

**„Einfluss von Saatstärke, Stickstoff- und Kaliumdüngung auf Ertrag und Qualität bei Winterweizen (*Triticum aestivum*) und Winterraps (*Brassica napus*) unter Trockenstress“**



Matthias Desaga

**DISSERTATION**

zur Erlangung des Doktorgrades der Agrarwissenschaften im Fachbereich 09  
Agrarwissenschaften, Ökotoxikologie und Umweltmanagement der  
Justus-Liebig-Universität Gießen

Aus dem Institut für Pflanzenernährung der  
Justus-Liebig-Universität Gießen

Professor Dr. Sven Schubert

**„Einfluss von Saatstärke, Stickstoff- und  
Kaliumdüngung auf Ertrag und Qualität bei  
Winterweizen (*Triticum aestivum*) und Winterraps  
(*Brassica napus*) unter Trockenstress“**

**Dissertation**

zur Erlangung des Doktorgrades der Agrarwissenschaften (Dr. agr.) im  
Fachbereich 09 Agrarwissenschaften, Ökotoxikologie und  
Umweltmanagement der  
Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von

Matthias Wolfgang Desaga

im März 2023

Fachbereich Agrarwissenschaften,  
Ökotoxikologie und Umweltmanagement der  
Justus-Liebig-Universität Gießen

Prüfungskommission:

1. Vorsitzende(r): Prof. Dr. Aurbacher
2. Gutachter(in): Prof. Dr. Sven Schubert
3. Gutachter(in): Prof. Dr. Matthias Frisch
4. Prüfer(in): Prof. Dr. Santner
5. Prüfer(in): Prof. Dr. Frei

Tag der Disputation: 28.06.2023

**Inhalt**

<b>1. <u>Einleitung</u></b>	<b>1</b>
1.1. Wasserpotential in Pflanze und Boden	2
1.2. Wasserhaushaltsgrößen, Wasserbilanz und effektiver Wurzelraum	3
1.3. Wirkung von Trockenstress auf den Pflanzenertrag	7
1.4. Kalium als Pflanzennährstoff	8
1.5. Einfluss der Saatstärke auf Kulturpflanzenbestände	13
1.6. Stickstoff als Pflanzennährstoff	14
1.7. Ziel der vorliegenden Arbeit	16
<b>2. <u>Material und Methoden</u></b>	<b>18</b>
2.1. Der Versuchsstandort	18
2.2. Die Versuchsanlage	18
2.3. Aussaat- und Düngepläne	23
2.4. Erfasste Versuchsparemeter	26
2.4.1. Bodenanalytik	26
2.4.1.1. pH-Wert	27
2.4.1.2. P- und K-Konzentration	27
2.4.1.3. Mg-Konzentration	28
2.4.1.4. N <sub>min</sub> -Wert	29
2.4.1.5. Kationenaustauschkapazität	29
2.4.1.6. Organische Substanz	30
2.4.1.7. Korngrößenfraktionierung	30
2.4.1.8. Trockenrohichte und Skelettanteil	31
2.4.1.9. Verfügbare Feldkapazität	31
2.4.2. Wetterdaten	32
2.4.3. Bonituren am Parzellenversuch	32
2.4.4. Pflanzenanalytik Weizen	33
2.4.5. Ertrags- und Qualitätsparameter bei Weizen	34
2.4.5.1. Fallzahl	35
2.4.5.2. Rohproteinkonzentration und Rohproteinertrag	35

2.4.6.	Ertrags- und Qualitätsparameter bei Raps	36
2.4.6.1.	Ölkonzentration und Ölertrag	36
2.4.7.	Evapotranspiration, Bodenfeuchte und Wassernutzungseffizienz	37
2.4.7.1.	Simulation der Bodenfeuchte und Wassernutzungseffizienz	38
2.5.	Statistische Auswertung	40
<b>3.</b>	<b><u>Ergebnisse</u></b>	<b><u>42</u></b>
3.1.	Bodenanalytik	42
3.2.	Wetterdaten	49
3.3.	Evapotranspiration, Bodenfeuchte und WUE	54
3.3.1.	Evapotranspiration und Bodenfeuchte Weizen	54
3.3.2.	Wassernutzungseffizienz Weizen	58
3.3.3.	Evapotranspiration und Bodenfeuchte Raps	61
3.3.4.	Wassernutzungseffizienz Raps	64
3.4.	Pflanzenanalytik	67
3.5.	Ernteergebnisse Weizen	71
3.5.1.	Qualitätsparameter Weizen	81
3.6.	Ernteergebnisse Raps	91
3.6.1.	Qualitätsparameter Raps	100
<b>4.</b>	<b><u>Diskussion</u></b>	<b><u>105</u></b>
4.1.	Die Trockenstressintensität variierte zwischen den Versuchsjahren	105
4.2.	Kaliumdüngung: Hohe Erträge und Qualitäten durch effiziente Wassernutzung	108
4.3.	Saatstärkenvariation wirkte auf Weizen und Raps unterschiedlich	118
4.4.	Stickstoffdüngung sicherte Erträge und Qualitäten	123

<b>5.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>130</b>
<b>6.</b>	<b>Summary</b>	<b>133</b>
<b>7.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>135</b>
<b>8.</b>	<b>Lebenslauf</b>	<b>143</b>
<b>9.</b>	<b>Danksagung</b>	<b>144</b>
<b>10.</b>	<b>Eidesstattliche Erklärung</b>	<b>145</b>

## 1. Einleitung

Wasser ist wesentlicher Bestandteil aller Pflanzen und Voraussetzung für pflanzliches Wachstum. Neben seiner quantitativ geringen Bedeutung als Konstitutionswasser, welches in der Pflanze verbleibt und dort diverse biochemische und physikalische Funktionen übernimmt, wird es überwiegend als Transpirationswasser über die Blätter an die Atmosphäre abgegeben (Schubert 2006).

Die Fixierung von  $\text{CO}_2$  im Rahmen der Photosynthese und damit die autotrophe Bildung von Biomasse durch Pflanzen sind dabei untrennbar mit Wasserabgabe durch Transpiration verbunden. Die Photosynthese ist ein Spagat zwischen ausreichender Fixierung von  $\text{CO}_2$  und dem zwanghaft damit verbundenem Verlust von Wasser; sie ist Voraussetzung pflanzlichen Wachstums und damit wesentliche Grundlage unseres Ökosystems (Ehlers 1996).

In Regionen der Erde, in denen die Wasserverfügbarkeit häufig das pflanzliche Wachstum begrenzt, gibt es Pflanzenarten mit einer effizienteren  $\text{CO}_2$ -Fixierung als unsere heimischen  $\text{C}_3$ -Pflanzen. Dabei handelt es sich um die sogenannten  $\text{C}_4$ -Pflanzen wie etwa Mais (*Zea mays*) oder Zuckerrohr (*Saccharum officinarum*) beziehungsweise CAM-Pflanzen (Crassulacean acid metabolism) wie Ananas (*Ananas comosus*). Der Wasserverlust je Einheit assimilierten  $\text{CO}_2$  ist bei diesen Pflanzen geringer als bei unseren heimischen  $\text{C}_3$ -Pflanzen (Campbell und Reece 2006). Dieser weit verbreitete Anpassungsmechanismus von Pflanzen an eine knappe Wasserversorgung lässt die begrenzte Wasserverfügbarkeit vielerorts erahnen.

Da die meisten Pflanzen (lediglich Sukkulenten stellen eine Ausnahme dar) nicht in der Lage sind, gemessen an ihrem Wasserverbrauch größere Wassermengen zu speichern, setzt der Vorgang der steten Wasserabgabe in Form von Transpiration eine stete Wasseraufnahme voraus (Ehlers 1996). Dies bedeutet, dass landwirtschaftliche Kulturpflanzenbestände auf ausreichende Wasserversorgung durch pflanzenverfügbaren Bodenwasservorrat angewiesen sind, um den Aufbau pflanzeneigener Primärprodukte betreiben zu können.

In Anbetracht der unterschiedlich hohen Wasserspeicherfähigkeit landwirtschaftlich genutzter Böden und ungleichmäßig verteilter Niederschläge verwundert es nicht, dass Trockenstress global ein limitierender Faktor vor allem in Regionen mit aridem und semiaridem Klima für die pflanzliche Produktion ist (Cattivelli et al. 2008). Aber auch in dem humiden Klima

Mitteleuropas und Teilen der Bundesrepublik Deutschland kommt es regelmäßig zu Trockenstress.

Dabei kann Trockenstress Erträge quantitativ und qualitativ begrenzen, die Effizienz des Produktionsmitteleinsatzes mindern und sogar zu Totalausfällen des Erntegutes führen. Um das Phänomen Trockenstress für Pflanzen zu verstehen, ist das Konzept des Wasserpotentials hilfreich.

### **1.1. Wasserpotential in Pflanze und Boden**

Die Bewegung von Wasser im Boden und in der Pflanze wird über das Konzept des Wasserpotentials beschrieben. Dieses wurde in den 1960er Jahren maßgeblich von Slatyer und Taylor geprägt. Das Wasserpotential beschreibt dabei die Kraft, die notwendig ist, um ein definiertes Wasservolumen von einem gegebenen Punkt eines Kraftfeldes zu einem anderen zu transportieren (Schubert 2006). Das Wasserpotential hat dabei die physikalische Druckeinheit MPa (1 bar = 0,1 MPa) und besteht aus mehreren Teilpotentialen: Dem Gravitationspotential, dem Matrixpotential, dem osmotischen Potential und dem Druckpotential (Ehlers 1996).

Die Bewegung von Wasser im Boden beziehungsweise dessen Aufnahme aus dem Boden durch Pflanzenwurzeln erfolgt immer vom Ort eines höheren zum Ort eines niedrigeren Wasserpotentials. Freies Wasser hat ein Wasserpotential von Null. Wird das Wasser in seiner freien Beweglichkeit reduziert, so nimmt das Wasserpotential negative Werte an (Kuntze et al. 1994). Im Boden setzt sich das Wasserpotential im Wesentlichen aus dem Matrixpotential, dem Gravitationspotential und dem osmotischen Potential zusammen (Ehlers 1996). Das Matrixpotential, welches stets negativ ist, beschreibt dabei die reduzierte Beweglichkeit von Wasser im Boden durch Adsorption an Bodenteilchen. Je feiner die Körnung des Bodens, umso stärker negativ kann das Matrixpotential sein. Das Gravitationspotential beschreibt die notwendige Energie, um das Wasser aus dem Boden aufwärts zu heben. Auch das osmotische Potential kann für die Wasserbewegung im Boden wichtig sein. Es beschreibt die reduzierte Beweglichkeit von Wasser durch Ionen in der Bodenlösung und ist besonders in salinen Böden von Bedeutung (Kuntze et al. 1994).

Je weniger Wasser im Porenraum des Bodens gespeichert ist, umso stärker negativ wird das Wasserpotential des Bodens. Die Pflanzen müssen also ihrerseits das Wasserpotential absenken, um Wasser aufzunehmen. Die Aufnahme von Wasser in die Wurzelzellen wird erst dadurch möglich, dass in den Wurzelzellen ein niedrigeres Wasserpotential herrscht als in dem

anliegenden Boden. Dies erreichen Pflanzen durch die Verlagerung osmotisch aktiver Substanzen wie Ionen und Zucker (Ehlers 1996).

Innerhalb der Pflanze wird der Wassertransport durch das durch Ionen und weitere osmotisch wirksame Verbindungen hergestellte negative osmotische Potential und dem das Potential erhöhenden Turgor gesteuert. Der Turgor wirkt dabei erhöhend auf das Wasserpotential, da er Druck auf die Zellwände ausübt (Mengel 1991). Eine effiziente Möglichkeit zum Wassertransport durch biologische Membranen sind Aquaporine. Dabei handelt es sich um spezifische in den biologischen Membranen vorhandene Wasserkanäle, die neben der Diffusion zum Wassertransport durch die Membranen beitragen (Schubert 2006). Unsere Kulturpflanzen sind nur bis zu einem gewissen Punkt befähigt, ihr Wasserpotential abzusenken und sich damit Wasser aus dem Boden anzueignen.

Die meisten Kulturpflanzen beginnen ab einem Wasserpotential von -1,5 MPa zu welken, da das Wasserpotential in den Wurzelzellen nicht unter -1,5 MPa gesenkt werden kann (Schubert 2006). Bereits deutlich vor dem Einsetzen von Welkesymptomen aber, sind diverse physiologische Prozesse und damit das pflanzliche Wachstum bereits gehemmt (Brunold et al. 1996).

Daher ist eine Prognose der Wasserverfügbarkeit für Kulturpflanzenbestände anhand von Wasserbilanzen von großer Bedeutung.

### **1.2. Wasserhaushaltsgrößen, Wasserbilanz und effektiver Wurzelraum**

Auf Standorten, an denen kein kapillarer Aufstieg von Grundwasser zur Wasserversorgung der Kulturpflanzenbestände beiträgt, muss der gesamte Wasserbedarf über Niederschlagswasser, welches im Porenraum des Bodens gespeichert werden kann, gedeckt werden (Ehlers 1996). In diesem Falle lautet die Wasserhaushaltsgleichung unter Ausschluss von oberflächlichem Wasserabfluss für einen ebenen und mit Pflanzen bewachsenen Boden nach Ehlers (verändert nach Ehlers 1996):

$N - E - T - I - S =$  Veränderung des Bodenwasservorrates.

N = Niederschlag

E = Evaporation

T = Transpiration

I = Interzeptionsverdunstung

S = Versickerung

Evaporation ist die Verdunstung von Wasser von einer feuchten Bodenoberfläche. Die Evaporation wird häufig als „unproduktive Verdunstung“ bezeichnet. Im Gegensatz zur Transpiration geht mit der Evaporation keine Primärproduktion einher. Voraussetzung für die Evaporation sind neben feuchtem Boden Strahlung, Dampfdruckgefälle und Konvektion. Durch Beschattung des Bodens, etwa durch die Blattfläche von Pflanzen, kann die Strahlung auf den Boden und damit die mögliche Evaporation reduziert werden (Ehlers 1996). Transpiration ist die dampfförmige Abgabe von Wasser in die Atmosphäre über die Blätter von Pflanzen (Schubert 2006). Rund 95% der Transpiration erfolgt über die Stomata, lediglich ein nahezu vernachlässigbarer Anteil des Wassers verlässt die Pflanze durch kutikuläre Transpiration (Ehlers 1996). Dies lässt sich über die hohe Impermeabilität der Kutikula gegenüber Wasser erklären, welche einen effektiven Schutz gegen unproduktive Wasserabgabe aus dem Blatt bietet (Brunold et al. 1996).

Aus der Evapotranspiration stellt die Transpiration im Gegensatz zur Evaporation den „produktiven Wasserverbrauch“ dar, da im Rahmen der Transpiration  $\text{CO}_2$  durch die Stomata in die Pflanzen aufgenommen werden kann. Die transpirierte Wassermenge eines Pflanzenbestandes hängt ab von dem für die Pflanzen verfügbaren Bodenwassergehalt und maßgeblich vom Blattflächenindex (LAI). Der Blattflächenindex beschreibt das Verhältnis von einseitiger Blattoberfläche zur Bodenoberfläche. Die maximalen Transpirationsraten erreichen unsere Kulturpflanzen meist zeitgleich mit ihrem maximalen Blattflächenindex (Ehlers 1996).

Die Interzeptionsverdunstung ist die Verdunstung von Wasser auf Blattoberflächen. Dabei kann Wasser nach Tau- oder Niederschlagsereignissen direkt von der Blattoberfläche verdunsten und steht damit dem Aufbau des Bodenwasservorrats nicht mehr zur Verfügung (Löpmeier 1994).

Versickerung tritt bei Überschreiten der Feldkapazität ( $pF$  2,0) auf. Als Feldkapazität (FK) wird der Wassergehalt bezeichnet, den ein Boden zwei Tage nach Wassersättigung gegen die Schwerkraft halten kann (Kuntze et al. 1994).

Abbildung 1 belegt, dass weite Teile der Bundesrepublik Deutschland für den Zeitraum 01.03.2022 bis 31.05.2022 eine deutlich negative Wasserbilanz aufwiesen. Besonders stark betroffen waren Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Mecklenburg-Vorpommern sowie Teile Niedersachsens und Sachsens. In diesen Regionen kommt es sehr regelmäßig zu negativen Wasserbilanzen im Frühjahr. Wenn in einem definierten Zeitraum die Evapotranspiration die Niederschläge übersteigt, entsteht eine negative Wasserbilanz. Unter dem

Begriff der Evapotranspiration werden Evaporation, Transpiration und häufig auch Interzeptionsverdunstung zusammengefasst (Ehlers 1996). Allein das Vorliegen einer negativen Wasserbilanz lässt noch keinen Rückschluss auf das Auftreten von Trockenstress zu. Dafür wird noch der Parameter der nutzbaren Feldkapazität (nFK) benötigt. Die Feldkapazität wird dabei noch um das nicht pflanzenverfügbare Wasser am permanenten Welkepunkt (pF 4,2) bereinigt. Dieses Wasser ist ob seiner starken Bindung im Boden nicht pflanzenverfügbar und wird auch „Totwasser“ genannt; je höher der Tonanteil eines Bodens umso höher dessen Totwasseranteil an der Feldkapazität (Kuntze et al. 1994). Die nutzbare Feldkapazität gibt also Auskunft über das für pflanzliches Wachstum zur Verfügung stehende Bodenwasser in einem definierten Bodenvolumen.

Klimatische Wasserbilanz 01.03.2022 – 31.05.2022

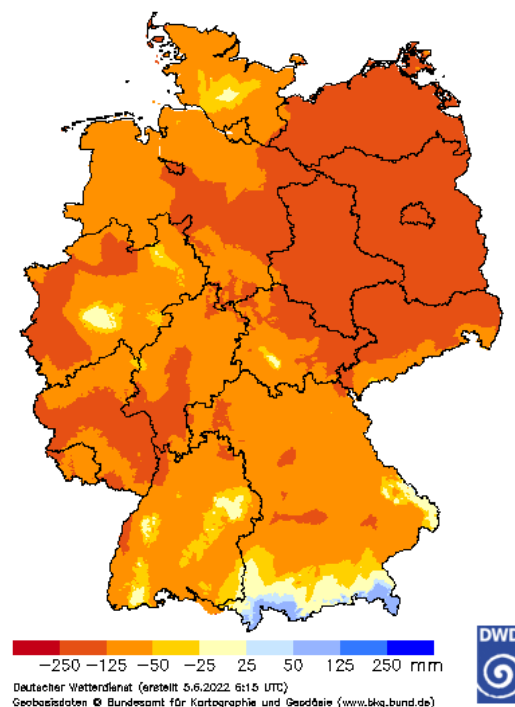


Abbildung 1: Wasserbilanzen in der BRD für den Zeitraum 01.03.2022 bis zum 31.05.2022 (DWD 2022).

Bei Kenntnis der nutzbaren Feldkapazität  $\text{dm}^{-1}$  Boden und der Durchwurzelungstiefe am Standort lässt sich der für die Pflanzen verfügbare Bodenwasservorrat errechnen. Dazu dient das Konzept der verfügbaren Feldkapazität (vFK): Die verfügbare Feldkapazität ergibt sich als Produkt aus der nutzbaren Feldkapazität  $\text{dm}^{-1}$  Boden und der Durchwurzelungstiefe; sie ist stets kleiner als die nutzbare Feldkapazität (Kuntze et al. 1994). Bei einem

vielerorts anzutreffenden effektiven Wurzelraum von lediglich sechs dm Tiefe auf Sandböden und einer nutzbaren Feldkapazität von  $10\text{-}20\text{ mm dm}^{-1}$  Boden, ergibt sich eine verfügbare Feldkapazität von lediglich  $60\text{-}120\text{ mm}$  Wasser (Ehlers 1996).

Das Konzept des effektiven Wurzelraumes nach Renger und Strebel zeigt Abbildung 2. Der effektive Wurzelraum beschreibt nicht die maximale Ausdehnung des Wurzelwerks von Pflanzen, sondern das Bodenvolumen welches maßgeblich durch pflanzliches Wachstum in trockenen Jahren wasserentleert wird. Neben Bodenart und Lagerungsdichte des Bodens finden pflanzenartsspezifische Parameter Eingang. Das Konzept beruht auf der Betrachtung der Bodenwasserverteilung im Herbst nach einem niederschlagsarmen Sommer.

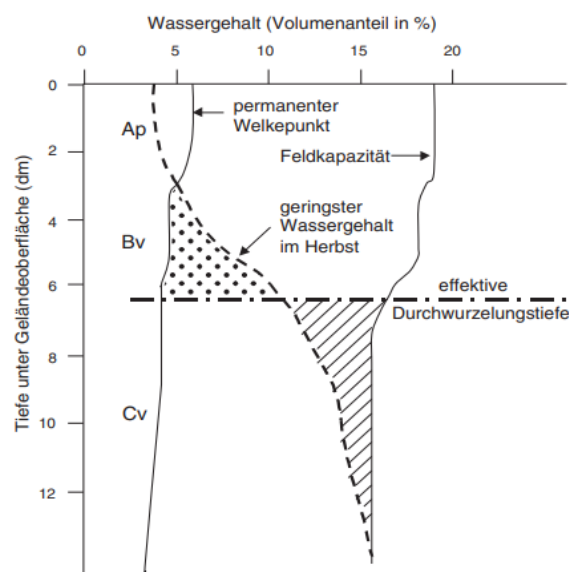


Abbildung 2: Modell des effektiven Wurzelraumes (Renger und Strebel 1980).

Bei etwa 6 dm Bodentiefe markiert die gestrichelte Linie die errechnete effektive Durchwurzelungstiefe. Die Spitze der schraffierten Fläche unterhalb der effektiven Durchwurzelungstiefe markiert die Wasserscheide, welche im Vegetationsverlauf stetig tiefer wandert; dort beträgt die nFK 100%. Oberhalb dieser Wasserscheide kommt es im Vegetationsverlauf zur Entleerung des Bodenwasservorrates durch Wasseraufnahme, unterhalb derer zur Bildung von Sickerwasser. Die Tiefe des effektiven Wurzelraumes ergibt sich aus der Differenz des aktuellen Bodenwassergehalts im Herbst eines trockenen Jahres und dem permanenten Welkepunkt (gepunktete Fläche), sowie der Feldkapazität und dem aktuellen Bodenwassergehalt (schraffierte Fläche). Die gepunktete und die schraffierte Fläche entsprechen sich in ihrem

Wasservolumen. Tatsächlich wird Wasser auch unterhalb der effektiven Durchwurzelungstiefe durch den Pflanzenbestand aufgenommen. Diese Wassermenge findet rechnerischen Eingang, wodurch das Konzept des effektiven Wurzelraumes gut anwendbar wird. Die Wasseraufnahme aus einzelnen Bodenschichten, zumeist wird aus den flacheren Bodenschichten bis 30 cm Bodentiefe ein Großteil des Gesamtwasserverbrauchs gedeckt, bleibt in dem Modell unberücksichtigt. Es betrachtet die verfügbare Feldkapazität lediglich über den gesamten effektiven Wurzelraum. Für Sandstandorte ergeben sich in Abhängigkeit von Kultur und Lagerungsdichte des Standortes zumeist effektive Wurzelräume von 6-9 dm Boden (Kuntze et al. 1994).

Eine Einschränkung der pflanzlichen Biomasseproduktion tritt bei vielen Pflanzenarten in Phasen hoher Transpirationsraten bereits bei Unterschreiten von 30% verfügbarer Feldkapazität ein. Bei den für Sandstandorte angesprochenen verfügbaren Feldkapazitäten von nur 120 mm bedeutet dies, dass bei täglichen Transpirationsraten von 6 mm, welche in Wintergetreidebeständen im Monat Mai häufig erreicht werden (Ehlers 1996), lediglich für vierzehn Tage der Wasserbedarf des Kulturpflanzenbestandes problemlos aus dem Bodenvorrat nachgeliefert werden kann.

### **1.3. Wirkung von Trockenstress auf den Pflanzenertrag**

Die Reaktion von Pflanzen auf eine eingeschränkte Wasserversorgung ist sehr prozessspezifisch, das heißt unterschiedliche physiologische Vorgänge werden durch unterschiedliche Trockenstressintensitäten ausgelöst beziehungsweise verhindert. Bereits bei einer Absenkung des Wasserpotentials um lediglich 0,1 MPa wird das Streckungswachstum pflanzlicher Zellen eingeschränkt. Bei steigender Trockenstressintensität für die Pflanze werden neben dem Streckungswachstum auch die Nitratreduktaseaktivität und das meristematische Wachstum, vor allem in Folge gestörter Proteinsynthese, vermindert. Eine Reduktion der Photosynthese folgt erst bei deutlich intensiverem Trockenstress bei Wasserpotentialabsenkungen um 0,75 MPa (Brunold et al. 1996).

Grundsätzlich können Kulturpflanzenbestände, sofern sie in Ihrer Vegetationsperiode einmal unter Trockenstress leiden, nicht mehr den maximal möglichen Biomasseertrag generieren. Das Ausmaß der Ertragsdepression ist dabei sehr stark davon abhängig, in welchem Stadium der Trockenstress eintritt (Ehlers 1996). Bei Pflanzen mit determiniertem Wachstum wie unseren heimischen Getreidearten laufen die Bildung des

vegetativen Sprosses und die Bildung der generativen Organe zeitlich streng getrennt ab. Die Befruchtung findet innerhalb eines kurzen Zeitraumes statt. Wegen der kurzen Blühdauer ist Trockenstress in diesem Stadium für Pflanzen mit determiniertem Wachstum besonders kritisch. In Folge von Trockenstress während der Blüte kann es, durch Hemmung der Meiose der Pollenmutterzellen, zu verminderter Fertilität kommen (Schubert 2006). Die Folge ist ein deutlicher Ertragsrückgang. Pflanzen mit nicht determiniertem Wachstum, beispielsweise Ackerbohnen (*Vicia fabea*), können hingegen bei wieder besser werdender Wasserversorgung erneut Blüten beziehungsweise Fruchtstände ansetzen (Ehlers 1996). Die Verlagerung von Assimilaten innerhalb der Pflanze reagiert recht unempfindlich auf Trockenstress, so dass während der Kornfüllung oder Reifephase eintretender Trockenstress weniger ertragswirksam ist als im sensiblen Stadium der Blüte. Trockenstress in der frühen vegetativen Entwicklung kann die Bestandsdichte reduzieren; dieser Effekt ist wegen der besseren Einzelpflanzenentwicklung häufig nicht ertragsmindernd (Ehlers 1996). Bei als Ganzpflanze genutzten Kulturen wie etwa Silomais, erfolgt ein Ertragsrückgang häufig dadurch, dass unter Trockenstress das Sprosswachstum zugunsten des Wurzelwachstums reduziert wird. Das Spross-Wurzel-Verhältnis wird unter Trockenstress enger (Brunold et al. 1996).

Das für die menschliche oder tierische Ernährung geerntete Pflanzenorgan unserer Kulturpflanzen ist aber zumeist der Samen. Dessen quantitativer wie auch qualitativer Ausbildung sollte die volle Aufmerksamkeit bei der Gestaltung von Produktionssystemen für Druschfrüchte unter der Gefahr von Trockenstress zufallen.

Ein effizienter Umgang mit der Ressource Wasser kann nur durch eine ausreichende Pflanzenernährung in Kombination mit standortangepassten Kulturpflanzenbeständen erreicht werden.

### **1.4. Kalium als Pflanzennährstoff**

Kalium (K) ist ein Pflanzennährstoff und liegt mit etwa 3-6% in der Trockenmasse in Pflanzen vor. Die Funktionen von K in der Pflanze sind vielfältig (Bergmann 1988). Zu unterscheiden sind osmotische Funktionen, Aktivierung von Enzymen und elektrostatische Funktionen. Die osmotischen Funktionen sind für diverse Stoffwechselforgänge von großer Bedeutung. Die osmotische Wirksamkeit von K ermöglicht beispielsweise die Wasseraufnahme in die Wurzelzellen sowie die Weitergabe von Wasser über die Parenchymzellen des Zentralzylinders ins Xylem (Mengel 1991). Auch für

das Streckungswachstum pflanzlicher Zellen ist die osmotische Funktion von K, zum Aufbau eines wachstumswirksamen Turgors in den Vakuolen, unverzichtbar (Schubert 2006). Durch Erniedrigung des osmotischen Potentials durch K kann durch Wassereinfluss aus benachbarten Geweben die Regulation der Stomata, und somit die Wasserretention im Blatt, effizient verlaufen. Bei K-Mangel kann die CO<sub>2</sub>-Fixierung, Voraussetzung der pflanzlichen Primärproduktion, zurückgehen (Mengel 1991).

Die spezifische Aktivierung von Enzymen durch K verläuft durch Bindung des positiv geladenen K an den negativen Carboxylgruppen der Enzyme. Beispiel wäre etwa die H<sup>+</sup>-ATPase, welche durch K stimuliert wird. Die H<sup>+</sup>-ATPase gibt Protonen in die Zellwand ab und sorgt damit durch Ansäuerung für eine ausreichende Zellwandextensibilität. Diese ist gemeinsam mit einem wachstumswirksamen Turgor Voraussetzung für das Streckungswachstum pflanzlicher Zellen. K wirkt also sowohl osmotisch als auch durch Enzymaktivierung auf das Streckungswachstum pflanzlicher Zellen (Schubert 2006). Die diversen elektrostatischen Funktionen von K beruhen auf seiner hohen Fähigkeit zur Überwindung biologischer Membranen (Mengel 1991). Durch seine positive Ladung kann K dabei negative Membranpotentiale abbauen und verschiedene physiologische Prozesse stimulieren, beispielsweise die Assimilatbeladung des Phloems oder die ATP-Synthese im Rahmen der Photosynthese (Schubert 2006).

Durch die genannten spezifischen Funktionen von K im Wasserhaushalt von Pflanzen kann eine ausreichende K-Versorgung unserer Kulturpflanzenbestände deren Wassernutzungseffizienz (WUE) verbessern (Bergmann 1988). Die Wassernutzungseffizienz ist das Verhältnis von gebildeter Trockenmasse zu Wasserverbrauch. Der effizientere Umgang mit Wasser wird dabei nicht durch einen sparsameren Wasserverbrauch, sondern durch ein gesteigertes Streckungswachstum und damit gesteigerte Trockenmasseproduktion erreicht (Schubert 2016). Da K zu einer effizienteren Nutzung von Wasser durch unsere Kulturpflanzenbestände beitragen kann, ist eine ausreichende K-Versorgung bei Trockenstress unbedingt anzustreben (Schubert 2006). K-Mangel tritt vornehmlich auf leichten, sauren Böden sowie auf stark kaliumfixierenden Böden mit vielen Drei-Schicht-Tonmineralen auf (Bergmann 1988). Die meisten Kulturpflanzen haben den höchsten K-Bedarf zum Zeitpunkt ihres stärksten Massewachstums; dieses Stadium ist beim Getreide das Schossen. Ein Mangel an K kann in diesem Stadium die Anzahl ährentragender Halme und später die Tausendkornmasse (TKM) reduzieren. Beim Raps ist der K-Bedarf vom beginnenden Streckungswachstum bis zum Blühbeginn am höchsten (Mengel 1991).

Die K-Mangelercheinungen werden oft durch eine unzureichende Steuerung des Wasserhaushaltes ausgelöst. Mit K mangelernährte Pflanzen weisen häufig eine geringe Turgeszenz auf; der Gesamthabitus der Pflanze wirkt schlaff (Bergmann 1988). Der K-Mangel wird dabei zunächst an älteren Blättern in Form von trockenen Nekrosen deutlich, da die Pflanze unter K-Mangel das vorhandene K in die jüngeren wachsenden Meristeme verlagert (Schubert 2006). Nur in Phasen intensiven Wachstums und geringer Stoffwechselaktivität älterer Blätter treten K-Mangelsymptome zunächst auch an jüngeren Blättern auf, da die Verlagerung von K in der Pflanze den Bedarf der jüngsten und sehr stoffwechselaktiven Blätter nicht decken kann (Bergmann 1988). Bei Monokotylen wie unseren Getreidearten, beginnen die K-Mangelsymptome charakteristisch an der Blattspitze und breiten sich im Verlauf basal am Blattrand entlang aus und lassen sich dadurch eindeutig von anderen Nährstoffmangelsymptomen unterscheiden. Bei dikotylen Pflanzen wie Raps sind Blattrandnekrosen an den älteren Blättern ein Merkmal für K-Mangel (Bergmann 1988).

Die K-Düngung gestaltet sich in der landwirtschaftlichen Praxis deutlich einfacher als beispielsweise die N-Düngung. K wird zumeist in einer Gabe beziehungsweise häufig nur zu einzelnen Fruchtfolgegliedern gedüngt. Als besonders kaliumbedürftig gelten dabei Kulturpflanzen mit Pfahlwurzel wie Raps (*Brassica napus*) oder Zuckerrüben (*Beta vulgaris* subsp. *vulgaris*). Beachtet werden sollte auf sehr leichten Standorten mit geringen Tonanteilen, selbiges gilt auch für Nitrat, die Auswaschungsgefahr von K (Finck 1991).

Für die Anlieferung von Nährstoffen an die Wurzeloberfläche gibt es drei Mechanismen: Interzeption, Diffusion und Massenfluss. Interzeption ist das Wachsen der Wurzel zum Nährstoff und ist quantitativ zu vernachlässigen. Der Massenfluss errechnet sich aus dem zur Wurzel transportierten Wasservolumen und dessen Nährstoffkonzentration. Das zur Wurzeloberfläche transportierte Wasservolumen und damit die Anlieferung von gelösten Nährstoffen hängen dabei von der Transpirationshöhe der Pflanzen ab. Nährstoffe, die mit hoher Konzentration im Boden vorliegen, werden durch Massenfluss in großer Menge an die Wurzeloberfläche transportiert. Hierzu zählen Magnesium (Mg), Calcium (Ca) und Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ). Die Anlieferung von K an die Wurzeloberfläche erfolgt hauptsächlich über Diffusion, die Aufnahme in die Wurzel über Ionenkanäle. Der Transport von K zur Wurzel durch Diffusion ist für Nährstoffe, die lediglich in geringer Konzentration in der Bodenlösung vorliegen, typisch (Schubert 2006).

Die Diffusion folgt dem Fickschen Diffusionsgesetz:

$$F = -D \times \frac{\Delta c}{\Delta x}$$

Dabei entspricht F dem Teilchenfluss, D dem Diffusionskoeffizienten,  $\Delta c$  der Stoffkonzentration und  $\Delta x$  dem zurückzulegenden Abstand.

Es beschreibt die Diffusion von Teilchen entlang eines Konzentrationsgradienten. Der Konzentrationsgradient wird dabei durch die Aufnahme von Nährstoffen an der Wurzeloberfläche von den Pflanzen selbst verursacht. Die Diffundierbarkeit eines Mediums, hier des Bodens, wird über den Diffusionskoeffizienten beschrieben. Der Diffusionskoeffizient vermindert sich dabei beim Austrocknen des Bodens, da die Diffusionswege sich verlängern. Weitere Eingangsparameter sind die Aktivität des Ions und der Abstand zur Wurzeloberfläche. Die Aktivität des Ions ergibt sich aus dessen Konzentration und einem Aktivitätskoeffizienten (Schubert 2006).

Durch Aufnahme von Nährstoffen an der Wurzeloberfläche, welche wie K durch Diffusion angeliefert werden, kommt es zu einem Verarmungsprofil mit geringen Nährstoffkonzentrationen an der Wurzeloberfläche. Die Ausformung des Verarmungsprofils ist abhängig von der Wurzelmorphologie, den Aufnahmemechanismen und der K-Konzentration im Boden (Kuchenbuch und Jungk 1984). Aufgrund des durch das Verarmungsprofil beschriebenen Konzentrationsgradienten diffundieren die Ionen zur Wurzeloberfläche. Dies führt dazu, dass viele Methoden der Bodenanalytik nur bedingt geeignet sind, eine ausreichende K-Versorgung verschiedener Pflanzen auf verschiedenen Böden vorherzusagen, da die Faktoren Nährstoffmobilität und pflanzenspezifische Nährstoffaneignungseffizienz nicht ausreichend berücksichtigt werden (Kuchenbuch und Claassen 1985).

Für das Verständnis der K-Ernährung von Pflanzen müssen die verschiedenen im Boden vorkommenden K-Fraktionen beachtet werden. Nicht das gesamte K des Bodens, die Erdrinde enthält etwa 3% K, ist für unsere Pflanzen verfügbar. Neben dem K in der Bodenlösung liegt K sorptiv (also unter Beibehaltung seiner Hydrathülle) an Bodenpartikeln gebunden und damit austauschbar vor. Die dritte Fraktion ist in dem Kristallgitter von Tonmineralen spezifisch gebunden und daher lediglich bedingt pflanzenverfügbar.

Diese drei Fraktionen stehen, wie Abbildung 3 zeigt, im Gleichgewicht zueinander (Schubert 2006).

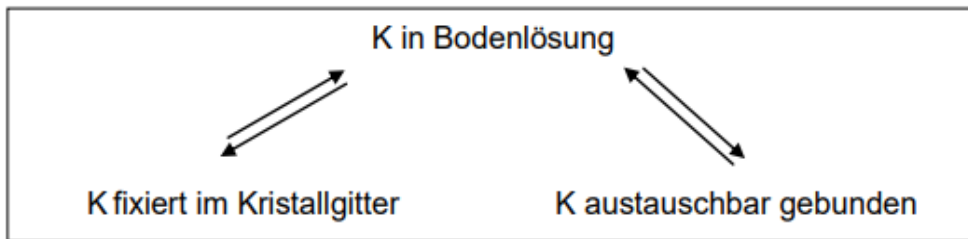


Abbildung 3: Kaliumfraktionen im Boden (Schubert 2006).

Durch Zufuhr von wasserlöslichen K-Düngemitteln in die Bodenlösung wird das Gleichgewicht zwischen den Fraktionen verschoben. Ein Teil des gedüngten K kann dabei in die austauschbar gebundene Fraktion, in Böden die zur Kaliumfixierung neigen, auch in die nicht austauschbar gebundene Fraktion, übergehen (Schubert 2006).

Blattfrüchte wie Kartoffeln (*Solanum tuberosum*) oder Zuckerrüben haben ein Pfahlwurzelsystem, welches den Boden weniger intensiv erschließt als das Faserwurzelsystem des Getreides. Sie sind in der Kaliumaneignung nicht effizient und können das im Kristallgitter der Tonminerale fixierte K kaum nutzen. Gräser mit ihrem ausgedehnten Wurzelsystem sind in der Lage, sich K aus dem Boden effizienter anzueignen und dabei auch das spezifisch gebundene K zu nutzen (Mengel 1991). Hohe K-Aufnahmeraten je Wurzeleinheit und ein enges Wurzel-Spross-Verhältnis sind weitere Mechanismen verschiedener Pflanzenarten zur Steigerung Ihrer K-Aneignungseffizienz (Claassen und Jungk 1983).

Die Bodenfeuchte spielt für die Verfügbarkeit von K für die Pflanze eine zentrale Rolle. Der Transport zur Wurzel über Diffusion kann für K durch Austrocknung des Bodens und damit einhergehender Verlängerung der Diffusionswege erheblich beeinträchtigt werden. Zudem kann sich die Diffusivität in hoch konzentrierten Lösungen gegenüber der Diffusivität in niederkonzentrierten Lösungen verschlechtern.

Dadurch vermindert sich die K-Verfügbarkeit gerade in Zeiten knapper Wasserversorgung, in denen eine ausreichende K-Versorgung für die Pflanze von zentraler Bedeutung ist.

## 1.5. Einfluss der Saatstärke auf Kulturpflanzenbestände

Der Kornertrag von Druschfrüchten setzt sich zusammen aus den Ertragskomponenten Fruchtstand  $m^{-2}$ , der Kornanzahl Fruchtstand $^{-1}$  und der Tausendkornmasse (TKM). Die Anzahl fruchtstandtragender Triebe auf einer Fläche lässt sich unter anderem durch die Auswahl der Saatstärke beeinflussen. Mit der Auswahl der Saatstärke wird über die später auf einer Fläche stehende Anzahl von Haupttrieben und die daraus resultierende Bestandsarchitektur wesentlich mitentschieden. Maßgeblich kann über die Auswahl einer dem Saattermin und dem Bodenzustand angepassten Saatstärke Einfluss auf den der Einzelpflanze zur Verfügung stehenden Standraum genommen werden. Damit wird über die Verteilung der Produktionsfaktoren Licht, Nährstoffe und Wasser für die Einzelpflanze entschieden (Geißler 1983). Generell gilt, dass Bestände mit überhöhter Pflanzenanzahl eine hohe intraspezifische Konkurrenz um Wachstumsfaktoren wie Standraum, Nährstoffe und Wasser aufweisen. Dies kann beispielsweise zum erhöhten Lagerdruck im Getreideanbau beziehungsweise bereits im Herbst einsetzenden Streckungswachstum im Raps führen. Beide Effekte sind absolut unerwünscht und in Beständen mit standortangepasster Triebdichte weniger stark ausgeprägt (Geißler 1983).

Durch die Bestandsdichte wird maßgeblich der Blattflächenindex beeinflusst. Über die Höhe des Blattflächenindex wird deutlich das Verhältnis von produktiver Transpiration zu unproduktiver Evaporation bestimmt. Dies erklärt sich über die zur Photosynthese zur Verfügung stehende Blattfläche, als auch deren Strahlungsabsorption (Geißler 1983). Auch auf den Transpirationskoeffizienten, also das Verhältnis von gebildeter Trockenmasse zu verbrauchtem Wasser, kann der Blattflächenindex Einfluss haben. In sehr lichten Kulturpflanzenbeständen mit geringem Blattflächenindex, beispielsweise verursacht durch zu geringe Saatstärke oder unzureichende Nährstoffversorgung, kann es zum sogenannten „Wäscheleinen-Effekt“ kommen. Dabei kommt es durch Advektion von Wärme in den Kulturpflanzenbestand zu erhöhten Transpirationsraten ohne Erhöhung der Nettoassimilation. Die Transpiration wird also weniger effizient, der Transpirationskoeffizient steigt (Ehlers 1997).

Beim Raps ist die Korrelation zwischen den einzelnen Ertragsmerkmalen, gemessen an den meisten anderen Kulturpflanzen, relativ schwach und die Einzelpflanzen sind stark zur Kompensation befähigt. Auf eine geringe Bestandsdichte kann die Einzelpflanze mit der Ausbildung diverser schotentragender Nebentriebe reagieren. Der Kornertrag hängt damit weniger von der Bestandsdichte, sondern von der Schotenanzahl Fläche $^{-1}$

ab (Geißler 1983). Werden durch geringe Saatstärken Getreidebestände mit relativ wenigen Haupttrieben erzeugt, sollte beachtet werden, dass die Ertragsfähigkeit von durch Bestockung gebildeten Nebentrieben zumeist geringer als die des Haupttriebes ist (Darwinkel et al. 1977). Sehr hohe Bestandsdichten hingegen führen zu einem geringeren Einzelährenertrag; ebenso können die Tausendkornmasse und damit häufig das Hektolitergewicht zurückgehen (Geisler 1983).

All dies bedeutet, dass die Wahl der Saatstärke an die Standortgegebenheiten und an die langjährige Ertragserwartung angepasst werden sollte. Eine Reduktion der Saatstärke ist eine Möglichkeit, die Wasserversorgung der Einzelpflanze unter Trockenstress zu verbessern (Waloszczyk 1996). In Trockengebieten werden regelmäßig höhere Kornerträge mit weniger dichten Getreidebeständen produziert; überzogene Saatstärken führen hingegen zu höheren Stroh- und niedrigeren Kornerträgen, häufig kombiniert mit Qualitätsmängeln am Erntegut (Ehlers 1996).

### **1.6. Stickstoff als Pflanzennährstoff**

Stickstoff (N) ist ein Pflanzennährstoff und quantitativ hinter den Elementen Wasserstoff (H), Kohlenstoff (C), und Sauerstoff (O) der wichtigste Nährstoff in der pflanzlichen Trockenmasse (Schubert 2006).

N ist derjenige Pflanzennährstoff, dem in der Düngung in der landwirtschaftlichen Praxis die größte Bedeutung zufällt. Dies ist nicht zuletzt wegen der möglichen deutlichen Ertragssteigerungen durch die Düngung von N zu erklären. N übernimmt im pflanzlichen Stoffwechsel eine Vielzahl unterschiedlicher Funktionen. Eine quantitativ bedeutende Aufnahme in die Pflanze erfolgt als Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) oder Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ). Wird der N als Ammonium aufgenommen, kann er direkt in Aminosäuren eingebaut werden. Bei Aufnahme als Nitrat ist vor der folgenden Assimilation eine zweiphasige enzymatische Reduktion des Nitrats durch die Enzyme Nitrat- und Nitritreduktase notwendig (Schubert 2006). Eine ausreichende N-Versorgung als Baustein von Proteinen ist Voraussetzung für die Synthese von Enzymen und durch deren spezifische Funktionen für pflanzliches Wachstum im Allgemeinen. Mit N mangelernährte Pflanzen erkennt man häufig an einer hellgrünen oder gelblichen Blattfarbe; die Wirkung des N am Aufbau des Chlorophylls wird dadurch deutlich (Mengel 1991). Wegen der guten sowohl akropetalen als auch basipetalen Verlagerbarkeit von N treten N-Mangelsymptome typischerweise zunächst an älteren Blättern auf, da es zu einer Verlagerung des N in junge Gewebe kommt (Schubert 2006).

An Kulturpflanzenbeständen verschiedener Arten ist N-Mangelernährung in verschiedensten Stadien möglich. Mangelernährte Getreidebestände fallen durch geringe Triebdichten, dünne Halme und kurze Ähren mit nicht voll ausgebildeten Körnern auf (Mengel 1991). Wegen ihres im Vergleich zu vielen anderen Kulturpflanzenbeständen hohen N-Bedarfs weisen N-mangelernährte Rapsbestände schwach entwickelte Einzelpflanzen, eine geringe Blattfläche, eine verminderte Verzweigung mit schotenträgenden Nebentrieben, verminderten Blütenansatz und Schoten mit wenig Körnern auf (Geisler 1980).

Die Möglichkeit, einen Kulturpflanzenbestand über die N-Düngung mit wasserlöslichen N-Düngemitteln „zu führen“ ergibt sich daraus, dass sich im Boden üblicherweise nur geringe Mengen an pflanzenverfügbarem N befinden (Geisler 1980). Der überwiegende Teil des im Boden befindlichen N ist organisch gebunden und damit nicht unmittelbar pflanzenverfügbar. Bogulawski (1981) bezifferte den Anteil des organisch gebundenen N am Gesamt-N des Bodens auf etwa 98%.

Durch die N-Düngung lassen sich die einzelnen Ertragskomponenten bei Getreide deutlich beeinflussen. Die N-Düngung lässt sich in der absoluten N-Menge ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ), deren Aufteilung in verschiedene Gaben und der Wahl des Applikationstermins variieren. Hohe N-Düngegaben zu Vegetationsbeginn beziehungsweise zum Stadium der Bestockung fördern die Bestockung und führen damit zu triebstarken Beständen (Diepenbrock et al. 2009). Diese Bestände sind für Ertragsdepressionen durch Trockenstress besonders empfindlich (Sticksel et al. 1996). Spätere N-Düngung zu Stadium EC 32 fördert die Kornanzahl  $\text{Ähre}^{-1}$ , noch spätere N-Gaben etwa um den Termin des Ährenschiebens fördern die Tausendkornmasse und die Rohproteinkonzentration im Korn (Diepenbrock et al. 2009). Beim Raps lässt sich die notwendige Vorwinterentwicklung durch N-Düngung begünstigen. Eine sehr zeitige Düngung im Frühjahr mit N fördert die Bildung schotenträgender Nebentriebe und ein zügiges Schließen des Bestandes durch verstärkte Blattbildung (Geisler 1983).

Die Konstellation hoher N-Düngung unter Mangel an Wasser kann bei Getreide in unerwünschter Weise zur Einlagerung der Assimilate in Blatt und Spross, nicht aber in die Kornanlagen führen (Ehlers 1996). Durch die Bildung von viel vegetativer Pflanzenmasse kann eine N-Düngesteigerung den Kornertrag sogar negativ beeinflussen. Das für das üppige vegetative Wachstum verbrauchte Wasser steht für die Ausbildung generativer Organe dann nicht mehr zur Verfügung (Schubert 2006). Ein Wirksamwerden der mineralischen N-Düngemittel tritt erst mit entsprechendem Wasserangebot ein. Zunächst müssen die Düngesalze durch Bodenfeuchte oder

Niederschläge gelöst werden; dies kann vor allem bei späteren N-Düngegaben ein Problem darstellen (Ehlers 1996).

Die Wirksamkeit der N-Düngung ist unmittelbar an die Wasserversorgung der Pflanzen gebunden und sollte daher an die Wasserverfügbarkeit angepasst werden.

Wie für die Anlieferung von K zur Wurzeloberfläche durch Diffusion beschrieben, verringert sich die Anlieferung von N an die Wurzeloberfläche bei Trockenheit. Für Ammonium gelten die für K erläuterten Einschränkungen der Diffusion in ausgetrockneten Böden. Die Anlieferung von Nitrat an die Wurzeloberfläche durch Massenfluss nimmt unter Trockenstress wegen der reduzierten Transpirationsraten der Pflanzen ab. Die Verfügbarkeit von N nimmt also, unabhängig davon ob durch Massenfluss (Nitrat) oder durch Diffusion (Ammonium) zur Wurzeloberfläche transportiert, bei unzureichender Bodenfeuchte bei Trockenstress ab.

### **1.7. Ziel der vorliegenden Arbeit**

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung produktionstechnischer Maßnahmen im Anbau von Winterweizen (*Triticum aestivum*) und Raps (*Brassica napus*) zur Optimierung des Produktionsverfahrens unter Trockenstress.

Global betrachtet ist Trockenstress der bedeutendste abiotische Stress für Kulturpflanzenbestände (Cattivelli et al. 2008) und als eine der wichtigsten Gefährdungen der Ernährungssicherheit zu betrachten. Trockenstress betraf bereits zur Jahrtausendwende rund 40% der Weltbevölkerung unmittelbar (Quarrie et al. 1999). Unter Beachtung der wachsenden Weltbevölkerung und des stattfindenden Klimawandels (ein Ausbleiben regelmäßiger Niederschläge in den Phasen hohen Wasserbedarfs unser Kulturpflanzenbestände darf vielerorts erwartet werden) stellt sich damit die Frage des künftigen Umgangs mit der Gefahr von Trockenstress auf unsere Kulturpflanzenbestände aktueller denn je. Produktionsverfahren mit hoher Wassernutzungseffizienz sind sowohl global als auch national von großer Bedeutung (Jung et al. 2021).

Laut der FAO (Food and Agriculture Organisation) wird sich der Bedarf an ackerbaulichen Rohstoffen bis zum Jahr 2050 verdoppeln. Dies hängt sowohl mit der wachsenden Weltbevölkerung als auch mit sich verändernden Ernährungsangewohnheiten zusammen (Tilman et al. 2011). In Anbetracht begrenzter Flächenressourcen gilt es daher die Flächenproduktivität zu steigern, um ausreichend Lebensmittelrohstoffe, Futtermittel und

nachwachsende Rohstoffe zur energetischen Nutzung bereit zu stellen (Jung et al. 2021).

Trockenschäden an landwirtschaftlichen Kulturen verursachen niedrige Naturalerträge, eingeschränkte Produktqualitäten, wirtschaftliche Schäden und beeinträchtigen die effiziente Ausnutzung eingesetzter Produktionsfaktoren, etwa der Stickstoffdüngung, in erheblichem Umfang. Die Nachhaltigkeit des Produktionssystems wird durch Trockenschäden reduziert. Die Möglichkeit der Beregnung ist vielerorts technisch schwierig umsetzbar, häufig nicht genehmigungsfähig oder wirtschaftlich darstellbar und soll in der vorliegenden Arbeit unberücksichtigt bleiben. Vielmehr wird die Wirkung einfach zu variierender Produktionsfaktoren an bedeutenden Kulturarten überprüft. Als Kulturen wurden Winterweizen und Winterraps gewählt, da beide einen bedeutenden Anbauumfang in den Trockenstressregionen Deutschlands haben. In Mecklenburg-Vorpommern wuchsen im Jahr 2022 auf 306.800 ha Winterweizen und auf 192.400 ha Winterraps (Statistisches Bundesamt 2022). Damit haben diese beiden Kulturen den größten Anbauumfang im Nordosten Deutschlands.

In der vorliegenden Arbeit wird die Wirkung von Saatstärke, Stickstoff- und Kaliumdüngung auf Ertrag und Qualität bei Weizen und Raps unter Trockenstress geprüft. Gesucht wird die optimale Faktorenkombination, um die unter Trockenstress auftretenden Ertragsdepressionen und Qualitätsmängel zu minimieren, und damit zu einer effizienten und nachhaltigen Pflanzenproduktion beizutragen.

Folgende Hypothesen wurden zur Prüfung aufgestellt:

1. Eine erhöhte Kaliumzufuhr führt bei ausreichend mit Kalium versorgten Böden unter Trockenstress zu einer signifikanten Ertragssteigerung und höheren Qualitäten bei Weizen und Raps.
2. Reduzierte Saatstärken führen bei Stickstoff- und Kaliumdüngung entsprechend guter fachlicher Praxis unter Trockenstress nicht zu signifikanten Ertragseinbußen bei Weizen und Raps.
3. Reduktion der Stickstoffdüngung unter Trockenstress führt bei Weizen zu signifikant höheren Erträgen und Qualitäten und bei Raps zu signifikant höheren Ölerträgen.

## **2. Material und Methoden**

Um die genannten Hypothesen prüfen zu können, wurde für das Promotionsvorhaben ein dreijährig wiederholter Parzellenversuch im Freiland mit den beiden Kulturen Weizen und Raps angelegt. Der Parzellenversuch wurde von der GEP-zertifizierten (Good Experimental Practice) Quintus GmbH mit Sitz in 17194 Liepen angelegt und betreut. Die dreijährige Wiederholung erhöht die Belastbarkeit der gewonnenen Daten und ist langjährig gängige Praxis im Feldversuchswesen (Thomas 2006).

### **2.1. Der Versuchsstandort**

Als Versuchsstandort wurde 17194 Liepen (53°37'51.143" N/12°25'47.629" E) in Mecklenburg-Vorpommern gewählt.

Die Parzellenversuche konnten alle drei Versuchsjahre in unmittelbarer Umgebung zueinander am Hauptsitz der Quintus GmbH durchgeführt werden. Der Standort liegt auf 65 m ü. NHN und hat eine langjährige Durchschnittstemperatur von 8,8°C. Das langjährige Niederschlagsmittel direkt am Versuchsstandort beträgt rund 480 mm jährlich.

Der Standort Liepen zeichnet sich durch sehr leichte Böden mit geringem Wasserhaltevermögen aus. Der in Liepen vorliegende Bodentyp ist eine diluviale saure Braunerde mit etwa 25-30 Bodenpunkten. Die Bodenart ist als Su2 (schwach schluffiger Sand) anzusprechen. Das Gelände ist leicht kupiert; für die Versuchsanlagen wurden stets möglichst ebene Teilflächen genutzt.

Die Kombination aus geringem Wasserhaltevermögen und ausbleibenden Niederschlägen im Frühjahrsverlauf machte das Auftreten von Trockenstressphasen als Voraussetzung für die Prüfung der Hypothesen sehr wahrscheinlich.

### **2.2. Die Versuchsanlage**

Das Versuchsdesign war für beide Kulturen identisch. Dabei wurde eine balancierte, randomisierte vollständige Blockanlage mit vier Wiederholungen genutzt. Wiederholung und Randomisierung der Prüfvarianten sind die wichtigsten Grundsätze der Versuchsanlage (Thomas 2006). Durch die Nutzung einer vollständigen Blockanlage kam jede Prüfvariante in jedem Block einmal vor. Die Bildung von Blöcken ist die sicherste und gebräuchlichste Form, um die Wirkung störender Bodeneinflüsse auf das Versuchsergebnis zu reduzieren (Thomas 2006). Die Blöcke lagen in allen Jahren übereinander, im

letzten Versuchsjahr im Weizen zwei Blöcke übereinander und zwei Blöcke nebeneinander. Grund hierfür war störende Bodenheterogenität, hätte man die Blöcke alle übereinander angeordnet. Eine solche Anordnung ist ebenfalls geläufig (Ströbele mündlich 2021, Inhaber der Quintus GmbH). Die Randomisierung wechselte jährlich.

Die gewählten Prüffaktoren Saatstärke (ortsüblich 100%, 80% und 60%), N-Düngung (ortsüblich 100%, 80% und 60%) und K-Düngung (unterlassen und gedüngt) ergeben  $3 \times 3 \times 2 = 18$  verschiedene Prüfvarianten. Diese sind in Abbildung 4 aufgeführt. Die 100% Saatstärke wurde für beide Kulturen anhand regional praxisüblicher Saatstärken gewählt. Bei der N-Düngung entsprach die 100% N-Düngung der laut Düngebedarfsermittlung (Richtwerte für die Untersuchung und Beratung zur Umsetzung der Düngeverordnung vom 26. Mai 2017 in Mecklenburg-Vorpommern) maximal zulässig zu düngenden N-Menge. Langjährige Erträge wurden mit  $50 \text{ dt ha}^{-1}$  Weizen und  $30 \text{ dt ha}^{-1}$  Raps angenommen. Die K-Düngemenge wurde bewusst über dem prognostizierten Entzug gewählt, um die Wahrscheinlichkeit von K-Düngeeffekten auf Ertrag und Qualitätsparameter auf dem ausreichend mit K versorgten Standort zu steigern.

