

Hochschule Anhalt

Fachbereich Landwirtschaft, Ökotrophologie und Landschaftsentwicklung



Bachelorarbeit

„Einfluss der Kaliumversorgung auf den Ertrag und die Qualität von
verschiedenen landwirtschaftlichen Kulturen“

Name, Vorname	Fröhlich, Leya
Matrikelnummer	4065838
Geboren am	29.08.1998
Studiengang	BA Landwirtschaft, 7. Fachsemester

1. Gutachter	Frau Prof. Dr. Anette Deubel
2. Gutachter	Herr Prof. Dr. Heiko Scholz

Bernburg (Saale), den 25.03.2021

Bibliographische Beschreibung

Name, Vorname: Fröhlich, Leya

Thema: „Einfluss der Kaliumversorgung auf den Ertrag und die Qualität von verschiedenen landwirtschaftlichen Kulturen“

2021/ 51 Seiten / 13 Tabellen/ 8 Abbildungen

Bernburg: Hochschule Anhalt

Fachbereich Landwirtschaft, Ökotoxikologie und
Landschaftsentwicklung

Autorreferat:

In der vorliegenden Arbeit wurde der Zeitraum der Versuchsjahre 2019 bis 2020 eines Dauerdüngungsversuchs mit Kalium an der Hochschule Anhalt in Bernburg-Strenzfeld im Hinblick des Einflusses von diesem auf den Ertrag und die Qualität der Kulturen Winterweizen, Zuckerrüben, Winter- und Sommergerste sowie Silomais untersucht.

Dabei wurden mögliche signifikante Veränderungen in den Ergebnissen des Ertrags und der Qualität dieser Kulturen in Zusammenhang mit der Höhe der K-Versorgung und K-Form ermittelt. Dazu erfolgte die K-Düngung in fünf verschiedenen Stufen, wobei die Erfassung und Auswertung von vielen Parametern wie Kornertrag, Rohproteingehalt und Zuckergehalt je nach Kultur als Grundlage der Untersuchung dienten. Die daraus resultierenden Ergebnisse wurden anschließend im Vergleich mit dem vorher dargelegten Literaturstand diskutiert.

Das Ziel dieser Arbeit war es, Verbesserungsmöglichkeiten und Lösungsansätze für eine erhöhte K-Effizienz unter der Voraussicht von steigenden Bevölkerungszahlen und dem Klimawandel herauszuarbeiten. So konnten diese vor allem in der Relevanz einer ausreichenden K-Versorgung zur Absicherung stabiler Erträge und Qualitäten gesehen werden. Zusätzlich konnte auch die Optimierung der K-Effizienz durch Anpassung der K-Düngung an die Bodenreserven bzw. eine Steigerung der Freisetzung von Kalium aus diesen als Lösungsansatz herausgearbeitet werden.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1. Einleitung	1
2. Literatur	2
2.1 chemische Grundlagen	2
2.2 Kalium im Boden	3
2.2.1 Transformationsverhalten	3
2.2.2 Bodenanalyse	5
2.3 Nährstofftransport zur Wurzel	7
2.4 Funktionen in der Pflanze	9
2.4.1 Einfluss auf osmotische Funktionen	9
2.4.2 Einfluss auf Enzymaktivitäten	10
2.4.3 Einfluss auf den Ladungsausgleich	12
2.5 Ernährungsstörungen	13
2.6 Düngemittel	15
2.6.1 Vorkommen und Herstellung	15
2.6.2 Rahmenbedingungen und Düngerformen	16
3. Zielstellung	18
4. Material und Methoden	19
4.1 Standortbeschreibung	19
4.2 Versuchsaufbau	21
4.3 Versuchsdurchführung	22
4.4 Datenerfassung	23
4.5 Statistische Auswertung	24
5. Ergebnisse	25
5.1 Winterweizen	26
5.2 Silomais	26
5.3 Sommergerste	27
5.4 Zuckerrüben	28
5.5 Wintergerste	29
6. Diskussion	30

7. Schlussfolgerung	36
8. Zusammenfassung	37
Literaturverzeichnis	38
Anhang	43
Selbstständigkeitserklärung	44

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kaliumdynamik im Boden (IVA, 2019)	3
Abbildung 2: K-Mangel bei Hafer (<i>Avena sativa</i>) zum Zeitpunkt des Rispschiebens (BERGMANN, 1986).....	14
Abbildung 3: Feldsituation von Weizen (<i>Triticum aestivum</i> L.) mit K-Mangelzustand und erhöhtem biotischem Stress (ZÖRB et al., 2013)	14
Abbildung 4: Blätter einer Zuckerrübe (<i>Beta vulgaris saccharifera</i>) mit sehr stark ausgeprägten K-Mangelsymptomen (BERGMANN, 1986)	14
Abbildung 5: Ausgeprägte Spitzen- und Blattnekrosen den älteren Blättern einer Maispflanze (<i>Zea mays</i>) zum Blühzeitpunkt (BERGMANN, 1986)	14
Abbildung 6: Vergleich des durchschnittlichen Jahrestemperaturverlauf am Standort Bernburg-Strenzfeld von 1981 bis 2010 (nach BÖTTCHER, 2012) mit dem Temperaturverlauf in der Vegetationsperiode 2019/2020 (nach GILLE et al., 2020)	19
Abbildung 7: Vergleich der durchschnittlichen Jahresniederschlagsmenge am Standort Bernburg-Strenzfeld von 1981 bis 2010 (nach BÖTTCHER, 2012) mit der Niederschlagsmenge in der Vegetationsperiode 2019/2020 (nach GILLE et al., 2020)	20
Abbildung 8: Versuchsplan (GILLE et al., 2020)	22

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Definition der Gehaltsklassen für pflanzenverfügbare Nährstoffe im Boden (nach VDLUFA, 1999)	6
Tabelle 2: Richtwerte für die K-Gehaltsklasse C (nach VDLUFA, 1999).....	6
Tabelle 3: Mittlere Gehalte an Kalium von Ackerkulturen zur Zeit der Ernte in der FM (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010)	9
Tabelle 4: Zusammensetzung verschiedener Kaliumdünger (nach SCHUBERT, 2006).....	17
Tabelle 5: Varianten der Dünge­stufen unter Berücksichtigung der Sortenwahl, Fruchtfolge und -art (nach GILLE et al., 2020)	21
Tabelle 6: Richtwerte für Düngung und Pflanzenschutz (GILLE et al., 2020).....	22
Tabelle 7: Nährstoffgehalte des Bodens nach der Ernte im Jahr 2019 (eigene Berechnungen).....	25
Tabelle 8: N _{min} - und nFK- Werte zu Vegetationsbeginn (nach DEUBEL, 2020).....	25
Tabelle 9: Ergebnisse Winterweizenanbau 2020 (nach DEUBEL, 2020)	26
Tabelle 10: Ergebnisse Silomaisanbau 2020 (nach DEUBEL, 2020)	27
Tabelle 11: Ergebnisse Sommergerstenanbau 2020 (nach DEUBEL, 2020)	27
Tabelle 12: Ergebnisse Zuckerrübenanbau 2020 (nach DEUBEL, 2020)	28
Tabelle 13: Ergebnisse Wintergerstenanbau 2020 (nach DEUBEL, 2020).....	29

Abkürzungsverzeichnis

ATP	Adenosintriphosphat
BBCH	Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Bundessortenamt und chemische Industrie
bzw	beziehungsweise
Ca	Calcium
CAL	Calcium-Acetat-Lactat
Cl	Chlor
cm	Zentimeter
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
dt	Dezitonne
ESTA-Verfahren	Elektrostatisches Verfahren
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FM	Frischmasse
g	Gramm
H	Wasserstoff
ha	Hektar
K	Kalium
KCl	Kaliumchlorid
kg	Kilogramm
K ₂ O	Kaliumoxid
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
LLG	Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau
m	Meter
m ²	Quadratmeter
Mg	Magnesium
mg	Milligramm
MgCl	Magnesiumchlorid

MgO	Magnesiumoxid
mm	Millimeter
mM	Millimolar
mmol	Millimol
N	Stickstoff
Na	Natrium
Na ₂ O	Natriumoxid
NaCl	Natriumchlorid
nFK	nutzbare Feldkapazität
N _{min}	Gehalt an mineralisiertem Stickstoff
NN	Normalnull (über dem Meeresspiegel)
P ₂ O ₅	Diphosphorpentoxid
pH	pondus Hydrogenii
S	Seite
SG	Sommergerste
SM	Silomais
SO ₃	Schwefeltrioxid
TKG	Tausendkorngewicht
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
VDLUFA	Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- & Forschungsanstalten
vgl	vergleiche
WG	Wintergerste
WW	Winterweizen
ZR	Zuckerrübe
°C	Grad Celsius
\bar{x}	Mittelwert
%	Prozent
σ	Standartabweichung

1. Einleitung

Der Mensch erzeugt seit Jahrtausenden gezielt pflanzliche Produkte mittels des Ackerbaus, allerdings werden erst seit etwa 170 Jahren die biologischen, chemischen und physikalischen Prozesse verstanden, welche für die Entwicklung dieser verantwortlich sind. Die vorher herrschende Unwissenheit über diese Prozesse hat in der Vergangenheit zu fatalen Hungersnöten geführt, da die Nahrungsmittelproduktion nicht mit den stetig ansteigenden Bevölkerungszahlen mithalten konnte (FINCK, 2007). Allerdings gibt es auch heute noch solche Hungersnöte in einigen Entwicklungsländern. Dort sind zwar auch soziale und politische sowie wirtschaftliche Problematiken als wichtige Ursache zu nennen, aber der mangelnde Bildungsstand der Bevölkerung und das so fehlende „Know-How“ über die Pflanzenproduktion trägt ebenfalls dazu bei (SCHUBERT, 2006). Dabei ist eine ausreichende Versorgung mit Lebensmitteln durch eine effiziente Produktion der Grundstein für die Entwicklung eines hohen Lebensstandards, da die Mehrproduktion in der Landwirtschaft eine ökonomische Voraussetzung dafür darstellt.

Trotz des demnach relativ jungen Wissenstandes über die Landwirtschaft auf naturwissenschaftlicher Basis, konnten bereits viele Erfolge zur Verbesserung der Effizienz erzielt werden. So legte Carl Philipp Sprengel, welcher als Begründer der Mineralstofftheorie bekannt ist, im Jahr 1828 einen wichtigen Grundstein für die Entwicklung der modernen Pflanzenernährung durch die erstmalige Formulierung des Gesetzes vom Minimum. Dieses lautet: „Wenn eine Pflanze zwölf Stoffe zu ihrer Ausbildung bedarf, so wird sie nimmer aufkommen, wenn nur ein einziger fehlt, und stets kümmerlich wird sie wachsen, wenn einer derselben nicht in der Menge vorhanden ist, als es die Natur der Pflanze erheischt“ (SCHUBERT, 2006). Die Anzahl der Pflanzennährstoffe hat sich durch weiterführende Untersuchungen jedoch noch ausgedehnt und es wurde eine Einteilung in Makro- und Mikronährstoffe vorgenommen, welche sich an der notwendigen Menge orientiert.

Allerdings gibt es noch viele Ansatzpunkte zur Optimierung und Anpassung der heutigen Pflanzenproduktion an die sich kontinuierlich verändernden Gegebenheiten wie Bevölkerungszahl, Klima, Flächenausstattung, Standortbedingungen und technischer Fortschritt. So hat sich die Weltbevölkerung seit den 1960er Jahren nach Angaben von ZÖRB et al. (2013) von drei auf sieben Milliarden Menschen mehr als verdoppelt und nach Prognosen von VON BRAUN (2018) müssen auch in Zukunft immer mehr Menschen von immer weniger Fläche ernährt werden. Um diesen ansteigenden Lebensmittel- und Energiebedarf zukünftiger Generationen zu decken, muss der Ertrag pro Hektar gesteigert werden, wobei gleichzeitig die Ressourcen des Planeten erhalten bleiben sollen. Da sich zudem aus Klimamodellen entnehmen lässt, dass Dürre- und Hitzeperioden durch den Klimawandel in vielen Regionen zunehmen werden, sind in Zukunft besondere Herausforderungen an die Landwirtschaft gestellt. In diesem Zusammenhang spielt neben vielen anderen Nährstoffen der Makronährstoff Kalium eine besonders wichtige Rolle, da er entscheidend für viele physiologische Prozesse in der Pflanze ist. Diese sind dem Wachstum, der Ertrags- und Qualitätsbildung sowie der Stressresistenz beim Anbau von landwirtschaftlichen Kulturen förderlich (ZÖRB et al., 2013). So wird in der folgenden Arbeit der Einfluss von Kalium auf den Ertrag und die Qualität von verschiedenen Kulturen thematisiert.

2. Literatur

2.1 chemische Grundlagen

Kalium zählt zu den so genannten Alkalimetallen, welche sich in der ersten Hauptgruppe des Periodensystems befinden. Sie haben ein Elektron auf der äußersten Schale und sind bestrebt dieses abzugeben um die Edelgaskonfiguration zu erreichen. Kalium gibt sein Elektron daher sehr leicht ab, sodass es an der Luft oxidieren würde und auch in Wasser schnell reagiert. Allerdings kommt es in der Natur in freiem, metallischem Zustand nicht vor. Durch die leichte Abgabe des äußeren Elektrons liegt Kalium in Lebewesen immer als einwertig positiv geladenes Ion (K^+) vor, welches durch seine Eigenschaften als Kation viele Auswirkungen auf sein Umfeld hat. Es befindet sich in Pflanzen demzufolge also weder in organischen Verbindungen, noch wird es in diese eingebaut, sondern begünstigt beispielsweise enzymatische Reaktionen (RICHTER, 2005).

Zudem ist Kalium im Boden im Vergleich zu anderen Nährstoffen relativ fest gebunden, sodass es kein hohes Auswaschungsrisiko gibt, denn mit zunehmender Atommasse steigt der Ionendurchmesser der Alkaliionen an, wobei gleichzeitig die Dicke der Hydratationshülle abnimmt. Der Grund dafür liegt aus chemischer Sichtweise darin, dass sich die Ladung bei einem geringeren Ionendurchmesser auf einer geringeren Oberfläche konzentriert, sodass viele Wassermoleküle aufgrund ihrer Eigenschaften als Dipol angezogen werden und sich eine dickere Hydrathülle ausbilden kann. So kommt zum Beispiel die positive Ladung von Kalium mehr zur Geltung als die von Natrium, da sein Ionendurchmesser größer ist und damit seine Hydrathülle kleiner. Es gibt also eine geringere Abschirmung der Ladung, wodurch Kalium stärker von den negativ geladenen Bodenteilchen angezogen wird.

Des Weiteren zählt Kalium wie bereits erwähnt zu den Pflanzennährstoffen, wobei dafür drei Kriterien erfüllt sein müssen. So kann die Pflanze bei einem K-Mangel seinen Lebenszyklus nicht vollenden, der Mangel ist spezifisch für das Element und es ist mindestens eine spezifische Funktion dessen in der Pflanze nachgewiesen. Bei Kalium handelt es sich dabei um ein Makroelement, welches bedeutet, dass es in höheren Mengen von über 0,5 g/kg TM benötigt wird (SCHUBERT, 2006). So ist K laut ZÖRB et al. (2013) an zweiter Stelle nach N der Nährstoff, der in den größten Mengen von den Pflanzen benötigt wird.

2.2 Kalium im Boden

2.2.1 Transformationsverhalten

Kalium ist in primären Silicaten wie Kalifeldspäten und Glimmern, aber auch in den silicatischen Tonmineralen Illit und Vermiculit gebunden. In Böden liegt die Konzentration für K nach SCHILLING (2000) zwischen 0,2 und 3 %. Dies ist allerdings auch von der Bodenart abhängig, sodass tonreiche Böden im Vergleich zu Sandböden generell einen höheren K-Gehalt aufweisen. Der Grund dafür liegt darin, dass diese, durch ihren erhöhten Anteil an negativ geladenen Bodenkolloiden und die daraus resultierende gesteigerte Kationenaustauschkapazität, Nährstoffe besser fixieren können. Die gesamte K-Dynamik der Mineralböden erfolgt auf Grundlage des in der Abbildung 1 dargestellten Gleichgewichts, wobei Kalium immer als K^+ -Ion vorliegt.

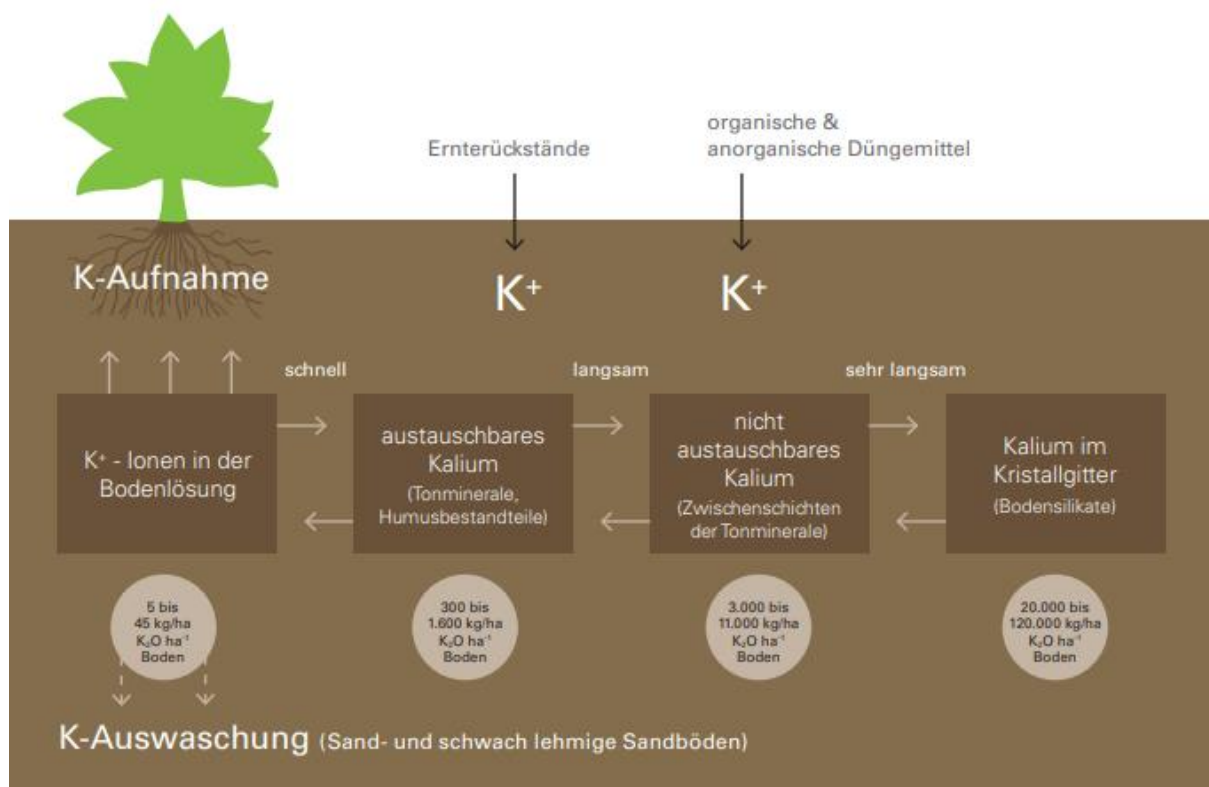


Abbildung 1: Kaliumdynamik im Boden (IVA, 2019)

Demzufolge erfolgt bei Kaliumentzug durch die Pflanze zunächst eine Nachlieferung von austauschbarem K, welches in seiner Konzentration durch die Düngung beeinflusst wird und nach SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (2010) in der Ackerkrume je nach Mineralbestand der Böden 100-1000 kg K/ha und in der Bodenlösung 2-20 mg/Liter beträgt. Daraufhin erfolgt eine Nachlieferung von K aus den Zwischenschichten der Tonminerale, sodass die verschiedenen Formen in der Bodenlösung im Gleichgewicht stehen. Die Übergänge zwischen diesen finden allerdings mit unterschiedlicher Geschwindigkeit statt.

