Mischproben des Proteingehalts und Tausendkorngewichts der drei Stickstoffdüngungsstufen (b1, b2 und b3) für die Jahre 2022 und 2023 von Quinoa aufgelistet.

Tabelle 4: Arithmetisches Mittel des Ertrags mit Standardabweichung sowie Variationskoeffizient, Proteingehalt und Tausendkorngewicht von Quinoa je nach Düngestufe in den Jahren 2022 und 2023

Ertrag MW [kg/ha] $\pm s$ [kg/ha] (Variationskoeffizient [%])						
Düngestufe	n	2022	SiG.	n	2023	SiG.
b1 = 0 kg N/ha	3	258,79 ^{d1} \pm 81,19 (31,37)	a A	4	2701,59 ^{d1 z1 z-1} \pm 204,88 (7,58)	a B
b2 = 50 kg N/ha	4	315,96 ^{d1} \pm 74,99 (23,73)	a A	4	3353,76 ^{d1 z1 z-1} \pm 276,06 (8,23)	a B
b3 = 100 kg N/ha	4	492,00 ^{d1} \pm 71,51 (14,53)	b A	4	3570,22 ^{d1 z1 z-1} \pm 576,48 (16,17)	a B
Proteingehalt [%]						
Düngestufe	n	2022	n	2023		
b1 = 0 kg N/ha	0	keine Angabe	1		15,55 ^{d1 z1 z-2}	
b2 = 50 kg N/ha	0	keine Angabe	1		17,24 ^{d1 z1 z-2}	
b3 = 100 kg N/ha	0	keine Angabe	1		18,20 ^{d1 z1 z-2}	
Tausendkorngewicht [g]						
Düngestufe	n	2022	n	2023		
b1 = 0 kg N/ha	1	1,00	1		2,36 ^{d-1 z-1 z-2}	
b2 = 50 kg N/ha	1	0,70	1		2,18 ^{d-1 z-1 z-2}	
b3 = 100 kg N/ha	1	1,00	1		2,21 ^{d-1 z-1 z-2}	

^d signifikanter Korrelation mit $p \leq 0,05$, d1/d-1 positive/negative gerichtete Korrelation zwischen den abhängigen Variablen und N-Düngung (Korrelationanalyse)

^z signifikante Korrelation mit $p \leq 0,05$, z1/z-1 positive/negative gerichtete Korrelation zwischen den abhängigen Variablen (Korrelationanalyse)

a signifikante Unterschiede zwischen Mittelwerten (a/b: Spalten und A/B: Zeilen) mit $p \leq 0,05$, die nicht denselben Buchstaben tragen (Einfaktorielle Variationsanalyse, Tukey-HSD-Test)

In Tabelle 4 ist zu erkennen, dass im Jahr 2022 die Erträge insgesamt auf einem niedrigeren Niveau als 2023 lagen. Die unbehandelte Variante erreichte einen mittleren Ertrag von 258,79 kg/ha. In der mittleren Düngestufe lag der Ertrag bei 315,96 kg/ha. Mit einer Düngung

von 100 kg N/ha wurde ein Mittelwert von 492,00 kg/ha erzielt. Der Ertrag stieg somit von b1 zu b3 um 233,21 kg/ha, was einer relativen Steigerung von ca. 90 % entspricht. Signifikante Unterschiede der Erträge wurden von b1 und b2 zu b3 festgestellt (a/b). Im Jahr 2023 lagen die Erträge der jeweiligen Düngestufe signifikant bis zu 946 % über denen des Vorjahres (A/B). In b1 wurde ein mittlerer Ertrag von 2701,59 kg/ha gemessen. Der Wert erhöhte sich in b2 auf 3353,76 kg/ha und in b3 auf 3570,22 kg/ha. Die Differenz zwischen der niedrigsten (b1) und höchsten Düngungsstufe (b3) betrug 868,63 kg/ha, was einem relativen Anstieg von etwa 32 % entsprach. Mit $p = 0,054$ lag in dieser Ertragsentwicklung grenzwertig kein signifikanter Unterschied vor. Die Variationskoeffizienten (VK) waren 2022 bis auf die b3-Variante höher als 2023. Die Korrelationsanalysen zeigen, dass 2022 und 2023 mit steigender Stickstoffdüngung der mittlere KornErtrag steigt, was durch eine signifikante gleichgerichtete Korrelation (d1) dargestellt ist. Die Signifikanzgruppen zeigen jedoch, dass lediglich 2022 ein signifikanter Mehrertrag durch erhöhte Stickstoffdüngung in b3 2022 vorlag.

2022 wurde kein Proteingehalt ermittelt. Nach Tabelle 4 zufolge, stieg der Proteingehalt 2023 von 15,55 % in der Kontrollvariante auf 18,20 % in der höchsten Düngestufe, was mit einer signifikanten gleichgerichteten Korrelation zwischen der N-Düngung und dem Proteingehalt unterstützt wird. Außerdem wurde eine signifikante gleichgerichtete Korrelation zwischen dem Ertrag und dem Proteingehalt (z1) festgestellt.

Wie in Tabelle 4 aufgelistet, war das TKG 2022 in b2 mit 0,70 g der geringste Wert aus den beiden Versuchsjahren. In b1 und b3 lag das TKG bei 1,0 g. Grundsätzlich waren die TKG-Werte aus 2022 um mindestens 120 % kleiner als 2023. 2022 konnte kein signifikanter Effekt von N auf das TKG festgestellt werden. Das Versuchsjahr 2023 wies das höchste TKG in b1 mit 2,36 g auf und fiel in b2 auf den geringsten Wert mit 2,18 g ab. Zwischen der N-Düngung und dem TKG ist 2023 eine signifikante entgegengesetzt gerichtete Korrelation (d-1) festgestellt wurden. Außerdem wurde dabei eine signifikante entgegengesetzt gerichtete Korrelation zwischen dem Ertrag und dem TKG (z-1) ermittelt. Des Weiteren lag zwischen dem Protein gehalt und dem TKG eine signifikante entgegengesetzt gerichtete Korrelation (z-2) vor.

5.1.2 Ergebnisse von Quinoa aus dem Jahr 2024

In Tabelle 5 sind die mittleren Erträge, die zugehörigen Standardabweichungen ($\pm s$) mit berechneter Variationskoeffizienten, die absoluten Proteingehalte sowie Tausendkorngewichte der drei Quinoasorten (ST 240011, ST 240102 und Quipu) unter den Düngestufen b1, b2 und b3 im Jahr 2024 dokumentiert.

Tabelle 5: Arithmetisches Mittel des Ertrags mit Standardabweichung sowie Variationskoeffizient, Proteingehalt und Tausendkorngewicht von drei Quinoasorten je nach Düngestufe im Erntejahr 2024

Ertrag MW [kg/ha] $\pm s$ [kg/ha] (Variationskoeffizienten [%])							
Düngestufe	n	Sorte 1 / ST 240011		SiG.	Sorte 2 / ST 240102		SiG.
b1 = 0 kg N/ha	4	417,77 ^{d1} z1 z-1 ± 171,55 (41,06)		a A	904,64 ± 72,80 (8,05)		a B
b2 = 50 kg N/ha	4	1017,65 ^{d1} z1 z-1 ± 204,50 (23,63)		b A	753,90 ± 42,79 (5,68)		a A
b3 = 100 kg N/ha	4	1499,88 ^{d1} z1 z-1 ± 272,20 (18,15)		b A	995,89 ± 246,74 (24,78)		a B
Proteingehalt [%]							
Düngestufe	n	Sorte 1		Sorte 2		Sorte 3	
b1 = 0 kg N/ha	1	13,40 ^{d1} z1		13,50 ^{d1}		12,50 ^{z-1}	
b2 = 50 kg N/ha	1	14,60 ^{d1} z1		14,60 ^{d1}		11,90 ^{z-1}	
b3 = 100 kg N/ha	1	14,60 ^{d1} z1		14,60 ^{d1}		12,20 ^{z-1}	
Tausendkorngewicht [g]							
Düngestufe	n	Sorte 1		Sorte 2		Sorte 3	
b1 = 0 kg N/ha	1	2,81 ^{d-1} z-1		2,32		2,14 ^{z-1}	
b2 = 50 kg N/ha	1	2,78 ^{d-1} z-1		2,62		2,64 ^{z-1}	
b3 = 100 kg N/ha	1	2,58 ^{d-1} z-1		2,20		2,23 ^{z-1}	

^d signifikanter Zusammenhang mit $p \leq 0,05$, d1/d-1 positive/negative gerichtete Korrelation zwischen den abhängigen Variablen und N-Düngung (Korrelation)

^z signifikanter Zusammenhang mit $p \leq 0,05$, z1/z-1 positive/negative gerichtete Korrelation zwischen den abhängigen Variablen (Korrelation)

a signifikanter Unterschied zwischen Mittelwerten (a/b: Spalten und A/B: Zeilen) mit $p \leq 0,05$, die nicht denselben Buchstaben tragen (Einfaktorielle Variansanalyse Tukey-HSD-Test)

Aus Tabelle 5 lässt sich entnehmen, dass die Sorte ST 240011 über alle Düngungsstufen hinweg eine deutliche Steigerung des Ertrags zeigte. In b1 wurde ein mittlerer Ertrag von 417,77 kg/ha erzielt. Die Variante b3 erreichte den höchsten Ertrag mit 1499,88 kg/ha. Damit war der Ertrag in der höchsten Düngestufe 259 % höher als in der unbehandelten Variante. Zwischen b1 und b2 ergibt sich eine relative Zunahme um 143 %, zwischen b2 und b3 nochmals um 47 %. Wie an „d1“ zu erkennen, lag eine signifikante gleichgerichtete Korrelation zwischen der N-Düngung und dem Ertrag vor. Anzumerken ist, dass ein signifikanter Anstieg der

mittleren Erträge von b1 zu b2 und b3 festgestellt wurde. Bei Sorte 2 (ST 240102) lag der geringste Ertrag mit 753,90 kg/ha in b2, während in b3 der höchste Wert von 995,89 kg/ha erzielt wurde. Die Kontrollvariante war im Ertrag besser als die mit 50 kg N/ha. Im Vergleich zu den anderen Sorten zeigte sich hier der geringste Ertragszuwachs über die Düngestufen. Die Streuung, anhand des Variationskoeffizient gemessen, war in der Sorte in der Kontroll- und mittleren Variante verhältnismäßig gering. Letztlich zeigte die ANOVA-Analyse, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Erträgen aller Versuchsvarianten gab. Die Sorte Quipu (Sorte 3) wies in allen Düngungsstufen die höchsten Erträge im Sortenvergleich auf. In b1 betrug der mittlere Ertrag 1222,13 kg/ha, in b2 1486,11 kg/ha und in b3 1587,85 kg/ha. Der absolute Unterschied zwischen der unbehandelten Variante und der höchsten Düngung betrug 365,72 kg/ha, was einer Steigerung von etwa 30 % entsprach. Die Mittelwerte der Erträge unterschieden sich auf einem Signifikanzniveau von 5 % nicht. Der Variationskoeffizient in der ertragreichsten Variante war mit 7,48 % gering im Vergleich zu den anderen Sorten. Weiterhin lag eine signifikante gleichgerichtete Korrelation zwischen der N-Düngung und dem Körnertrag. Zusammenfassend zeigte Sorte 1 die höchste absolute Ertragssteigerung zwischen b1 und b3 (+1082,11 kg/ha) sowie die stärkste prozentuale Zunahme (+259 %), was bereits in der Ertragsentwicklung von b1 zu b2 signifikant bestätigt wurde. Insgesamt wurde der höchste Ertrag mit Sorte 3 in b3 (1587,85 kg/ha) gemessen, was jedoch keinen signifikanten Unterschied zu Sorte 1 in b3 aufwies. In jeder Düngestufe gab es signifikante Ertragsunterschiede zwischen den Sorten. In b1 war Sorte 1 signifikant geringer, in b2 war Sorte 3 signifikant höher und in b3 war Sorte 2 signifikant geringer als die anderen Sorten.

Die Abbildung 15 veranschaulicht die Ertragsverteilung in kg/ha von drei Quinoasorten in Abhängigkeit von drei Stickstoffdüngestufen. Die Sorten sind wie folgt nummeriert: Sorte 1: ST 240011, Sorte 2: 240102, Sorte 3: Quipu.

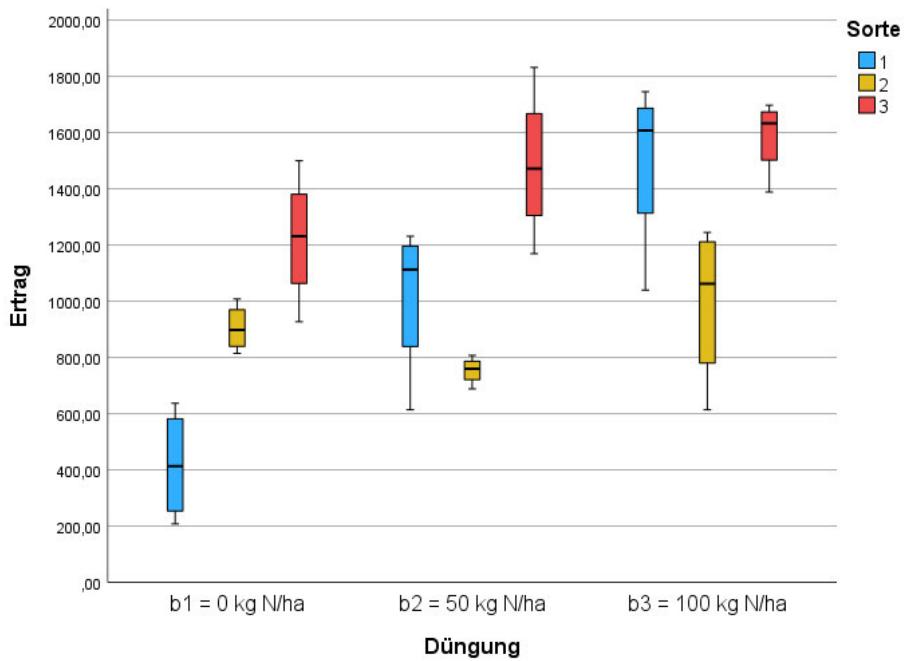


Abbildung 15: Boxplots der Ertragsmengen der Quinoasorten 2024 unterteilt nach Düngestufen

In Abbildung 15 lässt sich erkennen, dass die Sorte ST 240011 (Sorte 1) über alle drei Düngestufen einen deutlichen Anstieg des Ertrags verzeichnet. ST 240011 war in b1 im Vergleich zu den anderen Sorten und Düngevarianten die ertragsschwächste. Die größte Spannweite dieser Sorte mit ca. 700 kg/ha trat in der höchsten Düngestufe (b3) auf. Bei der Sorte ST 240102 (Sorte 2) war der Ertrag in b1 im Mittelfeld, wohingegen in den Düngestufen b2 und b3 die Sorte den geringsten Ertrag lieferte. Jedoch ist zu erkennen, dass die Spannweite der Sorte in b2 lediglich ca. 100 kg/ha beträgt und ist damit die geringste Spannweite unter allen Sorten und Düngevarianten. Die Sorte Quipu (Sorte 3) wies in allen drei Düngungsstufen den jeweils höchsten Medianertrag auf.

Wie in Tabelle 5 zu sehen, lag der Proteingehalt von ST 240011 (Sorte 1) in der Nullvariante bei 13,40 %. Mit der Steigerung der N-Düngung auf 50 kg N/ha stieg der Wert um 8,9 % auf 14,60 %. Darüber hinaus wurde bei der Düngevariante mit 100 kg N/ha keine Veränderung festgestellt. Das traf ebenso auf ST 240102 (Sorte 2) zu. Hier enthielten die Samen der Kontrollvariante 13,50 % Protein und stieg in den höheren Düngestufen auf 14,60 % an. Es bestand bei Sorte 1 und 2 eine signifikante gleichgerichtete Korrelation zwischen der N-Düngung und dem Proteingehalt (d1). Hinzu kommt, dass bei Sorte 1 eine signifikante gleichgerichtete Korrelation zwischen dem Ertrag und dem Proteingehalt vorlag (z1). Quipu (Sorte 3) wies in

b1 den höchsten Proteingehalt mit 12,50 % auf. Mit 50 kg N/ha fiel der Proteingehalt auf 11,90 % und stieg bei 100 kg N/ha auf 12,20 %. Die Sorte wies im Sortenvergleich über alle Düngestufen hinweg die niedrigsten Proteingehalte auf.

In Abbildung 16 ist der Proteingehalt der drei Quinoasorten ST 240011, ST 240102 und Quipu in Abhängigkeit von drei Stickstoffdüngestufen dargestellt.

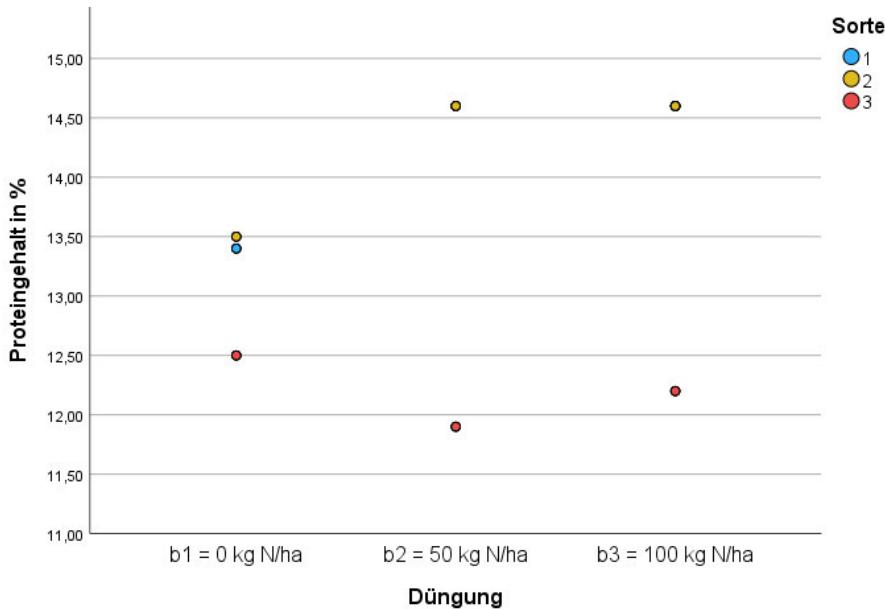


Abbildung 16: Streudiagramm der Proteingehalte der Quinoasorten 2024 unterteilt nach Düngestufen

Für die Sorte ST 240011 (Sorte 1) lag in der Nullvariante (b1) ein Wert von 13,40 % vor. Die Werte aus den Varianten b2 und b3 sind in Abbildung 16 dargestellt, jedoch werden diese von Sorte 2 überdeckt, da diese Werte exakt übereinstimmen. Die Werte der b2 und b3 Variante betrugen 14,60 % und stiegen von der b1 Variante stark an. Zwischen b2 und b3 war damit keine Veränderung zu beobachten. Die Sorte Quipu (Sorte 3) wies in der Nullvariante (b1) den höchsten Proteinwert von den Düngestufen der Sorte auf. Mit gesteigerter N-Düngung sank der Proteingehalt.

Wie in Tabelle 5 aufgelistet, lag das TKG der Sorte 1 in b1 bei 2,81 g, was der höchste Wert aller Sorten und Versuchsvarianten ist. Mit zunehmender N-Düngung nahm das TKG ab und betrug schließlich 2,58 g bei 100 kg N/ha. Es bestand eine signifikante entgegengesetzt gerichtete Korrelation zwischen der N-Düngung und dem TKG (d-1). Außerdem bestand eine signifikante entgegengesetzt gerichtete Korrelation zwischen dem Ertrag und dem TKG. Das TKG der Sorte 2 betrug in der Kontrollvariante 2,32 g und stieg in b2 auf 2,62 g an, welcher den Höchstwert der Sorte darstellte. Bei b3 fiel das TKG stark auf 2,20 g ab. Sorte 3 wies mit 2,14 g in der Nullvariante das geringste TKG aller Sorten auf, stieg in b2 auf 2,64 g an und fiel in b3 auf 2,23 g ab. Hier traten die größten Schwankungen innerhalb der Sorte auf. An z-1 ist

zu erkennen, dass eine signifikante entgegengesetzt gerichtete Korrelation zwischen dem TKG und dem Proteingehalt vorlag. Die größte Differenz des TKGs lag zwischen den Kontrollvarianten von Sorte 1 und Sorte 3.