Lfd. Nummer	Saatstärke %	N-Düngung %	K-Düngung %
1	100	100	Unterlassen
2	100	80	Unterlassen
3	100	60	Unterlassen
4	100	100	Gedüngt
5	100	80	Gedüngt
6	100	60	Gedüngt
7	80	100	Unterlassen
8	80	80	Unterlassen
9	80	60	Unterlassen
10	80	100	Gedüngt
11	80	80	Gedüngt
12	80	60	Gedüngt
13	60	100	Unterlassen
14	60	80	Unterlassen
15	60	60	Unterlassen
16	60	100	Gedüngt
17	60	80	Gedüngt
18	60	60	Gedüngt

Abbildung 4: Variantenplan für Weizen und Raps.

Durch die vierfache Wiederholung ergaben sich für den Gesamtversuch je Kultur  $18 \times 4 = 72$  Prüfparzellen. Zwischen den Parzellen verblieb jeweils ein 25 cm breiter nicht bewachsener Streifen. Um Rand- und Nachbarwirkungen möglichst zu minimieren, wurde zwischen den Prüfparzellen jeweils eine standardisierte Parzellenvariante platziert. Diese werden als

Kontrollprüfglieder bezeichnet (Thomas 2006). Als Nachbarwirkung gilt der Einfluss des Randes eines Pflanzenbestandes auf den benachbarten Pflanzenbestand. Als Randwirkung gilt die Reaktion einer Pflanze am Parzellenrand auf die benachbarte Freifläche (Thomas 2002). Durch die Nutzung der Kontrollprüfglieder konnte gewährleistet werden, dass alle Prüfparzellen immer denselben Nachbarn, und somit dieselben Rand- bzw. Nachbarwirkungen hatten. Die Kontrollprüfglieder entsprachen dabei Prüfvariante Eins (100% Saatstärke, 100% N-Düngung, unterlassene K-Düngung). Stirnseiteneffekte auf die Prüfparzellen wurden als ceteris-paribus hingenommen.

Das Schema des Versuchsaufbaus zeigt Abbildung 5. Pro Block ergaben sich insgesamt 37 Parzellen und für den Gesamtversuch  $37 \times 4 = 148$  Parzellen je Kultur. Der gesamte Parzellenversuch umfasste damit je Kultur rund 48 m Länge  $\times$  65 m Breite und damit  $3120 \text{ m}^2$ .

x 1 0	x 6 7	x 1 4	x 4 8	x 8 2	x 2 1	x 1 4	x 1 9	x 9 5	x 5 1	x 1 3	x 3 1	x 1 1	x 1 1	x 1 7	x 7 1	x 1 1	x 1 1
x 1 7	x 1 2	x 1 6	x 1 0	x 3 7	x 7 6	x 6 5	x 1 8	x 1 4	x 4 8	x 8 1	x 1 5	x 5 1	x 1 1	x 9 1	x 1 4	x 1 2	x 2 x
x 1 2	x 1 8	x 6 7	x 1 6	x 1 5	x 1 0	x 1 3	x 3 4	x 1 3	x 1 4	x 4 2	x 2 8	x 8 5	x 5 7	x 7 1	x 1 9	x 9 x	x
x 1 2	x 2 3	x 3 4	x 4 5	x 5 6	x 6 7	x 7 8	x 8 9	x 9 0	x 1 1	x 1 2	x 1 3	x 1 4	x 1 5	x 1 6	x 1 7	x 1 8	x 1 x

Abbildung 5: Schema der Versuchsanlage mit vier Blöcken und der in 2020/2021 genutzten Randomisierung. x = Kontrollprüfglied.



Photo 1: Rapsparzellenversuch zur Vollblüte 2020. Der rot umrandete Versuch entsprach, von der fehlenden Parzelle abgesehen, dem Schema in Abbildung 5 (Photo: Ströbele 2020).

Wegen des hohen Schalenwildbestands in der Region wurden die Versuchsanlagen komplett mit Elektrozäunen eingezäunt; eine Schädigung einzelner Parzellen durch Tritt oder Fraß konnte dadurch ausgeschlossen werden. Die für den Parzellenversuch genutzten Flächen waren langjährig bekannt, so dass zur Vermeidung von Versuchsfehlern möglichst homogene Teilstücke genutzt werden konnten. Mögliche Heterogenität des Bodens wurde penibel in den Vorkulturen des Versuchs an den Pflanzenbeständen bonitiert. Man spricht in diesem Zusammenhang von sogenannten Blindversuchen (Thomas 2006). Ebenso wurde darauf geachtet, dass die für den Parzellenversuch genutzten Flächen vorher dreijährig nicht als Versuchsstandort sondern wie üblich im Feldversuchswesen (Ströbele mündlich 2019, Inhaber der Quintus GmbH) als reguläre Ackerfläche genutzt wurden. Zur Reduktion technischer Fehler wurde die Anlage des Parzellenversuches wie üblich (Ströbele mündlich 2019, Inhaber der Quintus GmbH) quer zur vorherig erfolgten Bodenbearbeitung durchgeführt. Etwaige Ungleichmäßigkeiten der vorherigen Bodenbearbeitung verblieben dadurch innerhalb der angelegten Blöcke und betrafen somit alle Prüfvarianten gleichermaßen. Die Bodenbearbeitung musste eine sehr ebene Bodenoberfläche mit wenigen Strohresten der Vorfrucht hinterlassen, um eine genaue Ablage des Saatguts mit der Parzellensämaschine gewährleisten zu können. Zwischen den Blöcken wurde jeweils eine Fahrgasse angelegt. Ortsüblicher Pflanzenschutz und Applikation von Düngemitteln (außer N und K) konnten aus diesen Fahrgassen mit einer 12 m-Feldspritze und einem pneumatischen 12 m-Gestängestreuer für Mineraldünger durchgeführt werden. Die Aussaat erfolgte nach pflugloser Bodenbearbeitung zu ortsüblichen Terminen mit einer 1,5 m breiten Parzellensämaschine mit Scheibenscharen, die von einem GPS-gesteuerten Traktor gezogen wurde. Weizen wurde mit 12,5 cm Reihenabstand, Raps mit 25 cm Reihenabstand gesät.



Photo 2: Sämaschine bei der Weizenaussaat im September 2019 (Photo: Desaga 2019).

Die Parzellen wurden mit einer Fläche von 1,5 m x 12 m ausgesät. An den Stirnseiten der Parzellen wurden nach dem Auflaufen des Bestandes jeweils 1,5 m mit Glyphosat abgetötet.



Photo 3: Parzellendüngerstreuer mit Bandkopf und pneumatischer Düngerverteilung bei der ersten N-Düngung im Weizen 2020 (Photo: Desaga 2020).

Dadurch wurden technische Fehler an den Parzellenstirnseiten (etwa bei der Saatgutdosierung) reduziert. Die parzellenindividuelle Düngung von N und K erfolgte aber weiterhin auf 12 m x 1,5 m, um auch hier technische Fehler (etwa ein zu spätes Aktivieren der Düngerzufuhr) auszuschließen. Beim Raps konnte die gesamte Applikation von N und K maschinell erfolgen; beim Weizen erfolgte die dritte N-Düngung wegen der Höhe des Bestandes händisch.

Der Raps musste, wie bei Freilandparzellenversuchen mit Raps üblich (Ströbele mündlich 2019, Inhaber der Quintus GmbH), im Stadium EC 80 mit einem Gerät des Herstellers Haltrup maschinell gescheitelt werden, um einen sauberen Drusch der Gesamtparzelle zu ermöglichen. Dies war notwendig, da der Pflanzenbestand sich aus den einzelnen Parzellen ineinander gelegt hatte, und daher kein separater Drusch der einzelnen Parzellen möglich gewesen wäre. Das Scheiteln erfolgte zu einem Stadium, in dem die Schoten noch elastisch waren und nicht durch die mechanische Beanspruchung aufplatzen.



Photo 4: Maschine zum Scheiteln des Rapsversuches (Photo: Desaga 2020).

Die Ernte erfolgte als Mähdrusch der Parzellen mit einem Parzellenmähdrescher des Herstellers Halstrup mit 1,6 m breitem Schneidwerk bei Totreife der Kulturen. Es wurde die gesamte Parzelle mit 13,5 m<sup>2</sup> geerntet.



Photo 5: Parzellenmähdrescher bei der Weizenernte 2020 (Photo: Ströbele 2020).

Bereits während des Drusches wurden von jeder Parzelle Proben des geernteten Materials für die weitere Analytik genommen. Um Vermischungen des Ernteguts unterschiedlicher Parzellen ausschließen zu können, reinigte der Mähdrescher seine Druschorgane automatisch nach jeder Parzelle pneumatisch. Während des Drusches erfasste der Mähdrescher Kornertrag, Kornfeuchte und Hektolitergewicht.

### 2.3. Aussaat- und Düngepläne

Der Weizen (*Triticum aestivum* L. cv. Linus) wurde in allen drei Versuchsjahren nach der Vorfrucht Sommerhafer (*Avena sativa*) angebaut. Die Beizausstattung des Weizensaatguts war praxisüblich (Landor CT).

Die Aussaat erfolgte je nach Bodenzustand zu einem ortsüblichen Termin in der letzten Septemberwoche. Dabei musste der Boden eine gewisse Feuchte aufweisen, da es bei ganz trockenem Boden im Bearbeitungshorizont zu erheblichen Schwierigkeiten mit der exakten Tiefenablage des Saatguts kam. Als ortsübliche Saatstärke wurden 250 keimfähige Körner m<sup>-2</sup> ausgesät. Daraus ergaben sich reduzierte Saatstärken von 200 (80%) beziehungsweise 150 (60%) keimfähigen Körnern m<sup>-2</sup>. Es wurde praxisüblich zwei bis drei cm tief gesät.

Die N-Düngung erfolgte mit handelsüblichem Kalkammonsalpeter (KAS) vom Hersteller Eurochem mit 27% N in drei Gaben. Die Aufteilung der einzelnen N-Gaben war praxisüblich: 40% Vegetationsbeginn, 30% Stadium EC 30/31 (Beginn Schossen), 30% Stadium EC 37 (Erscheinen des Fahnenblatts). Die Variante 100% N-Düngung entsprach dabei 175 kg N ha<sup>-1</sup>. Daraus ergaben

sich reduzierte N-Düngungen von  $140 \text{ kg N ha}^{-1}$  (80%) und  $105 \text{ kg N ha}^{-1}$  (60%).  $N_{\min}$  wurde nach jährlicher Messung als arithmetisches Mittel der Messwerte von der ersten N-Düngung abgezogen.

Die K-Düngung erfolgte mit Kornkali (49,81% K) zu Vegetationsbeginn. Einer möglichen K-Auswaschung über Winterniederschläge auf dem sandigen Standort wurde damit vorgebeugt. Es wurden  $165 \text{ kg K ha}^{-1}$  gedüngt. Nachdem in 2021 die kritische Nährstoffkonzentration nach Bergmann (1988) zu Stadium EC 34/37 des Weizens für K von keiner Prüfvariante erreicht wurde, erfolgte die K-Düngung im letzten Versuchsjahr modifiziert. Im dritten Versuchsjahr wurden  $165 \text{ kg K ha}^{-1}$  zu Vegetationsbeginn und  $165 \text{ kg K ha}^{-1}$  vier Wochen nach der ersten K-Düngung appliziert. Zur Anhebung des pH-Wertes und zur Vermeidung von Mängeln an Nährstoffen welche nicht als Prüffaktoren fungierten, wurden folgende Nährstoffmengen im Weizen appliziert: Vor der letzten Bodenbearbeitung vor der Aussaat des Versuches  $3,0 \text{ t ha}^{-1}$  Rügener Kreidekalk ( $960,96 \text{ kg Ca ha}^{-1}$ ). Zu Vegetationsbeginn wurden  $31,20 \text{ kg S ha}^{-1}$  und  $22,62 \text{ kg Mg ha}^{-1}$  als Kieserit und  $24,08 \text{ kg P ha}^{-1}$  als Tripelsuperphosphat gedüngt. Die Applikation von Mikronährstoffen erfolgte in flüssiger Form beim Pflanzenschutz (Yara Vita Getreide Plus). Es wurde zum Stadium EC 29 und zu Stadium EC 37 jeweils  $1,0 \text{ L ha}^{-1}$  appliziert.

Der Winterraps (*Brassica napus* L. cv. Architekt) wurde im ersten Versuchsjahr 2019/2020 nach der Vorfrucht Winterroggen (*Secale cereale*), in den beiden weiteren Jahren nach der Vorfrucht Wintergerste (*Hordeum vulgare*) angebaut. Die Beizaustattung des Rapssaatguts war praxisüblich (Scenic Gold).

Die Aussaat erfolgte je nach Bodenzustand zu einem ortsüblichen Termin um den zwanzigsten August. Der Anspruch an eine gewisse Bodenfeuchte gilt wie bei der Beschreibung der Weizenaussaat geschildert. Als ortsübliche Saatstärke wurden  $40$  keimfähige Körner  $\text{m}^{-2}$  ausgesät. Daraus ergaben sich reduzierte Saatstärken von  $32$  (80%) bzw.  $24$  (60%) keimfähigen Körnern  $\text{m}^{-2}$ . Gesät wurde praxisüblich zwischen  $1$  und  $2$  cm tief. Wegen der sehr geringen Saatgutmengen von wenigen g Parzelle<sup>-1</sup>, wurde das Saatgut der saatstärkereduzierten Prüfvarianten mit keimunfähigem Rapssaatgut auf dieselbe Masse aufgefüllt wie die 100%-Saatstärkevarianten. Dies sollte technischen Fehlern bei der Aussaat im Verteilerkopf der Sämaschine vorbeugen. Das Rapssaatgut wurde, um die Keimunfähigkeit herzustellen, eine Stunde bei  $95^\circ\text{C}$  thermisch behandelt. Die beprobte Keimfähigkeit lag im Anschluss nach Probe bei 0%. Die N-Düngung erfolgte, wie auch beim Weizen, mit handelsüblichem Kalkammonsalpeter mit 27% N in zwei Gaben. Dabei wurden 70% der Gesamt-N-Menge zu Vegetationsbeginn und 30% zum

beginnenden Streckungswachstum gedüngt. Die Variante 100% N-Düngung entsprach dabei  $170 \text{ kg N ha}^{-1}$ . Daraus ergaben sich reduzierte N-Düngungen von  $136 \text{ kg N ha}^{-1}$  (80%) und  $102 \text{ kg N ha}^{-1}$  (60%).  $N_{\min}$  wurde nach jährlicher Messung als arithmetisches Mittel der Messwerte von der ersten N-Düngung abgezogen.



Photo 6: Verteilerkopf der Sämaschine (Photo: Desaga 2019).

Die K-Düngung erfolgte mit Kornkali (49,81% K) zu Vegetationsbeginn. Es wurden  $240 \text{ kg K ha}^{-1}$  gedüngt. Im letzten Versuchsjahr wurde die K-Düngung bei identischer Gesamtmenge gesplittet. Die erste K-Düngung erfolgte zu Vegetationsbeginn, die Restmenge wurde vier Wochen später appliziert.

Zur Anhebung des pH-Wertes und zur Vermeidung von Mängeln an Nährstoffen welche nicht als Prüffaktoren fungierten, wurden folgende Nährstoffmengen im Winterraps appliziert: Vor der letzten Bodenbearbeitung vor der Aussaat des Versuches  $3 \text{ t ha}^{-1}$  Rügener Kreidekalk ( $960,96 \text{ kg Ca ha}^{-1}$ ). Als praxisübliche Herbsdüngung wurden  $2 \text{ dt}$  Diammonphosphat (DAP)  $\text{ha}^{-1}$  in Stadium EC 14 gedüngt. Dabei wurden  $36,00 \text{ kg N ha}^{-1}$  und  $40,14 \text{ kg P ha}^{-1}$  gedüngt.

Zu Vegetationsbeginn wurden  $52,00 \text{ kg S ha}^{-1}$  und  $37,70 \text{ kg Mg ha}^{-1}$  als Kieserit ausgebracht. Die Applikation von Mikronährstoffen erfolgte in flüssiger Form beim Pflanzenschutz (YaraVita Raps DF). Es wurden zu Stadium EC 16-18 und im Frühjahr zu Stadium EC 30 jeweils  $2,0 \text{ kg ha}^{-1}$  appliziert. Kupfer (Cu) und Zink (Zn) wurden mit jeweils  $25 \text{ g ha}^{-1}$  als Soloprodukt appliziert.

## 2.4. Erfasste Versuchsparameter

Zur Prüfung der Hypothesen wurden verschiedene Parameter im Versuchsverlauf erfasst. Dabei wurde unterschieden zwischen Bodenanalytik, Wetterdaten, Boniturergebnissen und Pflanzenanalytik. Von zentraler Bedeutung waren die Ernteergebnisse für den Ertrag und die Qualitätsparameter des Ernteguts.

Boden- und Pflanzenanalysen wurden von der LUFA Rostock durchgeführt. Die Inhaltsstoffanalytik bei Weizen (Fallzahl, Rohproteinkonzentration) und Raps (Ölkonzentration) erfolgte bei der Agrolab Agrarzentrum GmbH in Leinefelde-Worbis.

In Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Braunschweig konnten zudem Daten zur Evapotranspiration der Kulturen und dem Verlauf der Bodenfeuchten gewonnen werden.

Aus der errechneten Evapotranspiration und den Kornerträgen wurde die Wassernutzungseffizienz für Weizen und Raps errechnet.

### 2.4.1. Bodenanalytik

Im ersten Versuchsjahr 2019 wurden vor Anlage der Parzellenversuche an drei verschiedenen Stellen des möglichen Versuchsstandortes Bodenproben aus 0-30 cm Bodentiefe gezogen, um die grundsätzliche Eignung des Standortes Liepen für die Versuchsanlage zu klären. Dabei wurden neben pH-Wert, P-, K- und Mg-Konzentration im Boden auch die potentielle Kationenaustauschkapazität ( $KAK_{pot}$ ) und der Anteil der organischen Substanz im Boden gemessen.

Jährlich wurden nach Anlage des Parzellenversuchs aus jedem Block fünf Bodenproben aus 0-30 cm Bodentiefe gezogen. In den Bodenproben wurden der pH-Wert, die P-, K- und Mg-Konzentration gemessen. Die Messungen dienten der Überprüfung der Bodenhomogenität innerhalb der Blöcke. Ebenfalls jährlich wurde eine Bodenprobe aus der Versuchsfläche aus 0-90 cm Bodentiefe in verschiedene Korngrößen fraktioniert; aus der Fraktionierung ließ sich die vorliegende Bodenart ableiten. Erfasst wurden zudem Trockenrohdichte und Skelettanteil des Bodens.

Diese drei Parameter waren wesentlich zur rechnerischen Bestimmung der nutzbaren Feldkapazität  $dm^{-1}$  Boden.

Die Durchwurzelungstiefen der Kulturen wurden durch mehrfache Probegrabungen am Standort ermittelt. Sperrschichten die ein Wurzelwachstum in noch tiefere Bodenschichten verhindert hätten, konnten nicht beobachtet werden.

Zu Vegetationsbeginn wurden aus den Prüfvarianten eins, sieben und dreizehn eines jeden Blocks  $N_{\min}$ -Proben aus 0-90 cm Bodentiefe gezogen. Ein Einfluss der Saatstärke auf die  $N_{\min}$ -Gehalte im Frühjahr konnte dadurch geprüft werden. Die  $N_{\min}$ -Proben wurden fraktioniert auf 0-30 cm Bodentiefe und 30-90 cm Bodentiefe. Die Fraktionierung der Probe fand statt, um eine mögliche Verlagerung von N in tiefere Bodenschichten beurteilen zu können.

### 2.4.1.1. pH-Wert

Der pH-Wert wurde entsprechend VDLUFA (Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten) I A 5.1.1 ermittelt (VDLUFA Methodenbuch I 2016). Dabei wurde die  $H^+$ -Ionen-Aktivität potentiometrisch in einer Suspension aus Boden und einer 0,01 M  $CaCl_2$ -Lösung gemessen. Durch die Verwendung der  $CaCl_2$ -Lösung wurden auch an Bodenpartikeln sorbierte  $H^+$ -Ionen durch Calcium substituiert und gelangten so in Lösung. Daher ist der pH-Wert bei Messung in  $CaCl_2$ -Lösung stets niedriger als in wässriger Suspension. Man spricht hierbei von Gesamtacidität (Kuntze et al. 1994).

Vor Beginn der Analytik wurde das pH-Messgerät mit bekannten Pufferlösungen kalibriert. Für die Analytik wurde der lufttrockene Boden durch ein Sieb mit 2 mm Maschenweite gesiebt. Im Anschluss wurden 10 g Boden mit 25 mL  $CaCl_2$ -Lösung versetzt und aufgerührt. Nach einem weiteren Aufrühren der Suspension binnen einer Stunde wurde nach Absetzen der Bodenpartikel in der Lösung der pH-Wert gemessen. Vor der Messung weiterer Proben wurde die pH-Elektrode mit destilliertem Wasser abgespült, um ein Verfälschen des Messergebnisses zu verhindern.

### 2.4.1.2. P- und K-Konzentration

Die Konzentrationen von P und K im Boden wurden entsprechend VDLUFA I A 6.2.1.1 gemessen (VDLUFA Methodenbuch I 2016). Dabei kam die CAL-Methode (Calcium-Acetat-Lactat-Methode) zum Einsatz. Für die Messung wurden 5 g lufttrockener und auf 2 mm gesiebter Boden mit 100 mL CAL-Lösung versetzt und 90 min maschinell geschüttelt. Die saure CAL-Lösung mit

einem pH-Wert von 4,1 setzt sich aus 0,5 M Calciumacetat und Calciumlactat sowie 0,3 M Essigsäure zusammen. Nach dem Schütteln wurden die Proben filtriert.

Zur photometrischen Messung von P in 4 mL Probenvolumen wurde nach Zugabe von Ammoniummolybdat und einer Reduktionslösung erneut gemischt. Im Anschluss konnte die Extinktion bei 580 nm mittels ICP-OES (Optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma) gemessen werden. Bei der ICP-OES werden die Proben in ein aus heißem Gas bestehendes Plasma eingeführt. Dabei kommt es zur Lichtemission der Atome und Ionen aus der Probensubstanz. Die Lichtemission wird spektral zerlegt: Aus den Wellenlängen erfolgt die Elementidentifikation, aus der Intensität wiederum die Quantifizierung des entsprechenden Elements in der Probe (Nölte 2020).

K wurde direkt im Filtrat mittels Flammenphotometrie bei 767 nm gemessen. Das Prinzip der Flammenphotometrie beruht darauf, dass angeregte Atome eines jeweiligen Elements bei Zufuhr in eine Gasflamme eine elementspezifische Färbung der Gasflamme verursachen. Im Falle von K entsteht ein blauviolettes Flammenbild. Betrachtet man dieses Flammenbild durch ein Spektrometer, so sind elementspezifische Spektrallinien erkennbar, aus deren Intensität auf die Elementkonzentration in der Probe rückgeschlossen werden kann (Hermann und Alkemade 1960).

### 2.4.1.3. Mg-Konzentration

Die Mg-Konzentration im Boden wurde entsprechend VDLUFA I A 6.2.4.2 gemessen (VDLUFA Methodenbuch I 2016). Hierfür wurden 5 g Boden, gesiebt auf 2 mm, mit 250 mL Doppellactat- Gebrauchslösung versetzt und 90 min maschinell geschüttelt. Die Doppellactat-Gebrauchslösung (pH-Wert 3,6) wurde hergestellt aus 120 g Calciumlactat, 800 mL kochendem Wasser und 40 mL HCL (10 M). Die Mg-Konzentration im Filtrat wurde mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) bei 285,2 nm gemessen.

Bei der Atomabsorptionsspektrometrie wird das Probenmaterial durch sehr starke Erhitzung in einzelne Atome zerlegt, welche eine Atomwolke bilden. Die einzelnen Atome sind in der Lage, Licht in bestimmten Wellenlängen zu absorbieren, also dessen Intensität zu vermindern. Mit einer externen Lichtquelle wird die Atomwolke mit verschiedenen Wellenlängen „durchleuchtet“. Gemessen wird bei der AAS die Intensitätsminderung einzelner Wellenlängen durch das Probenmaterial beziehungsweise die darin

enthaltenen Elemente. Je höher die Konzentration eines Elements in der Probe, umso stärker die Intensitätsminderung der entsprechenden Wellenlänge (Welz und Sperling 1997).

### 2.4.1.4. N<sub>min</sub>-Werte

Wegen der Gefahr fehlerhafter Ergebnisse durch Wärmeeinfluss auf das Probenmaterial wurden die N<sub>min</sub>-Proben unmittelbar nach der Probennahme gekühlt zur LUFA Rostock gebracht. Die Temperatur sollte dabei 4°C keinesfalls überschreiten. Die N<sub>min</sub>-Gehalte wurden entsprechend VDLUFA I A 6.1.4.1 gemessen (VDLUFA Methodenbuch I 2016). Dabei wurden Nitrat und Ammonium aus einer nicht getrockneten Bodenprobe in einer 0,0125 M CaCl<sub>2</sub>-Lösung extrahiert. Dafür wurden 150 g Probenmaterial, welches vorher auf 5 mm gesiebt wurde, mit 600 mL CaCl<sub>2</sub>-Lösung versetzt und 1 h geschüttelt. Die Probenmasse wurde so groß gewählt, da es sonst schnell zu mangelnder Homogenisierung des erdfeuchten Probematerials kommt. Im Anschluss an das maschinelle Schütteln wurden die Proben filtriert. Für die weiteren Analyseschritte kamen unterschiedliche Verfahren für Nitrat beziehungsweise Ammonium zur Anwendung.

Beide Stickstoffformen wurden photometrisch quantifiziert. Dabei wurde die Extinktion, also die Lichtundurchlässigkeit der Proben, gemessen. Je stärker die Absorption des von einer Lichtquelle durch die Probe gesandten Lichtstrahls ist, umso höher ist die Konzentration des entsprechenden Elements in der Probe. Das in der Probenlösung enthaltene Nitrat konnte durch Nutzung einer Reduktionssäule aus Cadmiumspänen zu Nitrit reduziert werden. Durch Zugabe von Sulfanilamid und N-(1-Naphtyl)-ethyldiamindihydrochlorid bildete sich ein Komplex. Die Extinktion dieses Komplexes wurde bei 543 nm photometrisch gemessen.

Die Ermittlung der Ammoniumkonzentration erfolgte nach der Berthelot-Reaktion. Unter Zugabe von Salicylat, Hypochlorit und Nitroprussid bildet sich bei Anwesenheit von Ammoniak im basischen Milieu ein blaugrüner Farbkomplex, der photometrisch bei 660 nm gemessen wurde.

### 2.4.1.5. Kationenaustauschkapazität

Die potentielle Kationenaustauschkapazität (KAK<sub>pot</sub>) wurde entsprechend dem Handbuch forstliche Analytik A3.2.1.2 (König 2014) gemessen. Dabei wurde eine 2,5 g schwere Bodensäule aus auf 2 mm gesiebttem lufttrockenem Boden

mit 5 mL gepufferter BaCl<sub>2</sub>-Triäthanolamin-Lösung (pH-Wert 8,1) eingeweicht. Die Lösung setzte sich zusammen aus BaCl<sub>2</sub>-Lösung (0,1 M) und CaCl<sub>2</sub>-Lösung (0,1 M), gemischt im Verhältnis 1:1. Nach zwölfstündiger Wartezeit wurde der Boden zunächst mit 50 mL der genannten Lösung perkoliert. Es schloss sich eine Perkolation mit 50 mL ungepufferter BaCl<sub>2</sub>-Lösung (0,1 M) an. Die Gesamtperkulationsdauer musste mindestens 4 h betragen und wurde durch Einstellen der Tropfgeschwindigkeit sichergestellt. Das Perkolat wurde für die weitere Analytik aufgehoben. Das überschüssige in der Bodensäule befindliche BaCl<sub>2</sub> wurde im Anschluss mit 50 mL demineralisiertem Wasser ausgewaschen. Die an der Bodensäule sorbierten Bariumionen wurden danach mittels vierstündiger Perkolation mit einer 0,1 M MgCl<sub>2</sub>-Lösung ausgetauscht. In diesem zweiten Perkolat wurde die Bariumkonzentration mittels Atomabsorptionsspektrometrie gemessen; die Summe der Bariumionenäquivalente entsprach dabei der KAK<sub>pot</sub>. In dem ersten Perkolat wurden mittels Atomabsorptionsspektrometrie Ca, K, Mg und Na gemessen, um die Anteile der einzelnen Ionen an der KAK<sub>pot</sub> zu ermitteln.

### 2.4.1.6. Organische Substanz

Die organische Substanz wurde gemäß DIN ISO 10694 ermittelt (International Organization for Standardization 1995). Dabei wurde der gesamte in der Probe enthaltene Kohlenstoff in dem auf 2 mm gesiebten Boden aus 0-30 cm Bodentiefe erfasst. Zur Trennung des Kohlenstoffs in der organischen Bodensubstanz und des Kohlenstoffs aus Carbonaten, wurde der Boden zunächst durch Zusatz von 4 M Salzsäure carbonatfrei gemacht. Im Anschluss wurde eine definierte Menge Boden bis auf 900°C erhitzt. Dies geschah unter Nutzung von kohlenstoffdioxidfreien Gasen. Das im Rahmen der Erhitzung freigesetzte Kohlenstoffdioxid wurde quantifiziert und daraus die organische Bodensubstanz errechnet.

### 2.4.1.7. Korngrößenfraktionierung

Die Korngrößenfraktionierung wurde entsprechend DIN ISO 11277:1998-05 15 durchgeführt (Beuth Verlag GmbH 2002). Dafür wurde ausschließlich lufttrockener Feinboden mit Partikelgrößen  $\leq 2$  mm verwendet. Die verschiedenen Partikelgrößen von 2 mm bis 0,002 mm wurden durch trockenes bzw. nasses Sieben und durch verschiedene Sedimentationseigenschaften voneinander getrennt. Partikel  $\leq 0,063$  mm wurden ausschließlich durch ihr unterschiedliches Sedimentationsverhalten

getrennt. Alle Partikel  $\leq 0,002$  mm fielen der Fraktion Ton zu. Sand- und Schluffpartikel wurden wiederum in die Unterkategorien Grob, Mittel und Fein aufgeteilt. Dadurch wurden sieben verschiedene Korngrößenfraktionen ermittelt.

### 2.4.1.8. Trockenrohddichte und Skelettanteil

Zur Bestimmung von Trockenrohddichte und Skelettanteil des Bodens wurden fünf Stechzylinderproben mit einem Durchmesser von 25 mm aus 0-90 cm Bodentiefe gezogen. Die Bodenproben wurden bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und gewogen. Aus dem bekannten Volumen des Stechzylinders und den durch Wägung ermittelten Massen des Bodens ließ sich die Trockenrohddichte errechnen.

Der Skelettanteil wurde bestimmt durch Sieben von lufttrockenem Boden und Volumenbestimmung von Bodenpartikeln  $> 2$  mm aus der Bodenprobe.

### 2.4.1.9. Verfügbare Feldkapazität

Aus der Fraktionierung des Feinbodens und der daraus möglichen Ableitung der vorliegenden Bodenart, dem Gehalt an organischer Substanz, dem Skelettanteil des Bodens und der Lagerungsdichte ließ sich aus der bodenkundlichen Kartieranleitung KA5 von 2005 eine nutzbare Feldkapazität (nFK)  $\text{dm}^{-1}$  Boden ableiten. Es wurde dabei unterstellt, dass die nFK  $\text{dm}^{-1}$  Boden im gesamten durchwurzelten Bodenprofil gleichbleibend ist. Durch wiederholte Probegrabungen wurde die maximale Durchwurzelungstiefe der Kulturen Weizen und Raps ermittelt. Aus der Durchwurzelungstiefe in dm und der nFK  $\text{dm}^{-1}$  Boden konnte die verfügbare Feldkapazität (vFK) für beide Kulturen geschätzt werden.

### 2.4.2. Wetterdaten

Durch eine direkt am Versuchsstandort vorhandene Wetterstation (Davis Instruments Vantage Vue DAV-6250EU Funk-Wetterstation) wurden tagesgenau Daten zu Temperatur (Minima, Maxima, Durchschnitt) in °C erfasst. Der Temperaturdurchschnitt entsprach dem arithmetischen Mittel von acht täglichen Messungen.

Zusätzlich erfasst wurden tagesgenau Niederschlag (mm), Windgeschwindigkeit ( $\text{m s}^{-1}$ ), relative Luftfeuchtigkeit (%) sowie Strahlung ( $\text{W m}^{-2}$ ). Diese Daten waren Grundlage aller weiteren Berechnungen zum Wasserhaushalt.

### 2.4.3. Bonituren am Parzellenversuch

Bonituren am Parzellenversuch wurden etwa alle 14 Tage während der Vegetationsperiode erstellt. Dabei wurden etwaige Auffälligkeiten am Versuch beziehungsweise an einzelnen Parzellen schriftlich festgehalten. Ebenso erfolgten Bonituren auf Pflanzenanzahl in den einzelnen Parzellen, Ährenanzahl beim Winterweizen und Trockenstresssymptome (Blattrollen, Welken).

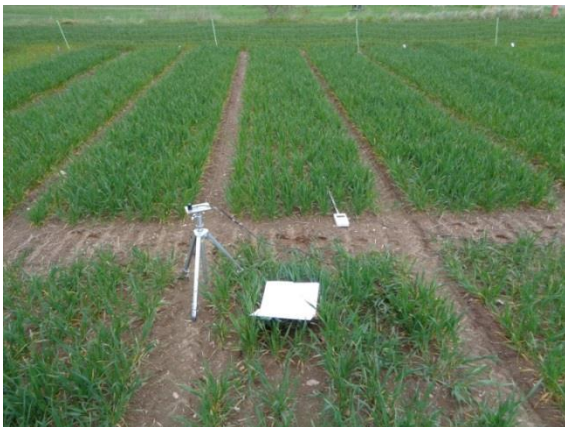


Photo 7: Messung des LAI im Weizen am 03.05.2021 (Photo: Desaga 2021).

Der Blattflächenindex (LAI) wurde im ersten Versuchsjahr zum Termin mit dem unterstellten maximalen LAI manuell an den verschiedenen Saatstärkevarianten gemessen. In den Folgejahren wurde zur LAI-Messung das Messgerät ACCUPAR LP-80 PAR/LAI Ceptometer des Herstellers Meter Group vom Institut für Pflanzenernährung der Justus-Liebig-Universität Gießen genutzt. Dabei wurde die Beschattung einer Messlanze durch den

Pflanzenbestand gemessen. Als Referenz diente eine auf einem Stativ angebrachte unbeschattete Messoptik. Das Messverfahren war auf eine hohe Strahlungsintensität angewiesen um zuverlässige Ergebnisse zu liefern; wechselnde Bewölkung störte die Messungen erheblich.

### **2.4.4. Pflanzenanalytik Weizen**

Um den Ernährungszustand der Weizenpflanzen für N und K im Versuch beurteilen zu können, wurden im zweiten und dritten Versuchsjahr aus allen Parzellen in Stadium EC 34/37 Pflanzenproben gezogen. Dabei wurde die gesamte Weizenpflanze ab 5-8 cm Wuchshöhe als Probenmaterial verwendet.

Die Pflanzenanalyse für N wurde entsprechend VDLUFA III 31.2: 1983-10 durchgeführt (VDLUFA Methodenbuch III 2006). Dafür wurde das Probenmaterial bei 60-70°C getrocknet und in einer Mühle auf unter 1 mm Partikelgröße gemahlen. Anschließend wurde das Probenmaterial im NIRSystem 5000/6500 der Firma Foss mittels Nahinfrarotspektrometrie auf seine N-Konzentration analysiert. Das Prinzip der Nahinfrarotspektrometrie beruht auf der Anregung von Molekülen durch Infrarotstrahlung, das heißt elektromagnetischer Strahlung in einem Wellenlängenbereich von 800-200.000 nm. Ein Teil der Strahlung wird vom Probenmaterial absorbiert; es kommt zur Umwandlung der Energie der elektromagnetischen Strahlung in Schwingungsenergie (Günzler 2012). Die absorbierten Wellenlängen und die Frequenz der dabei entstehenden Schwingungen sind elementspezifisch. Die Intensitätsminderung der Strahlung durch die Absorption gegenüber einer Referenzstrahlung ist linear zur Elementkonzentration in der zu analysierenden Probe (Uray et al. 1999). Die Analyse für die K-Konzentration wurde entsprechend VDLUFA III 10.8.3 durchgeführt (VDLUFA Methodenbuch III 2006). Dafür wurde das Probenmaterial bei 60°C getrocknet und in einer Mühle auf unter 1 mm Partikelgröße gemahlen. Aus dem homogenisierten Probenmaterial wurden Tabletten mit einer Masse von 5 g gepresst, welche spektrometrisch auf ihre K-Konzentration analysiert wurden. Dabei fand das Prinzip der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) Anwendung. Die RFA macht sich das Prinzip der Fluoreszenz zu Nutze: Nach Anregung eines Stoffes mit Strahlung, emittiert dieser sogenanntes Fluoreszenzlicht (Heldt und Piechulla 2008). Bei der RFA werden Atome mit Röntgenstrahlen angeregt, woraufhin die Atome charakteristische Röntgenstrahlen emittieren. Die spektrale Zusammensetzung und die Intensität der Fluoreszenzstrahlung sind dabei elementspezifisch und können zur Quantifizierung des entsprechenden Elements in der Probe genutzt werden (Hahn-Weinheimer et al. 1984).

### 2.4.5. Ertrags- und Qualitätsparameter bei Weizen

Neben dem absoluten Kornertrag wurde die Ertragszusammensetzung bei Weizen ermittelt. Der Kornertrag setzt sich zusammen aus den Komponenten Ähren  $\text{m}^{-2}$ , der Kornanzahl  $\text{Ähre}^{-1}$  und der TKM. Der erste festgehaltene Parameter war die Ährenanzahl  $\text{m}^{-2}$ ; diese wurde durch Zählung nach dem Ährenschieben bestimmt. Dabei wurden die Ähren innerhalb einer laufenden Saatreihe ausgezählt, so dass ein fehlerhaftes Platzieren eines Zählrahmens vermieden werden konnte. Diese Technik ist in Parzellenversuchen üblich (Ströbele mündlich 2019, Inhaber der Quintus GmbH). Der Kornertrag mit originalen Kornfeuchten wurde durch den Parzellenmähdrescher erfasst; es erfolgte eine rechnerische Bereinigung auf 14,5% Kornfeuchte für alle erfassten Parameter und eine Umrechnung des Kornertrages auf die Einheit  $\text{dt ha}^{-1}$ .

Das Hektolitergewicht sowie die TKM konnten an den beim Drusch gewonnenen Erntegutmustern mit geeichten Geräten der Quintus GmbH gemessen werden. Das Hektolitergewicht wurde an einem Granomaten des Typen Aquamatic 5200 des Herstellers Schramm gemessen. Zur Ermittlung der TKM wurde ein Seed Analyzer 5.0 von MARVIN genutzt.



Photo 8: Seed Analyzer Marvin 5.0 (Photo: Desaga 2022).

Die Parameter Kornanzahl  $\text{Ähre}^{-1}$  und Kornanzahl  $\text{m}^{-2}$  wurden aus dem Kornertrag, der TKM und der ausgezählten Ährenanzahl beziehungsweise der Parzellenfläche errechnet.

### 2.4.5.1. Fallzahl

Die Fallzahl wurde entsprechend Hagberg-Perten und damit nach ICC-Standard 107 / 1: 1995 gemessen (Beuth Verlag GmbH 2009). Die Fallzahl gibt Auskunft über die Alpha-Amylaseaktivität und damit über den enzymatischen Stärkeabbau im Weizenkorn. Es wurden 300 g Weizen, der vorab vom Spelz und Fremdkörpern befreit wurde, fein gemahlen (80% der Probenmasse müssen  $\leq 200 \mu\text{m}$  sein). Im Anschluss ließ man die Mehlsprobe 1 h abkühlen. Es wurden 6,95 g Weizenmehl in eine Viskosimeterröhre mit 25 mL destilliertem Wasser mit 22°C Temperatur versetzt und mehrfach geschüttelt, um eine homogene Suspension herzustellen. Durch die Wasserzugabe begann die Verkleisterung der Stärke. Unter Rühren mit einem Rührstab in der Viskosimeterröhre wurde die Lösung im siedenden Wasserbad erhitzt; der Rührstab wurde nach 60 s Rührdauer nach oben gezogen. Im Anschluss ließ man den Rührstab in der Viskosimeterröhre absinken. In Abhängigkeit der Enzymaktivität und damit der Fähigkeit zur Verkleisterung sinkt der Rührstab unterschiedlich schnell durch die Wasser-Mehl-Suspension zu Boden. Die Fallzahl (s) entspricht der Zeit, welche der Rührstab bis zum Erreichen eines definierten Messpunktes benötigt.

### 2.4.5.2. Rohproteinkonzentration und Rohproteinertrag

Die Rohproteinkonzentration wurde entsprechend DIN EN ISO 16634-2: 2016-11 gemessen (Beuth Verlag GmbH 2016). Dabei kam die Bestimmung des Gesamtstickstoffs nach DUMAS zum Einsatz. Es wird bei der Methode, wie auch bei der Kjeldahl-Methode, nicht zwischen Protein-N und Nicht-Protein-N unterschieden. Der zur Analyse genutzte Weizen wurde mit einer Mühle auf maximal 1 mm Partikelgröße gemahlen. Die dem Messgerät zugeführte Probenmasse war von 0,1-3,5 g zu wählen. Die Probe wurde in einem DUMAS-Gerät bei 850°C quantitativ verbrannt. Bei der Verbrennung entstehende Zersetzungsprodukte wie Stickstoffoxide, CO<sub>2</sub> und Wasserdampf wurden mittels Helium als Trägergas durch das DUMAS-Gerät geleitet. Dabei wurden N-Oxide zu molekularem N<sub>2</sub> reduziert. Nach Entfernung störender Begleitstoffe wie CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O und flüchtiger Halogen- und Schwefelverbindungen, wurde das Helium-Stickstoff-Gemisch durch einen Wärmeleitfähigkeitsdetektor geleitet. An einer Wärmeleitfähigkeitsmesszelle wurde der N quantitativ bestimmt. Mittels eines Faktors (5,7) konnte aus der N-Konzentration die Rohproteinkonzentration errechnet werden.

Aus den Parametern Kornertrag und Rohproteinkonzentration wurde der Rohproteinertrag (dt ha<sup>-1</sup>) errechnet.

### **2.4.6. Ertrags- und Qualitätsparameter bei Raps**

Bei Raps wurden neben dem Kornertrag die TKM und die Ölkonzentration ermittelt. Wie auch bei Weizen wurde der Kornertrag beim Drusch festgehalten und im Anschluss rechnerisch auf 9% Kornfeuchte korrigiert. Der Parameter Kornanzahl Pflanze<sup>-1</sup> wurde rechnerisch aus Kornertrag, TKM und der Pflanzenanzahl Parzelle<sup>-1</sup> (bei 95% Feldaufgang) errechnet. Die Kornanzahl m<sup>-2</sup> wurde aus Kornertrag, Parzellenfläche und TKM errechnet. Die TKM wurde, wie auch beim Weizen, mit dem Seed Analyzer Marvin 5.0 gemessen.

#### 2.4.6.1. Ölkonzentration und Ölertrag

Die Ölkonzentration bei 9% Kornfeuchte wurde entsprechend DIN EN ISO 10565: 1998-10 gemessen (Beuth Verlag GmbH 1998). Dabei fand das Prinzip der gepulsten Kernresonanzspektroskopie (NMR) Anwendung. Dafür wurden 25 g saubere Rapssamen dem Kernresonanzspektroskopiegerät zugeführt. Bei der NMR wird die Absorption elektromagnetischer Strahlung durch Atomkerne gemessen. Um die Atomkerne zur Absorption zu befähigen, wird die zu analysierende Probe einem Magnetfeld ausgesetzt. Gemessen wird die Reaktion des Magnetfeldes der Atomkerne selbst zu dem sie umgebenden Magnetfeld. Die Atome können sich entsprechend ihres Energiezustandes in zwei Richtungen, das heißt in zwei Energiezuständen im Magnetfeld ausrichten. Um eine Neuausrichtung (Resonanz) der Atome, das heißt den Wechsel vom energieärmeren zum energiereicheren Zustand zu erreichen, wird Strahlung spezifisch in Frequenz und Intensität benötigt. Die Energiemenge und Frequenz, welche zum Einleiten der Resonanz benötigt beziehungsweise vom Atomkern absorbiert wird, gibt Auskunft über die Zusammensetzung des Anylantens (Skoog und Leary 1996).

### 2.4.7. Evapotranspiration, Bodenfeuchte und Wassernutzungseffizienz

In Zusammenarbeit mit dem „Zentrum für agrarmeteorologische Forschung“ des Deutschen Wetterdienstes (DWD) wurden begleitend zum Parzellenversuch Daten zum Wasserhaushalt mit dem Modell AMBAV („Agrarmeteorologisches Modell zur Berechnung der aktuellen Verdunstung“) errechnet. Ursprünglich wurde das Modell AMBAV entwickelt, um unter verschiedenen Kulturpflanzenbeständen die Bodenfeuchten zu errechnen. Grundlage des Modells ist die Penman-Monteith-Gleichung (Abbildung 6).

$$\lambda E = \frac{Se (Rn - G) + \rho c_p (e_s - e) / r_a}{Se + \gamma (1 + r_s / r_a)}$$

$\lambda E$	=	Verdunstung (kg (m <sup>2</sup> s))
$Se$	=	Änderung des Sättigungsdampfdrucks
$Rn$	=	Strahlung (Watt m <sup>-2</sup> )
$G$	=	Bodenwärmestrom (Watt m <sup>-2</sup> )
$\rho$	=	Luftdichte (kg m <sup>-3</sup> )
$c_p$	=	spezifische Wärme der Luft bei konstantem Luftdruck (kg K <sup>-1</sup> )
$e_s$	=	Sättigungsdampfdruck (mbar)
$e$	=	Dampfdruck (mbar)
$r_a$	=	aerodynamischer Widerstand (s m <sup>-1</sup> )
$\gamma$	=	Psychrometerkonstante (mbar K <sup>-1</sup> )
$l$	=	Lufttemperatur (°C)
$r_s$	=	stomatärer Widerstand (s m <sup>-1</sup> )

Abbildung 6: Penman-Monteith Gleichung als Grundlage für AMBAV (verändert nach Löpmeier 1994).

Auf eine genaue Erläuterung der mathematischen Hintergründe des Modells AMBAV soll an dieser Stelle verzichtet werden. Eine genaue Methodenbeschreibung von Löpmeier und weitere Literaturhinweise sind beim DWD erhältlich. Weitere Erläuterungen zum Modell wurden publiziert von Herbst et al. (2021). Wichtigste Eingangsparameter für die Verdunstung sind Strahlung, Bodenwärmestrom, Temperatur, Wind, Luftfeuchtigkeit und kulturspezifische Rauigkeit beziehungsweise Bestandswiderstände, in die auch Bestandshöhe und Blattflächenindex einfließen. Das Modell AMBAV berücksichtigt die Folgen limitierter Wasserversorgung (einsetzenden Trockenstress) auf die Transpiration. Dies geschieht kulturspezifisch über die Eingangsgröße Bestandswiderstand.

Die Vorzüglichkeit des seit über zwanzig Jahren durch Lysimeterversuche mit zwei verschiedenen Bodenarten verifizierten und stets weiterentwickelten Modells liegt in der möglichen Nutzung vor Ort gewonnener synoptischer Daten. So war es möglich, neben der wie beschrieben ermittelten verfügbaren Feldkapazität des Versuchsstandortes auch die am Versuchsstandort gewonnenen Wetterdaten und den durch Messung ermittelten maximalen Blattflächenindex in das Modell einzupflegen.

Mit dem Modell AMBAV ließ sich die Evapotranspiration der Pflanzenbestände des Versuchs rechnerisch in Transpiration, Evaporation und Interzeptionsverdunstung aufteilen.

Alle drei Formen der Verdunstung werden im Modell AMBAV vom Blattflächenindex beeinflusst.

### 2.4.7.1. Simulation der Bodenfeuchte und Wassernutzungseffizienz

Neben der Aufteilung der Evapotranspiration in Ihre Einzelgrößen konnte mit dem Modell AMBAV der Verlauf der verfügbaren Feldkapazität simuliert werden. Dafür wurden folgende vereinfachenden Annahmen getroffen:

Es wurde unterstellt, dass die nutzbare Feldkapazität  $\text{dm}^{-1}$  Boden über den gesamten durchwurzelten Bodenhorizont gleichbleibend ist.

Ebenso wurde bei dem simulierten Verlauf der Bodenfeuchte stets von einer verfügbaren Feldkapazität ausgegangen, die bei maximal entwickelter Durchwurzelung vorliegt. Da Trockenstress erst mit weit vorangeschrittener Entwicklung, also auch mit hoher Durchwurzelungstiefe eintrat, war diese Vereinfachung gerechtfertigt. Es wurden also keine einzelnen Bodenschichten und Durchwurzelungstiefen zum Verlauf der Bodenfeuchte betrachtet, sondern lediglich der im Durchwurzelungsmaximum durchdrungene Bodenhorizont in seiner Gesamtheit. Ein möglicher kapillarer Aufstieg von Wasser aus Bodenschichten unterhalb der Durchwurzelungsmaxima wurde auf dem grundwasserfernen Sandstandort nicht berücksichtigt.

Je Kultur wurden jährlich drei verschiedene Verläufe der verfügbaren Feldkapazität in Abhängigkeit von dem LAI errechnet. In den Berechnungen zu den Wasserbilanzen der Versuchskulturen wurde der LAI ausschließlich durch die Saatstärke beeinflusst, da diese den größten Einfluss der Prüffaktoren auf den LAI hatte. Die Prüffaktoren N-Düngung und K-Düngung fanden keinen Eingang in Form von Beeinflussung des Blattflächenindex in die Simulation, um den Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht zu sprengen. Im Modell wurde von einem gemessenen maximalen LAI des Weizens zu Stadium EC 39

(Fahnenblatt voll entwickelt) und des Raps zu Stadium EC 65 (Vollblüte) ausgegangen. Die Entwicklung des LAI innerhalb der Vegetationsperiode entsprach einer Simulation des DWD-Modells; stichprobenartige LAI-Messungen an den Beständen des Parzellenversuchs bis zum Erreichen des maximalen LAI deckten sich gut mit dem im DWD-Modell simulierten LAI.

Im DWD-Modell wurde unterschieden zwischen LAI-Green und LAI-Yellow. Der für die vorliegende Arbeit relevante LAI-Green beschreibt grüne Blattfläche, die transpiert. Der LAI-Yellow hingegen beschreibt das Verhältnis von seneszenten Blattfläche zu Bodenoberfläche. Eine Zunahme des LAI-Yellow im Vegetationsverlauf ab Blüte bewirkt also zwangsweise eine Reduktion des LAI-Green; dies muss bei Betrachtung der Ergebnisse zu Evapotranspiration und Bodenfeuchte beachtet werden. Da die seneszente Blattfläche nicht mehr transpiert, spielt sie für die Berechnungen der Transpiration keine Rolle, beeinflusst aber durch Beschattung des Bodens die Evaporation. Im Ergebnisteil wird lediglich der LAI-Green vorgestellt, da dieser intensiver auf die verschiedenen Einzelkomponenten der Evapotranspiration wirkte.

Aus den errechneten Evapotranspirationssummen und den Kornertragsdaten ließ sich die Wassernutzungseffizienz ( $g \text{ TS Kornertrag} (L \text{ H}_2\text{O})^{-1}$ ) errechnen. Die Wassernutzungseffizienz wurde für beide Kulturen errechnet.

## 2.5. Statistische Auswertung

Der Parzellenversuch hatte je Prüfvariante vier Wiederholungen ( $n = 4$ ); das Prinzip der Randomisierung innerhalb der Blöcke wurde eingehalten. Zur Vermeidung von Nachbarschaftseffekten wurden Kontrollprüfglieder genutzt. Die Voraussetzung für eine statistische Auswertung war damit gegeben. Die Versuchsjahre wurden unabhängig voneinander verrechnet. Damit sollte eine Interpretation der Ergebnisse unter Berücksichtigung der jährlich wechselnden Witterung (vor allem dem Einsetzen von Trockenstressphasen) ermöglicht werden.

Als statistischer Lageparameter wird in allen Säulendiagrammen das arithmetische Mittel der Stichproben abgebildet. Das arithmetische Mittel ist der Quotient aus der Summe der gemessenen Werte und der Anzahl der Wiederholungen  $n$ . Als Streuungsmaß der Stichproben ist der Standardfehler als Fehlerbalken ober- und unterhalb vom arithmetischem Mittel eingezeichnet. Der Standardfehler errechnet sich dabei als Quotient aus Standardabweichung und der Quadratwurzel aus  $n$ . Die Standardabweichung wiederum wird errechnet aus dem Streuungsmaß der Varianz (Köhler et al. 2012).

Zur Überprüfung statistisch signifikanter Effekte wurden die erfassten Parameter mit einer mehrfaktoriellen Varianzanalyse verrechnet. Vorab wurde mit dem Levene-Test die Varianzhomogenität geprüft. Im Anschluss an die ANOVA wurden zur Prüfung der Hypothesen Mittelwertvergleiche einzelner Prüfvarianten durchgeführt.

Zum Mittelwertvergleich einzelner Prüfvarianten wurden lineare Kontraste genutzt. Diese sind bei a priori Formulierung der Kontraste als t-Test üblich (Köhler et al. 2012, Thomas 2006). Bei den linearen Kontrasten wurden nicht alle möglichen Mittelwertvergleiche, sondern lediglich definierte Mittelwertvergleiche durchgeführt.

Zur Prüfung möglicher K-Düngeeffekte wurden die K-gedüngten Prüfvarianten mit den jeweiligen bei N-Düngung und Saatstärke identischen Prüfvarianten ohne K-Düngung verglichen.

Zur Überprüfung der Saatstärkeneffekte auf Kornerträge und Qualitäten wurden lediglich die drei Prüfvarianten mit maximaler N-Düngung und erfolgter K-Düngung bei variierten Saatstärken miteinander verglichen.

Zur Prüfung möglicher N-Düngeeffekte wurden die Prüfvarianten mit variiertes N-Düngeintensität innerhalb eines Saatstärkeniveaus bei erfolgter oder unterlassener K-Düngung miteinander verglichen.

Eine Adjustierung zur Vermeidung der  $\alpha$ -Fehlerkumulierung bei multiplen Testen wurde bei der begrenzten Testanzahl nicht durchgeführt. Sie ist an dieser Stelle nicht zwingend notwendig, da lediglich der unmittelbare Paarvergleich der jeweiligen Prüfvarianten untereinander interessiert.

Dieses Vorgehen sollte bei der Einordnung der Ergebnisse berücksichtigt werden (Perneger 1998, Saville 1990, 2003 und 2015).

Bei allen Auswertungen wurde ein Signifikanzniveau von  $p = 0,05$  genutzt.

Für die statistische Auswertung wurden Microsoft Excel 2010, IBM SPSS Statistics 27 und RStudio genutzt. Die Linearen Kontraste wurden mit Hilfe der STAT-UP Statistical Consulting & Data Science GmbH in München gerechnet.

### 3. Ergebnisse

Aufgrund der dreijährigen Wiederholung des Versuches liegt eine Fülle an Datensätzen für Wetter, Evapotranspiration, Bodenfeuchte, Erträge und Qualitäten vor. Ergebnisse aus dem Jahr 2020 sind mit **A**, Ergebnisse aus dem Jahr 2021 mit **B** und Ergebnisse aus dem Jahr 2022 mit **C** innerhalb der Diagramme gekennzeichnet. Diagramme, die Ergebnisse zu mehreren Versuchsjahren zeigen, tragen keine extra Kennzeichnung.

#### 3.1. Bodenanalytik

##### 3.1.1. pH-Wert, P- und Mg-Konzentration

Der pH-Wert sowie die Konzentrationen an P und Mg in 0-30 cm Bodentiefe sind für die Versuchsanlagen für Weizen und Raps jeweils nach der Kalkung für alle drei Versuchsjahre in den Tabellen 1 und 2 dargestellt.

Die pH-Werte waren zwischen den drei Versuchsjahren unterschiedlich und variierten zwischen pH-Wert = 4,3 und 6,0; innerhalb der Versuchsjahre und –anlagen waren die Variationen deutlich geringer. Besonders niedrige pH-Werte wurden für beide Versuchsanlagen im Versuchsjahr 2021/2022 gemessen. Der pH-Wert des Versuchsstandortes war damit insgesamt als schwach bis ausreichend einzustufen (Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern 2017).

Die P-Konzentrationen in 0-30 cm Bodentiefe lagen zwischen 5,0-13,0 mg P (100 g Boden)<sup>-1</sup> in den drei Versuchsjahren und damit in Gehaltsklasse C-D (4,36–13,96 mg P (100 g Boden)<sup>-1</sup>). Die P-Konzentration im Boden variierte zwischen den einzelnen Versuchsjahren mäßig.

