

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

DOMINIK REEB



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



édition scientifique
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

Das Werk ist in allen seinen Teilen urheberrechtlich geschützt.

Jede Verwertung ist ohne schriftliche Zustimmung des Autors oder des Verlages unzulässig. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in und Verarbeitung durch elektronische Systeme.

1. Auflage 2011

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the Author or the Publishers.

1st Edition 2011

© 2011 by VVB LAUFERSWEILER VERLAG, Giessen
Printed in Germany



édition scientifique
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

STAUFENBERGRING 15, D-35396 GIESSEN
Tel: 0641-5599888 Fax: 0641-5599890
email: redaktion@doktorverlag.de

www.doktorverlag.de

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

Professor Dr. Sven Schubert

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

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

vorgelegt von

Dominik Reeb

im April 2010

Diese Arbeit wurde finanziert von der K+S Kali GmbH



Tag der Disputation: 18. Januar 2011

Bestätigt durch die Prüfungskommission

Vorsitzender: Prof. Dr. Steffen Hoy

1. Gutachter: Prof. Dr. Sven Schubert

2. Gutachter: Prof. Dr. Hans-Georg Frede

Prüfer: Prof. Dr. Diedrich Steffens

Prüfer: Prof. Dr. Günter Leithold

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Kaliumdynamik im Boden	2
1.2	Nährstofftransport zur Wurzeloberfläche	3
1.3	Salinität	5
1.4	Kalium als essentieller Pflanzennährstoff	7
1.5	Zielsetzung	8
2	Material und Methoden	10
2.1	Versuchsgefäße	10
2.1.1	Keramische-Platten-Versuche 2007	10
2.1.2	Containerversuch Ackerbohnen 2008	13
2.1.3	Kaliumsteigerungsversuch Ackerbohnen 2008	16
2.1.4	Versuch zur Verträglichkeit einer K_2SO_4 -Blattapplikation.....	17
2.1.5	Containerversuch Ackerbohnen 2009	17
2.1.6	Containerversuch Sommerweizen 2009.....	19
2.1.7	Mitscherlichgefäßversuch Tomaten 2009.....	21
2.2	Analyseverfahren	22
2.2.1	Ermittlung und Einstellung der Salinität auf 9 dS m^{-1}	22
2.2.2	Wurzellängenmessung	23
2.2.3	Messung der Blattfläche	24
2.2.4	Nacherntebehandlung des Pflanzenmaterials	25
2.2.5	Kationenanalyse mittels Flammen-Atomabsorptions-Spektralfotometrie (Flammen-AAS).....	25
2.2.6	Phosphorbestimmung in pflanzlichem Material mit der Ammoniumvanadat-Molybdat-Methode.....	26
2.2.7	Messung des Wasserpotentials ψ in Blättern mit der Scholander-Bombe	27
2.2.8	Messung des osmotischen Potentials ψ_0	27
2.2.9	Berechnung des Turgors ψ_P in Pflanzenzellen.....	28
2.2.10	Rohproteinanalyse nach Kjeldahl	28
2.3	Inokulation der Ackerbohnsamen	29
2.4	Statistische Auswertung	30

3	Ergebnisse	32
3.1	Keramische Platten	32
3.2	Containerversuch Ackerbohnen 2008	39
3.3	Vorversuche zum Containerversuch 2009	46
3.3.1	Kaliumsteigerungsversuch Ackerbohnen	46
3.3.2	Versuch zur Verträglichkeit einer K ₂ SO ₄ -Blattapplikation.....	49
3.4	Containerversuch Ackerbohnen 2009	51
3.4.1	Vegetatives Wachstum bis zur Blüte	51
3.4.2	Kornertrag und Wassernutzungseffizienz von Ackerbohnen bis zur Reife	62
3.5	Containerversuch Sommerweizen	68
3.5.1	Vegetatives Wachstum	68
3.5.2	Ertrags- und Qualitätsparameter von Sommerweizen	71
3.6	Mitscherlichgefäßversuch mit Tomate 2009	79
4	Diskussion	91
4.1	Unter Trockenstress und Salinität ist eine bessere Versorgung der Pflanzen mit K notwendig	91
4.2	Eine gute K-Versorgung verbessert die WUE	95
4.3	Spezielle Wirkung von K auf die WUE unter Dürrestress bzw. salinen Bodenverhältnissen	96
4.4	K führt zu einem geringeren Wasserverbrauch und / oder zu einer besseren TM-Produktion.....	97
5	Zusammenfassung.....	102
6	Summary	104
7	Literaturverzeichnis	106
8	Danksagung	119
9	Lebenslauf	120
10	Eidesstattliche Versicherung	121