So geht austauschbares K relativ schnell in die Bodenlösung und ist damit direkt pflanzenverfügbar, wohingegen die Nachlieferung des in den Zwischenschichten fixierten Kaliums deutlich langsamer erfolgt. Der Grund dafür liegt darin, dass dieses K erst durch langsame Diffusionsvorgänge unter einer Aufweitung der Zwischenschichten freigesetzt wird (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010). Um Kalium aus dem Kristallgitter herauszulösen, ist eine Zerstörung der Silikate erforderlich, welches ein extrem langwieriger Prozess ist und in einem neutralen Boden kaum stattfindet. Dennoch zeigen jüngste Untersuchungen, dass eine Düngung mit K-haltigen Primärmineralien wie Biotit auf einem Boden mit K-Mangel zu einer langfristigen Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit führen kann, wobei dies aufgrund des langen Verwitterungszeitraums kein Ersatz zu löslichen K-Düngemitteln darstellt (SHENG, 2005; BASAK and BISWAS, 2009). Durch den mehrfach aufeinander folgenden Anbau von Pflanzen lässt sich also laut SCHILLING (2000) viel Kalium aus den Zwischenschichten herauslösen, welches auch der Grund dafür ist, dass die K-Mangelvariante bei einem Dauerdüngungsversuch meistens erst nach einer Zeit von 15-20 Jahren Ertragsausfälle aufweist. Zudem wird der Ertragsunterschied durch den Kaliummangel häufig eher bei Hackfrüchten deutlich (SCHACHTSCHABEL, 1985).

In bestimmten Böden kann es allerdings auch zu einer K-Fixierung in den Zwischenschichten von Schichtsilikaten kommen. Diese Böden haben einen hohen Tonanteil, welcher viele aufweitbare Tonminerale beinhaltet, und werden als kaliumdüngungsaktive Böden bezeichnet. Nach SPARKS (1987) sind Montmorillonit, Vermiculit und verwitterte Glimmer die wichtigsten Tonminerale, die zur K-Fixierung neigen. Durch diese ist das Kalium aus der Düngung nicht mehr pflanzenverfügbar, da es in den Zwischenschichtraum aufgeweiteter Dreischichttonminerale diffundiert und dadurch festgelegt wird. Die K-fixierenden Böden müssen demnach erst mit so viel Kalium gedüngt werden bis die inneren Oberflächen weitgehend gesättigt sind, sodass sich ein Vorrat an austauschbarem K aufbauen kann und ein Düngeerfolg zu beobachten ist. Es stellt sich nun die Frage, ob es auch andere Ionen gibt, die diese Tonmineralschichten sättigen können, sodass das gedüngte Kalium in diesen Böden direkt pflanzenverfügbar wäre. Doch hier lässt sich anmerken, dass die K-Sorptionsstellen spezifisch sind und K sich aufgrund seiner Ionengröße optimal in die Sechsecktetraedernetze einfügt. Hierzu wäre nur noch Ammonium fähig, welches jedoch kostenintensiver ist und einen erheblichen Umwelteinfluss aufweist (RICHTER, 2005). Allerdings eignen sich die K-fixierenden Böden gut für Versuche zur K-Effizienz von Pflanzen. So konnten Untersuchungen von EL DESSOUGI et al. (2002) zeigen, dass Weizen unter K-Mangelbedingungen eine geringere Ertragsdepression aufweist als Gerste und Zuckerrüben. Vergleicht man die Geschwindigkeiten des Fixierungs- und des Freisetzungprozesses von K in Bezug auf die Zwischenschichten der Tonminerale, so lässt sich nach ÖBORN et al. (2005) feststellen, dass der Freisetzungsprozess durch die starken Bindungskräfte viel langsamer erfolgt.

Die K-Fixierungskapazität von Böden kann durch Bodenproben analysiert werden. Dafür wird eine bestimmte Menge an gelöstem K hinzugegeben und anschließend die Differenz zum in der Bodenlösung verbliebenden K bestimmt. Dies kann mit oder ohne eine vorherige Zwischentrocknung des Bodens erfolgen, sodass sich entweder die trockene oder die nasse K-Fixierungskapazität ergibt (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010).

Der Grad der K-Fixierung in Böden hängt nämlich sowohl vom Feuchtigkeitsgehalt als auch von der Art des Tonminerals, der Ladungsdichte, dem Gehalt an konkurrierenden Ionen und dem pH-Wert ab (ZÖRB et al. 2013).

2.2.2 Bodenanalyse

Die Bodenanalyse von verschiedenen Pflanzennährstoffen gliedert sich in mehrere Einzelschritte. Zunächst muss eine repräsentative Probennahme erfolgen, sodass mehre Proben auf einer Fläche genommen und vermischt werden. Dabei sind heterogene Böden, Verdichtungen wie zum Beispiel durch Fahrspuren und wechselnde Bodeneigenschaften zu beachten. Daraufhin erfolgt die Probenaufbereitung, welche Trocknung und Siebung des Probenmaterials mit anschließender Extraktion beinhaltet. Das Ziel dieses Verfahrens ist es, durch die Auswahl eines geeigneten Extraktionsmittels die unterschiedliche Bindungsstärke von Nährstoffen zu berücksichtigen (SCHUBERT, 2006). So wird das pflanzenverfügbare Kalium, welches sich aus dem austauschbarem und dem in der Bodenlösung vorhandenen K zusammensetzt, in den meisten Fällen nach der sogenannten CAL-Methode oder DL-Methode bestimmt. Es gibt zwar auch andere Methoden, aber diese stellen Standardmethoden der VDLUFA für die Extraktion von Kalium dar, wobei im selben Zug der pflanzenverfügbare Phosphor extrahiert wird. Allerdings ist bei diesen Methoden zu beachten, dass vor allem die Quantität der potenziell verfügbaren Ionen erfasst wird, wohingegen entscheidende Faktoren wie Standort, Jahreswitterung, Bewirtschaftung und Pflanzeigenschaften, welche die Verfügbarkeit von Kalium in der Pflanze zusätzlich beeinflussen, nicht berücksichtigt werden. Durch Ergebnisse von K-Felddüngungsversuchen aus zurückliegenden Jahren konnte gezeigt werden, dass zwischen den lactatlöslichen K-Gehalten und dem K-Düngebedarf der Pflanzen eine Beziehung besteht. So ist der K-Düngebedarf umso geringer, je höher der gemessene pflanzenverfügbare K-Gehalt des Bodens ist (VDLUFA, 1999).

Bei der ersten Methode wird als Extraktionsmittel eine pH 4,1 gepufferte Calcium-Acetat-Lactat-Lösung verwendet, wohingegen bei der DL-Methode eine Doppellactat-Lösung mit einem pH-Wert von 3,6 als Extraktionsmittel dient. Die CAL-Lösung toleriert durch ihre höhere Pufferkapazität eine größere Menge an Kalk in der zu untersuchenden Bodenprobe. Bei beiden Methoden werden die an den Bodenkolloiden austauschbar gebundenen Kalium- und Phosphationen durch Calcium, Wasserstoff- und Laktationen ersetzt und dadurch frei in Lösung gebracht. Letztere binden zusätzlich die in Lösung gehenden Eisenionen, wodurch eine Ausfällung von schwerlöslichen Eisenphosphaten verhindert wird. Nach der Extraktion wird das Extrakt gefiltert und anschließend erfolgt eine chemische Analyse. Zur quantitativen Bestimmung von Kationen kann zum Beispiel das Verfahren der Atomspektrometrie angewendet werden, wobei sich zwischen der Messung der Absorption oder der Emission wählen lässt. Das Probenfiltrat wird hierzu als Aerosol direkt in eine Flamme eingesprüht. Bei der Bestimmung der Konzentration von Kalium findet die Atomemissionsspektrometrie Anwendung, da die Energie der Flamme für eine Anregung der Elektronen der Kaliumatome bereits ausreichend ist.

Beim Rückfallen der Elektronen in den energetischen Grundzustand wird Energie als Lichtemission freigesetzt, wobei die Intensität des emittierten Lichts proportional zur Konzentration ist. Mittels Kalibrierlösungen kann so eine Kalibrierkurve erstellt werden, sodass die Kaliumkonzentration anhand dieser ermittelt werden kann (LÖFFLER et al., 2018).

Um den ermittelten Wert zu interpretieren muss daraufhin eine Umrechnung von der Lösungskonzentration in die Bodenkonzentration mg/100 g erfolgen. Als letzten Schritt soll aus dieser Angabe nun eine Düngebedarfsempfehlung abgeleitet werden. Dazu werden Tabellenübersichten verwendet, welche wie bereits erwähnt durch umfangreiche und langjährige Feldversuche erstellt werden. Diese berücksichtigen Bodenart und -typ und sind in die Gehaltsklassen A-E unterteilt. Eine kurze Erläuterung der Gehaltsklassen erfolgt in der folgenden Tabelle, wobei sich der anzustrebende Gehalt in Klasse C mittelfristig durch ökonomisch optimale K-Düngung einstellt und somit nachhaltig optimale Erträge gewährleistet.

Tabelle 1: Definition der Gehaltsklassen für pflanzenverfügbare Nährstoffe im Boden (nach VDLUFA, 1999)

Gehaltsklasse	Bezeichnung	Düngungsempfehlung	Voraussichtliche Auswirkung der Düngung
A	sehr niedrig	stark erhöhte Düngung	sehr hoher Mehrertrag
B	niedrige	erhöhte Düngung	hoher Mehrertrag
C	anzustreben	Erhaltungsdüngung	mittlerer Mehrertrag, Gehalt im Boden bleibt erhalten
D	hoch	verminderte Düngung	geringer Mehrertrag, meist nur bei Blattfrüchten
E	sehr hoch	keine Düngung	kein Mehrertrag

Nach und SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (1010) weist der durch die Bodenanalyse bestimmte K-Gehalt allerdings nur bei einer Unterversorgung der Böden, welches den Gehaltsklassen A und B entspricht, eine Korrelation mit dem Pflanzenertrag auf. So wird bei den meisten Böden ab einem Wert von ungefähr 10 mg K/100 g Boden kein Mehrertrag durch eine K-Düngung erzielt, denn bei einer Unterversorgung des Oberbodens nehmen die Pflanzen 10-60 % des benötigten Kaliums aus dem Unterboden auf. Wenn die Böden die Versorgungsstufe C aufweisen, kann die notwendige K-Düngung an der Abfuhr der K-Menge in den Ernteprodukten bemessen werden. Zudem konnten aus 194 Dauerversuchen mit etwa 1.500 Versuchsernten, welche der Band 47/1998 der VDLUFA-Schriftenreihe beinhaltet, für den Ackerbau die in der nachfolgenden Tabelle enthaltenen Richtwerte für den Bereich der Gehaltsklasse C abgeleitet werden.

Tabelle 2: Richtwerte für die K-Gehaltsklasse C (nach VDLUFA, 1999)

Bodenart	Tongehalt in %	K (mg/100 g Boden)	K ₂ O (mg/100 g Boden)
Sehr leichte Böden	0-5	5-8	6-10
Leichte Böden	6-12	8-12	10-15
Mittlere Böden	13-25	8-17	10-20
Schwere Böden	> 25	11-22	13-26

2.3 Nährstofftransport zur Wurzel

Damit sich die Pflanze einen Nährstoff aneignen kann, gibt es drei verschiedene Möglichkeiten. Bei der Interzeption wächst die Wurzel in Richtung des Nährstoffes, wohingegen beim Massenfluss der Nährstoff mit dem durch die Transpiration erzeugten Wasserfluss aufgenommen wird. Die Nährstoffe, die in geringer Konzentration in der Bodenlösung vorliegen, werden über Diffusion aufgenommen. Dies bezeichnet einen ohne äußere Einwirkung eintretenden Ausgleich von Konzentrationsunterschieden in Flüssigkeiten oder Gasen als natürlich ablaufender physikalischer Prozess aufgrund der Brownschen Molekularbewegung. So gelangt unter anderem auch Kalium vorwiegend über diesen Prozess an die Wurzeloberfläche (SCHILLING, 2000).

Um festzustellen, dass ein Stoff vorwiegend über Diffusion aufgenommen wird, kann nach SCHUBERT (2006) ein sogenanntes Verarmungsprofil erstellt werden. Dieses besagt je höher die freie Konzentration eines Nährstoffs ist, desto größer ist der Diffusionsgradient. Der Grund dafür liegt darin, dass die Aufnahme eines Nährstoffs die Konzentration von diesem an der Rhizosphäre auf sehr niedrige Werte sinken lässt. Demnach entsteht in einem gut mit Kalium versorgten Boden ein ausgeprägtes Verarmungsprofil in der Rhizosphäre, wodurch das Diffusionsgefälle ansteigt. Daraus resultiert eine erhöhte Diffusion also K-Aufnahme im Vergleich zu einem schlecht mit diesem Nährstoff versorgten Boden. Zudem wird dies von der These nach GRIMME (1978) unterstützt, welche besagt, dass der Konzentrationsgradient und die daraus resultierende Anlieferung von Nährstoffen durch Diffusion umso größer wird, je höher die Ausgangskonzentration ist. Alles in allem ist also die vorhandene Konzentration eines Nährstoffs im Boden ein Einflussfaktor auf das Diffusionsverhalten.

Ein weiterer Einflussfaktor ist der Wurzelabstand, wobei bei einer zunehmend intensiven Durchwurzelung der Pflanze der mittlere Abstand eines Nährstoffs von der Bodenfläche sinkt. So können Pflanzen mit einer Faserwurzel sich die Nährstoffe besser über Diffusion aneignen als Pfahlwurzler. Demzufolge kann sich zum Beispiel Weizen bei einer K-Unterversorgung besser spezifisch gebundenes K aus den Zwischenschichten aneignen und ist so nicht oder weniger in seiner Entwicklung eingeschränkt. Hierbei ist jedoch die Bodenstruktur zu beachten, da diese einen erheblichen Einfluss auf die Durchwurzelbarkeit und Wurzelatmung hat (SCHUBERT, 2006).

Außerdem hat auch der sogenannte Diffusionskoeffizient, welcher die Diffusivität eines Stoffes bezeichnet, einen wichtigen Einfluss auf die Diffusion. Der Diffusionskoeffizient ist nach MUNK (2000) eine stoffspezifische Konstante mit negativem Vorzeichen, da der Teilchenfluss in Richtung des kleineren chemischen Potentials verläuft. In reinem Wasser liegt der Diffusionskoeffizient für verschiedene Nährstoffe nahezu einheitlich bei $1,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{Sekunde}$. Betrachtet man hingegen einen porösen Boden, wird der Diffusionskoeffizient für Phosphor und Kalium sehr viel kleiner. So wird für Kalium ein Wert von $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{Sekunde}$ angegeben (MARSCHNER, 1995). Demnach ist also die Diffusivität und damit die daraus resultierende Diffusionsgeschwindigkeit in einem trockenen Boden deutlich schlechter bzw. langsamer als in einem feuchten Boden.

Eine weitere Einschränkung der Diffusion von Nährstoffen in einem trockenen Boden stellt die Schrumpfung der Wasserhüllen um die Bodenteilchen dar, welche zusätzlich die Diffusionswege verlängern, da die Ionen nur entlang der Hydrathüllen der Bodenteilchen diffundieren können (SCHUBERT, 2006). Insgesamt sind für eine K-Diffusion in die Wurzel in einem feuchten, gut durchwurzelbaren Boden, welcher bereits eine ausreichende K-Versorgung aufweist, demnach die besten Bedingungen gegeben.

Die treibende Kraft für die Diffusion ist ein Konzentrationsgradient, welcher nach MARSCHNER (1995) zwischen angrenzendem Boden und der Wurzeloberfläche gebildet wird, wenn die Aufnahme der Nährstoffe größer ist, als die Nachlieferung durch den Massenfluss. Die Bildung des Konzentrationsgradienten erfolgt mittels der sogenannten H^+ -ATPase. Dies bezeichnet ein Polypeptid, welches in der pflanzlichen Membran lokalisiert ist und unter Hydrolyse von ATP Protonen wie Kalium aus dem Cytoplasma in den extrazellulären Raum transloziert. Dadurch entsteht eine protonenmotorische Kraft, die sich aus einer elektrischen Potentialdifferenz und einer Differenz in der Wasserstoffionenkonzentration zusammensetzt. Die protonenmotorische Kraft stellt die Grundlage für viele sekundäre Transportprozesse dar (OECKING, 2002). So können die Kalium-Ionen nach DATNOFF et al. (2007) sowie auch MAATHIUS und SANDERS (1996) aufgrund des vorherrschenden Konzentrationsgradienten mittels spezifischen oder unspezifischen Ionophoren in die Wurzel diffundieren. Unter spezifischen Ionophoren ist zu verstehen, dass diese nur auf den Transport von Kalium spezialisiert sind, während unspezifische Ionophore verschiedene Ionen transportieren können. So gelangen zum Beispiel Magnesium-Ionen nur über unspezifische Transporter in die Wurzel, sodass es bei einem sehr hohen Angebot an Kalium zu einer Störung der Magnesiumaufnahme kommen kann. Dahingegen hat eine hohe Magnesiumverfügbarkeit im Boden keinen Einfluss auf die Kaliumaufnahme der Wurzel. Es handelt sich demzufolge um einen einseitigen Antagonismus. Deshalb wird Kalium häufig in Verbindung mit Magnesium gedüngt, wobei Erfahrungen aus umfangreichen Feldversuchen gezeigt haben, dass mit einem Kalium-/Magnesium-Verhältnis im Boden von 3:1 eine ausreichende Aufnahme beider Nährstoffe gewährleistet werden kann. Dies wird auch durch die jeweiligen Konzentrationsbereiche in der Bodengehaltsklasse C sichergestellt (KALI-AKADEMIE, 2019).