Die P-Versorgung des Versuchsstandortes war damit insgesamt als ausreichend bis gut einzustufen.



Photo 9: Bohrstock zur Bodenprobenentnahme in 0-30 cm Bodentiefe im Herbst 2019 (Photo: Desaga 2019).

Tabelle 1: pH-Wert nach Kalkung, P- und Mg-Konzentration in 0-30 cm Bodentiefe in den Versuchsanlagen für Weizen für alle drei Versuchsjahre.

<b>Weizen</b>	2019/2020	2020/2021	2021/2022
pH-Wert (CaCl <sub>2</sub> )	4,9 – 5,1	4,7 – 5,3	4,3 – 4,6
mg P (100 g Boden) <sup>-1</sup> (CAL)	8,8 – 10,4	5,0 – 12,0	10,0 – 13,0
mg Mg (100 g Boden) <sup>-1</sup> (CaCl <sub>2</sub> )	3,1 – 4,2	2,5 – 4,0	1,0 – 2,0

Die Mg-Konzentrationen im Boden lagen in den ersten beiden Versuchsjahren zwischen 2,5–5,0 mg Mg (100 g Boden)<sup>-1</sup> und damit in Gehaltsklasse B-C (3,0–6,0 mg Mg (100 g Boden)<sup>-1</sup>). Im dritten Versuchsjahr 2021/2022 lagen die Mg-Konzentrationen in 0-30 cm Bodentiefe nur bei 1,0–4,0 mg Mg (100 g Boden)<sup>-1</sup> und waren besonders niedrig in der Versuchsanlage für Weizen. Die Mg-Konzentrationen fielen damit in die Gehaltsklassen A-C. Die Magnesiumversorgung des Versuchsstandortes war damit insgesamt als schwach einzustufen.

Tabelle 2: pH-Wert nach Kalkung, P- und Mg-Konzentration in 0-30 cm Bodentiefe in den Versuchsanlagen für Raps für alle drei Versuchsjahre.

<b>Raps</b>	2019/2020	2020/2021	2021/2022
pH-Wert (CaCl <sub>2</sub> )	5,4 – 6,0	4,3 – 5,3	4,5 – 5,1
mg P (100 g Boden) <sup>-1</sup> (CAL)	5,8 – 6,8	9,0 – 12,0	7,0 – 11,0
mg Mg (100 g Boden) <sup>-1</sup> (CaCl <sub>2</sub> )	3,5 – 5,0	2,0 – 4,0	3,0 – 4,0

### 3.1.2. K- Konzentration

Die K-Konzentration in 0-30 cm Bodentiefe lag in den Versuchsanlagen für Weizen über den gesamten Versuchszeitraum zwischen 7,0-14,0 mg K (100 g Boden)<sup>-1</sup> und damit nahezu ausschließlich in Gehaltsklasse C (8,3-15,0 mg K (100 g Boden)<sup>-1</sup>). Dies zeigt Abbildung 7. Im Versuchsjahr 2019/2020 waren die K-Konzentrationen im Boden gemessen an den weiteren Versuchsjahren besonders hoch.

Lediglich in 2020/2021 war die K-Konzentration in der Versuchsanlage für Weizen nur als knapp ausreichend zu bezeichnen.

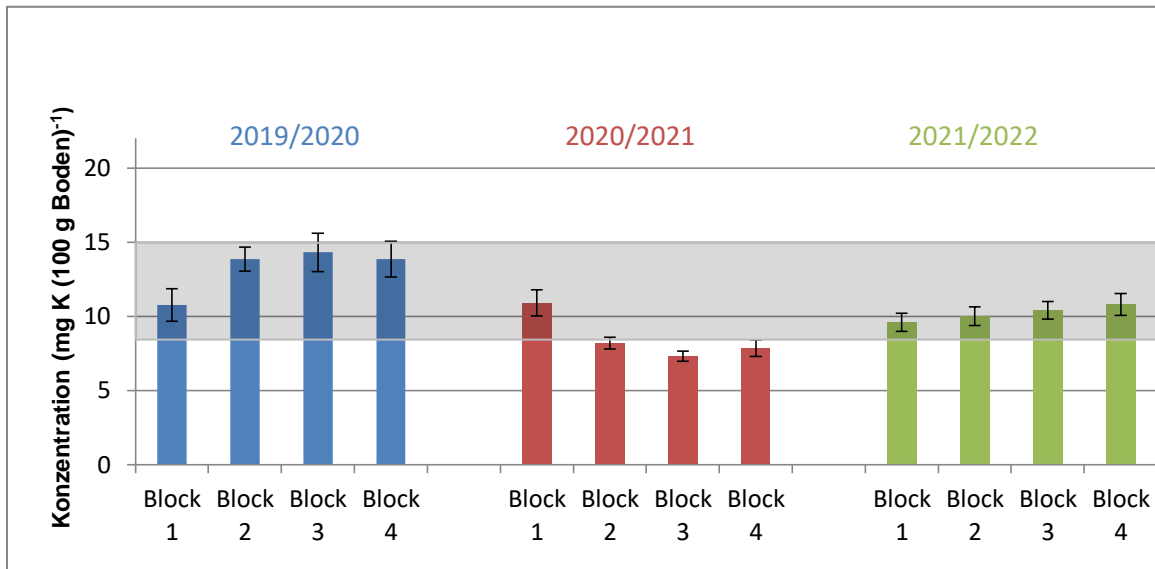


Abbildung 7: K-Konzentration (mg K (100 g Boden)<sup>-1</sup>) in 0-30 cm Bodentiefe in den Versuchsanlagen für Weizen für alle drei Versuchsjahre. Grau hinterlegt ist die Gehaltsklasse C für K im vorliegenden Boden nach VDLUFA. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 5).

In den Versuchsanlagen für Raps lag die K-Konzentration in 0-30 cm Bodentiefe über den gesamten Versuchszeitraum zwischen 10,0-15,0 mg K (100 g Boden)<sup>-1</sup> und damit in Gehaltsklasse C-D. Das Gesamtniveau der K-Konzentration war über die gesamte Versuchsdauer vergleichbar und als ausreichend bis hoch einzuordnen.

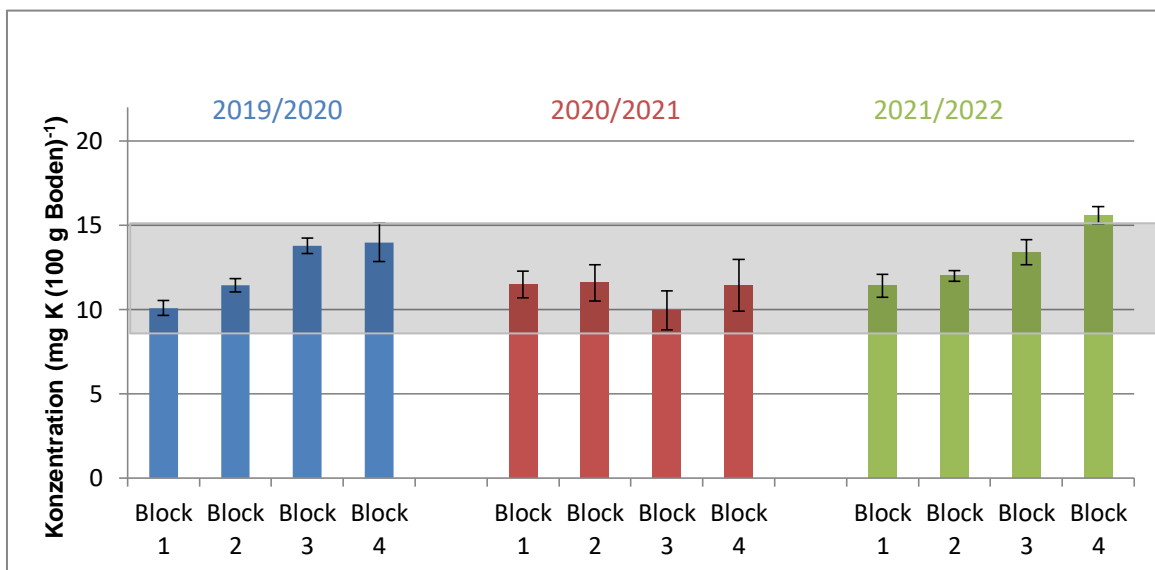


Abbildung 8: K-Konzentration (mg K (100 g Boden)<sup>-1</sup>) in 0-30 cm Bodentiefe in den Versuchsanlagen für Raps für alle drei Versuchsjahre. Grau hinterlegt ist die Gehaltsklasse C für K im vorliegenden Boden nach VDLUFA. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 5).

### 3.1.3. $N_{\min}$ -Werte

Ob der sehr geringen  $N_{\min}$ -Werte im gesamten Versuchszeitraum wird auf eine separate Darstellung der  $N_{\min}$ -Werte in den verschiedenen Entnahmetiefen verzichtet; eine ausgesprochene Verlagerung von N in tiefere Bodenschichten hatte nicht stattgefunden. Die  $N_{\min}$ -Proben wurden in allen drei Versuchsjahren jeweils Anfang Februar gezogen.

Die  $N_{\min}$ -Werte lagen beim Weizen (Abbildung 9) im dritten Versuchsjahr deutlich über den Werten der ersten beiden Versuchsjahre. Der  $N_{\min}$ -Wert war 2022 gegenüber den Vorjahren etwa verdoppelt.

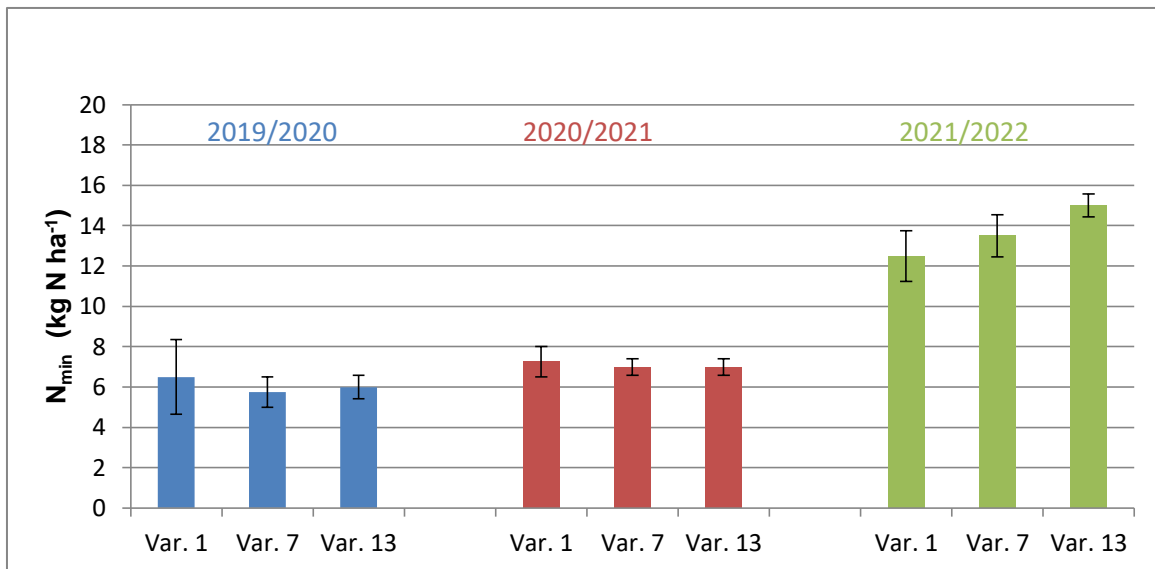


Abbildung 9:  $N_{\min}$  (kg N ha<sup>-1</sup>) in 0-90 cm Bodentiefe unter verschiedenen Saatstärkevarianten bei Weizen für alle drei Versuchsjahre. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4).



Photo 10: Bohrstock zur Bodenprobenentnahme in 0-90 cm Bodentiefe im Februar 2020 (Photo: Desaga 2020).

Beim Raps waren die  $N_{\min}$ -Werte in 0-90 cm Bodentiefe im dritten Versuchsjahr gegenüber den Vorjahren etwa verdoppelt und wiesen eine größere Streuung auf. Die  $N_{\min}$ -Werte waren in allen drei Versuchsjahren als gering einzustufen. Dies zeigt Abbildung 10 bei Raps für alle drei Versuchsjahre.

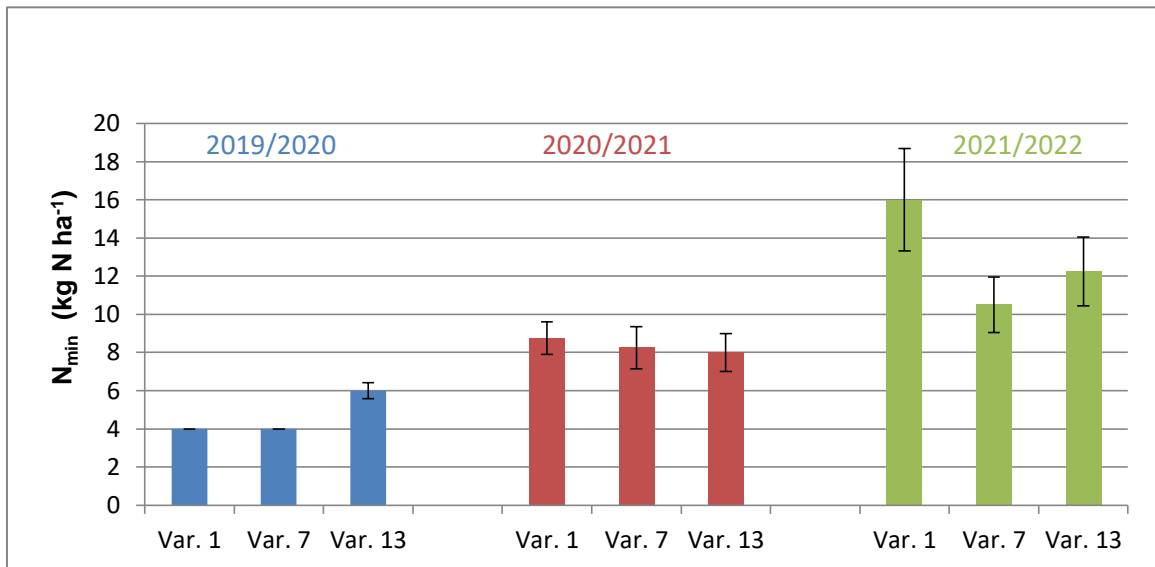


Abbildung 10:  $N_{\min}$  (kg N ha<sup>-1</sup>) in 0-90 cm Bodentiefe unter verschiedenen Saatstärkevarianten bei Raps für alle drei Versuchsjahre. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4).

### 3.1.4. Potentielle Kationenaustauschkapazität

Die potentielle Kationenaustauschkapazität ( $KAK_{\text{pot}}$ ) gemessen in gepufferter BaCl<sub>2</sub>-Lösung wurde dreimalig am Standort gemessen. Die Ergebnisse lagen zwischen 47,4- 64,0  $\mu\text{mol g}^{-1}$  Boden. Absolut dominant war Ca mit rund 80% der  $KAK_{\text{pot}}$ , gefolgt von K mit rund 8% und Mg mit etwa 5% (Abbildung 11). Das Verhältnis der einzelnen Kationen zueinander war in allen drei Proben vergleichbar.

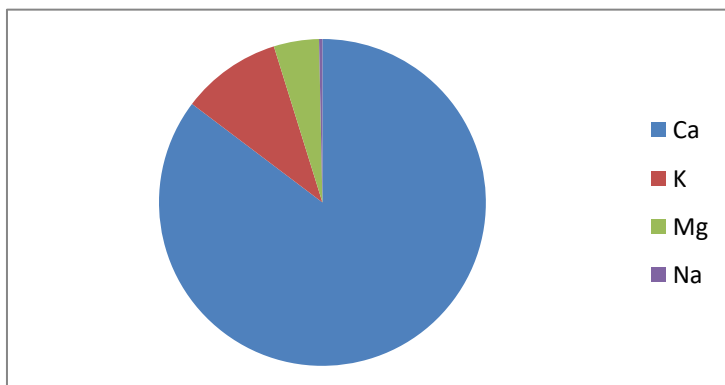


Abbildung 11: Anteil der einzelnen Kationen an der potentiellen Kationenaustauschkapazität bei Beprobung 2019.

### 3.1.5. Organische Substanz

Die organische Substanz wurde 2019 vor Anlage der Versuche an den drei für den Versuch angedachten Flächen in 0-30 cm Bodentiefe gemessen.

Bei einer Spanne von 1,6-2,1% lag das Mittel der Messungen bei knapp 1,9% organischer Substanz am Feinboden.

### 3.1.6. Korngrößenfraktionierung

Die Bodenart konnte die ersten beiden Versuchsjahre als schwach schluffiger Sand (Su2) und das letzte Jahr wegen eines etwas höheren Tonanteils als schwach lehmiger Sand (Sl2) bestimmt werden. Absolut dominant war in allen Bodenproben die Kornfraktion Sand. Dies zeigt Abbildung 12 exemplarisch für 2019/2020.

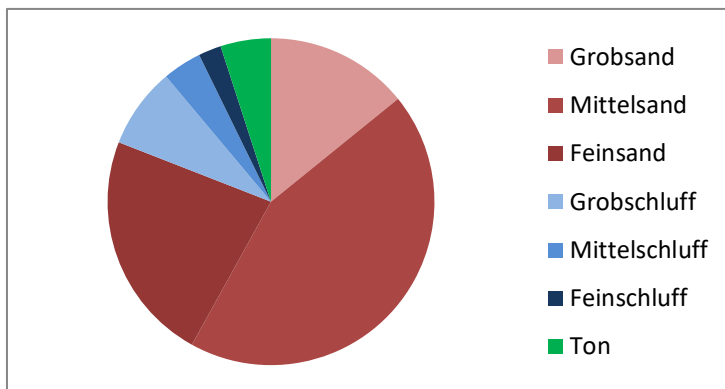


Abbildung 12: Korngrößenfraktionierung 0-90 cm Bodentiefe aus der Versuchsanlage für Weizen 2019/2020 mit über 80% Sandanteil.

### 3.1.7. Bodenskelett und Trockenrohdichte

Aus den Bodenproben aus 0-90 cm Bodentiefe wurde der Grobboden > 2 mm durch Siebung entfernt: Es wurde ein Volumenanteil von 6% Grobboden gemessen.

Für die Trockenrohdichte wurden aus der Stechzylinderprobe 0-90 cm Bodentiefe Massen von 1,0547-1,1876 g cm<sup>-3</sup> ermittelt. Die Trockenrohdichte war damit nach bodenkundlicher Kartieranleitung als sehr gering anzusprechen (Eckelmann 2005).

### 3.1.8. Verfügbare Feldkapazität

Aus der Kenntnis über Korngrößenzusammensetzung und damit Bodenart, organischer Substanz im Boden, Grobbodenanteil und Trockenrohddichte ließ sich mit Hilfe der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA5 (Eckelmann 2005) die nutzbare Feldkapazität ableiten.

Die nutzbare Feldkapazität lag bei den vorgefundenen Bodenarten und der geringen Trockenrohddichte bei  $20 \text{ mm dm}^{-1}$  Bodenhorizont. Die 6% ermittelte Grobboden wurden rechnerisch korrigiert; Zuschläge für den Gehalt organischer Substanz gab es bei dem geringen Anteil organischer Substanz in den Bodenproben nicht. Es ergab sich eine errechnete nutzbare Feldkapazität von  $18,8 \text{ mm dm}^{-1}$  Boden.

Durch mehrere Probegrabungen konnten die maximalen Durchwurzelungstiefen von 6 dm bei Weizen zum Ende des Ährenschiebens und 9 dm bei Raps zur Vollblüte unmittelbar an der Versuchsanlage nachgewiesen werden.

Für die weitere Handhabung der verfügbaren Feldkapazität im Rahmen der Wasserbilanzen wurde die nutzbare Feldkapazität  $\text{dm}^{-1}$  Boden auf  $18,5 \text{ mm}$  korrigiert, da die Software des DWD  $18,8 \text{ mm}$  nicht verrechnen konnte. Die Abweichung von  $< 2\%$  nutzbarer Feldkapazität wurde an dieser Stelle hingenommen.

Es ergab sich für Weizen eine verfügbare Feldkapazität von  $18,5 \text{ mm nFK dm}^{-1}$  Boden  $\times 6 \text{ dm}$  Durchwurzelungstiefe =  $111,0 \text{ mm vFK}$ .

Es ergab sich für Raps eine verfügbare Feldkapazität von  $18,5 \text{ mm nFK dm}^{-1}$  Boden  $\times 9 \text{ dm}$  Durchwurzelungstiefe =  $166,5 \text{ mm vFK}$ .



Photo 11: Probegrabung vom 01.06.2020 zur Überprüfung der Durchwurzelungstiefe bei Weizen (Photo: Desaga 2020).

## 3.2. Wetterdaten

### 3.2.1. Temperatur

Die Temperatur in °C wurde alle drei Stunden unmittelbar am Versuchsstandort erfasst. Abgebildet sind in Abbildung 13 die Tagesdurchschnittstemperaturen jeweils vom 21.08. bis zum 06.08. des Folgejahres. Dieser Zeitraum deckt die Zeitspanne von Rapsaussaat bis Weizenernte für alle drei Versuchsjahre ab und erleichtert damit Vergleiche zwischen den einzelnen Versuchsjahren, da die Zeiträume in den drei Versuchsjahren damit einheitlich sind.

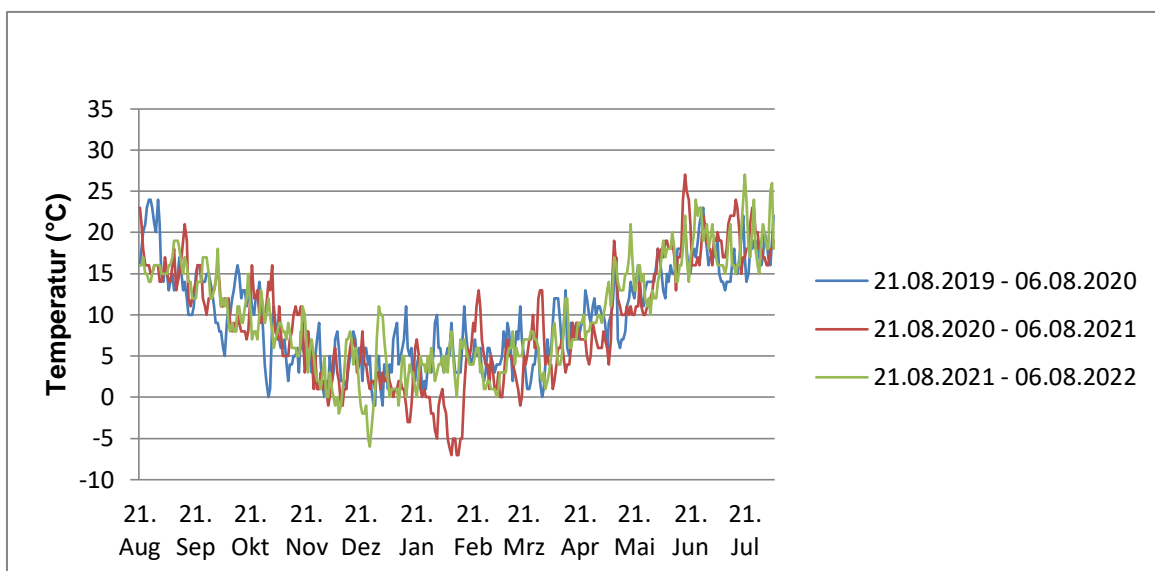


Abbildung 13: Tagesdurchschnittstemperatur (°C) vom 21.08. bis zum 06.08. des Folgejahres für die drei Versuchsjahre.

Auffällig war die niedrige Durchschnittstemperatur im Januar und Februar 2021.

Abbildung 14 zeigt die Tagestemperaturen mit Ihren minimalen und maximalen Werten für die beschriebenen Zeiträume. Die niedrigsten Temperaturen im gesamten Versuchszeitraum mit  $-12^{\circ}\text{C}$  konnten in der kalten Phase im Februar 2021 verzeichnet werden. Durch Kälte bedingte Schäden an den Pflanzen des Versuchs konnten über den gesamten Versuchszeitraum nicht beobachtet werden.

Ebenfalls im Jahr 2021 konnte im Juni die maximale Temperatur von 35°C gemessen werden. Temperaturen über 30°C wurden im gesamten Versuchszeitraum nur selten erreicht.

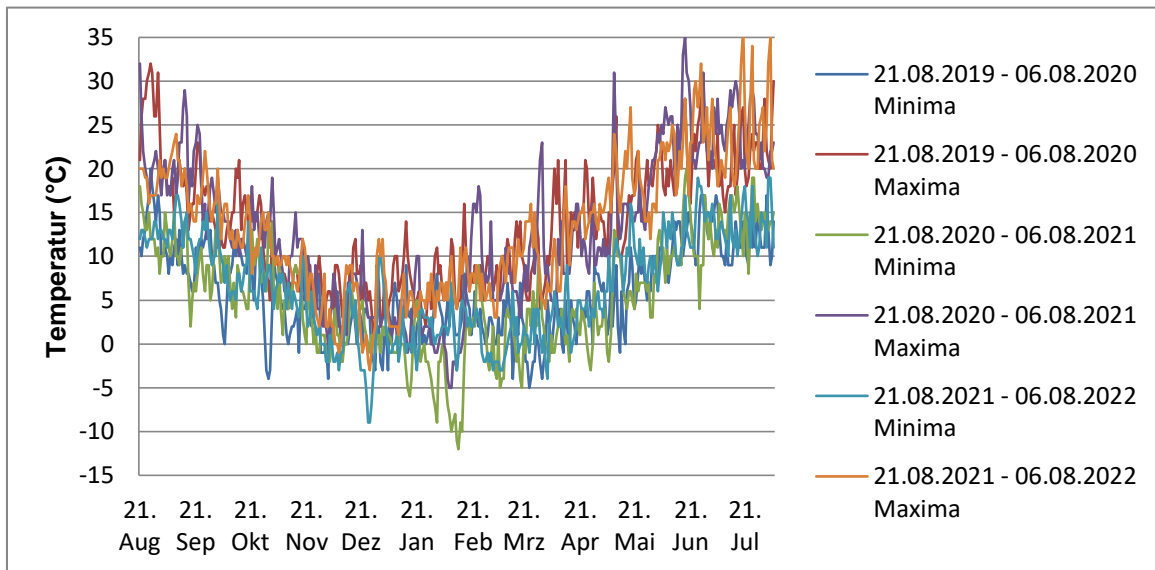


Abbildung 14: Temperaturminima und -maxima (°C) vom 21.08. bis zum 06.08. des Folgejahres für die drei Versuchsjahre.

Aus den Tagesdurchschnittstemperaturen wurden unter Ausschluss der Tage mit einer Durchschnittstemperatur < 5°C Temperatursummenkurven erstellt. Diese zeigt Abbildung 15 für alle drei Versuchsjahre vom 21.08. bis zum 06.08. des Folgejahres.

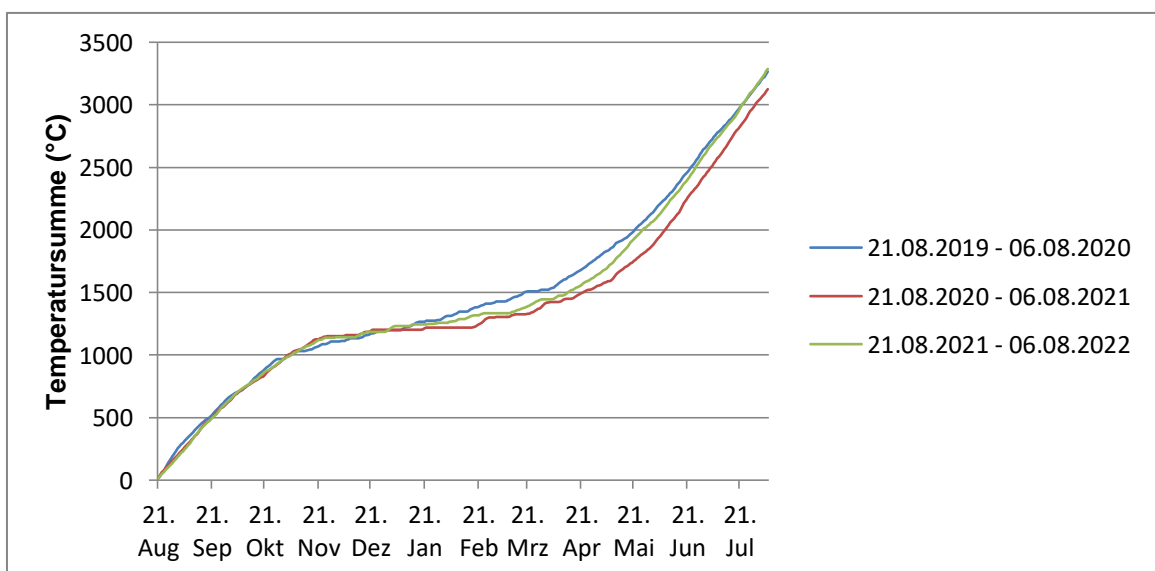


Abbildung 15: Temperatursummenkurven (°C) mit Basis 5°C vom 21.08. bis zum 06.08. des Folgejahres für die drei Versuchsjahre.

Tabelle 3 zeigt die Temperatursummen mit Basis 5°C für alle drei Versuchsjahre und die jeweilige Kultur vom Termin der Aussaat bis zur Ernte.

Die höchste Temperatursumme wurde für Weizen 2019/2020 und für Raps 2020/2021 erreicht.

Tabelle 3: Temperatursummen (°C) mit Basis 5°C für die jeweiligen Zeiträume von Aussaat bis Ernte der Versuchskulturen für alle drei Versuchsjahre.

<b>Raps</b>	26.08.2019- 22.07.2020	21.08.2020- 26.07.2021	23.08.2021- 14.07.2022
<b>Weizen</b>	26.09.2019- 06.08.2020	30.09.2020- 05.08.2021	24.09.2021- 30.07.2022
$\Sigma^{\circ}\text{C ab } 5^{\circ}\text{C}$ <b>Raps</b>	2874°C	2928°C	2789°C
$\Sigma^{\circ}\text{C ab } 5^{\circ}\text{C}$ <b>Weizen</b>	2666°C	2483°C	2603°C

### 3.2.2. Niederschlag

Der Niederschlag wurde tagesgenau erfasst. Dies zeigt Abbildung 16 für den Zeitraum vom 21.08. bis zum 06.08. des Folgejahres. Dieser Zeitraum deckt in allen drei Versuchsjahren die Spanne von Rapsaussaat bis Weizenernte ab.

Aus der Abbildung 16 ist das Ausbleiben größerer Niederschlagsereignisse von März bis Mai für 2020 und 2022 gut zu erkennen. Ebenfalls deutlich zu erkennen sind die höheren Niederschlagsmengen im vorgenannten Zeitraum für 2021 (rote Linie).

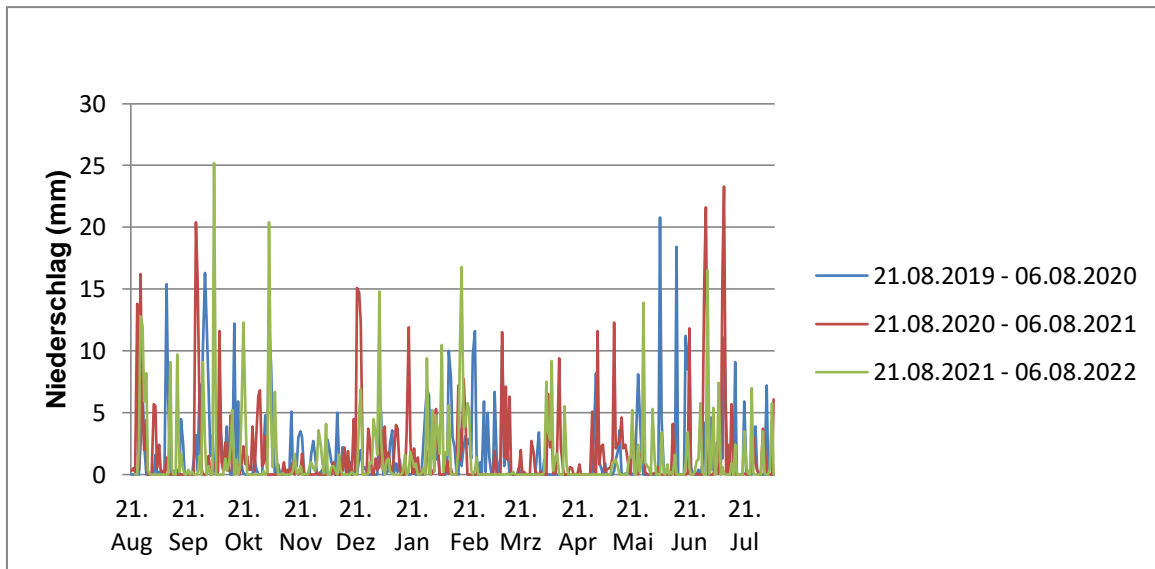


Abbildung 16: Tagesgenauer Niederschlag (mm) vom 21.08. bis zum 06.08. des Folgejahres für die drei Versuchsjahre.

Aus den Tagesniederschlägen wurden Niederschlagssummenkurven für die jeweiligen Zeiträume von Weizenaussaat bis Weizenernte und Rapsaussaat bis Rapsenernte gebildet. Diese zeigen Abbildung 17 für Weizen und Abbildung 18 für Raps. Das Ausbleiben größerer Niederschlagsereignisse nach Vegetationsbeginn um den 10. März war in beiden Versuchskulturen im ersten wie auch im letzten Versuchsjahr deutlich am Plateau der Niederschlagssummenkurve zu erkennen. In 2020/2021 hingegen war ein Plateau der Niederschlagssummenkurve erst deutlich verzögert ab Ende Mai zu erkennen. Beim Weizen war die Niederschlagsdifferenz zwischen den Jahren sehr groß. So fielen im letzten Versuchsjahr 2021/2022 gut 400 mm Niederschlag von Weizenaussaat bis zur Ernte, was einer reduzierten Niederschlagsmenge von über 20% gegenüber dem Referenzzeitraum 2019/2020 entsprach. Vom 10.03.2022, dem ungefähren Vegetationsbeginn nach Winter, bis zur Weizenernte am 30.07.2022, fielen lediglich 137 mm Niederschlag.

Im Versuchsjahr 2020/2021 fielen im Referenzzeitraum hingegen 258 mm und damit nahezu die doppelte Menge.

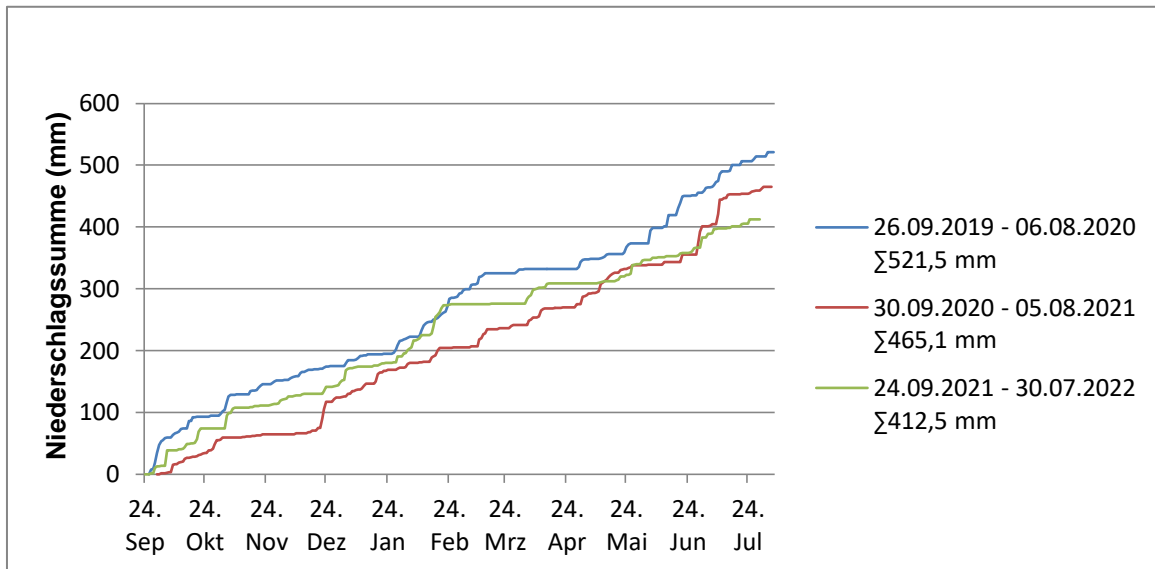


Abbildung 17: Niederschlagssumme (mm) für den Zeitraum Weizenaussaat bis Weizenernte für die drei Versuchsjahre.

Das letzte Versuchsjahr wies mit lediglich 462 mm Niederschlag von Rapsaussaat bis Rapsernte etwa 90 mm weniger Niederschlag auf als die Vorjahre und war damit deutlich trockener (Abbildung 18).

Vom 10.03.2022 bis zur Rapsernte am 14.07.2022 fielen lediglich 123 mm Niederschlag. Hingegen fielen vom 10.03.2021 bis zur Rapsernte am 26.07.2021 rund 250 mm Niederschlag und damit mehr als die doppelte Menge.

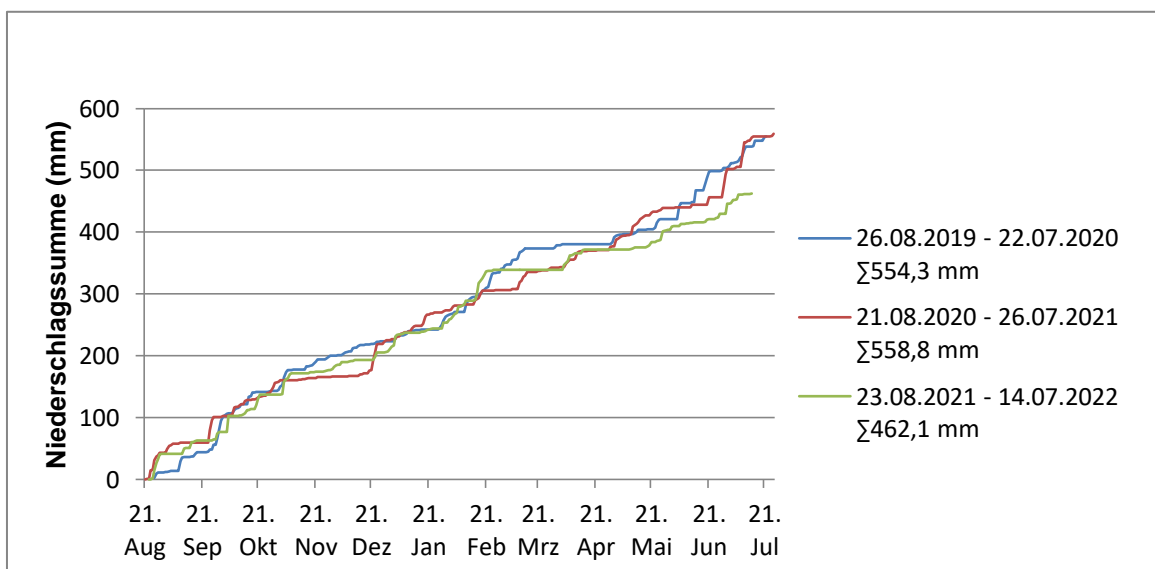


Abbildung 18: Niederschlagssumme (mm) für den Zeitraum Rapsaussaat bis Rapsernte für die drei Versuchsjahre.

### 3.3. Ergebnisse Evapotranspiration, Bodenfeuchte und WUE

Die beiden Kulturen Weizen und Raps verhielten sich in Hinblick auf den Wasserhaushalt im Versuch unterschiedlich. Aufgrund der unterschiedlichen Durchwurzelungstiefen standen Weizen und Raps unterschiedliche verfügbare Feldkapazitäten zur Verfügung. Der Raps wies die größeren Blattflächenindizes und höhere Evapotranspirationssummen auf als der Weizen. Beide Kulturen erreichten im zweiten Versuchsjahr ihre maximalen Blattflächenindizes. Sowohl bei Weizen als auch bei Raps war die Transpiration mit Abstand die größte Komponente der Evapotranspiration, gefolgt von Evaporation und Interzeptionsverdunstung.

Die zeitliche Verteilung der Evapotranspiration war different, da Raps deutlich früher im Vegetationsverlauf bei zeitgleich höherem LAI mehr Wasser transpirierte als Weizen. Betrachtet man exemplarisch das letzte Versuchsjahr 2022 mit Vegetationsbeginn nach Winter um den 10. März zeigt sich folgendes Bild: Wählt man den 15.04.2022 als Stichtag, so hatte Raps seit Vegetationsbeginn bereits 56 mm transpiriert, Weizen hingegen erst 19 mm. Zum 15.05.2022 wies Raps eine Transpirationssumme von 140 mm, Weizen hingegen lediglich 85 mm seit Vegetationsbeginn auf. Die Evapotranspirationssummen ab Vegetationsbeginn bis zum 15.05.2022 unterschieden sich von 154 mm Raps zu 104 mm bei Weizen.

Es kam sowohl bei Weizen als auch bei Raps zu different intensivem Trockenstress in unterschiedlichen Entwicklungsstadien.

#### 3.3.1. Evapotranspiration und Bodenfeuchte Weizen

In Tabelle 4 sind die Evapotranspiration und deren Zusammensetzung für die drei Versuchsjahre für Weizen in Abhängigkeit von der Bestandsdichte abgebildet. Die Bestandsdichte, bedingt durch den Prüffaktor Saatstärke, fand Eingang durch den gemessenen LAI. Ein hoher LAI führte zu vermehrter Transpiration und Interzeptionsverdunstung und verminderte zeitgleich die Evaporation. In Summe stieg die Evapotranspiration durch hohe Bestandsdichten lediglich gering gegenüber den reduzierten Bestandsdichten an; es gab keinen deutlich verminderten Wasserbedarf in den reduzierten Bestandsdichten. Die Evapotranspiration war im Versuchsjahr 2021/2022 insgesamt am geringsten und unterschritt die beiden übrigen Versuchsjahre um etwa 35 mm Evapotranspiration bei maximaler Bestandsdichte. Die Verhältnisse der einzelnen Verdunstungsformen zueinander differierten zwischen den Jahren; im ersten Versuchsjahr hatte die Transpiration mit fast 75% den größten relativen Anteil an der Evapotranspiration über den

gesamten Versuchszeitraum. In 2021/2022 entsprach die Transpiration der Evapotranspiration nur zu 67%. Der größte LAI wurde in 2021 gemessen, die höchste Evapotranspiration aber für 2019/2020 errechnet.

Tabelle 4: Evapotranspiration und deren Zusammensetzung (mm) errechnet mit dem Modell AMBAV sowie der gemessene maximale LAI in Abhängigkeit von der Bestandsdichte für alle drei Versuchsjahre für Weizen.

<b><u>Weizen</u></b>	<b>2019/2020</b>	<b>2020/2021</b>	<b>2021/2022</b>
Wasserverbrauch in mm	26.09.2019- 06.08.2020	30.09.2020- 05.08.2021	24.09.2021- 30.07.2022
<b>Saatstärke 100%</b>			
max. LAI	2,52	3,74	2,72
Transpiration	225,35	210,84	176,09
Evaporation	54,19	52,63	61,34
Interzeptionsv.	27,4	30,82	25,94
Evapotranspiration $\Sigma$	<b>306,94</b>	<b>294,29</b>	<b>263,37</b>
<b>Saatstärke 80%</b>			
max. LAI	2,20	3,18	2,42
Transpiration	209,47	200,03	170,77
Evaporation	63,93	58,99	65,55
Interzeptionsv.	23,98	27,59	24,41
Evapotranspiration $\Sigma$	<b>297,38</b>	<b>286,61</b>	<b>260,73</b>
<b>Saatstärke 60%</b>			
max. LAI	2,18	2,54	2,29
Transpiration	185,4	183,47	168,10
Evaporation	77,54	68,17	67,51
Interzeptionsv.	20,09	24,21	23,65
Evapotranspiration $\Sigma$	<b>283,03</b>	<b>275,85</b>	<b>259,26</b>

Die Zusammensetzung der Evapotranspiration zeigt Abbildung 21 für 2021/2022 bei maximaler Bestandsdichte für Weizen. Es wurden im Mai und Juni Tagesevapotranspirationssummen von knapp 3 mm erreicht. Die Transpiration entsprach zu 67% der Evapotranspiration.

Die Interzeptionsverdunstung hingegen betrug lediglich rund 10%, die Evaporation gut 20% der Evapotranspiration.

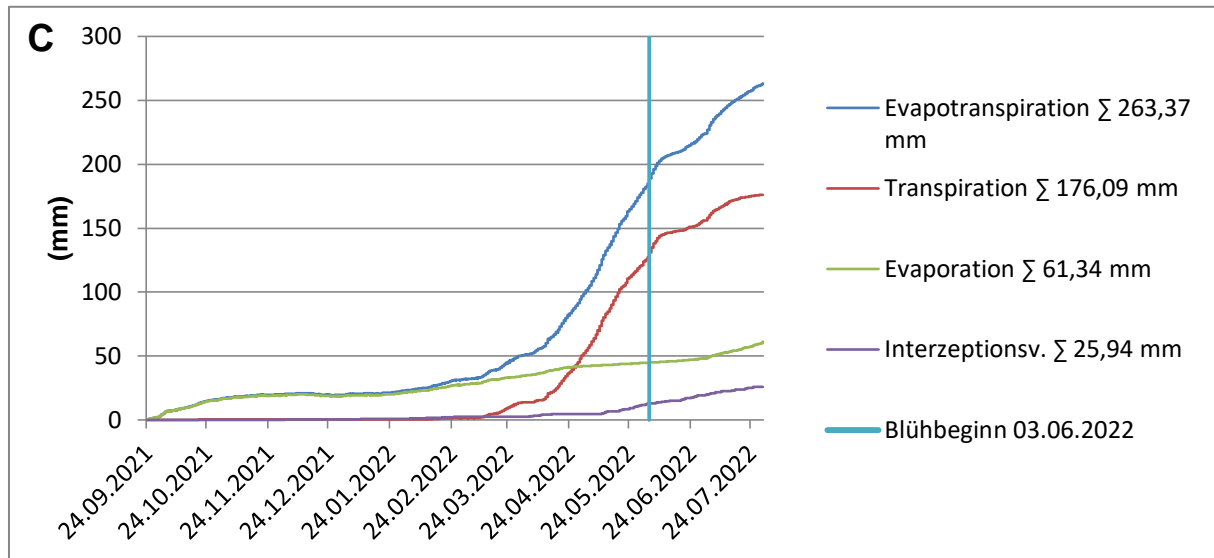


Abbildung 19: Summenkurve der Evapotranspiration und deren Zusammensetzung (mm) bei maximaler Bestandsdichte im Vegetationsverlauf 2021/2022 für Weizen errechnet mit dem Modell AMBAV.

Interzeptionsverdunstung und Evaporation hatten deutlich flachere Kurvenverläufe als die Transpiration, deren Kurvenverlauf erst nach der Blüte abflachte.

Abbildung 22 zeigt den im Modell AMBAV simulierten Verlauf des LAI-Green, das heißt transpirierende Blattfläche in Relation zur Bodenoberfläche, im Vegetationsverlauf und die gemessenen maximalen LAI im Jahr 2022 in Abhängigkeit der Bestandsdichte.

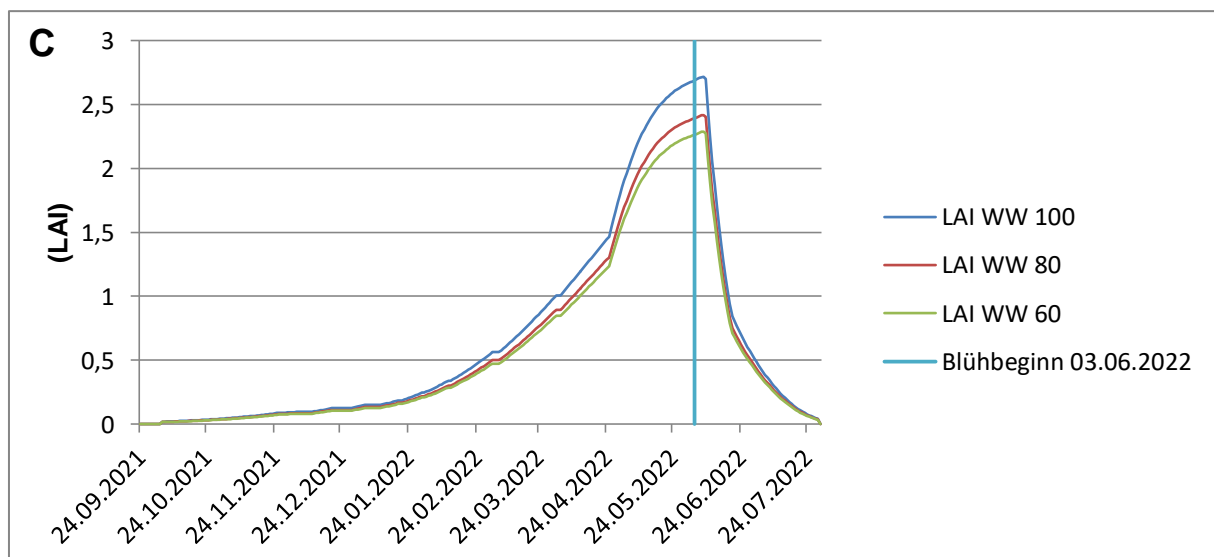


Abbildung 20: Verlauf des LAI-Green für Weizen im Vegetationsverlauf 2021/2022 in Abhängigkeit von der Bestandsdichte errechnet mit dem Modell AMBAV und dem gemessenen maximalen LAI.

Auffällig waren die starke Zunahme des LAI ab Ende April während des Schossens und die rasante Abnahme des LAI ab Mitte Juni durch beginnende Seneszens.

Aus der bekannten Evapotranspiration und den Niederschlägen ließ sich der Verlauf der Bodenfeuchte als prozentuale Veränderung der verfügbaren Feldkapazität errechnen. Da die Evapotranspiration sich zwischen den verschiedenen Bestandsdichten lediglich sehr gering unterschied, wird auf eine Darstellung des Verlaufs der verfügbaren Feldkapazität unter allen drei Bestandsdichten für beide Kulturen verzichtet, da die Verläufe nahezu identisch waren. Ebenso wurde der Blühbeginn für Weizen (Abbildungen 21) und Raps (Abbildung 27) aus Darstellungsgründen für die drei Jahre identisch datiert. Der Beginn der Weizenblüte konnte 2020 auf den 05.06. und 2022 auf den 03.06. datiert werden; 2021 begann der Weizen am 16.06. zu blühen. Die Rapsblüte begann 2020 am 20.04., 2022 am 23.04. und in 2021 zehn Tage später. Den Verlauf der verfügbaren Feldkapazität für Weizen bei maximaler Bestandsdichte im Vegetationsverlauf zeigt Abbildung 21 für alle drei Versuchsjahre.

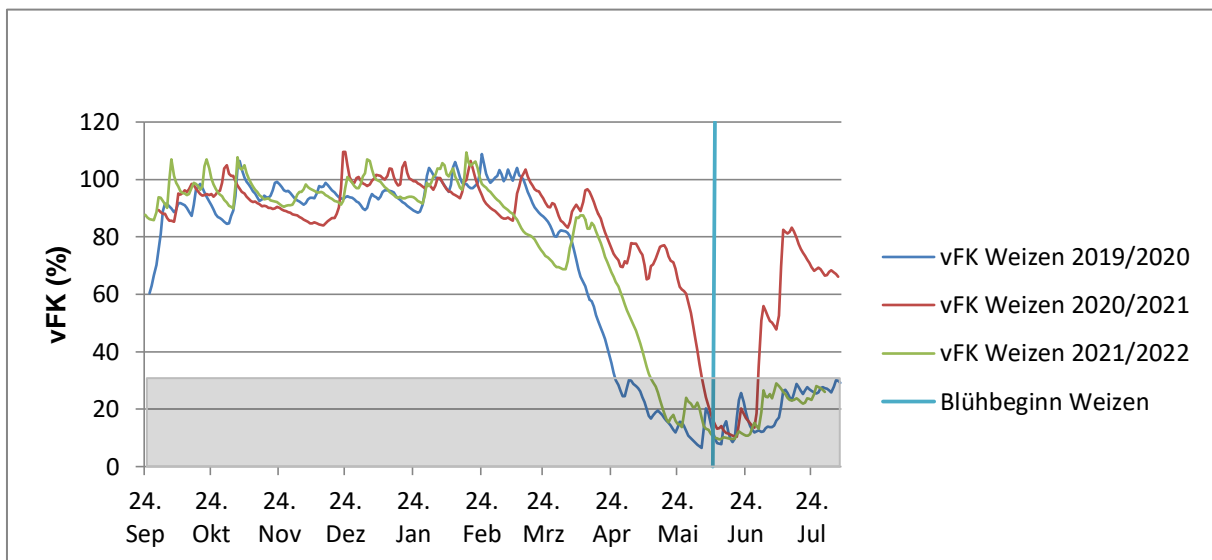


Abbildung 21: Verlauf der vFK (% vFK) von Aussaat bis Ernte Weizen für die drei Versuchsjahre bei maximaler Bestandsdichte errechnet mit dem Modell AMBAV. Grau hinterlegt ist der Bereich ( $\leq 30\%$  vFK) der vFK, in dem Trockenstress herrscht.

Ein kurzfristiges Überschreiten von 100% vFK war durch intensive Niederschläge zu erklären, in deren Anschluss es zur Versickerung kam. Ende Februar lag die vFK in allen Versuchsjahren bei nahezu 100% und sank im Anschluss daran jahresspezifisch schnell ab. In allen drei Versuchsjahren herrschte zum Stadium der Weizenblüte Trockenstress, das heißt die verfügbare Feldkapazität unterschritt die 30%-Grenze. Der Trockenstress

setzte im Versuchsjahr 2019/2020 am frühesten und mit Ende April bereits deutlich vor Blühbeginn ein und hielt bis zur Ernte des Weizens an. Ein ähnlicher Verlauf war auch 2021/2022 zu beobachten, jedoch setzte der Trockenstress erst etwa vierzehn Tage später in der ersten Maidekade ein.

In 2021 herrschte nur für einen deutlich kürzeren Zeitraum (ab Anfang Juni) Trockenstress für den Weizen als in den beiden übrigen Jahren; ausgiebige Niederschläge im Juni und Juli ließen die Bodenfeuchte wieder in den optimalen Bereich steigen.



Photos 12 und 13: Trockenstresssymptome an Weizen am 18.06.2022 (Photos: Desaga 2022).

### 3.4.2. Wassernutzungseffizienz Weizen

Aus den Kornerträgen und dem Wasserverbrauch konnte die Wassernutzungseffizienz (WUE) für Weizen errechnet werden.

Diese beschreibt in diesem Fall das Verhältnis von Evapotranspiration zu geernteter Korntrockenmasse ( $\text{g TS Kornertrag (L H}_2\text{O)}^{-1}$ ). Bei dieser Betrachtung der WUE wurde also auch das unproduktiv verdunstete Wasser in Form von Evaporation und Interzeptionsverdunstung inkludiert. Die WUE war sich in den einzelnen Versuchsjahren ähnlich und wies für Weizen Werte von 1,20-1,45 auf.

Wie in den Ergebnissen zur Evapotranspiration bereits gezeigt, erhöhte jede Saatstärkesteigerung die Evapotranspirationen geringfügig. Grund hierfür war der erhöhte Blattflächenindex, der zu erhöhten Transpirationssummen führte (Tabelle 4).

Im Jahr 2019/2020 unterschieden sich die Evapotranspirationssummen der verschiedenen Saatstärkevarianten jeweils um etwa 10 mm über den gesamten Vegetationszeitraum. Einer Evapotranspiration von 307 mm bei maximaler Saatstärke stand eine Evapotranspiration von 283 mm bei stark

reduzierter Saatstärke gegenüber (Tabelle 4). Das entsprach einer Reduktion von 24 mm beziehungsweise 7,5%.

Abbildung 22 zeigt die Wassernutzungseffizienz für Weizen in 2020. Auf der Abszisse ist die Nährstoffversorgung der jeweiligen Prüfvariante beschrieben. Die Saatstärkevarianten sind farblich differenziert. Die WUE wies bei hoher N-Düngung, 100% Saatstärke und unterlassener K-Düngung signifikant höhere Werte auf als bei auf 60% reduzierter Saatstärke und identischer Düngung. Das bedeutet, dass die durch höhere Saatstärke gesteigerte Evapotranspiration durch die gesteigerten Kornerträge überkompensiert wurde. Dieser Effekt ist bei erfolgter K-Düngung interessanterweise nicht nachweisbar gewesen, da die WUE bei stark reduzierter Saatstärke und maximaler N-Düngung durch K-Düngung signifikant gesteigert werden konnte. Bei mäßiger Saatstärke und erfolgter K-Düngung gab es zudem eine positive N-Düngewirkung auf die WUE.