In Abbildung 17 ist das Tausendkorngewicht der untersuchten Quinoasorten in Abhängigkeit von drei Stickstoffdüngungsvarianten dargestellt.

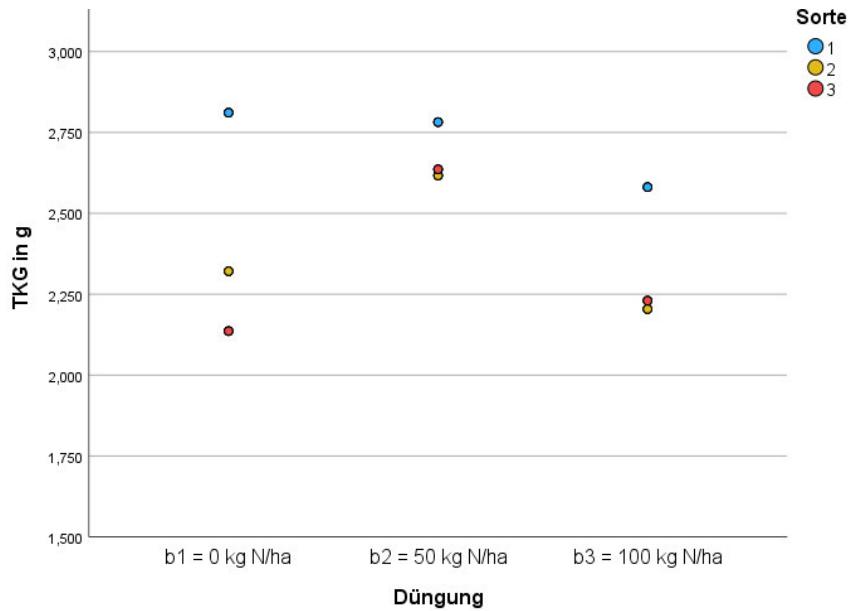


Abbildung 17: Streudiagramm der TKG-Werte der Quinoasorten 2024 unterteilt nach Düngestufen

Abbildung 17 zeigt, dass das TKG der Sorte 1 bei erhöhtem N-Einsatz niedriger wurde. Sorte 2 und 3 verhielten sich ähnlich bei der Steigerung der N-Düngemenge. In b2 hatten Sorte 2 und 3 ihren Höchstwert, wohingegen Sorte 1 diesen in der Kontrollvariante hatte.

5.2 Ergebnisse von Amarant aus den Jahren 2022, 2023 und 2024

Tabelle 6 beinhaltet die mittleren Körnerträge von Amarant sowie die zugehörigen Standardabweichungen ($\pm s$) mit Variationskoeffizienten. Des Weiteren sind die Werte des Proteingehalts und des Tausendkorngewichts der drei Stickstoffdüngungsstufen (b1, b2 und b3) für die Jahre 2022, 2023 und 2024 von Amarant aufgeführt.

Tabelle 6: Arithmetisches Mittel des Ertrags mit Standardabweichung sowie Variationskoeffizient, Proteingehalt und Tausendkorngewicht von Amarant je nach Düngestufe in den Jahren 2022, 2023 und 2024

Ertrag MW [kg/ha] $\pm s$ [kg/ha] (Variationskoeffizienten [%])															
Düngestufe	n	2022		SiG.	n	2023		SiG.	2024		SiG.				
b1 = 0 kg N/ha	3	275,76	^{d1}	$\pm 86,51$		a A	4	3591,51	$\pm 691,73$		a B	2161,86	^{z-1}	$\pm 595,47$	ab C
b2 = 50 kg N/ha	4	336,68	^{d1}	$\pm 79,91$		a A	4	3104,20	$\pm 463,87$		a B	1419,11	^{z-1}	$\pm 128,01$	a C
b3 = 100 kg N/ha	4	524,26	^{d1}	$\pm 76,20$		b A	4	3187,04	$\pm 514,06$		a B	2656,09	^{z-1}	$\pm 349,85$	b C
Proteingehalt [%]															
Düngestufe	n	2022		n	2023		2024								
b1 = 0 kg N/ha	0	keine Angabe		1	18,28		15,00 ^{z-1}								
b2 = 50 kg N/ha	0	keine Angabe		1	21,38		15,90 ^{z-1}								
b3 = 100 kg N/ha	0	keine Angabe		1	19,42		14,00 ^{z-1}								
Tausendkorngewicht [g]															
Düngestufe	n	2022		n	2023		2024								
b1 = 0 kg N/ha	1	0,77		1	0,79 ^{d-1}		0,75								
b2 = 50 kg N/ha	1	0,62		1	0,77 ^{d-1}		0,75								
b3 = 100 kg N/ha	1	0,75		1	0,76 ^{d-1}		0,75								

^d signifikanter Zusammenhang mit $p \leq 0,05$, d1/d-1 positive/negative gerichtete Korrelation zwischen den abhängigen Variablen und N-Düngung (Korrelation)

^z signifikanter Zusammenhang mit $p \leq 0,05$, z1/z-1 positive/negative gerichtete Korrelation zwischen den abhängigen Variablen (Korrelation)

a signifikanter Unterschied zwischen Mittelwerten (a/b: Spalten und A/B/C: Zeilen) mit $p \leq 0,05$, die nicht denselben Buchstaben tragen (Einfaktorielle Variationsanalyse Tukey-HSD-Test)

2022 ist der geringste Ertrag mit 275,76 kg/ha in b1 und der höchste Ertrag mit 524,26 kg/ha in b3 gemessen wurden (siehe Tabelle 6). Der Ertrag bei b3 war somit etwa 90 % höher als bei b1. Es lag eine signifikante gleichgerichtete Korrelation zwischen der Stickstoffdüngung und dem Ertrag vor (d1). Dabei wurde eine signifikante Erhöhung des Ertrags von b1 und b2 zu b3 festgestellt. Die Streuung, anhand des VK gemessen, war in dem Jahr zwischen 14,53 und 31,37 %, was im Vergleich zu den anderen Jahren hoch ist. Besonders auffällig war die hohe Streuung bei der niedrigsten Düngestufe, während mit steigender N-Gabe die relative

Streuung gesunken ist. In den Jahren 2023 und 2024 wurden signifikant höhere Erträge als 2022 erreicht, wobei sich 2023 und 2024 bis auf b2 nicht signifikant unterschieden. Der höchste Mittelwert im Jahr 2023 wurde mit 3591,51 kg/ha in der unbehandelten Variante erzielt und ist 585 % höher als der Höchstertrag 2022. In b2 und b3 lagen die Erträge bei 3104,20 kg/ha bzw. 3187,04 kg/ha. Der Ertrag 2023 in b1 war rund 16 % höher als in b3, wobei jedoch der Unterschied nicht signifikant war. Die VK-Werte im Versuchsjahr 2023 waren auf einem ähnlichen Niveau. 2024 waren die Erträge besser als 2022 aber schlechter als 2023. Der höchste Ertrag mit 2656,09 kg/ha wurde 2024 in der höchsten N-Gabe gemessen. In der mittleren Düngestufe wurde der niedrigste Wert mit 1419,11 kg/ha ermittelt. Der Ertrag in b3 lag somit fast 87 % über dem Wert von b2 und etwa 23 % über dem Ertrag in b1. Auffällig ist der vergleichsweise niedrige Ertrag in b2, der signifikant unter denen der anderen Varianten 2024 lag. Dabei zeigte der VK mit 9,02 % eine geringe Streuung. Der höchste Ertrag im Jahr 2024 lag 26 % unter dem Maximalertrag von 2023, was jedoch nicht signifikant war. Letztlich wurde eine signifikante Steigerung des Ertrags bei Erhöhung der N-Stufe im Jahr 2022 von b1 und b2 zu b3 sowie 2024 von b2 zu b3 festgestellt. Vorher ist jedoch der Ertrag 2024 von b1 zu b2 signifikant gesunken.

Abbildung 18 visualisiert den Einfluss von Stickstoffdüngung über die drei Versuchsjahre.

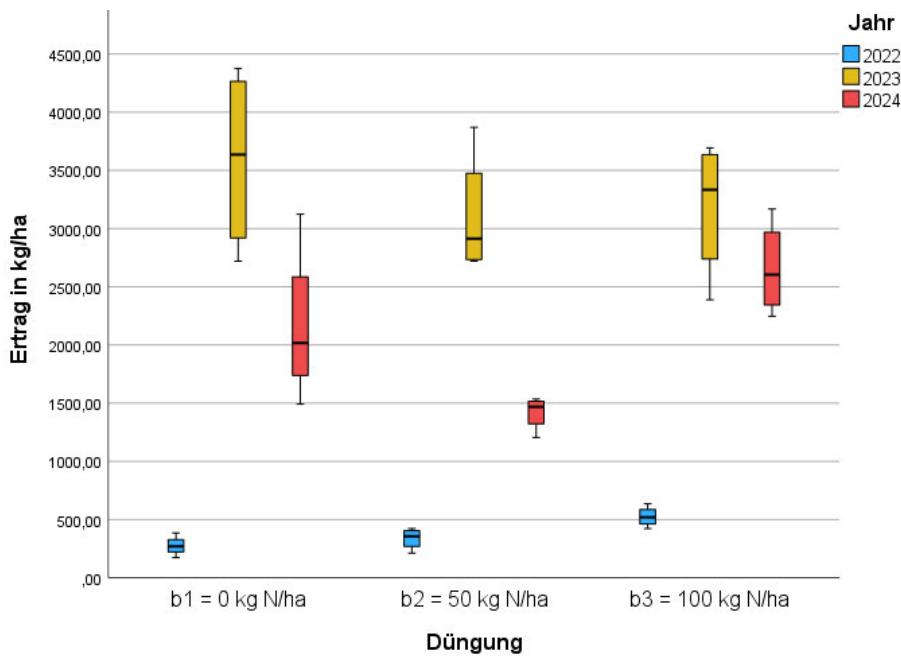


Abbildung 18: Boxplots zum Ertrag von Amaranth der Jahre 2022, 2023 und 2024 unterteilt nach Düngestufen

In Abbildung 18 ist zu erkennen, dass 2022 die Erträge im Vergleich zu den anderen Jahren sehr gering waren. Es zeigt, dass 2022 mit steigender N-Düngung die Erträge kontinuierlich ansteigen. 2023 waren die Erträge am höchsten von den drei Versuchsjahren. In b1 war der

höchste Körnertrag, wobei die Streuung sehr weit ist. Auffällig ist, dass 2024 in b2 die Erträge und die Streuung wesentlich niedriger sind als in den anderen Versuchsvarianten des Jahres.

2022 wurden keine Proteingehalte analysiert. Wie in Tabelle 6 aufgelistet, war im Erntejahr 2023 der geringste Proteingehalt mit 18,28 % in der Variante mit 0 kg N/ha gemessen wurden. Der höchste Proteingehalt mit 21,38 % wurde mit 50 kg N/ha analysiert. In b3 fiel der Wert auf 19,42 % ab. 2024 wurde der höchste Proteingehalt mit 15,90 % ebenso in b2 festgestellt. Der geringste Proteinwert mit 14,00 % wurde in der Variante mit der höchsten N-Düngung gemessen. 2023 war der Proteingehalt deutlich über dem Niveau von 2024. Außerdem wurde 2024 eine signifikante entgegengesetzt gerichtete Korrelation zwischen dem Ertrag und dem Proteingehalt festgestellt (z-1), die besagt, dass mit steigendem Ertrag der Proteingehalt sinkt.

Wie aus Tabelle 6 zu entnehmen, wies 2022 die ungedüngte Variante das höchste TKG mit 0,77 g auf, während bei 50 kg N/ha das geringste TKG mit 0,62 g gemessen wurde. Die Variante mit 100 kg N/ha war minimal geringer als die Kontrollvariante mit 0,75 g. 2023 lagen die TKG-Werte insgesamt höher als 2022 und 2024. Der höchste Wert wurde mit 0,79 g in b1 gemessen und fiel bei höherer N-Düngung bis auf 0,76 g ab. Es lag eine signifikante entgegengesetzt gerichtete Korrelation zwischen der N-Düngung und dem TKG (d-1) vor. 2024 war das Tausendkorngewicht über alle Versuchsvarianten konstant 0,75 g und unabhängig von dem N-Einsatz.

In Abbildung 19 sind die Tausendkorngewichte der Versuchsjahre 2022 bis 2024 in Abhängigkeit von den Düngestufen dargestellt.

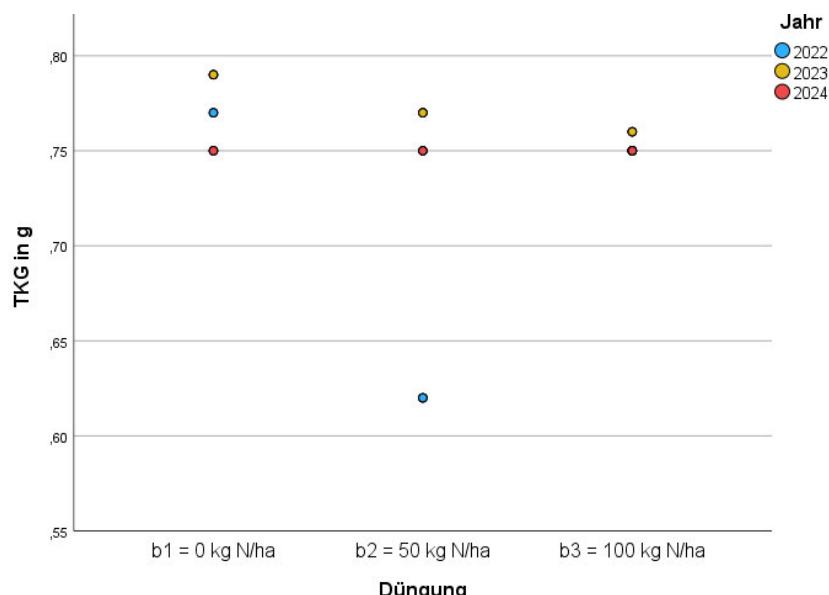


Abbildung 19: Streudiagramm der TKG-Werte von Amaranth der Jahre 2022, 2023 und 2024 unterteilt nach Düngestufen

Abbildung 19 zeigt, dass 2022 das TKG in b2 deutlich geringer als in b1 (0,77 g) und b3 (0,75 g) ist. Es ist zu erkennen, dass im Jahr 2023 mit zunehmender Düngestufe, das TKG kontinuierlich abnimmt. 2024 bleibt das TKG über alle Varianten konstant und teilt sich in b3 den Messwert mit dem von 2022.

5.3 Ergebnisse von Chia aus den Jahren 2022, 2023 und 2024

In Tabelle 7 sind die mittleren Kornerträge, die zugehörigen Standardabweichungen ($\pm s$) sowie die entsprechenden Variationskoeffizienten aufgelistet. Außerdem sind die Proteingehalte und die Tausendkorngewichte der drei Stickstoffdüngungsstufen (b1, b2 und b3) für die Jahre 2022, 2023 und 2024 von Chia festgehalten.

Tabelle 7: Arithmetisches Mittel des Ertrags mit Standardabweichung sowie Variationskoeffizient, Proteingehalt und Tausendkorngewicht von Chia je nach Düngestufe in den Jahren 2022, 2023 und 2024

Ertrag MW [kg/ha] $\pm s$ [kg/ha] (Variationskoeffizienten [%])													
Düngestufe	n	2022		SiG.	n	2023		SiG.	n	2024		SiG.	
b1 = 0 kg N/ha	3	171,54	\pm 48,57 (28,31)	a A	4	352,46	\pm 74,05 (21,01)	a B	4	749,03	\pm 55,55 (7,42)	a C	
b2 = 50 kg N/ha	4	276,47	\pm 64,99 (23,51)	b A	4	598,31	\pm 362,04 (60,82)	a B	4	909,17	\pm 139,25 (15,32)	a B	
b3 = 100 kg N/ha	4	155,68	\pm 15,43 (9,91)	a A	4	308,86	\pm 59,06 (19,12)	a B	4	830,92	\pm 55,06 (6,63)	a C	
Proteingehalt [%]													
Düngestufe	n	2022		n	2023		n	2024					
b1 = 0 kg N/ha	0	keine Angabe		1	22,25 ^{z-1}		1	18,70 ^{d1 z1}					
b2 = 50 kg N/ha	0	keine Angabe		1	24,43 ^{z-1}		1	20,40 ^{d1 z1}					
b3 = 100 kg N/ha	0	keine Angabe		1	21,35 ^{z-1}		1	22,40 ^{d1 z1}					
Tausendkorngewicht [g]													
Düngestufe	n	2022		n	2023		n	2024					
b1 = 0 kg N/ha	1	1,18 ^{d1}		1	1,32 ^{z-1}		1	1,49 ^{d1 z1}					
b2 = 50 kg N/ha	1	1,27 ^{d1}		1	1,24 ^{z-1}		1	1,51 ^{d1 z1}					
b3 = 100 kg N/ha	1	1,28 ^{d1}		1	1,38 ^{z-1}		1	1,53 ^{d1 z1}					

^d signifikanter Zusammenhang mit $p \leq 0,05$, d1/d-1 positive/negative gerichtete Korrelation zwischen den abhängigen Variablen und N-Düngung (Korrelation)

^z signifikanter Zusammenhang mit $p \leq 0,05$, z1/z-1 positive/negative gerichtete Korrelation zwischen den abhängigen Variablen (Korrelation)

a signifikanter Unterschied zwischen Mittelwerten (a/b: Spalten und A/B/C: Zeilen) mit $p \leq 0,05$, die nicht denselben Buchstaben tragen (Einfaktorielle Variansanalyse Tukey-HSD-Test)

Wie in Tabelle 7 aufgelistet, war 2022 der Ertragsmittelwert in der höchsten Düngestufe mit 155,68 kg/ha am niedrigsten, während der signifikant höchste Wert mit 276,47 kg/ha bei 50 kg N/ha gemessen wurde. Die Streuung sank mit steigender N-Düngung von einem VK von 28,31 auf 9,91 %. Auch im Jahr 2023 wurde bei 100 kg N/ha der geringste Ertrag mit 308,86 kg/ha gemessen. Hingegen lag der höchste Ertrag mit 598,31 kg/ha in b2. In der ertragreichsten Variante 2023 war der VK ca. dreimal so groß wie in den anderen Varianten. 2023 lagen die Chiaerträge in jeder Variante etwa doppelt so hoch wie im Vorjahr. 2024 lagen die Erträge mindestens 52 % über den Erträgen von 2023, jedoch wurden die Erträge mit einer anderen Sorte ermittelt. Die Ertragssteigerung von 2022 zu 2023 konnte signifikant festgestellt werden, sowie die Erträge 2024 bis auf b2 signifikant höher waren als 2023. Der höchste Ertrag 2024 wurde in b2 mit 909,17 kg/ha festgestellt, wobei der VK mit 15,32 % in Relation zu den anderen mittleren Düngestufen der Jahre gering war. Im Jahr 2024 wurden allgemein geringe Variationskoeffizienten festgestellt. Der geringste Ertrag wurde in b1 mit 749,03 kg/ha gemessen. Bis auf das Jahr 2022 in der mittleren Düngestufe konnten keine signifikanten Unterschiede der Erträge bei gesteigerter N-Menge festgestellt werden.

Wie in Tabelle 7 abzulesen, lag 2023 der höchste Proteingehalt mit 24,43 % in der Düngestufe mit 50 kg N/ha (b2) vor. In der unbehandelten Variante (b1) betrug der Wert 22,25 %, während in der höchsten Düngestufe der niedrigste Proteingehalt mit 21,35 % gemessen wurde. Der Proteingehalt 2024 stieg mit zunehmender Stickstoffdüngung kontinuierlich an, worin eine signifikante gleichgerichtete Korrelation zwischen der N-Düngung und dem Proteingehalt vorlag (d1). Bei 0 kg N/ha lag der Proteingehalt bei 18,70 % und stieg bei der maximalen Düngung auf 22,40 % an.