2.4 Funktionen in der Pflanze

Kalium wird nach SCHUBERT (2006) im Zellsaft auf Konzentrationen von 100 bis 200 mM angereichert, wohingegen ZÖRB et al. (2013) angibt, dass die Konzentration im Cytoplasma bei etwa 50-150 mM konstant gehalten wird und die Konzentration in der Vakuole in Abhängigkeit vom Versorgungsstatus erheblich variiert. Kalium hat durch seine spezifischen Eigenschaften als Kation vielfältige physiologische Aufgaben, welche in den folgenden Kapiteln erläutert werden. Zudem sind in der anschließenden Tabelle Kaliumgehalte in Ackerkulturen zum Zeitpunkt der Ernte dargestellt.

Tabelle 3: Mittlere Gehalte an Kalium von Ackerkulturen zur Zeit der Ernte in der FM (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010)

Pflanze	Nährelementgehalt in kg (100 kg/FM)		
		TM (%)	K
Weizen	Korn	86	0,50
	Stroh	86	1,16
Mais	Korn	86	0,42
	Stroh	86	1,66
Raps	Korn	91	0,83
	Stroh	86	2,08
Ackerbohne	Bohne	86	1,16
	Stroh	86	2,16
Zuckerrübe	Rübe	23	0,21
	Blatt	18	0,50
Kartoffel	Knolle	22	0,50
Silomais	Ganzpflanze	32	0,42

2.4.1 Einfluss auf osmotische Funktionen

Eine Voraussetzung für die Erfüllung der osmotischen Aufgaben von Kalium ist, dass es sehr gut durch biologische Membranen transportiert werden kann. Im Xylem dient K nach WHITE (2013) als quantitativ wichtigstes Osmotikum, welches für den Aufbau des Wurzeldrucks entscheidend ist und damit die Wasseraufnahme ermöglicht. Der Aufbau des Wurzeldrucks erfolgt durch die Abgabe von K^+ aus den Xylemparchymzellen in die Xylemgefäße. Durch die entstehenden Akkumulationen von Kalium wird das osmotische Potential dort erniedrigt und es strömt Wasser aus den Nachbargeweben nach. Da sowohl die Zellwände der Xylemgefäße versteift sind, als auch die Wurzelspitze einen Widerstand darstellt, wird das durch den aufgebauten Wurzeldruck erfasste Wasser basipetal in Richtung Spross gelenkt. Demnach ist Kalium also für die Einstellung des osmotischen Drucks sowie die daraus resultierende Wasserversorgung der Pflanze verantwortlich (SCHUBERT, 2006). Außerdem dienen nach MENGEL (2007) hohe Konzentrationen an K in den Vakuolen zum einen als Speicher und zum anderen über den osmotischen Effekt zum Aufbau des Turgors in den Blattzellen. Dieser bezeichnet den Druck des Zellsafts auf die Zellwand und ist nach SCHUBERT (2006) essentiell für das Streckungs- und Blattflächenwachstum.

So bezeichnet auch WHITE (2013) K als eine Hauptdeterminante des Zellurgors. Demnach ist für die Zellexpansion ein ausreichender Turgordruck erforderlich, wodurch dieser Parameter besonders wichtig für das Pflanzenwachstum ist (MENGEL und ARNEKE, 1982).

Des Weiteren weist Kalium wie bereits erwähnt eine große Wasserhülle auf, welche von pflanzlichem Eiweiß zur Ausbildung einer eigenen Hydrathülle genutzt werden kann (RICHTER 2005). Bei einem Mangel von K wird nach MENGEL (2007) die Funktion der Chloroplasten und Mitochondrien durch Schrumpfung beeinträchtigt, was einen immensen Einschnitt in die Energieversorgung der Zelle bedeutet. Zudem hat Kalium eine indirekte Einwirkung auf die Photosyntheseleistung, da es durch seine Konzentration und den dadurch erhöhten Turgor die Funktion der Stomata beeinflusst. So können unter K-Mangel die Stomata auch bei guter Belichtung und genügend Bodenfeuchte nicht vollkommen geöffnet sein. Dadurch wird die CO₂-Assimilation gehemmt, welches sich negativ auf die Photosyntheseleistung auswirkt. Bei einer ausreichenden K-Versorgung und einem beginnenden Wassermangel im Boden hingegen, bewirkt eine ausreichende K-Versorgung im Boden ein schnelleres und vollkommeneres Schließen der Stomata. Dadurch wird die Pflanze vor übermäßigem Wasserverlust und einer daraus resultierenden Schädigung geschützt (RICHTER, 2005). Alles in allem korreliert die CO₂-Assimilation also mit dem K-Gehalt, welcher zudem viele positive Auswirkungen wie verbesserte Regulation der Stomata, eine Anreicherung von K als Osmotikum sowie eine Erhöhung des Energiestatus der Zelle auf den Wasserhaushalt hat. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass eine ausreichend mit Kalium versorgte Pflanze eine ökonomischere Wasserverwertung hat, da sie dadurch nach SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (2010) eine erhöhte Dürre- und Frostresistenz ausweist. Auch HU und SCHMIDHALTER (2005) geben an, dass, bei einer ausreichenden Bodenkonzentration und Aufnahme von K, die Trockenstressresistenz der Pflanzen gesteigert wird. Dies wird nach RICHTER (2005) dadurch belegt, dass der Transpirationskoeffizient, welcher der benötigten Wassermenge je kg aufgebauter Pflanzentrockensubstanz entspricht, von ausreichend mit K versorgten Pflanzen geringer ist als der von Pflanzen mit K-Mangel.

2.4.2 Einfluss auf Enzymaktivitäten

Enzyme regulieren alle biochemischen Reaktionen in Lebewesen indem sie als Katalysator fungieren. Meistens erfolgt dabei ein Aufbau höhermolekularer Verbindungen aus niedermolekularen. Nach Angaben von MARSCHNER (1995) sind über 50 Enzyme entweder spezifisch auf die Aktivierung von Kalium angewiesen, da es deren Struktur zugunsten einer Reaktion verändert, oder werden durch die Anwesenheit von K⁺-Ionen stimuliert. Laut SCHUBERT (2006) reagiert besonders die Proteinsynthese empfindlich auf einen K-Mangel. Demnach wird zum einen die Bildung von Proteinen aus Aminosäuren und zum anderen von Fett aus Glycerin und drei Fettsäuren gefördert. Außerdem wird die Bildung von Saccharose aus den Monosacchariden Glucose und Fructose begünstigt, sodass Ernteprodukte wie Zuckerrüben und Zuckerrohr bei ausreichender K-Versorgung einen hohen Zuckergehalt aufweisen (RICHTER, 2005). Darüber hinaus steigert ein K-Mangel nach SCHILLING (2000) die Aktivität von kohlenhydratabbauenden Enzymen, sodass eine Anreicherung von niedermolekularen Verbindungen auftritt.

Auch die Bildung von Stärke aus Glucose bzw. Maltose wird ähnlich wie beim Zuckergehalt gefördert. Demnach haben bei ausreichender K-Versorgung Getreide und Knollenfrüchte wie Kartoffeln einen höheren Stärkegehalt. Allerdings kann es sowohl bei solchen stärkehaltigen Knollenfrüchten als auch bei zuckerhaltigen Kulturen wie Zuckerrüben durch einen zu hohen K-Gehalt im Boden auch einen negativen Stärkebildungs- bzw. Zuckerbildungseffekt geben. Der Grund dafür liegt darin, dass durch eine erhöhte K-Aufnahme der Pflanze der Trockensubstanzgehalt und damit auch der Stärke- bzw. Zuckergehalt abnimmt, da jedes K^+ -Ion eine große Wasserhülle mit sich bringt. Als letztes wird zudem noch die Bildung von Cellulose gefördert, welches für das Stützgewebe also auch die Halmstabilität und die Zellwände essentiell ist. So kann es bei einem K-Mangel zu erhöhter Lagergefahr und Krankheitsanfälligkeit kommen, da zum Beispiel Pilzkrankheiten wie Mehltau leichter durch die schlecht ausgebildeten Zellwände in die Blätter eindringen können (RICHTER, 2005). Allerdings gibt es nach ZÖRB et al. (2013) einen weiteren Grund, der zu einer erhöhten Anfälligkeit durch Krankheitserreger führen kann. Dieser beruht auf der Grundlage, dass durch die Beeinträchtigung der Stärkebildung und des Phloemtransports, welcher im anschließenden Abschnitt näher erläutert wird, in Pflanzen mit K-Mangel die Konzentrationen an löslichem Zucker und organischen Säuren in den Sprossgeweben erhöht sind, sodass diese eine bessere Nahrungsquelle für Krankheitserreger darstellen. Ein Krankheitsbefall, welcher aus dieser erhöhten Krankheitsanfälligkeit durch einen K-Mangel resultiert, kann einen durch eine ausreichende K-Versorgung vermeidbaren Pestizideinsatz erforderlich machen. Alles in allem ist Kalium also für alle aufbauenden Vorgänge in der Pflanze unerlässlich und kann nicht durch ein anderes Element ersetzt werden (MIX und MARSCHNER, 1974).

Des Weiteren spielt Kalium wie bereits erwähnt auch eine wichtige Rolle beim Phloemtransport. Bei diesem werden die in der Photosynthese gebildeten Assimilate wie Saccharose und Aminosäuren von den Orten der Produktion, welches vorwiegend die Laubblätter sind, zu den Orten des Verbrauchs transportiert. Letztere werden im englischen mit dem Wort „sinks“ bezeichnet und meinen vor allem Wurzeln, wachsende Organe und andere Speicherorgane. Im Gegensatz zu dem Einfluss der P- und Mg-Versorgung auf den Phloemtransport, gibt es nach (MENGEL, 1980; CONTI und GEIGER, 1982) bereits einen erheblichen Wissensbestand über den Einfluss von Kalium auf diesen Prozess. So ist nach HARTT (1969) und MENGEL (1980) bekannt, dass eine ausreichende K-Versorgung den Phloemtransport erhöht und die Umverlagerung von Assimilaten durch Beeinflussung verschiedener Teilschritte des Transports wie die Beladung des Phloems stimuliert. Die Phloembeladung ist ein aktiver und trägervermittelter Prozess, der von der sogenannten H^+ -ATPase in der Plasmamembran der Siebrohrzellen angetrieben wird (GIAQUINTA, 1983). Diese baut durch das Pumpen von Protonen unter Energieverbrauch einen Protonengradienten auf, sodass die Assimilate zusammen mit den Protonen durch $6 H^+$ -Symporter zurückfließen und aufgenommen werden können. Insgesamt wird der Verbesserungseffekt von K auf den Zuckertransport der Stimulierung der Aktivität der „sinks“ (HAEDER und MENGEL, 1972; CONTI und GEIGER, 1982), dem verbesserten ATP-Status von Pflanzen (MENGEL und VIRO, 1974), seinem Beitrag zum Abtransport von Zucker in die Apoplasten der Laubblätter (HUBER und MORELAND, 1981) sowie dem osmotischen Druck in den Siebröhren und der daraus resultierenden Fließgeschwindigkeit der Assimilate in die „sinks“ (HAYAISHI und CHINO, 1990) zugeschrieben.

Ein von ÇAKMAK et al (1994) durchgeführter Versuch bestätigt diese Rolle von K beim Phloemtransport durch seine Ergebnisse. Allerdings kann der Kaliumtransport in die Siebröhren nicht nur durch einen K-Mangel, sondern auch durch einen Mg-Mangel, aufgrund seines Einflusses auf die ATPase-Aktivität und auf Cotransporte von K und Saccharose, eingeschränkt werden (HUBER und MORELAND, 1981; Giaquinta, 1983). Insgesamt ist K also wesentlich an der Beladung des Phloems und damit der Umverlagerung von Assimilaten in Wurzeln und Speicherorgane beteiligt, welches sowohl mit dem Einfluss auf den Wasserhaushalt als auch mit den Qualitätseffekten zusammenhängt.

2.4.3 Einfluss auf den Ladungsausgleich

Aufgrund der guten Beweglichkeit von Kalium innerhalb der Zelle und Pflanze trägt es nach REEB (2010) durch seine chemischen Eigenschaften als Kation zum elektrostatischen Ausgleich bei und verbessert so den Ladungsausgleich. Zudem hat es einen Einfluss auf den Gehalt an organischen Anionen. Unter diesen versteht man den Rest eines Säuremoleküls nach Abspaltung des H^+ -Ions. Der Gehalt an organischen Anionen in pflanzlichen Ernteprodukten wie zum Beispiel Gemüse oder Obst bedingt deren charakteristischen Geschmack. Durch die Aufnahme von K^+ wird die Produktion pflanzeneigener Anionen gefördert, da die Pflanze bestrebt ist den positiven Ladungsüberschuss auszugleichen. Zwar werden bereits vorhandene Anionen zunächst neutralisiert, doch durch die schnelle Aufnahme von K^+ im Vergleich zu anderen Ionen wird kurz darauf die Produktion angeregt. Eine Voraussetzung dafür ist allerdings, dass Kalium zusammen mit einem langsam aufnehmbaren Begleit-anion wie Sulfat angeboten wird. Deshalb werden häufig Kaliumdünger wie Kaliumsulfat im Gemüse- und Obstanbau verwendet, wenn der charakteristische Geschmack Priorität in der Produktion hat. Der Nachteil hingegen ist, dass diese Dünger durch ihr seltenes Vorkommen und ihrer aufwendigen und umweltschädlichen Herstellung kostenintensiv sind (RICHTER, 2005).

2.5 Ernährungsstörungen

Bei der Diagnose von Mangelsymptomen kann man nach BERGMANN (1986) drei Kategorien unterscheiden. So befinden sich die Schäden entweder vorwiegend an den alten, den jungen oder je nach Pflanzenart und Zeitpunkt an den jüngeren und/oder älteren Blättern bzw. Organen. Der Nährstoff Kalium fällt dabei in die erste Kategorie, sodass die älteren Blätter der Pflanze am stärksten betroffen sind, welches zusätzlich die gute Verlagerbarkeit von K im Phloem zeigt, und das Gesamtpflanzenwachstum verändert wird. Durch einen K-Mangel in der Pflanze ist nach SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (1010) eine erhöhte Neigung zu Welkeerscheinungen gegeben, welche nach ZÖRB et al. (2013) auf einen gestörten Wasserhaushalt sowie eine mangelhafte Verholzung der Zellwände zurückzuführen ist. Die Welketracht wird von BERGMANN (1986) durch die folgenden Symptome beschrieben. So weisen manche Pflanzen eine weiße bis weiß-braune Punktierung entlang des Blattrandes auf, wobei sich allerdings vorwiegend Chlorosen von der Blattspitze und dem Blattrand ausgehend bilden. Diesen folgen braune, graubraune, rötlichbraune bis dunkelbraune Nekrosen, welche zunächst fleckenartig sind und später flächenartig zusammenfließen, wobei die Interkostalfeder dabei oft noch oben gewölbt ist. Im weiteren Verlauf vertrocknen die Blätter, wobei sie eine gelbbraune bis braune Verfärbung aufweisen und die Blattränder auf- oder abwärtsgebogen sind. Mit zunehmender Zeit kann es schließlich zu masseweisem Absterben der älteren Blätter kommen. Bei Betrachtung der Wurzeln fällt auf, dass diese gelblich, schleimig und lang mit wenigen Seitenwurzeln sind. Im Vergleich dazu gibt MARSCHNER (1995) an, dass der K-Mangel sich anfänglich durch unspezifische Wachstumsreduzierungen äußert, wobei dann jedoch sehr schnell chlorotische und nekrotische Symptome, vorwiegend an älteren Blättern, von der Blattspitze beginnend bis zur völligen Zerstörung auftreten (MENGEL, 2007).

Während die Mangelsymptome der unterschiedlichen Pflanzennährstoffe spezifisch für die Elemente sind und sich bei genauer Betrachtung gut abgrenzen lassen, sind die abiotischen Schadsymptome, welche durch den Überschuss an einem Pflanzennährstoff entstehen, weniger spezifisch und haben viele Gemeinsamkeiten. So sind direkte Symptome, die durch eine Überversorgung mit Kalium entstehen, an der Pflanze kaum oder gar nicht zu beobachten. Eine Ausnahme bildet die Zitrusfrucht, welche in Hydrokulturversuchen Wachstumsverzögerungen mit Symptomen wie Verbrennungen bzw. Verschorfungen der Blätter und einen vorzeitigen Laubfall aufwies. Zudem ist bei der K-Versorgung zu beachten, dass Kalium in Form von Salzen gedüngt wird. So kann es im Zuge einer Überdüngung zu Salzschäden kommen, welche vor allem bei sorptionsschwachen Böden auftreten (BERGMANN, 1986). Außerdem kann eine K-Überdüngung oder ein hoher K-Gehalt im Boden auch indirekte Einwirkungen auf die Pflanze haben. So kann ein Mg- und Ca-Mangel bei vielen Kulturpflanzen, wie zum Beispiel bei Obstbäumen, durch die Ionenkonkurrenz bei und nach der Aufnahme in die Pflanze induziert werden (RICHTER, 2005). Des Weiteren können wie bereits erwähnt die Stärke- und Zuckergehalte in Kartoffeln bzw. Zuckerrüben durch die Verminderung des Trockensubstanzgehalts reduziert werden (vgl. Abschnitt 2.4.2).

In den folgenden Abbildungen 2-5 sind typische K-Mangesymptome von verschiedenen Kulturen abgebildet.