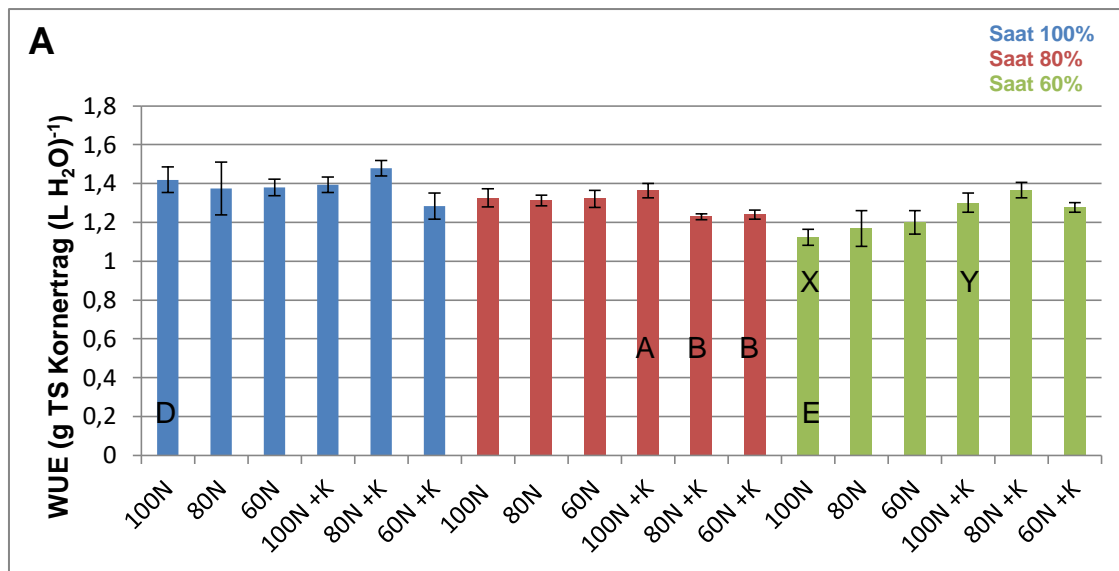


Abbildung 22: Wassernutzungseffizienz (g TS Kornertrag (L H<sub>2</sub>O)<sup>-1</sup>) bei Weizen 2020. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich).

(A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

In den beiden Folgejahren war die Wirkung der Prüffaktoren auf die WUE nicht so deutlich wie 2020 (Abbildungen 23 und 24). Signifikante Effekte der Prüffaktoren Saatstärke und der N-Düngung auf die WUE konnten 2021 und 2022 nicht nachgewiesen werden.

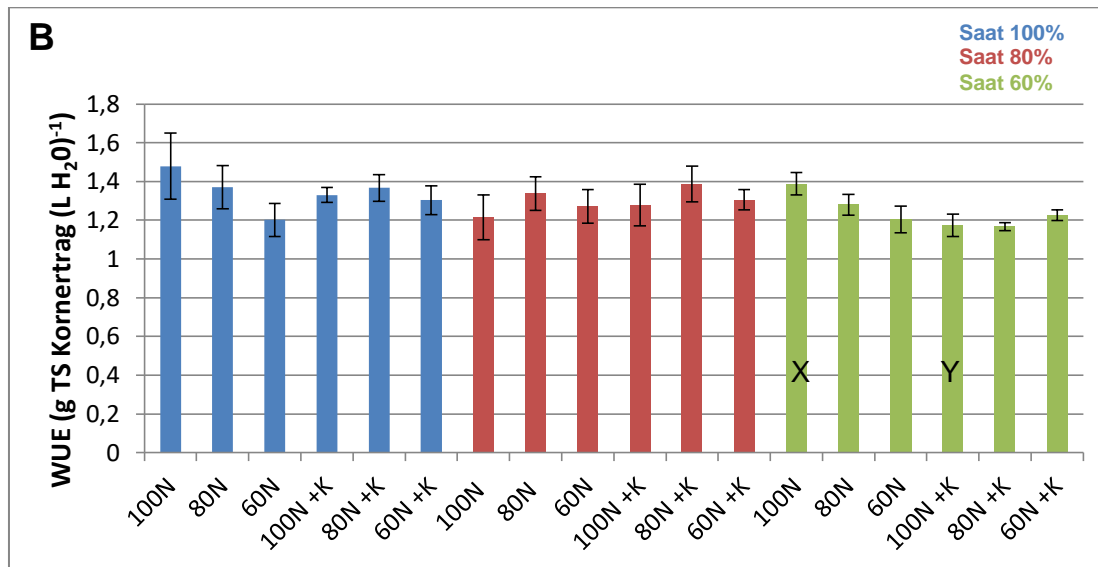


Abbildung 23: Wassernutzungseffizienz (g TS Kornertrag (L H<sub>2</sub>O)<sup>-1</sup>) bei Weizen 2021. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich).

(A/B/C: N-Düngeneffekt, X/Y: K-Düngeneffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

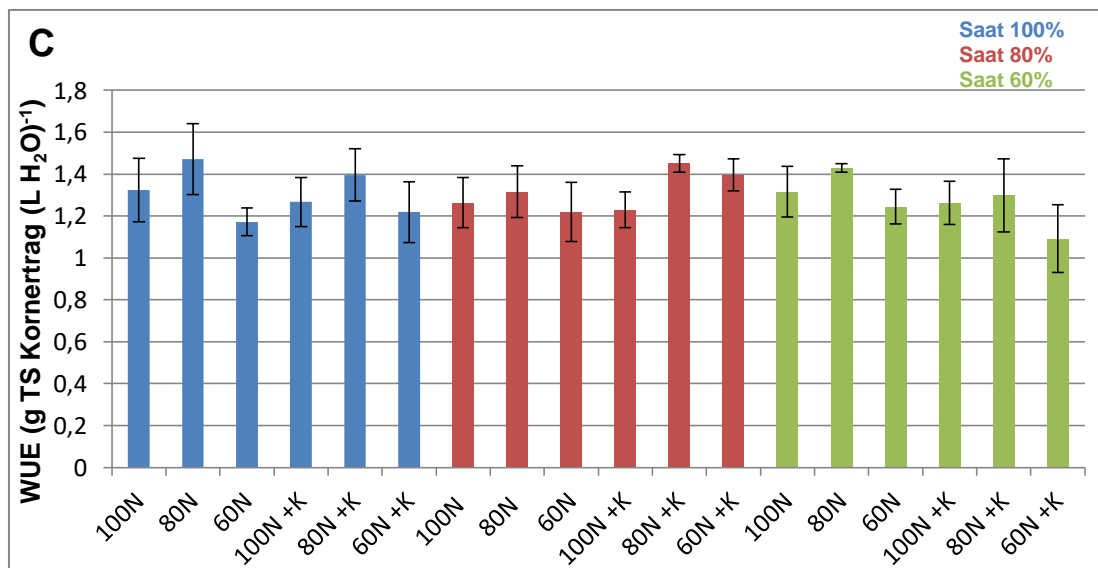


Abbildung 24: Wassernutzungseffizienz (g TS Kornertrag (L H<sub>2</sub>O)<sup>-1</sup>) bei Weizen 2022. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Keine signifikanten Unterschiede (p = 0,05) in den jeweiligen Kontrasten (Paarvergleiche).

3.3.3. Evapotranspiration und Bodenfeuchte Raps

Wie bereits für Weizen erläutert, zeigt Tabelle 5 die Evapotranspiration und deren Zusammensetzung für Raps für alle drei Versuchsjahre bei verschiedenen Bestandsdichten. Auch beim Raps konnte keine deutlich reduzierte Evapotranspiration durch reduzierte Bestandsdichten erreicht werden. Die geringste Evapotranspiration wurde im Versuchsjahr 2021/2022 ermittelt. Gegenüber den Vorjahren fiel sie bei maximaler Bestandsdichte um etwa 30 mm beziehungsweise 50 mm ab. Der größte LAI konnte wie auch beim Weizen 2021 gemessen werden; auch die Evapotranspiration war im Versuchsjahr 2020/2021 mit nahezu 350 mm Evapotranspiration bei maximaler Bestandsdichte am höchsten.

Tabelle 5: Evapotranspiration und deren Zusammensetzung (mm) errechnet mit dem Modell AMBAV sowie der gemessene maximale LAI in Abhängigkeit von der Bestandsdichte für alle drei Versuchsjahre für Raps.

<b><u>Raps</u></b>	<b>2019/2020</b>	<b>2020/2021</b>	<b>2021/2022</b>
Wasserverbrauch in mm	26.08.2019- 22.07.2020	21.08.2020- 26.07.2021	23.08.2021- 14.07.2022
<b>Saatstärke 100%</b>			
max. LAI	4,25	6,2	4,5
Transpiration	226,99	233,32	197,06
Evaporation	53,21	53,77	58,32
Interzeptionsv.	40,67	56,80	35,70
Evapotranspiration $\Sigma$	<b>320,87</b>	<b>343,89</b>	<b>291,08</b>
<b>Saatstärke 80%</b>			
max. LAI	3,4	5,4	3,9
Transpiration	213,88	230,97	192,61
Evaporation	61,34	57,44	61,94
Interzeptionsv.	34,97	51,35	32,50
Evapotranspiration $\Sigma$	<b>310,19</b>	<b>339,76</b>	<b>287,05</b>
<b>Saatstärke 60%</b>			
max. LAI	2,55	4,4	3,5
Transpiration	194,81	225,90	188,48
Evaporation	72,29	63,32	64,76
Interzeptionsv.	28,91	44,39	30,50
Evapotranspiration $\Sigma$	<b>296,01</b>	<b>333,61</b>	<b>283,74</b>

Wie auch beim Weizen trug die Transpiration mit knapp 70% gegenüber der Interzeptionsverdunstung und der Evaporation den größten Anteil zur Evapotranspiration bei. Sowohl absolut, als auch relativ war die Interzeptionsverdunstung in 2020/2021 gegenüber den anderen Jahren deutlich erhöht.

Abbildung 25 zeigt die Evapotranspiration und deren Zusammensetzung für Raps bei maximaler Bestandsdichte für 2021/2022. Mit Vegetationsbeginn nahm die Transpiration stark zu und erreichte Tagessummen von nahezu 5 mm, wohingegen die Evaporation nahezu zum Erliegen kam.

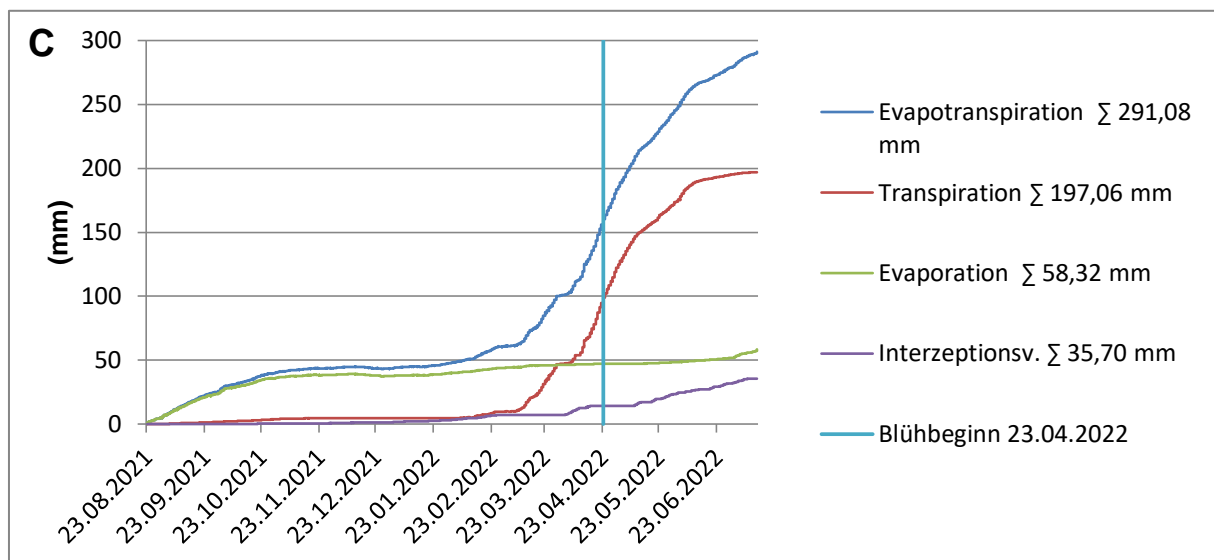


Abbildung 25: Sommerkurve der Evapotranspiration und deren Zusammensetzung (mm) bei maximaler Bestandsdichte im Vegetationsverlauf 2021/2022 für Raps errechnet mit dem Modell AMBAV.

Abbildung 26 zeigt den Verlauf des LAI-Green in Abhängigkeit der Bestandsdichte für Raps in 2021/2022. Die rasante Zunahme des LAI fand beim Raps bereits im März und damit sehr viel früher statt als beim Weizen, dessen LAI erst Ende April stark zunahm. Der Raps erreichte seinen maximalen LAI deutlich früher als der Weizen und übertraf den LAI des Weizens auch absolut sehr deutlich.

Das rasante Abfallen des LAI-Green nach Ende der Rapsblüte ist, wie bereits für Weizen erörtert, auf beginnende Seneszens und damit einsetzende Bildung des LAI-Yellow zurückzuführen.

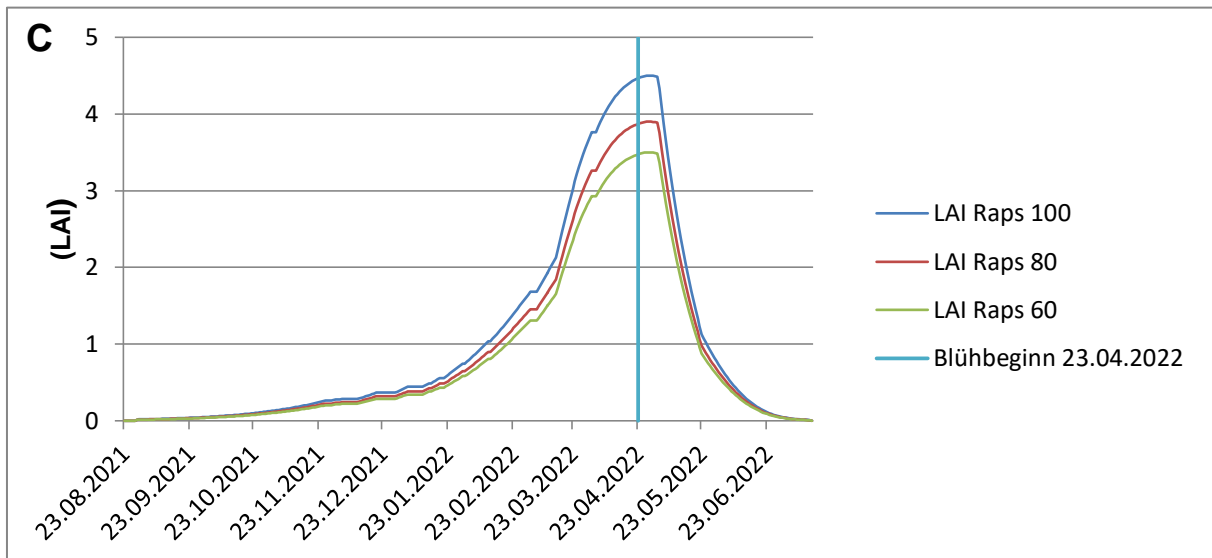


Abbildung 26: Verlauf des LAI-Green für Raps im Vegetationsverlauf 2021/2022 in Abhängigkeit von der Bestandsdichte errechnet mit dem Modell AMBAV und dem gemessenem maximalen LAI.

Aus der Evapotranspiration und den gefallen Niederschlägen ergab sich der in Abbildung 27 gezeigte Verlauf der Bodenfeuchte für die maximale Bestandsdichte bei Raps im Vegetationsverlauf der drei Versuchsjahre.

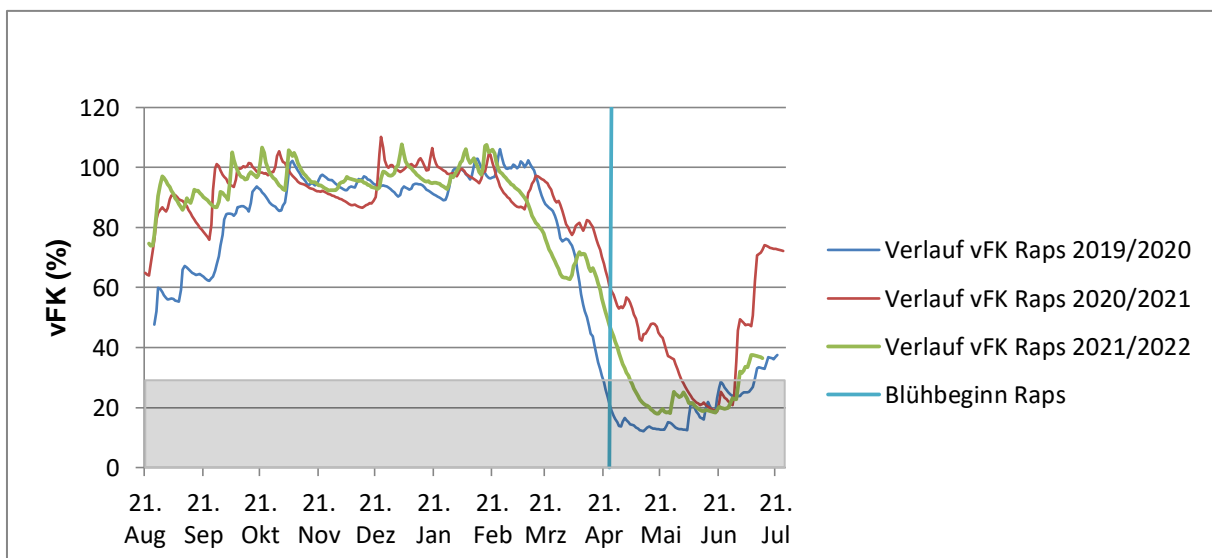


Abbildung 27: Verlauf der vFK von Aussaat bis Ernte Raps für die drei Versuchsjahre bei maximaler Bestandsdichte errechnet mit dem Modell AMBAV. Grau hinterlegt ist der Bereich ( $\leq 30\%$  vFK) der vFK, in dem Trockenstress herrscht.

Obwohl der Trockenstress beim Raps kalendarisch etwa eine Woche früher als beim Weizen eintrat, betraf er beim Raps spätere Entwicklungsstadien. Der

Beginn der Blüte war in 2021 und 2022 nicht durch Trockenstress beeinflusst. Lediglich im ersten Versuchsjahr 2020 herrschte bereits Trockenstress zum Beginn der Rapsblüte. In 2022 herrschte zu Blühbeginn noch kein Trockenstress; dieser setzte aber zum Ende der ersten Maidekade und damit noch in der Blüte ein. In Versuchsjahr 2021 setzte der Trockenstress erst Anfang Juni zur Kornfüllung ein und wurde durch einsetzende Niederschläge im zeitlichen Umfang auf rund vier Wochen begrenzt, bevor die Bodenfeuchte durch Niederschläge wieder in den optimalen Bereich anstieg.



Photos 14 und 15: Trockenstresssymptome an Raps am 16.05.2022 (Photos: Desaga 2022).

### 3.3.4. Wassernutzungseffizienz Raps

Die WUE bei Raps variierte über den gesamten Versuchszeitraum stark. Sowohl der Kornertrag als auch die Evapotranspiration variierten zwischen den Jahren deutlich. Beim Kornertrag lag 2020 mit rund 25 dt ha<sup>-1</sup> deutlich hinter 2021 mit rund 35 dt ha<sup>-1</sup> und 2022 mit über 40 dt ha<sup>-1</sup>.

Ebenfalls sei noch einmal an die stark differenten Evapotranspirationssummen bei Raps in den verschiedenen Versuchsjahren erinnert (Tabelle 5). Im Vegetationsverlauf 2020/2021 war die Evapotranspiration um etwa 50 mm beziehungsweise fast 20% gegenüber dem Referenzzeitraum für 2021/2022 erhöht. Die WUE betrug im ersten Versuchsjahr 2020 lediglich 0,6-0,9. Im letzten Versuchsjahr 2022 hingegen lag die WUE um 1,2. Pro Liter verbrauchten Wassers konnte also 2022 im Vergleich zu 2020 in einzelnen Prüfvarianten nahezu die doppelte Menge an Korntrockensubstanz gebildet werden. Da die Evapotranspiration innerhalb einer Saatstärkevariantengruppe bei gleichbleibendem LAI nicht variierte, führten Kornertragssteigerungen durch N- und K-Düngung auch zu einer verbesserten Wassernutzungseffizienz.

In 2020 konnte die WUE sowohl durch eine Steigerung der N-Düngung als auch durch erfolgte K-Düngung gesteigert werden (Abbildung 28). Die N-

Düngewirkung auf die WUE war lediglich bei reduzierter Saatstärke und unterlassener K-Düngung signifikant. Die K-Düngung verbesserte die WUE signifikant bei mäßiger Saatstärke und maximaler N-Düngeintensität.

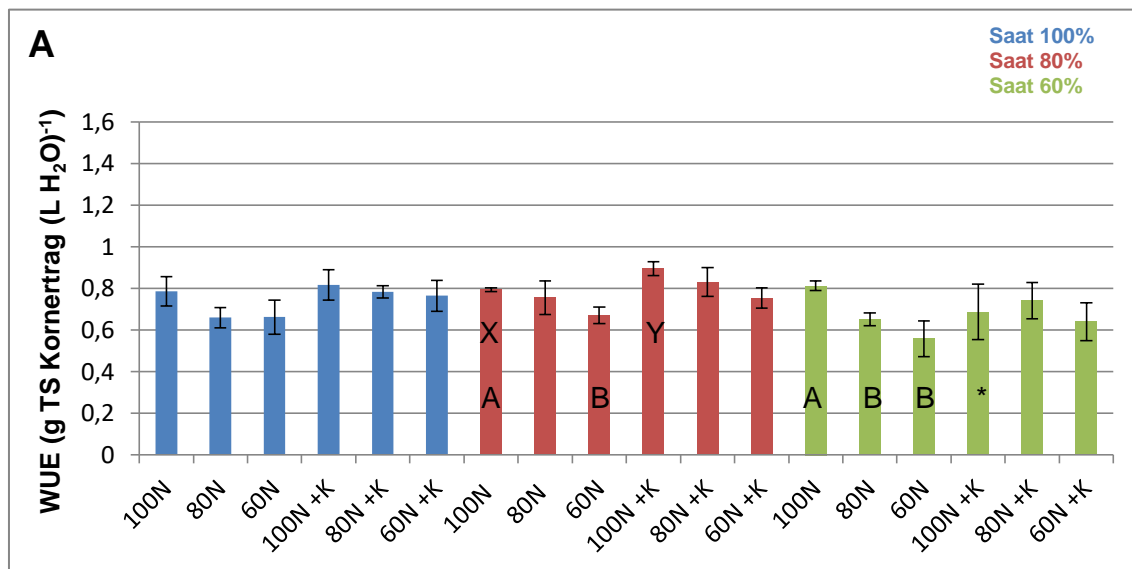


Abbildung 28: Wassernutzungseffizienz (g TS Kornertrag (L H<sub>2</sub>O)<sup>-1</sup>) bei Raps 2020. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). \*: n = 3. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Die Abbildung 29 zeigt die WUE für Raps in 2021. Wie auch 2020 führt eine Verminderung der N-Düngung auf 60% bei mäßiger Saatstärke und unterlassener K-Düngung zu einer reduzierten WUE bei Raps.

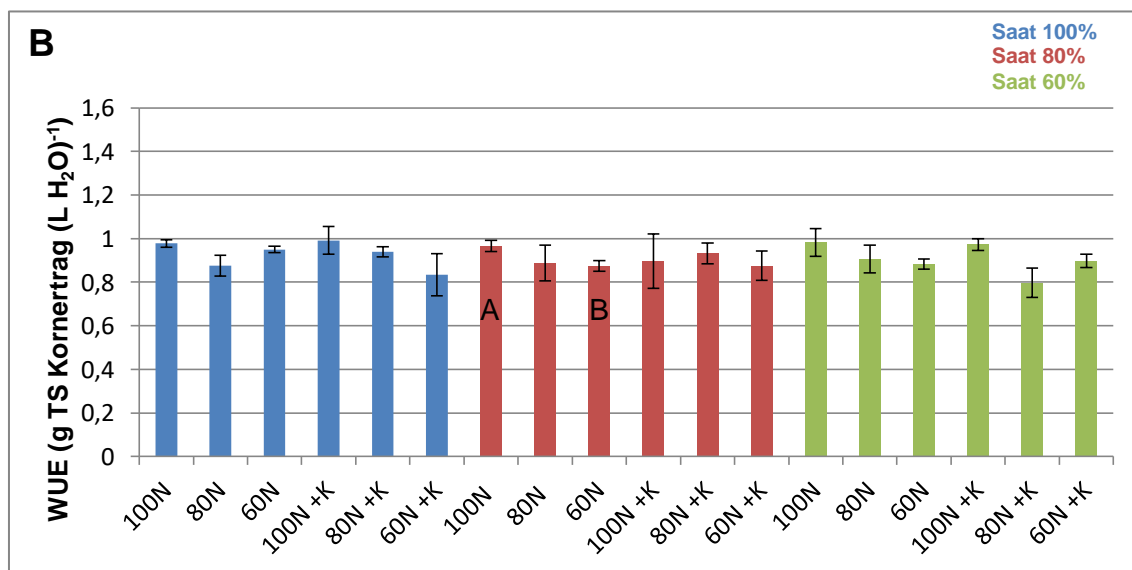


Abbildung 29: Wassernutzungseffizienz (g TS Kornertrag (L H<sub>2</sub>O)<sup>-1</sup>) bei Raps 2021. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

In 2022, dem Jahr mit der höchsten WUE im gesamten Versuchszeitraum, konnte die positive Wirkung der K-Düngung auf die WUE nur als Trend bei ortsüblicher Saatstärke festgestellt werden. Die durchgeführten Paarvergleiche für den Prüffaktor K konnten keine signifikanten Unterschiede absichern (Abbildung 30). Auch die Prüffaktoren Saatstärke und N-Düngung hatten 2022 keine signifikante Wirkung auf die WUE.

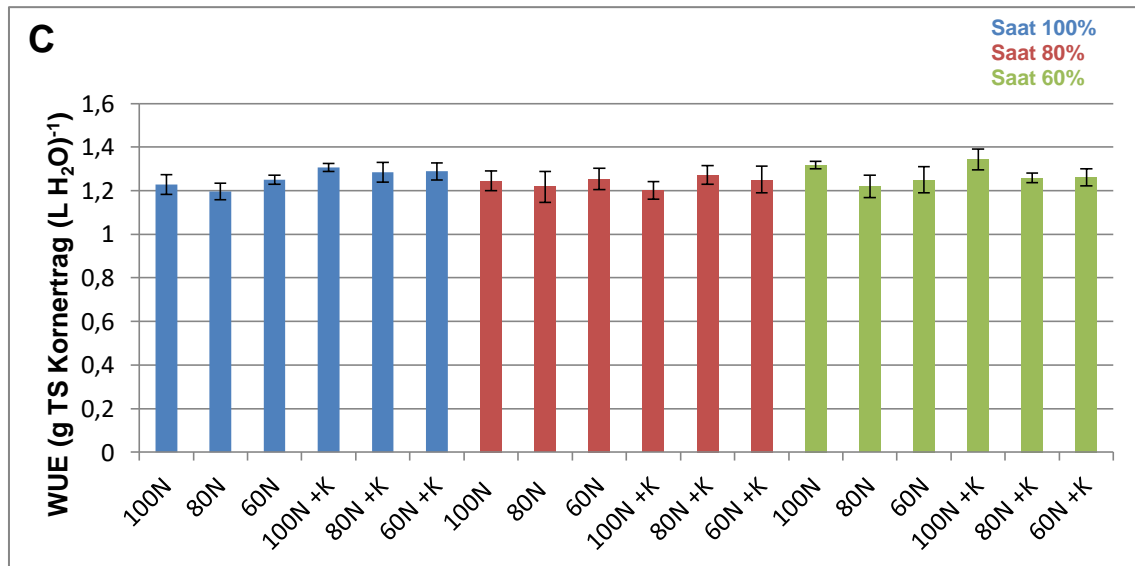


Abbildung 30: Wassernutzungseffizienz (g TS Kornertrag (L H<sub>2</sub>O)<sup>-1</sup>) bei Raps 2022. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Keine signifikanten Unterschiede (p = 0,05) in den jeweiligen Kontrasten (Paarvergleiche).

Der signifikante Unterschied im Rapskornertrag 2022 (Abbildung 64) zwischen ortsüblicher und 80%tiger Saatstärke bei maximaler N- und erfolgter K-Düngung war bei der WUE für 2022 sehr knapp nicht signifikant nachzuweisen, da die saatstärkenreduzierte Prüfvariante geringfügig weniger Wasser verbraucht hatte als die Prüfvariante mit ortsüblicher Saatstärke (Tabelle 5).

### 3.4. Pflanzenanalytik

In den Versuchsjahren 2021 und 2022 wurden statistisch auswertbare Pflanzenanalysen im Weizen für die N- und K-Konzentration in der Trockenmasse (TM) in Stadium EC 34/37 durchgeführt. Die Ergebnisse sind für N in Abbildung 31 für das Versuchsjahr 2021 dargestellt.

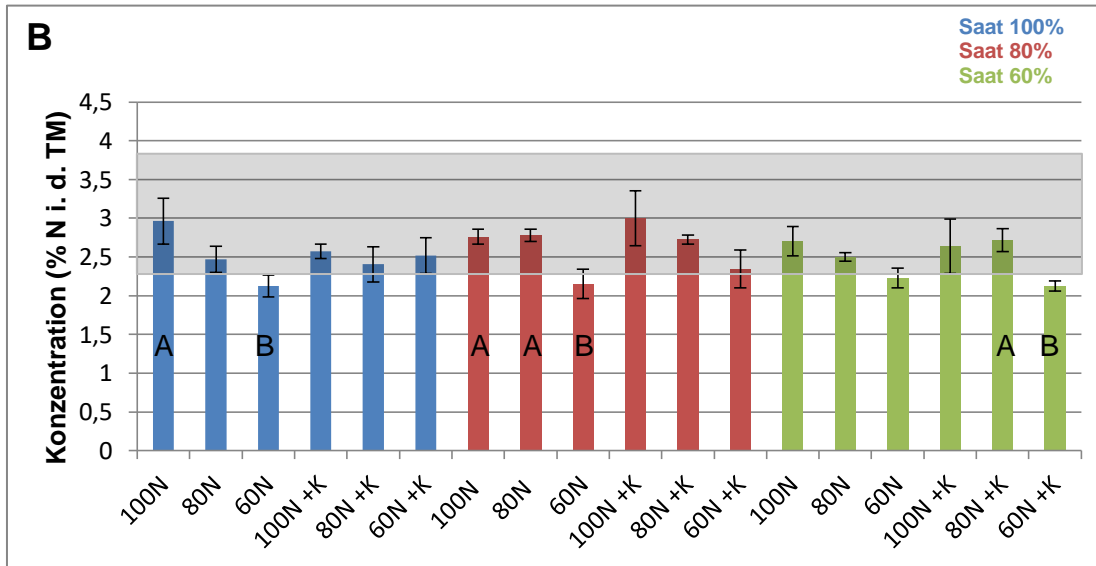


Abbildung 31: N-Konzentration in der Trockenmasse zu Stadium EC 34/37 im Weizen in 2021. Grau hinterlegt ist die kritische Nährstoffkonzentration nach Bergmann (1988). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ( $n = 4$ ). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ( $p = 0,05$ ) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich).

(A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeeffekt).

Grau hinterlegt im Diagramm ist der Bereich der kritischen Nährstoffkonzentration nach Bergmann (1988). Die von Bergmann ausgewiesene kritische Konzentration für N in Stadium EC 34/37 für Weizen liegt bei 2,3-3,8% N in der Trockenmasse und wurde nicht von allen Prüfvarianten erreicht. Ausschließlich Prüfvarianten mit minimaler N-Düngeintensität unterschritten die kritische Nährstoffkonzentration.



Photo 16: Weizen (Prüfvariante Eins) am 27.05.2021 zur Probennahme für die Pflanzenanalytik (Photo: Desaga 2021).

In 2022, die N-Konzentration in der Trockenmasse des Weizens lag auf höherem Niveau als im Vorjahr, konnte eine signifikante Steigerung der N-Konzentration in der Trockenmasse des Weizens zu Stadium EC 34/37 durch gesteigerte N-Düngung nachgewiesen werden (Abbildung 32). Diverse angestellte Paarvergleiche zeigten signifikante Unterschiede zwischen maximaler und minimaler N-Düngeintensität. Bei reduzierter Saatstärke und geringer N-Düngeintensität war zudem eine positive K-Düngewirkung auf die N-Konzentration in der Trockenmasse nachzuweisen. In 2022 erreichten alle Prüfvarianten die kritische Konzentration nach Bergmann (1988).

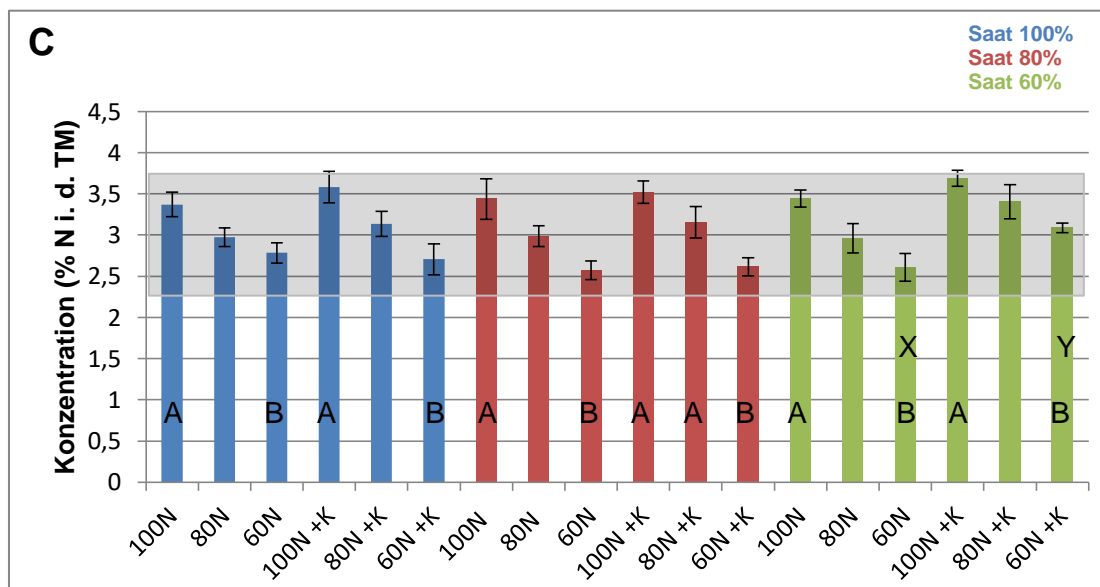


Abbildung 32: N-Konzentration in der Trockenmasse zu Stadium EC 34/37 im Weizen am 13.05.2022. Grau hinterlegt ist die kritische Nährstoffkonzentration nach Bergmann (1988). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich).

(A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Die K-Konzentration in der Trockenmasse des Weizens zu Stadium EC 34/37 war 2021 mit etwa 2,5% K i. d. TM deutlich geringer als 2022 und die kritische Konzentration nach Bergmann (1988) wurde 2021 von keiner Prüfvariante erreicht (Abbildung 33). Die kritische Nährstoffkonzentration nach Bergmann bei Weizen liegt für den Nährstoff K bei 3,3-4,5% in der Trockenmasse zu Stadium EC 34/37.

Erfolgte K-Düngung führte zur signifikanten Erhöhung der K-Konzentration in der Trockenmasse des Weizens. Dabei fiel auf, dass dieser Effekt unabhängig von der Saatstärke nur bei reduzierter N-Düngung nachweisbar war. Die für die N-Düngewirkung durchgeführten Paarvergleiche waren häufig knapp nicht

statistisch signifikant abzusichern, eine Steigerung der K-Konzentration durch intensive N-Düngung aber als Trend deutlich erkennbar.

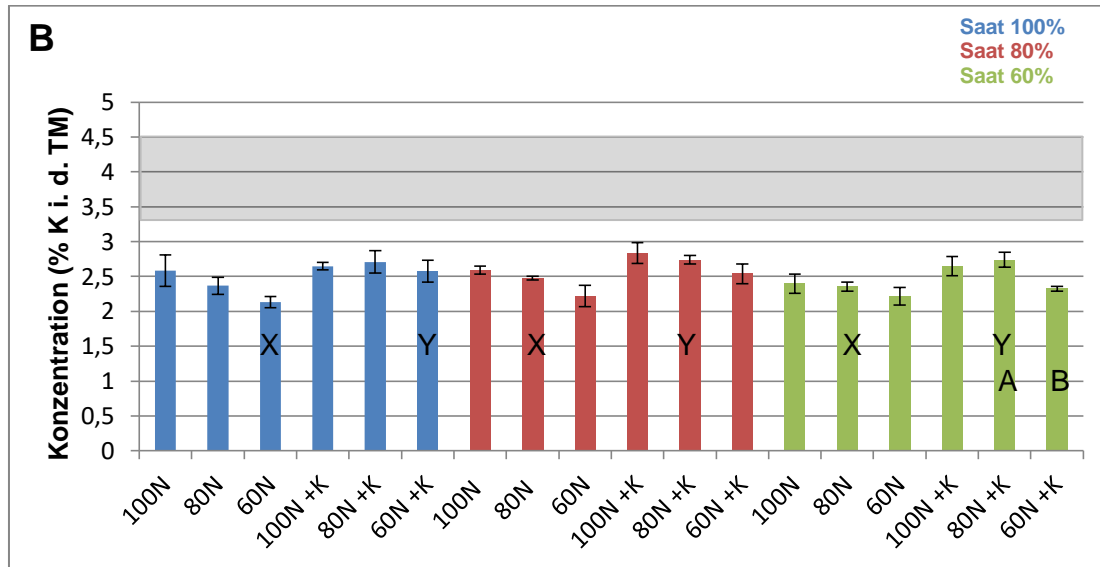


Abbildung 33: K-Konzentration in der Trockenmasse zu Stadium EC 34/37 im Weizen in 2021. Grau hinterlegt ist die kritische Nährstoffkonzentration nach Bergmann (1988). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Abbildung 34 zeigt die K-Konzentration in der Trockenmasse des Weizens zu Stadium EC 34/37 im Mai 2022.

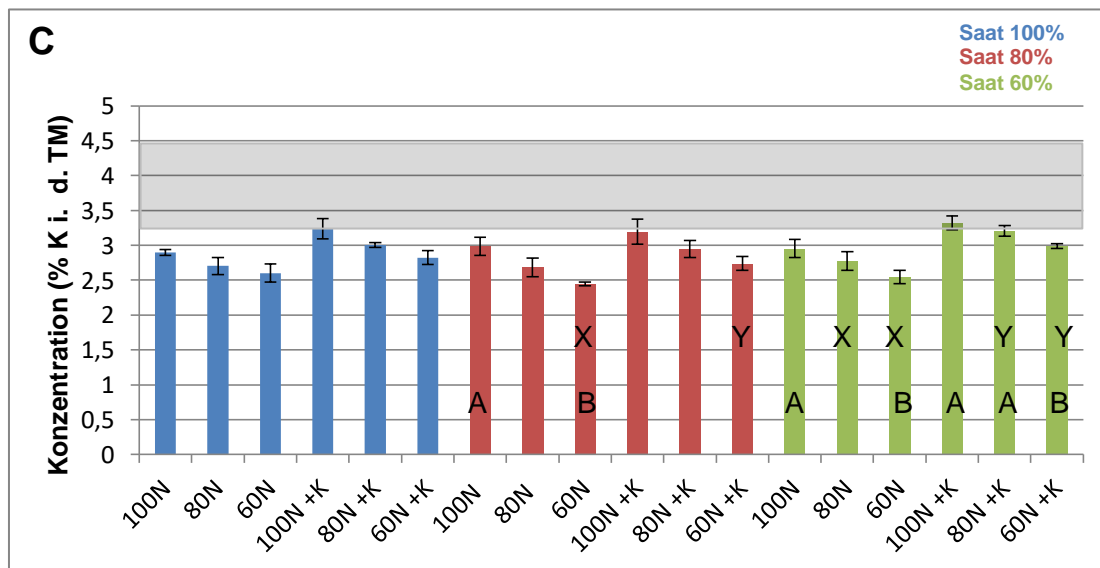


Abbildung 34: K-Konzentration in der Trockenmasse zu Stadium EC 34/37 im Weizen am 13.05.2022. Grau hinterlegt ist die kritische Nährstoffkonzentration nach Bergmann (1988). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Die K-Konzentration in der Trockenmasse des Weizens war 2022 deutlich gesteigert gegenüber 2021. Im Mittel aller Prüfvarianten wurde 2022 eine K-Konzentration von knapp 2,9% K i. d. TM gemessen, gegenüber 2,5% K i. d. TM in 2021.

Die kritische Nährstoffkonzentration nach Bergmann (1988) wurde nur von der Prüfvariante mit 60% Saatstärke, 100% N-Düngeintensität und erfolgter K-Düngung erreicht (Abbildung 34).

Die K-Konzentration in der Trockenmasse konnte durch K-Düngung signifikant gesteigert werden, wobei dieser Effekt wie bereits im Vorjahr nur bei reduzierter N-Düngeintensität zu beobachten war. Ebenfalls statistisch signifikant steigerte die Erhöhung der N-Düngung die K-Konzentration in der TM bei Prüfvarianten mit reduzierter Saatstärke und bestätigte damit den positiven Trend intensiver N-Düngung auf die K-Konzentration in der TM aus dem Vorjahr 2021 (Abbildung 33).

### 3.5. Ernteergebnisse Weizen

Der Kornertrag beim Weizen lag über den Gesamtversuchszeitraum in einem Bereich von 35-50 dt ha<sup>-1</sup> und variierte zwischen den Versuchsjahren lediglich gering. In den ersten beiden Versuchsjahren kostete ein Absenken der Saatstärke bei maximaler N- und erfolgter K-Düngung signifikant Kornertrag gegenüber der ortsüblichen Saatstärke und konnte in beiden Versuchsjahren durch einen signifikanten Unterschied im Paarvergleich statistisch abgesichert werden. Dies zeigen die Abbildung 35 für 2020 und die Abbildung 36 für 2021.

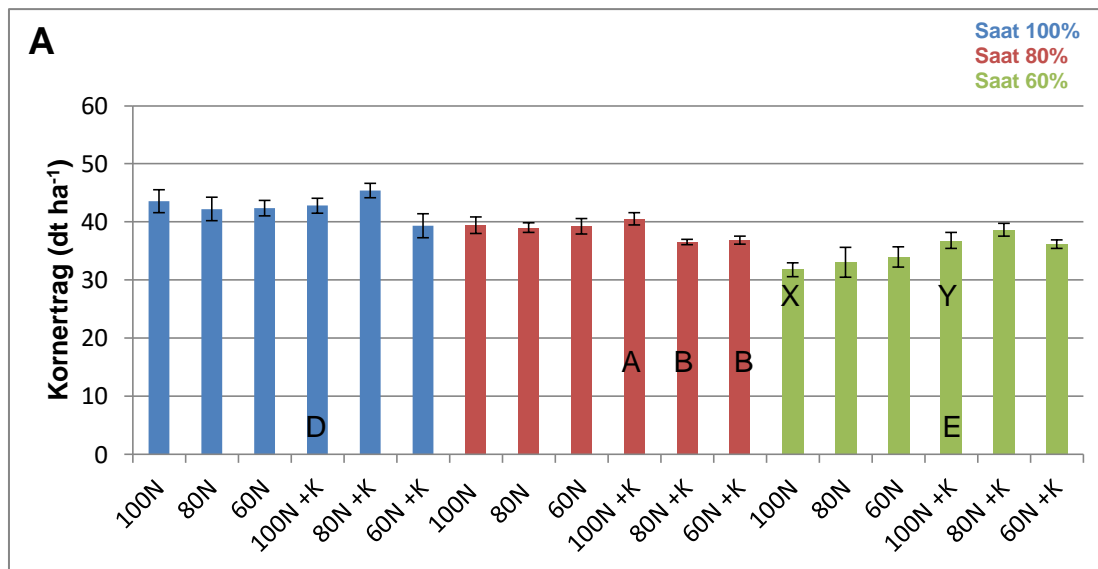


Abbildung 35: Kornertrag (dt ha<sup>-1</sup>) bei Weizen in 2020. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Die Prüfvarianten mit ortsüblicher Saatstärke erreichten 2020 im Mittel einen Kornertrag von gut 42,5 dt ha<sup>-1</sup>; die Prüfvarianten mit minimaler Saatstärke wiesen im Mittel hingegen lediglich einen Kornertrag von 35 dt ha<sup>-1</sup> auf.

In 2020 konnte zudem bei 60% Saatstärke und maximaler N-Düngung der Kornertrag durch K-Düngung positiv beeinflusst werden und bei 80% Saatstärke und gegebener K-Düngung gab es einen signifikant positiven N-Düngeeffekt im Paarvergleich. In 2020 hatten damit alle drei Prüffaktoren statistisch signifikanten Einfluss auf den Kornertrag bei Weizen.

In 2021 konnten neben dem positiven Effekt der ortsüblichen Saatstärke lediglich ein signifikanter K-Düngeeffekt bei reduzierter Saatstärke und maximaler N-Düngung nachgewiesen werden (Abbildung 36). Die Steigerung des Kornertrages durch die Verwendung der ortsüblichen Saatstärke gegenüber der minimalen Saatstärke war ähnlich wie 2020 und betrug im Mittel der Prüfvarianten gut 6 dt ha<sup>-1</sup>.

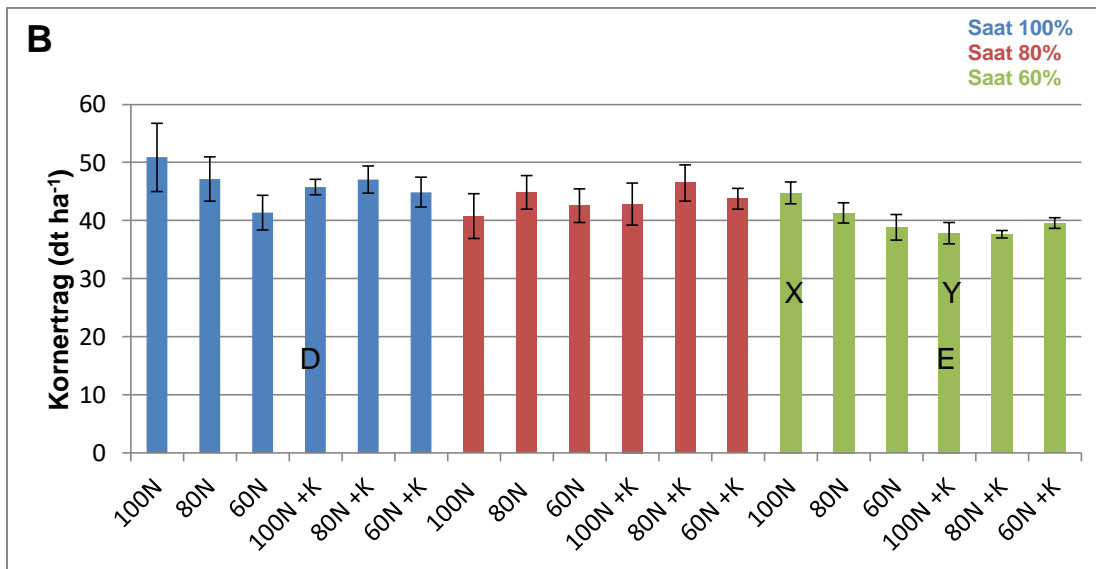


Abbildung 36: Kornertrag (dt ha<sup>-1</sup>) bei Weizen in 2021. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Zur dritten Weizenernte 2022, dargestellt in Abbildung 37, waren weder signifikante Saatstärkeneffekte noch K-Düngeeffekte auf den Kornertrag zu verzeichnen. Die Erträge variierten sehr stark und wiesen große Varianzen innerhalb der Prüfvarianten auf, weshalb die Kornertragsergebnisse und rechnerisch daraus ermittelte Ergebnisse schwierig zu bewerten waren. Das in der ANOVA für den Prüffaktor N-Düngung signifikante Ergebnis konnte nicht durch signifikante Unterschiede in den durchgeführten Paarvergleichen abgesichert werden.

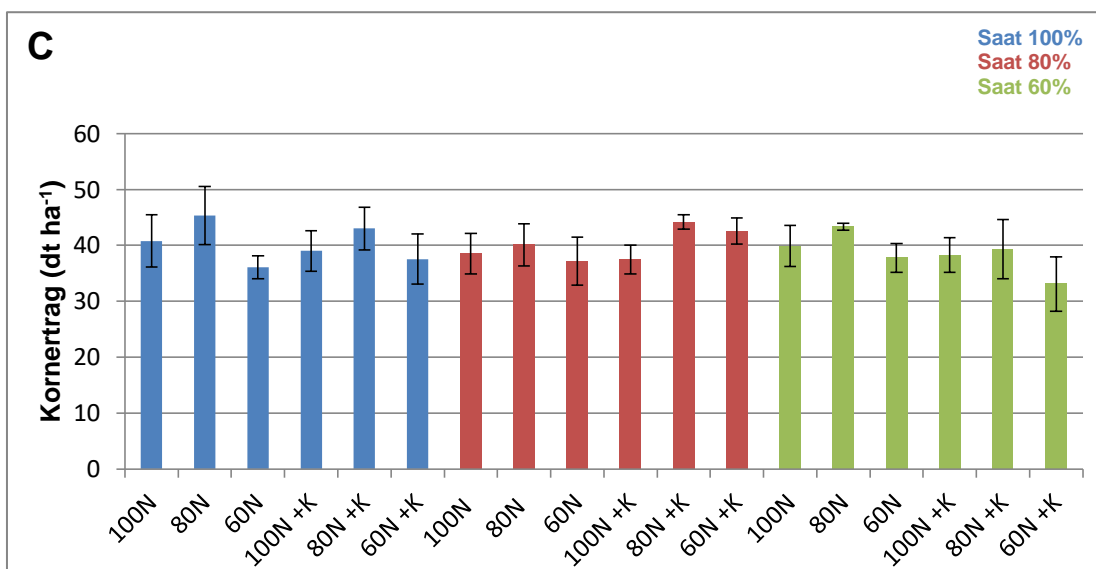


Abbildung 37: Kornertrag (dt ha<sup>-1</sup>) bei Weizen in 2022. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Keine signifikanten Unterschiede (p = 0,05) in den jeweiligen Kontrasten (Paarvergleiche).

Die Ährenanzahl  $\text{m}^{-2}$  variierte zwischen den Versuchsjahren trotz identischer Saatstärken und ähnlicher Saattermine erheblich; dies fand sich im Kornertrag zwischen den Versuchsjahren nicht im selben Umfang wieder. 2020 lag die Ährenanzahl im Bereich 250-300 Ähren  $\text{m}^{-2}$  und damit lediglich etwa halb so hoch wie im Folgejahr 2021 mit bis zu 650 Ähren  $\text{m}^{-2}$ .

Die Ährenanzahl ließ sich in den beiden Jahren 2020 und 2021, ähnlich wie der Kornertrag, bei maximaler N- und erfolgter K-Düngung durch die ortsübliche Saatstärke signifikant gegenüber dem auf 60% reduzierten Saatstärkeniveau erhöhen. Dies zeigen Abbildung 38 für das Jahr 2020 und Abbildung 39 für das Jahr 2021, in dem sich auch die beiden in der Saatstärke reduzierten Prüfvarianten signifikant voneinander unterschieden.

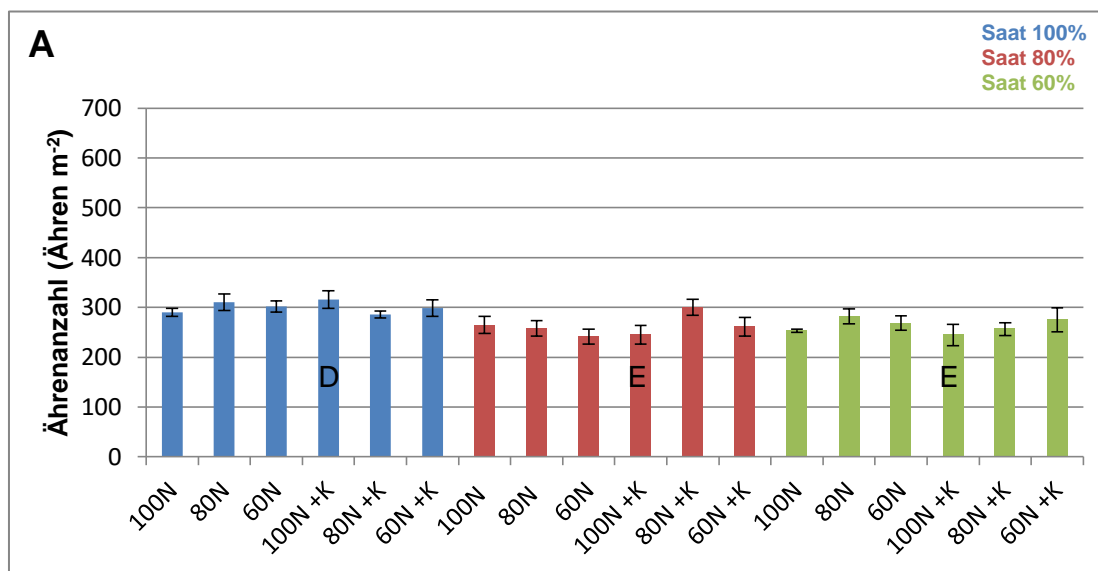


Abbildung 38: Ährenanzahl (Ähren  $\text{m}^{-2}$ ) bei Weizen in 2020. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ( $n = 4$ ). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ( $p = 0,05$ ) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Im Gegensatz zu 2020 hatte in 2021 auch die N-Düngeintensität eine Wirkung auf die Ährenanzahl  $\text{m}^{-2}$ ; eine Verminderung der N-Düngung reduzierte die Ährenanzahl  $\text{m}^{-2}$  gegenüber maximaler N-Düngung in mehreren Paarvergleichen signifikant.

Auffällig war zudem der K-Düngeeffekt bei ortsüblicher Saatstärke und hoher N-Düngung, der mit über 650 Ähren  $\text{m}^{-2}$  zu der mit Abstand höchsten Ährenanzahl aller Prüfvarianten im Jahr 2021 führte (Abbildung 39).

Im Jahr 2021 wurde ein Bestockungskoeffizient von rund 2,5 bei den auf 80% Saatstärke reduzierten Prüfvarianten und rund 3,0 bei 60% Saatstärke erreicht. Damit lag der Bestockungskoeffizient gegenüber 2020 auf etwa dem doppelten Niveau, woraus deutlich höhere Ährenanzahlen  $\text{m}^{-2}$  resultierten.

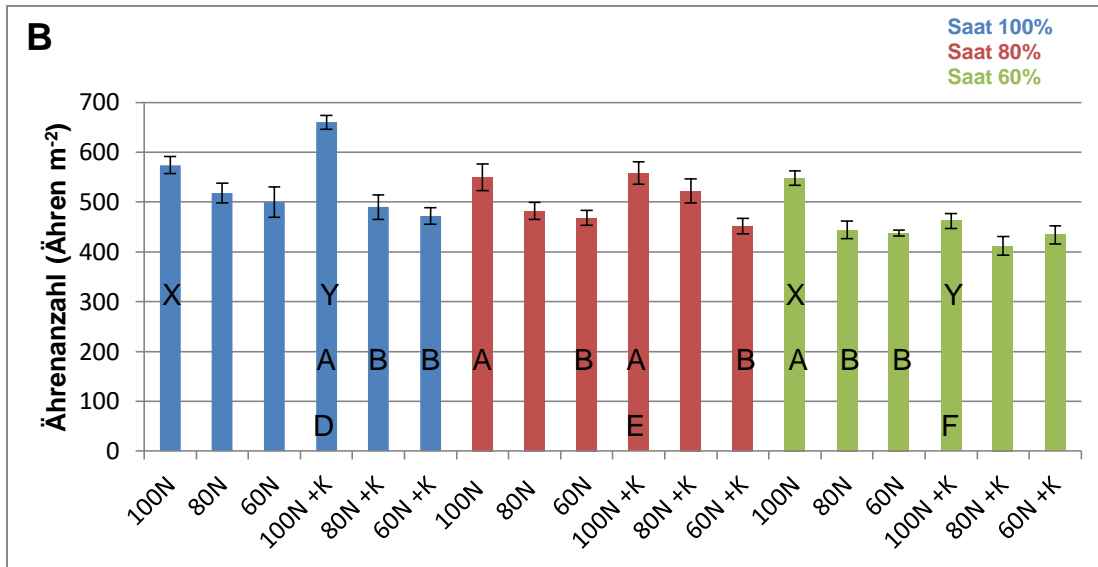


Abbildung 39: Ährenzahl (Ähren m<sup>-2</sup>) bei Weizen in 2021. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Auch in 2022 wirkte sich die Reduktion von Saatstärke und N-Düngung signifikant negativ auf die Ährenzahl m<sup>-2</sup> aus (Abbildung 40). Die Erhöhung der Ährenzahl m<sup>-2</sup> durch intensive N-Düngung konnte in diversen Paarvergleichen unabhängig von der Saatstärke und der K-Düngung belegt werden, resultierte aber nicht in höheren Kornerträgen.