Des Weiteren zeigte sich 2022 das niedrigste Tausendkorngewicht mit 1,18 g in der Kontrollvariante (siehe Tabelle 7). In den Düngestufen b2 und b3 stieg das TKG auf 1,27 g bzw. 1,28 g an. 2023 wurde das höchste TKG in b3 und das niedrigste TKG in b2 gemessen. Im Gegensatz zu 2023 lag im Jahr 2022 eine signifikante gleichgerichtete Korrelation zwischen dem TKG und der N-Düngung vor (d1). Außerdem wurde 2023 eine signifikante entgegengesetzt gerichtete Korrelation zwischen dem Proteingehalt und dem TKG festgestellt (z-1). Das TKG 2024 erhöhte sich mit zunehmender Stickstoffgabe. In b1 betrug das TKG 1,49 g und stieg in b3 auf 1,53 g an. Somit ist eine signifikante gleichgerichtete Korrelation zwischen der N-Düngung und dem TKG festgestellt wurden (d1). Des Gleichen wurde eine signifikante gleichgerichtete Korrelation zwischen dem Proteingehalt und dem Tausendkorngewicht ermittelt (z1).

6. Diskussion

6.1 Diskussion Quinoa

6.1.1 Diskussion Ertrag von Quinoa

Die zur Verfügung stehenden Daten der vorliegenden Arbeit zeigen, dass in allen Jahren bei der höchsten Düngestufe mit 100 kg N/ha der höchste Ertrag produziert wurde (siehe Tabelle 4 und Tabelle 5). Bis auf die Sorte ST 240102 lag eine gleichgerichtete signifikante Korrelation zwischen der N-Düngung und den Ertrag vor, was mit gesteigertem N-Einsatz einen höheren Ertrag zur Folge hatte. Der ANOVA-Test bestätigte 2022 einen signifikanten Ertragsunterschied zwischen den Düngestufen ($p = 0,002$). Anschließend ergab der Post-Hoc-Test, dass insbesondere der Unterschied zwischen der Kontrolle und der höchsten Stickstoffgabe signifikant war ($p = 0,002$). Des Weiteren konnte 2024 ein signikanter, höherer Ertrag mit höherer N-Düngung von b1 zu b2 festgestellt werden. Damit lässt sich $H_{0,1}$ verwerfen, da in zwei von fünf Ertragsuntersuchungen die Höhe der N-Düngung einen signifikanten Effekt auf den Ertrag hatte, der durch die ANOVA untersucht wurde. Dieses Ergebnis deckt sich im Ansatz mit den Ergebnissen von (Schulte auf'm Erley et al. 2005; Geren 2015; Almadini et al. 2019). Die Erträge sind dort desgleichen teilweise signifikant durch die Höhe der N-Düngung beeinflusst wurden. Deskriptiv konnten die durchgeföhrten Untersuchungen analog zum vorliegenden Versuch die Entwicklung der Erträge mit steigender N-Düngung aufweisen. Durch die gesteigerte N-Menge kann, wie (Schubert 2018) erläutert, die Ertragsleistung verbessert werden. Aus Tabelle 4 und Tabelle 5 ist zu entnehmen, dass bei drei von fünf Messergebnissen die gesteigerte Stickstoffdüngung eine stabilisierende Wirkung auf die Streuung hat. (Almadini et al. 2019) schließt auf die entscheidende Funktion von Stickstoff in der Pflanze, was die metabolische Aktivität stimuliert und die Stoffwechselprodukte beschleunigt. Die Autoren begründen dadurch eine verbesserte Erntequalität und -quantität. (Geren 2015) spricht sich für eine Düngung von 150 kg N/ha aus, da diese Düngestufe unter den mediterranen Bedingungen in der Türkei den höchsten Ertrag mit 2,95 t/ha und einen Proteingehalt von 16 % erzielte. Bei weiterer Steigerung der Düngung fällt der Ertrag in der Untersuchung des Autors ab, was auf einen sinkenden Grenzertrag hindeutet. Diesen Effekt beschreibt (van Grinsven et al. 2022). (Schulte auf'm Erley et al. 2005) betont, dass Quinoapflanzen stark auf die Stickstoffdüngung reagieren. Dabei stieg der Körnertrag in der Untersuchung der Autoren von der Kontrollvariante zur 120 kg N/ha-Variante von 1790 auf 3495 kg/ha an, was eine Steigerung von 194 % ist. Solch enorme Steigerung zwischen den Düngestufen konnte im Versuchsjahr 2024 bei der Sorte 240011 im mitteldeutschen Trockengebiet festgestellt werden. Dabei lag der Ertragszuwachs von der Kontrolle zur höchsten Düngestufe bei 259 % (1082 kg/ha) (siehe Tabelle 5).

Mit den ANOVA- und Tukey-HSD-Post-Hoc-Ergebnissen wurde 2023 signifikant mehr geerntet als 2022. Damit lässt sich $H_{0,5}$ verwerfen und $H_{1,5}$ wird angenommen, die besagt, dass die Witterungsbedingungen einen signifikanten Einfluss auf den Ertrag der untersuchten Kulturen, hier auf Quinoa haben. Der aufgetretene Jahreseffekt könnte auf die trockene Witterung 2022 zurückführen sein, da in der Hauptwachstumsphase Niederschlagsereignisse qualitativ und quantitativ fehlten (siehe Abbildung 12). Dagegen war 2023 ein warmes und feuchtes Jahr, was ein hohes Ertragspotenzial mit idealen Wachstumsbedingungen geboten hat (siehe Abbildung 13). Zwar wird Quinoa von (Sosa-Zuniga et al. 2017; Angeli et al. 2020) als trockenheitstolerant beschrieben, jedoch hat die Verfügbarkeit von Wasser einen Einfluss auf den Ertrag. Das zeigen die Untersuchungen von (Geren 2015), wo im Versuchsjahr 2014 95 % mehr Niederschlag im betrachteten Zeitraum gefallen ist als 2013. Das führte in der Studie von (Geren 2015) zu einem durchschnittlichen Mehrertrag von rund 14 %. Der Autor beschreibt den gestiegenen Ertrag im Jahr 2014 im Vergleich zu 2013 als signifikanter Jahreseffekt, der durch die höhere Feuchtigkeit begründet ist. 2023 gab es im Vergleich zu 2022 ca. 95 % mehr Niederschlag während der Hauptwachstumsphase von April bis August. In Relation zu der Studie von (Geren 2015) zeigt sich ein wesentlich stärkerer Ertragsanstieg (+946 %) von 2022 zu 2023. Im Hinblick auf die Temperatur sind die Jahre vergleichbar warm gewesen (siehe Abbildung 12 und Abbildung 13). Der Versuchsaufbau der Jahre war identisch (siehe Abbildung 21 und Abbildung 22). Demnach lässt sich die Ertragssteigerung durch den Jahreseffekt begründen. Mögliche entstandene Fehler in der Durchführung und Auswertung der Ergebnisse sind dabei nicht bekannt. Dennoch ist diese enorme Ertragsentwicklung zu hinterfragen.

Die Jahre 2022 und 2023 lassen sich nicht mit dem Versuchsjahr 2024 vergleichen, da die Sorte Jessie aus den beiden vorangegangenen Jahren nicht im Versuchsaufbau 2024 enthalten war. Wie 2024 zu sehen ist, können Sortenunterschiede extreme Auswirkungen auf den Körnertrag haben (siehe Abbildung 15). Dabei waren die abiotischen Bedingungen und Standortfaktoren für alle Sorten 2024 identisch. Das zeigt, dass jede Sorte individuell auf den Standort, die Witterung und die Bestandesführung reagiert. Im Versuchsjahr 2024 wurde ein maximaler Ertragsunterschied der Höchsterträge von 59 % gemessen. Nach den ANOVA- und Tukey-HSD-Post-Hoc-Ergebnissen traten in jeder Düngestufe signifikante Unterschiede zwischen den Sorten auf. Damit lässt sich $H_{0,6}$ verwerfen und $H_{1,6}$ annehmen, die besagt, dass es signifikante Unterschiede zwischen den Quinoasorten gibt. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit dem von (Präger et al. 2018), wo der maximale Ertragsunterschied zwischen den Sorten 40 % betrug und signifikante Ertragsunterschiede nachgewiesen wurden.

Sorte 1 (ST 240011) zeigt die stärkste Reaktion auf die Stickstoffdüngung, jedoch liegt der Ertrag der Sorte 3 (Quipu) in jeder Düngestufe höher als Sorte 1 (siehe Tabelle 5). Die Sorte ST 240011 wies als einzige Sorte einen signifikanten Ertragsunterschied bei gesteigerter N-

Düngung auf. Sorte 2 (ST 240102) zeigt keine ertragssteigernde Reaktion auf eine Erhöhung der N-Düngung. Der Körnertrag dieser Sorte bewegt sich im unteren Mittelfeld. Die Sorte Quipu überzeugt bereits in der Kontrollvariante mit einem sehr hohen Ertrag. Mit Steigerung der N-Düngemenge stieg sogleich der Ertrag an, was jedoch nicht signifikant war. Die Sorte hat 2024 in jeder Düngestufe den meisten Ertrag geliefert, jedoch nur in b2 einen signifikanten Mehrertrag als die anderen Sorten erwiesen. Diese hohen Erträge wurden mit einer vergleichsweise mittleren Standardabweichung erreicht. Das zeigt eine Ertragsstabilität dieser Sorte auf dem Standort. Sollte eine extensive Bewirtschaftung von Quinoa erfolgen, kann die Sorte Quipu bereits mit 0 kg N/ha solide Erträge produzieren.

Mit einer Aussaatstärke von 188 bzw. 150 Kö/m² wurden mehr als fünfmal so viele Körner je Quadratmeter gedrillt als in den Versuchen von (Schulte auf'm Erley et al. 2005; Almadini et al. 2019). Dort betrug die Saatstärke 30 Körner je Quadratmeter. Das (TFZ 2025) empfiehlt in Deutschland bei der Körnernutzung von Quinoa eine Aussaatstärke von 80 bis 100 Kö/m². (Jacobsen 2017) erläutert, dass eine tendenziell höhere Saatstärke bevorzugt werden soll, um gleichmäßige Pflanzen und damit eine homogene Abreife zu erzielen. Bei der Bonitur am 08.06.2025 (siehe Tabelle 1) wurde eine Bestandesdichte von 62 bis 81 Pflanzen je Quadratmeter ausgezählt. Bei einer anfänglichen Aussaatstärke von lediglich 30 Kö/m² und zusätzlichen Verlusten durch einen unvollständigen Feldaufgang oder andere Faktoren ergibt sich letztlich eine geringere Pflanzenanzahl pro Quadratmeter und damit eine reduzierte Bestandesdichte. Nach den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung wäre das ein sehr dünner Bestand. Zwar zeigen die Erträge von (Schulte auf'm Erley et al. 2005), dass mit geringen Bestandesdichten Erträge bis 3500 kg/ha möglich sind, jedoch im Jahr 2023 diese Erträge mit höherer Bestandesdichte auch erreicht wurden. Allerdings wurden die Pfl/m² 2023 nicht gezählt. Es lässt sich aus Tabelle 1 und Tabelle 5 ablesen, dass die Sorte 3 (Quipu) mit der geringsten Bestandesdichte, 8 bzw. 19 Pfl/m² weniger als die anderen Sorten, in jeder Düngestufe den höchsten Ertrag lieferte. Das spricht für eine gewisse Kompensationsfähigkeit von Quinoa, speziell für die Sorte Quipu, wobei das TKG der Sorte geringer als das der anderen Sorten war. Eine Kompensation von Quinoa wurde bisher nur in Bezug auf die Anpassung an Standort- oder Umweltbedingungen beschrieben (Sosa-Zuniga et al. 2017; Angeli et al. 2020). Anhand des geringen TKGs und dem hohen Ertrag lässt sich daraus schließen, dass der Ertrag hauptsächlich über eine hohe Anzahl Körner je Pflanze gebildet wurde. Vor diesem Hintergrund könnte der Sachverhalt womöglich doch mit der Bestandesdichte zusammenhängen, da der Bestand mit der geringsten Anzahl Pfl/m² den höchsten Ertrag lieferte. Das würde für eine geringere Aussaatstärke von beispielsweise 30 Kö/m² wie (Schulte auf'm Erley et al. 2005; Almadini et al. 2019) und gegen hohe Aussaatstärken wie 150 oder 188 Kö/m² aus der vorliegenden Versuchsdurchführung sprechen. Im Hinblick auf eine angestrebte

Bestandesdichte, die von der Aussaat bis zur Ernte sinken kann (siehe Feldaufgang Tabelle 1), wäre vermutlich eine Aussaatstärke von 80 bis 100 Kö/m², wie das (TFZ 2025) beschreibt, sinnvoll.

Es fällt auf, dass die ausgezählten Pfl/m² aller Pseudogetreidearten stark von der Anzahl der ausgesäten Kö/m² abweichen. Des Weiteren wurde ein heterogener Feldaufgang beobachtet. Diese Gegebenheiten lassen auf schlechte Keimbedingungen der Saatkörner schließen. Nach den Daten von Abbildung 24 und Abbildung 25 aus dem Anhang lassen sich die Niederschlagsverteilung und der Temperaturverlauf im April und Mai 2024 rekonstruieren. Dabei ist zu sehen, dass im April 2024 knapp 20 mm Niederschlag auf viele kleine Ereignisse verteilt, mit je 0,1 bis 6 mm, gefallen ist. Kleine Niederschlagsmengen infiltrieren zwar gut in den Boden, da der trockene Oberboden diese aufnimmt, jedoch gelangt die Feuchtigkeit aufgrund der geringen Menge nicht in tiefere Bodenschichten, wie (Assouline 2013) beschreibt. Nach dem letzten Niederschlag bis zur Aussaat betragen die Tageshöchsttemperaturen 15 bis 26 °C, was zu einer verstärkten Verdunstung führte. Ab dem 26.04.2024 bis zur Aussaat am 14.05.2024 folgte kein Niederschlagsereignis, wodurch der Saathorizont kaum Keimwasser zur Verfügung stellen konnte, trotz der Kapillarität, was das Bodenwasser aus tieferen Bodenschichten Richtung verdunsteter Oberfläche befördert (Or und Tuller 2023). Die vor der Saat durchgeführte Saatbettbereitung arbeitete tiefer als der 2 cm tiefe Saathorizont, aber förderte keine feuchte Erde in diesen Bereich. Da die Körner von Quinoa, Amarant und Chia sehr klein sind, wurde nach der Saat der Boden angewalzt, um mehr Bodenkontakt für die Saat herzustellen, wie (Jacobsen 2003; TFZ 2025) empfehlen. Die Samen, die ausreichend Keimwasser zur Aussaat zur Verfügung hatten, sind zeitnah gekeimt und zeigten bereits eine Woche nach der Aussaat ausgefaltete Keimblätter. Ab dem 19.05.2024 sind auf mehreren aufeinanderfolgenden Tagen größere Mengen Niederschlag gefallen, wodurch die anderen Samen gekeimt sind.

Wie die Bonitur in Tabelle 2 auflistet, haben die Quinoasorten bereits am 26.06.2024 Vergilbungen an den unteren Blättern. Diese Verfärbung nennt sich Chlorose und deutet auf Stickstoffmangel hin. Das beruht darauf, dass N in der Pflanze mobil ist und bei unzureichender Versorgung aus den älteren Blättern in jüngere Pflanzenteile umgelagert wird. Das Ziel dabei ist, dass das Wachstum in dem jungen Gewebe aufrecht gehalten wird. Bleibt der Mangel bestehen, kann es zu Nekrosen in den betroffenen Blättern kommen, da der gestörte Zellstoffwechsel zum Absterben von Gewebe führt (Schubert 2018). Dementsprechend wurde Quinoa 2024 zu spät gedüngt, da die Pflanze bereits Mangelscheinungen zeigte und der Dünger noch zusätzlich Zeit benötigt, um umgesetzt und aufgenommen zu werden.

6.1.2 Diskussion Proteingehalt von Quinoa

Der Datensatz auf dem die vorliegende Untersuchung basiert, enthält keine parzellenweise gemessene Proteinwerte. Es wurden Mischproben aus den vier Wiederholungen je Variante zusammengestellt und analysiert. Um Hypothesentests durchführen zu können, erfordert es innerhalb jeder Gruppe eine Schätzung der Streuung (Varianz). Wenn nur eine Beobachtung je Gruppe vorliegt, kann keine Varianz berechnet werden und daher auch kein Teststatistik mit verlässlichem Standardfehler gebildet werden. Aus diesem Grund müssen für die Anwendung von t-Test oder ANOVA die Voraussetzung erfüllt sein, dass die Stichprobe mehr als eine Beobachtung je Gruppe enthält (Hoffmann et al. 2023). Demzufolge werden die Daten des Rohproteins und Tausendkorngewichts deskriptiv bewertet.

Die Ergebnisse aus Tabelle 4 und Tabelle 5 zeigen, dass in nahezu allen Versuchsdurchführungen der Proteingehalt vergleichbar auf eine Stickstoffdüngung reagiert. Das steht im Einklang zu den durchgeföhrten Studien aus Abbildung 5. 2023 stieg der Proteingehalt mit jeder Steigerung der N-Düngestufe deutlich an und lag bei 100 kg N/ha mit 18,20 % höher als die Messungen von (Geren 2015; Almadini et al. 2019) mit Stickstoffgaben bis zu 175 kg/ha. Die Proteingehalte aus 2024 stiegen bei Sorte 1 und 2 mit der ersten N-Gabe von 13,40 bzw. 13,50 auf 14,60 % an (siehe Abbildung 16). Mit weiterer Steigerung der N-Düngung zeigten die Sorten keine weitere Reaktion im Proteinwert. Das könnte ein auf eine Sättigung hindeutet, was bedeutet, dass mit steigender N-Düngung der Proteingehalt unweentlich zunimmt, was in dem Fall ein Gleichbleiben des Proteingehalts ist (van Grinsven et al. 2022). Solche Beobachtungen wurden in den durchgeföhrten Studien nicht getätigt. Die Messungen von 2024 befinden sich oberhalb der den Daten von (Geren 2015), jedoch unterhalb der von (Almadini et al. 2019). Mit den Angaben von (Gonzalez et al. 2012) sind die Proteingehalte deckungsgleich. Eine Proteinstiegerung um 63 % von 0 bis 100 kg N/ha wie (Geren 2015) konnte im gesamten Versuch nicht festgestellt werden. Jedoch lag die maximale prozentuale Veränderung des Proteingehaltes 2023 von 0 auf 100 kg N/ha bei 17 %, was höher ist als die von (Almadini et al. 2019). Bis auf die Sorte Quipu im Jahr 2024 wurde in allen Jahren und Sorten eine signifikante gleichgerichtete Korrelation zwischen der N-Düngung und dem Proteingehalt festgestellt. Quipu zeigte neben niedrigeren Proteingehalten von 11,90 bis 12,5 % auch keine proteinsteigende Reaktion auf gesteigerte N-Gaben. 2023 waren die Proteingehalte höher als 2024. Diese Messungen lassen sich jedoch nicht miteinander vergleichen, da neben der Sortenänderung von 2023 auf 2024 die Analysemethode des Proteingehalts geändert wurde. Das sind zwei Faktoren, die nicht eindeutig zu identifizieren sind. Grundsätzlich konnte in den Studien von (Geren 2015; Almadini et al. 2019) keine signifikanten Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Proteingehalt festgestellt werden, jedoch berichten beide Studien über den Anstieg des Proteingehalts mit steigender N-Düngung (siehe Abbildung 5).

Eine signifikante gleichgerichtete Korrelation zwischen dem Quinoaertrag und dem Proteingehalt wurde im Jahr 2023 sowie 2024 in der Sorte ST 240011 festgestellt. Der Zusammenhang besteht darin, dass mit steigendem Ertrag der Proteingehalt zugleich ansteigt, da beide Faktoren positiv auf eine steigende Stickstoffdüngung reagieren (siehe Tabelle 4 und Tabelle 5). Das deutet entgegen des typischen Verdünnungseffekt hin, der besagt, dass mit steigendem Ertrag der Proteingehalt sinkt (Mengel et al. 2001). Des Weiteren wurde eine signifikante entgegengesetzt gerichtete Korrelation zwischen dem Ertrag und dem TKG sowie dem Proteingehalt und dem TKG im Jahr 2023 festgestellt. Das lässt sich begründen, da mit steigender N-Düngung der Ertrag und der Proteingehalt steigen und die Körner kleiner bzw. leichter werden, da mehr Körner je Pflanze gebildet werden. Grund dafür ist, dass durch die gute N-Versorgung die Pflanze Stickstoff und Assimilate in eine steigende Kornanzahl investiert, da eine zusätzliche Kornanzahl potentiellen Ertrag bringt, so (Beral et al. 2020). Der Proteingehalt steigt weiterhin bei ausreichender N-Versorgung. Das TKG steht dementsprechend unter Konkurrenzdruck und kann nicht steigen, da die gleiche Menge an Assimilaten auf mehr Körner aufgeteilt werden, wie von (Beral et al. 2020; Vicentin et al. 2024) beschrieben.