Abbildung 2: K-Mangel bei Hafer (*Avena sativa*) zum Zeitpunkt des Rispschiebens (BERGMANN, 1986)



Abbildung 3: Feldsituation von Weizen (*Triticum aestivum* L.) mit K-Mangelzustand und erhöhtem biotischem Stress (ZÖRB et al., 2013)



Abbildung 4: Blätter einer Zuckerrübe (*Beta vulgaris saccharifera*) mit sehr stark ausgeprägten K-Mangelsymptomen (BERGMANN, 1986)



Abbildung 5: Ausgeprägte Spitzen- und Blattnekrosen den älteren Blättern einer Maispflanze (*Zea mays*) zum Blühzeitpunkt (BERGMANN, 1986)

2.6 Düngemittel

2.6.1 Vorkommen und Herstellung

Kaliumdünger, auch als Kalidünger bezeichnet, werden aus Kaliumrohsalzen hergestellt. Die Ablagerungen dieser entstanden beim Eintrocknen prähistorischer Meere, wobei dies in Deutschland beispielsweise einer Zeit von vor 200 Millionen Jahren entspricht. So wird das Kaligestein im Untertagebau vor allem in Deutschland, Kanada und den Vereinigten Staaten von Amerika bergmännisch abgebaut, da es dort große Vorräte gibt. Trotz dessen sind die Vorräte jedoch endlich, weshalb der Abbau, die Produktion und die Anwendung der Düngemittel möglichst effektiv und ressourcenschonend gehandhabt werden sollten. Das Kaligestein bildete sich durch eine Überlagerung der Kaliumrohsalze von verschiedenen geologischen Schichten, sodass es über die Jahre verhärtet ist (SCHUBERT, 2006).

Nach dem Abbau gibt es drei Verfahren nach denen die Kalisalze abgetrennt werden können. Das erste Verfahren stellt das Heißlöseverfahren dar, welches auf der Grundlage der verschiedenen Löslichkeit von Salzen bei unterschiedlichen Temperaturen beruht. So ist NaCl das wichtigste Begleitsalz von KCl, wobei NaCl schon bei geringen Temperaturen gelöst wird, während die Löslichkeit von KCl linear mit dieser ansteigt. Bei dem zweiten Verfahren handelt es sich um die Flotation, welches ein Anreicherungsverfahren bezeichnet. Hierbei werden Flotationsmittel wie zum Beispiel primäre Fettamine verwendet, die selektiv die Oberfläche der KCl-Partikel belegen. Durch Luftzufuhr steigen diese zur Oberfläche auf und können so abgetrennt werden. Im Jahr 1980 wurde das dritte Verfahren von der deutschen Kaliindustrie eingeführt. Dabei handelt es sich um das sogenannte ESTA-Verfahren, bei dem die Salze durch elektrostatische Aufladung getrennt werden. Dafür wird ein elektisches Feld erzeugt, durch welches das trockene und feingemahlene Ausgangsprodukt im freien Fall passiert. So werden die verschiedenen Bestandteile abgelenkt und können am Boden getrennt aufgefangen werden. Das nach den verschiedenen Verfahren gewonnene KCL wird aufgearbeitet, sodass ein weiß- bis rotfarbiges Produkt entsteht. Dieses kann durch Kompaktierung in ein streufähiges und grobkörniges Düngemittel umgeformt werden. Generell lässt sich feststellen, dass alle gebräuchlichen Kalidünger gut wasserlöslich sind, da Kalium in Form von leicht löslichen Salzen darin vorliegt (SCHILLING, 2000).

2.6.2 Rahmenbedingungen und Düngerformen

Seit 1980 hat der Einsatz von K-Düngemitteln nach ZÖRB et al. (2013) aufgrund des gezielten Anstiegs der globalen Agrarproduktion um etwa 25 % zugenommen. Hinzukommend wird ein weiterer Anstieg der weltweiten Nachfrage nach diesen von 35,4 (2016) auf 40,2 Millionen Tonnen K_2O im Jahr 2022 prognostiziert. Insbesondere von Entwicklungsländern wie Indien und anderen asiatischen Ländern wird dabei ein erheblich erhöhter K-Düngemittelbedarf erwartet (FAO, 2019).

Besonders bei geringen pflanzenverfügbaren nativen Boden-K-Konzentrationen, können die Erträge von zum Beispiel Weizen und Zuckerrüben von der K-Düngung profitieren. So haben sowohl Zuckerrüben als auch Weizen einen hohen K-Bedarf und die Aufnahme reicht im Allgemeinen von etwa 50 bis 300 kg K/ha je Vegetationsperiode, welches ähnlich der Aufnahmemenge von N ist (ZÖRB et al., 2013). Allerdings gibt es für die Düngung von Kalium im Gegensatz zu Stickstoff und Phosphor keine vergleichbaren rechtlichen Einschränkungen, da dieses keine ökologische oder toxikologische Relevanz aufweist und sich bei sachgemäßer Anwendung und Ausbringung von K-Düngemitteln keine Beeinträchtigung des Ökosystems ergibt. Dahingegen begrenzt die Düngeverordnung den Einsatz von Stickstoff immer weiter. Daher ist es umso wichtiger die Versorgung der Pflanze mit anderen Nährstoffen wie Kalium zu optimieren um die Effizienz der N-Düngung zu steigern. So ist nach RÖMHELD und KIRKBY (2010) N der am häufigsten und wichtigste wachstumslimitierende Faktor beim Anbau von landwirtschaftlichen Kulturen, sodass eine erhöhte N-Düngung eine zusätzliche Erhöhung der K-Verfügbarkeit erfordert, um den Wasserzustand der Pflanze, insbesondere unter trockenen Bedingungen, aufrechtzuerhalten.

Zudem ist der Zeitpunkt der Düngung für die Ertragswirkung weitgehend irrelevant, da die K^+ -Ionen nach der Düngung an den Sorptionskomplexen gebunden werden. So kann auf eventuell auftretende Defizite jederzeit flexibel reagiert werden. Allerdings besteht auf leichten Böden bei der Herbstdüngung ein gewisses Auswaschrisiko, wobei dies unabhängig von dem jeweiligen Dünger ist. Außerdem ist auch keine Bodenuntersuchung vorgeschrieben, wobei sich diese jedoch gleichzeitig mit der verpflichtenden Untersuchung auf Phosphor durchzuführen empfiehlt um bei der Düngeplanung eine effiziente Nährstoffversorgung sicherzustellen (IVA, 2019).

Die Auswahl des geeigneten Kalidüngers wird nach SCHILLING (2000) vor allem durch das begleitende Anion und die daraus resultierenden Folgen für die angebaute Kultur bestimmt. Die häufig verwendeten chloridischen Düngesalze werden vermieden, wenn eine hohe Salzbelastung unerwünscht ist, da nach RADER (1943) der Salzindex in Bezug auf die Einheit K_2O von Kaliumchlorid doppelt so hoch ist wie die von Kaliumsulfat. Allerdings sind letztere teurer als die chloridhaltigen Kalidünger, da sie in der Natur nicht so häufig vorkommen. Zudem werden sulfathaltige Kalidünger auch vor allem bei chloridempfindlichen Kulturen wie Nachtschattengewächse und Citrus-Arten eingesetzt und wie bereits erwähnt im Obst- und Gemüseanbau für die verstärkte Erzeugung deren charakteristischen Geschmacks durch die erhöhte Produktion an organischen Anionen wie Malat und Citrat (vgl. Abschnitt 2.4.3).

So neigen Kartoffeln bei einer Überversorgung mit Chlor zum Beispiel zu Blattnekrosen und einem geringeren Ertrag sowie auch einem geringerem Stärkegehalt, da Cl^- den Abtransport der Assimilate behindert (HAEDER 1980). Als Beimengungen zu den Kalidüngen werden vor allem NaCl und MgCl verwendet. Für viele Ackerkulturen ist ein zu hoher Na-Anteil allerdings nachteilig, wobei die Zuckerrübe eine Ausnahme darstellt, da diese K zu einem hohen Grad durch Na substituieren kann und in manchen Fällen sogar positiv auf eine Na-Düngung reagiert (SCHUBERT, 2006). In der nachfolgenden Tabelle ist die Zusammensetzung verschiedener handelsüblicher K-Dünger angegeben.

Tabelle 4: Zusammensetzung verschiedener Kaliumdünger (nach SCHUBERT, 2006)

Produkt	Form des K-Salzes	% K_2O	Nebenbestandteile
Korn-Kali	Kaliumchlorid	40	6 % MgO , 4 % Na_2O , 12,5 % SO_3 Magnesium und Schwefel in Sulfatform und Natriumchlorid
60er Kali	Kaliumchlorid	60	
KALISOP	Kaliumsulfat	50	45 % SO_3 Schwefel in Sulfatform

3. Zielstellung

Um den Einfluss der K-Düngung auf den Ertrag und die Qualität von verschiedenen landwirtschaftlichen Kulturen herauszuarbeiten, lassen sich die folgenden Fragen stellen, wobei die Beantwortung dieser auf Grundlage eines im Jahr 2019/2020 durchgeführten Feldversuchs erfolgt.

1. Gibt es bei den ermittelten Qualitäts- und Ertragsparametern der verschiedenen Kulturen einen signifikanten Unterschied zur Variante ohne K-Düngung?
2. Wie signifikant unterscheidet sich der K-Einfluss zwischen den verschiedenen Düngevarianten bzw. -mengen?
3. Wie unterscheidet sich die Einflussnahme von K zwischen den verschiedenen Kulturen und welche Ertrags- oder Qualitätsparameter werden jeweils beeinflusst?
4. Gibt es einen Unterschied zwischen den Ergebnissen bei Vergleich der Anwendung von den Düngerformen Korn-Kali und 60er Kali?
5. Sind Erscheinungsmerkmale bei einer K-Übersorgung/Untersorgung zu erkennen?

Die Ergebnisse, die anhand des im Anschluss thematisierten Feldversuch ermittelt wurden, sollen zunächst in Zusammenhang mit der Höhe der K-Versorgung gebracht werden. Daraufhin soll eine Begründung dieses Zusammenhangs erfolgen, welche auf Grundlage der in den verschiedenen Kulturen ablaufenden physiologischen Prozesse zur Ertrags- und Qualitätsbildung und des Einflusses von K auf diese beruht. Zudem soll ein Vergleich mit dem aktuellen Literaturstand durchgeführt werden. Dieser soll die Ergebnisse im besten Fall bestätigen sowie Ansatzmöglichkeiten zur Optimierung der K-Effizienz offenlegen. Die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen sollen zusammengefasst werden und als letztes soll ein Ausblick über die zukünftige Entwicklung bezüglich dieses Nährstoffs gegeben werden.

4. Material und Methoden

4.1 Standortbeschreibung

Der dieser Arbeit zugrundeliegende Feldversuch befindet sich auf dem Flurstück „Strenzfeld 1“ auf dem Gelände der Hochschule Anhalt in Bernburg-Strenzfeld. Dieser Standort liegt 80 m über NN am Südrand der Magdeburger Börde und nordöstlich vom Regenschatten des Harzes. Bei dem Boden handelt es sich um Lössschwarzerde mit der Bodenart schluffiger Lehm, welche nach der LLG (2021) der Bodengruppe 4 angehört. Die Bodenwertzahl liegt bei 86-100 und es gibt eine nutzbare Feldkapazität von 220 mm in einem Meter Tiefe. Dieses Schwarzerdengebiet ist nach SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (1010) durch seine Fruchtbarkeit ein ausgezeichneter Ackerbaustandort und sein Bodentyp zählt zu den wichtigsten Weizenböden weltweit. Der pH-Wert befindet sich im nahezu neutralen Bereich von 7,5. Des Weiteren weist der Boden einen Humusgehalt von 2,5-3,0 % mit einem C/N-Verhältnis von 10:1 auf (GILLE et al., 2020).

Um die Witterungsbedingungen für diesen Standort einschätzen zu können, wurde ein 30-jähriges Mittel im Zeitraum von 1981 bis 2010 gebildet. Der daraus ermittelte Jahrestemperaturverlauf des Standorts Bernburg-Strenzfeld ist in Abbildung 6 im Vergleich mit den im Versuchsjahr vorherrschenden Temperaturen dargestellt. Die durchschnittliche Jahrestemperatur des langjährigen Mittels beträgt 10 °C, wobei der wärmste Monat mit 19,2 °C der Juli ist und der Januar als kältester Monat eine durchschnittliche Temperatur von 0,9 °C aufweist. Zudem ist anzumerken, dass die thermische Vegetationsperiode im Mittel am 09.03 beginnt und durchschnittlich 254 Tage andauert (BÖTTCHER, 2012).

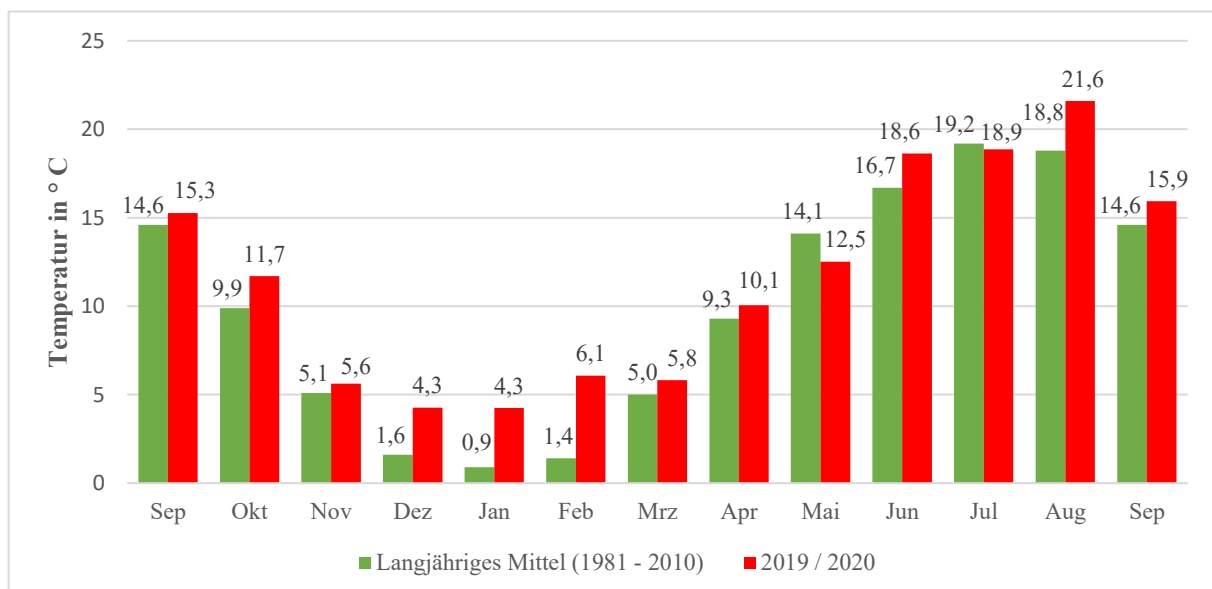


Abbildung 6: Vergleich des durchschnittlichen Jahrestemperaturverlauf am Standort Bernburg-Strenzfeld von 1981 bis 1010 (nach BÖTTCHER, 2012) mit dem Temperaturverlauf in der Vegetationsperiode 2019/2020 (nach GILLE et al., 2020)

In der Abbildung 7 ist die Jahresniederschlagsmenge, welche ebenfalls anhand des zuvor genannten langjährigen Durchschnitts bestimmt wurde, im Vergleich mit der während des Versuchsjahrs ermittelten Niederschlagsmengen dargestellt. Demnach beträgt das Niederschlagsmittel 43 mm, wobei der Juli der niederschlagsreichste Monat mit 60 mm ist und der Februar den niederschlagsärmsten Monat mit durchschnittlich 25 mm bildet.

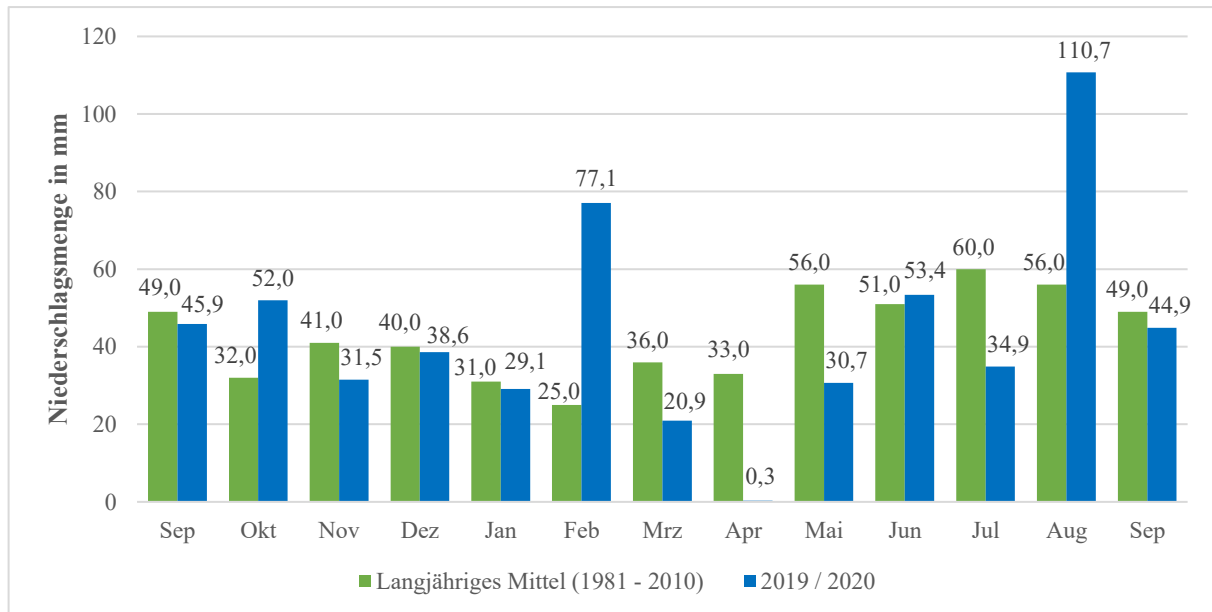


Abbildung 7: Vergleich der durchschnittlichen Jahresniederschlagsmenge am Standort Bernburg-Strenzfeld von 1981 bis 2010 (nach BÖTTCHER, 2012) mit der Niederschlagsmenge in der Vegetationsperiode 2019/2020 (nach GILLE et al., 2020)

Zu Beginn des thematisierten Versuchsjahrs 2019/2020 war der Bodenwasservorrat am Standort aufgrund der extremen Witterungsbedingungen im Jahr 2019, welche durch Hitze und Trockenheit geprägt waren, weitestgehend erschöpft. Allerdings konnte trotz dessen ein guter Feldaufgang und eine normale Vorentwicklung bei der am 20.09 Wintergerste und dem am 14.10 gedrillten Winterweizen beobachtet werden, da im Herbst ausgeglichene Niederschläge und durchschnittliche Temperaturen herrschten (DEUBEL, 2020). In den darauffolgenden Wintermonaten von Dezember bis Februar lagen die Temperaturen mit durchschnittlich 13,4 °C über dem langjährigen Mittel sehr hoch, welches sich aus der Abbildung 6 entnehmen lässt. Das Bodenwasserdefizit durch die extreme Trockenheit im Jahr 2019 konnte wie in Abbildung 7 dargestellt durch hohe Niederschläge im Februar von 77,1 mm teilweise ausgeglichen werden. In dem darauffolgenden Monat bis Ende Mai war die Niederschlagsmenge mit durchschnittlich 24,37 mm unter dem langjährigen Mittel jedoch extrem gering, wodurch eine Stresssituation für die Pflanzen entstand. Außerdem kam es durch einen Gewitterniederschlag am 15.08, welcher ungefähr 72 mm Niederschlag mit sich brachte, zu partiellen oberflächlichen Verschlammungen und einer monatlichen Gesamtniederschlagsmenge von aufgerundet 111 mm (vgl. Abbildung 7).