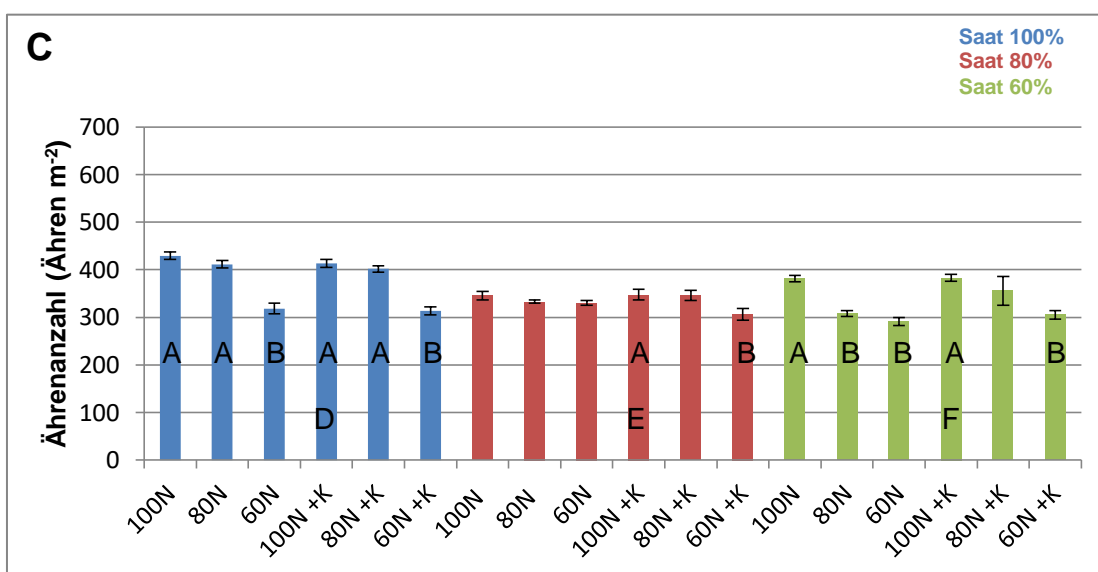


Abbildung 40: Ährenzahl (Ähren m<sup>-2</sup>) bei Weizen in 2022. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Die Kornanzahl  $\text{Ähre}^{-1}$  lag über den gesamten Versuchszeitraum zwischen 22-35 Körnern  $\text{Ähre}^{-1}$ . Die geringste Kornanzahl  $\text{Ähre}^{-1}$  wurde in 2021 (Abbildung 42) gemessen, die höchste in 2020 (Abbildung 41). Eine basale beziehungsweise akropetale Reduktion angelegter Spindelstufen war häufig zu beobachten, konnte aber den Prüffaktoren nicht eindeutig zugeordnet werden.



Photo 17: Weizenähre bei ortsüblicher Saatstärke, maximaler N- und erfolgter K-Düngung am 14.06.2020 (Photo: Desaga 2020).

Eine signifikante Wirkung der Prüffaktoren auf die Kornanzahl  $\text{Ähre}^{-1}$  konnte 2020 nicht nachgewiesen werden.

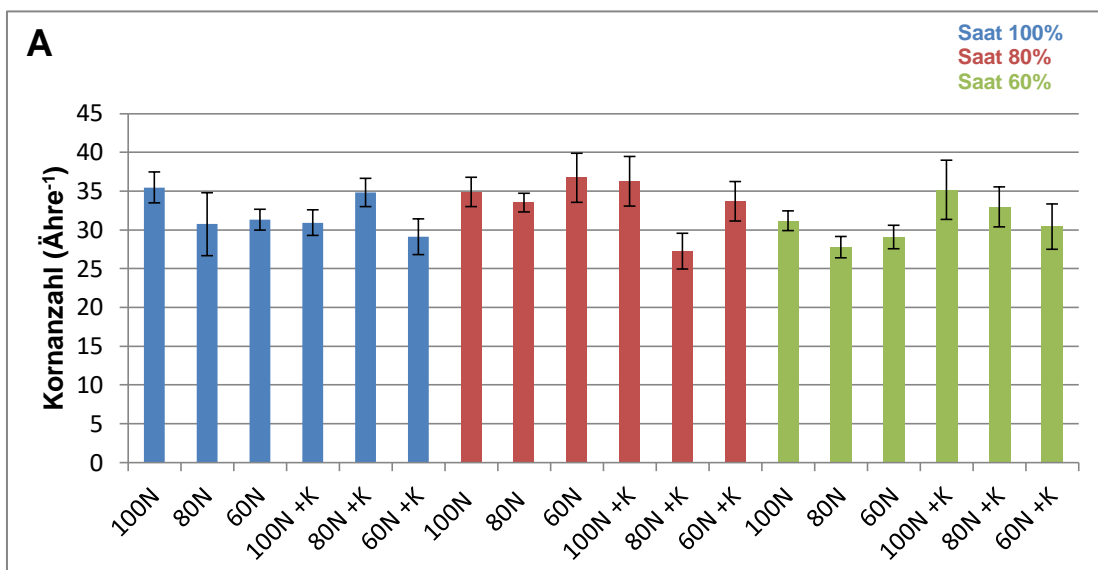


Abbildung 41: Kornanzahl  $\text{Ähre}^{-1}$  bei Weizen 2020. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ( $n = 4$ ). Keine signifikanten Unterschiede ( $p = 0,05$ ) in den jeweiligen Kontrasten (Paarvergleiche).

Die Kornanzahl Ähre<sup>-1</sup> reagierte 2021 gegenläufig auf die Prüffaktoren wie der Parameter der Ährenanzahl m<sup>-2</sup>. So wurde die Kornanzahl Ähre<sup>-1</sup> durch die maximale N-Düngeintensität gegenüber der reduzierten N-Düngung signifikant vermindert. Prüfvariante vier (100% Saatstärke, 100% N-Düngung, erfolgte K-Düngung), welche durch eine besonders hohe Ährendichte aufgefallen war, wies besonders wenig Körner Ähre<sup>-1</sup> auf und unterschied sich signifikant zu der auf 60% Saatstärke reduzierten Prüfvariante. Dies zeigt Abbildung 42.

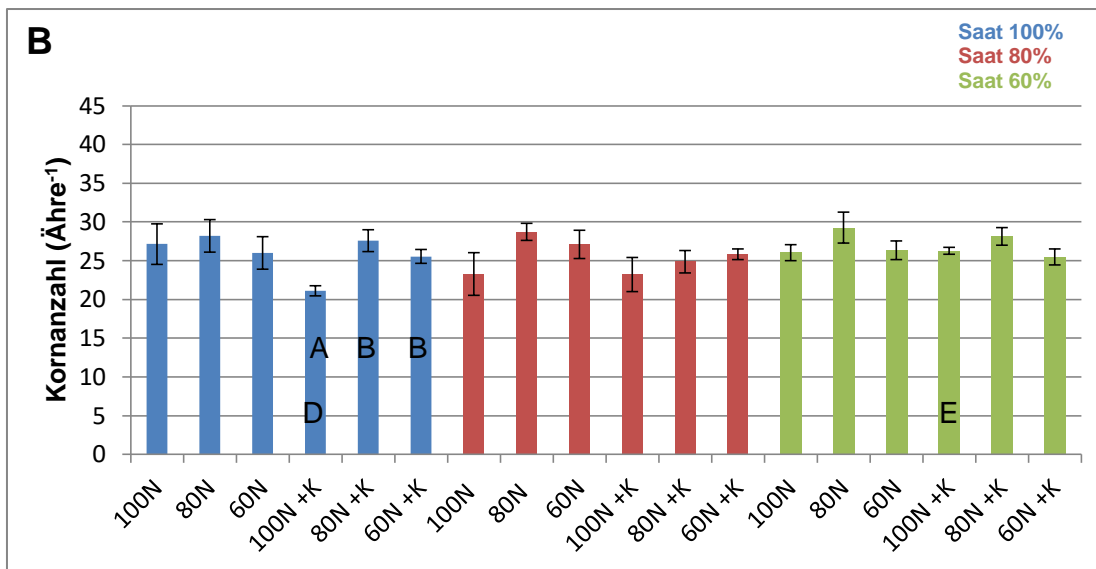


Abbildung 42: Kornanzahl Ähre<sup>-1</sup> bei Weizen 2021. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

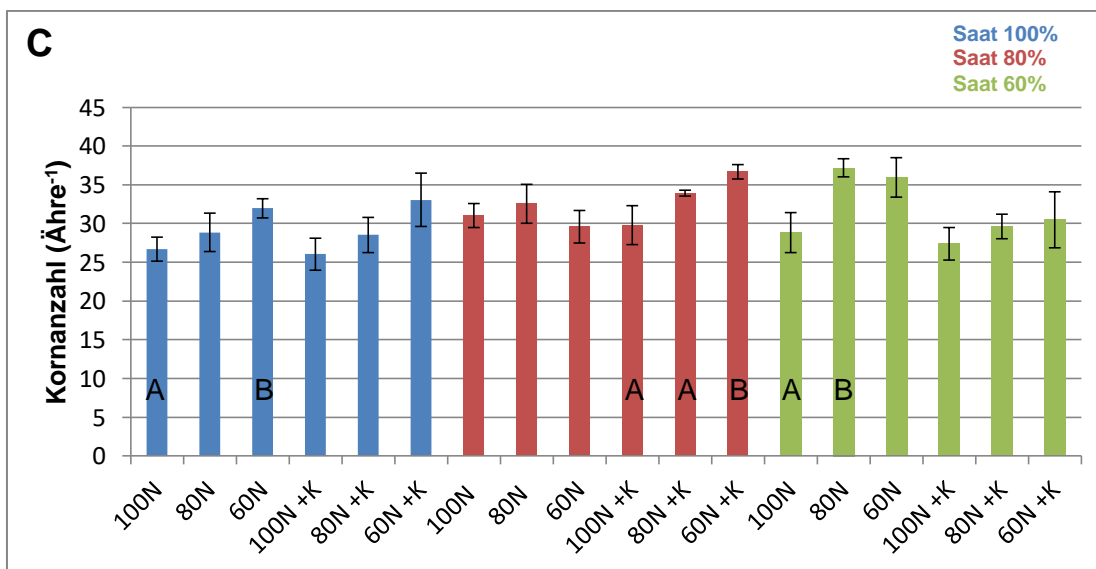


Abbildung 43: Kornanzahl Ähre<sup>-1</sup> bei Weizen 2022. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Die negative Wirkung hoher N-Düngung auf die Kornanzahl Ähre<sup>-1</sup> war in 2022 ebenfalls zu beobachten und konnte durch drei signifikante Unterschiede in den angestellten Paarvergleichen unabhängig von der Saatstärke nachgewiesen werden (Abbildung 43).

Von größerem Interesse als die Kornanzahl Ähre<sup>-1</sup> war aber die Kornanzahl m<sup>-2</sup>, da diese gemeinsam mit der TKM unmittelbar den Kornertrag bildet. Dieser Parameter wurde rechnerisch aus dem Kornertrag der Gesamtparzelle, deren Größe und der TKM errechnet. In 2020 (Abbildung 44) und in 2021 (Abbildung 45) wurde die Kornanzahl m<sup>-2</sup> durch reduzierte Saatstärken signifikant vermindert. In 2020 wiesen die Prüfvarianten mit ortsüblicher Saatstärke rund 9500 Körner m<sup>-2</sup> auf; eine Reduktion der Saatstärke auf 60% resultierte in einer über 15%tigen Verminderung der Kornanzahl m<sup>-2</sup> auf etwa 8000 Körner m<sup>-2</sup>.

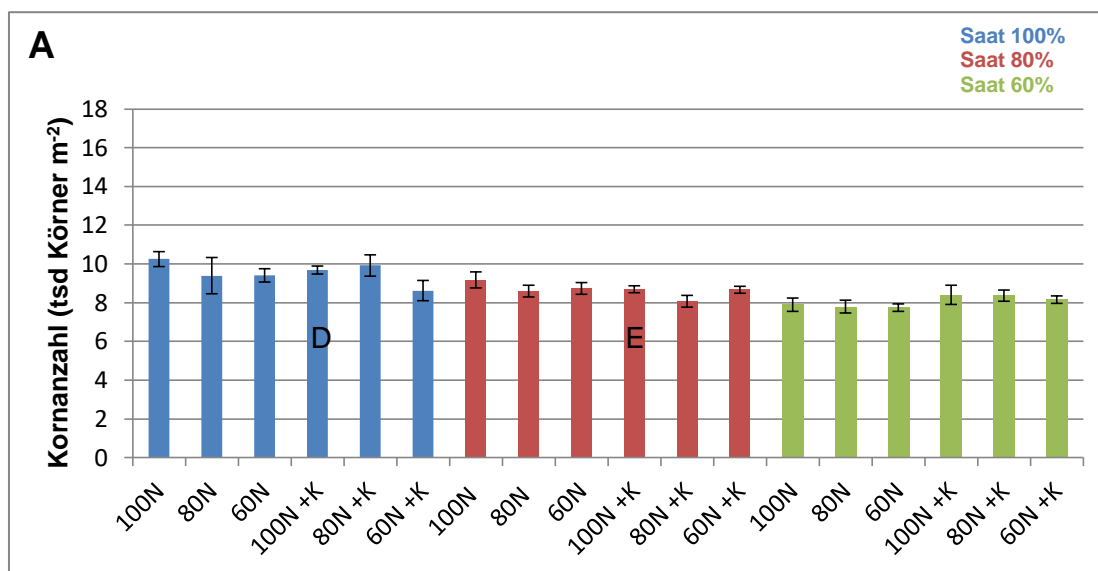


Abbildung 44: Kornanzahl (tsd. Körner m<sup>-2</sup>) bei Weizen in 2020. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Die signifikante Reduktion der Kornanzahl  $\text{m}^{-2}$  in 2021 durch reduzierte Saatstärken und reduzierte N-Düngung zeigt Abbildung 45.

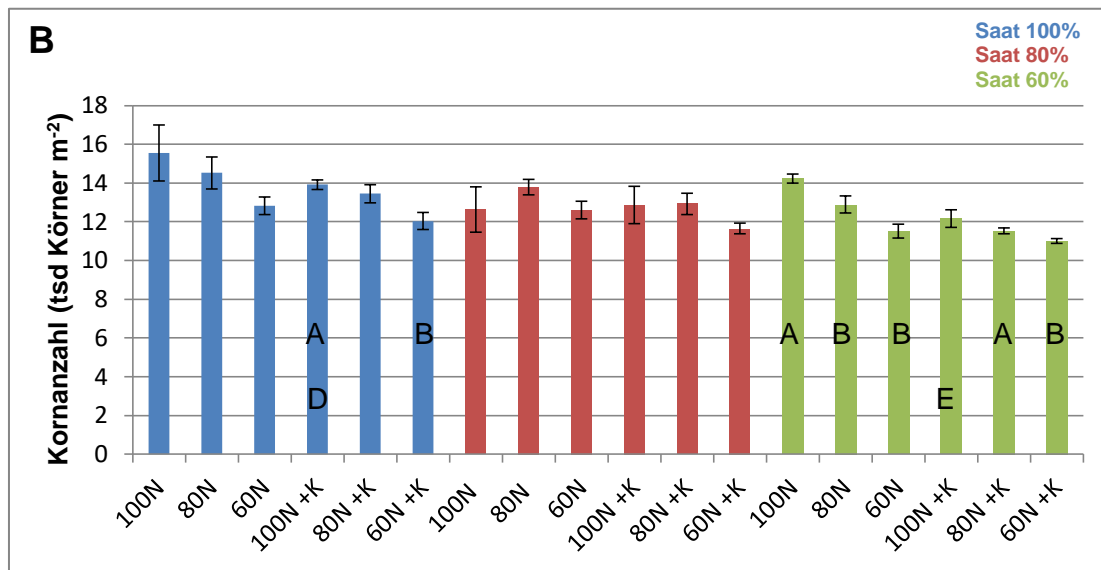


Abbildung 45: Kornanzahl (tsd. Körner  $\text{m}^{-2}$ ) bei Weizen in 2021. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ( $n = 4$ ). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ( $p = 0,05$ ) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

In 2022 gab es, genau wie beim Kornertrag (Abbildung 37), keine signifikanten Effekte der Prüffaktoren auf die Kornanzahl  $\text{m}^{-2}$ .

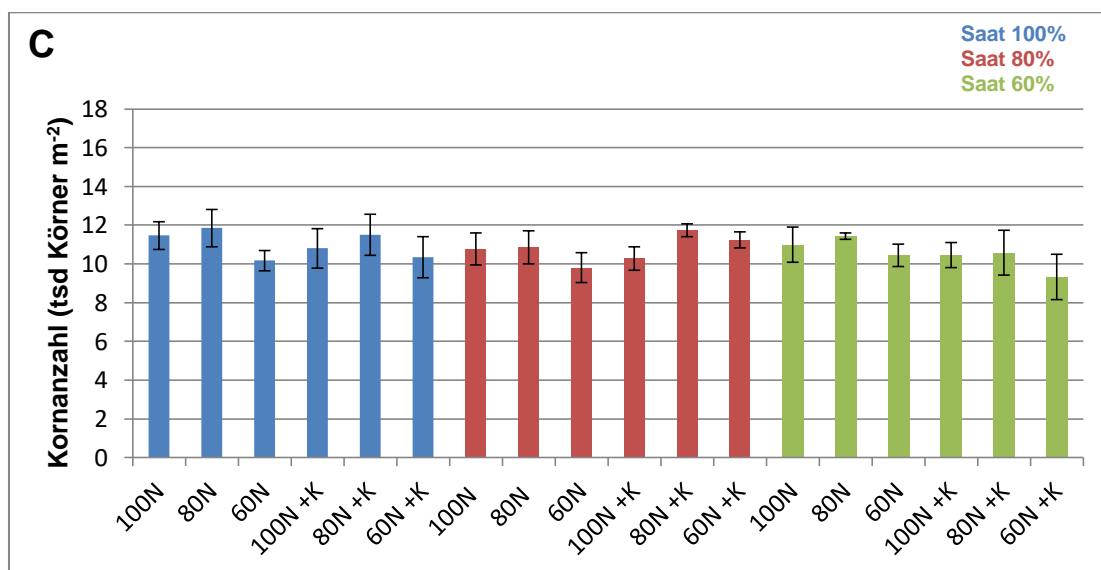


Abbildung 46: Kornanzahl (tsd. Körner  $\text{m}^{-2}$ ) bei Weizen in 2022. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ( $n = 4$ ). Keine signifikanten Unterschiede ( $p = 0,05$ ) in den jeweiligen Kontrasten (Paarvergleiche).

Zur Vervollständigung der Ertragsparameter des Weizens wurde zudem die Tausendkornmasse (TKM) erfasst, welche über den Gesamtversuch in einem Bereich von 30-47 g lag und damit stark variierte. Die TKM war 2020 (dem Jahr mit der geringsten Kornanzahl m<sup>-2</sup>) am höchsten und lag bei allen Prüfvarianten über 40 g. Die schwächste TKM wurde 2021 (dem Versuchsjahr mit dem höchsten Kornanzahlen m<sup>-2</sup>) mit unter 35 g im Mittel aller Prüfvarianten gemessen.

Die TKM wurde 2020 (Abbildung 47) von den Prüffaktoren N- und K-Düngung beeinflusst. In 2020 erhöhte die K-Düngung die TKM bei reduzierten Saatstärken und maximaler bzw. mittlerer N-Düngeintensität signifikant.

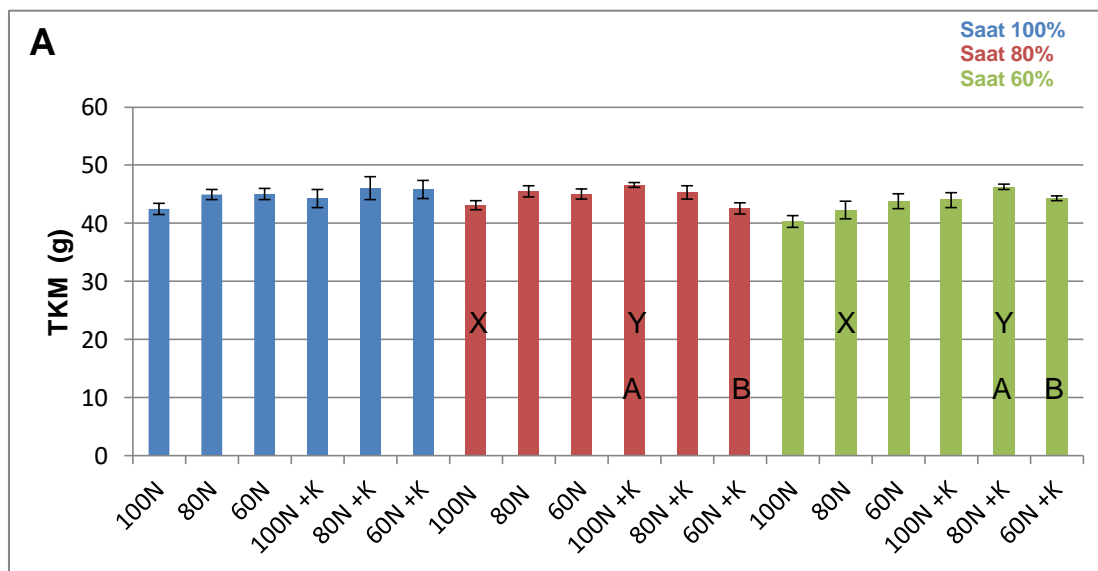


Abbildung 47: TKM (g) bei Weizen 2020. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Die Wirkung der N-Düngung hingegen war wenig eindeutig, verursachte aber signifikante Unterschiede in zwei Paarvergleichen bei mittlerer und minimaler Saatstärke und erfolgter K-Düngung, in denen die TKM durch intensive N-Düngung erhöht wurde (Abbildung 47). Die Wirkung der N-Düngung auf die TKM war 2020 wenig eindeutig, da von den signifikanten Unterschieden im Paarvergleich abgesehen, die 100%-N-Düngeintensität tendenziell die TKM verminderte. Die Prüfvarianten mit maximaler N-Düngung wiesen im Mittel eine TKM von rund 43,5 g auf, die Prüfvarianten mit 80%-N-Düngeintensität hingegen über 45 g. Eine Erhöhung der TKM durch hohe N-Düngung konnte in den Folgejahren nicht erneut nachgewiesen werden. Gegenteiliges war der Fall. Die positive Wirkung der K-Düngung auf die TKM bei minimaler N-Düngeintensität konnte in 2021 bei zwei Paarvergleichen signifikant abgesichert werden. Damit konnte K-Düngung die TKM bei Weizen zweijährig

steigern. Die Steigerung der TKM in 2021 durch K-Düngung lag im Mittel aller Prüfvarianten bei über 2 g. Die Wirkung der N-Düngung war 2021 einheitlicher als 2020; maximale N-Düngung vermindert die TKM gegenüber reduzierter N-Düngung. Im Mittel der Prüfvarianten lag dieser Unterschied bei rund 10% zwischen maximaler und minimaler N-Düngeintensität. Bei erfolgter K-Düngung und unabhängig von der Saatstärke konnte dieser Effekt durch signifikante Unterschiede in mehreren Paarvergleichen nachgewiesen werden (Abbildung 48).

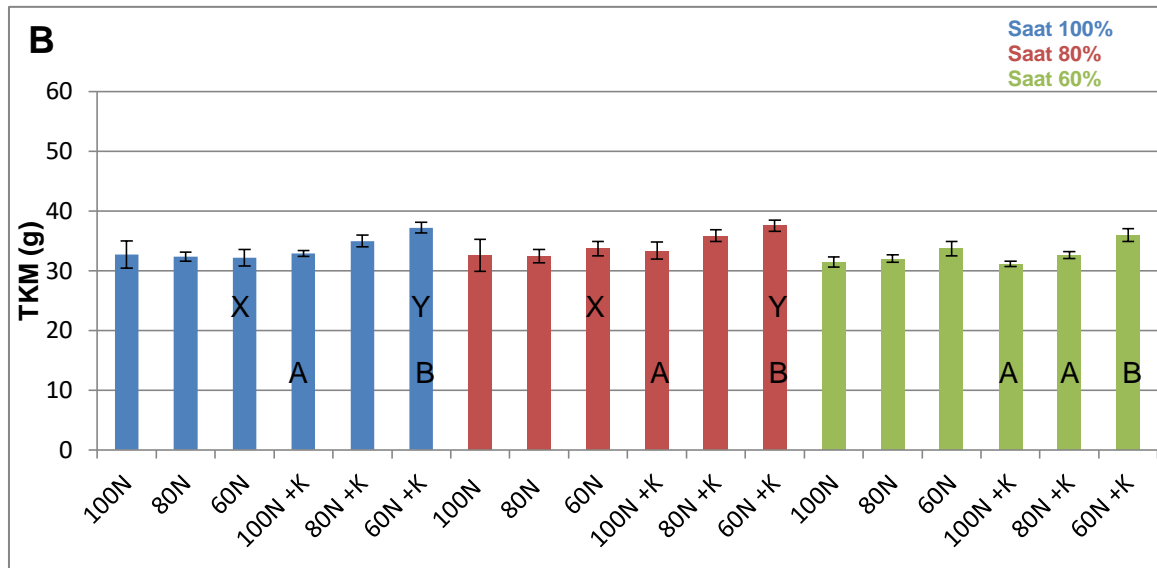


Abbildung 48: TKM (g) bei Weizen 2021. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

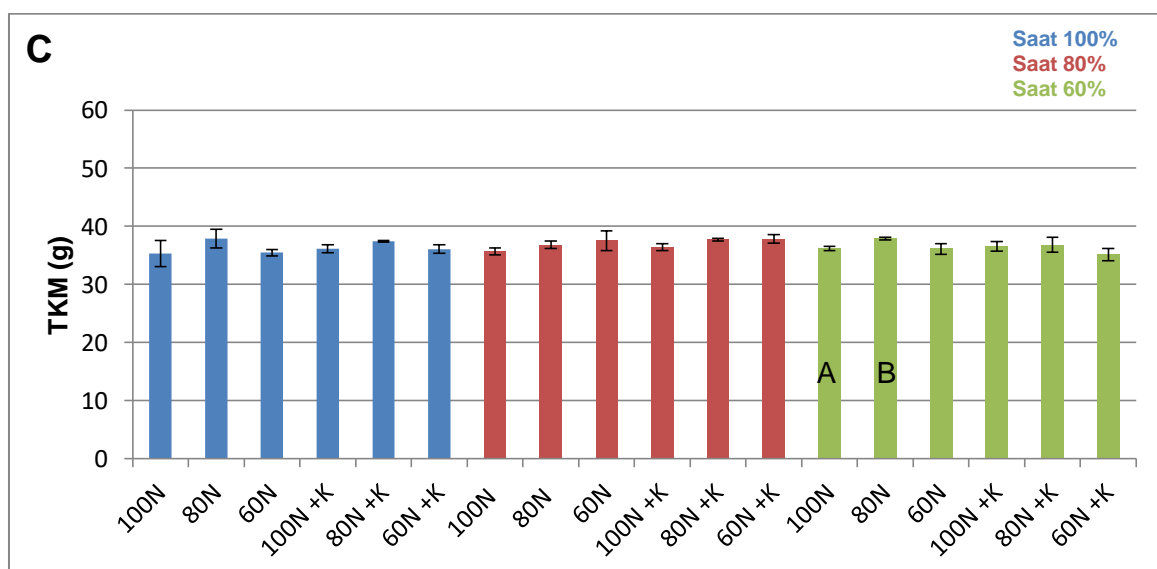


Abbildung 49: TKM (g) bei Weizen 2022. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt)

Im letzten Versuchsjahr 2022 wirkte maximale N-Düngung ebenso negativ auf die TKM des Weizens (Abbildung 49). Dies konnte durch einen signifikanten Unterschied im Paarvergleich bei 60% Saatstärke und unterlassener K-Düngung abgesichert werden. Die Prüfvarianten mit 100%-N-Düngeintensität wiesen im Mittel eine TKM von 36 g auf und hatten damit die geringste TKM aller N-Düngeintensitäten. Signifikante K-Düngeeffekte auf die TKM gab es 2022 nicht.

### 3.5.1. Qualitätsparameter Weizen

Das Hektolitergewicht hatte über den gesamten Versuchszeitraum auffallend geringe Werte von etwa 62-72 kg HL<sup>-1</sup>, was eine deutliche Qualitätsminderung darstellte.

Im ersten Versuchsjahr kam es nach einer längeren Trockenstressphase durch spät einsetzende Niederschläge (Abbildung 16) zu massivem Zwiewuchs im Weizen. Der Zwiewuchs war so intensiv, dass eine Vorerntesikkation notwendig war, um eine problemlose Ernte gewährleisten zu können. Der Zwiewuchs trat dabei in den triebschwächeren Varianten besonders massiv auf, was zu einer Verringerung des Hektolitergewichtes führte. Die Reduktion der Saatstärke führte daher in 2020 zu einer deutlichen Reduktion des Hektolitergewichtes, zu erkennen in Abbildung 50. Die Prüfvarianten mit ortsüblicher Saatstärke wiesen im Mittel ein Hektolitergewicht von knapp 72,0 kg auf, Prüfvarianten mit maximal reduzierter Saatstärke hingegen lediglich rund 69,5 kg.

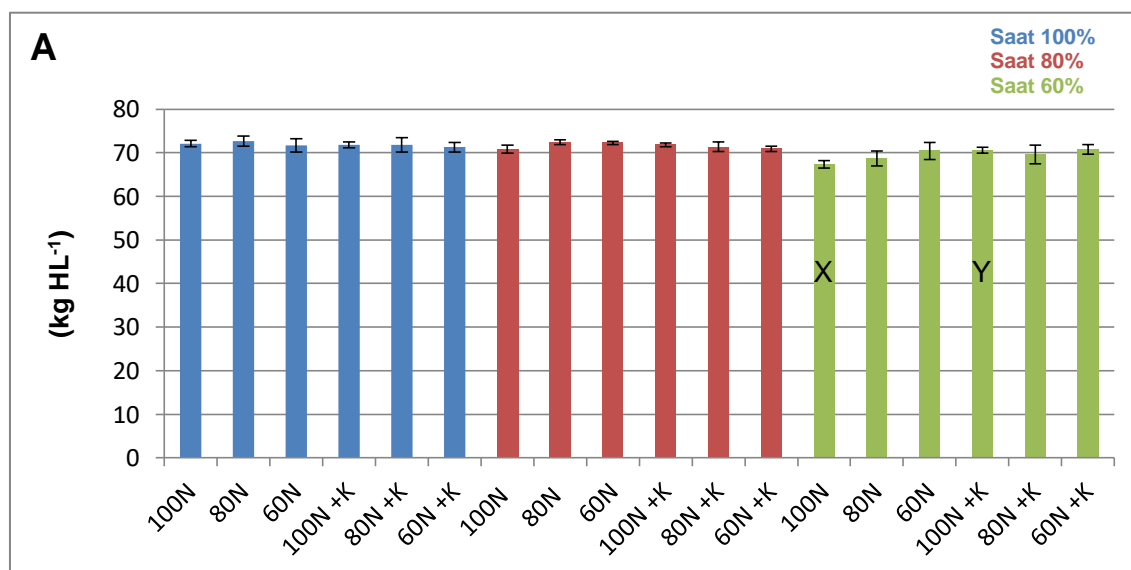


Abbildung 50: Hektolitergewicht (kg HL<sup>-1</sup>) bei Weizen 2020. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Eine signifikant positive Wirkung der K-Düngung auf das Hektolitergewicht war 2020 lediglich bei stark reduzierter Saatstärke und hoher N-Düngung nachweisbar. Besonders schwach war das Hektolitergewicht, genauso wie die TKM (Abbildung 48), in 2021 mit Werten knapp über 60,0 kg HL<sup>-1</sup>. Die Wirkung der Prüffaktoren auf das Hektolitergewicht war deren Wirkung auf die TKM bei Weizen in 2021 sehr ähnlich. K-Düngung erhöhte, maximale N-Düngung hingegen reduzierte das Hektolitergewicht signifikant.



Photo 18: Zwiewuchs an Weizen am 10.07.2020 (Photo: Desaga 2020).

Dies zeigt Abbildung 51 für das Jahr 2021 mit diversen signifikanten Unterschieden in den durchgeführten Paarvergleichen für die Effekte der N- und K-Düngung.

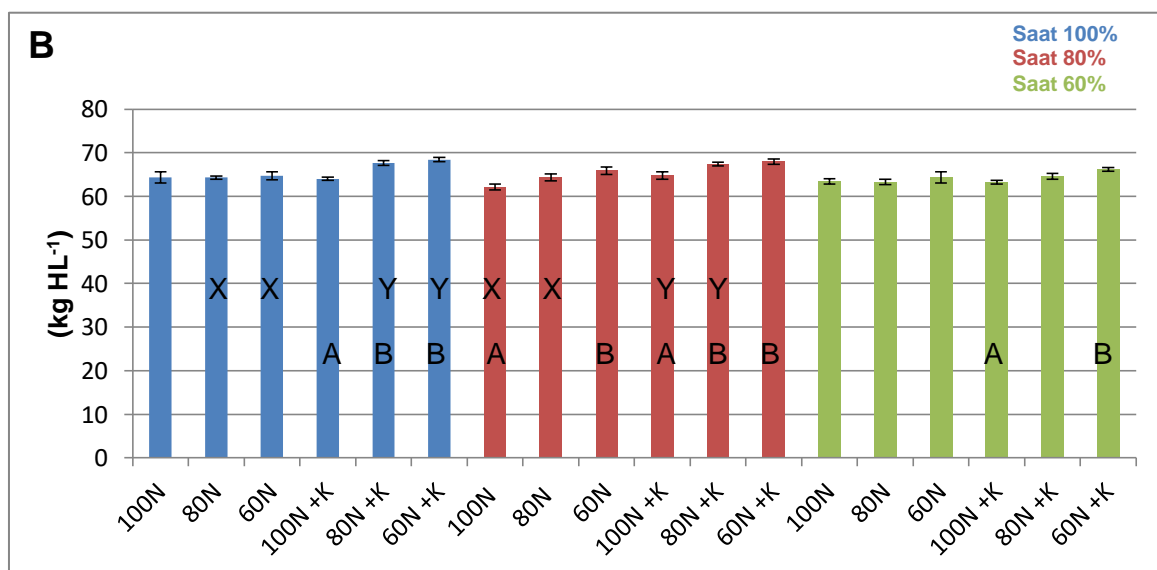


Abbildung 51: Hektolitergewicht (kg HL<sup>-1</sup>) bei Weizen 2021. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Im Mittel der Prüfvarianten konnte das Hektolitergewicht 2021 durch erfolgte K-Düngung um rund 2,0 kg auf 66,0 kg HL<sup>-1</sup> gegenüber den Prüfvarianten mit unterlassener K-Düngung gesteigert werden.

In 2022, das Hektolitergewicht lag knapp unter 70,0 kg HL<sup>-1</sup>, waren keine signifikanten Effekte der Prüffaktoren auf das Hektolitergewicht nachzuweisen (Abbildung 52).

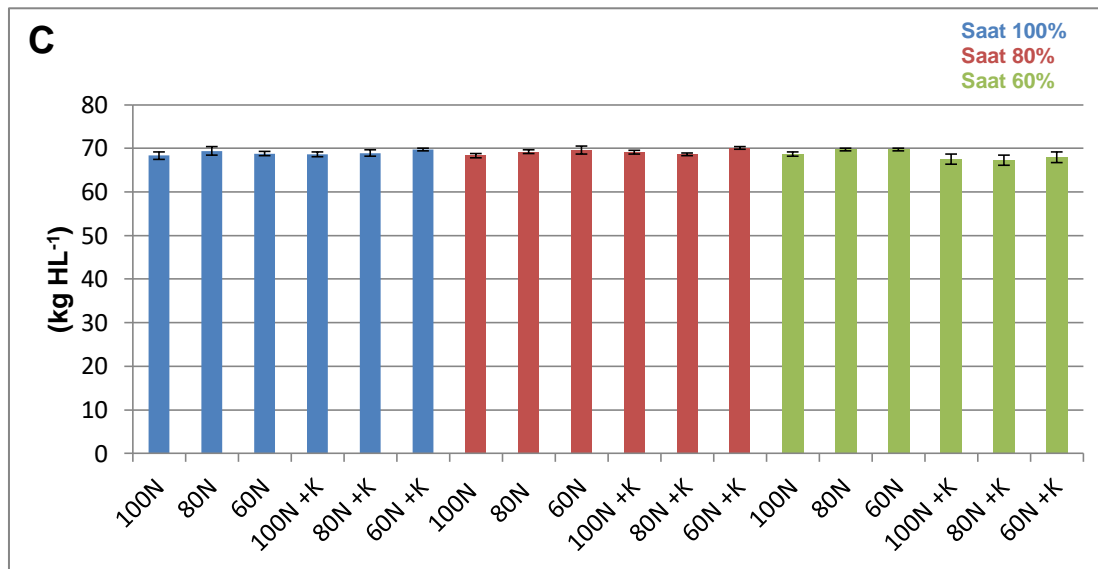


Abbildung 52: Hektolitergewicht (kg HL<sup>-1</sup>) bei Weizen 2022. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Keine signifikanten Unterschiede (p = 0,05) in den jeweiligen Kontrasten (Paarvergleiche).

Die Fallzahl als wichtiger Qualitätsparameter für die Backeigenschaften des Mehls, lag über den gesamten Versuchszeitraum bei geringer Variation auf hohem Niveau zwischen 350-400 s. Die Wirkung der Prüffaktoren auf die Fallzahl war in den drei Versuchsjahren nicht einheitlich.

In 2020 wies die Fallzahl große Varianzen innerhalb der Prüfvarianten auf und reagierte nicht eindeutig auf die Prüffaktoren (Abbildung 53). Eine positive Wirkung hoher N-Düngung war bei ortsüblicher Saatstärke und unterlassener K-Düngung in 2020 als Trend erkennbar aber statistisch deutlich nicht signifikant.

Die beiden folgenden Versuchsjahre hingegen wiesen vergleichbare Ergebnisse auf: Eine Reduktion der N-Düngung reduzierte die Fallzahl. Dieser Effekt war 2021 und 2022 signifikant nachweisbar; nicht signifikant aber als Trend erkennbar war die positive Wirkung der K-Düngung auf die Fallzahl bei ortsüblicher und stark reduzierter Saatstärke in 2022 (Abbildung 55).

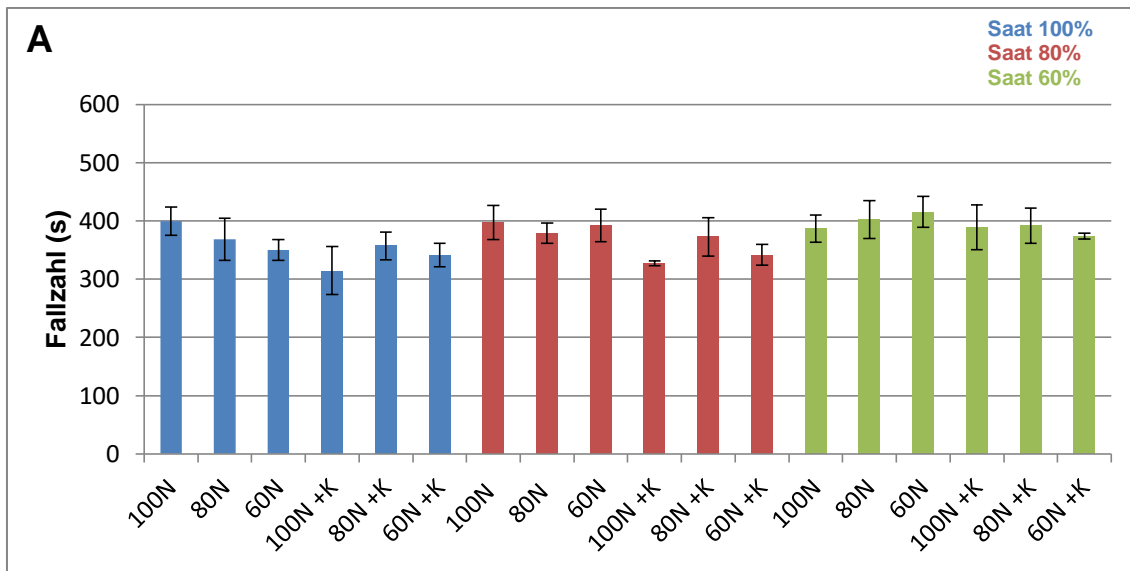


Abbildung 53: Fallzahl (s) bei Weizen 2020. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Keine signifikanten Unterschiede (p = 0,05) in den jeweiligen Kontrasten (Paarvergleiche).

In 2021 konnte die Wirkung der N-Düngung auf die Fallzahl ebenso statistisch signifikant nachgewiesen werden. In den angestellten Paarvergleichen gab es unabhängig von der Saatstärke diverse signifikante Unterschiede. Intensive N-Düngung erhöhte die Fallzahl. Dies zeigt Abbildung 54.

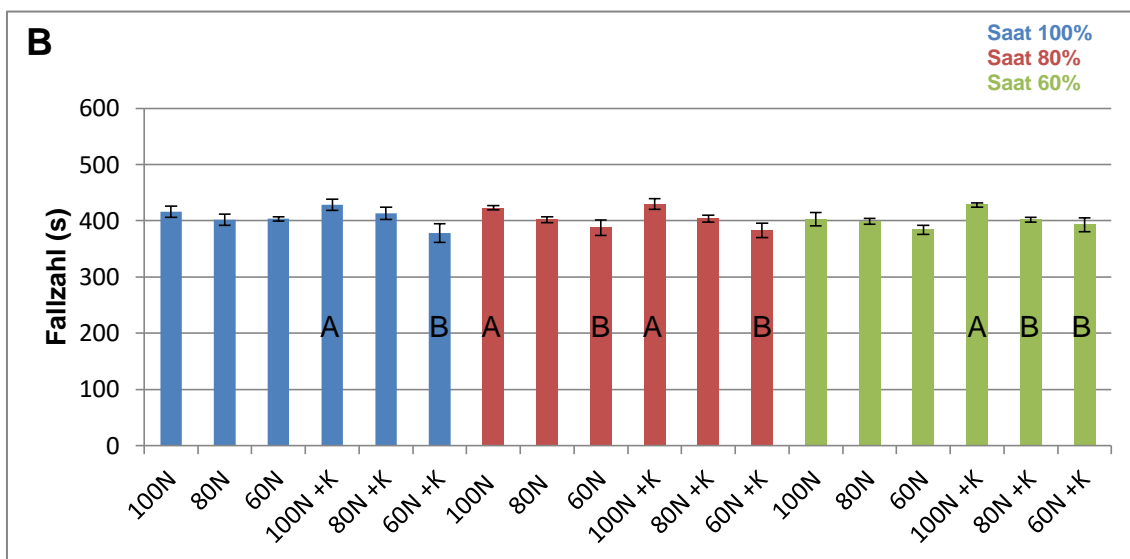


Abbildung 54: Fallzahl (s) bei Weizen 2021. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

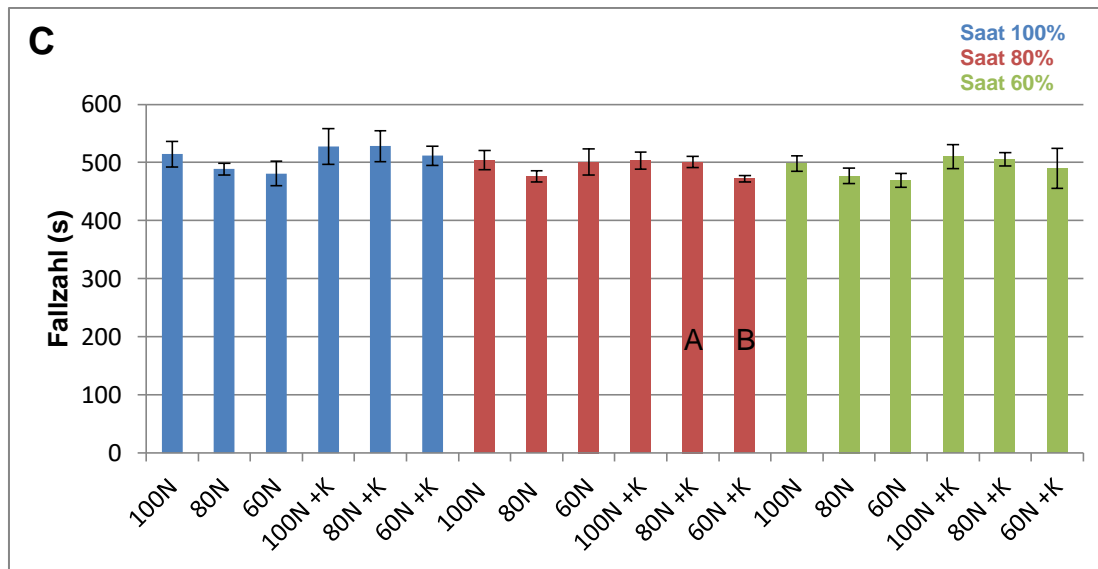


Abbildung 55: Fallzahl (s) bei Weizen 2022. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich).

(A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Als wesentlicher Qualitätsparameter wurde die Rohproteinkonzentration im Weizenkorn erfasst. Die Rohproteinkonzentration lag über den gesamten Versuchszeitraum im Bereich 12-17% in der Frischmasse (FM) und variierte zwischen den einzelnen Versuchsjahren deutlich.

In 2021, dem Jahr mit den höchsten Weizenerträgen, war die Rohproteinkonzentration gegenüber den anderen Versuchsjahren deutlich reduziert; die mit Abstand höchste Rohproteinkonzentration im Weizenkorn wurde in 2020 gemessen (Abbildung 56). Die Wirkung der Prüffaktoren auf die Rohproteinkonzentration war in den drei Versuchsjahren ähnlich. In allen drei Jahren führte eine Erhöhung der N-Düngung zu signifikant höheren Rohproteinkonzentrationen. Auch die positive Wirkung der K-Düngung auf die Rohproteinkonzentration konnte in allen drei Versuchsjahren durch signifikante Unterschiede in durchgeführten Paarvergleichen nachgewiesen werden.

In 2020 war die Rohproteinkonzentration ungewöhnlich hoch und lag im Bereich von 14-17%. Eine Abstufung entsprechend der N-Düngeintensität lässt Abbildung 56 gut erkennen. Signifikant unterschieden sich die Prüfvarianten mit maximaler und mit auf 60% reduzierte N-Düngung in der Rohproteinkonzentration unabhängig von der Saatstärke. Die K-Dünge Wirkung war nur differenzierter erkennbar. Dabei konnte K-Düngung bei mäßig reduzierter Saatstärke und 60% N-Düngeintensität die Rohproteinkonzentration signifikant von etwa 14% auf 16% steigern. Im Mittel aller Prüfvarianten steigerte K-Düngung die Rohproteinkonzentration auf über 16% gegenüber 15,5% bei unterlassener K-Düngung.

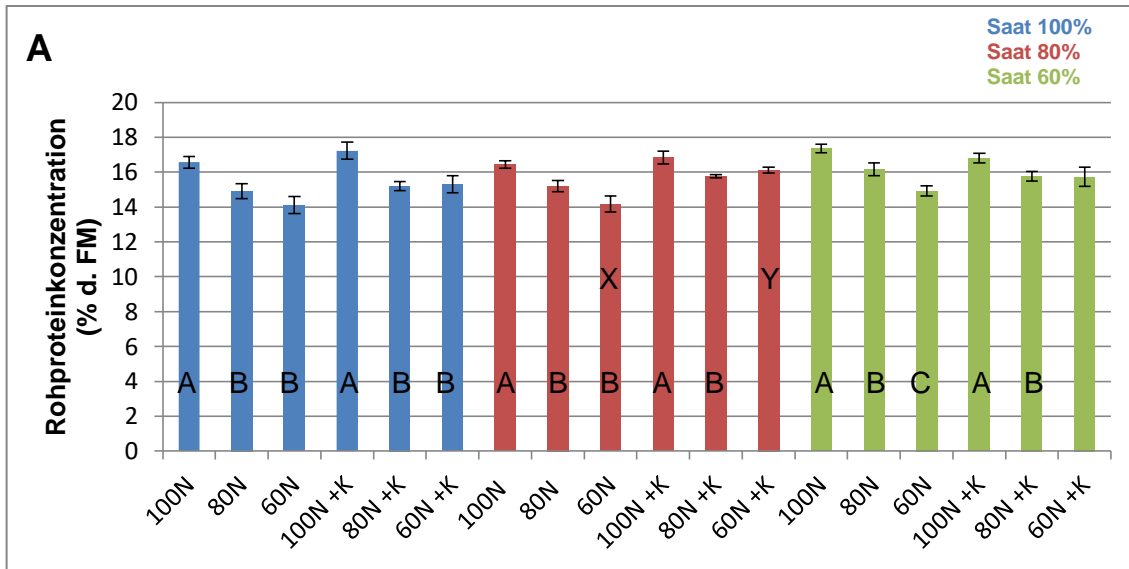


Abbildung 56: Rohproteinkonzentration (% d. FM) im Weizenkorn 2020. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich).

(A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Die Wirkung der N- und K-Düngung auf die Rohproteinkonzentration war wie beschrieben auch 2021 nachweisbar, wobei die K-Düngewirkung im Gegensatz zu 2020 auch bei hoher N-Düngeintensität erkennbar war. Bei den N-Düngeeffekten war die Differenzierung zwischen den einzelnen N-Düngeintensitäten in 2021 unabhängig von den weiteren Prüffaktoren sehr deutlich. Dies zeigt Abbildung 57.

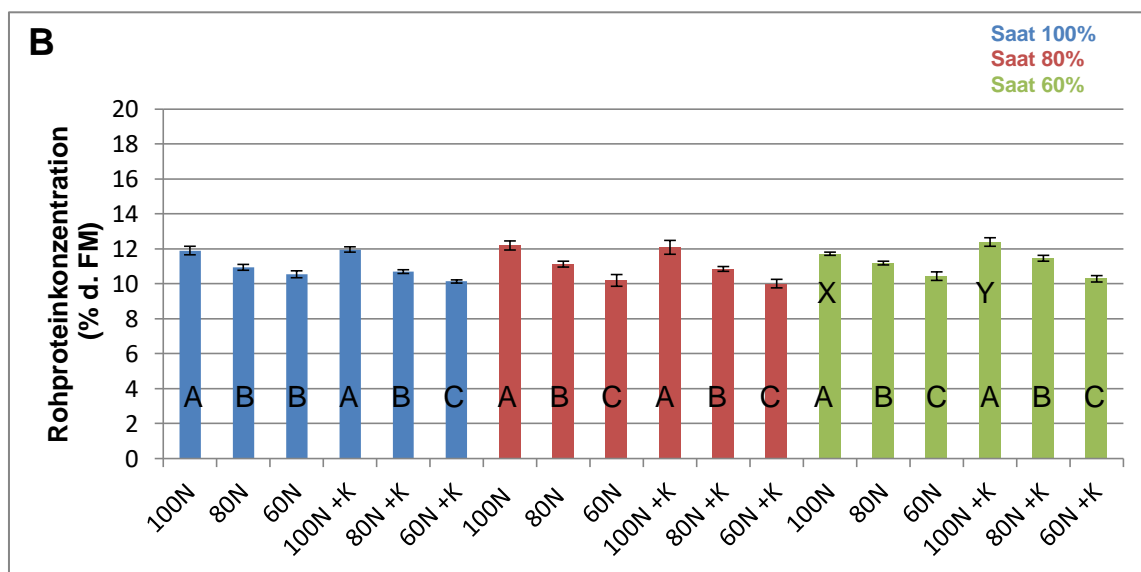


Abbildung 57: Rohproteinkonzentration (% d. FM) im Weizenkorn 2021. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich).

(A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Erfolgte K-Düngung steigerte bei auf 60% reduzierter Saatstärke und maximaler N-Düngung die Rohproteinkonzentration signifikant gegenüber unterlassener K-Düngung. Unabhängig von Saatstärke und K-Düngung führte eine Erhöhung der N-Düngeintensität von 60% auf 100% in allen durchgeführten Paarvergleichen zu signifikant erhöhten Rohproteinkonzentrationen im Weizenkorn (Abbildung 57). Auch eine Absenkung auf 80% N-Düngeintensität führte zu einem signifikanten Rückgang der Rohproteinkonzentration. Die Steigerung der Rohproteinkonzentration durch maximale N-Düngung lag bei etwa 2% gegenüber den Prüfvarianten mit minimaler N-Düngung, so dass bei maximaler N-Düngung Rohproteinkonzentrationen von etwa 12% erreicht wurden.

Für die Rohproteinkonzentration im Weizenkorn 2022 lohnt ein kurzer Rückblick auf die Abbildungen 32 und 34 im Kapitel 3.4. Pflanzenanalytik. Die Wirkung der Prüffaktoren auf die Konzentration von N und K im Pflanzengewebe zu Stadium EC 34/37 des Weizen in 2022 ist der Wirkung der Prüffaktoren auf die Rohproteinkonzentration im Weizenkorn zur Ernte 2022 ähnlich. Sowohl erfolgte K-Düngung, als auch die Steigerung der N-Düngung erhöhen die Rohproteinkonzentration im Weizenkorn signifikant. K-Düngung führte allerdings nur bei auf 60% reduzierter Saatstärke zu signifikanten Unterschieden in den durchgeführten Paarvergleichen (Abbildung 58). Im Mittel der Prüfvarianten steigerte erfolgte K-Düngung 2022 die Rohproteinkonzentration im Weizenkorn von 12,5% auf 13,2%.

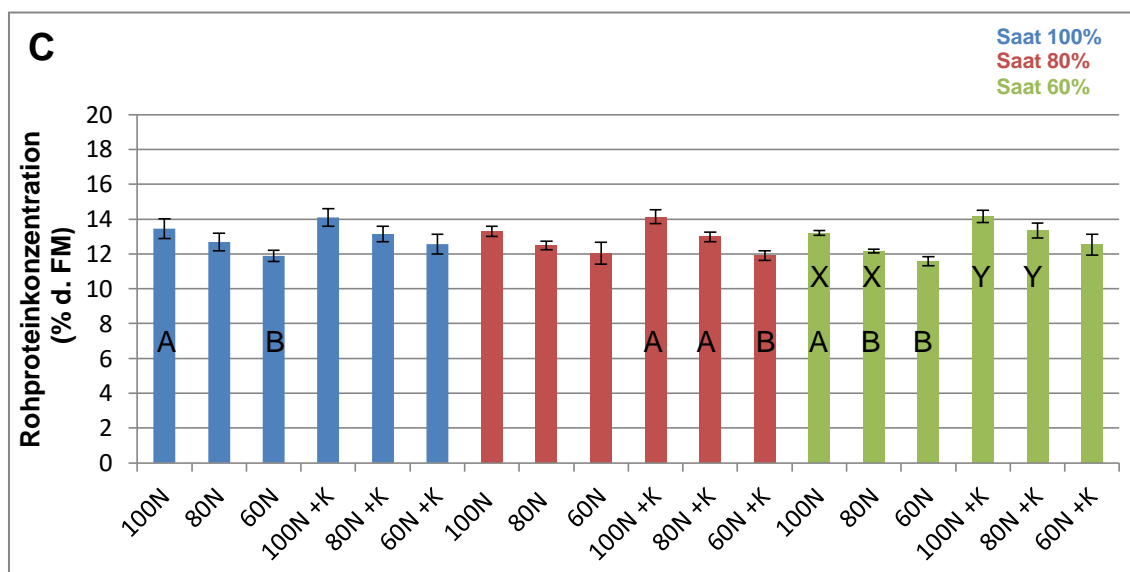


Abbildung 58: Rohproteinkonzentration (% d. FM) im Weizenkorn 2022. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Aus Kornertrag und Rohproteinkonzentration ließ sich der Rohproteinерtrag (dt RP ha<sup>-1</sup>) errechnen, aus welchem wiederum die durch das Erntegut abgefahrene N-Menge bestimmt werden konnte. Der Rohproteinерtrag schwankte über den gesamten Versuchszeitraum zwischen 4-7 dt Rohprotein ha<sup>-1</sup>. Die höchsten Rohproteinерträge waren in 2020 zu verzeichnen, obwohl der Kornertrag geringer war als in 2021.

Die Wirkung von Saatstärke und N-Düngung auf den Rohproteinерtrag in 2020 zeigt Abbildung 59.

Deutlich zu erkennen war die signifikante Steigerung des Rohproteinерtrags bei maximaler gegenüber reduzierter N-Düngung unabhängig von der K-Düngung bei ortsüblicher und mäßig reduzierter Saatstärke, die durch mehrere signifikante Unterschiede in den durchgeführten Paarvergleichen statistisch abgesichert werden konnte. Selbiges galt für die Saatstärke: Bei maximaler N- und erfolgter K-Düngung verminderte ein Absenken der ortsüblichen Saatstärke auf 60% Saatstärke den Rohproteinерtrag signifikant um über 1 dt RP ha<sup>-1</sup>.

Die positive Wirkung erfolgter K-Düngung auf den Rohproteinерtrag wurde deutlich bei den Prüfvarianten mit 60% Saatstärke. Die drei Prüfvarianten ohne K-Düngung wiesen Rohproteinерträge von gut 5,5 dt RP ha<sup>-1</sup> auf, die drei K-gedüngten Prüfvarianten hingegen lieferten knapp 6,4 dt RP ha<sup>-1</sup>. Dieser positive Trend war durch die durchgeführten Paarvergleiche nicht signifikant abzusichern.