6.1.3 Diskussion Tausendkorngewicht von Quinoa

Das Tausendkorngewicht wurde analog zum Proteingehalt mit Mischproben analysiert. Demnach kann ebenso kein Hypothesentest durchgeführt werden.

Das TKG aus 2022 (siehe Tabelle 4) ist mit 0,7 und 1,0 g sehr gering. Ein Abfall des TKGs im Jahr 2022 hat sich in der ersten Düngestufe erkennen lassen, wobei in der zweiten Düngestufe dieses wieder auf den Ursprungswert aus der Kontrolle anstieg. Außerdem konnte analog zu 2023, im Jahr 2024 bei der Sorte ST 240011 eine signifikante entgegengesetzt gerichtete Korrelation festgestellt werden, sodass mit steigendem Körnertrag das TKG sinkt. Dieses Verhalten wurde bereits in Abschnitt 6.2.1 beschrieben. Das steht im Einklang von den Ergebnissen von (Geren 2015), welcher die höchsten TKG-Werte in der Kontrollvariante beobachtete. In der Studie hatte der steigende N-Einsatz signifikant sinkende TKG-Werte zur Folge. Im Gegensatz dazu stieg das TKG bei (Almadini et al. 2019) signifikant von 0 auf 80 und von 0 auf 160 kg N/ha an. Dementsprechend lässt sich anhand der Studien kein eindeutiger Effekt der N-Düngung auf das TKG formulieren (siehe Abbildung 6). Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass mit steigender Stickstoffdüngestufe tendenziell das TKG geringer wird. Alle gemessenen Werte der Versuchsjahre liegen unterhalb der Werte von (Geren 2015) aber stimmen mit den Ergebnissen von (Almadini et al. 2019) überein.

Die Sorten ST 240102 und Quipu reagierten auf die N-Düngung lediglich in der ersten Stufe. Bei 50 kg N/ha war das TKG der beiden Sorten am höchsten und fiel bei weiterer N-Gabe. Des Weiteren lag bei Quipu ein signifikante entgegengesetzt gerichtete Korrelation zwischen dem Proteingehalt und dem TKG vor. Das bedeutet, dass mit steigendem Proteingehalt das TKG sinkt. Solche Korrelation wurde in der Studie von (Bai et al. 2025) bei Weizen festgestellt. Dabei wurde dieses Verhältnis durch eine verkürzte Kornfüllungsphase unter Stressbedingungen festgestellt, wodurch die Stärkesynthese stärker beeinträchtigt wurde als die Proteinsynthese. Dadurch sinkt das Kornvolumen und somit das TKG, aber die Proteinkonzentration steigt an. 2024 waren zwar warme Verhältnisse, jedoch trafen Stressbedingungen durch Dürre oder Hitze nicht ein, da die anderen Sorten keine vergleichbaren Reaktionen gezeigt haben. Das spricht für eine sortenspezifische Reaktion von Quipu.

6.1.4 Bearbeitung der Forschungsfragen für Quinoa

Forschungsfrage 1: Wie wirkt sich die Höhe der Stickstoffdüngung (0, 50, 100 kg N/ha) auf den Körnertrag von Quinoa, Amaranth und Chia aus?

In allen Quinoaversuchen, bis auf die Sorte ST 240102 ist der maximale Ertrag bei maximaler Stickstoffdüngung von 100 kg N/ha erzielt wurden. Zwischen der Stickstoffdüngung und dem Körnertrag lag bis auf die Sorte ST 240102 eine signifikante gleichgerichtete Korrelation vor. In zwei Versuchsergebnissen wurde eine signifikante Steigerung des Ertrags mit steigender N-Düngung festgestellt. Mit den Ergebnissen lässt sich die Nullhypothese verwerfen und die Alternativhypothese annehmen, die besagt, dass die Höhe der Stickstoffdüngung in mindestens einem Jahr einen signifikanten Einfluss auf den Quinoaertrag hat. Dieser Schluss deckt sich mit der Literatur.

Forschungsfrage 2: In welchem Maße beeinflusst die Stickstoffdüngung den Rohproteingehalt der Körner der drei Pseudogetreidearten?

Der Proteingehalt von Quinoa ist lediglich 2023 mit Steigerung der N-Gaben adäquat angestiegen und erreichte bei der höchsten Düngestufe den höchsten Wert. Im Versuchsjahr 2024 konnte eine Steigerung des Proteingehalts bis 50 kg N/ha festgestellt werden. Darüber hinaus fand keine Erhöhung des Proteinwertes statt, was auf eine Sättigung hindeutet. Bei einer Sorte wurde der höchste Proteingehalt in der Kontrolle gemessen. Die Ergebnisse des Versuches deuten darauf hin, dass die Stickstoffdüngung den Proteingehalt gewissermaßen beeinflusst, jedoch nicht so stark wie den Ertrag. Anhand der Beobachtungen zeigt sich eine Tendenz, dass Quinoa mit 50 kg N/ha einen hohen Proteingehalt bildet. Jedoch lassen sich die

Hypothesen aufgrund von fehlendem Hypothesentest nicht überprüfen und dementsprechend keine abgesicherte Aussage treffen. Die Literatur beschreibt ebenso einen Anstieg des Proteingehalts bei steigender N-Düngung, der aber nicht als signifikant eingestuft wird.

Forschungsfrage 3: Welchen Einfluss haben unterschiedliche Stickstoffdüngestufen auf das Tausendkorngewicht der Pseudogetreidekulturen?

Die Stickstoffdüngestufen haben in zwei von fünf Ergebnissen signifikante entgegengesetzte gerichtete Korrelationen mit den Tausendkorngewichten von Quinoa gehabt. Das bedeutet, dass mit einer gesteigerten N-Gabe, das TKG sinkt. In einem Fall war in der mittleren Düngestufe das niedrigste TKG und in zwei Ergebnissen das höchste TKG gemessen wurden. Es lässt sich kein eindeutiger Einfluss der Stickstoffdüngung auf das TKG ermitteln, wobei eine negative Tendenz bei erhöhter N-Düngestufe naheliegend ist, aufgrund der zwei festgestellten signifikanten entgegengesetzten gerichteten Korrelationen. Hypothesentests konnte hier ebenso nicht durchgeführt werden. Die Literatur zeigt signifikante Effekt, wobei jedoch gegenteiliges festgestellt wurde.

Forschungsfrage 4: Welche artspezifischen Empfehlungen lassen sich zur Stickstoffdüngung für den Anbau von Pseudogetreide im mitteldeutschen Trockengebiet ableiten?

Eine N-Düngung von 100 kg/ha führte in allen Jahren zu höheren Quinoaerträgen, ohne dabei den Proteingehalt negativ zu beeinflussen. Daher kann diese Menge für das mitteldeutsche Trockengebiet empfohlen werden. Je nach Jahr ist mit einer N-Düngung von 100 kg/ha der maximale Proteingehalt zu erzielen.

Forschungsfrage 5: Unter welchen Wetterbedingungen liefern die unterschiedlichen Kulturen den höchsten Ertrag?

Ein Jahreseffekt wurde 2022 und 2023 festgestellt, da die Quinoaerträge 2022 signifikant geringer waren als 2023. Da der Versuchsaufbau identisch war und 2022 wesentlich trockenere Witterung herrschte, könnte der geringe Ertrag 2022 auf die trockenen Bedingungen zurückzuführen sein. Im Versuchsjahr 2023 herrschten feuchte und warme Bedingungen, was die Quinoapflanzen für die Ertragsbildung genutzt haben. Die $H_{0,5}$ kann somit verworfen und $H_{1,5}$ angenommen werden. Dieser Schluss deckt sich mit der Literatur.

Forschungsfrage 6: Welche Quinoasorte hat im Erntejahr 2024 den besten Körnertrag sowie Proteingehalt geliefert?

Die Quinoasorte Quipu kann mit einem hohen Ertragsniveau in allen N-Düngestufen überzeugen und weist im Maximalertrag eine geringe Standardabweichung auf, was auf eine

ertragsstabile und standortangepasste Sorte schließen lässt. Dabei war der Ertrag der Sorte in der mittleren Düngestufe signifikant am höchsten. In den anderen Stufen war die Sorte mit jeweils einer anderen Sorte auf einem signifikanten Ertragsniveau. Jedoch ist der Proteingehalt von Quipu niedriger als die der anderen getesteten Sorten. Die Sorte ST 240011 zeigt eine starke, teils signifikante ertragssteigernde Reaktion auf die Stickstoffdüngung. Bei maximaler Düngung liegt der Ertrag unterhalb von Quipu, was jedoch nicht signifikant niedriger ist. Das deutet auf ein hohes Nährstoffnutzungspotenzial hin. ST 240102 liefert die geringsten Erträge aber hohe Proteingehalte, die mit ST 240011 vergleichbar sind. Die H_0 kann mit dem Ergebnis letztlich verworfen und H_1 angenommen werden. Diese besagt, dass signifikante Ertragsunterschiede zwischen den Sorten vorliegen, dabei jedoch auf signifikante Unterschiede im Proteingehalt nicht überprüft wurden.

6.2 Diskussion Amarant

6.2.1 Diskussion Ertrag von Amarant

Die Ergebnisse der Jahre 2022, 2023 und 2024 zeigen, dass in zwei von drei Jahren die höchste Stickstoffdüngung von 100 kg/ha den höchsten Ertrag lieferte (siehe Tabelle 6). Dabei wurde der höchste Ertrag bei höchster Düngung lediglich im Jahr 2022 signifikant festgestellt. Vergleichbares beschreibt (Myers 1998), dass bei 90 kg N/ha das ökologische und ökonomische Optimum liegt. Auffällig ist, dass 2023 der höchste Körnertrag in der Kontrolle gemessen wurde. Dennoch wurden in dem Jahr keine signifikanten Unterschiede zwischen den Erträgen der einzelnen Düngestufen festgestellt. 2022 lagen die Erträge mindestens 1000 kg/ha unterhalb der von (Myers 1998). In der Untersuchung des Autors zeigt sich ein Sättigungseffekt. Dieses Phänomen kann mit dem abnehmenden Grenzertrag begründet werden, da auf dem Niveau von 90 kg N/ha der Ertrag bei höherer Zufuhr von Stickstoff unwesentlich ansteigt, was (van Grinsven et al. 2022) beschreibt. Dieser Effekt wurde in der vorliegenden Untersuchung teilweise festgestellt, da 2023 zwar deskriptiv der Ertrag mit der N-Zufuhr abnahm, was jedoch nicht signifikant war. Die Ertragsdifferenzen zwischen den anderen Studien und dem Ertrag von 2022 werden von (Pospišil et al. 2006) zu (Schulte auf'm Erley et al. 2005) größer. Im Hinblick auf den prozentualen Ertragszuwachs von der Kontrollvariante zur 100 kg N/ha Variante liegt das Ergebnis von 2022 mit 90 % über dem von (Pospišil et al. 2006) mit 11 %. Das Jahr 2022 zeigt im gesamten Versuch die größte Reaktion des Ertrags auf eine gesteigerte N-Düngung. Des Weiteren sank der VK mit der Steigerung der N-Stufe, was auf einen stabilisierenden Einfluss auf die Erträge hindeutet. Zwischen der Stickstoffdüngung und dem Ertrag lag in dem Jahr eine signifikante gleichgerichtete Korrelation vor, was bedeutet, dass mit

steigender Düngestufe der Ertrag ansteigt. Die $H_{0,1}$ kann somit verworfen werden, da 2022 in der höchsten Düngestufe der signifikant höchste Ertrag gemessen wurde. 2024 hingegen fiel der Körnertrag in b2 signifikant ab, war jedoch in b1 und b3 auf einem signifikanten Niveau. Damit kann $H_{1,1}$ angenommen werden, die besagt, dass die Höhe der Stickstoffdüngung in mindestens einem Jahr die N-Düngung einen signifikanten Einfluss auf den Ertrag hat. Ein vergleichbares Ergebnis haben (Pospišil et al. 2006) erhalten, indem nur in einem von drei Jahren, welches ein Trockenjahr war, die Stickstoffdüngung einen signifikanten Effekt auf den Ertrag hatte. (Schulte auf'm Erley et al. 2005) haben ebenso signifikante Ertragssteigerungen mit höherer N-Düngung festgestellt.

Demgegenüber war 2023 der höchste Ertrag mit 3591,51 kg/ha in der Kontrollvariante, wobei jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchsvarianten ermittelt wurden. Körnerträge über 2800 kg/ha wurden in den Studien von (Myers 1998; Thanapornpoonpong 2004; Schulte auf'm Erley et al. 2005; Pospišil et al. 2006) nicht erreicht. Das deutet auf ein enormes Ertragspotenzial im mitteldeutschen Trockengebiet von Amaranth hin, wenn ausreichend Wasser zur Verfügung steht. Im Vergleich dazu fielen in den Versuchsjahren von (Schulte auf'm Erley et al. 2005) 578 bzw. 600 mm Jahresniederschlag, was zu Erträgen von knapp 2800 kg/ha führte. Dies weist auf die zentrale Bedeutung ausreichender Niederschlagsmengen für die Ertragsbildung hin.

Im Jahr 2024 liegen die Erträge zwischen denen von 2022 und 2023. Beachtenswert ist, dass 2023 und 2024 die geringsten Erträge in der mittleren Düngestufe von 50 kg N/ha gemessen wurden. Das trat ebenso in den genannten veröffentlichten Studien nicht auf. Die Körnerträge 2024 halten sich zwischen den Ergebnissen von (Myers 1998; Schulte auf'm Erley et al. 2005; Pospišil et al. 2006) auf.

Der signifikante Ertragsunterschied zwischen dem Jahr 2022 und den Jahren 2023 und 2024 zeigt einen Jahreseffekt, der gegebenenfalls auf die Witterung zurückzuführen ist. Die Jahre 2023 und 2024 sind bis auf b2 nicht signifikant unterschiedlich. Dabei herrschte in beiden Jahren ähnliche Witterung. 2022 begrenzte die geringe Niederschlagsmenge das Ertragspotenzial von Amaranth (siehe Abbildung 12). Diesen Schluss ziehen (Pospišil et al. 2006) ebenso aus einem ihrer Versuchsjahre. Die signifikante Ertragssteigerung mit den Düngestufen ist auf die Trockenheit zurückzuführen, da unter trockenen Bedingungen die Stickstoffmineralisation im Boden eingeschränkt abläuft (siehe Abschnitt 2.2.3). Dementsprechend steht der Stickstoff im Boden begrenzt zur Verfügung, wodurch die Pflanzen auf eine Stickstoffdüngung stärker reagieren. Ähnliches stellten (Pospišil et al. 2006) fest. Aufgrund des Jahreseffekts mit der stark abweichenden Witterung kann $H_{0,5}$ verworfen und $H_{1,5}$ angenommen werden.

Zum Zeitpunkt der Ernte nennen (Pospišil et al. 2006) eine Bestandesdichte von 40 Pfl/m². Das lässt sich mit der Bonitur aus Tabelle 1 vergleichen, wo rund 41 Pfl/m² am 08.06.2024 notiert wurden. Später im Vegetationsverlauf wurde keine erneute Bonitur der Bestandesdichte durchgeführt. Hingegen war die Bestandesdichte von (Schulte auf'm Erley et al. 2005) mit 30 Pfl/m² etwas geringer. Die Aussaatstärke von (Myers 1998) lag bei 2,2 kg/ha, was bei einer Keimfähigkeit von 80 % und einem mittleren TKG von 0,75 g rund 235 Kö/m² entspricht. Das ist wesentlich höher als in den verglichenen Studien. Das (TFZ 2022) empfiehlt in Deutschland eine Aussaatstärke von 40 bis 60 keimfähigen Körnern je Quadratmeter. Vor diesem Hintergrund war die Aussaatstärke der Versuche von 2022, 2023 und 2024 mit 80 Kö/m² tendenziell zu hoch. Wie jedoch in Tabelle 1 zu erkennen, hat sich die Bestandesdichte auf die Hälfte der Saatstärke reduziert. Die 80 Kö/m² sind dementsprechend sinnvoll, um über die gesamte Vegetationsperiode eine tragbare Bestandesdichte zu erhalten.

Wie in Tabelle 2 zu erkennen, hat Amaranth analog zu Quinoa am 26.06.2024 bereits Stickstoffmangel gezeigt, da vereinzelt gelbe und rote Blätter abfielen. Amaranth hätte hier zeitiger gedüngt werden müssen.

6.2.2 Diskussion Proteingehalt von Amaranth

2023 wurden Proteingehalte zwischen 18,28 und 21,38 % gemessen (siehe Tabelle 6). Diese Werte sind mindestens 1,5 % höher als die von (Pospišil et al. 2006) und mindestens 2,5 % höher als die von (Thanapornpoonpong 2004). Weiterhin sind die Messwerte über den Angaben von (Caselato-Sousa und Amaya-Farfán 2012; Assad et al. 2017). 2024 waren die Proteingehalte von 14,00 bis 15,90 % niedriger als von (Pospišil et al. 2006) und im Bereich von (Thanapornpoonpong 2004). In beiden Jahren war ein Anstieg des Proteingehalts von der Kontrolle zur Variante mit 50 kg N/ha zu verzeichnen. Jedoch fiel dieser bei weiterer Steigerung der Stickstoffdüngestufe ab. Das deutet auf eine Sättigung des Proteingehalt bei steigender Stickstoffdüngung hin (van Grinsven et al. 2022).

Ein signifikanter Einfluss der Stickstoffdüngung auf den Proteingehalt konnte in beiden Versuchsjahren nicht festgestellt werden. Die Hypothesen können wie in Abschnitt 6.1.2 nicht eindeutig verworfen oder angenommen werden. Das Ergebnis der Studie von (Pospišil et al. 2006) zeigt, dass keine signifikanten Unterschiede der Proteinwerte zwischen den N-Behandlungen festgestellt werden konnten. Die Änderung des Proteingehalts zwischen den Düngestufen der Autoren war im Vergleich zum vorliegenden Versuch geringer. Das kann an sortenspezifischen Unterschieden und abweichenden Klimabedingungen liegen, da jede Sorte differenziert veranlagt ist, Stickstoff zu nutzen und Rohprotein zu bilden (Gaju et al. 2011). Die

abweichenden Werte von 2023 und 2024 können zum einen an einen Jahreseffekt gekoppelt und zum anderen durch den Wechsel der Analysemethode begründet werden. Die NIR-Analyse wurde, wie in Abschnitt 4.2.2, mit keiner exakten Kalibrierung von Amarant durchgeführt, wodurch diese Werte lediglich eine mögliche Tendenz geben. Die Elementaranalyse hingegen zeigt eine eindeutige Analyse.

Zwischen dem Ertrag und dem Proteingehalt wurde 2024 eine signifikante entgegengesetzt gerichtete Korrelation festgestellt, die besagt, dass mit steigendem Ertrag der Proteingehalt fällt. Das Phänomen lässt auf den Verdünnungseffekt schließen. Hierbei wird bei hohem Ertrag die verfügbare Stickstoffmenge auf mehr Biomasse bzw. Kornmasse verteilt. Gleichzeitig kann die N-Aufnahme nicht proportional zum Kohlenstoffaufbau ansteigen, wodurch die Proteinkonzentration im Erntegut sinkt. Diesen Vorgang beschreiben (Mengel et al. 2001; Ghimire et al. 2021). (Ghimire et al. 2021) untersuchten diesen Effekt an Winterweizen und zeigten, dass bei weiterer Erhöhung der N-Düngemenge der Proteingehalt zwar ansteigt, jedoch die Beziehung zwischen hohem Ertrag und niedrigeren Proteingehalt nicht vollständig aufgehoben werden kann.