4.2 Versuchsaufbau

Bei dem Versuch handelt es sich um einen Dauerdüngungsversuch mit Kalium, welcher seit 1993 an der Hochschule durchgeführt wird. Solche Langzeitfeldversuche werden in einer bestimmten Gegend systematisch angelegt und stehen wie auch in diesem Fall länger als 20 Jahre unter permanenter Nutzung. Aus den periodischen Ergebnissen dieser Versuche werden Fragen zur Pflanzenproduktion, Nährstoffkreisläufen und dem Einfluss auf die Umwelt beantwortet (FLIEBBACH et al., 2007; RASMUSSEN et al., 1998). Durch die entstehenden umfangreichen Probenarchive können Veränderungen im Boden in einem dekadischen Maßstab erkannt und quantifiziert werden (RICHTER et al., 2007; DEBRECZENI und KÖRSCHENS, 2003). Zudem können nach RICHTER (2005) für die Versuchsgegend Gehaltsklassen für die Versorgung mit Nährstoffen entwickelt werden, welche am Pflanzenertrag geeicht sind.

Im Sommer 2013 wurde die einheitliche Versuchsanleitung überarbeitet um größere Differenzen zwischen den Varianten zu erzeugen. Dazu wurde beschlossen Körnermais durch den Anbau von Silomais zu ersetzen und das Stroh des Getreides in Zukunft abzufahren, wobei gleichzeitig die Düngermengen angepasst wurden. Langfristig sollen bei diesem Versuch die Auswirkungen einer variierenden Kalidüngung auf die Trockentoleranz, den Ertrag und die Qualität der in der Fruchtfolge angebauten Fruchtarten sowie auf die K-Dynamik im Boden bei konventioneller Bodenbearbeitung untersucht werden. Dabei rotieren fünf Kulturen innerhalb von fünf Jahren nach der Fruchtfolge Zuckerrübe-Sommergerste-Silomais-Winterweizen-Wintergerste (GILLE et al, 2020). Demnach wird als erster Prüffaktor jede Fruchtart jedes Jahr im Fruchtfolgerhythmus angebaut, wobei es festgelegte Sorten gibt, und als zweiten Prüffaktor dienen fünf verschiedene Düngestufen für Kalium. Die sich aus den zwei Prüffaktoren ergebenden Varianten werden von der nachfolgenden Tabelle 5 dargestellt. Der Tabelle lässt sich zudem entnehmen, dass zusätzlich ein Vergleich der K-Wirkung durch unterschiedliche K-Düngerformen in den Varianten 2 und 4 durchgeführt wird. So wird in diesen dieselbe Menge an Kalium gedüngt, wobei die Düngung in Variante 2 in Form von 60er Kali und damit im Gegenzug zur Variante 4 nicht in Verbindung mit Magnesium erfolgt (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 5: Varianten der Düngestufen unter Berücksichtigung der Sortenwahl, Fruchtfolge und -art (nach GILLE et al., 2020)

Fruchtart	ZR	SG	SM	WW	WG	
Sorte	Lunella	Fandaga	Fabiano	Asory	SU Jule	
Variante						Düngerform
	kg K ₂ O/ha					
1	0	0	0	0	0	
2	200	100	200	100	100	60er Kali
3	150	50	150	50	50	Korn-Kali
4	200	100	200	100	100	Korn-Kali
5	300	150	300	150	150	Korn-Kali

Als Versuchsanlage wurde dafür eine einfaktorielle Blockanlage je Fruchtart gewählt. Dies bietet den Vorteil, dass durch die Nähe der Parzellen gezielt homogene Bodenqualitäten ausgewählt werden können und ein guter visueller Vergleich durch Bonituren der einzelnen Parzellen möglich ist. Die fünf unterschiedlichen Düngestufen wurden für die fünf verschiedenen Kulturen mit je vier Wiederholungen angebaut. Daraus ergeben sich also insgesamt 25 Varianten, 20 Parzellen je Fruchtart und 100 Gesamtparzellen, wobei die Fläche jeder Parzelle 25 m² beträgt (GILLE et al, 2020). Der Aufbau dieser Versuchsanlage ist in der anschließenden Abbildung 8 dargestellt.

ZR					WG					WW					SM					SG				
2	5	4	3	1	2	5	4	3	1	2	5	4	3	1	2	5	4	3	1	2	5	4	3	1
12	15	14	13	11	52	55	54	53	51	42	45	44	43	41	32	35	34	33	31	22	25	24	23	21
3	1	5	2	4	3	1	5	2	4	3	1	5	2	4	3	1	5	2	4	3	1	5	2	4
13	11	15	12	14	53	51	55	52	54	43	41	45	42	44	33	31	35	32	34	23	21	25	22	24
5	4	2	1	3	5	4	2	1	3	5	4	2	1	3	5	4	2	1	3	5	4	2	1	3
15	14	12	11	13	55	54	52	51	53	45	44	42	41	43	35	34	32	31	33	25	24	22	21	23
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
11	12	13	14	15	51	52	53	54	55	41	42	43	44	45	31	32	33	34	35	21	22	23	24	25

Abbildung 8: Versuchsplan (GILLE et al., 2020)

4.3 Versuchsdurchführung

Aus den Richtwerten für die anbautechnischen Daten geht hervor, dass eine Grundbodenbearbeitung mit dem Pflug durchgeführt wird, wobei optional noch eine anschließende Saatbettbereitung hinzukommt. Zudem werden die Aussattermine und -mengen an die Fruchtart und die aktuellen Gegebenheiten angepasst (GILLE et al., 2020). Für die Düngung und den Pflanzenschutz wurden Richtwerte festgelegt, welche in der folgenden Tabelle dargestellt sind.

Tabelle 6: Richtwerte für Düngung und Pflanzenschutz (GILLE et al., 2020)

Fruchtart in FF	N: N _{min} -Berücksichtigung in kg/ha	P ₂ O ₅ in kg/ha	Pflanzenschutzmittel	Wachstumsregulatoren
ZR	120	75	nach guter fachlicher Praxis	
SG	50	75		
SM	120	75		
WW	200 (80/60/60)	75		Ja
WG	160 (80/80)	75		Ja

Die Ertragserfassung erfolgt bei den Getreideparzellen auf 15 m² durch Kerndrusch mit einem Parzellenmähdrescher, wohingegen die Ernte der Zuckerrüben per Hand auf einer Fläche von 9 m² erfolgt. Nach der Ernte wird das Stroh abgefahren und das Rübenblatt verbleibt auf dem Acker (GILLE et al., 2020). Die ausführliche Auflistung der durchgeführten Arbeiten im Versuchsjahr 2019/2020 je Fruchtart ist dem Anhang zu entnehmen.

4.4 Datenerfassung

Um die erforderlichen Daten zur Auswertung des Versuchs zu erheben werden verschiedene Parameter bestimmt, welche sich im Wesentlichen als Analyse von Witterung, Boden und Pflanzenmaterial zusammenfassen lassen. Für die Witterungsdaten wird dabei die Temperatur und der Niederschlag gemessen. Zur Analyse des Bodens wird zunächst jährlich nach der Ernte je Parzelle eine Bodenprobe entnommen. Anhand dieser wird der pH-Wert gemessen sowie der Nährstoffgehalt an Phosphor, Kalium, Magnesium und bei Zuckerrüben zusätzlich an Natrium bestimmt. Des Weiteren wird jedes Jahr zu Vegetationsbeginn je Fruchtart eine Durchschnittsprobe zur N_{min}-Bestimmung entnommen. Zusätzlich wird zum gleichen Zeitpunkt auch die Bodenfeuchte in den drei verschiedenen Schichten der Tiefen 0-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm bestimmt. Da diese Beprobung für jede Fruchtart durchgeführt wird, ergeben sich für diese Messung insgesamt 15 Proben. Allerdings wird die Bodenfeuchte unter Wintergerste im Vegetationsverlauf bereits kontinuierlich gemessen, wobei dies mit einer ML2x-Sonde von Delta T in den Bodentiefen 10, 20, 40 und 70 cm erfolgt. Die Messtellen befinden sich dabei an je einem Punkt der niedrigsten und höchsten K-Düngungsstufe. Ergänzend dazu wird eine wöchentliche Messung der Bodenfeuchte in allen vier Wiederholungen der zuvor genannten Düngerstufen in den Kulturen WG und ZR mit der mobilen Sonde Diviner 200 von Sentek durchgeführt. Die Pflanzenanalyse erfolgt anhand einer Mischprobe, welche aus jeder Varianten einer Fruchtart entnommen wird, sodass sich ein Probenumfang von 25 Proben ergibt. In diesen wird der Stickstoffgehalt in % sowie der K-Gehalt in g/kg in der TM bestimmt. Die Probenahmen erfolgen im Getreide nach der BBCH-Skala im Stadium 32/37, beim Mais zum Zeitpunkt des Fahnenschiebens bis zur Blüte und bei den Zuckerrüben Ende Juli.

Ein weiterer Aspekt der Datenerfassung sind Bonituren und Auszählungen, welche per Hand und immer parzellenweise durchgeführt werden. So wird das Getreide beim Aufgang und nach der BBCH-Skala in den Entwicklungsstadien 31, 55 und 87 bonitiert. Dabei wird in jeder Parzelle die Standfestigkeit sowie die Beeinträchtigung des Gesundheitszustandes der Pflanzen durch Krankheiten wie zum Beispiel Mehltau oder Roste beurteilt. Zudem wird je nach Entwicklungsstand die Keimdichte auf 2 x 1 m bzw. die Ährenzahl auf 8 x 1 m je Parzelle bestimmt. Beim Silomais wird zum Zeitpunkt des Aufgangs die Aufgangsdichte auf einer Fläche von 2 x 4 m je Parzelle bestimmt. Des Weiteren wird beim Entwicklungsstadium des Fahnenschiebens die Pflanzen- und Kolbenanzahl ausgezählt, wobei auch hier die Standfestigkeit und die Beeinträchtigung der Pflanzengesundheit durch das Auftreten von Krankheiten wie Beulenbrand oder Stängelfeule bewertet wird.

Auch bei den Zuckerrüben wird die Pflanzenzahl zum Aufgangszeitpunkt auf der gleichen Flächengröße wie beim Silomais bestimmt. Außerdem wird nach Bestandesschluss die Pflanzenzahl je Ernteparzelle ausgezählt, wobei zusätzlich auch der bei dieser Kultur der Befall von Krankheiten sowie zusätzlich die Anzahl der Schosser je Parzelle ausgezählt werden.

Nach der Ernte erfolgen eine Ertragsermittlung der erzeugten Hauptprodukte (Korn, SM, Rübe) und Koppelprodukte (Stroh, Rübenblatt). Der Ertrag wird in kg/Parzelle erfasst und dann in die Einheit dt/ha umgerechnet. Des Weiteren werden die Inhaltsstoffe der erzeugten Produkte zur Untersuchung der Qualität bestimmt. So wird bei allen diesen der Gehalt an Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium sowie der Trockensubstanzgehalt erfasst. Bei den Zuckerrüben und dem Rübenkraut wird dabei zusätzlich der Natriumgehalt ermittelt und es erfolgt eine Rübenuntersuchung in der Zuckerfabrik je Parzelle. Beim Weizenkorn erfolgt eine darüberhinausgehende Ermittlung von TKG, Hektolitergewicht, Fallzahl, Sedimentation und Stärkegehalt, wohingegen beim Wintergerstenskorn zusätzlich nur noch TKG, Stärkegehalt und Hektolitergewicht analysiert werden. Zudem erfolgt auch beim Sommergerstenskorn eine Bestimmung des TKG, wobei optional bei einer deutlichen K-Wirkung auch eine Braugerstenanalyse erfolgen kann (GILLE et al., 2020).

4.5 Statistische Auswertung

Zur Auswertung der gewonnenen Daten sind deskriptiv-statistische Verfahren angewendet worden. Mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramms Microsoft Excel konnte die Gesamtheit der Daten in Form von Tabellen und Diagrammen visualisiert werden. Zudem wurde mit demselben Programm die Berechnung der arithmetischen Mittelwerte und Standardabweichungen durchgeführt. Unter Verwendung des F-Tests nach Ronald Aylmer Fisher wurden die Ergebnisse auf eine Übereinstimmung der Varianzen oder eine signifikante Unterscheidung in Bezug auf die Stufeneffekte statistisch untersucht. Unter Stufeneffekten sind dabei in diesem Zusammenhang die möglichen unterschiedlichen Auswirkungen der verschiedenen Kaliumdüngestufen auf den jeweiligen Prüffaktor zu verstehen. Bei dieser Berechnung wird eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,05 angenommen und im Fall von auftretenden Signifikanzen schließt sich ein multipler Mittelwertvergleich in Form des T-Tests an. So können alle Varianten auf signifikante Unterschiede geprüft werden.

5. Ergebnisse

Um die Versorgung des Bodens mit relevanten Nährstoffen sowie den pH-Wert zu Beginn des Versuchs zu beurteilen werden die gemessenen Bodenuntersuchungsergebnisse in einer Tiefe von 0-30 cm nach der Ernte im Jahr 2019 herangezogen, da sich der thematisierte Versuch auf das Erntejahr 2020 bezieht. Der K- und Mg-Gehalt sind düngabhängig, sodass der Mittelwert aller Fruchtarten pro Variante berechnet wurde. Der Na-Gehalt wird in allen Varianten nur nach der Ernte der Zuckerrüben bestimmt. Für die Beschreibung des P-Gehalts und pH-Werts kann der Gesamtmittelwert mit Standardabweichung angegeben werden, da diese lediglich in Abhängigkeit vom Boden und dem Entzug bzw. des Einflusses durch die Vorfrucht schwanken. Die daraus resultierenden Werte enthält die nachfolgende Tabelle.

Tabelle 7: Nährstoffgehalte des Bodens nach der Ernte im Jahr 2019 (eigene Berechnungen)

Variante	Nährstoffgehalte in mg/100 g Boden				pH-Wert
	\bar{x} von Mg	\bar{x} von K	Na	P	
1	7,96	11,86	2,5	$\bar{x} = 10,27$ $\sigma = 2,12$	$\bar{x} = 7,14$ $\sigma = 0,11$
2	8,00	21,34	3,4		
3	8,78	18,02	3,9		
4	9,32	20,66	3,8		
5	9,92	26,00	4,5		

Zudem wurde am 05.02.20 eine Beprobung aller Fruchtarten durchgeführt um die Bodenfeuchte und den Gehalt an mineralisiertem pflanzenverfügbarem Stickstoff zu Vegetationsbeginn zu bestimmen. Dabei wurde die Bodenfeuchte in Form der nutzbaren Felkapazität erfasst, welche nach KAUPENJOHANN (2018) das maximale Speichervermögen des Bodens für pflanzenverfügbares Wasser bezeichnet. Für jede Kultur ist der Mittelwert dieser beiden Parameter aus allen Düngevarianten je Schicht in Tabelle 8 abgebildet.

Tabelle 8: N_{\min} - und nFK- Werte zu Vegetationsbeginn (nach DEUBEL, 2020)

Fruchtart	N_{\min} in kg/ha			nFK in %		
	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
ZR	9	28	31	67,14	58,64	51,69
SG	47	68		61,79	61,09	47,86
SM	9	22	23	62,98	60,48	51,05
WW	6	26	59	65,95	61,70	51,69
WG	3	1	2	66,55	54,98	42,76

5.1 Winterweizen

Der Weizen hatte in der Fruchtfolge Silomais als Vorfrucht. Die Keimdichte wurde am 22.10 bestimmt. Bei den Bonituren konnten keine Krankheiten oder Schaderreger festgestellt werden. Die Pflanzenanalyse wurde im Entwicklungsstadium 32 durchgeführt, welches der Weizen am 20.05 erreichte. Der durch diese Analyse ermittelte K- und N-Gehalt ist in der Tabelle 9 farblich hervorgehoben. Zusätzlich sind auch die anderen bei der Ernte ermittelten Parameter in derselben Tabelle angeführt. Bei der Überprüfung auf signifikante Unterschiede, welche nach der im vorrausgehenden Abschnitt 4.5 beschriebenen statistischen Methode durchgeführt wurde, konnte beim Kornertrag die Signifikanzgrenze erreicht werden. Das bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Kornertrag durch die verschiedenen Kaliumdüngestufen zwar unterschiedlich war, aber noch größer sein müsste um als signifikant zu gelten.

Tabelle 9: Ergebnisse Winterweizenanbau 2020 (nach DEUBEL, 2020)

Merkmal	Düngevarianten				
	1	2	3	4	5
Keimdichte in Pflanzen/m ²	239	248	245	250	251
N in % (TS)	2,7	2,7	2,6	3,2	2,9
K in g/kg (TM)	15,3	16,3	18,1	18,9	18,9
Korn in dt/ha (86 % TS)	95,7	100,4	97,6	99,1	100,3
Korn – TS zur Ernte in %	89,3	89,2	89,3	89,0	89,0
Ähren/m ²	553	600	530	564	550
Kornzahl/Ähre	42,5	39,7	43,2	42,4	43,4
TKG in g	40,7	42,2	42,6	41,4	42,0
Hektolitergewicht in kg	80,1	80,9	80,6	83,2	80,5
Rohproteingehalt in % (TS)	13,3	13,5	13,4	13,6	13,3
Stärkegehalt in % (TS)	63,9	64,5	52,6	54,4	64,8
N-Gehalt Korn in % (TS)	2,3	2,4	2,4	2,4	2,3
Stroh in dt/ha (TM)	79,96	78,69	77,11	77,55	79,43
TS Stroh zur Ernte in %	95	95	95	94	94
N-Gehalt Stroh in % (TS)	0,85	0,88	0,85	0,84	0,76
K-Gehalt Stroh in g/kg (TM)	7,3	8,3	9,3	9,5	8,6

5.2 Silomais

Beim Anbau von Silomais mit der Vorfrucht Sommergerste wurde die Keimdichte am 05.05 bestimmt und die Pflanzenanalyse erfolgte am 21.08, wobei die daraus resultierenden Ergebnisse in der nachfolgenden Tabelle ergänzend zu den nach der Ernte bestimmten Parametern angeführt sind. Bei den Bonituren konnten keine Brände, Fäulen, Maiszünsler oder eine Beeinträchtigung der Standfestigkeit festgestellt werden, allerdings gab es Fehlstellen, welche durch Drahtwurm-Fraß entstanden sind. Des Weiteren konnten auch keine signifikanten Ertragsunterschiede anhand des F-Tests zwischen den Düngevarianten ermittelt werden.