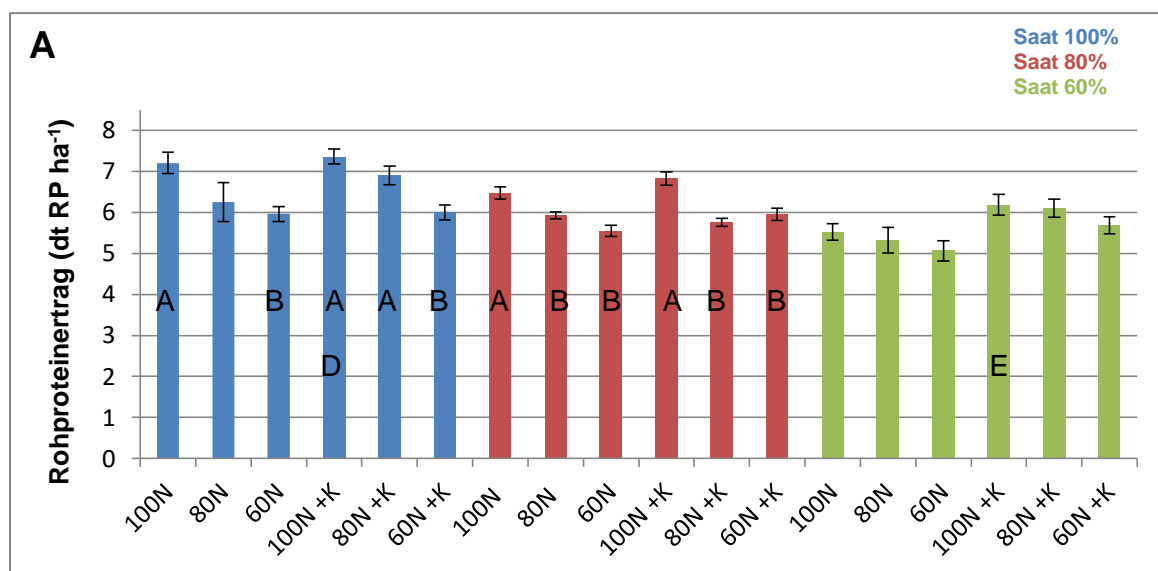


Abbildung 59: Rohproteinерtrag (dt RP ha<sup>-1</sup>) bei Weizen 2020. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeeffekt).

Die Wirkung der Prüffaktoren Saatstärke und N-Düngung auf den Rohproteinertrag war im Folgejahr 2021 ähnlich: Eine Steigerung des Rohproteinertrags durch gesteigerte N-Düngung war in diversen Paarvergleichen statistisch signifikant abzusichern und eine ortsübliche Saatstärke führte bei maximaler N- und erfolgter K-Düngung zu signifikant höheren Rohproteinerträgen als die auf 60% Saatstärke reduzierte Prüfvariante bei identischer Düngung (Abbildung 60).

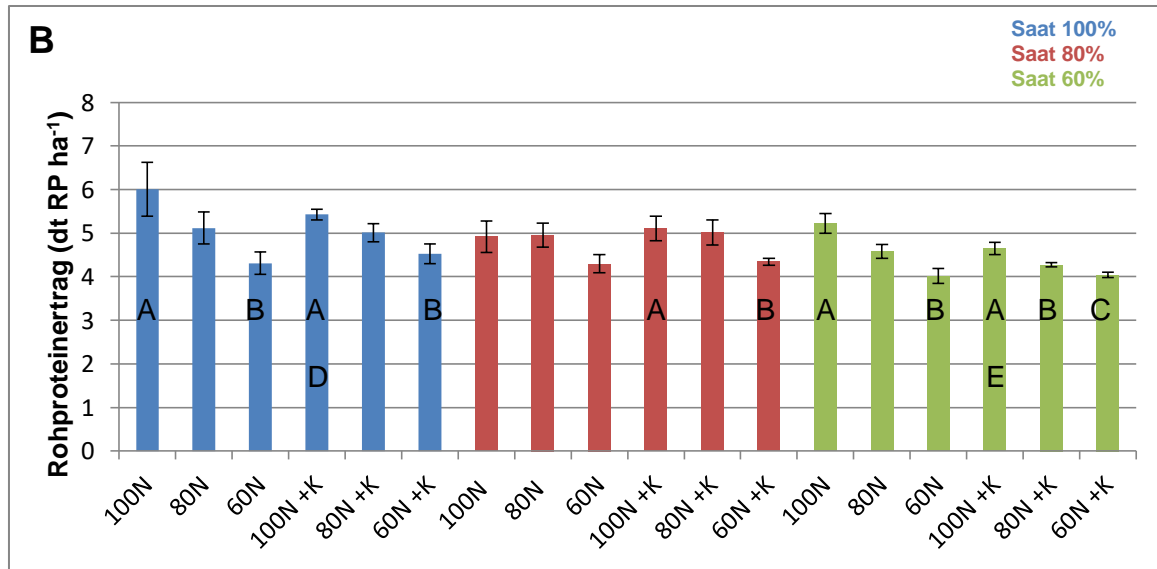


Abbildung 60 : Rohproteinertrag (dt RP ha<sup>-1</sup>) bei Weizen 2021. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

In 2022 wies der aus dem Kornertrag und der Rohproteinkonzentration errechnete Rohproteinерtrag sehr große Varianzen innerhalb der Prüfvarianten auf. Die Reduktion der N-Düngung auf 60% reduzierte den Rohproteinерtrag im Paarvergleich signifikant gegenüber 80% N-Düngeintensität bei geringer Saatstärke und unterlassener K-Düngung (Abbildung 61). Die Prüfvarianten mit 80% N-Düngeintensität wiesen im Mittel einen Rohproteinерtrag von 5,4 dt ha<sup>-1</sup> auf, und übertrafen die Prüfvarianten mit 60% N-Düngeintensität damit um knapp 20%.

Damit konnte eine Steigerung des Rohproteinерtrags durch intensive N-Düngung in allen drei Versuchsjahren nachgewiesen werden, obgleich die N-Düngewirkung 2022 nicht so deutlich wie in den Vorjahren ausfiel.

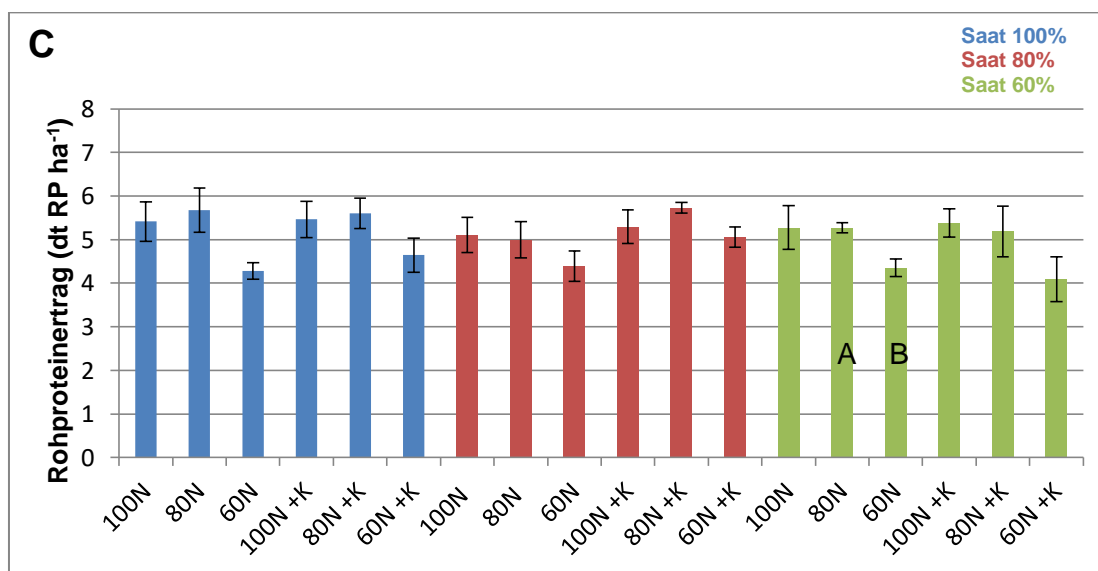


Abbildung 61: Rohproteinерtrag (dt RP ha<sup>-1</sup>) bei Weizen 2022. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Aus dem Rohproteinерtrag konnte unter Verwendung des „DUMAS-Faktors“ die N-Abfuhr von der Fläche ermittelt werden. Die N-Abfuhr über das Weizenkorn lag im gesamten Versuchszeitraum in der Spanne von rund 70-130 kg N ha<sup>-1</sup>.

### 3.6. Ernteergebnisse Raps

Der Kornertrag beim Raps lag über den Gesamtversuchszeitraum in einem Bereich von 20–40 dt ha<sup>-1</sup>. Die geringsten Kornerträge waren im ersten, die höchsten Kornerträge im letzten Versuchsjahr zu verzeichnen. Im Herbst 2019 konnten die angestrebten Bestandsdichten im Raps wegen schlechtem Feldaufgang und Pflanzenverlusten durch massiven Erdflodruck nicht erreicht werden. Die tatsächlich erreichte Bestandsdichte lag nur bei rund 60% der Zielbestandsdichte, das heißt die Prüfvarianten mit der geringsten Saatstärke wiesen nur rund 16 Pflanzen m<sup>-2</sup> auf. In Anbetracht dessen, sollte das lediglich in der ANOVA signifikante Ergebnis für den Prüffaktor Saatstärke mit Wirkung auf den Kornertrag in 2020, gezeigt in Abbildung 62, nicht überbewertet werden. Die Prüfvarianten mit minimaler Saatstärke hatten mit gut 20 dt ha<sup>-1</sup> einen um knapp 20% verminderten Kornertrag gegenüber den Prüfvarianten mit höherer Saatstärke.

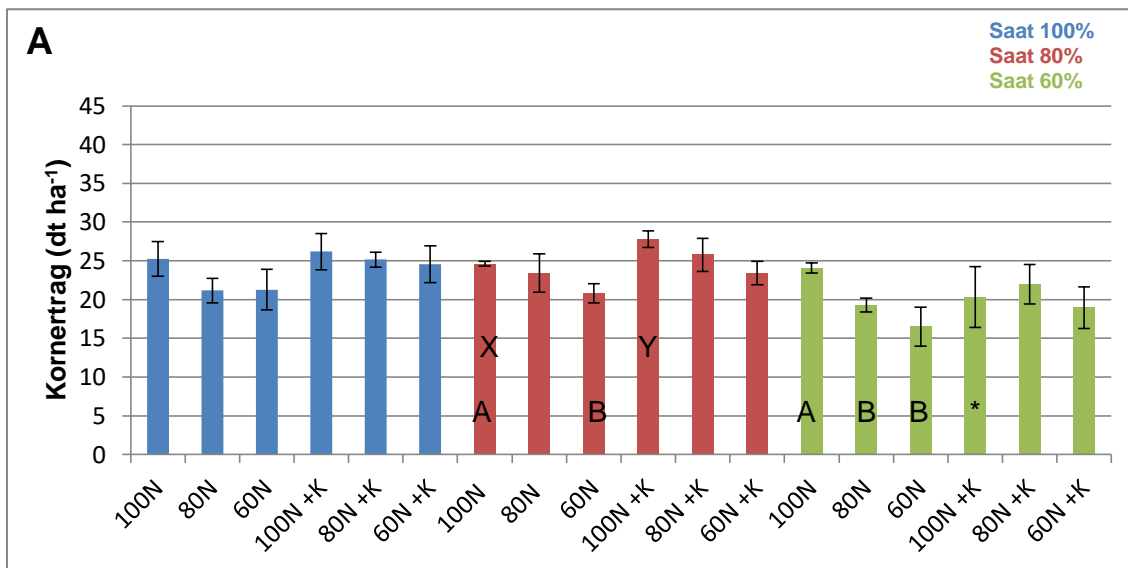


Abbildung 62: Kornertrag (dt ha<sup>-1</sup>) bei Raps in 2020. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). \*: n = 3. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Der Kornertrag beim Raps wurde 2020 vielmehr durch die Düngung von N und K beeinflusst. Im ersten Versuchsjahr 2020 erhöhte K-Düngung den Kornertrag signifikant bei einem Paarvergleich mit mäßiger Saatstärke und maximaler N-Düngung. Die K-gedüngten Prüfvarianten wiesen im Mittel einen um etwa 2 dt ha<sup>-1</sup> erhöhten Kornertrag gegenüber den nicht mit K gedüngten Prüfvarianten auf. Zu beobachten war der K-Düngeeffekt vor allem bei ortsüblicher beziehungsweise mäßig reduzierter Saatstärke. Auch die N-Düngung hatte signifikanten Einfluss auf den Kornertrag; eine Reduktion der N-Düngeintensität bei stark beziehungsweise mäßig reduzierter Saatstärke

und unterlassener K-Düngung führte zu einem signifikant verminderten Kornertrag. Die intensiv mit N gedüngten Prüfvarianten erreichten im Mittel einen Kornertrag von knapp 25 dt ha<sup>-1</sup> und übertrafen die mit nur 60% N-Düngeintensität behandelten Prüfvarianten damit um knapp 4 dt ha<sup>-1</sup>.

Der signifikant ertragssteigernde Effekt der N-Düngung bei mittlerer Saatstärke und unterlassener K-Düngung ließ sich auch im zweiten Versuchsjahr zur Ernte 2021, dargestellt in Abbildung 63, feststellen. Maximale N-Düngung steigerte den Kornertrag, ähnlich wie 2020, um etwa 3 dt ha<sup>-1</sup> gegenüber den Prüfvarianten mit minimaler N-Düngeintensität. Eine signifikante Wirkung der Prüffaktoren Saatstärke und K-Düngung auf den Kornertrag bei Raps war 2021 nicht nachzuweisen.

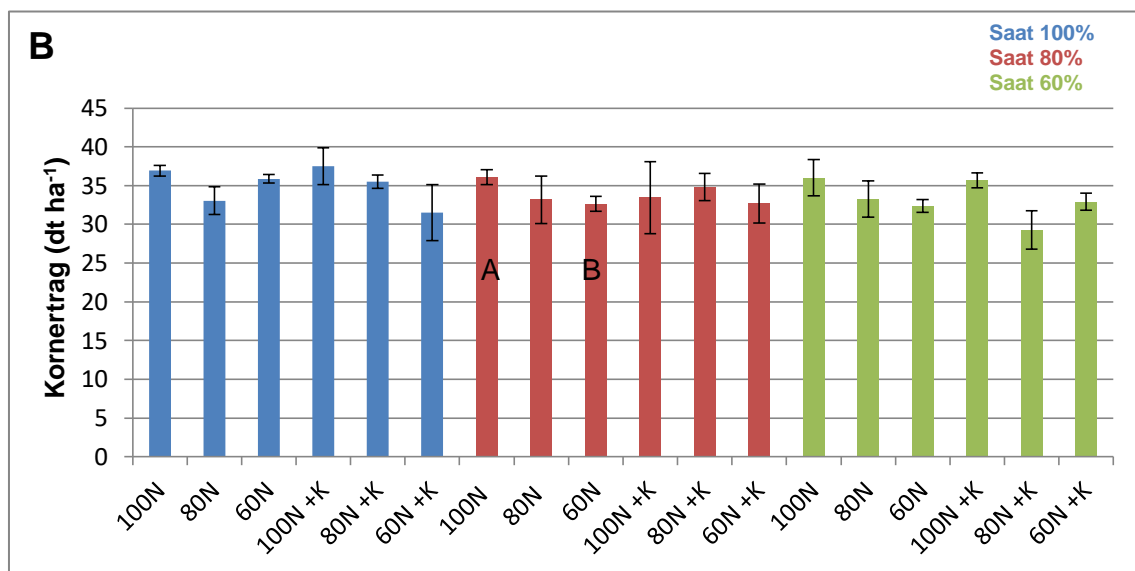


Abbildung 63: Kornertrag (dt ha<sup>-1</sup>) bei Raps in 2021. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Für die Rapsernte 2022, welche auf hohem Ertragsniveau um 40 dt Kornertrag ha<sup>-1</sup> lag, konnten keine weiteren Effekte der N-Düngung belegt werden. Die Düngung von K hingegen wirkte bei ortsüblicher Saatstärke tendenziell ertragssteigernd. Dieser Effekt konnte aber in den durchgeführten Paarvergleichen nicht signifikant abgesichert werden. Trotz einer für den Faktor Saatstärke nicht signifikanten ANOVA, konnte im Paarvergleich eine signifikante Wirkung der Saatstärke auf den Kornertrag nachgewiesen werden. Ein Absenken der Saatstärke von 100% auf 80% reduzierte den Kornertrag signifikant. In Anbetracht dessen, dass ein weiteres Absenken der Saatstärke auf 60% den Kornertrag wiederum knapp nicht signifikant erhöhte, sollte diesem Effekt nicht zu viel Aufmerksamkeit geschenkt werden. Der absolut

höchste Kornertrag mit nahezu 45 dt ha<sup>-1</sup> wurde bei maximaler Düngung von N und K und minimaler Saatstärke erreicht. Die genannten Effekte der Prüffaktoren auf den Kornertrag bei Raps 2022 zeigt Abbildung 64.

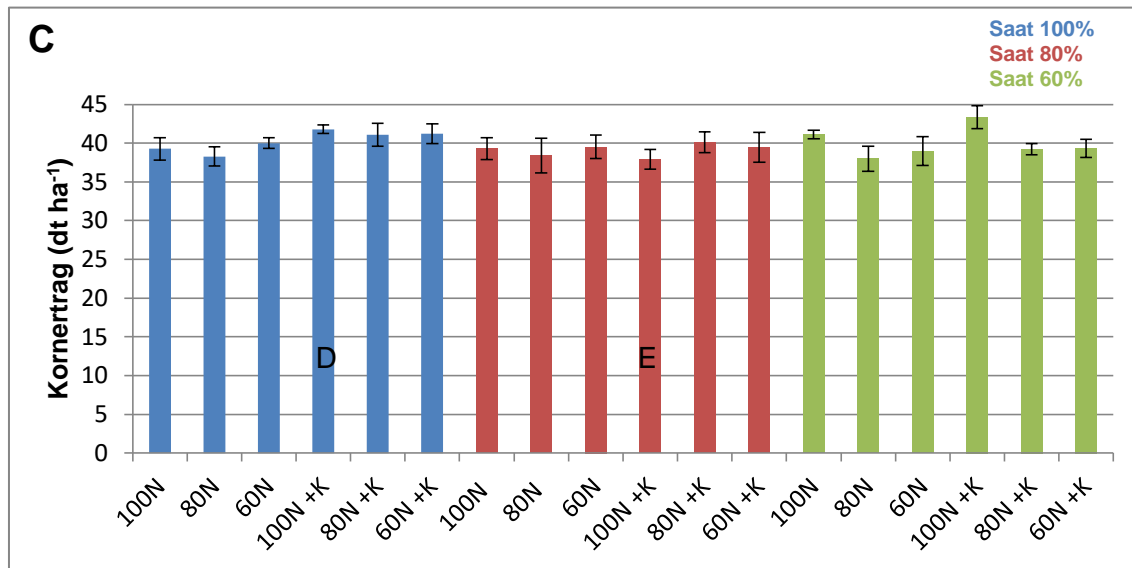


Abbildung 64: Kornertrag (dt ha<sup>-1</sup>) bei Raps in 2022. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Der Kornertrag der Prüfvarianten setzte sich zusammen aus den Ertragskomponenten Pflanze m<sup>-2</sup>, Kornanzahl Pflanze<sup>-1</sup> und der TKM. Die Kornanzahl Pflanze<sup>-1</sup> wurde rechnerisch ermittelt aus der Bestandsdichte, der TKM und dem Kornertrag der Prüfparzellen. Die Kornanzahl Pflanze<sup>-1</sup> bewegte sich in einer Spanne von 1250-5000 Körnern Pflanze<sup>-1</sup> im gesamten Versuchszeitraum und variierte zwischen den Versuchsjahren stark. Besonders wenig Körner bildeten die Einzelpflanzen in 2020 (Abbildung 65), besonders viele in 2022 (Abbildung 67) aus.

In allen drei Versuchsjahren wirkte eine reduzierte Saatstärke sich auf die Kornanzahl Pflanze<sup>-1</sup> aus. In 2020 war der Unterschied für den Prüffaktor Saatstärke im Paarvergleich bei erfolgter K-Düngung nicht signifikant, in 2021 (Abbildung 66) und 2022 (Abbildung 67) hingegen schon.

In den Jahren 2020 und 2021 begünstigte zudem intensive N-Düngung die Ausbildung vieler Rapssamen Pflanze<sup>-1</sup>.

Die Wirkung der Prüffaktoren Saatstärke und N-Düngung auf die Kornanzahl Pflanze<sup>-1</sup> in 2020 zeigt Abbildung 65.

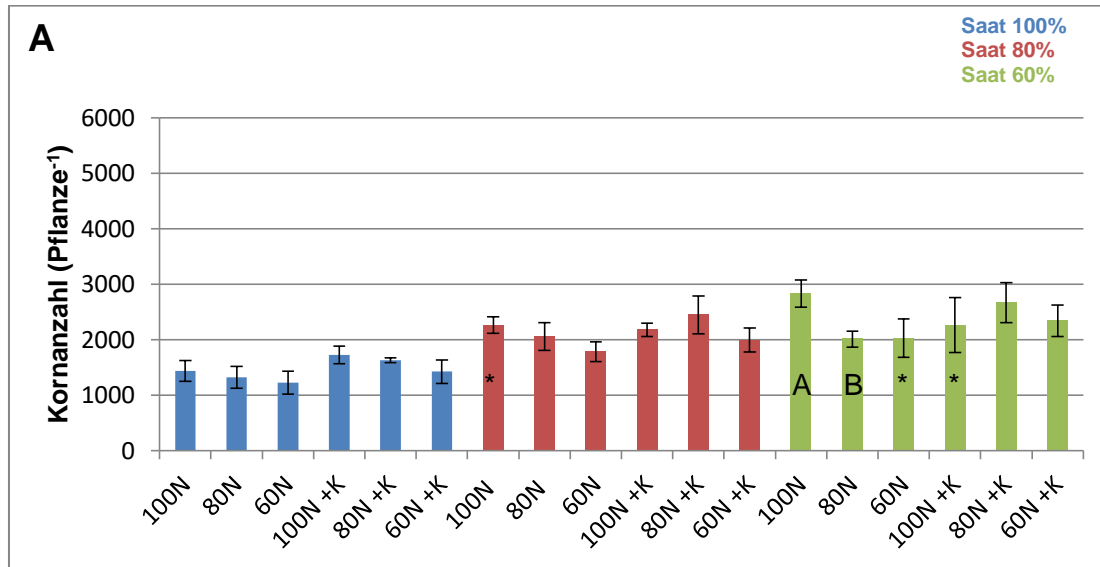


Abbildung 65: Kornanzahl (Pflanze<sup>-1</sup>) bei Raps 2020. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). \*: n = 3. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

In 2021 wurde die Kornanzahl Pflanze<sup>-1</sup> von rund 2500 Körnern bei ortsüblicher Saatstärke auf über 3500 Körner Pflanze<sup>-1</sup> bei nur 60% Saatstärke gesteigert.

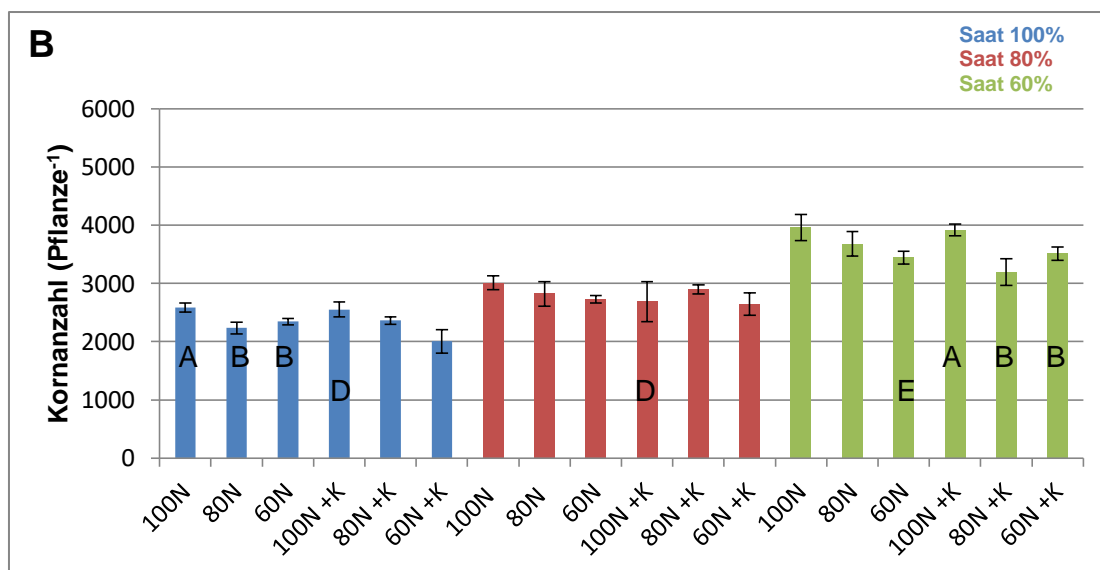


Abbildung 66: Kornanzahl (Pflanze<sup>-1</sup>) bei Raps 2021. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Die höchste Kornanzahl Pflanze<sup>-1</sup> in den drei Versuchsjahren wurde wie bereits erläutert in 2022, dem Jahr mit dem höchsten Kornertrag, gemessen. Dies zeigt Abbildung 67.

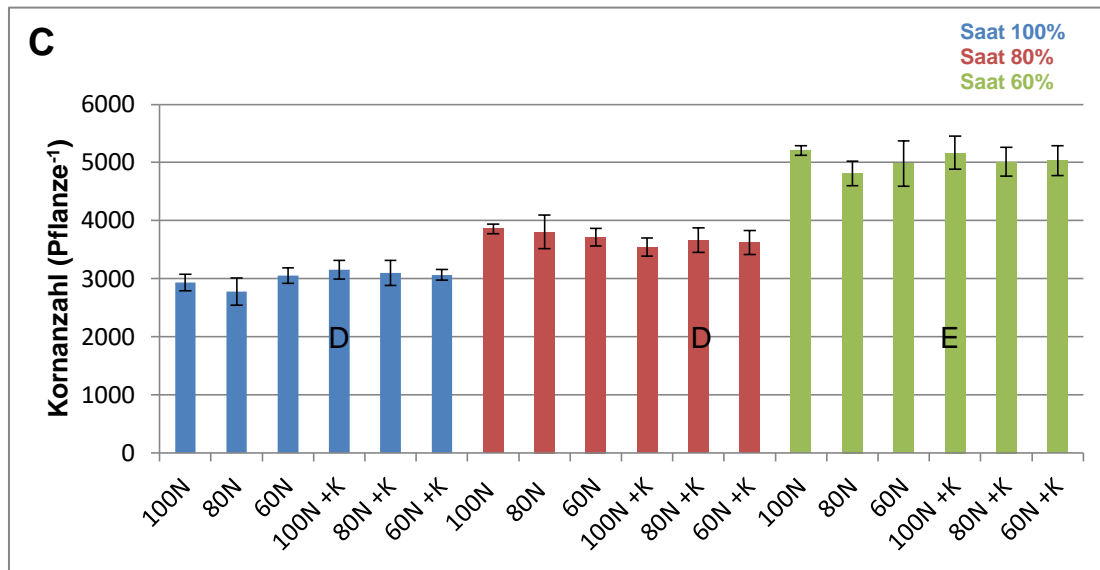


Abbildung 67: Kornanzahl (Pflanze<sup>-1</sup>) bei Raps 2022. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeneffekt, X/Y: K-Düngeneffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

In Hinblick auf den Kornertrag aber war der Parameter Kornanzahl m<sup>-2</sup>, wie bereits in der Ergebnisdarstellung für Weizen erläutert, der interessantere Parameter als Kornanzahl Pflanze<sup>-1</sup>. Die Kornanzahl m<sup>-2</sup> wurde rechnerisch ermittelt aus dem Kornertrag der Gesamtparzelle, deren Fläche und der TKM. Die Kornanzahl m<sup>-2</sup> war in den drei Versuchsjahren sehr unterschiedlich und lag in einem Bereich von 30.000-120.000 Körnern m<sup>-2</sup>. Die Kornanzahl m<sup>-2</sup> war im kornertragsschwächstem Versuchsjahr 2020 am geringsten (Abbildung 68) und in 2022, dem Jahr mit den höchsten Rapskornerträgen, am höchsten (Abbildung 70). Die Kornanzahl m<sup>-2</sup> war in 2022 gegenüber 2020 nahezu verdreifacht.

Für das Jahr 2020 zeigt Abbildung 68 die Kornanzahl m<sup>-2</sup>. In einem Paarvergleich konnte die signifikant positive Wirkung intensiver N-Düngung auf die Kornanzahl m<sup>-2</sup> bei reduzierter Saatstärke und unterlassener K-Düngung abgesichert werden.

Die K-Düngung wirkte vor allem bei ortsüblicher beziehungsweise mäßig reduzierter Saatstärke erhöhend auf die Kornanzahl  $\text{m}^{-2}$ . Dies entsprach auch der K-Düngewirkung auf den Kornertrag in 2020.

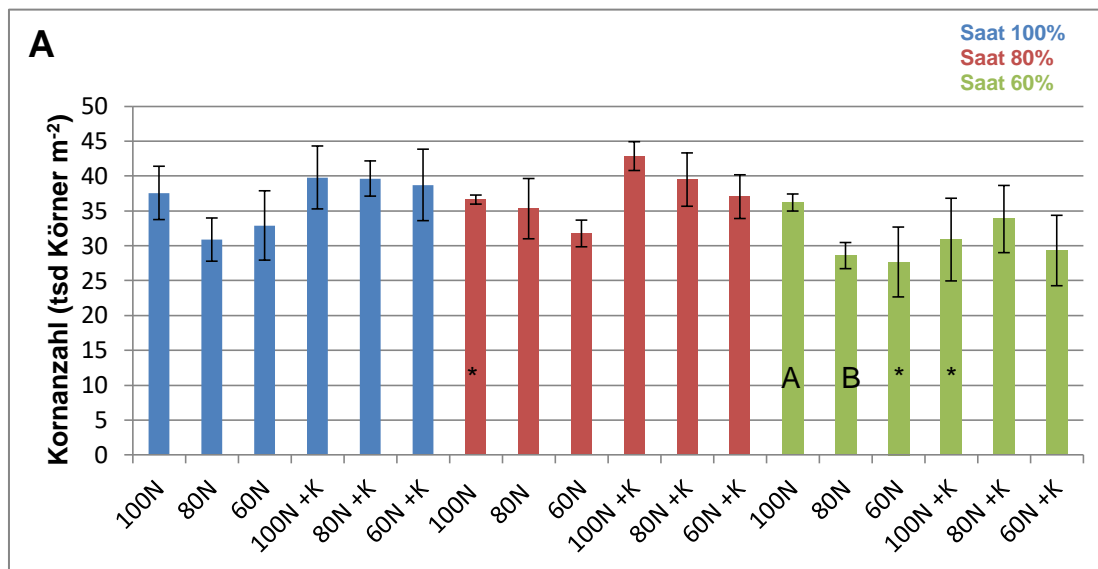


Abbildung 68: Kornanzahl (tsd. Körner  $\text{m}^{-2}$ ) in 2020. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ( $n = 4$ ). \*:  $n = 3$ . Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ( $p = 0,05$ ) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Auch in 2021 konnte die positive Wirkung intensiver N-Düngung auf die Kornanzahl  $\text{m}^{-2}$  durch signifikante Unterschiede in den durchgeführten Paarvergleichen unabhängig von der Saatstärke nachgewiesen werden, wie Abbildung 69 zeigt.

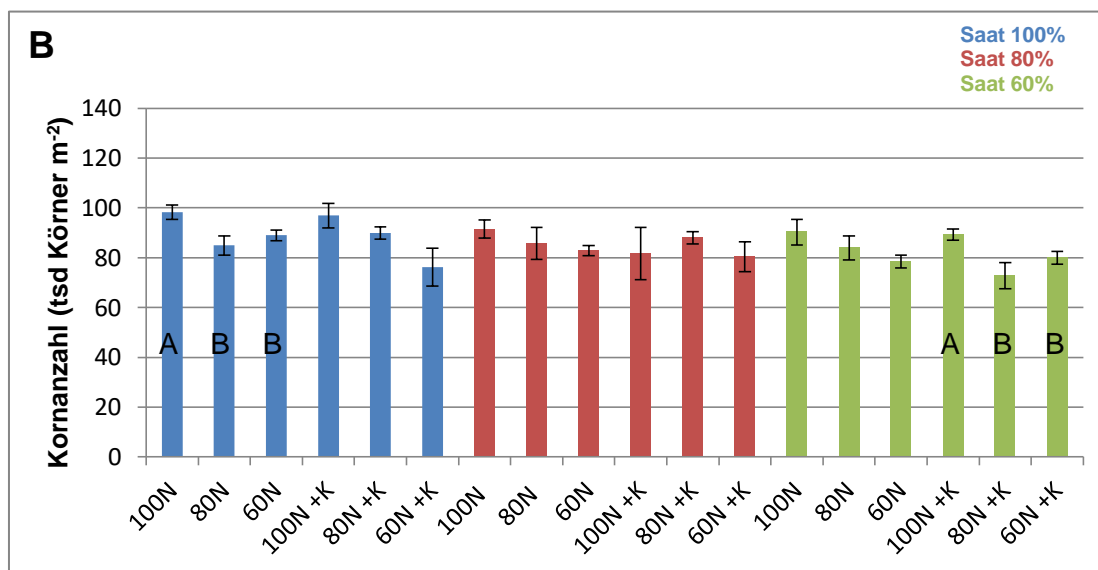


Abbildung 69: Kornanzahl (tsd. Körner  $\text{m}^{-2}$ ) in 2021. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ( $n = 4$ ). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ( $p = 0,05$ ) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Im letzten Versuchsjahr 2022 konnte, wie auch beim Kornertrag, keine signifikante Wirkung der Prüffaktoren auf die Kornanzahl  $\text{m}^{-2}$  nachgewiesen werden (Abbildung 70).

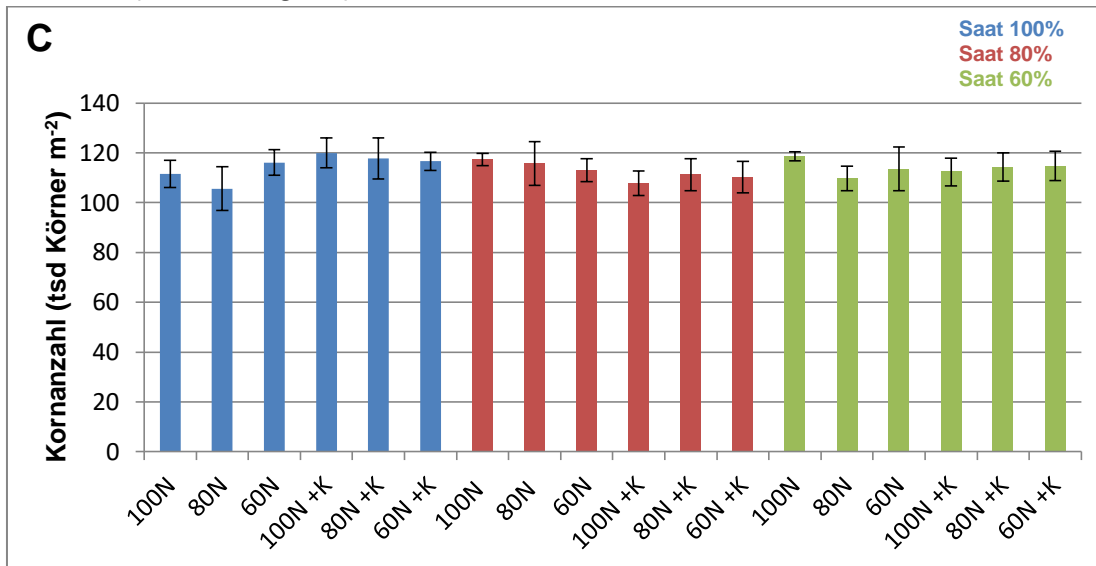


Abbildung 70: Kornanzahl (tsd. Körner  $\text{m}^{-2}$ ) in 2022. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ( $n = 4$ ). Keine signifikanten Unterschiede ( $p = 0,05$ ) in den jeweiligen Kontrasten (Paarvergleiche).

Die Wirkung der Prüffaktoren auf die TKM bei Raps war in den drei Versuchsjahren gering. Die TKM lag über den gesamten Versuchszeitraum in einer Spanne von 3,5-7,0 g und variierte damit stark. Die höchste TKM wurde in 2020 mit fast 7,0 g erreicht (Abbildung 71), die niedrigste TKM um 3,5 g in 2022 (Abbildung 73). In 2020 gab es keine signifikanten Effekt auf die TKM bei Raps.

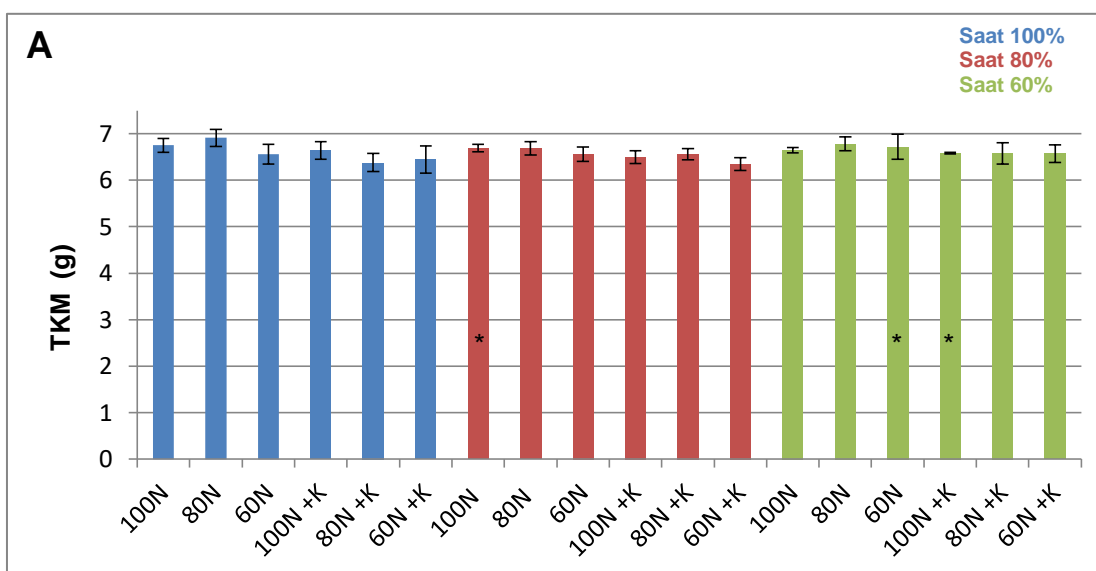


Abbildung 71: TKM (g) bei Raps 2020. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ( $n = 4$ ). \*:  $n = 3$ . Keine signifikanten Unterschiede ( $p = 0,05$ ) in den jeweiligen Kontrasten (Paarvergleiche).

In 2021 konnte ein signifikanter Effekt der N-Düngung auf die TKM des Rapses in der ANOVA nachgewiesen werden; intensive N-Düngung verminderte die TKM. Dieser Effekt war aber nicht durch signifikante Unterschiede in den durchgeführten Paarvergleichen abzusichern. Die Prüfvarianten mit minimaler N-Düngeintensität wiesen im Mittel eine TKM von über 4,0 g auf, Prüfvarianten mit maximaler N-Düngung hingegen erreichten die 4,0 g Marke knapp nicht (Abbildung 72).

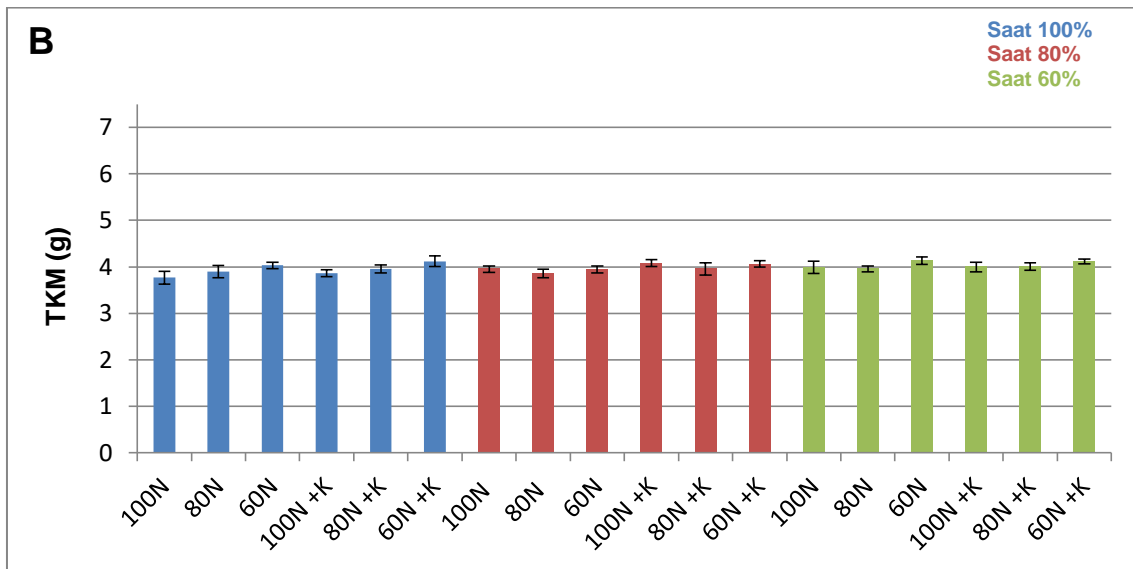


Abbildung 72: TKM (g) bei Raps 2021. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Keine signifikanten Unterschiede (p = 0,05) in den jeweiligen Kontrasten (Paarvergleiche).

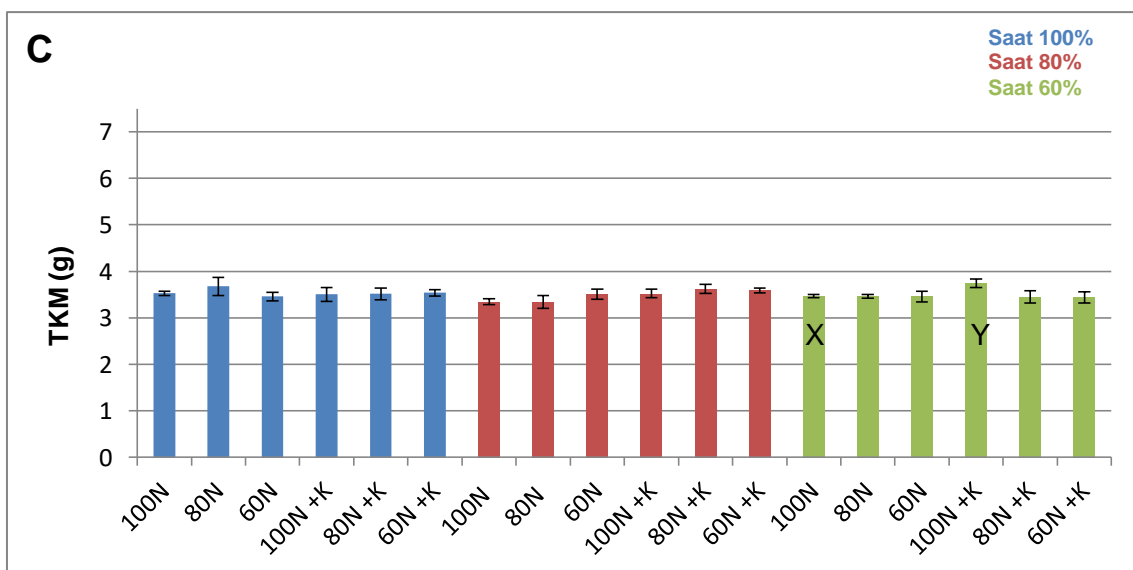


Abbildung 73: TKM (g) bei Raps 2022. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Die einzige signifikante Wirkung eines Prüffaktors im Paarvergleich auf die TKM bei Raps im gesamten Versuchszeitraum konnte 2022 nachgewiesen werden.

In 2022 wies die Prüfvariante mit dem höchsten Kornertrag (Abbildung 64) auch die höchste TKM von knapp 3,75 g auf (Abbildung 73). Ursächlich war erfolgte K-Düngung bei maximaler N-Düngung und auf 60% reduzierter Saatstärke. Die TKM konnte durch die erfolgte K-Düngung im vorgenannten Paarvergleich um knapp 10% erhöht werden.

### 3.6.1. Qualitätsparameter Raps

Als maßgebliches Qualitätskriterium wurde die für die Wirtschaftlichkeit des Rapsanbaus wesentliche Ölkonzentration im Rapssamen gemessen. Die Ölkonzentration bei 9% Kornfeuchte lag im gesamten Versuchszeitraum in einer Spanne von 38-43% Öl und damit arttypisch. Die geringsten Ölkonzentrationen waren zur Ernte 2022, dem Jahr mit den höchsten Kornerträgen, zu verzeichnen. Zur ertragsschwächsten Ernte 2020 hingegen, konnten die höchsten Ölkonzentrationen gemessen werden. Alle Prüfvarianten wiesen in 2020 über 40% Ölkonzentration im Rapssamen auf (Abbildung 74).

Die Wirkung der Prüffaktoren auf die Ölkonzentration im Rapssamen war über alle drei Versuchsjahre ähnlich. Eine Steigerung der N-Düngung verminderte in jedem Versuchsjahr die Ölkonzentration in den Rapssamen. Die negative Wirkung intensiver N-Düngung auf die Ölkonzentration war 2020 (Abbildung 74) im Trend erkennbar, aber nicht durch signifikante Unterschiede in durchgeführten Paarvergleichen abzusichern. Die Prüfvarianten mit maximaler N-Düngeintensität wiesen eine Ölkonzentration von 41%, die Prüfvarianten mit minimaler N-Düngeintensität hingegen von knapp 42% auf.

In den beiden Folgejahren 2021 und 2022 konnte die negative Wirkung intensiver N-Düngung auf die Ölkonzentration im Rapssamen durch statistisch signifikante Unterschiede in den durchgeführten Paarvergleichen belegt werden. Die Prüffaktoren Saatstärke und K-Düngung hatten in keinem Versuchsjahr einen signifikanten Einfluss auf die Ölkonzentration im Rapssamen.

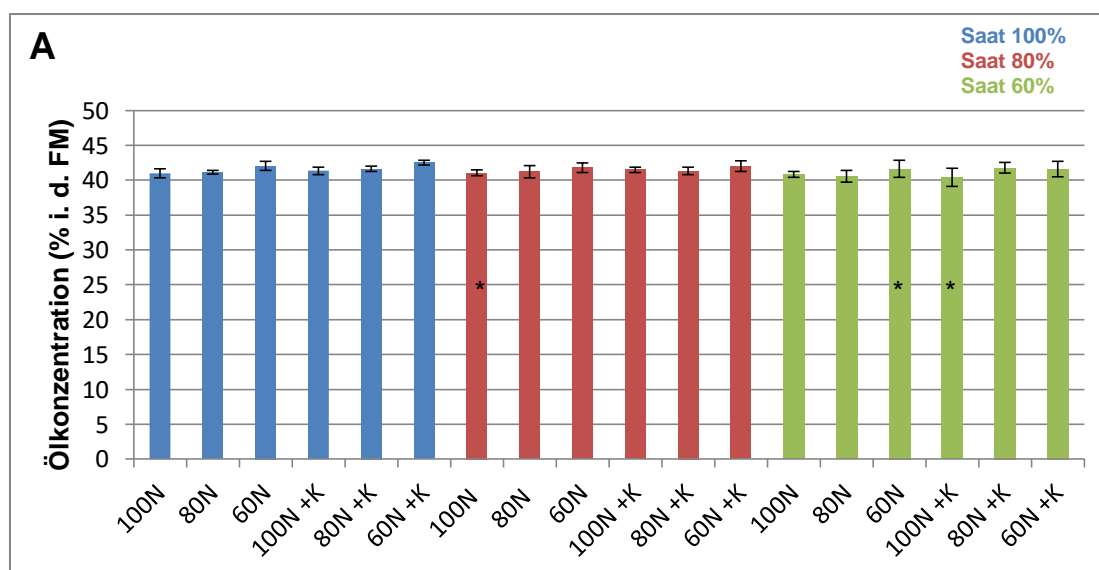


Abbildung 74: Ölkonzentration (% i. d. FM) im Rapssamen in 2020. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). \*: n = 3. Keine signifikanten Unterschiede ( $p = 0,05$ ) in den jeweiligen Kontrasten (Paarvergleiche).

Die gesteigerten Ölkonzentrationen bei von 100% auf 60% reduzierter N-Düngung zeigt für 2021 Abbildung 75 und für 2022 Abbildung 76. In beiden Jahren wurde die Ölkonzentration im Rapssamen unabhängig von Saatstärke und K-Düngung durch intensive N-Düngung signifikant reduziert.

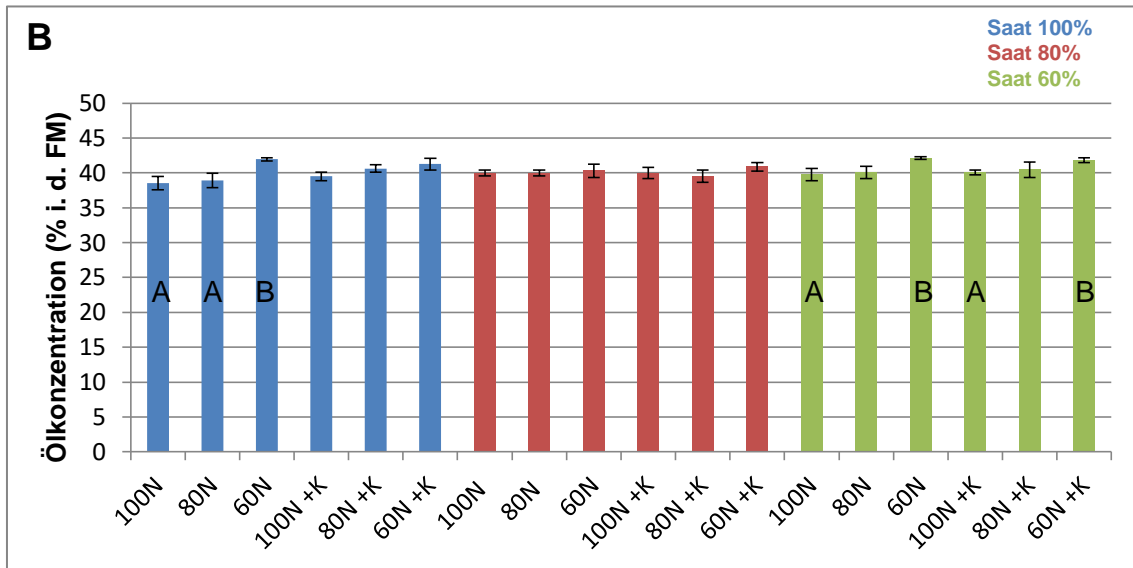


Abbildung 75: Ölkonzentration (% i. d. FM) im Rapssamen in 2021. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

In 2021 konnte die Ölkonzentration im Mittel der Prüfvarianten von 39,65% bei maximaler N-Düngeintensität durch Verminderung der N-Düngung auf 60% um knapp 2% auf 41,40% Öl im Rapssamen gesteigert werden (Abbildung 75).

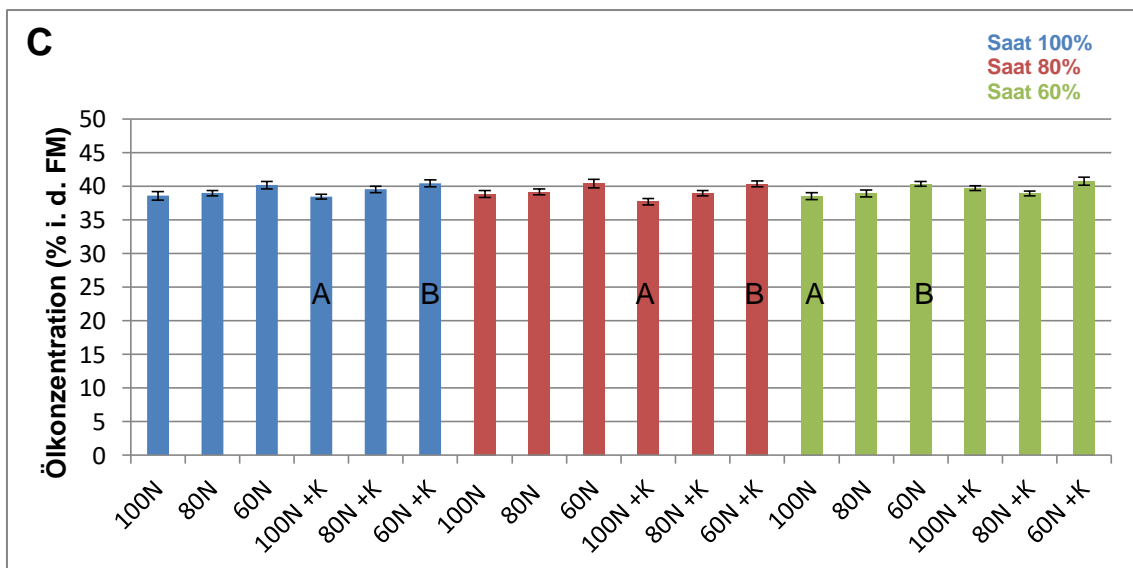


Abbildung 76: Ölkonzentration (% i. d. FM) im Rapssamen in 2022. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Die Wirkung war in 2022 nahezu identisch. Maximale N-Düngeintensität reduzierte die Ölkonzentration im Rapssamen um knapp 2% gegenüber den Prüfvarianten mit minimaler N-Düngeintensität (Abbildung 76).

Aus dem Kornertrag ( $\text{dt ha}^{-1}$ ) und der Ölkonzentration (% i. d. FM) im Rapssamen ließ sich der Ölertrag ( $\text{dt Öl ha}^{-1}$ ) errechnen. Der Ölertrag ist das beschreibende Merkmal für die Wirtschaftlichkeit des Rapsanbaus. Der Ölertrag schwankte über den gesamten Versuchszeitraum zwischen 10-15  $\text{dt Öl ha}^{-1}$ . Am geringsten fiel der Ölertrag, trotz der höchsten Ölkonzentration im Rapssamen, in 2020 aus; die gemessen an den weiteren Versuchsjahren höheren Ölkonzentrationen konnten den in 2020 schwachen Kornertrag nicht kompensieren. Die Differenz im Ölertrag fiel zwischen den beiden Folgejahren deutlich geringer aus; der höchste Ölertrag konnte mit über 15  $\text{dt Öl ha}^{-1}$  in 2022 verzeichnet werden (Abbildung 79).

In 2020 konnten nach einer für den Prüffaktor K signifikanten ANOVA zwei knapp nicht signifikante Paarvergleiche für die K-Düngewirkung ermittelt werden. Bei ortsüblicher beziehungsweise mäßig reduzierter Saatstärke steigerte die K-Düngung den Ölertrag um rund 1,30  $\text{dt Öl ha}^{-1}$  auf 10,65  $\text{dt Öl ha}^{-1}$  gegenüber den Prüfvarianten ohne K-Düngung.

Neben der K-Düngewirkung konnte nachgewiesen werden, dass reduzierte N-Düngung zu reduzierten Ölerträgen führt. Der signifikante Unterschied im Paarvergleich zeigt dies bei unterlassener K-Düngung und 60% Saatstärke in Abbildung 77.

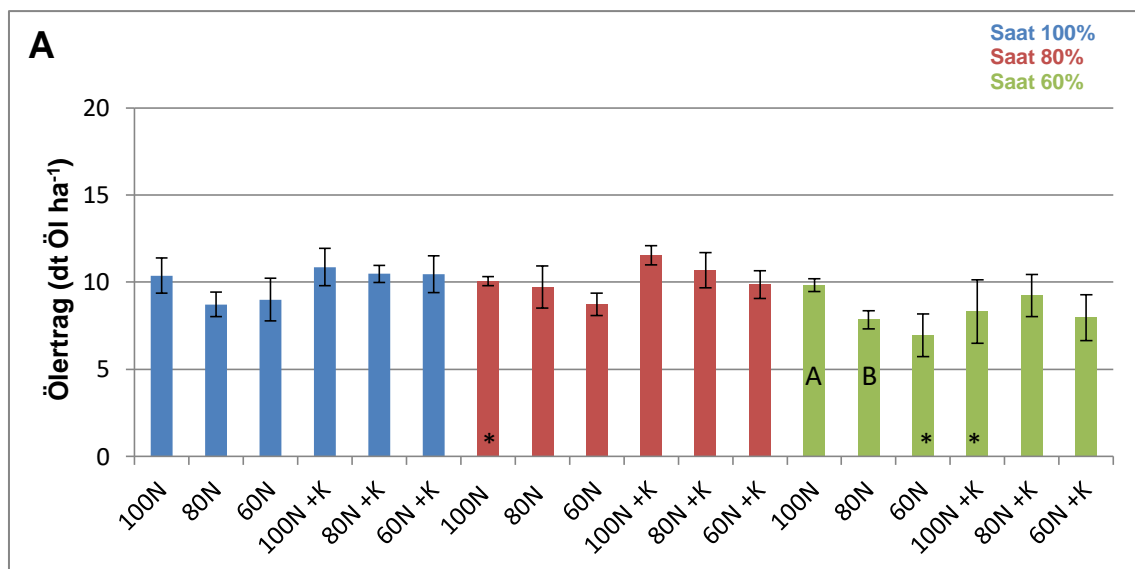


Abbildung 77: Ölertrag ( $\text{dt Öl ha}^{-1}$ ) bei Raps 2020. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ( $n = 4$ ). \*:  $n = 3$ . Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ( $p = 0,05$ ) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Der höchste Ölertrag in 2020 mit über 11,50 dt Öl ha<sup>-1</sup> wurde bei mäßiger Saatstärke, maximaler N- und erfolgter K-Düngung erreicht.