6.2.3 Diskussion Tausendkorngewicht Amarant

2022 ist das TKG insgesamt im Vergleich zur Kontrolle mit erhöhter N-Düngestufe gesunken (siehe Tabelle 6). Nach einem starken Abfall des TKGs zur mittleren Düngestufe, stieg es bei der maximalen Düngestufe nochmals an. 2023 ist das TKG kontinuierlich mit steigender N-Düngung gefallen, wobei eine signifikante entgegengesetzt gerichtete Korrelation festgestellt werden konnte. Das Jahr 2024 zeigt, dass die N-Düngung keinen Einfluss auf das TKG hatte, da der Wert über alle Düngestufen konstant blieb. Somit lässt sich aus dem Jahr 2024 deuten, dass wenn der Ertrag steigt und das TKG konstant bleibt, die Anzahl der Körner je Pflanze ansteigt. Vergleichbares hat (Myers 1998) festgestellt. 2023 hingegen wurde das höchste TKG bei dem Maximalertrag in der Kontrollvariante festgestellt, was einen gänzlich anderen Effekt hat. In dem Fall wurde der hohe Ertrag vermutlich mit wenigen Körnern je Pflanze gebildet, wodurch das TKG höher ausfällt. Das lässt sich damit begründen, dass mehr Assimilate und Nährstoffe je Korn zur Verfügung stehen, sodass die Körner stärker ausgefüllt werden und das einzelne Korngewicht steigt. Damit kann ein Ertragsverlust durch geringere Kornanzahl je Pflanze bzw. je Quadratmeter zum Teil ausgeglichen werden (Sinclair 2021). 2022 stehen die Messwerte in keiner Relation zum Ertrag.

(Pospišil et al. 2006) haben in einem trockenen Versuchsjahr signifikant höhere Tausendkorngewichte in Abhängigkeit der Stickstoffdüngung festgestellt. Dieser Einfluss geht aus der

vorliegenden Untersuchung nicht hervor, da in dem trockenen Jahr 2022 die TKG-Messungen nicht höher waren als in den anderen Jahren. (Myers 1998) stellte keinen signifikanten Effekt auf das TKG fest. Wie in zuvor beschriebenen Abschnitten, können die Hypothesen nicht sicher widerlegt oder angenommen werden. Deskriptiv zeigt sich, dass das TKG im Vergleich zum Ertrag und Proteingehalt weniger stark auf Stickstoff reagiert. Es zeigt sich jedoch, dass die Stickstoffdüngung tendenziell einen negativen Effekt auf das Tausendkorngewicht hat.

6.2.4 Bearbeitung der Forschungsfragen für Amarant

Forschungsfrage 1: Wie wirkt sich die Höhe der Stickstoffdüngung (0, 50, 100 kg N/ha) auf den Kornetrag von Quinoa, Amarant und Chia aus?

In zwei von drei Jahren hat die höchste Düngestufe mit 100 kg N/ha den höchsten Amarant-ertrag geliefert. Dieser Effekt wurde in einem Jahr signifikant abgesichert, wodurch H_{1,1} kann angenommen werden kann. Das deckt sich mit der Literatur.

Forschungsfrage 2: In welchem Maße beeinflusst die Stickstoffdüngung den Rohproteingehalt der Körner der drei Pseudogetreidearten?

Eine Düngung von 50 kg N/ha führte zu einem Anstieg des Proteingehalts im Amarantkorn. Bei weiteren N-Erhöhung fällt dieser wiederum ab, bis teilweise unterhalb der Kontrollvariante. Dies deutet auf einen Sättigungseffekt hin. Des Weiteren könnte ein Verdünnungseffekt durch eine gesteigerte Biomasseproduktion bei höherer N-Versorgung zur Abnahme des Proteingehalts beigetragen haben. Die Stickstoffdüngung konnte auf keinen signifikanten Einfluss auf den Proteingehalt getestet werden, wodurch keine Hypothese sicher ausgeschlossen werden können. Die Literatur zeigt keine signifikanten Effekte von Stickstoff auf den Proteingehalt.

Forschungsfrage 3: Welchen Einfluss haben unterschiedliche Stickstoffdüngestufen auf das Tausendkorngewicht der Pseudogetreidekulturen?

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Steigerung der Stickstoffdüngung zu tendenziell niedrigeren Tausendkorngewichten bei Amarant führt. Das konnte 2023 mit einer signifikanten Korrelation abgesichert werden, wohingegen 2024 die Stickstoffdüngung keinen Effekt hatte, da das TKG konstant geblieben ist. Diese Ergebnisse deuten auf eine Kompensationsfähigkeit der Pflanze hin, bei der je nach Umweltbedingung flexibel zwischen Kornanzahl und Korngewicht ein Ertragsverlust abgesichert wird. Aufgrund von fehlenden Daten konnte kein Hypothesentest

durchgeführt werden. Die Literatur benennt teilweise signifikante, aber auch nicht signifikante Effekte von Stickstoff auf das TKG.

Forschungsfrage 4: Welche artspezifischen Empfehlungen lassen sich zur Stickstoffdüngung für den Anbau von Pseudogetreide im mitteldeutschen Trockengebiet ableiten?

Vor dem Hintergrund, dass in zwei von drei Jahren bei 100 kg N/ha der maximale Ertrag gemessen wurde, was in einem Jahr signifikant abgesichert ist, empfiehlt sich diese Düngestufe für den Anbau von Amarant unter den Standortbedingungen. Eine Reduzierung der Stickstoffdüngung auf 50 kg/ha führt zwar zu höheren Proteingehalten, liefert allerdings unter Umständen die geringsten Erträge, was in einem Jahr signifikant festgestellt wurde.

Forschungsfrage 5: Unter welchen Wetterbedingungen liefern die unterschiedlichen Kulturen den höchsten Ertrag?

Wie zu erwarten, leidet auch Amarant unter der Trockenheit des Jahres 2022, wodurch das Ertragspotenzial begrenzt wird. Ein signifikanter Jahreseffekt konnte von 2022 zu 2023 und 2024 festgestellt werden. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass unter warmen und feuchten Witterungsverhältnissen die Kultur ihr volles Ertragspotenzial ausschöpft. Damit kann $H_{0,5}$ verworfen und $H_{1,5}$ angenommen werden, was sich mit der Literatur deckt.

6.3 Diskussion Chia

6.3.1 Diskussion Ertrag von Chia

Wie in Tabelle 7 zu sehen, war 2022 der maximale Ertrag in der mittleren Düngestufe mit 50 kg N/ha bei 276,47 kg/ha, was am niedrigsten von allen Versuchsjahren und deutlich unterhalb der Erträge der durchgeföhrten Untersuchungen ist. Dabei ist der Ertrag in b2 signifikant höher als in den anderen Varianten. Signifikante Ertragsunterschiede zwischen den Stickstoffdüngestufen wurden bei (Grimes et al. 2019; Mohanty et al. 2021) nicht festgestellt. Dagegen hat (Mary 2018) in der höchsten N-Gabe von 90 kg/ha signifikant höhere Erträge als in den niedrigeren N-Gabe ermittelt. Im Folgejahr 2023 ist ein Anstieg des Maximalertrags um 116 % in der mittleren Düngestufe auf 598,31 kg/ha zu verzeichnen. Diese Messung ist auf dem Niveau von (Mohanty et al. 2021), höher als von (Mary 2018), jedoch nach wie vor niedriger als (Grimes et al. 2019; Bordin-Rodrigues et al. 2021). Die Erträge waren 2023 signifikant höher als im Jahr zuvor. Der jeweilige Versuchsaufbau von (Grimes et al. 2019; Bordin-Rodrigues et al.

2021; Mohanty et al. 2021) ist stark differenziert. Während die höchste Stickstoffdüngung bei (Grimes et al. 2019) 40 kg/ha beträgt, ist das die kleinste N-Gabe von (Mohanty et al. 2021).

Im Versuchsjahr 2024 lag der Maximalertrag nochmals 52 % über dem vom Vorjahr, was jedoch unter anderem an den Sortenwechsel liegen kann. Das Jahr zeigt dabei signifikant höher Erträge als 2022 und 2023. Wiedermals lieferte die Variante mit 50 kg N/ha den höchsten Ertrag. Dieser Wert liegt bei vergleichbarer Düngestufe über dem Niveau von (Mary 2018; Grimes et al. 2019; Mohanty et al. 2021). Solch starke Ertragssteigerungen zwischen den Jahren fanden in keiner der durchgeführten Untersuchungen statt. In allen drei Jahren wurde der höchste Ertrag in der mittleren Düngestufe von 50 kg N/ha gemessen. Vergleichbares haben (Grimes et al. 2019) festgestellt. In der Studie war die höchste N-Gabe 40 kg/ha, was zum höchsten Ertrag führte. Hingegen ist der Ertragszuwachs bei (Grimes et al. 2019) von der Kontrolle zur 40 kg N/ha Variante lediglich 12 %. In den Jahren 2022 und 2023 betrug der Ertragszuwachs von 0 zu 50 kg N/ha 61 bzw. 69 %. 2024 fällt dieser mit 21 % etwas niedriger aus. (Mary 2018) stellte den höchsten Ertrag bei der höchsten Düngestufe von 90 kg N/ha fest. Dabei wurde eine Ertragssteigerung von 31 % von der geringsten zur höchsten N-Düngung ermittelt. Diese vergleichbar hohen N-Menge führten in der vorliegenden Untersuchung zu den geringsten Erträgen.

Die Ergebnisse von (Mohanty et al. 2021) zeigen einen starken nahezu linearen Ertragszuwachs mit steigender N-Düngung. Der Höchstertrag der Studie wurde mit 1210 kg/ha bei 100 kg N/ha festgestellt, was einen Ertragszuwachs von 144 % im Vergleich zur geringsten Düngestufe ausmacht. Die Ergebnisse von (Mary 2018; Mohanty et al. 2021) liegen deutlich über den Werten der vorliegenden Untersuchung, was vermutlich auf andere Standortbedingungen zurückzuführen ist.

Das signifikant gestiegene Ertragsniveau 2023 im Vergleich zu 2022 lässt auf ändernde Witterungsbedingungen bei identischen Versuchsaufbau deuten. 2022 war es im Vergleich zu 2023 deutlich trockener, was das Ertragspotenzial von Chia einschränkte. Unter trockenen Bedingungen haben (Muriithi et al. 2022) ebenso geringere Erträge festgestellt. Mit den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung lässt sich ein Jahreseffekt bestätigen. Zwar sind die Erträge 2024 signifikant höher als 2023 und 2022, aber der Sortenwechsel hat dabei zusätzlich einen Effekt beigetragen, der nicht klar definiert werden kann. Demnach kann $H_{0,5}$ verworfen werden und $H_{1,5}$ angenommen werden.

Da die Erträge in allen Versuchsjahren von der mittleren Düngestufe zur höchsten Düngestufe teilweise stark abfallen, könnte diese Reaktion mit dem Sättigungseffekt zusammenhängen. Wie in Abschnitt 6.2.1 bereits erklärt, kann der Ertragszuwachs bei Erhöhung der N-Gabe

abnehmen. In diesem Fall jedoch verringert sich nicht nur der Ertragszuwachs, sondern auch der Gesamtertrag zwischen 9 und 48 %. Wie (Schubert 2018) beschreibt, verzögert Stickstoff die generative Entwicklung, indem die vegetative Phase gefördert wird. Durch diesen Einfluss könnte es zu einer späteren oder teils unvollständigen Samenbildung kommen. Das könnte im Zusammenhang mit dem steigenden TKG bei steigender N-Gabe zusammenhängen, da weniger Samen je Pflanze gebildet werden und dadurch die Samen größer bzw. schwerer sind. Eine unausgewogene Nährstoffversorgung, insbesondere ein Überschuss an Stickstoff, kann die Aufnahme anderer Nährstoffe wie Kalium oder Magnesium hemmen. Dadurch werden wichtige physiologische Abläufe in der Pflanze gestört, was ebenso einen ertragssinkenden Effekt haben kann (Schubert 2018). Da keine Bonituren zur Blüte und nach der Blüte durchgeführt wurden, lässt sich ein verzögter Reifeprozess oder eine erhöhte Anfälligkeit für Krankheiten nicht ausschließen, was nach dem Autor ein weiterer Effekt von einer nicht angepassten Stickstoffdüngung sein kann. Es lässt sich jedoch nicht sicher begründen, da (Grimes et al. 2019) nicht höhere Stickstoffgaben als 40 kg/ha in Deutschland untersucht haben und sowohl (Mary 2018) als auch (Mohanty et al. 2021) solche Reaktionen des Ertrags unter ihren Standortbedingungen nicht feststellten.

Von den 150 gedrillten Körnern je Quadratmeter wurden in der Bonitur am 08.06.2024 lediglich rund 42 Pfl/m² gezählt. Vermutlich ist das wie bei den anderen Versuchskulturen auf die trockene Aussaatbedingung zurückzuführen. (Grimes et al. 2018) nennen starke Schwankungen in der Bestandesdichte zwischen 17 und 134 Pfl/m², was auf den Standort zurückzuführen war. Dabei war die Bestandesdichte an einem Standort zwischen 17 und 30 Pfl/m² und auf dem anderen zwischen 87 und 134 Pfl/m². Der maximale Unterschied der Bestandesdichten zwischen den Standorten lag bei 483 %, allerdings war der Ertrag bei 134 Pfl/m² lediglich 34 % höher als bei 23 Pfl/m². Das zeigt, dass der geringe Bestand mehr Samen je Einzelpflanze produzierte, was auf eine starke Kompensationsfähigkeit hinweist (Grimes et al. 2018). (Top Agrar 2024) empfiehlt eine Saatstärke von 120 Kö/m². (Baginsky et al. 2016) beschreiben, dass nach der ersten vollständigen Blattentfaltung, die Pflanzendichte auf 80 – 90 Pflanzen/m² ausgedünnt wurde. Dementsprechend war die Saatstärke von 150 Kö/m² bei etwas Verlust gut gewählt, jedoch ist die tatsächliche Bestandesdichte sehr niedrig.

Eine Besonderheit zeigte Chia auf, da die Erträge der Kultur 2024 signifikant höher waren als 2023. Quinoa und Amarant reagierten ähnlich auf die Witterungen der Jahre und produzierten im Gesamtversuch die höchsten Erträge der jeweiligen Kultur im Jahr 2023. Diese Unterschiede deuten auf artspezifische Anpassungsstrategien hin. Dabei wird die Bedeutung einer differenzierten Sorten- und Kulturwahl im Hinblick auf die witterungsbedingte Ertragssicherheit unterstreichen.

6.3.2 Diskussion Proteingehalt von Chia

Nach Tabelle 7 liegt der Proteingehalt der Kontrollvariante im Jahr 2023 bei 22,25 %, steigt in der mittleren Düngestufe auf das Maximum mit 24,43 % an und fällt bei weiterer N-Gabe auf 21,35 % ab. Diese Werte übertreffen die Ergebnisse von (Mary 2018; Grimes et al. 2019) trotz teilweiser höherer N-Düngung in den Untersuchungen, jedoch ist die Reaktion auf die Stickstoffdüngung 2023 nicht mit den Studien zu vergleichen. In beiden Untersuchungen stieg der Proteingehalt mit zunehmender N-Düngung an, wohingegen der Proteingehalt in der vorliegenden Untersuchung 2023 in der ersten Stickstoffsteigerung anstieg und anschließend abfiel. Dieses Verhalten deutet auf einen Sättigungseffekt hin, bei dem eine überhöhte Stickstoffzufuhr zu einer Abnahme des Proteingehalts führt (van Grinsven et al. 2022).

Dagegen hat sich 2024 eine signifikante gleichgerichtete Korrelation der Stickstoffdüngung auf den Proteingehalt gezeigt. Mit steigender Stickstoffdüngung stieg der Proteingehalt von 18,70 % aus der unbehandelten Variante auf 22,40 % in der 100 kg N/ha Variante. Die ermittelten Proteinwerte decken sich mit den Daten von (Mary 2018; Grimes et al. 2019). (Mary 2018) hat in der höchsten Düngestufe einen signifikant höheren Proteingehalt als die niedrigeren Düngestufen festgestellt. Hingegen wurde bei (Grimes et al. 2018) ein signifikanter Jahres- und Standorteffekt ermittelt. Die Daten der vorliegenden Untersuchung ermöglichen, wie bereits erwähnt, keine Überprüfung von signifikanten Unterschieden zwischen den Versuchsvarianten sowie -jahren. Somit kann keine Hypothesenprüfung erfolgen.

2023 waren die Proteingehalte im Allgemeinen höher als 2024, was zum einen an sortenspezifischen Reaktionen und zum anderen durch die geänderte Analysemethode begründet werden kann (Grimes et al. 2018). Die NIR-Analyse wurde wie beschrieben ohne Kalibrierungen für Chia durchgeführt, was demnach nicht die exakten Proteinwerte analysieren kann. Die durchgeführte Analyse kann Tendenzen innerhalb der Analysemethode zeigen, jedoch nicht mit der Elementaranalyse auf eine Stufe gebracht werden. Hinzu kommt, dass ein Jahreseffekt dabei weiteren Einfluss haben kann. Da 2023 der höchste Ertrag mit dem höchsten Proteingehalt einherging, lässt sich ein Einfluss des Verdünnungseffekts in dem Fall ausschließen. Demnach würde eine Düngung mit 100 kg N/ha, wie 2024, den höchsten Proteingehalt liefern, da in dem Jahr eine signifikante gleichgerichtete Korrelation vorlag. Das bestätigt das Ergebnis von (Mary 2018).

6.3.3 Diskussion Tausendkorngewicht von Chia

2022 ist eine signifikante gleichgerichtete Korrelation zwischen der Stickstoffdüngung und dem TKG festgestellt wurden (siehe Tabelle 7). Dabei stieg das TKG von 1,18 g aus der Kontrollvariante auf 1,28 g in der höchsten Stickstoffdüngung an. Das geht mit den Ergebnissen von (Mary 2018; Grimes et al. 2019) einher. 2023 war das TKG von 1,32 auf 1,24 g in der mittleren Düngestufe gesunken und anschließend wieder angestiegen auf 1,38 g. Dieser Verlauf wurde in den durchgeführten Untersuchungen von (Mary 2018; Grimes et al. 2019) nicht beobachtet. Des Weiteren sind die Werte von den Autoren geringer als die gemessenen Werte in der vorliegenden Untersuchung. 2024 war eine weitere Steigerung des TKGs festzustellen, da die Werte mit 1,49 bis 1,53 g mindestens 0,2 g höher sind als die veröffentlichten Untersuchungen. In dem Jahr ist wiederholt eine signifikante gleichgerichtete Korrelation zwischen der Stickstoffdüngung und dem TKG festgestellt wurden, jedoch mit einem geringeren Anstieg als bei (Mary 2018; Grimes et al. 2019). In dem Jahr 2023 wurde eine signifikante entgegengesetzt gerichtete Korrelation zwischen dem Proteingehalt und dem TKG ermittelt. Dieser Effekt lässt sich durch die Source-Sink-Dynamik erklären, wobei verstärkte Proteinsynthese während der Kornfüllung vermehrt Stickstoff und energetische Ressourcen beansprucht. Dabei kommt es zu einer verschobenen Assimilatnutzung zugunsten von Proteinen. Die Kohlenhydrat- bzw. Stärkeeinlagerung je Korn verringert sich, wodurch das Gewicht je Korn geringer wird (Mengel et al. 2001). Solche Beobachtungen wurden von den durchgeführten Studien bislang nicht getätigt. Im Gegensatz dazu wurde 2024 eine signifikante gleichgerichtete Korrelation zwischen dem TKG und der N-Düngung sowie dem Proteingehalt ermittelt. Der gleichzeitige Anstieg dieser Parameter bei steigender N-Düngung könnte auf eine effiziente Nutzung von Stickstoff und eine ausreichende Assimilatverfügbarkeit schließen. Des Weiteren ist es möglich, dass eine sortenbedingte Steigerung der Source-Sink-Dynamik vorliegt (Gaju et al. 2011; Sinclair 2021). 2022 wies ebenso eine signifikante gleichgerichtete Korrelation zwischen dem TKG und dem Proteingehalt auf. Das kann ähnlich wie 2024 begründet werden, da die verbesserte N-Versorgung die Assimilatproduktion und die Aufnahmekapazität der Körner fördert (Gaju et al. 2011). (Grimes et al. 2019) stellten einen signifikanten Jahresseffekt, jedoch keinen im Zusammenhang mit der Stickstoffdüngung fest. In der Untersuchung von (Mary 2018) wurde ebenso kein signifikanter Einfluss von Stickstoff auf das TKG festgestellt. Zusammengefasst lässt sich in der vorliegenden Untersuchung beobachten, dass mit höherem Stickstoffeinsatz Chia mit einem tendenziell höheren TKG reagiert.