Tabelle 10: Ergebnisse Silomaisanbau 2020 (nach DEUBEL, 2020)

Merkmale	Düngevarianten				
	1	2	3	4	5
Keimdichte in Pflanzen/m ²	6,3	8,4	6,9	6,3	8,0
N in % (TS)	2,6	2,1	2,2	2,0	2,1
K in g/kg (TM)	10,9	14,8	10,8	14,3	17,5
Frischmais in dt/ha (32 % TS)	500	516	514	501	526
TS zur Ernte in %	35,12	35,45	34,78	35,23	35,43
Mais-TM in dt/ha	160,0	165,0	164,4	160,5	168,2
N-Gehalt in % (TS)	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1
K-Gehalt in g/kg (TM)	5,0	4,6	6,5	5,8	6,3

5.3 Sommergerste

Die Pflanzenanalyse der Sommergerste, welche dem Anbau von Zuckerrüben folgte, wurde am 20.05 im Entwicklungsstadium 37 durchgeführt. Die Ergebnisse jener sind wie zuvor in der Tabelle 11 farblich kenntlich gemacht. Der Gesundheitszustand der Pflanzen war im gesamten Anbauzeitraum gut, sodass keine Krankheiten, Lagerschäden oder Schädlingsbefälle festgestellt werden konnten. Zudem konnten auch keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Düngevarianten hinsichtlich des Ertrags ermittelt werden.

Tabelle 11: Ergebnisse Sommergerstenanbau 2020 (nach DEUBEL, 2020)

Merkmale	Düngevarianten				
	1	2	3	4	5
Ähren/m ²	596,95	625,00	594,25	525,50	580,00
N in % (TS)	3,1	3,1	3,1	2,8	3,1
K in g/kg (TM)	18,4	21,8	18,4	20,7	20,3
Korn in dt/ha (86 % TS)	53,1	51,1	52,4	53,0	53,1
Korn – TS zur Ernte in %	88,7	89,5	89,5	89,4	89,5
Kornzahl/Ähre	19,3	18,2	19,8	21,8	19,9
TKG in g	46,0	44,9	44,6	46,2	46,0
Rohproteingehalt in % (TS)	16,0	16,5	16,6	16,6	16,6
N-Gehalt Korn in % (TS)	2,6	2,6	2,7	2,7	2,7
Stroh in dt/ha (TM)	37,98	27,31	28,25	33,82	37,26
TS Stroh zur Ernte in %	93	91	90	91	92
N-Gehalt Stroh in % (TS)	1,05	1,05	1,05	0,91	0,90
K-Gehalt Stroh in g/kg (TM)	12,8	13,2	11,3	12,8	13,4

5.4 Zuckerrüben

Bei den Zuckerrüben, welche Wintergerste als Vorfrucht hatten, wurde die Aufgangsdichte am 23.04 bestimmt und die Pflanzenanalyse am 21.08 durchgeführt. Bei dieser wurde zusätzlich zur Bestimmung des Stickstoffs- und Kaliumgehalts noch der Natriumgehalt bestimmt. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle farblich hervorgehoben sind. Die Bestimmung der Polarisation, welche den Zuckergehalt der Rübenmelasse bezeichnet, und die Nährstoffgehalte in der Rübe in der Einheit mmol/1000 g wurden von der Zuckerfabrik in Könnern durchgeführt. Die anderen Untersuchungen erfolgten im Labor der Hochschule Anhalt in Bernburg. Bei dem bereinigten Zuckergehalt konnte das Erreichen der Signifikanzgrenze statistisch errechnet werden.

Tabelle 12: Ergebnisse Zuckerrübenanbau 2020 (nach DEUBEL, 2020)

Merkmale	Düngevarianten				
	1	2	3	4	5
Keimdichte in Pflanzen/m ²	9,4	10,0	9,1	8,6	9,6
Na in % (TS)	2,7	2,2	2,4	2,7	2,4
K in g/kg (TM)	24,8	28,0	27,4	22,5	27,2
Na in g/kg (TM)	22,8	23,5	25,6	25,0	28,0
Pflanzen/m ² zur Ernte	9,8	9,5	9,9	9,2	9,6
Rüben in dt/ha	682,40	694,00	745,93	659,70	714,40
Polaristaion in °S	18,0	18,6	18,7	18,5	18,5
K in mmol/1000 g Rübe	28,1	32,6	32,3	31,6	34,3
Na in mmol/1000 g Rübe	7,4	6,3	7,4	7,5	7,5
α-Amino-N in mmol/1000 g Rübe	18,5	16,1	17,8	16,2	16,9
Bereinigter Zuckergehalt in %	16,1	16,6	16,7	16,5	16,6
Bereinigter Zuckerertrag in dt/ha	109,4	114,8	124,1	108,8	118,5
TS-Rüben in %	23,8	24,5	24,7	24,5	24,6
N-Gehalt Rüben in % (TS)	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7
K-Gehalt Rüben in g/kg (TM)	3,5	3,7	3,7	3,7	4,0
Na-Gehalt Rüben in g/kg (TM)	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9
Rübenkraut in dt/ha	226,7	234,4	229,7	230,3	234,4
TS Rübenkraut in %	18,5	19,5	18,0	16,5	21,5
Rübenkraut in dt/ha (TM)	41,9	45,7	41,4	38,0	50,4
N-Gehalt Kraut in % (TS)	1,5	1,4	1,4	1,6	1,3
K-Gehalt Kraut in g/kg (TM)	14,2	15,5	14,6	18,2	17,1
Na-Gehalt Kraut in g/kg (TM)	10,0	9,3	9,7	10,9	10,9

5.5 Wintergerste

Als Vorfrucht hatte Wintergerste hinsichtlich der Fruchtfolge Winterweizen. Eine Bestimmung der Keimdichte konnte nach dem Aufgang am 28.09 erfolgen. Des Weiteren konnte auch bei dieser Kultur keine visuelle Beeinträchtigung des Gesundheitszustandes durch Krankheiten, Schädlinge oder Lagerschäden beobachtet werden. Die farblich markierten Bereiche in der folgenden Tabelle geben auch hier die Ergebnisse der Pflanzenanalyse an, welche am 20.05 zum Zeitpunkt des Entwicklungsstadiums 32/33 vorgenommen wurde. Bei der Wintergerste konnte bei der Anwendung der statistischen Untersuchungsmethode festgestellt werden, dass sowohl beim Kornertrag als auch dem Strohertrag die Signifikanzgrenze erreicht wurde.

Tabelle 13: Ergebnisse Wintergerstenanbau 2020 (nach DEUBEL, 2020)

Merkmale	Düngevarianten				
	1	2	3	4	5
Keimdichte in Pflanzen/m ²	277	282	280	284	282
N in % (TS)	1,5	1,6	1,6	1,5	1,5
K in g/kg (TM)	17,9	19,6	17,9	18,7	17,8
Korn in dt/ha (86 % TS)	91,5	94,4	95,9	97,8	97,0
Korn – TS zur Ernte in %	87,7	87,6	87,6	87,7	87,4
Ähren/m ²	461,5	474,5	520,0	612,5	477,0
Kornzahl/Ähre	37,1	36,3	33,2	29,4	36,4
TKG in g	53,48	54,87	55,49	54,27	55,88
Hektolitergewicht in kg	69,0	69,4	69,4	68,6	68,5
Rohproteingehalt in % (TS)	12,8	12,9	12,9	12,7	12,5
Stärkegehalt in % (TS)	55,3	55,7	56,2	56,9	56,0
N-Gehalt Korn in % (TS)	2,0	2,1	2,1	2,0	2,0
Stroh in dt/ha (TM)	65,2	70,6	59,3	71,0	66,2
TS Stroh zur Ernte in %	68	66	55	63	61
N-Gehalt Stroh in % (TS)	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8
K-Gehalt Stroh in g/kg (TM)	12,5	13,5	12,4	13,7	13,1

6. Diskussion

Der Bodenwasservorrat zu Beginn des Versuchs im Jahr 2019 wurde anhand der nutzbaren Feldkapazität ermittelt, wobei diese im Durchschnitt aller Kulturen und Bodentiefen gerundet 56 % betrug (vgl. Tabelle 8). Dies ist nicht ideal, da die Obergrenze eines optimalen Wasserangebots laut dem DEUTSCHEN WETTERDIENST (2020) ein Bodenwasservorrat von 80 % wäre, wohingegen höhere Werte den Beginn einer Überversorgung darstellen. Allerdings war die Auffüllung des Bodenwasservorrats nach DEUBEL (2020) damit jedoch besser als im Vorjahr.

Um die Versorgung des Bodens mit Stickstoff zu Beginn des Versuchs im Jahr 2019 einschätzen zu können, wurde der N_{\min} -Gehalt für alle Kulturen bestimmt (vgl. Tabelle 8). Dabei fiel auf, dass der Gehalt an verfügbarem Stickstoff in der oberen Bodenschicht bis 30 cm generell sehr niedrig war. So lag dieser im Durchschnitt aller Kulturen mit Ausnahme der Sommergerste, welche mit der Vorfrucht Zuckerrübe durch das auf dem Acker verbleibende Rübenblatt einen N_{\min} -Wert von 47 kg/ha aufwies, nur bei 6,75 kg/ha. Nach aktuellen Empfehlungen der LLG in Sachsen-Anhalt (2021) sollte dieser jedoch für die vorliegende Bodengruppe 4 in der oberen Bodenschicht für beispielsweise WW und WG zwischen 26 und 27 kg/ha liegen. Insgesamt sind die N_{\min} -Werte der Kulturen außer Wintergerste in Bezug auf alle untersuchten Bodenschichten jedoch als durchschnittlich anzusehen, da die höheren Gehalte in den tieferen zwei gemessenen Schichten das Defizit der oberen Schicht ausgleichen, sodass die Gesamtrichtwerte nach LLG (2021) aller Schichten eingehalten werden. Bei Wintergerste liegen alle N_{\min} -Gehalte im extrem niedrigen Bereich von 1- 3 kg/ha, welches nach DEUBEL (2020) durch die zeitweilig fehlende Winterruhe bedingt sein kann. Somit gewinnt hier eine gute N-Düngewirkung zu Vegetationsbeginn an Bedeutung, wobei diese, wie in Abschnitt 2.6.2 beschrieben, durch eine gute K-Versorgung in ihrer Effizienz gesteigert werden kann und durch die zunehmenden rechtlichen Einschränkungen in der N-Düngung generell immer relevanter wird. Des Weiteren gibt auch ZÖRB et al. (2013) an, dass ein Kaliummangel in Getreidekulturen deren Fähigkeit einschränken kann N zu nutzen, was zu einem erhöhten Potential für eine Nitratauswaschung führen kann. Allerdings war eine Düngewirkung des Stickstoffs durch die extrem geringen Niederschläge im März und April nur eingeschränkt gegeben (vgl. Abschnitt 4.1).

Die Witterungsverhältnisse in dem Versuchsjahr waren wie bereits erwähnt durch anhaltende Trockenheit geprägt, welche vor allem aus überdurchschnittlich hohen Temperaturen im Winter und mangelnden Niederschlägen im Frühling resultierte (vgl. Abschnitt 4.1). So war der Krankheitsdruck bei den Kulturen generell relativ gering und der Gesundheitszustand sowie die Standfestigkeit der Pflanzen konnten durch durchgeführte Pflanzenschutzmaßnahmen nach guter fachlicher Praxis abgesichert werden (vgl. Anhang). Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Kulturen diskutiert, wobei sich zusammenfassend feststellen lässt, dass die anhand der Pflanzenanalyse ermittelten K-Gehalte nach DEUBEL (2020) in allen Kulturen und Varianten sehr niedrig sind und durch die K-Düngung nur leicht erhöht wurden.

Beim Weizen konnten trotz der schwierigen Witterungsbedingungen durch die anhaltende Trockenheit sehr hohe Erträge erzielt werden. Dies resultiert vermutlich aus der zunehmenden Optimierung der Stresstoleranz der Sorten sowie der guten Qualität des Ackerbodens. Zudem kann anhand der Ergebnisse festgestellt werden, dass die Kornausbildung durch eine erhöhte K-Düngung deutlich verbessert wurde. Der Grund dafür könnte darin liegen, dass eine ausreichende K-Versorgung, durch die positiven Auswirkungen von Kalium auf die Regulation des Transpirationsflusses und die Unterstützung des Nährstofftransports in die Wurzeln, besonders in Trockenperioden einer vorzeitigen Abreife und einer damit verbundenen verkürzten Kornfüllungsphase entgegenwirken kann. So ist der Kornertrag von gerundet 96 dt/ha in der Variante 1 auf ungefähr 100 dt/ha in der Variante 5, welche die höchste K-Düngung aufweist, angestiegen. Dabei fällt auf, dass der Ertrag von Variante 2 und 5 nahezu gleich ist, sodass schlussgefolgert werden kann, dass die zusätzlichen 50 kg K₂O/ha, welche in der Variante 5 gedüngt wurden, in Bezug auf den Kornertrag als nicht effizient anzusehen sind (vgl. Tabelle 5). Allerdings ist zu beachten, dass bei der Variante 2 die Düngerform 60er Kali verwendet wurde, welche 20 % mehr Kaliumchlorid enthält als Korn-Kali (vgl. Tabelle 4). Durch die aus den gesteigerten Kornerträgen resultierenden erhöhten TKG konnte aufgrund der ausreichenden Stickstoffversorgung jedoch kein Absinken des Rohproteingehalts bestimmt werden. Außerdem lässt sich feststellen, dass die K-Gehalte im Stroh relativ niedrig sind, da diese bei Weizen nach SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL bei umgerechnet ungefähr 10 g/kg bezogen auf die TM liegen sollten (vgl. Tabelle 3), wohingegen sich die in denen mit K gedüngten Versuchspartellen gemessenen Werte im Bereich von 8,3-9,5 g/kg K befinden und der Wert der Düngevariante 1 bei 7,3 g/kg K liegt. Demnach wurde auch der K-Gehalt im Stroh durch die K-Düngung leicht erhöht. Der generell niedrige Gehalt kann sich positiv auf den K-Gehalt des Bodens auswirken, da weniger Kalium im Stroh vom Acker abgefahren wurde und somit der im Folgejahr angebauten Kultur Wintergerste ein erhöhter Gehalt zur Verfügung steht.

Die K-Gehalte im Weizenkorn hingegen wurden nicht bestimmt. Allerdings gibt ZÖRB et al. (2013) an, dass reife Weizenkörner eine relativ niedrige und konstante K-Konzentration von ungefähr 3 mg/g TM unabhängig des breiten Spektrums an K-Versorgungsstufen aufweisen. Dies wird auch durch einen Langzeitversuch zur K-Düngung in Halle bestätigt, welcher erstmals im Jahr 1949 von Karl Schmalfuß durchgeführt wurde (MERBACH et al., 2000). So sind die K-Konzentrationen in den Körnern über alle K-Versorgungsniveaus konstant, während die K-Werte im Stroh die verschiedenen Düngerstufen widerspiegeln. Nach ZÖRB et al. (2013) kann hier ein Optimierungspotential gesehen werden, da es in den meisten Industrieländern zu einer starken Abnahme der täglichen K-Aufnahme in der Ernährung gekommen ist. Der Grund dafür liegt in einem steigenden Verbrauch an verarbeiteten und K-armen Lebensmitteln auf Weizenbasis wie Brot und Nudeln, welcher mit einer Verringerung des Konsums an K-reichem Obst und Gemüse kombiniert ist. Dabei zeigen viele epidemiologische und klinische Studien, dass eine ausreichende K-Versorgung in vielen Aspekten eine positive Auswirkung auf die menschliche Gesundheit aufweist.

Deshalb könnte ein Optimierungsansatz für die Lebensmittelproduktion die Erhöhung des K-Gehalts in den Körnern sein, indem die physiologischen und molekularen Prozesse, welche diesen Parameter beeinflussen, besser verstanden werden sowie möglicherweise auch die genotypischen Unterschiede zwischen den verschiedenen Getreidegenotypen untersucht werden. Nach HE und MACGREGOR (2008) stellt eine Erhöhung des Verzehrs von Obst und Gemüse allerdings auch einen effektiven Lösungsansatz dar.

Der Silomais wurde am 21.04.2020 gelegt und in seinem Feldaufgang stark durch die im April ausbleibenden Niederschläge beeinträchtigt. Durch die zusätzlich entstandenen Fehlstellen, welche als Drahtwurm-Fraß interpretiert wurden, kam es so zu einer geringen Bestandesdichte. Trotz dessen konnten allerdings sehr gute Erträge von im Durchschnitt 511 dt/ha erzielt werden. An dieser Stelle lässt sich auch ein K-Düngungseffekt durch eine Steigerung des Ertrags von bis zu 26 dt/ha feststellen, wobei dieser in der Signifikanzanalyse aufgrund einer starken Streuung zwischen den Wiederholungen nicht abgesichert werden konnte und somit als nicht signifikant ermittelt wurde. Eine mögliche Ursache für die unterschiedlichen Ergebnisse zwischen den Wiederholungen könnte ein Zusammenspiel der ungleichmäßigen Bestandesdichte und einer ungleichen Wasserverteilung nach dem Extremniederschlag im August mit 72 mm Niederschlag sein. Anhand der Ergebnisse des Vergleichs der K-Formen in den Varianten 2 und 4 kann abgeleitet werden, dass vor allem der Maisertrag durch die Verwendung von 60er Kali im Vergleich zu Korn-Kali um 15 dt/ha gesteigert wurde. Allerdings wäre das Gegenteil zu erwarten gewesen, da Mais nach Angaben von KWS (entnommen 2021) einen relativ hohen Mg-Bedarf von 40 bis 70 kg MgO/ha aufweist und ein zu hohes K-Angebot wie in Abschnitt 2.3 beschrieben die Mg-Aufnahme durch den einseitigen Antagonismus behindern kann. Zudem kann wie bereits erwähnt nach HUBER und MORELAND (1981) sowie GIAQUINTA (1983) auch der Kaliumtransport in die Siebröhren durch einen Mg-Mangel, aufgrund seines Einflusses auf die ATPase-Aktivität und Cotransporte von K und Saccharose, eingeschränkt werden (vgl. Abschnitt 2.4.2). Demnach ist beim Anbau von Kulturen mit einem hohen Mg-Bedarf wie Mais eine optimale Kaliumwirkung nur in Verbindung mit Mg gegeben. Der dies widerlegende gesteigerte Ertrag in Variante 2 könnte möglicherweise nur eine Folge der zuvor erläuterten starken Streuung der Ergebnisse durch die ungleiche Wasserverteilung und unregelmäßige Bestandesdichte sein.