In 2021 (Abbildung 78) konnte keine signifikante Wirkung der Prüffaktoren auf den Ölertrag festgestellt werden. Intensive N-Düngung wirkte 2021 lediglich tendentiell erhöhend auf den Ölertrag. Mit 14,3 dt Öl ha<sup>-1</sup> bei 100% N-Düngeintensität konnte der Ölertrag um etwa 1 dt Öl ha<sup>-1</sup> gegenüber den Prüfvarianten mit 80% N-Düngeintensität gesteigert werden.

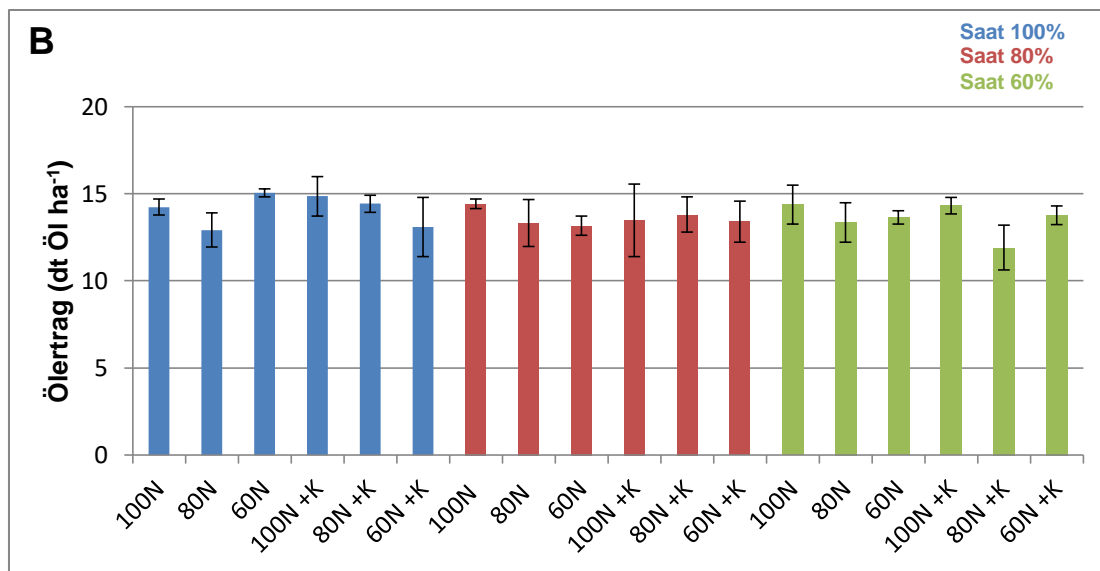


Abbildung 78: Ölertrag (dt Öl ha<sup>-1</sup>) bei Raps 2021. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Keine signifikanten Unterschiede (p = 0,05) in den jeweiligen Kontrasten (Paarvergleiche).

Obwohl die ANOVA für den Ölertrag 2022 keine signifikante Wirkung der Saatstärke ergab, gab es statistisch signifikante Unterschiede in den durchgeführten Paarvergleichen (Abbildung 79).

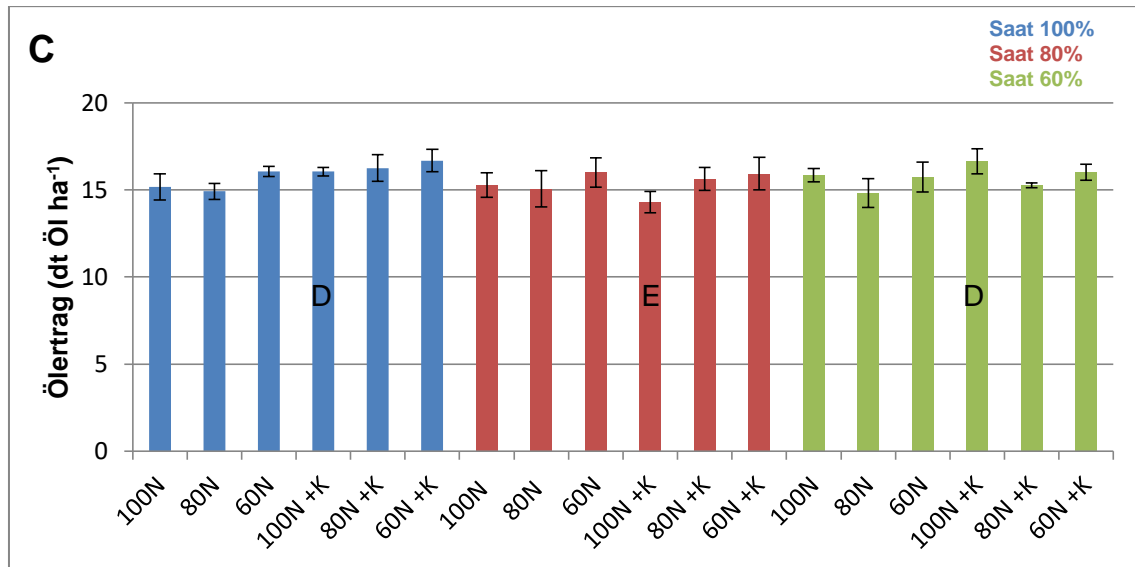


Abbildung 79: Ölertrag (dt Öl ha<sup>-1</sup>) bei Raps 2022. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) im jeweiligen Kontrast (Paarvergleich). (A/B/C: N-Düngeeffekt, X/Y: K-Düngeeffekt, D/E/F: Saatstärkeneffekt).

Diese waren interessant, da der Ölertrag bei maximaler N- und erfolgter K-Düngung durch 80% Saatstärke gegenüber ortsüblicher und auch minimaler Saatstärke reduziert war. Der Saatstärkeneffekt folgte also keiner klaren Richtung, wie bereits beim Kornertrag für Raps 2022 (Abbildung 64) gezeigt werden konnte.

Mit über 16,50 dt Öl ha<sup>-1</sup> wurde der höchste Ölertrag im gesamten Versuchszeitraum bei minimaler Saatstärke, maximaler N- und erfolgter K-Düngung erreicht.

## 4. Diskussion

### 4.1. Die Trockenstressintensität variierte zwischen den Versuchsjahren

Voraussetzung für die Prüfung der drei aufgestellten Hypothesen war das Auftreten von Trockenstress im Vegetationsverlauf der Versuchsjahre. In allen drei Versuchsjahren trat Trockenstress in unterschiedlichen Wachstumsstadien mit unterschiedlicher Intensität und Dauer auf, wie im Ergebnisteil Evapotranspiration und Bodenfeuchte gezeigt werden konnte (Abbildung 21 und Abbildung 27). Die in den vorgenannten Grafiken gezeigten Verläufe der verfügbaren Feldkapazität wurden mit dem Modell AMBAV (Agrarmeteorologisches Modell zur Berechnung der aktuellen Verdunstung) des Deutschen Wetterdienstes errechnet. Obwohl die direkt am Versuchsstandort erfassten Boden- und Wetterdaten sowie die Entwicklung der Bestände (maximaler gemessener LAI, kalendarisches Erreichen bestimmter EC-Stadien) in dem Modell berücksichtigt wurden, sind die mit AMBAV gewonnenen Daten als Ergebnisse eines Rechenmodells und nicht als vor Ort gemessene Werte einzuordnen. Für die Genauigkeit der ermittelten verfügbaren Feldkapazitäten (Kapitel 3.1.8.) und der Evapotranspirationssummen (Tabellen 4 und 5) sprach, dass ein Unterschreiten der 30%-Marke der verfügbaren Feldkapazität im Rechenmodell zeitgleich auch durch Beobachtung von Trockenstresssymptomen an den Versuchspflanzen bestätigt werden konnte. Insofern war davon auszugehen, dass der verfügbare Bodenwasservorrat und die errechneten Evapotranspirationssummen den Gegebenheiten am Versuchsstandort sehr nahe kamen, beziehungsweise die verfügbaren Feldkapazitäten keinesfalls überschätzt wurden. Ein kapillarer Aufstieg von nennenswerten Wassermengen aus dem nicht mehr vom Wurzelwachstum erreichten Bodenraum (Weizen ab 6 dm Bodentiefe, Raps ab 9 dm Bodentiefe) war auf dem grundwasserfernen, sehr sandigem Standort unwahrscheinlich (Kuntze et al. 1994). Daher war die Annahme, in welcher der maximale Wurzelraum auch dem Bodenraum entsprach, der zur Wasserbedarfsdeckung beitragen konnte, gerechtfertigt.

Der Trockenstress hatte auf Weizen und Raps eine unterschiedliche Wirkung. Dieser Unterschied hatte zwei herausragende Gründe: Der Raps konnte sich durch sein deutlich tiefergehendes Wurzelsystem ein größeres Bodenvolumen und somit eine höhere verfügbare Feldkapazität erschließen als der Weizen. Durch seinen um 3 dm tieferen Wurzelraum vergrößerte der Raps seine verfügbare Feldkapazität im Vergleich zum Weizen um etwa 55 mm beziehungsweise 50% (Kapitel 3.1.8.). Zudem war der Raps in seiner Entwicklung im Frühjahr deutlich schneller als Weizen und erreichte das für

Trockenstress bei generativ genutzten Kulturen sensible Stadium der Blüte bereits Ende April (Abbildung 27), der Weizen hingegen erst zum Ende der ersten Junidekade (Abbildung 21). Dazwischen lagen fast sechs Wochen mit ansteigenden täglichen Evapotranspirationssummen (Abbildung 19 und Abbildung 25), welche die Wahrscheinlichkeit von Trockenstress bei weitestgehend ausbleibenden Niederschlägen erhöhten (Abbildung 16). Trotz der größeren verfügbaren Feldkapazität unterschritt der Raps in allen drei Versuchsjahren etwa eine Woche vor dem Weizen die kritische 30%-Marke der verfügbaren Feldkapazität (Abbildung 21 und Abbildung 27). Dies erklärte sich über den absolut etwa 30 mm erhöhten Gesamtwasserbedarf (Tabellen 4 und 5), sowie insbesondere über den im Ergebnisteil dargestellten sehr viel früheren Wasserbedarf des Rapses gegenüber Weizen (Abbildung 19 und Abbildung 25). Obwohl der Trockenstress beim Raps früher als beim Weizen eintrat, schien der Raps mit dem Trockenstress besser zurechtzukommen als der Weizen. Ausschlaggebend dafür dürfte die um fast sechs Wochen frühere Blüte sein, die beim Raps vor allem 2021 und 2022 bei noch überwiegend gesicherter Wasserversorgung stattfand (Abbildung 27). Dieser Umstand mag erklären, weshalb sich über den gesamten Versuchszeitraum die Erträge von Weizen und Raps untypischerweise nur geringfügig unterschieden und sich im letzten Versuchsjahr sogar nahezu glichen (Abbildungen 35-37 und Abbildungen 62-64).

Der Trockenstress trat im ersten Versuchsjahr 2020 zum frühesten Zeitpunkt im gesamten Versuchszeitraum auf, entwickelte die stärkste Intensität und die längste Dauer. Der Verlauf der Bodenfeuchte war im letzten Versuchsjahr 2022 ähnlich, der Trockenstress setzte aber erst rund zwei Wochen später in der ersten Maidekade ein. Am moderatesten war der Trockenstress im zweiten Versuchsjahr 2021: Der Trockenstress auslösende Grenzwert von 30% verfügbarer Feldkapazität wurde erst Anfang Juni 2021 und damit rund vier Wochen später als in den übrigen Versuchsjahren unterschritten (Abbildung 21 und Abbildung 27). An dieser Stelle wird deutlich, wie schwach das Wasserhaltevermögen des Versuchsstandortes war. Die verfügbare Feldkapazität wurde bei täglichen Evapotranspirationssummen von über 3 mm bei Weizen (Abbildung 19) und nur vernachlässigbaren Niederschlägen (Abbildung 16) innerhalb von vierzehn Tagen von 70% auf 30% reduziert und Trockenstress trat ein (Abbildung 21). Diese Beobachtung deckt sich mit den in der Einleitung von Ehlers (1996) genannten Größenordnungen zu Transpiration und verfügbarer Feldkapazität für Wintergetreide auf Sandstandorten.

Bekannt ist, dass Pflanzen auf das Auftreten von Trockenstress in verschiedenen Entwicklungsphasen mit unterschiedlich ausgeprägten Ertragsdepressionen reagieren. Besonders sensibel ist das Stadium der Blüte,

deutlich weniger empfindlich für Trockenstress ist das Stadium der Kornfüllung mit seinen Translokationsvorgängen (Schubert 2006). Lediglich im ersten Versuchsjahr herrschte beim Raps bereits zu Beginn der Blüte, nämlich ab dem 20.04.2020 Trockenstress (Abbildung 27); in diesem Jahr war der Rapsenertrag deutlich schwächer als in den Folgejahren (Abbildungen 62-64), in denen eine ausreichende Wasserversorgung zur Rapsblüte vorlag. Ob der Trockenstress, der Anfang Juni 2021 und damit deutlich nach Ende der Blüte im Raps einsetzte (Abbildung 27), überhaupt noch ertragsrelevant war, kann bezweifelt werden. Nach Ehlers (1996) und Geißler (1983) ist höchstens mit minimal abfallenden Erträgen durch den spät einsetzenden Trockenstress zu rechnen. Beim Weizen waren die Kornerträge 2021 (Abbildung 36) die höchsten des gesamten Versuchszeitraumes; es war das einzige Jahr, in dem nicht bereits deutlich vor Beginn der Weizenblüte massiver Trockenstress herrschte (Abbildung 21).

Die Reduktion des Blattflächenindex durch reduzierte Saatstärken war kein geeignetes Mittel, um das Auftreten von Trockenstress zu verzögern beziehungsweise zu verhindern. Die absoluten Evapotranspirationssummen waren sich auch bei unterschiedlichen Blattflächenindizes sehr ähnlich, da ein Großteil des nicht durch produktive Transpiration verbrauchten Wassers in LAI-schwachen Prüfvarianten durch unproduktive Evaporation verbraucht wurde (Tabellen 4 und 5). Die Evaporation stieg wegen fehlender Beschattung des Bodens an. Zudem verhielt sich die Transpiration nicht linear zum LAI sondern entsprach einer Sättigungsfunktion; mit steigendem LAI flachte die Kurve der Transpiration ab, das heißt je Einheit Blattfläche wurde bei hohem LAI weniger Wasser transpiriert als bei niedrigem LAI (Tabellen 4 und 5). Dies entspricht auch Erkenntnissen von Ehlers (1996).

Die rasante Abnahme des LAI-Green in der Simulation des DWD (Abbildung 20 und Abbildung 26) nach Blühbeginn in beiden Kulturen verwunderte, konnte aber nicht anhand der Parzellenversuche überprüft werden, da bei den durchgeführten Messungen nicht zwischen transpirierender und senescenter Blattfläche differenziert werden konnte. Unterstellt man ein zu schnelles Absinken des LAI-Green ab dessen maximaler Ausprägung im Modell (welche an nicht senescenter Blattfläche gemessen wurde) kommt man zu dem Schluss, dass die Transpiration der Bestände im Anschluss an das Erreichen des maximalen LAI in der Simulation eventuell unterschätzt wurde. Bei Weizen sank die Tagestranspiration nach Erreichen des maximalen LAI zügig ab (Abbildung 19). Da die Annahme verminderter Transpiration ob reduzierten LAIs einer Schonung der Bodenwasservorräte gleichkäme, bekräftigt auch dies das sichere Auftreten von Trockenstress im Rechenmodell zu dem vorliegenden Versuch.

#### 4.1. Kaliumdüngung: Hohe Erträge und Qualitäten durch effiziente Wassernutzung

In der Einleitung wurde die große Bedeutung von K für das pflanzliche Wachstum unter Trockenstress beschrieben. Ebenso wurde die eingeschränkte Verfügbarkeit von K für die Kulturpflanzen in ausgetrockneten Böden durch verminderte Anlieferungsprozesse an die Wurzeloberfläche erläutert. Der K-Ernährung gebührt damit auf Trockenstressstandorten besondere Aufmerksamkeit.

Einen interessanten Ansatz dazu veröffentlichten Damm et al. (2013b). Damm et al. zielten nicht nur auf eine ausreichende K-Ernährung durch bedarfsgerechte Düngung der Kulturpflanzenbestände ab, sondern untersuchten die Auswirkung langjähriger K-Düngung (14-jähriger Düngesteigerungsversuch) auf die Bodenstruktur und verschiedene Kenngrößen des Bodenwasserhaushalts. Dabei kamen Damm et al. zu dem Ergebnis, dass langjährige K-Düngung gegenüber langjährig unterlassener K-Düngung zu einer Verbesserung der Bodenstruktur, Erhöhung der organischen Substanz im Boden und einer gesteigerten nutzbaren Feldkapazität führen kann. Eine Steigerung der nutzbaren Feldkapazität um 9%, das entsprach 6 mm in der Krume 0-30 cm Bodentiefe, wurde ermittelt. Je weniger Ton der Boden enthielt, umso stärker war die Wirkung langjähriger K-Düngung auf die angesprochenen Parameter. Auf den gut mit K versorgten Böden war zudem das Erschließen des effektiven Wurzelraums bei Zuckerrüben schneller möglich als auf den nicht mit K gedüngten Böden, woraus gesteigerte Erträge und eine höhere Wassernutzungseffizienz resultierten (Damm et al. 2013a). Inwiefern die Ergebnisse von Damm et al. (2013a, 2013b) spezifisch durch K verursacht wurden, oder aber die Konsequenz generell verbesserten Pflanzenwachstums (beispielsweise intensiveren Wurzelwachstums und Verbleib größerer Mengen organischen Materials im Boden) ob ausreichender K-Düngung waren, ist unklar.

Da die Wirkung solch langjähriger K-Düngung nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit war, ist der Blick auf die kurzfristigen Möglichkeiten zur Verbesserung der K-Ernährung und derer Effekte zu richten.

Die K-Konzentration in 0-30 cm Bodentiefe (Abbildung 7 und Abbildung 8) war am Versuchsstandort nach VDLUFA als ausreichend bis gut einzustufen. Es wurden K-Konzentrationen in einem Bereich von  $7,5 \text{ mg (100 g Boden)}^{-1}$  bis zu  $15 \text{ mg K (100 g Boden)}^{-1}$  gemessen. Wählt man als Mittel eine K-Konzentration von  $10 \text{ mg K (100 g Boden)}^{-1}$  die in den meisten Proben erreicht wurde, so ist bei einem für Sandböden üblichen spezifischen Gewicht von  $1,2 \text{ g cm}^{-3}$  (Kuntze et al. 1994), vergleichbare Werte für den Versuchsstandort konnten auch in Kapitel 3.1.7. gezeigt werden, mit einer K-Menge von rund

36 g K m<sup>-2</sup> in 0-30 cm Bodentiefe zu rechnen. Ein Weizenbestand mit 40 dt ha<sup>-1</sup> Kornertrag entzieht dem Boden inklusive Stroh rund 8 g K m<sup>-2</sup>, ein Rapsbestand von 40 dt ha<sup>-1</sup> rund 18 g K m<sup>-2</sup> (Finck 1991). Anhand der vorgenannten Verhältnisse sollte davon ausgegangen werden, dass der K-Bedarf von Weizen und Raps gut aus dem mittels CAL-Methode ermittelten K-Bodenvorrat in 0-30 cm Bodentiefe gedeckt werden könnte. Nachlieferungen von K aus den nicht mit der CAL-Methode erfassten K-Fractionen (Abbildung 3) und aus Bodenschichten unterhalb 30 cm Bodentiefe bleiben bei dieser Betrachtung bereits unberücksichtigt. Dennoch traten in beiden Kulturen K-Düngeeffekte auf den Kornertrag (Abbildung 35 und Abbildung 61) unter Trockenstress auf. Bei Weizen konnte zudem das Hektolitergewicht (Abbildung 50 und Abbildung 51) und die Rohproteinkonzentration (Abbildungen 56-58) durch K-Düngung verbessert werden.

Gedüngt wurden im Weizen K-Mengen von 16,5 g K m<sup>-2</sup> beziehungsweise 33 g K m<sup>-2</sup> (in 2022) und bei Raps 24 g K m<sup>-2</sup> (Kapitel 2.3.). Die K-Konzentration in der TM konnte bei Weizen zu Stadium EC 34/37 sowohl 2021 (Abbildung 33) als auch 2022 (Abbildung 34) durch die K-Düngung gesteigert werden. Dieser Umstand ließ eine unzureichende Verfügbarkeit des pedogenen K bei Trockenstress vermuten. Wie in der Einleitung beschrieben, vermindert sich die K-Verfügbarkeit in ausgetrockneten Böden erheblich durch verlängerte Diffusionswege und mögliche verminderte Diffusivität in hochkonzentrierten Lösungen. Die verminderte K-Verfügbarkeit in ausgetrockneten Böden durch Verlängerung der Diffusionswege zur Wurzeloberfläche wiesen Kuchenbuch et al. (1986) an Zwiebeln (*Allium cepa*) nach. Bei ausreichender Bodenfeuchte wurde ein im Gegensatz zu trockenem Boden zehnfach erhöhter Diffusionskoeffizient für K ermittelt. Ausreichende Bodenfeuchte führte zu höheren Erträgen, einer höheren K-Aufnahmerate Wurzeleinheit<sup>-1</sup>, und bis zu einer gewissen Feuchte zu erhöhten K-Konzentrationen im Gewebe. Erst die durch die K-Düngung hergestellte höhere K-Konzentration in der Bodenlösung ermöglichte vermutlich eine Steigerung der K-Konzentration in der Trockenmasse zu Stadium EC 34/37 bei Weizen (Abbildung 33 und Abbildung 34) und ein Erreichen der kritischen Nährstoffkonzentration nach Bergmann (1988) bei einer Prüfvariante in 2022. Reeb (2010) berichtete in seiner Dissertation über ähnliche Ergebnisse in einem Containerversuch an Sommerweizen (*Triticum aestivum*), in dem K-Konzentrationen in der Sprosstrockenmasse in Abhängigkeit von der Wasser- und K-Versorgung geprüft wurden. Aus den höheren K-Konzentrationen im Gewebe resultierten bei Reeb keine höheren Kornerträge des Sommerweizens. Absolut betrachtet waren die K-Konzentrationen in der Trockenmasse in beiden Versuchsjahren, gemessen an dem Bereich der kritischen Nährstoffkonzentration nach Bergmann (1988), trotz der

ausreichenden Versorgung des Versuchsstandortes mit K als gering einzustufen, und ließen sich auch durch K-Düngung nur in einzelnen Prüfvarianten signifikant erhöhen (Abbildung 33 und Abbildung 34). Dies entspricht der in der Einleitung beschriebenen Erkenntnis von Kuchenbuch und Claassen (1985), dass verminderte Nährstoffmobilität und artspezifische Aneignungseffizienz bei der Interpretation von Bodenprobenergebnissen unzureichende Beachtung finden.

Neben den in der Bodenlösung vorliegenden K-Konzentrationen, spielt die K-Aneignungseffizienz eine entscheidende Rolle bei der Sicherstellung einer ausreichenden K-Ernährung. Steingrobe und Claassen (1999) definierten Nährstoffaneignungseffizienz als Fähigkeit von Pflanzen, höhere Erträge bei geringen Nährstoffkonzentrationen zu bilden als nichteffiziente Pflanzen. Um in der Nährstoffaneignung effizient zu sein, gibt es verschiedene Mechanismen wie die Vergrößerung der Wurzeloberfläche, hohe Nährstoffaufnahmeleistungen Wurzeleinheit<sup>1</sup>, ein enges Wurzel-Spross-Verhältnis oder eine relativ geringe Nährstoffnachfrage vom Spross. In einem Gefäßversuch auf kaliumarmem sandigem Lehm mit den Arten Weizen und Zuckerrübe konnte von Steingrobe und Claassen (1999) nachgewiesen werden, dass beide Arten unterschiedliche Mechanismen nutzten, um sich K effizient anzueignen: Die Zuckerrübe (das gute Wachstum von Zuckerrüben auf kaliumarmen Böden erklärt sich über die hohe Aufnahmeleistung hinaus durch die sehr lange Wachstumsdauer der Rüben im Jahresverlauf (Schubert mündlich 2023)) hatte auch bei geringer K-Konzentration im Boden hohe Aufnahmeleistungen und verarmte die Rhizosphäre stärker an K als Weizen, welcher mit intensivem Wurzelwachstum auf die geringe K-Konzentration reagierte.

Aus diesem Grunde ist auch das für K typische Verarmungsprofil im wurzelbeeinflussten Bodenraum, bedingt durch die Wurzelmorphologie, artspezifisch und hängt zudem von der K-Konzentration im Boden ab. Ähnliche Beobachtungen machten Claassen und Jungk (1983) an Weidelgras (*Lolium perenne*) und Raps. Beachtung fanden in Ihrem Versuch drei Einflussgrößen auf das K-Aneignungsvermögen: Das Wurzel-Spross-Verhältnis, die K-Aufnahmeleistung Wurzeleinheit<sup>1</sup> und die Zeitspanne der K-Aufnahmeaktivität der Wurzeln. Alle drei Einflußgrößen hatten eine nachweisbare Wirkung auf die K-Aneignungseffizienz der im Versuch verwendeten Arten und wirkten synergistisch. In Ihrem Gefäßversuch konnte nachgewiesen werden, dass das K-Aneignungsvermögen sehr wesentlich davon abhängt, welche Größe das vom Wurzelwerk der Pflanzen erschlossene Bodenvolumen hat. So lag die K-Aufnahmeleistung, also die aufgenommene K-Menge Wurzeleinheit<sup>1</sup>, bei Raps höher als bei Weidelgras. Dennoch erreichte das Weidelgras bei Wachstum auf kaliumarmem Boden die

deutlich höheren K-Konzentrationen in der Sprosstrockenmasse als Raps. Ähnliches berichtete auch Schubert 2006 aus einem Gefäßversuch mit Weizen und Lein (*Linum*) auf einem Auenboden; das Faserwurzelsystem des Weizens war auch bei schwacher K-Verfügbarkeit auf dem Auenboden in der Lage, ausreichend K aufzunehmen, wohingegen der Lein mit seinem Pfahlwurzelsystem wegen K-Mangel reduziertes Wachstum zeigte. Der Weizen war im Gegensatz zum Lein in der Lage, sich das in den 2:1-Tonmineralen fixierte K (Abbildung 3) anzueignen (Schubert 2006). Diese Erkenntnis sollte für die vorliegende Arbeit nicht überbewertet werden, da der Versuchsstandort arm an Ton war (Abbildung 12) und eine Fixierung von K damit unwahrscheinlich war; allerdings ist das von der Wurzel erschlossene Bodenvolumen auch bei reduzierter K-Verfügbarkeit im ausgetrockneten Boden von großer Bedeutung. Dies belegten Claassen und Jungk (1983). Besonders interessant ist die Erkenntnis der beiden Autoren, dass das Wurzel-Spross-Verhältnis und die Länge der Wurzelhaare gerade bei eingeschränkter K-Mobilität im Boden, etwa ausgelöst durch Trockenheit, für das K-Aneignungsvermögen wesentlicher sind als die K-Aufnahmerate Einheit Wurzellänge<sup>-1</sup>. Auf den vorliegenden Versuch übertragen dürfte also folgende Annahme getroffen werden: Die K-Aneignungsmechanismen von Weizen waren geeigneter als bei Raps, um sich auf dem Trockenstandort ausreichend K anzueignen. Die hohe K-Aufnahmerate Wurzeleinheit<sup>-1</sup> von Raps konnte die große Wurzeloberfläche bei Weizen in Hinblick auf die K-Aneignungseffizienz nicht kompensieren. Umso verwunderlicher waren die deutlichen K-Düngeeffekte beim Weizen sowohl auf den Kornertrag als auch auf die Rohproteinkonzentration. Beim Raps konnten lediglich K-Düngeeffekte auf den Kornertrag nachgewiesen werden.

Eine Steigerung des Kornertrags in beiden Kulturen (Abbildung 35 und Abbildung 62) und die gesteigerte Rohproteinkonzentration im Weizenkorn (Abbildungen 56-58) durch K-Düngung legten nahe, dass der N-Stoffwechsel von Weizen und Raps durch ausreichende K-Ernährung begünstigt wurde. Die Wirkung unterschiedlich intensiver K-Ernährung auf die Aufnahmeraten von Ammonium und Nitrat ins pflanzliche Gewebe wurden in Arbeiten von Mengel aus den 1960er und 1970ern intensiv in Vivo untersucht. Helal und Mengel (1968) wiesen in einem Gefäßversuch mit Sommerweizen die Notwendigkeit ausreichender K-Ernährung zur effizienten N-Nutzung nach. Kornertragssteigerungen durch eine Erhöhung der N-Düngung waren nur bei ausreichender K-Düngung möglich. Bei Hydrokulturen mit Tabak (*Nicotiana tabacum* L.) wurden von Koch und Mengel (1974) erhöhte Nitrataufnahmen und ein schnellerer Einbau des N in organische Verbindungen nachgewiesen, sofern die Pflanzen ausreichend mit K ernährt waren. Mengel et al. (1976) konnten gesteigerte Aufnahmemengen für Ammonium bei guter K-Ernährung

an Reis (*Oryza sativa*) nachweisen. Es wurde sowohl eine absolut höhere Aufnahmemenge als auch eine verbesserte Translokation des Ammoniums von der Wurzel in den Spross belegt. MacLeod (1969) konnte in einer Hydrokultur sehr deutliche Synergieeffekte der Düngung von K und N auf Kornertrag und TKM an Gerste (*Hordeum vulgare*) festhalten: Nur bei ausreichender K-Ernährung war die Gerste in der Lage, gesteigerte N-Düngung in einen höheren Kornertrag umzusetzen. Da die vorgenannten Versuche in Vivo stattfanden, bleibt ungeklärt ob die gesteigerte N-Aufnahme und Translokation spezifisch durch K bedingt waren, oder Konsequenz generell verstärkten Wachstums beziehungsweise synergistischer Effekte waren.

Eine erfolgte K-Düngung steigerte den Kornertrag (Abbildung 35 und Abbildung 62) und die Wassernutzungseffizienz (Abbildungen 22 und Abbildung 28) bei Weizen und Raps im vorliegenden Versuch. Ähnliches berichteten Grzebisz et al. (2013) aus Feldversuchen mit Winterweizen in Polen. Bei der Verbesserung der Wassernutzungseffizienz durch ausreichende K-Ernährung wird dabei kein Wasser gespart, sondern das verbrauchte Wasser wird effizienter in Trockenmasse umgesetzt (Schubert 2016). Wie in der Einleitung beschrieben, übernimmt K in der Pflanze herausragende Funktionen in Hinblick auf den Wasserhaushalt. Es wird dabei unterschieden zwischen osmotischen Funktionen, Enzymaktivierung und elektrostatischem Ausgleich. Durch seine osmotische Wirksamkeit kann K Wasser aus der Bodenlösung in die Wurzelzellen ziehen; K sorgt durch Verringerung des osmotischen Potentials im Xylem für das Nachfließen von Wasser und erhöht dadurch den Druck innerhalb des Xylems, welcher Voraussetzung für einen effizienten Xylemtransport ist. Ähnliche Funktionen übernimmt K bei der Herstellung eines ausreichenden Turgors als Voraussetzung für pflanzliches Streckungswachstum. Damit es tatsächlich zum Streckungswachstum kommt, ist neben dem wachstumswirksamen Turgor zudem Zellwandextensibilität von Nöten. Auch an deren Herstellung ist K durch Aktivierung der im Plasmalemma lokalisierten  $H^+$ -ATPase spezifisch beteiligt. Unter mildem Trockenstress limitiert zunächst die Zellwandextensibilität, nicht aber der Turgor, das Streckungswachstum (Schubert 2016). Auch die Wirkung auf die Wasserretention im Rahmen der Photosynthese wird maßgeblich durch die osmotische Wirksamkeit von K beeinflusst. Nur bei ausreichender K-Ernährung ist eine effiziente Regulation der Stomata und damit die Aufnahme hoher  $CO_2$ -Mengen bei gleichzeitig geringem Wasserverlust möglich (Mengel 1991). Durch seine gute Beweglichkeit über biologische Membranen kann K dazu beitragen, Membranpotentiale abzubauen und fördert damit unter anderem die Beladung des Phloems. All diese Funktionen kann K wegen seiner spezifischen Größe,

Ladung und der hohen Mobilität durch biologische Membranen erfüllen (Schubert 2006).

In 2021, dem Versuchsjahr mit dem moderatsten Trockenstress, führte K-Düngung bei Weizen zu einer Erhöhung der TKM (Abbildung 48) und des Hektolitergewichts (Abbildung 51). Denkbar ist in diesem Zusammenhang eine durch K-Düngung verbesserte Kornfüllung aufgrund der Funktion von K bei der Stomataregulation und der Beladung sowie Entladung des Phloems mit Assimilaten. Durch eine effizientere Regulation der Stomata bei grenzwertiger Wasserversorgung, Trockenstress bei Weizen herrschte im verwendeten Rechenmodell lediglich vom 05.06.2021 bis zum 29.06.2021, könnte vermehrt CO<sub>2</sub> fixiert worden sein als in nicht K-gedüngten Prüfvarianten. Eine ausreichende CO<sub>2</sub>-Fixierung aber ist Grundlage des pflanzlichen Kohlenhydratstoffwechsels und damit der Ausbildung von Speicherorganen. Bedacht werden muss an dieser Stelle aber, dass die Photosynthese erst bei deutlichen Wasserpotentialabsenkungen um 0,75 MPa, das heißt deutlich nach den Prozessen Zellstreckung und Proteinsynthese, reduziert wird (Brunold et al. 1996). Die Photosynthese wirkte an dieser Stelle also nicht limitierend (Schubert mündlich 2023). Es ist wahrscheinlicher, dass die durch K-Düngung verbesserten Translokationsvorgänge von Assimilaten im Weizen zu einer verbesserten Kornausbildung führten und damit die TKM (Abbildung 48), das Hektolitergewicht (Abbildung 51) und die Rohproteinkonzentration (Abbildungen 56-58) steigerten.

Die Translokation von Photoassimilaten und Aminosäuren, vor allem Glutamin, Glutamat und Aspartat (Heldt und Piechulla 2008) durch das Phloem in die Sinkgewebe, kann durch eine ausreichende K-Ernährung verbessert werden. Mengel (1980) konnte an *Ricinus communis* deutlich erhöhte Flussraten im Phloem bei ausreichender K-Ernährung nachweisen. Da es dabei nicht zu einem Verdünnungseffekt kam, wurde die Transportrate für Aminosäuren und Saccharose erhöht (Mengel 1980). Denkbar ist in diesem Zusammenhang die Steigerung vom Massenfluss im Phloem durch die hohe Konzentration osmotisch wirkender Substanzen wie K (es liegt von allen Kationen mit Abstand in der höchsten Konzentration im Phloemsaft vor (Heldt und Piechulla 2008)) und Saccharose im Phloem. Neben den Funktionen von K bei der Aufrechterhaltung des Massenflusses im Phloem von den Source- zu den Sinkgeweben, kann K auch die Beladung und die Entladung des Phloems mit Assimilaten und Aminosäuren verbessern. Bei der apoplastischen Phloembeladung werden Assimilate wie Saccharose und Aminosäuren aus den Source-Zellen zunächst passiv dem Konzentrationsgradienten folgend in den Apoplasten abgeschieden. Der Transport der Assimilate aus dem Apoplasten in das Phloem erfolgt einem Gradienten folgend im Protonen-Cotransport. Das Enzym, welches den Konzentrationsunterschied zwischen

Apoplast und Phloemzellen herstellt, ist die  $H^+$ -ATPase, welche unter Spaltung von ATP Protonen aus dem Phloem in den Apoplasten abgibt und damit den sauren pH-Wert des Apoplasten herstellt (Heldt und Piechulla 2008). Die Aktivierung der  $H^+$ -ATPase wird durch K stimuliert (Schubert 2008). Wie die Phloembeladung kann auch die Phloementladung entweder symplastisch oder apoplastisch stattfinden. Die Entladung des Phloems in generative Speichergewebe erfolgt häufig über den apoplastischen Weg (Heldt und Piechulla 2008). Zur apoplastischen Phloementladung unter Trockenstress veröffentliche Schubert (2016) Ergebnisse von Versuchen an Mais. Bei der apoplastischen Phloementladung wird Saccharose aus den Phloemzellen in den Apoplasten abgegeben und dort von dem Enzym Saure Invertase in die zwei Hexosen Glucose und Fructose gespalten, wodurch eine Verlagerung zurück ins Phloem unmöglich wird. Die Hexosen werden dann über spezielle Carrier in die Zellen der Speicherorgane, hier der Körner, abgegeben und dienen dort dem Aufbau von Stärke. Das Enzym Saure Invertase stellt durch Spaltung der Saccharose in Glucose und Fructose die Sink-Aktivität im entsprechenden Gewebe her und ist in seiner Aktivität von einem ausreichend niedrigen pH-Wert im Apoplast abhängig. Dieser wiederum ist nur bei ausreichender Aktivität der  $H^+$ -ATPase zu erreichen (Schubert 2016). Insofern vermag eine ausreichende K-Ernährung deutlich zur verbesserten Translokation gebildeter Photoassimilate und Aminosäuren in die Sinkgewebe beitragen. K wirkt damit sowohl osmotisch als auch durch elektrostatischen Ausgleich und die Aktivierung von Enzymen positiv auf den Phloemtransport.

In 2022 konnte eine K-Düngewirkung sowohl auf die N-Konzentration in der Trockenmasse zu Stadium EC 34/37 (Abbildung 32), als auch auf die Rohproteinkonzentration im Weizenkorn (Abbildung 58) nachgewiesen werden. Bereits 2020 konnte eine signifikante Wirkung der K-Düngung auf die Rohproteinkonzentration im Weizenkorn (Abbildung 56) belegt werden. Auch 2021 konnte die Rohproteinkonzentration im Weizenkorn bei reduzierter Saatstärke und maximaler N-Düngung durch K-Düngung gesteigert werden (Abbildung 57). Die Steigerung der Rohproteinkonzentration durch K-Düngung war damit für alle Versuchsjahre statistisch abzusichern. Sie ist verbunden mit einer höheren N-Aufnahme und einer verbesserten Translokation von N und Assimilaten innerhalb der Pflanze. Eine Verbesserung der Proteinsynthese konnte vermutet werden.

In der Einleitung wurden der Transport von Nitrat und Ammonium zur Wurzeloberfläche und die unterschiedlichen Mechanismen nach Aufnahme des N durch die Pflanze beschrieben. Ebenso wurde festgehalten, dass der überwiegende Anteil des N im Boden als Nitrat und nicht als Ammonium

vorliegt. Im Gegensatz zur passiven Ammoniumaufnahme, die dem elektrochemischen Konzentrationsgradienten folgt, wird für die aktive Aufnahme von Nitrat enzymatisch Energie verbraucht (Heldt und Piechulla 2008). Bereits an der Aufnahme von Nitrat an der Wurzeloberfläche ist K durch seine stimulierende Wirkung auf die H<sup>+</sup>-ATPase im Plasmalemma beteiligt. Nitrat wird im Protonen-Cotransport an der Wurzeloberfläche aufgenommen. Dies setzt also voraus, dass ausreichend Protonen von der H<sup>+</sup>-ATPase in die Rhizosphäre abgegeben werden. Nach Überwindung des Plasmalemmas wird das Nitrat durch verschiedene Gewebe in die Stele der Wurzel transportiert, wobei die Casparyschen Streifen spätestens an der Endodermis eine Aufnahme in den Symplasten erzwingen, da sie für hydrophile Stoffe undurchlässig sind. Erst an der Stele kann die Übergabe des Nitrat an das Xylem als spezialisiertes Leitgewebe erfolgen. Die Abgabe des Nitrat von den Xylemparenchymzellen ins Xylem durch Kanäle erfolgt passiv; Voraussetzung dafür ist ein ausreichender elektrochemischer Gradient der wiederum von der K-stimulierten H<sup>+</sup>-ATPase im Plasmalemma der Xylemparenchymzellen hergestellt wird. Nur bei ausreichender Aktivität der H<sup>+</sup>-ATPase kann das Nitrat in ausreichend hohen Konzentrationen im Xylem verlagert werden. Der weitere akropetale Xylemtransport ist ein von der Transpiration und vom Wurzeldruck angetriebener Massenfluss (Schubert 2006). Am Xylemtransport wiederum ist K divers beteiligt: In Folge seiner osmotischen Wirksamkeit verbessert K die Wasseraufnahme an der Wurzeloberfläche. Durch die hohe K-Konzentration im Xylemsaft wird Wasser aus benachbarten Geweben ins Xylem gesogen und führt so zum akropetalen Massenfluss im Xylem. Durch intensive Transpiration, die Bedeutung von K für die Stomataregulation wurde bereits beschrieben, wird der Xylemtransport zudem durch Transpirationssog gefördert. Damit verbessert eine ausreichende K-Ernährung sowohl die Aufnahme als auch die effiziente Verlagerung von Nitrat mit hohen Konzentrationen im Xylem (Marschner et al. 1996).

Vor der Assimilation muss das Nitrat zweiphasig zu Ammonium reduziert werden; dieser Prozess findet artspezifisch quantitativ überwiegend in der Wurzel oder im Spross statt (Hahn 2007). Die Nitratreduktaseaktivität von Raps, die Nitratreduktion findet bei Raps mit 80% überwiegend in den Blättern statt, untersuchte Hahn (2007) in Vivo. Bei ausreichender K-Ernährung konnte die Nitrataufnahme und die folgende Nitratreduktion gesteigert werden. Hahn vermutete die Funktion des K bei der posttranslationalen Steigerung der Nitratreduktaseaktivität durch die Aktivierung der Nitrat-Reduktase-Phosphatase, die durch hydrolytische Abspaltung des Phosphatrestes die Hemmung der Nitratreduktase aufhebt (Heldt und Piechulla 2008). Da die gesteigerte Nitratreduktaseaktivität bei guter K-Ernährung von Hahn in Vivo beobachtet wurde ist, wie für die Versuche von Mengele aus den 1980er

Jahren erläutert, unklar ob es sich um eine spezifische K-Wirkung oder um ein generell gesteigertes Wachstum (und in Folge dessen eine gesteigerte Nitratreduktaseaktivität) durch eine ausgewogene Pflanzenernährung handelt.

Nach der erfolgten Reduktion steht das Ammonium zur Assimilation zur Verfügung und ist damit Grundlage der folgenden Synthese von verschiedenen Aminosäuren und der Proteinsynthese.

Da im durchgeführten Versuch lediglich die Rohproteinkonzentration erfasst wurde, diese umfasst neben Proteinen auch freie Aminosäuren und Amide, ist aus der vorliegenden Arbeit die unmittelbare Wirkung von K auf die eigentliche Proteinsynthese nicht zu prüfen. Eine Akkumulation löslicher Amminoverbindungen unter K-Mangel, ausgelöst durch eine verminderte Proteinsynthese, konnte von Helal und Mengel (1968) an Sommerweizen nachgewiesen werden. In den Folgejahren wurden ähnliche Ergebnisse erzielt: Ein von Koch und Mengel (1974) durchgeführter Versuch zeigte neben gesteigerter Aufnahme von Nitrat bei Tabakpflanzen einen schnelleren Einbau des N in die unlösliche N-Fraktion bei ausreichender K-Ernährung. Mengel et al. (1981) konnten an Weizen eine verbesserte Proteinsynthese bei ausreichender K-Ernährung feststellen. Die verstärkte Proteinsynthese bei ausreichender K-Ernährung erklärten Mengel et al. in ihrem Flüssigkulturversuch primär über die verbesserte Translokation der Aminosäuren. Diese Annahme der Autoren gilt es ob der heute bekannten Funktion von K bei der Proteinsynthese zu hinterfragen.

Die spezifische Wirkung von K auf die Proteinsynthese konnte von Faust und Schubert (2016) nachgewiesen werden. In Nährlösungsversuchen an Zuckerrüben wurde nachgewiesen, dass eine Substitution von K durch Natrium (Na) auf unterschiedliche physiologische Prozesse different wirkt. Transpiration und Wachstum der Zuckerrüben waren auch bei fast vollständiger Substitution von K durch Na kaum beeinträchtigt; die Proteinsynthese hingegen reagierte sensibel auf die Substitution von K durch Na. Wie in den Versuchen von Mengel et al. (1981) an Weizen beobachtet, kam es zu einer Akkumulation freier Aminosäuren durch die reduzierte Proteinsynthese. Faust und Schubert (2017) konnten in Vitro die spezifische Funktion von K an der Translation an den Ribosomen nachweisen. Die in Vivo beobachtete verbesserte Proteinsynthese konnte damit durch die in Vitro nachgewiesene Funktion von K bei der Translation an den Ribosomen erklärt werden. Dort kann K positiv auf die Stabilität von RNA-Strukturen und deren Bindung an die Ribosomen wirken und damit die Proteinsynthese erhöhen. Dies konnten ebenfalls Rozov et al. (2019) eindrucksvoll an dem gramnegativen Eubakterium *Thermus thermophilus* nachweisen. Die

spezifische Wirkung von K liegt dabei in Ionendurchmesser und Ladung, beispielsweise im Vergleich zu dem ebenfalls an der Proteinsynthese beteiligten Kation Magnesium. Den Einfluss der K-Ernährung auf die Proteinsynthese untersuchten auch Dai et al. (2021) in Nährlösungsversuchen an jungen Tabakpflanzen. Unterschiedliche K-Konzentrationen in den Nährlösungen verursachten proteomische Unterschiede durch variierte Proteinexpression, was die Bedeutung von K für die Proteinsynthese unterstreicht.

All diese Funktionen von K im Stickstoffhaushalt und Langstreckentransport von Nährstoffen und Assimilaten in Pflanzen verdeutlichen, dass intensive N-Düngung nur bei gesicherter K-Ernährung sinnvoll ist.

Es traten im vorliegenden Feldversuch, trotz guter K-Versorgung des Versuchsstandortes und K-aneignungseffizienten Versuchsarten, überraschende K-Düngeeffekte auf den Kornertrag und die Wassernutzungseffizienz bei Weizen und Raps auf. Im Weizen konnte zudem die Rohproteinkonzentration im Weizenkorn als wesentliches Qualitätsmerkmal durch K-Düngung signifikant erhöht werden. Die K-Düngung förderte damit die effiziente Ausnutzung des zur Verfügung stehenden N, was ökonomische und ökologische Beachtung verdient.

### Hypothese I der vorliegenden Arbeit lautete:

Eine erhöhte Kaliumzufuhr führt bei ausreichend mit Kalium versorgten Böden unter Trockenstress zu einer signifikanten Ertragssteigerung und höheren Qualitäten bei Weizen und Raps.

Für Weizen war Hypothese I für den Ertrag und für die Rohproteinkonzentration zu bestätigen. Für Raps war Hypothese I für den Kornertrag zu bestätigen und für die Ölkonzentration als Qualitätsmerkmal zu verwerfen.

#### 4.2. Saatstärkenvariation wirkte auf Weizen und Raps unterschiedlich

Durch die Wahl der Saatstärke wird, wie in der Einleitung beschrieben, die Einzelpflanzenentwicklung und damit die Bestandsarchitektur maßgeblich beeinflusst. Im vorliegenden Versuch konnte kaum eine Wirkung der Saatstärke auf Qualitätsparameter der Ernteprodukte wie die Rohproteinkonzentration im Weizenkorn (Abbildungen 56-58) oder die Ölkonzentration im Rapssamen (Abbildungen 74-76) nachgewiesen werden. Die Wirkung der Saatstärkenvariation auf den Kornertrag hingegen war deutlich; Weizen (Abbildungen 35-37) und Raps (Abbildungen 62-64) zeigten unterschiedliche Reaktionen.

Deutlich wirkte sich eine Reduktion der ortsüblichen Saatstärke auf den Kornertrag beim Weizen aus: Eine Reduktion der Saatstärke bei maximaler N-Düngung und erfolgter K-Düngung kostete in den ersten beiden Versuchsjahren signifikant Kornertrag (Abbildungen 35 und 36). Die Prüfvarianten mit geringen Saatstärken waren offensichtlich nur sehr begrenzt in der Lage, die reduzierte Saatstärke durch eine verstärkte Bestockung zu kompensieren. Tageslichtlänge und Temperatur dürften im durchgeführten Versuch keine begrenzende Wirkung auf die Bestockung gehabt haben (Geißler 1983). Obwohl zeitig im Herbst gesät und unmittelbar zu Vegetationsbeginn mit nitrathaltigen N-Düngemitteln gedüngt, fand keine ausreichende Bestockung statt. Der Bestockungskoeffizient bei den saatstärkereduzierten Prüfvarianten lag 2020 (Abbildung 38) und 2022 (Abbildung 40) in einem Bereich von lediglich 1,2-2,0 bzw. etwa 2,5 in 2021 (Abbildung 39). Auch die maximale N-Düngung saatstärkereduzierter Varianten vermochte nicht die ertragsmindernden Effekte der Saatstärkenreduktion durch Anregung der Bestockung aufzuheben. Bei den geringen Bestockungskoeffizienten sollten Sorte und Vorfrucht bedacht werden; es ist nicht unwahrscheinlich, dass es bei der Vorfrucht Winterraps wegen der hohen N-Menge in der Krume zu einer intensiveren Bestockung bereits im Herbst gekommen wäre. Zudem ist die Neigung zu intensiver Bestockung bei Weizen sehr sortenspezifisch (Geißler 1983).

Der Ertragsrückgang durch reduzierte Saatstärken ist in diversen Feldversuchen belegt. Ähnliche Ergebnisse dokumentierten etwa Schäfer und Merker (2012), in deren dreijährigen Versuchen eine Reduktion der Saatstärke von 250 auf 150 keimfähige Körner  $\text{m}^{-2}$  zu einem Rückgang des Kornertrags bei Weizen führte. Auf einem mit Liepen gut vergleichbaren Versuchsstandort in Gülzow, die Orte liegen nur etwa 50 km voneinander entfernt, wurde ebenso die negative Wirkung von reduzierten Saatstärken auf den Kornertrag an Winterroggen (*Secale cereale*) von 1993-2000 in einem langjährigen Versuch

belegt. Saatstärke und die Anzahl ährentragender Triebe waren dabei eng korreliert (Gruber et al. 2003).

Die in der Literatur anzutreffenden Zielährendichten von 450-600 Ähren  $m^{-2}$  (Bogulawski 1981) oder 350-700 Ähren  $m^{-2}$  (Diepenbrock et al. 2009) zur vollständigen Ausnutzung des vorhandenen Standraumes, mögen diese für den sehr leichten Boden des Versuchsstandort auch überhöht sein, konnten lediglich 2021 erreicht werden und blieben gerade 2020 mit nur 250-300 Ähren  $m^{-2}$  (Abbildung 38) deutlich dahinter zurück. Wollring (1990) prüfte in Feldversuchen die Wirkung von Saatstärke und N-Düngung auf den Kornertrag von Weizen in der Region Hannover. Obwohl der Bestockungskoeffizient, bei ähnlich hoher N-Versorgung wie im vorliegenden Versuch, bei Saatstärken von 150 Körnern  $m^{-2}$  mit dem Faktor drei höher lag, war ein Ertragsrückgang bei derart geringen Saatstärken nicht zu verhindern. Der Ertragsrückgang war eindeutig auf die geringere Ährenanzahl  $m^{-2}$  zurückzuführen, da die Kornanzahl  $Ähre^{-1}$  und die TKM nicht reduziert waren. Einen Ertragsrückgang bei zu geringen Bestandsdichten bei Winterweizen beschrieb auch Geißler (1983).

Waloszcyk (1996) hingegen belegte in einem langjährigen Feldversuch bei Bernburg, dass Weizenbestände mit reduzierter Saatstärke in Trockenjahren deutliche Ertragsvorteile gegenüber triebdichteren Beständen haben. Die reduzierte Saatstärkenvariante entsprach bei Waloszcyk dabei allerdings immer noch 225 keimfähigen Körnern  $m^{-2}$  und somit 90% der ortsüblichen Saatstärke im vorliegenden Versuch. Waloszcyk erklärte die Ertragsvorteile der triebärmeren Bestände mit einem geringeren Wasserverbrauch bis zur Blüte und der daraus resultierenden besseren Wasserversorgung zur Kornfüllung. Ohne absolute Zahlen der Saatstärke zu nennen empfiehlt Ehlers (1996) die Reduktion der Saatstärke auf Standorten mit Trockenstressrisiko. Es müsse Wasser vor dem Stadium der Blüte eingespart werden, dennoch müsse ausreichend Biomasse vorhanden sein, um den beabsichtigten Kornertrag realisieren zu können: „Der Weg aus dem Dilemma kann nur heißen, reduzierte Aussaatmenge, keine überbetonte Bestockung, starke Einzeltriebe mit großer Ährenausbildung und großer Anzahl Blüten pro Ähre“. Die von Ehlers ausgesprochene Empfehlung führt dazu, dass in saatstärkereduzierten Beständen ein relativ höherer Ertragsanteil von Bestockungstrieben erbracht werden muss, als in Beständen mit einem hohen Anteil von Haupttrieben. Die verminderte Ertragsleistung von Bestockungstrieben, vor allem bei Ausbildung erst im Frühjahr, gegenüber Haupttrieben ist bekannt und wurde von Darwinkel et al. (1977) in Abhängigkeit von der N-Düngung ausführlich beschrieben.

Eine Kompensation der durch reduzierte Saatstärken ausgelösten fehlenden Triebdichte über die Kornanzahl Ähre<sup>-1</sup> (Abbildungen 41-43) oder die TKM (Abbildungen 47-49) fand im vorliegenden Versuch nicht statt. Dies entspricht einer Aussage von Seiffert (1968): Ein bedingtes Ausgleichen zwischen den einzelnen Ertragskomponenten sei beim Getreide möglich; zu triebsschwache Bestände könnten aber ihren Ertragsrückgang nicht vollständig durch Steigerung der Kornanzahl Ähre<sup>-1</sup> oder der TKM kompensieren. Damit entspricht die Einschätzung Seifferts den zwanzig Jahre später veröffentlichten Versuchsergebnissen von Wollring (1990) sehr genau. Die Steigerung des Kornertrags 2020 und 2021 bei Weizen durch die Verwendung der ortsüblichen Saatstärke beruhte auf einer gesteigerten Kornanzahl m<sup>-2</sup> (Abbildung 44 und Abbildung 45) bei gleichzeitig unveränderter TKM (Abbildungen 47 und Abbildung 48). Den nur begrenzten Einfluss auf die Entwicklung des Einzelkorngewichtes und damit der TKM durch die verwendeten Prüffaktoren beschrieben Seiffert (1968) und Geißler (1983): Erst bei sehr triebdichten Beständen oder deutlichem Nährstoffmangel, möglicherweise ausgelöst durch die bei Trockenstress reduzierte Nährstoffmobilität im Boden, gehe die TKM zurück und sei darüber hinaus sehr stark durch weitere Umwelteinflüsse bestimmt. Im vorliegenden Versuch konnte die TKM in keinem Jahr durch Saatstärkenvariation beeinflusst werden (Abbildungen 47-49).

Aus den vorliegenden Ergebnissen des dreijährigen Feldversuchs lässt sich für Weizen festhalten, dass die ortsübliche Saatstärke von 250 keimfähigen Körnern m<sup>-2</sup> keinesfalls weiter reduziert werden sollte. Das von Ehlers (1996) und Waloszczyk (1996) beschriebene Phänomen, dass Bestände mit höherer Saatstärke zu viel Wasser im vegetativen Wachstum verbrauchen und folglich verfrüht unter Trockenstress leiden als triebärmere Bestände konnte im vorliegenden Versuch nicht beobachtet werden. Inwiefern weitere Erhöhungen der Saatstärke zur Steigerung des Kornertrags führen könnten, wurde nicht untersucht und bleibt weiteren Versuchen vorbehalten.