6.3.4 Bearbeitung der Forschungsfragen für Chia

Forschungsfrage 1: Wie wirkt sich die Höhe der Stickstoffdüngung (0, 50, 100 kg N/ha) auf den Körnertrag von Quinoa, Amarant und Chia aus?

Mit einer Steigerung der Stickstoffdüngung von 0 auf 50 kg/ha steigt der Ertrag auf sein Maximum an, wohingegen bei weiterer Steigerung der N-Menge Chia mit einem starken Ertragsabfall reagiert. Der Ertragsabfall bei höherer N-Düngung deutet auf einen Sättigungseffekt hin. Der Maximalertrag wurde in allen drei Versuchsjahren bei 50 kg N/ha festgestellt und in einem Jahr signifikant bestätigt. Damit lässt sich $H_{0,1}$ verwerfen und $H_{1,1}$ annehmen. In der Literatur wird teils von signifikanter Ertragssteigerung bei einer Stickstoffdüngung von 90 kg/ha berichtet. Vermehrt zeigt sich in der Literatur jedoch, dass N keinen signifikanten Effekten auf den Ertrag hat.

Forschungsfrage 2: In welchem Maße beeinflusst die Stickstoffdüngung den Rohproteingehalt der Körner der drei Pseudogetreidearten?

2023 stieg der Proteingehalt der Chiasamen lediglich von der Kontrolle auf die mittlere Düngestufe an und fiel bei weiterer N-Gabe ab, was auf eine Sättigung hindeutet. 2024 hingegen konnte eine signifikante gleichgerichtete Korrelation zwischen der N-Düngung und dem Proteingehalt festgestellt werden, was ein Zusammenspiel von einer sortenspezifischen Reaktion und einem Jahresseffekt sein kann. Demnach ist zu beobachten, dass Chia bei steigender Stickstoffverfügbarkeit tendenziell mit höherem Proteingehalt reagiert. In der Literatur wird teilweise ein signifikanter Effekt von Stickstoff auf den Proteingehalt beschrieben, was in der vorliegenden Untersuchung nicht analysiert werden konnte. Ein Hypothesentest konnte anhand mangelnder Daten nicht durchgeführt werden, weshalb keine signifikante abgesicherte Aussage getroffen werden kann.

Forschungsfrage 3: Welchen Einfluss haben unterschiedliche Stickstoffdüngestufen auf das Tausendkorngewicht der Pseudogetreidekulturen?

In zwei von drei Jahren wurde eine signifikante gleichgerichtete Korrelation zwischen den N-Düngestufen und dem TKG der Chiasamen ermittelt. Das könnte aufgrund einer verbesserten Stickstoffversorgung und damit gestiegene Assimilateproduktion und Aufnahmekapazität der Körner begründet sein. Demnach zeigen die Beobachtungen, dass bei steigender Stickstoffdüngegabe tendenziell höhere Tausendkorngewichte entstehen. In der Literatur wurden ähnliche Beobachtungen festgestellt, jedoch ohne signifikanten Effekt von Stickstoff auf das TKG. Ein Hypothesentest konnte aus bereits genannten Gründen nicht durchgeführt werden, weshalb keine gesicherte Hypothese verworfen oder angenommen werden kann.

Forschungsfrage 4: Welche artspezifischen Empfehlungen lassen sich zur Stickstoffdüngung für den Anbau von Pseudogetreide im mitteldeutschen Trockengebiet ableiten?

Die Erträge waren in allen Versuchsjahren in der mittleren Düngestufe mit 50 kg N/ha am höchsten, was in einem Jahr signifikant abgesichert ist. Der Proteingehalt hingegen war in einem Jahr ebenso bei 50 kg N/ha am höchsten, jedoch ohne Signifikanzprüfung. 2024 lag eine signifikante gleichgerichtete Korrelation zwischen der Proteingehalt und den Düngestufen vor. Im Hinblick auf den höchsten Ertrag mit soliden Proteingehalten, kann anhand der Beobachtungen eine Stickstoffdüngempfehlung für Chia von 50 kg/ha für das mitteldeutsche Trockengebiet empfohlen werden.

Forschungsfrage 5: Unter welchen Wetterbedingungen liefern die unterschiedlichen Kulturen den höchsten Ertrag?

2022 war der Ertrag signifikant geringer als 2023 und 2024. 2023 war der Ertrag signifikant geringer als 2024, trotz ähnlicher Witterung. Dabei hat der Sortenwechsel von 2023 zu 2024 einen zusätzlichen undefinierten Effekt darauf, da jede Sorte, wie die Literatur beschreibt, unterschiedlich auf Standort- und Witterungsbedingungen reagiert. Der Jahreseffekt von 2022 zu 2023 deutet auf die unterschiedliche Witterung hin, da es 2022 wesentlich trockener war und dementsprechend das Ertragspotenzial eingegrenzt hat. Demnach kann $H_{0,5}$ verworfen und $H_{1,5}$ angenommen werden, was sich mit der Literatur deckt.

7. Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit verdeutlichen, dass die drei untersuchten Pseudogetreidearten Quinoa, Amarant und Chia unterschiedlich stark auf die Stickstoffdüngung reagieren. Insgesamt zeigt sich, dass Stickstoff einen bedeutenden Einfluss auf den Körnertrag sowie teilweise auf den Rohproteingehalt und das Tausendkorngewicht hat. Dabei variiert jedoch die Ausprägung stark artenspezifisch sowie witterungsabhängig.

Quinoa reagierte besonders deutlich auf die Stickstoffdüngung. Mit steigender Stickstoffdüngung nahm der Ertrag signifikant zu. Gleichzeitig zeigte der Proteingehalt eine signifikante Korrelation mit der Stickstoffmenge, während das Tausendkorngewicht in einzelnen Fällen leicht rückläufig war. Die unterschiedlichen Jahre mit ihren Witterungen haben teils signifikante Unterschiede zwischen den Erträgen hervorgerufen, wobei im Jahr 2023 unter warmen und feuchten Wetterbedingungen die höchsten Erträge sowie Proteingehalte gemessen wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass für Quinoa eine Stickstoffdüngung von 100 kg/ha für einen Standort wie Bernburg im mitteldeutschen Trockengebiet empfehlenswert ist, um hohe Erträge und Proteingehalte zu erzielen. Die Sorte Quipu wies aus dem Sortenversuch 2024 in jeder Düngestufe das höchste Ertragsniveau auf, was für eine Anbaustabilität auf dem Standort spricht. Dabei war jedoch der Proteingehalt auf niedrigem Niveau. Die Sorte ST 240011 zeigte die stärkste Ertragssteigerung bei gesteigerten N-Düngung sowie hohe Proteingehalte. Bei weiterer Forschung sollte diese Sorte mit höheren Stickstoffgaben gedüngt werden, um zu überprüfen, ob die starke Reaktion auf Stickstoff weiterhin erhalten bleibt.

Amarant zeigte eine moderate Reaktion auf Stickstoff. In den Versuchsjahren 2022 und 2024 stieg der Ertrag mit zunehmender N-Gabe an, wobei 2022 eine signifikante Steigerung festgestellt werden konnte. Dagegen war 2023 der Ertrag in der Kontrolle am höchsten. Der Protein gehalt war in mittleren Düngestufe am höchsten, was jedoch nicht signifikant abgesichert ist. Das Tausendkorngewicht wurde 2023 negativ von der N-Düngung beeinflusst, wobei sich in den anderen Jahren ein weniger eindeutiger Effekt zeigte. Demnach lässt sich für den Standort eine Stickstoffdüngung von 100 kg/ha empfehlen, um maximale Erträge bei mittleren Protein gehalten zu erzielen. Da eine Stickstoffdüngung von 50 kg/ha die höchsten Proteingehalte, jedoch in zwei Versuchsjahren die geringsten Erträge lieferte, wäre eine feinere Abstufung der N-Düngung für weitere Versuche zu empfehlen, mit dem Ziel ein Optimum zwischen Ertrag und Proteingehalt zu finden.

Chia wies eine verhaltene Reaktion auf Stickstoff auf. In allen Jahren wurde der höchste Ertrag in den mittleren Düngestufen gemessen, da bei weiterer N-Gabe die Erträge gesunken sind. Analog dazu hat sich der Proteingehalt 2023 verhalten. 2024 stieg der Proteingehalt mit der

Stickstoffdüngung an. In zwei von drei Jahren wurde eine signifikante Korrelation mit der N-Düngung festgestellt. Für den Versuchsstandort lässt sich anhand der Ergebnisse eine N-Düngung von 50 kg/ha empfehlen, was zu maximalen Erträgen und soliden Proteingehalten führt.

Zum Standort Bernburg im mitteldeutschen Trockengebiet hat sich Amarant als passend gezeigt, da diese Kultur weitaus höhere Erträge liefert hat als in den veröffentlichten Studien. Quinoa und Chia zeigen jedoch auch ertragreiche Jahre, wohingegen Chia von 2022 zu 2023 einen geringeren Ertragssprung gemacht hat als Quinoa und Amarant. Im Hinblick auf die Anbauwürdigkeit müsste ein Vermarktungsweg für die jeweilige Kultur sichergestellt werden.

Die starke Abhängigkeit der Ergebnisse von Witterungseinflüssen unterstreicht die Notwendigkeit, die Versuche über mehrere Jahre und an weiteren Standorten unter anderen Bedingungen zu wiederholen. Essenziell ist dabei, dass der Versuchsaufbau während der gesamten Versuchsdurchführung einheitlich bleibt, insbesondere hinsichtlich der verwendeten Sorten, der Düngestrategie, der Analysemethoden und der Datenauswertung. Um die Ertragsbildung bei Pseudogetreiden besser zu verstehen, sollte der Zusammenhang zwischen Ertrag, Proteingehalt und Tausendkorngewicht künftig gezielt untersucht werden. Dabei sollte besonderen Fokus auf Verdünnungseffekte und physiologische Kompensationen gelegt werden. Hilfreich wären in diesem Zusammenhang vermehrte Bonituren, ergänzt durch Zählungen der Bestandesdichte und der Körner je Pflanze. Des Weiteren wäre die Entwicklung spezifischer Düngeempfehlungen unter Berücksichtigung von N_{min} -Gehalten wünschenswert, um die Stickstoffeffizienz nachhaltig zu untersuchen. Da die Pseudogetreidekulturen laut Literaturangaben beachtliche Mengen an Öl und Mineralstoffe enthalten, wären Analysen auf weitere Qualitätsparameter im Hinblick auf die Stickstoffdüngung interessant.

8. Zusammenfassung

Die Landwirtschaft steht aktuell vor großen Herausforderungen durch zunehmender Trockenheit und Extremwetterereignissen. Hinzu kommt der steigende politische und gesellschaftliche Druck, was die Forschung des Anbaus anpassungsfähigerer und ressourceneffizienter Kulturen erfordert. Dazu wurde in einem dreijährigen Feldversuch der Einfluss von Stickstoffdüngung auf Pseudogetreide untersucht. Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede im Reaktionsverhalten der Pseudogetreidekulturen Quinoa, Amarant und Chia auf die Stickstoffdüngung unter den Standortbedingungen des mitteldeutschen Trockengebiets. Die Analyse der Erträge über alle drei Jahre macht deutlich, dass Quinoa und Amarant besonders im Jahr 2023 die höchsten Kornerträge erzielten, während Chia im Jahr 2024 den Höchstertrag lieferte. Dies verdeutlicht die jahrgangsabhängige Reaktion der Kulturen auf klimatische Bedingungen, insbesondere in Bezug auf Niederschläge und Temperaturen.

Mit zunehmender Stickstoffdüngung zeigten Quinoa und Amarant tendenziell steigende Erträge, wohingegen Chia bei überhöhter Stickstoffdüngung mit einem Ertragsabfall reagierte. Diese Zusammenhänge waren dabei jedoch in wenigen Jahren signifikant. Besonders im trockenen Jahr 2022 wurde eine signifikante Steigerung des Ertrags mit der Stickstoffdüngung bei allen Kulturen deutlich. Eine unzureichende Wasserversorgung kann dabei das Ertragspotenzial einschränken. Unter günstiger Witterung können hingegen gesteigerten Kornerträge produziert werden.

Der Proteingehalt reagierte bei Quinoa positiv auf die Stickstoffdüngung, zeigte jedoch teilweise bei Amarant und Chia eine Abnahme bei höheren N-Gaben. Das deutet nach Angaben der Literatur auf einen Sättigungseffekt hin. Vereinzelt trat ein Verdünnungseffekt auf, bei dem der Proteingehalt trotz höherer N-Versorgung durch steigenden Ertrag abnimmt.

Das Tausendkorngewicht reagierte schwächer auf die Stickstoffgaben als Ertrag und Protein gehalt. Es zeigten sich sowohl leichter Anstiege als auch Abnahmen bei gesteigerter Stickstoffdüngung. Diese Schwankungen deuteten auf die Source-Sink-Dynamik und die Kompen sationsmöglichkeit der Pflanze auf Umweltbedingungen zu reagieren.

Die Messwerte des dreijährigen Feldversuchs zeigten Tendenzen zur standortangepassten Düngestrategie und Sorten, die anhand dessen formuliert wurden. Für Quinoa zeigte sich eine standortangepasste Stickstoffdüngung von 100 kg/ha, für Amarant von 100 kg/ha und für Chia 50 kg/ha.

Die Wirkung der Stickstoffdüngung auf den Ertrag, den Proteingehalt und das Tausendkorn gewicht war messbar, jedoch weitestgehend nicht signifikant differenzierbar.

9. Literaturverzeichnis

Almadini, Abdulrahman M.; Badran, Ayman E.; Algoosaibi, Abdullah M. (2019): Evaluation of Efficiency and Response of Quinoa Plant to Nitrogen Fertilization levels. In: *Middle East J. Appl. Sci.* DOI: 10.36632/mejas/2019.9.4.1.

Alvarez-Jubete, L.; Arendt, E. K.; Gallagher, E. (2010): Nutritive value of pseudocereals and their increasing use as functional gluten-free ingredients. In: *Trends in Food Science & Technology* 21 (2), S. 106–113. DOI: 10.1016/j.tifs.2009.10.014.

Amato, Mariana; Caruso, Marisa C.; Guzzo, Flavia; Galgano, Fernanda; Comisso, Mauro; Bochicchio, Rocco et al. (2015): Nutritional quality of seeds and leaf metabolites of Chia (*Salvia hispanica* L.) from Southern Italy. In: *Eur Food Res Technol* 241 (5), S. 615–625. DOI: 10.1007/s00217-015-2488-9.

Angeli, Viktória; Miguel Silva, Pedro; Crispim Massuela, Danilo; Khan, Muhammad Waleed; Hamar, Alicia; Khajehei, Forough et al. (2020): Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): An Overview of the Potentials of the "Golden Grain" and Socio-Economic and Environmental Aspects of Its Cultivation and Marketization. In: *Foods* 9 (2), S. 216. DOI: 10.3390/foods9020216.

Assad, Rezwana; Reshi, Zafar A.; Jan, Snober; Rashid, Irfan (2017): Biology of Amaranths. In: *Bot. Rev.* 83 (4), S. 382–436. DOI: 10.1007/s12229-017-9194-1.

Assouline, Shmuel (2013): Infiltration into soils: Conceptual approaches and solutions. In: *Water Resources Research* 49 (4), S. 1755–1772. DOI: 10.1002/wrcr.20155.

Ayerza, Ricardo; Coates, Wayne (2009a): Influence of environment on growing period and yield, protein, oil and α-linolenic content of three chia (*Salvia hispanica* L.) selections. In: *Industrial Crops and Products* 30 (2), S. 321–324. DOI: 10.1016/j.indcrop.2009.03.009.

Ayerza, Ricardo; Coates, Wayne (2001): Omega-3 enriched eggs: The influence of dietary α-linolenic fatty acid source on egg production and composition. In: *Can. J. Anim. Sci.* 81 (3), S. 355–362. DOI: 10.4141/A00-094.

Ayerza, Ricardo; Coates, Wayne (2005): Chia. Rediscovering a Forgotten Crop of the Aztecs. Unter Mitarbeit von Wayne Coates. 1st ed. Erscheinungsort nicht ermittelbar: University of Arizona Press. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=29044389>.

Ayerza, Ricardo; Coates, Wayne (2006): Influence of chia on total fat, cholesterol, and fatty acid profile of Holstein cow's milk. Online verfügbar unter https://dspace.uces.edu.ar/bitstream/123456789/278/1/influence_of_chia.pdf.

Ayerza, Ricardo; Coates, Wayne (2011): Protein content, oil content and fatty acid profiles as potential criteria to determine the origin of commercially grown chia (*Salvia hispanica L.*). In: *Industrial Crops and Products* 34 (2), S. 1366–1371. DOI: 10.1016/j.indcrop.2010.12.007.

Baginsky, Cecilia; Arenas, Jorge; Escobar, Hugo; Garrido, Marco; Valero, Natalia; Tello, Diego et al. (2016): Growth and yield of chia (*Salvia hispanica L.*) in the Mediterranean and desert climates of Chile. fertig, viel v ay... Standort, Blüte, Öl. In: *Chilean J. Agric. Res.* 76 (3), S. 255–264. DOI: 10.4067/S0718-58392016000300001.

Bai, Yunlong; Khoddami, Ali; Messina, Valeria; Zhang, Zhao; Tan, Daniel K. Y. (2025): Response of Wheat Genotypes Stressed by High Temperature in Terms of Yield and Protein Composition Across Diverse Environments in Australia. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Online verfügbar unter <https://www.mdpi.com/2077-0472/15/5/514>, zuletzt aktualisiert am 01.10.2025, zuletzt geprüft am 01.10.2025.

Beral, Aurore; Rincent, Renaud; Le Gouis, Jacques; Girousse, Christine; Allard, Vincent (2020): Wheat individual grain-size variance originates from crop development and from specific genetic determinism. In: *PLoS one* 15 (3), e0230689. DOI: 10.1371/journal.pone.0230689.

Bhattarai, Geeta (2019): Amaranth: A Golden Crop for Future. In: *Himalayan J. Sci. Technol.* 2, S. 108–116. DOI: 10.3126/hijost.v2i0.25854.

Bochicchio, Rocco; Philips, Tim D.; Lovelli, Stella; Labella, Rosanna; Galgano, Fernanda; Di Marisco, Antonio et al. (2015): Innovative Crop Productions for Healthy Food: The Case of Chia (*Salvia hispanica L.*). In: Antonella Vastola (Hg.): *The Sustainability of Agro-Food and Natural Resource Systems in the Mediterranean Basin*. Cham: Springer International Publishing, S. 29–45.

Bojórquez-Velázquez, Esaú; Velarde-Salcedo, Aida Jimena; León-Rodríguez, Antonio de; Jimenez-Islas, Hugo; Pérez-Torres, Jose Luis; Herrera-Estrella, Alfredo et al. (2018): Morphological, proximal composition, and bioactive compounds characterization of wild and cultivated amaranth (*Amaranthus* spp.) species. In: *Journal of Cereal Science* 83, S. 222–228. DOI: 10.1016/j.jcs.2018.09.004.

Bordin-Rodrigues, Jaqueline Calzavara; da Silva, Tiago Roque Benetoli; Del Moura Soares, Debora Fernandes; Stracieri, Juliana; Ducheski, Rhaizza Lana Pereira; da Silva, Gessica Daiane (2021): Bean and chia development in accordance with fertilization management. In: *Heliyon* 7 (6), e07316. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07316.

Brandán, J. Pérez; Curti, R. N.; Acreche, M. M. (2019): Phenological growth stages in chia (*Salvia hispanica L.*) according to the BBCH scale. In: *Scientia Horticulturae* 255, S. 292–297. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.05.043.

Bruckner, August; Mack, Ralf (2025): Stickstoff (N). Nutrinet. Online verfügbar unter <https://www.nutrinet.agrarpraxisforschung.de/naehrstoffmanagement/naehrstoffe/stickstoff-n>, zuletzt aktualisiert am 22.08.2025, zuletzt geprüft am 22.08.2025.

Bruin, A. de (1964): Investigation of the Food Value of Quinua and Cañihua Seed. In: *Journal of Food Science* 29 (6), S. 872–876. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1964.tb00464.x.

Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (2024): Was sind eigentlich Pseudogetreide? Online verfügbar unter <https://www.landwirtschaft.de/tier-und-pflanze/pflanze/getreide/was-sind-eigentlich-pseudogetreide>, zuletzt aktualisiert am 03.05.2025, zuletzt geprüft am 03.05.2025.

Bundesverband Quinoa e. V. (2023): Über Quinoa - Bundesverband Quinoa e. V. Online verfügbar unter <https://bundesverband-quinoa.de/ueber-quinoa/>, zuletzt aktualisiert am 13.03.2023, zuletzt geprüft am 27.03.2025.

Busilacchi, Héctor; Bueno, Mirian; Severin, Cecilia; Di Sapiro, Osvaldo; Flores, Voykos (2013): Evaluación de *Salvia hispanica L.* Cultivada en el sur de Santa Fe (República Argentina). In: 0258-5936 34 (4), S. 55–59. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/262628863_Evaluacion_de_Salvia_hispanica_L_Cultivada_en_el_sur_de_Santa_Fe_Republica_Argentina.

Caselato-Sousa, Valéria Maria; Amaya-Farfán, Jaime (2012): State of knowledge on amaranth grain: a comprehensive review. In: *Journal of Food Science* 77 (4), R93-104. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2012.02645.x.

Coates, W.; Ayerza, R. (2009): Chia (*Salvia hispanica L.*) seed as an n-3 fatty acid source for finishing pigs: effects on fatty acid composition and fat stability of the meat and internal fat, growth performance, and meat sensory characteristics. In: *Journal of animal science* 87 (11), S. 3798–3804. DOI: 10.2527/jas.2009-1987.

Dallmann, J.; Gille, S.; Herzig, P.; Orzessek, D. Deubel, A.; Knauer, U. (2022): Versuchsfeldführer 2022. Unter Mitarbeit von J. Dallmann, S. Gille, P. Herzig, Orzessek, D. Deubel, A. und U. Knauer. Hg. v. Hochschule Anhalt. Hochschule Anhalt. Online verfügbar unter https://www.hs-anhalt.de/fileadmin/Dateien/FB1/Forschung/Feldbau/Auswertungsberichte/versuchsfeldfuehrer/versuchsfeldfuehrer_2022_web.pdf, zuletzt aktualisiert am 2022, zuletzt geprüft am 21.08.2025.

Dallmann, J.; Gille, S.; Herzig, P.; Orzessek, D. Deubel, A.; Knauer, U. (2023): Versuchsfeldführer 2023. Unter Mitarbeit von J. Dallmann, S. Gille, P. Herzig, Orzessek, D. Deubel, A. und U. Knauer. Hg. v. Hochschule Anhalt. Hochschule Anhalt. Online verfügbar unter https://www.hs-anhalt.de/fileadmin/Dateien/FB1/Forschung/Feldbau/Auswertungsberichte/versuchsfeldfuehrer/versuchsfeldfuehrer_2023_web.pdf, zuletzt geprüft am 21.08.2025.

Dallmann, J.; Gille, S.; Herzig, P.; Orzessek, D. Deubel, A.; Knauer, U. (2024): Versuchsfeldführer 2024. Unter Mitarbeit von J. Dallmann, S. Gille, P. Herzig, Orzessek, D. Deubel, A. und U. Knauer. Hg. v. Hochschule Anhalt. Hochschule Anhalt. Online verfügbar unter https://www.hs-anhalt.de/fileadmin/Dateien/FB1/Forschung/Feldbau/Auswertungsberichte/versuchsfeldfuehrer/versuchsfeldfuehrer_2024_druck.pdf, zuletzt geprüft am 06.08.2025.

Das, Saubhik (2016): Cultivation of Amaranths. In: *Amaranthus: A Promising Crop of Future*: Springer, Singapore, S. 153–166. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-1469-7_10.

Deutscher Wetterdienst (2025): Monats- und Jahreswerte Bernburg an der Saale (Anhalt) - Wetter Rückblick - WetterKontor. Online verfügbar unter <https://www.wetterkontor.de/wetterrueckblick/monats-und-jahreswerte.asp?id=N548&jr0=2024&jr1=2024&mo0=1&mo1=12>, zuletzt aktualisiert am 29.07.2025, zuletzt geprüft am 29.07.2025.

Dong, Junfu; Cui, Xiaoyong; Niu, Haishan; Zhang, Jing; Zhu, Chuanlu; Li, Linfeng et al. (2022): Effects of Nitrogen Addition on Plant Properties and Microbiomes Under High Phosphorus Addition Level in the Alpine Steppe. In: *Frontiers in plant science* 13, S. 894365. DOI: 10.3389/fpls.2022.894365.

Estela (2025): Stickstoffmangel bei Pflanzen: Symptome, Ursachen und Lösungen. Hg. v. Atami. Online verfügbar unter <https://atami.com/de/blog/anbau/stickstoffmangel-bei-pflanzen-symptome-ursachen-und-loesungen>, zuletzt aktualisiert am 18.03.2025, zuletzt geprüft am 22.08.2025.

Fabig, Ilka (2007): Die Niederschlags- und Starkregenentwicklung der letzten 100 Jahre im Mitteldeutschen Trockengebiet als Indikatoren möglicher Klimaänderungen. Universitäts- und Landesbibliothek Sachsen-Anhalt.

FAO (2013): Internationales Jahr der Quinoa 2013. Hg. v. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Online verfügbar unter <https://www.fao.org/quinoa-2013/en/>, zuletzt aktualisiert am 18.03.2025, zuletzt geprüft am 18.03.2025.

Finck, Arnold (1992): Dünger und Dünung. Grundlagen und Anleitung zur Dünung der Kulturpflanzen. zweite, neubearbeitete Auflage. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH.

Future Market Insights (2023): Chia Seed Market Growth & Demand Forecast 2023-2033, zuletzt geprüft am 15.04.2025.

Gaju, O.; Allard, V.; Martre, P.; Snape, J. W.; Heumez, E.; LeGouis, J. et al. (2011): Identification of traits to improve the nitrogen-use efficiency of wheat genotypes. In: *Field Crops Research* 123 (2), S. 139–152. DOI: 10.1016/j.fcr.2011.05.010.

Galwey, N. W. (1992): The potential of quinoa as a multi-purpose crop for agricultural diversification: a review. In: *Industrial Crops and Products* 1 (2-4), S. 101–106. DOI: 10.1016/0926-6690(92)90006-H.

Gélinas, Bruce; Seguin, Philippe (2008): Evaluation of Management Practices for Grain Amaranth Production in Eastern Canada. In: *Agronomy Journal* 100 (2), S. 344–351. DOI: 10.2134/agronj2007.0189.

Geren, Hakan (2015): Effects of different nitrogen levels on the grain yield and some yield components of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under mediterranean climatic conditions. In: *Turkish Journal Of Field Crops* 20 (1). DOI: 10.17557/.39586.

Ghimire, Deepak; Das, Saurav; Mueller, Nathan D.; Creech, Cody F.; Santra, Dipak; Baenziger, P. Stephen et al. (2021): Effects of cultivars and nitrogen management on wheat grain yield and protein. In: *Agronomy Journal* 113 (5), S. 4348–4368. DOI: 10.1002/agj2.20836.

Gonzalez, Juan A.; Konishi, Yotaro; Bruno, Marcela; Valoy, Mariana; Prado, Fernando E. (2012): Interrelationships among seed yield, total protein and amino acid composition of ten quinoa (*Chenopodium quinoa*) cultivars from two different agroecological regions. In: *Journal of the science of food and agriculture* 92 (6), S. 1222–1229. DOI: 10.1002/jsfa.4686.

Grace-Martin, Karen (2020): Missing Data: Two Big Problems with Mean Imputation - The Analysis Factor. Online verfügbar unter <https://www.theanalysisfactor.com/mean-imputation/>, zuletzt aktualisiert am 09.08.2023, zuletzt geprüft am 01.10.2025.

Graziano, Sara; Agrimonti, Caterina; Marmiroli, Nelson; Gullì, Mariolina (2022): Utilisation and limitations of pseudocereals (quinoa, amaranth, and buckwheat) in food production: A review. In: *Trends in Food Science & Technology* 125, S. 154–165. DOI: 10.1016/j.tifs.2022.04.007.

Grimes, Samantha J.; Phillips, Timothy D.; Capezzone, Filippo; Graeff-Hönninger, Simone (2019): Impact of Row Spacing, Sowing Density and Nitrogen Fertilization on Yield and Quality Traits of chia (*Salvia Hispanica L.*) Cultivated in southwestern Germany. In: *Agronomy* 9 (3), S. 136. DOI: 10.3390/agronomy9030136.

Grimes, Samantha J.; Phillips, Timothy D.; Hahn, Volker; Capezzone, Filippo; Graeff-Hönninger, Simone (2018): Growth, Yield Performance and Quality Parameters of Three Early Flowering Chia (*Salvia hispanica L.*) Genotypes Cultivated in Southwestern Germany. In: *Agriculture* 8 (10), S. 154. DOI: 10.3390/agriculture8100154.

Hoffmann, Sabine; Scheipl, Fabian; Boulesteix, Anne-Laure (2023): Reproduzierbare und replizierbare Forschung. In: Moderne Verfahren der Angewandten Statistik: Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, S. 1–28. Online verfügbar unter https://link.springer.com/rwe/10.1007/978-3-662-63496-7_25-1.

Industrieverband Agrar (2025): Quinoa aus Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.iva.de/iva-magazin/schule-wissen/quinoa-aus-deutschland>, zuletzt aktualisiert am 11.04.2025, zuletzt geprüft am 14.04.2025.

Jacobsen, E. E.; Skadhauge, B.; Jacobsen, S.-E. (1997): Effect of dietary inclusion of quinoa on broiler growth performance. In: *Animal Feed Science and Technology* 65 (1-4), S. 5–14. DOI: 10.1016/S0377-8401(96)01082-6.

Jacobsen, S.-E. (2017): The scope for adaptation of quinoa in Northern Latitudes of Europe. In: *J Agronomy Crop Science* 203 (6), S. 603–613. DOI: 10.1111/jac.12228.

Jacobsen, Sven-Erik (2003): The Worldwide Potential for Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). In: *Food Reviews International* 19 (1-2), S. 167–177. DOI: 10.1081/FRI-120018883.

Jaikishun, Sirpaul; Li, Wenqiang; Yang, Zhenbiao; Song, Shikui (2019): Quinoa: In Perspective of Global Challenges. In: *Agronomy* 9 (4), S. 176. DOI: 10.3390/agronomy9040176.

Jamboonsri, Watchareewan; Phillips, Timothy D.; Geneve, Robert L.; Cahill, Joseph P.; Hildebrand, David F. (2012): Extending the range of an ancient crop, *Salvia hispanica* L.—a new ω3 source. In: *Genet Resour Crop Evol* 59 (2), S. 171–178. DOI: 10.1007/s10722-011-9673-x.

Joshi, Dinesh C.; Sood, Salej; Hosahatti, Rajashekara; Kant, Lakshmi; Pattanayak, A.; Kumar, Anil et al. (2018): From zero to hero: the past, present and future of grain amaranth breeding. In: *Theor Appl Genet* 131 (9), S. 1807–1823. DOI: 10.1007/s00122-018-3138-y.

Kabir, Kayenat; Vries Robbe, Sophie de; Godinho, Catrina (2024): Climate change mitigation policies in agriculture: An overview of sociopolitical barriers. In: *WIREs Climate Change* 15 (6), Artikel e916. DOI: 10.1002/wcc.916.

Koziol, M. J. (1992): Chemical composition and nutritional evaluation of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). In: *Journal of Food Composition and Analysis* 5 (1), S. 35–68. DOI: 10.1016/0889-1575(92)90006-6.

LfL (2014): Amarant. Hg. v. Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft. Online verfügbar unter https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/rohstoffpflanzen/dateien/steckbrief_amarant.pdf, zuletzt geprüft am 08.04.2025.

Libbert, Eike (1973): Lehrbuch der Pflanzenphysiologie. Jena: Gustav Fischer Verlag.

Lim, Jeong Gyu; Park, Hyun-Mee; Yoon, Ki Sun (2020): Analysis of saponin composition and comparison of the antioxidant activity of various parts of the quinoa plant (*Chenopodium quinoa* Willd.). In: *Food science & nutrition* 8 (1), S. 694–702. DOI: 10.1002/fsn3.1358.

Liu, F.; Stützel, H. (2002): Leaf water relations of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to soil drying. In: *European Journal of Agronomy* 16 (2), S. 137–150. DOI: 10.1016/S1161-0301(01)00122-8.

Lorenz, K.; Hwang, Y. S. (1985): Lipids in amaranths. Online verfügbar unter <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19851469636>.

LTZ (2015): Amarant. Hg. v. Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg. Online verfügbar unter https://www.landwirtschaft-bw.de/site/pbs-bw-new/get/documents/MLR.LEL/PB5Documents/ltz_ka/Service/Schriftenreihen/Hinweise%20zum%20Pflanzenbau/%C3%96kolandbau/HinweisePflanzenbau_Amarant_DL/Pflanzenbau%20Amarant.pdf, zuletzt geprüft am 08.04.2025.

Lu, Jingying; Zhang, Qi; Sun, Xiaojing; Deng, Yan; Guo, Hongxia; Wang, Chuangyun; Zhao, Li (2024): Study on the Mechanism of Slow-Release Fertilizer and Nitrogen Fertilizer on the Senescence Characteristics of Quinoa Leaves. In: *Agronomy* 14 (5), S. 884. DOI: 10.3390/agronomy14050884.

Managa, Gudani Millicent; Nemadodzi, Lufuno Ethel (2023): Comparison of Agronomic Parameters and Nutritional Composition on Red and Green Amaranth Species Grown in Open Field Versus Greenhouse Environment. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Online verfügbar unter <https://www.mdpi.com/2077-0472/13/3/685>, zuletzt aktualisiert am 06.09.2025, zuletzt geprüft am 06.09.2025.

Manoharan, R.; Asthana, S.; Somanathan Nair, C.; Gokhale T, Nishanth, D; Jaleel, A.; Sood, N. (2025): Exploring the hidden treasure in arid regions: pseudocereals as sustainable, climate-resilient crops for food security. In: *Frontiers* 2025, 19.09.2025.

Martínez-Núñez, M.; Ruiz-Rivas, M.; Vera-Hernández, P. F.; Bernal-Muñoz, R.; Luna-Suárez, S.; Rosas-Cárdenas, F. F. (2019): The phenological growth stages of different amaranth species grown in restricted spaces based in BBCH code. In: *South African Journal of Botany* 124, S. 436–443. DOI: 10.1016/j.sajb.2019.05.035.

Mary, Jeena (2018): Effect of Different Spacings and Fertilizer Levels on Growth Parameters and Yield of Chia (*Salvia hispanica* L.). In: *Int. J. Pure App. Biosci.* 6 (2), S. 259–263. DOI: 10.18782/2320-7051.6040.

Meier, Uwe; Bleiholder, Hermann; Buhr, Liselotte; Feller, Carmen; Hack, Helmut; Heß, Martin et al. (2009): The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants – history and publications –. 41-52 Pages / Journal of Cultivated Plants, Vol. 61 No. 2 (2009). In: *Journal fur Kulturpflanzen* 61 (2), S. 41–52. DOI: 10.5073/JfK.2009.02.01.

Mengel, Konrad; Kirkby, Ernest A.; Kosegarten, Harald; Appel, Thomas (2001): Principles of Plant Nutrition. Dordrecht: Springer Netherlands.

Mohanty, Punyasloka; Umesh, C. Sarangi, Dillip Ranjan; Kumarsanodiya, Lalit (2021): Impact of Spacing and Nitrogen Levels on growth and Yield of Chia (*Sylvia hispanica* L.). Online verfügbar unter <https://www.researchtrend.net/bfij/pdf/25%20Impact%20of%20Spacing%20and%20Nitrogen%20Levels%20on%20growth%20and%20Yield%20of%20Chia%20Sylvia%20hispanica%20L.%20Punyasloka%20Mohanty.pdf>, zuletzt geprüft am 20.09.2025.

Mordor Intelligence (2024): Marktgrößen- und Marktanteilsanalyse für Chia-Samen – Wachstumstrends und -prognosen (2024 – 2029).

Muñoz, Loreto A.; Cobos, Angel; Diaz, Olga; Aguilera, José Miguel (2013): Chia Seed (*Salvia hispanica*): An Ancient Grain and a New Functional Food. In: *Food Reviews International* 29 (4), S. 394–408. DOI: 10.1080/87559129.2013.818014.

Muriithi, Moses Njoka; Masinde, Peter; Mwenda, Cynthia Mugo (2022): Influence of varying soil moisture on growth and yield of Chia (*Salvia hispanica* L.) in Meru county, Kenya. In: *AJSTSS* 1 (2), S. 26–35. DOI: 10.58506/ajstss.v1i2.113.

Myers, Robert L. (1998): Nitrogen Fertilizer Effect on Grain Amaranth. In: *Agronomy Journal* 90 (5), S. 597–602. DOI: 10.2134/agronj1998.00021962009000050005x.

Or, Dani; Tuller, Markus (2023): Capillarity. In: Encyclopedia of Soils in the Environment: Elsevier, S. 225–239.

Pospíšil, Ana; Pospíšil, M.; Varga, B.; Svečnjak, Z. (2006): Grain yield and protein concentration of two amaranth species (*Amaranthus* spp.) as influenced by the nitrogen fertilization. In: *European Journal of Agronomy* 25 (3), S. 250–253. DOI: 10.1016/j.eja.2006.06.001.

Präger, Achim; Munz, Sebastian; Nkebiwe, Peteh Mehdi; Mast, Benjamin; Graeff-Hönninger, Simone (2018): Yield and Quality Characteristics of Different Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Cultivars Grown under Field Conditions in Southwestern Germany. In: *Agronomy* 8 (10), S. 197. DOI: 10.3390/agronomy8100197.

Rastogi, Anu; Shukla, Sudhir (2013): Amaranth: a new millennium crop of nutraceutical values. In: *Critical reviews in food science and nutrition* 53 (2), S. 109–125. DOI: 10.1080/10408398.2010.517876.

Repo-Carrasco, R.; Espinoza, C.; Jacobsen, S.-E. (2003): Nutritional Value and Use of the Andean Crops Quinoa (*Chenopodium quinoa*) and Kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*). In: *Food Reviews International* 19 (1-2), S. 179–189. DOI: 10.1081/FRI-120018884.

Ribitsch et al. (2011): Gesamtheitliche Nutzung von Quinoa für Feinchemikalien, Diätnahrungsmittel und Fasermaterial. In: *Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Berichte aus Energie- und Umweltforschung* (14). Online verfügbar unter https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/fdz_pdf/endbericht_1114_quinoa.pdf, zuletzt geprüft am 19.03.2025.

Schilling, Günther (2000): Pflanzenernährung und Düngung. Unter Mitarbeit von M. Kerschberger, K.-F. Kummer, H. Peschke. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.

Schubert, Sven (2018): Pflanzenernährung Sven Schubert. 3., vollständig überarb. Auflage. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer (UTB, UTB Band-Nr. 2802).

Schulte auf'm Erley, Gunda; Kaul, Hans-Peter; Kruse, Markus; Aufhammer, Walter (2005): Yield and nitrogen utilization efficiency of the pseudocereals amaranth, quinoa, and buckwheat under differing nitrogen fertilization. In: *European Journal of Agronomy* 22 (1), S. 95–100. DOI: 10.1016/j.eja.2003.11.002.

Sharifi-Rad, Mehdi; Ozcelik, Beraat; Altın, Gökçe; Daşkaya-Dikmen, Ceren; Martorell, Miquel; Ramírez-Alarcón, Karina et al. (2018): Salvia spp. plants—from farm to food applications and phytopharmacotherapy. In: *Trends in Food Science & Technology* 80, S. 242–263. DOI: 10.1016/j.tifs.2018.08.008.

Shea, Fred; Watts, C. E. (1939): Dumas method for organic nitrogen. DOI: 10.1021/ac50134a013.

Shewry, Peter R. (2002): The Major Seed Storage Proteins of Spelt Wheat, Sorghum, Millets and Pseudocereals. In: Pseudocereals and Less Common Cereals: Springer, Berlin, Heidelberg, S. 1–24. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-09544-7_1.