Die Sommergerste wurde besonders durch die Trockenheit in ihrem Wachstum beeinflusst, da im Oberboden bereits zur Aussaat am 17.03.20 durch die mangelnden Niederschläge im Frühling wenig Wasser zur Verfügung stand (vgl. Abbildung 7). Zudem war auch der Unterboden mit einer nFK von aufgerundet 48 % vermutlich aufgrund des hohen Wasserverbrauchs der Vorfrucht Zuckerrüben trockener als bei den anderen Kulturen (vgl. Tabelle 8). Daraus resultiert nach DEUBEL (2020) ein im Vergleich zu den Vorjahren deutlich niedrigerer Ertrag von durchschnittlich 52,5 dt/ha, welcher von kleinen Ähren hervorgerufen wurde und sich auch durch eine K-Düngung nicht verbessern ließ. Allerdings können im K-Gehalt des Stroh sehr leichte K-Düngungseffekte mit einer Steigerung von bis zu 0,6 g/kg TM beobachtet werden. Außerdem kann anhand der Ergebnisse festgestellt werden, dass im Korn sehr hohe N- und Rohproteingehalte von im Mittel 16,5 % vorliegen.

Diese sind vermutlich eine Folge des schlechten Ertrags und dem geringen N-Entzug durch eine schlechte Rübenernte im Vorjahr. Durch den hohen Rohproteingehalt kann das Erntegut jedoch nicht als Braugerste verwendet werden, da nach LORENZ et al. (2018) der maximale Rohproteingehalt 12 % beträgt, wobei 9,6-10,5 % den optimalen Bereich darstellt.

Bei den Zuckerrüben führte die Trockenheit im Frühjahr dazu, dass trotz den Blattneubildungen und deutlichen Zuwächsen durch die Starkniederschläge im August von insgesamt 111 mm (vgl. Abbildung 7), nur mittelmäßige Erträge von im Durchschnitt 700 dt/ha erreicht wurden. Der höchste Ertrag von gerundet 746 dt/ha war in der Düngevariante 3 gegeben, welche die zweithöchste K-Düngung aufweist. Der durchschnittliche Ertrag ist vermutlich eine Folge der von Verschlämmungen und oberflächlichen Wasserabflüssen verursachten ungleichmäßigen Wasserverteilung. Anhand der Ergebnisse und der Signifikanzanalyse kann festgestellt werden, dass der bereinigte Zuckergehalt durch die K-Düngung gesteigert werden konnte. So lag dieser in der Düngevariante 1 bei gerundet 109 dt/ha und in der Variante 3, welche den höchsten Ertrag aufweist, bei 124 dt/ha, sodass eine Steigerung des Zuckerertrags von ungefähr 15 dt/ha erzielt wurde. Allerdings stellt die Variante 3 nicht diejenige mit der höchsten K-Versorgung da, sodass verdeutlicht wird, dass eine zu hohe K-Düngung sich nach RICHTER (2005) negativ auf den Bildungsprozess von Saccharose auswirken kann, da der Trockensubstanzgehalt durch die zunehmende Wasseraufnahme, welche mit einer erhöhten K-Aufnahme einhergeht, abnimmt (vgl. Abschnitt 2.4.2).

Ein weiteres Qualitätsmerkmal, das durch die K-Düngung verbessert werden konnte, ist der α -Amino-N-Gehalt, da dieser als sogenannter Nichtzuckerstoff die Zuckergewinnung beeinträchtigt. So wird die Qualität der Zuckerrübe nach ROTHER (1998) durch deren Verarbeitung im Zuckerfabrikationsprozess definiert, wobei diese eine Kombination aus den physikalischen Eigenschaften und der chemischen Zusammensetzung von Saccharose und Nichtzuckerstoffen, welche auch Melassebildner genannt werden, darstellt. Bei der Qualitätsanalyse von Zuckerrüben wird der α -Amino-N-Gehalt demnach unter anderem stellvertretend für alle bei der Verarbeitung störenden Inhaltsstoffe erfasst (HOFFMANN, 2002). So konnte dieser durch eine K-Düngung von 18,5 mmol/1000 g Rübe um bis zu 2,4 mmol/1000 g Rübe reduziert werden. Allerdings ist im Gegenzug zu beachten, dass auch der K- und Na-Gehalt in der Rübe als Melassebildner bekannt sind und der K-Gehalt durch die erhöhte K-Düngung um bis zu 6 mmol/1000 g Rübe angestiegen ist, wobei der Na-Gehalt bei allen Düngegraden vergleichbar blieb. Demnach müsste die Signifikanz der Einflüsse vom Gehalt an Kalium und α -Amino-N als Melassebildner abgewogen werden, wobei der gesteigerte Zuckerertrag als positive Folge der K-Düngung bereits ausschlaggebend ist.

Wie bereits erwähnt war der Na-Gehalt bei allen Düngegraden vergleichbar, allerdings wäre bei einem K-Mangel ein geringerer Na-Gehalt zu erwarten. Der Grund dafür liegt darin, dass der K-Bedarf von natrophilen Pflanzenarten wie Zuckerrüben im Gegensatz zu beispielsweise Weizen niedriger ist, da diese Pflanzenspezies K bis zu einem gewissen Grad effizient durch Na ersetzen kann (WAKEEL et al., 2010; WAKEEL, 2013). So sind etwa 60 % des K in den Zellen von Zuckerrüben durch Na austauschbar, während es bei Weizen nur weniger als 15 % sind. Bei einem K-Mangel können Zuckerrüben also K durch Na für osmotische Zwecke in der Vakuole ersetzen, sodass der Na-Gehalt sinken müsste.

Allerdings ist der Teil an K, welcher zur K-spezifischen Aktivierung von Enzymen im Cytosol notwendig ist, nicht austauschbar (ZÖRB et al., 2013). Demnach lässt sich daraus schließen, dass die Zuckerrüben in Variante 1 trotz eines Anbaus ohne eine K-Düngung, keinem K-Mangel ausgesetzt waren. Unterstützend dazu lässt sich dem Bericht von DEUBEL (2020) entnehmen, dass der Na-Gehalt im Boden nach der Ernte der Zuckerrüben in Variante 1 am höchsten war.

Die Erträge der Wintergerste waren trotz der Trockenheit und der bereits erwähnten verzögerten N-Düngewirkung, welche durch die extrem niedrigen N_{\min} -Gehalte im Boden besonders wichtig gewesen wäre, relativ hoch. Hier konnten nicht nur die Kornerträge, sondern auch die Stroherträge durch die K-Düngung bis zur Signifikanzgrenze gesteigert werden. So ließen sich beide um bis zu 6 dt/ha steigern, wobei die Erträge nicht mit zunehmender K-Versorgung linear ansteigen, aber trotz Schwankungen in der Gesamtheit betrachtet höher liegen. Des Weiteren kann festgestellt werden, dass mit einer Ernte am 06.07.2020 die Wintergerste relativ früh abgereift ist (vgl. Anhang). Allerdings konnten trotz dessen und auch gefördert durch den aus der K-Düngung resultierenden erhöhten Kornertrag hohe TKG erzielt werden. Diese sollten nach KLOEPFER (2018) zwischen 35 und 54 g liegen und sind mit einem Mittelwert von 54,8 g bei allen Kulturen vergleichbar. Bei Betrachtung der N- bzw. Rohproteingehalt zeigte sich bei hoher K-Düngung ein leichter Verdünnungseffekt.

Insgesamt konnten in diesem Versuchsjahr durch eine K-Düngung zwar positive Effekte auf den Ertrag und die Qualität der angebauten Kulturen beobachtet werden, allerdings konnte bei diesen höchstens ein Erreichen der Signifikanzgrenze erzielt werden. Daraus lässt sich schließen, dass der Standort Bernburg-Strenzfeld in Bezug auf das native Vorkommen des Nährstoffs Kalium sehr gut versorgt ist, sodass sich trotz der Versuchsdauer von bisher 27 Jahren kein signifikantes Ergebnis im Vergleich zur Variante ohne K-Düngung hervorheben konnte. Somit werden die Erträge und Qualitäten auf diesem Standort durch eine K-Düngung vor allem stabilisiert und abgesichert. Diese Annahme wird dadurch unterstützt, dass keine typischen Erscheinungsmerkmale einer K-Unterversorgung festgestellt werden konnten (vgl. Abbildungen 2-5). Außerdem konnte wie bereits erläutert auch bei den Zuckerrüben anhand der Na-Gehalte keine Notwendigkeit einer Substitution von K durch Na abgeleitet werden. Demnach ist ein besseres Verständnis der Mechanismen hinter der K-Freisetzung aus Bodenmineralien der Schlüssel zur Entwicklung neuer Ansätze für eine nachhaltige Landwirtschaft, da sich die K-Reserven mit einem Anteil an der Erdkruste von etwa 2,1-2,3 % im Allgemeinen als groß bezeichnen lassen (SCHROEDER, 1978; WEDEPOHL, 1995). Die Nutzung der nicht austauschbaren K-Quellen ist nach CLAASSEN und STEINGROBE (1999) ein wichtiger Faktor für die K-Aufnahmeeffizienz von Kulturpflanzen. Es wird von WANG et al. (2011) berichtet, dass es Unterschiede zwischen den Pflanzenarten oder Genotypen bei der Umwandlung von nicht austauschbarem K in lösliche Formen gibt, sodass sie sich in ihrer Fähigkeit zur Nutzung dieser Ressource voneinander abheben. Nach Versuchen von EL DESSOUGI et al. (2002) konnte gezeigt werden, dass Zuckerrüben bei einem Anbau auf einem K-fixierenden Boden 3-6 mal mehr K je Einheit Wurzellänge aufnehmen können als Weizen oder Gerste. Dies ist nicht nur auf eine effiziente Absorption durch Wurzelmorphologische und -anatomische Unterschiede, sondern auch auf eine bessere Mobilisierung von nicht austauschbarem K durch Wurzelexsudate zurückzuführen.

Zudem wird von SHENG et al. (2020) über die Existenz von Bodenmikroorganismen, welche K aus den Primärmineralien durch Ausscheidung organischer Säuren freisetzen können, berichtet. So konnten eine Reihe von Versuchen unter Laborbedingungen zeigen, dass die Anwendung von damit geimpftem Feldspat im Boden die Löslichkeit und Aufnahme von K um etwa 40-60 % erhöht hat (HAN und SUPANJANI LEE, 2006; BASAK und BISWAS, 2009; ABOU-EL-SEOUD und ABDEL-MEGEED, 2012). Dies könnte in Verbindung mit einer Düngung von K-haltigen Primärmineralien wie Biotit von besonderem Interesse sein (vgl. Abschnitt 2.2.1).

Allerdings ist der Ursprung des K, welches von der Kultur aufgenommen wird und der Beitrag von nicht austauschbarem K an diesem, aufgrund eines Mangels an geeigneten Methoden unter Feldbedingungen äußerst schwer zu ermitteln (ZÖRB et al. 2013). Insgesamt ist es daher für ein optimiertes Management von K-Düngemitteln wichtig, die Faktoren zu verstehen, die die K-Freisetzung aus den Bodenmineralien regulieren, da ähnlich wie bei anderen Nährstoffen die Verbesserung der Effizienz der K-Nutzung entscheidend für die Erhaltung der K-Ressourcen ist. Daher könnte der Einsatz von K-mobilisierenden Bakterienstämmen und die Auswahl bestimmter Pflanzenarten, welche K über Exsudate effizient solubilisieren, beim Anbau in K-begrenzten Gebieten ein großes Potenzial zur Steigerung der Ressourcennutzungseffizienz haben. Solche Gebiete, in denen die Verfügbarkeit von K unzureichend ist, sind zum Beispiel dreiviertel der Reisböden in China und zweidrittel des Weizengürtels in Südaustralien (MENGEL und KIRKBY, 2001; RÖMHELD und KIRKBY, 2010).

7. Schlussfolgerung

In dieser Übersicht werden die Schlussfolgerungen, welche sich aus den Ergebnissen des thematisierten Versuchs und deren Analyse in der anschließenden Diskussion ergeben, über den Einfluss der Kaliumversorgung auf den Ertrag und die Qualität von den verschiedenen landwirtschaftlichen Kulturen zusammengefasst.

- Bei der Düngebedarfsermittlung muss der Verbleib bzw. das Entfernen des Erntekoppelprodukts wie Stroh oder Rübenblatt als N- und K-Quelle berücksichtigt werden. Zudem verbessert eine ausreichende K-Versorgung die Effizienz der N-Düngewirkung und vermindert das Potential für eine Nitratauswaschung, welches im Hinblick auf die aktuelle agrarumweltpolitische Lage immer mehr an Relevanz gewinnt.
- Unter Aussicht des fortschreitenden Klimawandel gewinnt eine ausreichende K-Versorgung durch die Erhöhung der Stresstoleranz der Pflanzen auch immer weiter an Bedeutung, welches anhand des durchgeführten Versuchs bestätigt werden konnte. So wurden trotz schwieriger Witterungsbedingungen, welche von überdurchschnittlich hohen Temperaturen und mangelnden Niederschlägen geprägt waren, gute bis durchschnittliche Erträge erzielt werden.
- Der K-Gehalt im Weizenkorn ist konstant relativ niedrig und könnte zur Ernährungsoptimierung und daraus resultierender gesteigerter Effizienz erhöht werden, da durch den steigenden Verbrauch an verarbeiteten und K-armen Lebensmitteln auf Weizenbasis die tägliche K-Aufnahme vieler Menschen sinkt, wobei K nachweislich viele gesundheitsfördernde Auswirkungen auf den menschlichen Organismus mit sich bringt.
- Da der Fokus beim Anbau von Zuckerrüben auf der Zuckerausbeute liegt, kann eine ausreichende K-Versorgung zur Verbesserung dieser durch Reduzierung des α -Amino-N-Gehalts für eine bessere Wirtschaftlichkeit nur empfohlen werden. Allerdings sind Zuckerrüben durch ihre Fähigkeit zur erhöhten Substitution von K durch Na jedoch nicht so stark auf eine gute K-Versorgung angewiesen wie andere Kulturen, wobei dafür eine ausreichende Na-Versorgung eine Voraussetzung darstellt.
- Bei Kulturen mit einem hohen Mg-Bedarf wie zum Beispiel Mais empfiehlt sich die Anwendung von K-Düngerformen mit Mg als Nebenbestandteil um eine ausreichende Mg-Versorgung und K-Nutzung sicherzustellen.
- Insgesamt konnten durch die K-Düngung in dem durchgeführten Versuch die Erträge der Kulturen und Qualitäten der Ernteprodukte hauptsächlich stabilisiert und abgesichert werden, da der Standort ein ausreichendes natives Bodenvorkommen an K aufweist und sich deshalb zunächst kein starker K-Mangel herbeiführen lässt.
- Der Schlüssel für eine ressourcennutzungseffiziente K-Düngung ist ein besseres Verständnis der Prozesse der K-Freisetzung aus Bodenmineralien. So könnte ein Ansatz, welcher aus vorangegangenen Versuchen hervorgeht, der Anbau von Pflanzen mit einer besseren K-Solubilisierung in Gegenden wie in China und Australien mit einem K-Defizit durch mangelnde K-Verfügbarkeit sein.

8. Zusammenfassung

Anhand der in dieser Arbeit verfassten Auswertung des Kalidüngungsversuchs im Jahr 2019/2020 konnten die in der Zielstellung formulierten Fragestellungen beantwortet werden. So wurden die diskutierten Ertragsparameter wie der Korn- und Strohertrag sowie Qualitätsparameter wie zum Beispiel der Zuckergehalt der untersuchten landwirtschaftlichen Kulturen durch eine K-Düngung gesteigert. Allerdings konnte durch die hohen K-Reserven des Schwarzerdengebiets als Versuchsstandorts keine über die Signifikanzgrenze hinausgehende Optimierung festgestellt werden. Demnach könnte eine erhöhte Auslastung der nicht pflanzenverfügbaren K-Reserven den Düngebedarf verringern und die Ernteleistung insbesondere in Systemen mit geringem Input steigern. Die Möglichkeiten zur Erschließung dieser Ressource bestehen zum Beispiel in einer Einführung von K-mobilisierenden Bakterienstämmen und der Entwicklung von K-effizienteren Genotypen durch konventionelle Züchtung oder gezielte biotechnologische Strategien. Um das Potenzial dieser für die Anwendung in landwirtschaftlichen Produktionssystemen zu bewerten, werden allerdings mehr Studien unter Feldbedingungen benötigt, um die Auswirkung auf die Bodeneigenschaften und das Pflanzenwachstum zu analysieren. Außerdem ist ein möglicher vielversprechender Lösungsansatz die Verbesserung der K-Aufnahme. Dieses Ziel könnte durch die weiterführende Analyse von Wurzelmorphologie und -anatomie, Kinetik der Transporter und Regulierung sowie Freisetzung von Wurzelexsudaten erreicht werden, da es erhebliche Unterschiede zwischen den Pflanzenarten und -sorten diesbezüglich gibt.

Ein weiterer Aspekt zur Steigerung der K-Effizienz ist eine optimierte K-Düngemittelanwendung. Diese spielt vor allem in K-begrenzten Böden eine entscheidende Rolle um die Reaktion der Kulturpflanzen auf Trockenstress durch vorteilhaftere Anpassungs- und Resistenzmechanismen zu verbessern. Allerdings ist die K-Düngemittelversorgung in den Entwicklungsländern der Welt häufig aus wirtschaftlichen Gründen wie der Nichtverfügbarkeit von Düngemitteln oder aufgrund mangelnder Kenntnisse unzureichend. Unter der Voraussicht, dass der Bedarf von K-Düngern besonders in diesen Regionen erheblich zunehmen wird, gewinnt eine optimierte Düngemittelanwendung demnach vor allem dort an Bedeutung. Zudem kann neben der Anpassung der Düngermengen auch ein Verbesserungspotential in der Anwendungstechnik gesehen werden, welche in Zusammenhang mit dem technischen Fortschritt steht.