Raps reagierte auf die Reduktion der Saatstärke in völlig anderer Weise als Weizen: Eine Verminderung der Saatstärke kostete keinen Kornertrag (Abbildungen 62 und 63). Eine Ausnahme bildete dabei der signifikante Unterschied im Paarvergleich in 2022, der aber nur eingeschränkt belastbar war, da eine weitere Absenkung der Saatstärke auf 60% nicht ertragsmindernd wirkte, sondern den Kornertrag sogar leicht steigerte (Abbildung 64). Die Ertragsstabilität auch saatstärkenreduzierter Prüfvarianten erklärte sich darüber, dass die Einzelpflanzenentwicklung in den Prüfvarianten mit geringer Saatstärke deutlich besser war, was durch die höhere, nahezu

verdoppelte Anzahl an Rapskörnern Pflanze<sup>-1</sup> zu belegen war (Abbildungen 65-67). Das Absenken der Saatstärke hatte somit keine signifikante Wirkung auf die Kornanzahl m<sup>-2</sup> (Abbildungen 68-70). Im Gegensatz zum Getreide ist dies für Raps arttypisch (Geißler 1983). Vergleichbares berichteten Christensen und Friedt (2007), die dem Raps bescheinigen, Defizite eines Ertragsmerkmals gut durch ein anderes Ertragsmerkmal kompensieren zu können. Diese Eigenschaft sei bei Hybridsorten, die auch im vorliegenden Versuch genutzt wurden, stärker ausgeprägt als bei Liniensorten. Comberg (2014) veröffentlichte vagere Ergebnisse aus Saatstärkeversuchen an Winterraps: Die Ertragswirkung der Saatstärke war in seinen Versuchen sortenabhängig; zudem variierten die Ergebnisse in Abhängigkeit von der Witterung. Unter schwierigen Witterungsbedingungen wiesen Bestände mit hohen Saatstärken um 60 Körner m<sup>-2</sup> in seinen Versuchen höhere Kornerträge auf als Dünnsaaten mit 30 Körnern m<sup>-2</sup>. Im Resümee empfahl Comberg höhere Saatstärken, war dabei aber von einem Sicherheitsdenken bezüglich möglicher Pflanzenverluste durch Auswinterung oder Schädlinge gesteuert. Dieses Sicherheitsdenken mag berechtigt sein: Die hohe Saatstärke hatte lediglich im ersten Versuchsjahr, in dem ein verminderter Feldaufgang sowie massiver Schädlingsdruck die Bestandsdichten deutlich reduzierte, tendenziell Ertragsvorteile (Abbildung 62). Im Mittel der Prüfvarianten lag der Kornertrag bei ortsüblicher Saatstärke bei knapp 24 dt ha<sup>-1</sup> bei minimaler Saatstärke hingegen lediglich bei gut 20 dt ha<sup>-1</sup>. Geißler (1983) charakterisierte die Ertragszusammensetzung bei Raps wie folgt: Der straffeste Zusammenhang des Kornertrags bestehe zur Schotenanzahl Fläche<sup>-1</sup>. Ein Großteil der Schoten wird dabei arttypisch am Haupttrieb, weitere Schoten an Nebentrieben erster und zweiter Ordnung angelegt. Dabei haben Schoten an Nebentrieben generell ein reduziertes Ertragspotential gegenüber Schoten des Haupttriebes. Reduziert vitale Einzelpflanzen durch überzogene Bestandsdichten wurden erst bei Beständen mit über 150 Pflanzen m<sup>-2</sup> befürchtet. Aus dieser Erkenntnis wurden für heutige Zeiten ungewöhnlich hohe Saatstärkenempfehlungen von bis zu 100-120 keimfähigen Körnern m<sup>-2</sup>, insbesondere für ungünstige Standorte, abgeleitet. Die Einschätzung Geißlers (1983) konnte im vorliegenden Versuch nicht bestätigt werden: Die in der Saatstärke reduzierten Prüfvarianten bildeten über verstärkte Nebentriebbildung signifikant höhere Kornanzahlen Pflanze<sup>-1</sup> aus (Abbildungen 65-67). Weder im Korn- und Ölertrag, noch bei der TKM war der höhere Anteil von Schoten an Nebentrieben in den saatstärkereduzierten Prüfvarianten gegenüber den Prüfvarianten mit ortsüblicher Saatstärke zu erkennen. Aktuellere Empfehlungen zur Saatstärke liegen bei etwa 40 keimfähigen Körnern m<sup>-2</sup> (Christensen und Friedt 2007, Diepenbrock et al. 2009) und entsprechen damit der im Versuch verwendeten ortsüblichen

Saatstärke. Im durchgeführten Versuch ließ sich kein sicherer Mehrertrag durch die ortsübliche Saatstärke gegenüber saatstärkereduzierten Varianten generieren. Die unklare Wirkung des Prüffaktors Saatstärke bei Raps zeigten vor allem der Kornertrag (Abbildung 64) und der Ölertrag (Abbildung 79) in 2022. Eine Reduktion der Saatstärke auf 80% bei maximaler N- und erfolgter K-Düngung verminderte den Kornertrag gegenüber ortsüblicher Saatstärke signifikant. Den Höchstertrag erreichte aber die auf 60% Saatstärke reduzierte Variante bei identischer Düngung mit fast 45 dt ha<sup>-1</sup> (Abbildung 64). Beim Ölertrag zeigte sich folgendes Bild: Bei maximaler N- und erfolgter K-Düngung wies die Variante mit 80% Saatstärke einen signifikant geringeren Ölertrag auf als bei ortsüblicher oder 60%tiger Saatstärke (Abbildung 79). Der Saatstärkeneffekt folgte damit keiner klaren Richtung.

Können eine ausreichende Vorwinterentwicklung und damit die Anlage ausreichend vieler schotentragender Nebentriebe gewährleistet werden, so ist allenfalls der von Comberg (2014) genannte und 2020 im eigenen Versuch beobachtete Aspekt der Sicherheit bei Pflanzenverlusten zu nennen, um hohe Saatstärken beim Winterraps zu rechtfertigen.

Die Hypothese II der vorliegenden Arbeit lautete:

Reduzierte Saatstärken führen bei Stickstoff- und Kaliumdüngung entsprechend guter fachlicher Praxis unter Trockenstress nicht zu signifikanten Ertragseinbußen bei Weizen und Raps.

Hypothese II war für Weizen zu verwerfen und für Raps zu bestätigen.

### 4.3. Stickstoffdüngung sicherte Erträge und Qualitäten

In der Einleitung wurde die überragende Rolle des N in der landwirtschaftlichen Düngepraxis beschrieben. N ist der Nährstoff, dem aufgrund seiner deutlichen Düngewirkung und den resultierenden Mehrerträgen die meiste Aufmerksamkeit gewidmet wird.

In dem durchgeführten Versuch schien die N-Düngeintensität bei Weizen nicht limitierend für den Kornertrag gewesen zu sein. Diese Annahme wird durch die Pflanzenanalysen zu Stadium EC 34/37 bestärkt, da nahezu alle Prüfvarianten in beiden Jahren die kritische Nährstoffkonzentration nach Bergmann (1988) in Höhe von 2,3-3,8% i. d. TM für N erreichten (Abbildung 31 und Abbildung 32). Gedüngt wurden je nach Intensität  $175 \text{ kg N ha}^{-1}$ ,  $140 \text{ kg N ha}^{-1}$  und  $105 \text{ kg N ha}^{-1}$  jeweils abzüglich der sehr geringen  $N_{\min}$ -Werte im Boden (Abbildung 9). Dem gegenüber standen aus Kornertrag und Rohproteinkonzentration errechnete N-Abfuhr von  $70\text{-}130 \text{ kg N ha}^{-1}$  durch den geernteten Weizen. Lediglich in Prüfvarianten mit geringer N-Düngeintensität ergab sich, dass nahezu die gesamte gedüngte N-Menge von den Pflanzen aufgenommen und als Ernteprodukt abgefahren werden konnte. Lässt man die Ergebnisse des dritten Versuchsjahres wegen ihrer großen Varianzen innerhalb der Prüfglieder unbeachtet, gab es keine signifikante N-Düngewirkung in der ANOVA auf den Kornertrag. Dies mag verwundern, da durch gesteigerte N-Düngung die Ährenanzahl  $\text{m}^{-2}$  (Abbildung 39 und Abbildung 40) und die Kornanzahl  $\text{m}^{-2}$  (Abbildung 45) gesteigert werden konnten. Die Reduktion der TKM durch intensive N-Düngung (Abbildung 48) führte aber dazu, dass keine Steigerung des Kornertrags erreicht werden konnte. Bei Betrachtung der insgesamt geringen N-Düngeeffekte auf den Kornertrag sei noch einmal an das sehr schwache Ertragsniveau von  $30\text{-}50 \text{ dt ha}^{-1}$  erinnert.

Eine Vielzahl neuer und älterer Feldversuche zeigt die sichere Ertragswirksamkeit der N-Düngung beim Anbau von Weizen bei gesicherter Wasserversorgung. Amberger (1977) berichtete von der positiven Wirkung gesteigerter N-Düngung auf Kornertrag und Rohproteinertrag von Weizen. Hoffmann et al. (1999) berichteten von der positiven Wirkung von N-Gaben bis  $150 \text{ kg N ha}^{-1}$  auf den Kornertrag von Winterweizen bei einem Ertragsniveau um  $50 \text{ dt ha}^{-1}$ . Dachler et al. (2003) konnten die positive Wirkung von gesteigerter N-Düngung auf den Kornertrag von Weizen bei verschiedenen Vorfrüchten an zwei Standorten in Österreich dokumentieren.

Betrachtet man aber Ergebnisse aus Versuchen unter Trockenstressbedingungen, verändert sich die Wirkung der N-Düngung auf den Kornertrag. Sticksel et al. (1996) prüften in Trockenjahren auf Standorten mit geringem Wasserhaltevermögen verschiedene N-Düngeintensitäten an Winterweizen. Eine Ertragssteigerung war bei einem Ertragsniveau von  $50\text{-}70$

dt  $\text{ha}^{-1}$  bis  $160 \text{ kg N ha}^{-1}$  zu belegen. Beachtlich war die Wirkung der unterschiedlichen Verteilung der Gesamt-N-Menge auf die verschiedenen N-Gaben. Sticksel et al. (1996) warnten daher vor hohen frühen N-Gaben, welche die Bestockung übermäßig fördern und dichte Bestände erzeugen, die zu viel Wasser vor der Blüte verbrauchen. Ähnliches berichteten Frederick und Camberato (1995) aus Ihren Feldversuchen mit Weizen in den USA, in denen eine Steigerung der N-Düngung sogar zu verminderten Kornerträgen und einer reduzierten TKM führte. Frederick und Camberato erklärten dies ebenfalls durch zu hohe Triebdichten.

Waloszczky (1996) warnte ebenfalls vor übermäßiger N-Düngung unter Trockenstress und kann aus langjährigen Feldversuchen bei Bernburg von Mindererträgen bei Trockenstress durch überzogene N-Düngung berichten. Waloszczky (1996) sah die Ursächlichkeit hierfür ähnlich wie bei überzogenen Saatstärken: Das zur Bildung vegetativer Masse verbrauchte Wasser stand für die Kornausbildung nicht mehr zur Verfügung.

Im Gegensatz zum Kornertrag konnten die Qualitätsparameter beim Weizen durch die verschiedenen N-Düngeintensitäten im Versuch deutlich beeinflusst werden. Das Hektolitergewicht (Abbildungen 51), stark durch die TKM beeinflusst, regierte dabei positiv auf geringe N-Düngeintensitäten. Ursächlich dafür dürfte die geringere Anzahl an Körnern  $\text{m}^{-2}$  (Abbildung 45) und die damit bessere Ausbildung des einzelnen Samens in den Prüfvarianten mit reduzierter N-Düngung gewesen sein. Geißler (1983) hingegen sieht eine hohe N-Düngeintensität als förderlich für das Einzelkorngewicht an, beschreibt aber auch die negative Korrelation von Einzelkorngewicht zu Kornanzahl  $\text{Ähre}^{-1}$ . Der von Geißler beschriebene Zusammenhang ließ sich in 2021 in der vorliegenden Arbeit nicht beobachten (Abbildung 42 und Abbildung 48). Setzt man die Kornanzahl  $\text{m}^{-2}$  und die TKM in Beziehung zueinander, ergab sich folgendes Bild: Intensive N-Düngung erhöhte die Kornanzahl  $\text{m}^{-2}$  (Abbildung 45) und reduzierte zeitgleich TKM und Hektolitergewicht (Abbildungen 48 und Abbildung 51). Das zur Kornfüllung zur Verfügung stehende Wasser scheint nicht ausreichend für die vollständige Ausbildung aller angelegten Körner gewesen zu sein. Dieser Effekt mag in 2021 besonders deutlich sein, da durch die gute Wasserversorgung bis Anfang Juni deutlich mehr Triebe (Abbildung 39) und damit wasserzehrende Biomasse auf der vergleichbaren Fläche vorhanden war als in den übrigen Versuchsjahren. Diese Annahme wird gestützt durch die deutlich höheren Blattflächenindizes in 2021 gegenüber den übrigen Versuchsjahren (Tabelle 4).

Die Fallzahl wurde 2021 in der vorliegenden Arbeit durch intensive N-Düngung gesteigert (Abbildung 54). Vergleichbares ist von Heyn (2006) bis zu einer N-Düngemenge von  $170 \text{ kg N ha}^{-1}$  in mehrjährigen Feldversuchen des

Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen von 1998-2005 dokumentiert worden. Die Fallzahl ist die Maßzahl für die Viskosität des Stärkekleisters und beschreibt die alpha-Amylaseaktivität im Getreidekorn. Das Enzym alpha-Amylase spaltet die im Korn enthaltene Stärke während der Keimung in Glucose (Heldt und Piechulla 2008). Die Fallzahl ist ein sehr stark umweltabhängiger Qualitätsparameter, der bei länger anhaltenden Niederschlägen auf das reife Weizenkorn sortenspezifisch schnell reduziert werden kann (Hees 2020). Mehl aus Weizen mit geringer Fallzahl ist nur noch bedingt backfähig (Diepenbrock et al. 2009), weshalb die Erhöhung der Fallzahl durch intensive N-Düngung positiv zu bewerten war. Es gab über die verschiedenen Versuchsjahre keine stabile Wirkung des Prüffaktors N auf die Fallzahl (Abbildungen 53-55).

Wie zu erwarten konnte die Rohproteinkonzentration durch eine Steigerung der N-Düngung erhöht werden (Abbildungen 56-58). Die Wirkung des Prüffaktors N auf die Rohproteinkonzentration war sehr deutlich und mehrjährig zuverlässig zu belegen; der die Rohproteinkonzentration steigernde Effekt der N-Düngung konnte in allen drei Versuchsjahren nachgewiesen werden (Abbildungen 56-58). An dieser Stelle sei noch einmal auf die Abbildung 32, welche die N-Konzentration in der Weizenpflanze zu Stadium EC 34/37 in 2022 zeigt, verwiesen. Die Effekte der N-Düngung auf die N-Konzentration im Pflanzengewebe sind den Effekten der N-Düngung auf die Rohproteinkonzentration im Weizenkorn 2022 (Abbildung 57) ähnlich.

Vergleichbare Ergebnisse bezüglich der Steigerung der Rohproteinkonzentration durch eine erhöhte N-Düngung konnten in den Versuchen des Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen von 1998-2005 nachgewiesen und von Heyn (2006) veröffentlicht werden. Auch Prugar (1978) berichtete von Ergebnissen seiner Feldversuche von 1970-1971, in denen er die positive Wirkung gesteigerter N-Düngung auf die Rohproteinkonzentration nachwies. Vergleichbare Ergebnisse berichteten auch Dachler et al. (2003) aus zweijährigen Feldversuchen an zwei verschiedenen Standorten Österreichs, in denen eine Steigerung der N-Düngung nicht nur den Kornertrag, sondern auch die Rohproteinkonzentration steigerte. Auch Hees (2020) konnte aus mehrjährigen Versuchen in Gießen und Rauschholzhausen berichten, dass eine Steigerung der N-Düngung zu erhöhten Rohproteinkonzentrationen im Weizenkorn führte. Geißler (1983) und Schubert (2006) betonten ebenfalls die große Bedeutung einer ausreichenden N-Ernährung für die Rohproteinkonzentration im Weizenkorn.

Brinker et al. (2015) konnten am Versuchsstandort Gießen ähnliche Ergebnisse, bei jedoch deutlich höheren  $N_{\min}$ -Werten als im vorliegenden Versuch, wie auch die vorliegende Arbeit liefern: Die Erhöhung der N-

Düngung hatte keinen positiven Effekt auf den Kornertrag, steigerte aber die Rohproteinkonzentration im Weizenkorn. Eine Erhöhung der Proteinkonzentration durch intensive N-Düngung bei nur minimal positiver Wirkung auf den Kornertrag bei Weizen dokumentierte Walsh (2020) in Feldversuchen in den USA.

In der Einleitung wurde beschrieben wie N zur Wurzeloberfläche gelangt, wie Trockenstress diese Prozesse stört, in welchen Formen N aufgenommen wird und welche Funktionen N in der Pflanze übernimmt. Die Aufnahme des N erfolgt in unseren heimischen Böden zum überwiegenden Teil als Nitrat. Vor der Assimilation, also dem Einbau des N in organische Verbindungen, wird das Nitrat von den Enzymen Nitrat- und Nitritreduktase über die Zwischenstufe Nitrit zu Ammonium reduziert. Die eigentliche Ammoniumassimilation erfolgt dann enzymatisch quantitativ überwiegend durch die Glutamin-Synthetase und die Glutamat-Synthase. Im ersten Schritt wird das Ammonium enzymatisch auf das Glutamat übertragen und es entsteht als Produkt Glutamin; im zweiten Schritt der Assimilation überträgt die Glutamat-Synthase die Amidgruppe des Glutamin auf das alpha-Ketoglutarat. Das Produkt sind zwei Moleküle Glutamat, die ins Cytosol abgegeben werden. Aus dem Glutamat können in weiteren enzymatischen Reaktionen verschiedene Aminosäuren synthetisiert werden (Heldt und Piechulla 2008).

Die Synthese von Aminosäuren kann durch N-Mangel oder durch den Mangel an Kohlenstoffverbindungen aus der photosynthetischen CO<sub>2</sub>-Assimilation limitiert werden. Unter Trockenstress können also sowohl N-Mangel, als auch die wegen der eingeschränkten Transpiration reduzierte Photosynthese die Bildung von Aminosäuren begrenzen (Heldt und Piechulla 2008). Üblicherweise ist die Photosynthese nicht limitierend, da sie erst bei deutlichen Wasserpotentialabsenkungen in der Pflanze auf Trockenstress reagiert und Vorgänge im N-Stoffwechsel deutlich vorher limitierend wirken (Brunold et al. 1996). Auch im vorliegenden Versuch scheint die Bildung von Aminosäuren nicht durch den Mangel an Kohlenstoffverbindungen limitiert gewesen zu sein, da ansonsten die Steigerung der Rohproteinkonzentration in allen Versuchsjahren durch Intensivierung der N-Düngung nicht zu erklären wäre.

Ebenfalls dreijährig konnte eine Steigerung der Rohproteinträge durch intensive N-Düngung nachgewiesen werden. Besonders deutlich war die N-Düngewirkung 2020 und 2021 (Abbildung 59 und Abbildung 60). In Anbetracht dessen, dass Weizen mit rund 20% den globalen Kalorien- als auch Proteinbedarf der menschlichen Ernährung deckt (Shiferaw et al. 2013), verdient dieser Umstand besondere Beachtung. Für die Produktion von Weizen mit hoher Backqualität auf Sandstandorten mit der Gefahr von Trockenstress sollte die N-Düngung an die langjährig zu erwartenden

Kornerträge angepasst werden, ohne die Wirkung der N-Düngung auf die Rohproteinkonzentration außer Acht zu lassen. Eine Aufteilung der N-Gaben mit Schwerpunkt auf der Dritten und damit die Kornqualität maßgeblich beeinflussenden N-Düngung, etwa zum Termin des Ährenschiebens (Diepenbrock et al. 2009), unter Beachtung des zu erwartenden Kornertrags, scheint daher angemessen.

Die Reaktion von Raps auf die unterschiedlichen N-Düngeintensitäten unterschied sich deutlich zu der von Weizen. Dabei sei noch einmal auf das, im Gegensatz zu Weizen, deutlich erhöhte Ertragsniveau von 35-45 dt ha<sup>-1</sup> in 2021 und 2022 beim Raps auf dem Trockenstandort verwiesen. Eine Wirkung wurde sowohl auf den Kornertrag als auch auf die Ölkonzentration nachgewiesen. In den ersten beiden Versuchsjahren (Abbildungen 62 und Abbildung 63) konnten signifikante Kornertragsrückgänge bei reduzierter N-Düngung nachgewiesen werden. Diese Effekte der N-Düngung waren interessanterweise nur in Prüfvarianten ohne K-Düngung signifikant nachweisbar. Die Steigerung des Kornertrags durch hohe N-Düngung beruhte auf einer Steigerung der Kornanzahl m<sup>-2</sup> (Abbildung 68 und Abbildung 69). Die TKM wurde nicht signifikant negativ durch intensive N-Düngung beeinflusst (Abbildungen 71-73). Der für Weizen vorgestellte negative Zusammenhang dieser beiden Ertragskomponenten war für Raps nicht zu beobachten. Die stark erhöhte TKM in 2020 (Abbildung 71) mit rund 6,5 g ließ sich auf die deutlich reduzierte Kornanzahl Pflanze<sup>-1</sup> gegenüber den Folgejahren zurückführen. In 2022, dem Jahr mit der höchsten Kornanzahl Pflanze<sup>-1</sup>, war die TKM (Abbildung 73) mit etwa 3,5 g am geringsten im gesamten Versuchszeitraum. Die TKM ist die Ertragskomponente im Rapsanbau, die am wenigsten durch Produktionsmitteleinsatz wie die Düngung mit N beeinflusst werden kann; im Gegensatz hierzu ist eine Beeinflussung durch Umwelteinflüsse wie Trockenstress oder Hitzestress häufiger zu beobachten (Geisler 1983). Diese Erkenntnis von Geißler wurde durch die vorliegende Untersuchung gestützt, da kaum eine Wirkung der Prüffaktoren auf die TKM bei Raps nachweisbar war (Abbildungen 71-73).

Bei den Prüfvarianten mit reduzierter N-Düngung waren die Ölkonzentrationen in 2021 und 2022 statistisch signifikant erhöht (Abbildung 75 und Abbildung 76). Eine signifikante N-Düngewirkung auf den Ölertrag, dem für die Wirtschaftlichkeit des Rapsanbaus maßgeblichen Ertragsparameter, war lediglich 2020 signifikant nachzuweisen (Abbildung 77). In 2020 überlagerte die Kornertragssteigerung durch hohe N-Düngeintensität (Abbildung 62) die tendenzielle Reduktion der Ölkonzentration (Abbildung 74) im Rapsamen. Nach Geißler (1983) ist diese N-Wirkung auf den Ölertrag üblich. Sehr

ähnliche Ergebnisse wurden von Amberger (1977) veröffentlicht, der von steigenden Korn- und Ölerträgen bei reduzierten Ölkonzentrationen im Rapssamen durch Steigerung der N-Düngung berichtete. Auch eine aktuelle Studie von Kage et al. (2022) belegt die ertragssteigernde Wirkung intensiver N-Düngung im Rapsanbau. Die Studie berücksichtigt Datensätze aus über 100 N-Steigerungsversuchen von 2006-2020. Die negative Wirkung intensiver N-Düngung auf die Ölkonzentration der Rapssamen wurde von Diepenbrock (1978) untersucht. In seinem N-Steigerungsversuch an Rapseinzelpflanzen im Mitscherlichgefäß belegte er die straff negative Korrelation von Lipid- und Proteinsynthese im Rahmen der Samenausbildung. Die Straffheit der Korrelation ließ zur Abreife hin nach, so dass keine signifikante Beeinflussung der Ölkonzentration durch gesteigerte N-Düngung zur Abreife nachgewiesen werden konnte. Die negative Korrelation zwischen Lipid- und Rohproteinkonzentration im Samen während dessen Ausbildung erklärte Diepenbrock dadurch, dass sowohl Lipide als auch Proteine auf Kohlenstoffverbindungen aus dem Kohlenhydratstoffwechsel angewiesen sind und um diese in Konkurrenz zueinander stehen. Eine intensive N-Düngung begünstigt dabei die Proteinsynthese.

Eine nur geringfügige Beeinflussung der Ölkonzentration in Abhängigkeit von der N-Düngeintensität sieht auch Geißler (1983). In den Stickstoffsteigerungsversuchen vom Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen von 1998-2005 wurden hingegen deutliche Rückgänge der Ölkonzentration bei hoher N-Düngeintensität nachgewiesen (Heyn 2006). Dies bekräftigen auch Ergebnisse eines Feldversuchs von Ijaz und Honermeier (2013) aus den Jahren 2008-2010 an den Standorten Gießen und Rauschholzhausen, in denen sinkende Ölkonzentrationen durch hohe N-Düngeintensitäten nachgewiesen werden konnten. Im vorliegenden Versuch führte intensive N-Düngung ebenfalls zu statistisch signifikant reduzierten Ölkonzentrationen im Rapssamen. Die Ölkonzentration im Rapssamen wurde durch maximale N-Düngung um rund 2% gegenüber den Prüfvarianten mit minimaler N-Düngeintensität reduziert (Abbildung 75 und 76).

Da der Kornertrag von Raps in zwei der drei Versuchsjahre signifikant positiv durch intensive N-Düngung beeinflusst wurde und 2020 auch höhere Ölerträge aufwies, ist eine Reduktion der N-Düngung bei Raps nicht empfehlenswert. Die 2020 durch intensive N-Düngung tendenziell verminderte Ölkonzentration im Rapssamen wurde durch eine deutliche Kornertragssteigerung überkompensiert; dies führte zu höheren Ölerträgen. Wie ausgeführt zeigten diverse Studien ähnliche Ergebnisse. Durch die Ertragssteigerung bei intensiver N-Düngung konnte zudem in zwei Jahren die Wassernutzungseffizienz bei Raps signifikant verbessert werden (Abbildung 28 und Abbildung 29). Dies entspricht Erkenntnissen von Kage (2011), in

denen die positive Wirkung standortangepasster N-Düngung auf die Wassernutzungseffizienz nachgewiesen wurde. Ursächlich für die Steigerung der Wassernutzungseffizienz könnte laut Kage (2011) im vorliegenden Versuch eine höhere Assimilationsrate bei gleichbleibendem Blattflächenindex oder eine erhöhte Strahlungsaufnahme durch schnellere Blattflächenexpansion gewesen sein. Eine ähnliche Erklärung zur Verbesserung der Wassernutzungseffizienz bei ausreichender Düngung von N, P und K sieht auch Jákli (2016). Verbessertes Wurzelwachstum und schnellere Blattflächenexpansion erhöhen demnach die Wassernutzungseffizienz.

Die Hypothese III der vorliegenden Arbeit lautete:

Reduktion der Stickstoffdüngung unter Trockenstress führt bei Weizen zu signifikant höheren Erträgen und Qualitäten und bei Raps zu signifikant höheren Ölerträgen.

Für Weizen war Hypothese III sowohl für den Kornertrag als auch für die Rohproteinkonzentration als Qualitätsmerkmal zu verwerfen. Für Raps war Hypothese III für den Kornertrag zu verwerfen. Ebenso musste Hypothese III für den Ölertrag verworfen werden, obwohl die Ölkonzentration im Rapsamen bei intensiver N-Düngung reduziert wurde.

## 5. Zusammenfassung

In einem dreijährig wiederholten, vollrandomisierten Parzellenversuch von 2019-2022 auf einem gut mit Kalium versorgten Sandstandort (Su2) in Zentralmecklenburg wurde der Einfluss von Saatstärke, Stickstoffdüngung und Kaliumdüngung auf Ertrag und Qualität von Winterweizen (*Triticum aestivum*) und Winterraps (*Brassica napus*) unter Trockenstress geprüft.

Für Saatstärke und N-Düngung gab es jeweils drei Faktorstufen, für die K-Düngung lediglich die Varianten unterlassen oder gedüngt. Die nutzbare Feldkapazität lag am Standort bei rund 18 mm dm<sup>-1</sup> Boden, woraus sich nach artspezifischen Durchwurzelungstiefen etwa 110 mm verfügbare Feldkapazität für Weizen und 160 mm verfügbare Feldkapazität für Raps ergaben. Begleitend zum Versuch wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) Modelle zum Wasserhaushalt mit am Versuchsstandort gewonnenen Daten zu Boden und Wetter errechnet. Das seit über zwanzig Jahren verifizierte Rechenmodell des DWD zerlegte dabei die Evapotranspiration der Kulturen in Transpiration, Evaporation und Interzeptionsverdunstung und simulierte den Verlauf der Bodenfeuchte im Wurzelraum über die Vegetationsperiode.

Für alle drei Versuchsjahre konnte Trockenstress rechnerisch ermittelt und auch an den Versuchspflanzen Weizen und Raps nachgewiesen werden. Dauer und Intensität des Trockenstress differierten zwischen den Versuchsjahren deutlich. Der Trockenstress trat im zweiten Versuchsjahr deutlich später ein und dauerte deutlich kürzer als in den übrigen beiden Versuchsjahren. Im ersten und im letzten Versuchsjahr herrschte bereits um den Monatswechsel April-Mai Trockenstress für beide Kulturen, welcher bis zum Stadium der Blüte und darüber hinaus anhielt.

Augenscheinlich war der Raps an die Bedingungen des Versuchsstandortes besser angepasst als der Weizen. Durch sein tiefergehendes Wurzelwerk verschaffte der Raps sich gegenüber Weizen eine um etwa 50% gesteigerte verfügbare Feldkapazität. Zudem erfolgte die Rapsblüte deutlich vor der des Weizens und profitierte von der zu diesem Zeitpunkt noch besseren Wasserversorgung. Die Erträge der beiden Kulturen glichen sich artuntypischerweise in zwei Versuchsjahren nahezu und lagen auf einem Niveau von rund 40-50 dt ha<sup>-1</sup> Weizen und 35-40 dt ha<sup>-1</sup> Raps.

Die Wirkung der Prüffaktoren auf die Kulturen war different: Der Weizen reagierte auf eine Reduktion der Saatstärke mit signifikanten Mindererträgen. Die saatstärkereduzierten Varianten waren nicht in der Lage ausreichend Bestockungstriebe zu bilden und wiesen daher signifikant weniger Ähren m<sup>-2</sup> auf. Eine Kompensation durch eine erhöhte Kornanzahl Ähre<sup>-1</sup> oder eine Steigerung der Tausendkornmasse war nicht zu beobachten. N-

Düngewirkungen auf den Kornertrag waren beim Weizen nur vereinzelt zu beobachten, da die durch N-Düngung gesteigerte Ährendichte durch eine verminderte TKM ertraglich egalisiert wurde. Eine Kornertragssteigerung durch K-Düngung konnte in einem Versuchsjahr nachgewiesen werden und führte zu einer Verbesserung der Wassernutzungseffizienz.

Gegenteiliges war beim Raps zu beobachten: Durch intensivere Einzelpflanzenentwicklung war die Reduktion der Saatstärke nicht ertragswirksam, da in den Prüfvarianten mit reduzierter Saatstärke eine signifikant höhere Kornanzahl Pflanze<sup>-1</sup> gebildet werden konnte. Dieser Umstand belegte die große Kompensationsfähigkeit von Raps zwischen den einzelnen Ertragskomponenten. Eine Reduktion der N-Düngung hingegen wirkte im Raps ertragsmindernd, da signifikant weniger Körner m<sup>-2</sup> gebildet wurden. Signifikant kornertragssteigernde Effekte durch K-Düngung waren im Raps in einem Versuchsjahr nachzuweisen. Die Steigerung der N-Düngung führte zu den höchsten Kornerträgen und reduzierte gleichzeitig die Ölkonzentration im Rapsamen. Eine zuverlässige Wirkung der Prüffaktoren auf den Ölertrag war nicht mehrjährig nachweisbar. Sowohl N- als auch K-Düngung konnten die Wassernutzungseffizienz bei Raps durch Kornertragssteigerung verbessern.

Im Weizen führte eine Reduktion der N-Düngung und eine unterlassene K-Düngung zu reduzierten N-Konzentrationen in der Trockenmasse der Gesamtpflanze zu Stadium EC 34/37. Nahezu identisch war die Wirkung der N- und K-Düngung auf die Rohproteinkonzentration im Weizenkorn: Eine Reduktion der N-Düngung und ein Unterlassen der K-Düngung führte in allen drei Jahren zu signifikant reduzierten Rohproteinkonzentrationen und damit zu Qualitätsmängeln. Eine Steigerung der N-Effizienz bei erfolgter K-Düngung durch verbesserte Aufnahme- und Translokationsprozesse war wahrscheinlich. Eine durch K-Düngung verbesserte Proteinsynthese konnte vermutet werden. Der Rohproteinertrag konnte in allen Versuchsjahren durch intensive gegenüber reduzierter N-Düngung signifikant erhöht werden und wurde darüber hinaus positiv durch K-Düngung beeinflusst.

Über die Steigerung der Rohproteinkonzentration hinaus konnten durch K-Düngung TKM und Hektolitergewicht beim Weizen mehrjährig signifikant gesteigert werden.

Überraschend waren die K-Düngeeffekte auf Erträge, Wassernutzungseffizienz und Qualitäten bei Weizen und Raps. Obwohl für beide im Versuch genutzten Arten Mechanismen der K-Aneignungseffizienz bekannt sind und der Versuchsstandort gut mit K versorgt war, schien das pedogene K keine ausreichende K-Versorgung der Kulturen zu gewährleisten.

Eine verminderte K-Verfügbarkeit durch Austrocknen des Bodens war zu vermuten.

Es konnte festgehalten werden, dass unter Trockenstress deutliche K-Düngeeffekte sowohl auf Weizen als auch auf Raps bestanden und eine verbesserte N-Ausnutzung bei erfolgter K-Düngung vorlag.

## 6. Summary

In a three-year replicated and fully randomised plot trial from 2019-2022 on a good potassium (K) supplied sandy site (Su2) in central Mecklenburg, the influence of seed rate, nitrogen (N) fertilisation and potassium (K) fertilisation on yield and quality of winter wheat (*Triticum aestivum*) and winter oilseed rape (*Brassica napus*) under drought stress was tested.

For seed rate and N fertilisation there were three factor levels each, for K fertilisation only omitted or fertilised. The usable field capacity at the site was about 18 mm dm<sup>-1</sup> soil, which resulted in about 110 mm available field capacity for wheat and 160 mm available field capacity for oilseed rape after species-specific rooting depths. Accompanying the trial, models of the water balance were calculated by the German Weather Service (DWD), using data of soil and wheater collected at the trial site. The for twenty years verified DWD model separated the evapotranspiration of the crops into transpiration, evaporation and interception and simulated the course of the soil moisture in the root zone over the vegetation period.

Drought stress could be calculated for all three trial years and could also be detected on the trial plants wheat and oilseed rape. The duration and intensity of the drought stress differed significantly among the trial years. Drought stress occurred considerably later in the second trial year and lasted much shorter than in the other two trial years. In the first and in the last trial year, the wheat and oilseed rape were already under drought stress at the beginning of May, which lasted until the flowering stage and beyond. Apparently, the oilseed rape was better adapted to the conditions of the trial site than the wheat by opening up a larger root space, which gave the oilseed rape a 50% increase in available field capacity, and earlier flowering in spring.

Untypically the yields of the two crops were almost identical in two trial years, and were at a level of around 40-50 dt ha<sup>-1</sup> wheat and 35-40 dt ha<sup>-1</sup> oilseed rape.

The effects of the test factors on the crops were different: Wheat reacted to a reduction in seed-strength with significantly lower yields. The seed-strength reduced treatments were not able to form sufficient tillers and therefore had significantly fewer heads m<sup>-2</sup>. Compensation by an increased number of seeds head<sup>-1</sup> or an increase in the thousand-grain mass was not observed. N fertilisation effects on grain yield were observed only sporadically in wheat, because the increased grain number m<sup>-2</sup> due to N fertilisation was equalised

by a reduced thousand-grain mass. An increase in grain yield through K fertilisation was detectable in one trial year and improved water use efficiency.

The opposite was observed in oilseed rape: Due to more intensive individual plant development, the seed rate did not affect yield, as significantly more grains per plant could be formed in the test treatments with reduced seed rate. This fact proved the great compensatory capacity of oilseed rape between the individual yield components. Reducing N fertilisation, on the other hand, had a yield-reducing effect in oilseed rape, because significantly fewer grains  $m^{-2}$  were formed. Thousand-grain mass was not affected by N fertiliser intensity. Positive effects of K fertilisation on grain yield were evident in oilseed rape in one trial year and improved the water use efficiency. Increasing N fertilisation resulted in highest grain yields and at the same time reduced the oil concentration in the oilseed rape seed. A reliable effect of the test factors on oil yield was not detectable over several years because of this. Both N and K fertilisation could improve water use efficiency in oilseed rape by increasing grain yield. In wheat, reducing N fertilisation and omitting K fertilisation resulted in reduced N concentrations in the dry matter of the whole plant at EC stadium 34/37. The effect of N and K on the crude protein concentration in wheat seeds was almost identical: A reduction in N fertilisation and omitted K fertilisation resulted in significantly reduced crude protein concentrations and thus quality defects. An increase in N efficiency when K fertilisation was applied was likely due to improved uptake- and translocation processes. Protein synthesis improved by K fertilisation could be suspected.

The crude protein yield was significantly increased in all trial years through intensive versus reduced N fertilisation and was also positively influenced by K fertilisation.

Beyond the increase in crude protein concentration, K fertilisation significantly increased thousand grain mass and hectoliter weight in wheat over several trial years.

The K fertilisation effects on yields, water use efficiency and qualities of wheat and oilseed rape were surprising. Although mechanisms of K appropriation efficiency are known in both species used in the trial and the trial site was well supplied with K, the pedogenic K did not seem to provide sufficient K supply to the crops. A reduced availability due to drying of the soil was suspected.

It was found that under drought stress there were clear K fertilisation effects on both wheat and oilseed rape and the N fertilisation was improved when K fertilisation was applied.

## 7. Literaturverzeichnis

Amberger, A. (1977): Mineralische Ernährung und Qualität pflanzlicher Produkte. Kali-Briefe, Fachgebiet 11: Düngung und Qualität, **5. Folge**.

Bergmann, W. (1988): Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Gustav Fischer Verlag.

Beuth Verlag GmbH (2009): DIN Deutsches Institut für Normung e.V (2010): Weizen, Roggen und deren Mehle, Hartweizen und Hartweizengrieß – Bestimmung der Fallzahl nach Hagberg-Perten (ISO 3093:2009); Deutsche Fassung EN ISO 3093:2009.

Beuth Verlag GmbH (2002): DIN Deutsches Institut für Normung e.V (2002): Die Internationale Norm ISO 11277:1998-05-15 Soil quality, Determination of particle size distribution in mineral soil material. Method by sieving and sedimentation.

Beuth Verlag GmbH (1998): DIN Deutsches Institut für Normung e.V (1998): Gleichzeitige Bestimmung des Öl- und Wassergehaltes Verfahren mit gepulster Kernresonanzspektroskopie (ISO 10565 : 1998).

Beuth Verlag GmbH (2016): DIN Deutsches Institut für Normung e.V (2016): Lebensmittelerzeugnisse – Bestimmung des Gehaltes an Gesamtstickstoff mit dem Verbrennungsverfahren nach Dumas und Berechnung des Gehaltes an Rohprotein – Teil 2: Getreide, Hülsenfrüchte und gemahlene Getreideerzeugnisse (ISO 16634-2:2016); Deutsche Fassung EN ISO 16634-2:2016.

Bogulawski, E. (1981): Ackerbau. Grundlagen der Pflanzenproduktion. DLG-Verlags-GmbH Frankfurt.

Brinker, S.; Macholdt, J.; Gaudchau, M.; Yan, F.; Honermeier, B. (2016): Ertragsbildung und Kornqualität von Waxy-Weizen in Abhängigkeit von der N-Düngung. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. **28**: 242-243 (2016).

Brunold, C.; Rügsegger, A.; Brändle, R. (1996): Stress bei Pflanzen. Verlag Paul Haupt.

Campell, N; Reece, J. (2006): Biologie. Pearson Education Deutschland GmbH.

Cattivelli, L.; Rizza, F.; Badeck, F-W.; Mazzucotelli, E.; Mastrangelo, A-M.; Francia, E.; Mare, C.; Tondelle, A.; Stanca, M. (2008): Drought tolerance improvement in crop plants: An integrated view from breeding to genomics. *Field Crops Research* **105** (2008) 1–14.

Christen, O.; Friedt, W. (2007): *Winterraps. Das Handbuch für Profis*. DLG-Verlags-GmbH Frankfurt.

Claassen, N.; Jungk, A. (1983): Bedeutung von Kaliumaufnahme, Wurzelwachstum, und Wurzelhaaren für das Kaliumaneignungsvermögen verschiedener Pflanzenarten. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.* **147**, 276-289 (1984).

Comberg, C. (2014): Einfluss der Bestandesarchitektur auf die Ertragsbildung im Winterraps (*Brassica napus* L.). Dissertation, Universität Göttingen.

Dachler, M.; Köchl, A. (2003): Der Einfluss von Fruchtfolge, Vorfrucht, Stickstoffdüngung und Einarbeitung der Ernterückstände auf Ertrag und Rohproteingehalt von Winterweizen und nachfolgender Sommergerste. *Die Bodenkultur* **54** (1) 2003.

Dai, L. J.; Liu, Y. K.; Zhu, C. W.; Zhong, J. (2021): Differential proteomics of tobacco seedling roots at high and low potassium concentrations. *Scientific Reports*, **11(1)**, 9194.

Damm, S.; Hoffmann, B.; Gransee, A.; Christen, O. (2013a): Zum Einfluss langjährig differenzierter Kaliumdüngung auf Parameter des Bodenwasserhaushaltes. *Archives of Agronomy and Soil Science* Vol. **59**, No. 1, January 2013, 21–40.

Damm, S.; Hoffmann, B.; Gransee, A.; Christen, O. (2013b): Zur Wirkung von Kalium auf ausgewählte bodenphysikalische Eigenschaften und den Wurzeltiefgang landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. *Archives of Agronomy and Soil Science* Vol. **59**, No. 1, January 2013, 1–19.

Darwinkel, A.; Ten Hag B.A.; Kuizenga, J. (1977): Effects of sowing date and seed rate on crop development and grain development and grain production of winter wheat. *Neth. J. agric. Sci.* **25** (1977): 83-94.

Diepenbrock, W. (1978): Einfluss der Stickstoffernährung auf qualitative und quantitative Sameneigenschaften von Raps (*Brassica napus* L.). *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.* **142**, 740-750 (1979).

Diepenbrock, W.; Ellmer, F.; Leon, J. (2009): *Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung*. Eugen Ulmer Verlag Stuttgart.

Eckelmann, W. (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, Ad-Hoc-AG-Boden, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.). 5. Auflage, Hannover.

Ehlers, W. (1996): Wasser in Boden und Pflanze. Dynamik des Wasserhaushalts als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag. Eugen Ulmer Verlag Stuttgart.

Ehlers, W. (1997): Zum Transpirationskoeffizienten von Kulturpflanzen unter Feldbedingungen. Pflanzenbauwissenschaften, **I (3)**, S. 97-108, 1997, Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart.

Faust, F.; Schubert, S. (2016): Protein synthesis is the most sensitive process when potassium is substituted by sodium in the nutrition of sugar beet (*Beta vulgaris*). Plant Physiology and Biochemistry **107** (2016) 237-247.

Faust, F.; Schubert, S. (2017): In vitro protein synthesis of sugar beet (*Beta vulgaris*) and maize (*Zea mays*) is differentially inhibited when potassium is substituted by sodium. Plant Physiology Biochemistry **118**, 228–234.

Finck, A. (1991): Düngung. Eugen Ulmer Verlag Stuttgart.

Frederick, J.R.; Camberato J.J. (1995): Water and nitrogen effects on winter wheat in the southeastern coastal plain: I. Grain yield and kernel traits. Agronomy Journal, **87(3)**, 521-526.

Frisch, M. (2021): Angewandte Statistik/ Biostatistics and Experimental Design.

Geisler, G. (1983): Ertragsphysiologie von Kulturarten des gemäßigten Klimas. Verlag Paul Parey Hamburg und Berlin.

Geisler, G. (1980): Pflanzenbau. Ein Lehrbuch- Biologische Grundlagen und Technik der Pflanzenproduktion. Verlag Paul Parey Hamburg und Berlin.

Gruber, H.; Thamm, U.; Michel, V. (2003): Einfluss der Saatstärke auf Ertragsmerkmale bei Getreide. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau - Ökologischer Landbau der Zukunft, Wien, 24.-26.2.2003; Published in Freyer, Bernhard, Eds. Ökologischer Landbau der Zukunft, Beiträge zur **7.** Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau, page 465-466.

Grzebisz, W.; Gransee, A.; Szczepaniak, W.; Diatta, J. (2013): The effects of potassium fertilization on water-use efficiency in crop plants. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, **176**, 355-374.

Günzler, H. (2012): Infrarotspektroskopie. Highlights aus dem Analytiker-Taschenbuch. Springer-Verlag Berlin.

Hahn, C. F. (2007): Untersuchungen zur Charakterisierung der Aufnahme, des Transports und der Reduktion von Nitrat in Blättern und Wurzeln von *Brassica napus* L. und *Lupinus albus* L. unter Einsatz der kurzlebigen Radioisotope <sup>11</sup>C und <sup>13</sup>N. Dissertation 2007, Universität Bonn.

Hahn-Weinheimer, P.; Hirner, A.; Weber-Diefenbach, K. (1984): Grundlagen und praktische Anwendung der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA). Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden.

Hees, J. (2020): Backqualität von Winterweizen bei variierender Stickstoff-Düngung und unter Berücksichtigung modifizierter Bewertungskriterien. Dissertation 2020, Universität Gießen.

Helal, M.; Mengel, K. (1968): Der Einfluß einer variierten N- und K-Ernährung auf den Gehalt an löslichen Aminoverbindungen und auf die Ertragsbildung bei Sommerweizen. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, **120(2)**, 89-98.

Heldt, H.; Piechulla, B. (2008): Pflanzenbiochemie. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.

Herbst, M.; Falge, E.; Frühauf, C. (2021): Regionale Klimamodellierung – Perspektive Landwirtschaft. In: Regionale Klimamodellierung II – Anwendungen. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), **Promet 104**, 55-62.

Hermann, R.; Alkemade, C.Th.J. (1960): Flammenphotometrie. Springer-Verlag Berlin.

Heyn, J. (2006): Ertrag, Ertragskomponenten, Qualitätseigenschaften, Rentabilität, N-Saldo und N-Ausnutzung bei steigender N-Düngung bei den wichtigsten Ackerfrüchten - Ergebnisse hessischer Feldversuche seit 1998. Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen 2006.

Hoffmann, S.; Kismanyoky, T.; Balazs, J.; Körschens, M. (1999): Ertragsleistung, N-Bilanz und N-Ausnutzung in Abhängigkeit von organischer und mineralischer N-Düngung. Arch. Acker- Pfl. Boden., 1999. **Vol. 44**, pp. 81-92.

Ijaz, M; Honermeier, B. (2013): Effect of different fungicides on seed yield and grain quality of rapeseed (*Brassica napus* L.) under two levels of nitrogen fertilization. Die Bodenkultur **64** (1-2) 2013.

International Organization for Standardization (1995): Soil quality - Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis). ISO 10964.

Jákli, Bálint (2016): The relation between potassium nutrition and water-use efficiency of crop plants: Comparative studies from leaf to field scale. **Vol. 1**. Cuvillier Verlag, 2016.

Jung, C.; Niggli, U.; Tiedemann, A., Kage, H. (2021): Pflanzenproduktion in Deutschland-Bestandsaufnahme und Perspektive für die Zukunft. NAL-Conference Nr. **426**, 7–24 (2021).

Kage, H. (2011): Interaktion von N- und Wassernutzungseffizienz. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. **23**: 19-23 (2011).

Kage, H.; Rübiger, T.; Sieling, K. (2022): Stickstoffdüngung zu Winterraps und Winterweizen. Eine Evaluierung der Düngeverordnung, methodischer Aspekte der Auswertung von Düngeversuchen sowie der Beziehung zwischen Düngehöhe und Stickstoffauswaschung. Bericht über Landwirtschaft. Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft. **Band 100**, Ausgabe 1. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft.

Koch, K.; Mengel, K. (1974): The influence of the level of potassium supply to young tobacco plants (*Nicotiana tabacum* L.) on short-term uptake and utilisation of nitrate nitrogen (15N). J. Sci. Fd Agric. 1974, **25**, 465-471.

Köhler, W.; Schachtel, G.; Voleske, P. (2012): Biostatistik. Eine Einführung für Biologen und Agrarwissenschaftler. Springer Spektrum.

König, N. (2014): Handbuch Forstliche Analytik. Eine Loseblatt-Sammlung der Analysemethoden im Forstbereich. Nordwestdeutsche forstliche Versuchsanstalt, Göttingen.

Kuchenbuch, R.; Claassen, N. (1985): Kalium-Verfügbarkeit und Kalium-Dynamik in der Rhizosphäre. KALI-BRIEFE (Büntehof) **17 (6)** 407-418, (1985).

Kuchenbuch, R.; Claassen, N.; Jungk, A. (1986): Potassium availability in relation to soil moisture. Plant and soil **95**, 221- 231, (1986).

Kuchenbuch, R.; Jungk, A. (1984): Wirkung der Kaliumdüngung auf die Kaliumverfügbarkeit in der Rhizosphäre von Raps. Z. Pflanzenernaehr. Bodenk. **147**, 435-448 (1984).

Kuntze, H.; Roeschmann, G.; Schwerdtfeger, G. (1994): Bodenkunde. Eugen Ulmer Verlag Stuttgart.

Löpmeier, F.-J. (1994): Agrarmeteorologisches Modell zur Berechnung der aktuellen Verdunstung (AMBAV).

Macleod, L.B. (1969): Effects of N, P, and K and their interactions on the yield and kernel weight of barley in hydroponic culture. *Agron. Journal*, **61**, 26-29 (1969).

Marschner, H.; Kirkby, E. A.; Cakmak, I. (1996): Effect of mineral nutritional status on shoot-root partitioning of photoassimilates and cycling of mineral nutrients. *Journal of experimental botany*, **47**(Special\_Issue), 1255-1263.

Mengel, K. (1980): Effect of potassium on the assimilate conduction to storage tissue. *Berichte der Deutschen botanischen Gesellschaft* **93.1**: 353-362.

Mengel, K. (1991): Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. Gustav Fischer Verlag Jena.

Mengel, K.; Viro, M.; Hehl, G. (1976): Effect of potassium on uptake and incorporation of ammonium-nitrogen on rice plants. *Plant and Soil* **44**, 547-558 (1976).

Mengel, K.; Secer, M.; Koch K. (1981): Potassium effect on protein formation and amino acid turnover in developing wheat grain. *Agronomy Journal* **73.1**: 74-78.

Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern (2017): Richtwerte für die Untersuchung und Beratung zur Umsetzung der Düngeverordnung vom 26. Mai 2017 in Mecklenburg-Vorpommern. Landesamt für innere Verwaltung M-V.

Nölte, J. (2020): ICP Emmisionsspektrometrie für Praktiker. Wiley-VCH, Weinheim.

Perneger, T. V. (1998): What's wrong with Bonferroni adjustments. *BMJ*, **316**(7139), 1236-1238.

Prugar, J. (1978): Einfluß der Düngung auf den Ertrag, den Gehalt an Eiweißstoffen und auf die Aminosäurezusammensetzung von Winterweizen. *Die Nahrung* **22/2**, 163-171, 1978.

Quarrie, S.; Stojanovic, J.; Pekic, S. (1999): Improving drought resistance in small grained cereals. A case study, progress and prospects. *Plant Growth Regulation* **29**, 1-21.

Reeb, D. (2010): 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 2010, Universität Gießen.

Renger, M.; Strebel, O. (1980): Jährliche Grundwasserneubildung in Abhängigkeit von Bodennutzung und Bodeneigenschaften. – Wasser und Boden, **32(8)**: 362-366, 1980.

Rozov, A.; Khusainov, I.; EL Omari, K.; Duman, R.; Mykhaylyk, V.; Yusupov, M.; Westhof, E.; Wagner, A.; Yusupova, G. (2019): Importance of potassium ions for ribosome structure and function revealed by long-wavelength X-ray diffraction. Nature Communications , (2019) **10:2519**.

Saville, D. J. (1990): Multiple comparison procedures: the practical solution. The American Statistician, **44(2)**, 174-180.

Saville, D. J. (2003): Basic statistics and the inconsistency of multiple comparison procedures. Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale, **57(3)**, 167.

Saville, D. J. (2015): Multiple comparison procedures—cutting the gordian knot. Agronomy Journal, **107(2)**, 730-735.

Schäfer, B.; Merker, C. (2012): Auswirkung von Saatstärke, Saattermin und Sorte auf den Ertrag von Winterweizen. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. **24**: 291–292 (2012).

Schubert, S. (2008): Biochemie. Eugen Ulmer Verlag Stuttgart.

Schubert, S. (2006): Pflanzenernährung. Grundwissen Bachelor. Eugen Ulmer Verlag Stuttgart.

Schubert, S. (2016): Trockenstress und Dürresistenz von Kulturpflanzen. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. **28**: 1-4 (2016).

Seiffert, M. (1968): Landwirtschaftlicher Pflanzenbau. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin.

Shiferaw, B.; Smale, M.; Braun, H-J.; Duveiller, E.; Reynolds, M.; Muricho, G. (2013): Crops that feed the world 10. Past successes and future challenges to the role played by wheat in global food security. Food Sec (2013) **5**: 291-317.

Skoog, D.; Leary, J. (1996): Instrumentelle Analytik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg (1996).

Statistisches Bundesamt (2022): Statistisches Bundesamt (Destatis), Fachserie 3 Reihe 3.1.2. Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Landwirtschaftliche Bodennutzung. Anbau auf dem Ackerland.

Steingrobe, B.; Claassen, N. (1999): Potassium dynamics in the rhizosphere and K efficiency of crops. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* (2000), **163**, 101-106.

Stickse, E.; Maidl, F.-X.; Ludwig, A.; Fischbeck, G. (1996): Der Ertragsbildung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen in Abhängigkeit von der nutzbaren Feldkapazität bei differenzierter Stickstoffdüngung in Trockenjahren. *Die Bodenkultur* **47 (3)** 1996.

Thomas, E. (2002): Rand- und Nachbarwirkung in landwirtschaftlichen Feldversuchen- Analyse und Konsequenzen. Bericht über die 53. Tagung 2002 der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs BAL Gumpenstein, 26. - 28. November 2002.

Thomas, E. (2006): Feldversuchswesen. Eugen Ulmer Verlag Stuttgart.

Tilman, D.; Balzer, C.; Hill, J.; Befort, B. L. (2011): Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. 20260–20264, PNAS.

Uray, G.; Kaufmann, J.; Steiner, B. (1999): Qualitätssicherung der Nah-Infrarot Reflexionsspektroskopie (NIRS) in der Futteruntersuchung: Bestimmung von Trockensubstanz, Rohprotein, Rohfaser und Rohfett. *Die Bodenkultur*, **50 (1)** 1999.

VDLUFA (2016): Methodenbuch I VDLUFA, Darmstadt.

VDLUFA (2006): Methodenbuch III VDLUFA, Darmstadt.

Waloszcyk, K. (1996): Ertragsbildung von Winterweizen auf Löss-Schwarzerdeböden unter semiariden Klimabedingungen." *Archives of Agronomy and Soil Science* **40.1** (1996): 1-12.

Walsh, O. S. (2020): Nitrogen and potassium fertilization in no-till hard red spring wheat production. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, **3(1)**, e20018.

Welz, B.; Sperling, M. (1997): Atomabsorptionsspektrometrie. VILEY-VCH.

Wollring, J. (1990): Das optimale N-Angebot im Frühjahr bei unterschiedlicher Keimdichte von Winterweizen. *J. Agronomy & Crop Science* **164**, 137-143 (1990).

Der Lebenslauf wurde aus der elektronischen Version der Arbeit entfernt.

The curriculum vitae was removed from the electronic version of the paper.

## 9. Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich herzlichst bei Professor Dr. Sven Schubert bedanken. Obwohl mein Studium der Pflanzenproduktion an der Justus-Liebig-Universität Gießen bereits sechs Jahre abgeschlossen war, erklärte Professor Dr. Sven Schubert im Frühjahr 2019 sofort seine Bereitschaft zur Übernahme der Betreuung meiner Promotion.

Trotz der räumlichen Entfernung habe ich mich jederzeit rundum gut betreut gefühlt und Professor Dr. Sven Schubert stand mir bei Bedarf jederzeit kurzfristig mit Rat und anregenden Vorschlägen zur Seite.

Einen weiteren Dank möchte ich an Herrn Ströbele aus Liepen aussprechen. Herr Ströbele ließ sich im Jahr 2019 ohne große Mühen davon überzeugen, meinen Parzellenversuch dreijährig wiederholt auf seinem Versuchsstandort anzulegen. Allen Mitarbeitern der Quintus GmbH, die an der Anlage und der Betreuung der Parzellenversuche beteiligt waren, möchte ich ebenfalls danken.

Einen Dank möchte ich auch meinem Arbeitgeber Herrn Jaeger aus Conow aussprechen. Nur dank der zeitlichen Flexibilität meiner Aufgaben in seinen Betrieben war dieses Projekt überhaupt möglich.

Ich bedanke mich ebenfalls bei denjenigen, welche die Arbeit auf Form- und Schreibfehler sowie auf deren Verständlichkeit zur Korrektur gelesen haben.

Mein letzter Dank gebührt meiner lieben Frau, die mir vier Jahre den Freiraum ließ, den die Arbeit in Anspruch nahm.

## 10. Eidesstattliche Erklärung

„Hiermit erkläre ich: Ich habe die vorgelegte Dissertation selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten.“

Gießen, März 2023

Matthias Wolfgang Desaga

---