Simopoulos, A. P. (2006): Evolutionary aspects of diet, the omega-6/omega-3 ratio and genetic variation: nutritional implications for chronic diseases. In: *Biomedicine & Pharmacotherapy* 60 (9), S. 502–507. DOI: 10.1016/j.biopha.2006.07.080.

Sinclair, Thomas R. (2021): “Basis of yield component compensation in crop plants with special reference to field bean, *Phaseolus vulgaris*” by M. Wayne Adams, *Crop Science* (1967) 7, 505–510. In: *Crop Science* 61 (2), S. 863–865. DOI: 10.1002/csc2.20350.

Sosa-Zuniga, V.; Brito, V.; Fuentes, F.; Steinfort, U. (2017): Phenological growth stages of quinoa (*Chenopodium quinoa*) based on the BBCH scale. In: *Annals of Applied Biology* 171 (1), S. 117–124. DOI: 10.1111/aab.12358.

Stallknecht, G. F.; Schulz-Schaeffer, J. R. (1993): Amaranth rediscovered. Online verfügbar unter <http://www.ask-force.org/web/feral-new/stallknecht-amaranth-1993.pdf>.

TFZ (2022): Amarant. Hg. v. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe. Online verfügbar unter <https://www.tfz.bayern.de/rohstoffpflanzen/einjaehrige-kulturen/091177/index.php>, zuletzt aktualisiert am 08.04.2025, zuletzt geprüft am 08.04.2025.

TFZ (2025): Quinoa (*Chenopodium quinoa*). Hg. v. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe. Online verfügbar unter <https://www.tfz.bayern.de/rohstoffpflanzen/einjaehrige-kulturen/034290/index.php>, zuletzt aktualisiert am 02.03.2025, zuletzt geprüft am 02.03.2025.

Thanapornpoonpong, Sa-nguansak (2004): Effect of nitrogen fertilizer on nitrogen assimilation and seed quality of amaranth and quinoa. Online verfügbar unter <https://ediss.uni-goettingen.de/handle/11858/00-1735-0000-0006-AB4D-1>.

Top Agrar (2024): Chia (1), Artikel Dokumentnummer: TOPA_20231219_048_01_01, S. 48. Online verfügbar unter https://www.wiso-net.de/document/TOPA__0e8bc55cb63cec31f78036b2492c56c820722896.

Universität Leipzig (2025): Grafiken | Methodenportal der Uni Leipzig. Online verfügbar unter <https://home.uni-leipzig.de/methodenportal/grafiken-2/>, zuletzt aktualisiert am 09.09.2025, zuletzt geprüft am 09.09.2025.

Valenzuela Zamudio, Francisco; Rojas Herrera, Rafael; Segura Campos, Maira Rubi (2024): Unlocking the potential of amaranth, chia, and quinoa to alleviate the food crisis: a review. In: *Current Opinion in Food Science* 57, S. 101149. DOI: 10.1016/j.cofs.2024.101149.

Valeri, M.; Roberto, M.; Dmitriev, B. (2022): Determination of physiological maturity of four quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) varieties for introduction in the Russian Federation. In: *Res. on Crops* 23 (2). DOI: 10.31830/2348-7542.2022.042.

van Grinsven, Hans J. M.; Ebanyat, Peter; Glendining, Margaret; Gu, Baojing; Hijbeek, Renske; Lam, Shu Kee et al. (2022): Establishing long-term nitrogen response of global cereals to assess sustainable fertilizer rates. In: *Nature food* 3 (2), S. 122–132. DOI: 10.1038/s43016-021-00447-x.

Vicentin, Lucas; Canales, Javier; Calderini, Daniel F. (2024): The trade-off between grain weight and grain number in wheat is explained by the overlapping of the key phases determining these major yield components. In: *Frontiers in plant science* 15, S. 1380429. DOI: 10.3389/fpls.2024.1380429.

Wetter Kontor (2025): Monats- und Jahreswerte Bernburg an der Saale (Anhalt) - Wetter Rückblick. Datenquelle Deutscher Wetterdienst. Online verfügbar unter <https://www.wetter-kontor.de/wetter-rueckblick/monats-und-jahres-werte.asp?id=N548&jr0=1991&jr1=2020&mo0=1&mo1=12>, zuletzt aktualisiert am 13.08.2025, zuletzt geprüft am 13.08.2025.

Yu, Chen; Liang, Dong; Yang, Cui; Zhao, Bing; Dong, Qin; Wu, Aoli et al. (2022): Research progress and the application of near-infrared spectroscopy in protein structure and molecular interaction analysis. In: *Vibrational Spectroscopy* 121, S. 103390. DOI: 10.1016/j.vibspec.2022.103390.

Zambrano, Jenny; Garzon-Lopez, Carol X.; Yeager, Lauren; Fortunel, Claire; Cordeiro, Norbert J.; Beckman, Noelle G. (2019): The effects of habitat loss and fragmentation on plant functional traits and functional diversity: what do we know so far? In: *Oecologia* 191 (3), S. 505–518. DOI: 10.1007/s00442-019-04505-x.

10. Anhang

In Abbildung 20 ist die geografische Karte des mitteldeutschen Trockengebiets nach (Fabig 2007) abgebildet. Bernburg liegt am Nordöstlichen Rand des Gebietes.

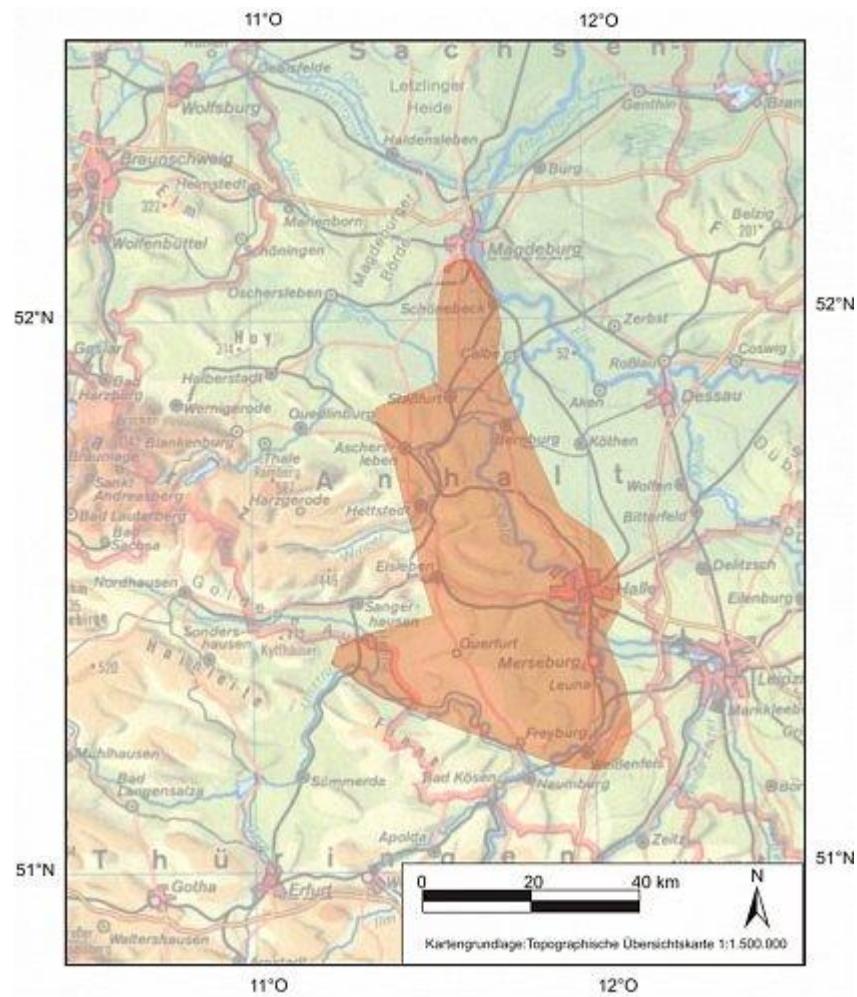


Abbildung 20: Geografische Karte des mitteldeutschen Trockengebietes nach (Fabig 2007)

Die Abbildung 21 veranschaulicht den Versuchsaufbau im Erntejahr 2022 nach (Dallmann et al. 2022).

Versuch 32.0/22 - Einfluss der N-Düngung auf Ertrag und Qualität bei ausgewählten Pseudogetreiden

Aussaat:	A Sorten:	B Varianten N-Düngung:
09.05.2022	a1 Quinoa - Jessie	b1 Kontrolle
Vorfrucht:	a2 Chia - Juana	b2 50 kgN/ha
Winterraps	a3 Roter Amaranth - Anna	b3 100 kgN/ha

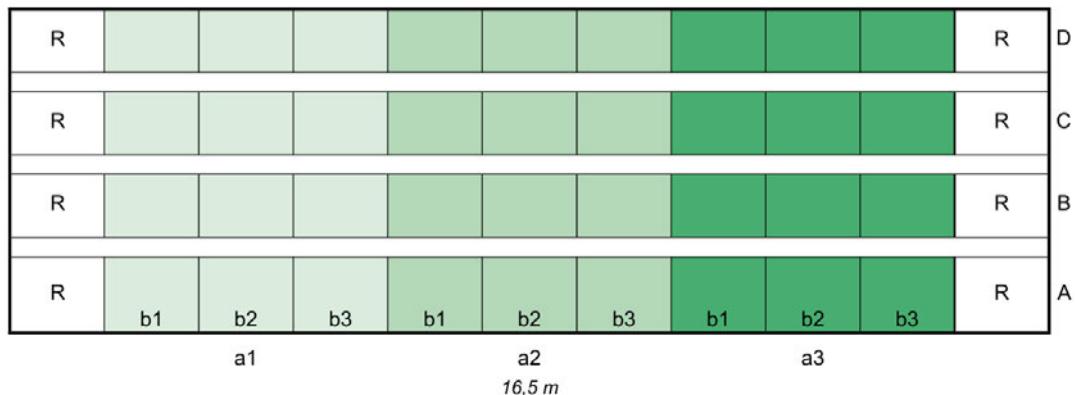


Abbildung 21: Versuchsaufbau 2022 nach (Dallmann et al. 2022)

Abbildung 22 zeigt den Aufbau des Versuches von 2023 nach (Dallmann et al. 2023). Dieser Aufbau ist identisch zu dem aus dem Jahr 2022.

Versuch 32.0/23 - Einfluss der N-Düngung auf Ertrag und Qualität bei ausgewählten Pseudogetreiden

A Sorten:	B Varianten N-Düngung:	Aussaat: 12.05.2023
a1 Quinoa - Jessie	b1 Kontrolle	Vorfrucht: Winterripraps
a2 Chia - Juanita	b2 50 kgN/ha	Aufgang: 21.05.2023
a3 Roter Amaranth - Anna	b3 100 kgN/ha	

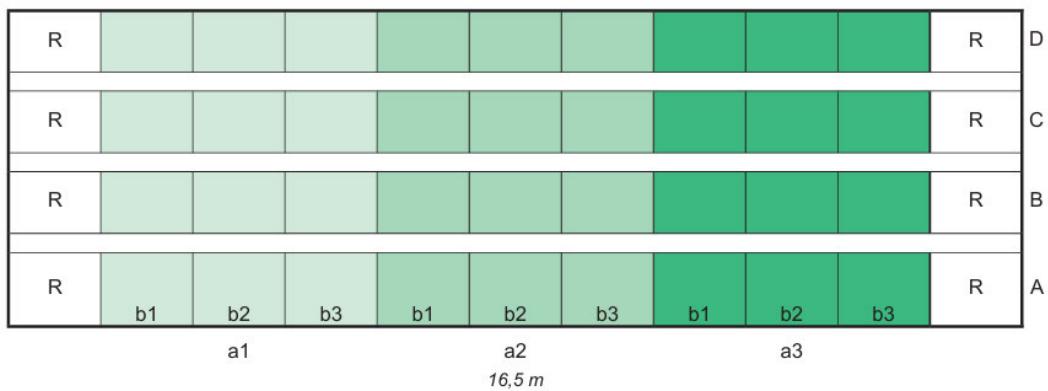


Abbildung 22: Versuchsaufbau 2023 nach (Dallmann et al. 2023)

Die nachstehende Abbildung 23 zeigt, dass im Veruchsjahr 2024 neben der Versuchsanlage der Düngestufen, ein Quinoasortenversuch angelegt wurde (Dallmann et al. 2024).

**Versuch 32.0/24 -
Einfluss der N-Düngung auf Ertrag und Qualität bei ausgewählten Pseudogetreiden**

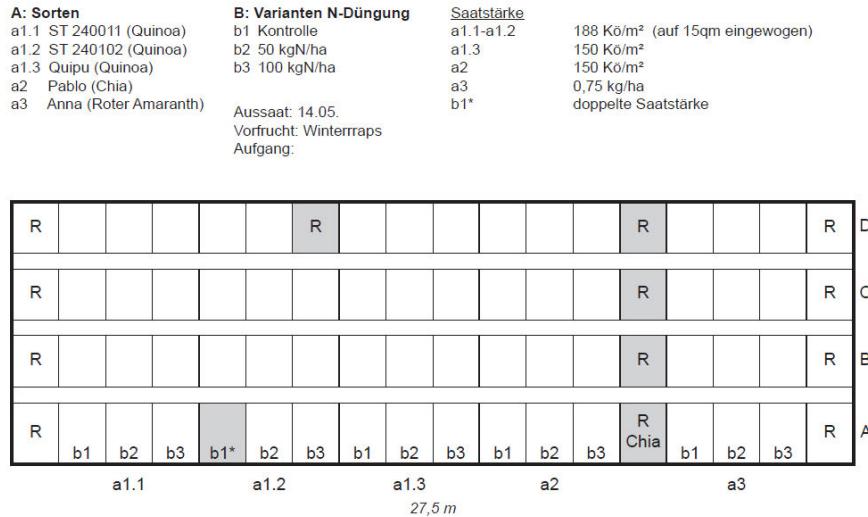


Abbildung 23: Versuchsaufbau 2024 nach (Dallmann et al. 2024)

Abbildung 24 ist ein Ausschnitt des Temperaturverlaufs der Wetterstation Bernburg im April bis Mai 2024, der zur Rekonstruktion des Wetters zur Aussaat der Pseudogetreidekulturen 2024 genutzt wurde (Wetter Kontor 2025; Deutscher Wetterdienst 2025).

Temperaturen Bernburg an der Saale (Anhalt) (06.04.2024 bis 31.05.2024)

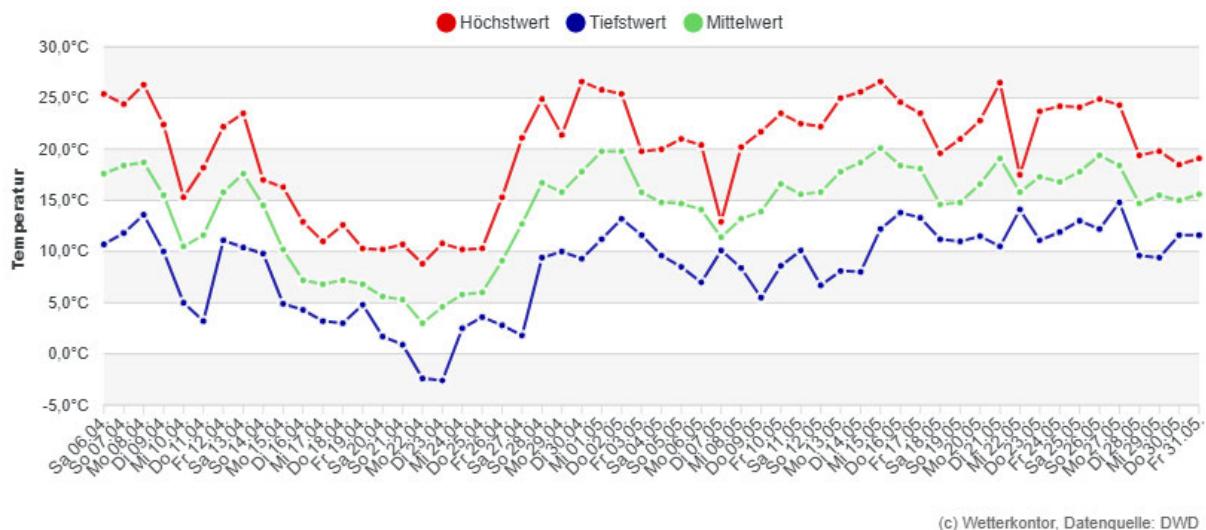
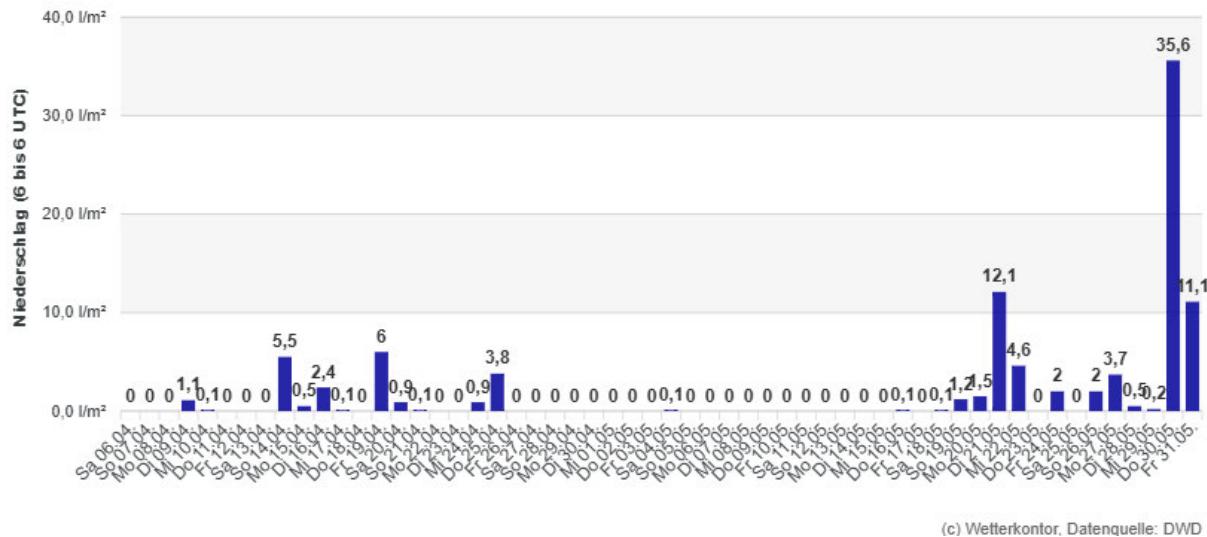


Abbildung 24: Temperaturverlauf am Standort Bernburg (Saale) vom 06.04.2024 bis 31.05.2024 dargestellt von (Wetter Kontor 2025; Deutscher Wetterdienst 2025)

Die Abbildung 25 zeigt die Niederschlagsereignisse im April und Mai 2024 von der Wetterstation Bernburg (Wetter Kontor 2025; Deutscher Wetterdienst 2025). Diese Darstellung wurde ebenso genutzt um den heterogenen Feldaufgang der Kulturen 2024 zu erörtern.

Niederschlag Bernburg an der Saale (Anhalt) (06.04.2024 bis 31.05.2024)



(c) Wetterkontor, Datenquelle: DWD

Abbildung 25: Niederschlagsverteilung am Standort Bernburg (Saale) vom 06.04.2024 bis 31.05.2024 dargestellt von (Wetter Kontor 2025; Deutscher Wetterdienst 2025)

11. Selbstständigkeitserklärung



Name, Vorname: Schmidt, Linus Benedikt

Matrikelnummer: 5091319

Studiengang: Bachelor Landwirtschaft

Selbstständigkeitserklärung

Durch meine Unterschrift erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel

„Einfluss der Stickstoffdüngung auf Ertrag und Qualität bei Quinoa, Amarant und Chia als ausgewählte Pseudogetreidekulturen“

selbstständig verfasst und in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht in einem anderen Studiengang als Prüfungsleistung vorgelegt habe. Ich habe alle von mir genutzten Hilfsmittel und Quellen, einschließlich generativer Modelle/KI angegeben und die den verwendeten Quellen und Hilfsmitteln wörtlich oder sinngemäß entnommenen Stellen in Form von Zitaten kenntlich gemacht. Darüber hinaus habe ich keine Hilfsmittel verwendet.

Ort, Datum Bernburg (Saale), 10.10.2025

Unterschrift