Alles in allem gibt es also noch viele Ansatzmöglichkeiten zur Steigerung der Effizienz in der heutigen Pflanzenproduktion auf naturwissenschaftlicher Basis. Dabei trägt die Optimierung der Effizienz eines jeden Pflanzennährstoffs insbesondere der Makronährstoffe wie Kalium einen erheblichen Teil dazu bei. Die Durchführung von Dauerdüngungsversuchen ist für den Fortschritt daher unerlässlich, da anhand dieser Aufschluss über solche potentiellen Möglichkeiten geben werden kann. Ob der zukünftig ansteigende Lebensmittel- und Energiebedarf bei gleichzeitiger Verminderung der Flächenkapazität und Erhaltung der Ressourcen gedeckt werden kann, bleibt abzuwarten.

Literaturverzeichnis

- ABOU-EL-SEOUD, I.I. und ABDEL-MEGEED, A., 2012: Impact of rock materials and biofertilizations on P and K availability for maize (*Zea mays*) under calcareous soil conditions, *Saudi Journal of Biological Sciences* 19, S. 55-63
- BASAK, B.B. und BISWAS, D.R., 2009: Influence of potassium solubilizing microorganism (*Bacillus mucilaginosus*) and waste mica on potassium uptake dynamics by sudan grass (*Sorghum vulgare* Pers.) grown under two Alfisols, *Plant and Soil* 317, S. 235-255
- BERGMANN, W., 1986: Farbatlas- Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen, 2. Auflage, VEB Gustav Fischer Verlag Jena, S. 8-13, 72-77
- BÖTTCHER, F., 2012: Die agrarmeteorologische Beschreibung des Standorts Bernburg-Strenzfeld als Managementwerkzeug für optimalen Pflanzenbau, Masterarbeit, Hochschule Anhalt, S. 44, 51
- CAKMAK, I., HENGELER, C., MARSCHNER, H., 1994: Changes in phloem export of sucrose in leaves in response to phosphorus, potassium and magnesium deficiency in bean plants, *Journal of Experimental Botany* 45, Ausgabe 278, S. 1251-1257
- CLAASSEN, N. und STEINGROBE, B., 1999: Mechanistic simulation models for a better understanding of nutrient uptake from soil, In: Rengel Z, editor, *Mineral nutrition of crops, Fundamental mechanisms and implications*, New York: Haworth Press, S. 327-367
- CONTI, T.R. und GEIGER, D.R., 1982: Potassium nutrition and translocation in sugarbeet, *Plant Physiology* 70, S. 168-172
- DATNOFF, L., E., ELMER, W., H., HUBER, D., M., 2007: *Mineral Nutrition and Plant Disease*, S. 15
- DEBRECZENI, K. und KÖRSCHENS, M., 2003: Long-term field experiments of the world, *Archives of Agronomy and Soil Science* 49, S. 465-483
- DEUBEL, A., 2020: Bericht, Kali-Düngungsversuch 2019/2020, Hochschule Anhalt
- DEUTSCHER WETTERDIENST, 2020: Bodenfeuchte - Klassen der Bodenfeuchte in Prozent nutzbarer Feldkapazität (% nFK), https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/dokumentationen/allgemein/bodenfeuchte_karte_doku.html, Zugriff: 22.03.2021
- EL DESSOUGI, H., CLAASSEN, N., STEINGREBE, B., 2002: Potassium efficiency mechanisms of wheat, barley and sugar beet grown on a K fixing soil under controlled conditions, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 165, S. 732-737
- FAO, 2019: *Current world fertilizer trends and outlook to 2022*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome

- FINCK, A., 2007: Pflanzenernährung und Düngung in Stichworten, 6. Auflage, Gebrüder Borntraeger, S. 8-9
- FLIEßBACH A., OBERHOLZER, H.R., GUNST, L., MÄDER, P., 2007: Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming, *Agriculture, Ecosystems & Environment* 188, S. 273-284
- GIAQUINTA, R.T., 1983: Phloem loading of sucrose, *Annual Review of Plant Physiology* 34, S. 347-387
- GILLE, S., DEUBEL, A., ORZESSEK, D., 2020: Versuchsfeldführer 2020, Hochschule Anhalt, S. 6-9, 62-66
- GRIMME, H., 1978: Wurzelsystem und Nährstoffanlieferung, *Kali Briefe* 14
- HAEDER, H. E., 1980: Effect of potassium nutrition on sink intensity and duration, *Physiological Aspects of Crop Productivity*, Intern. Kali Inst., Bern, Switzerland, S. 185-194
- HAEDER, H.E und MENGEL, K., 1972: Translocation and respiration of assimilates in tomato p plants as influenced by K nutrition, *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 131, S. 139-48
- HAN, H.S. und SUPANJANI LEE, K.D., 2006: Effect of co-inoculation with phosphate and potassium solubilizing bacteria on mineral uptake and growth of pepper and cucumber, *Plant Soil Environ* 52, S. 130-136
- HARTT, C.E., 1969: Effect of potassium deficiency upon translocation of ¹⁴C in attached blades and entire plants of sugarcane, *Plant Physiology* 44, S. 1461-1469
- HAYAISHI, H. und CHINO, M., 1990: Chemical composition of phloem sap from the uppermost internode of the rice plant, *Plant Cell Physiology* 134, S. 308-315
- HE, F.J. und MACGREGOR, G.A., 2008: Beneficial effects of potassium on human health, *Physiologia Plantarum* 133, S. 725–735
- HOFFMANN, C., 2002: Amino-N als Komponente des Schädlichen Stickstoffs in Zuckerrübensorten, *VDLUFA-Schriftenreihe* 58, S. 691-693
- HU, Y. und SCHMIDHALTER, U., 2005: Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168, S. 541-549
- HUBER, S.C. und MORELAND, D.E., 1981: Co-transport of potassium and sugars across the plasmalemma of mesophyll protoplasts, *Plant Physiology* 67, S. 163-169
- IVA, 2019: Kalium - Baustein für eine nachhaltige Ertragsentwicklung, Industrieverband Agrar e. V. (IVA) in Zusammenarbeit mit Bundesarbeitskreis Düngung (BAD), S. 16, 40

- KAUPENJOHANN, M., 2018: Bodenphysikalische Kenngrößen im Pflanzenbau, Faustzahlen für die Landwirtschaft, KTBL, 15. Auflage, S. 371
- KALI-AKADEMIE, 2019: Nährstoffwechselwirkungen am Beispiel Kalium und Magnesium, K+S Minerals and Agriculture GmbH, Zugriff: 11.02.2021, http://www.ks-minerals-and-agriculture.com/dede/fertiliser/advisory_service/kali-akademie/naehrstoffwechselwirkungen.html
- KLOPEFER, F., 2018: Saatzucht und Saat, Faustzahlen für die Landwirtschaft, KTBL, 15. Auflage, S. 523-533
- KWS, o.D.: Maßnahmen gegen das Schadbild -Magnesiummangel, KWS Saat SE & Co. KGaA, <https://www.kws.com/de/de/beratung/bestandesfuehrung/krankheiten/magnesiummangel/>, Zugriff: 22.03.2021
- LLG, 2021: Empfehlung N_{\min} gem. § 4 Absatz 4 1b Düngeverordnung, Sachsen-Anhalt, Zugriff: 06.03.2021, https://llg.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLU/LLFG/Dokumente/04_t_hemen/pfl_ernaehr_duengung/nmin_riwe_empf/21-08KW_Nmin-Richtwerte_1.pdf
- LÖFFLER, S., MATTHES, S., BINDER, D., STEPHAN, S., WINKLER, S., KABRODT, K., GOTTSTEIN, H.-D., 2018: Bachelor - Landwirtschaft, Methodische Anleitung zum Agrochemischen Praktikum, S. 56-58
- LORENZ, F., MAIDL, F.X., KLOEPFER, F., 2018: Feldfruchtbau, Faustzahlen für die Landwirtschaft, KTBL, 15. Auflage, S. 547-588
- MAATHIUS, F.J.M. und SANDERS, D., 1996: Mechanisms of potassium absorption by higher plant roots, *Physiologia Plantarum* 96, S. 158-168
- MARSCHNER, H., 1995: Mineral Nutrition of Higher Plants, Academic Press, London
- MENGEL K. 1980: Effect of potassium on the assimilate conduction to storage tissue, *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft* 93, S. 353-362
- MENGEL, K., 2007: Potassium, In: Barker, A. und Pilbeam, D. (2007): *Handbook of Plant Nutrition*, Taylor & Francis Group, London, New York
- MENGEL, K. und ARNEKE, W.-W., 1982: Effect of potassium on the water potential, the pressure potential, the osmotic potential and cell elongation in leaves of *Phaseolus vulgaris*, *Physiologia Plantarum* 54, S. 402-408
- MENGEL, K. und KIRKBY, E.A., 2001: *Principles of plant nutrition*, Dordrecht, NL: Kluwer Academic Publishers
- MENGEL, K. und VIRO, M., 1974: Effect of potassium supply on the transport of photosynthates to the fruits of tomatoes (*Lycopersicon esculentum*), *Physiologia Plantarum* 30, S. 295-300

- MERBACH, W., GARZ, J., SCHLIEPHAKE, W., STUMPE, H., SCHMIDT, L., 2000: The long-term fertilization experiments in Halle (Saale), Germany - introduction and survey, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 163, S. 629-638
- MIX, G. und MARSCHNER, H., 1974: Mineralstoffverteilung zwischen Chloroplasten und übrigen Blattgewebe, *Zeitschrift Pflanzenphysiologie* 73, S. 307-312
- MUNK, K., 2000: *Biochemie - Zellbioökologie - Ökologie - Evolution*, Spektrum Akademischer Verlag GmbH, 1. Auflage, Heidelberg, Berlin
- ÖBORN I., ANDRIST-RANGEL Y., ASKEKAARD M., GRANT C.A., WATSON C.A., EDWARDS A.C., 2005: Critical aspects of potassium management in agricultural systems, *Soil Use Manage* 21, S. 102-112
- OECKING, C., 2002: Die Protonenpumpe der pflanzlichen Zellmembran, Zentrum für Molekularbiologie der Pflanzen, Universität Tübingen, BIOSpektrum, Heft Nummer 1, S. 27
- RADER, L.F., 1943: *Soil Science* 55, 210-218. Zit. im *Western Fertilizer Handbook*, 5. Auflage 1975, California Fertilizer Association, The Interstate Printers & Publishers Inc., Danville, Illinois
- RASMUSSEN, P.E., GOULDING, K.W.T., BROWN, J.R., GRACE, P.R., JANZEN, H.H., KÖRSCHENS, M., 1998: Long-term agroecosystem experiments: assessing agricultural sustainability and goal change, *Science* 282, S. 893-896
- REEB, D., 1010: Einfluss der Kaliumdüngung auf das Wachstum und die Wassernutzungseffizienz von Ackerbohne (*Vicia faba*), Sommerweizen (*Triticum aestivum*) und Tomate (*Solanum lycopersicum*) unter Kontroll-, Trockenstress- bzw. Salinitätsbedingungen, Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen, S. 7
- RICHTER, C., 2005: *Agrikulturchemie und Pflanzenernährung*, Margraf Publishers, Roßdorf, S. 257-269, 378
- RICHTER (Jr.), D., HOFMOCKEL, M., CALLHAM (Jr.), MAC A., POWLSON, D.S., SMITH, v.P., 2007: Long-term soil experiments: key to managing earth's rapidly changing ecosystems, *Soil Science Society of America Journal* 71, S. 266-279
- RÖMHELD, V. und KIRKBY, E.A., 2010: Research on potassium in agriculture: needs and prospects, *Plant and Soil* 335, S. 155-180
- ROTHER, B., 1998: Die technische Qualität der Zuckerrübe unter dem Einfluss verschiedener Anbaufaktoren, Dissertationen, Cuvillier Verlag Göttingen
- SCHACHTSCHABEL, P., 1985: Beziehung zwischen dem durch K-Düngung erzielbaren Mehrertrag und dem K-Gehalt der Böden nach Feldversuchen in der Bundesrepublik Deutschland, *Zeitschrift Pflanzenernährung und Bodenkunde* 148, S. 439-458

- SCHEFFER, F. und SCHACHTSCHABEL, P., 1010: Lehrbuch der Bodenkunde, 16. Auflage, Spektrum, S. 321, 400, 423-426
- SCHILLING, G., 2000: Pflanzenernährung und Düngung, Ulmer, Stuttgart, S. 148-149, 266-268, 356-359
- SCHROEDER, D., 1978: Structure and weathering of potassium containing minerals, In: Proc. 11th Congr. International Potash Institute
- SCHUBERT, S., 2006: Pflanzenernährung - Grundwissen Bachelor, 2. Auflage, Ulmer, Stuttgart, S. 11-13, 30-47, 170-209
- SHENG, X.F., 2005: Growth promotion and increased potassium uptake of cotton and rape by a releasing strain of *Bacillus edaphicus*, *Soil Biology and Biochemistry* 37, Ausgabe 10, S. 1918-1922
- SHENG, X.F., HE, L.Y., HUANG, W.Y., 2002: The conditions of releasing potassium by a silicate-dissolving bacterial strain NBT, *Agricultural Sciences in China* 1, S. 662-666
- SPARKS, D.L., 1987: Potassium Dynamics in Soils, *Advances in Soil Science* 6, S. 1-63
- VDLUFA, 1999: Standpunkt, Kalium-Düngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf, Richtwerte für die Gehaltsklasse C, Bearbeiter: Baumgärtel, G., Fruchtenicht, K., Hege, U., Heyn, J., Orlovius, K., Darmstadt
- VON BRAUN, J., 2018: Wie ernähren wir 9 Milliarden Menschen?, Ausgabe 01.2018, f3 farm. food. future, S. 65
- WAKEEL, A., 2013: Potassium-sodium interactions in soil and plant under saline-sodic conditions, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 176, S. 34
- WAKEEL, A., STEFFENS, D., SCHUBERT, S., 1010: Potassium substitution by sodium in sugar beet (*Beta vulgaris*) nutrition on K-fixing soils, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 173, S. 127-134
- WANG, H.Y., SHEN, Q.H., ZHOU, J.M., WANG, J., DU, C.W., CHEN, X.Q., 2011: Plants use alternative strategies to utilize nonexchangeable potassium in minerals, *Plant and Soil* 343, S. 209-220
- WEDEPOHL, K.H., 1995: The composition of the continental crust, *Geochimica et Cosmochimica* 59, S. 1217-1232
- WHITE, P.J., 2013: Improving potassium acquisition and utilization by crop plants, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 176, S. 305-316
- ZÖRB, C., SENBAYRAM, M., PEITER, E., 2013: Potassium in agriculture - Status and perspectives, *Journal of Plant Physiology* 171, Ausgabe 9, S. 656-669

Anhang

	Wintergerste a5	Winterweizen a4	Sommergerste a2	Silomais a3	Zuckerrüben a1
<u>Stoppbearbeitung</u>	30.07.19 Scheibenegge	30.08.19 Mulcher + Scheibenegge	30.10.19 Scheibenegge	30.07.19 Scheibenegge 25.09.19 Scheibenegge 30.10.19 Scheibenegge	12.07.19 Scheibenegge 01.10.19 Scheibenegge
<u>Saatbettbereitung</u>	06.09.20 Pflug + Packer 06.09.19 Feingrubber	17.09.19 Pflug + Packer, Feingrubber 12.10.19 Feingrubber	06.11.19 Pflug + Packer 07.11.19 Feingrubber	06.11.19 Pflug + Packer 07.11.19 Feingrubber	06.11.19 Pflug + Packer 07.11.19 Feingrubber
<u>Aussaat:</u>					
Termin	20.09.19 Drillmaschine	14.10.19 Drillmaschine	17.03.20 Drillmaschine	21.04.20 Einzelkornsaat	07.04.20 Einzelkornsaat, ED Contour
Menge	300 Kö/m ²	350 Kö/m ²	320 Kö/m ²	9,2 Kö/m ²	11,1 Kö/m ²
Reihenweite	12,5 cm	12,5 cm	12,5 cm	75 x 14,5 cm	45 x 20 cm
Sorte	SU Jule	Asory (A)	Fandaga	Fablano	Lunella
<u>Aufgang</u>	28.09.19	22.10.19			
<u>Düngung</u>					
P+K-Düngung	04.09.19	17.09.19	05.11.19	05.11.19	29.10.9
N-Düngung	05.03.20 80 kg N Harnst. Stabur 07.04.20 80 kg N Harnst. Stabur 20.05.20 40 kg N KAS	05.03.20 80 kg N Harnst. Stabur 07.04.20 80 kg N Harnst. Stabur 20.05.20 60 kg N KAS	07.04.20 50 kg N Harnstoff Stabur	22.04.20 100 kg N AHL	07.04.20 120 kg N Harnstoff Stabur
<u>Pflanzenschutz</u>					
Herbizide	15.10.20 2,0 l Picona + 0,35 l Cadou	28.10.20 2,0 l Picona + 0,35 l Cadou 18.03.20 1,0 l Omnera + 0,9 l Axial	27.04.20 70 g Biathlon 4D + 1,0 l Dash + 1,0 l Ariane C 19.05.20 0,9 l Tomigan 200 + 50 g Pointer Plus	19.05.20 1,25 l Dual Gold + 1,5 l Calaris	29.04.20 1. NAK 1,5 l Goltix Titan + 1,0 l Betanal maxx Pro 08.05.20 11. NAK 1,5 l Goltix Titan + 1,0 l Betanal maxx Pro 27.05.20 11. NAK 1,5 l Goltix Titan + 1,0 l Betanal maxx Pro
Fungizide	04.05.20 0,8 l Champion + 0,8 l Diamant	04.05.20 0,8 l Champion + 0,8 l Diamant 08.06.20 0,5 l Prosaero			
Insektizide	15.10.20 75 ml Karate Zeon	28.10.20 75 ml Karate Zeon 08.06.20 75 ml Karate Zeon			30.04.20 0,075 l Karate Zeon 29.05.20 0,14 l Tippikei
Halmstabilisatoren	06.04.20 0,4 l Camposan 23.04.20 0,4 l Moddus	06.04.20 1,0 l CCC 720			
<u>Ernte</u>	06.07.20 Korn + Stroh	23.07.20 Korn + Stroh	29.07.20 Korn + Stroh	02.09.2020 komplette Ernte	06.10.2020 Handrodung 9m ²

Anhang 1: Übersicht Kalidüngungsversuch 2019/2020 - durchgeführte Arbeiten (DEUBEL, 2020)

Selbstständigkeitserklärung

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

Bernburg, den 25.03.2021

Unterschrift Leya Fröhlich

.....