1 Einleitung

Die landwirtschaftliche Nutzfläche sinkt weltweit, und somit wird auch die Anbaufläche pro Kopf immer geringer. Zum einen wird immer mehr Fläche der Produktion entzogen, beispielsweise durch Siedlungsbau (DÖÖS, 2002), zum anderen steigt die Weltbevölkerung stark an. Als eine Prognose für das Jahr 2050 geben WEDER (2003) und MILBURN (2006) die Weltbevölkerung mit neun Milliarden Menschen an. Für die Sicherstellung der Ernährung stehen zwei Strategien zur Verfügung: Flächenausweitung oder Intensivierung des Anbaus (SCHEIDLER, 1999).

Seit dem „Erdgipfel“ 1992 in Rio de Janeiro, der größten Gipfelkonferenz des 20. Jahrhunderts, ist der Begriff „nachhaltige Entwicklung“ eine Idee, die als Ziel immer mehr in den Köpfen der Menschen, Verwaltungen und Betrieben Eingang findet. Die wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklung muss demnach ihren Kurs ändern und mehr Rücksicht auf die Belange der Umwelt nehmen. Ziel ist, die Befriedigung der menschlichen Grundbedürfnisse mit einer qualitativ hochwertigen Umwelt und einer gesunden Wirtschaft für alle Menschen auf der Erde miteinander in Einklang zu bringen. Nachhaltig ist eine Entwicklung dann, so der Brundtland-Report von 1987, „wenn sie den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen.“ (ANONYMUS, 1987).

Im Zuge einer nachhaltigen Bewirtschaftung wird in dieser Arbeit der Pflanzennährstoff Kalium (K) angesprochen. Die Ressourcen von K in Böden weisen eine große Schwankungsbreite auf (s.u.). Auf Hohertragsstandorten in humiden Gebieten sind die Entzüge von K durch die Pflanzen sehr groß und die Nährstoffbilanz fällt oft negativ aus (HOLMQVIST *et al.*, 2003). Wird der negative Saldo nicht durch eine Düngung ausgeglichen, kommt es nach und nach zu einer starken Verarmung von K im Boden (SIMONSSON *et al.*, 2007), und die Gleichgewichtsbeziehung der K-Fractionen wird gestört. Kurzzeitig kann dies durch die K-Nachlieferung aus dem Boden gepuffert werden (ANDERSSON, *et al.*, 2007). Letztlich resultiert der ständige Entzug von K in

einer Zerstörung der Tonminerale und bedeutet somit einen großen Verlust an Bodenfruchtbarkeit (TRIBUTH *et al.*, 1987; ASKEGAARD *et al.*, 2004).

1.1 Kaliumdynamik im Boden

In Böden liegt die Konzentration für K nach SCHILLING (2000) zwischen 0,2 und 3%. Auf den A_p-Horizont von 30 cm eines Ackerbodens bezogen, ergibt das rechnerisch eine Menge von 9.000 bis 140.000 kg K ha⁻¹. Tonreiche Böden haben einen hohen Gehalt an K, während Sandböden eher zu den K-armen Böden gehören. Kalium ist in den primären Silicaten (bspw. Kalifeldspäte und Glimmer) aber auch in den silicatischen Tonmineralen (bspw. Illit und Vermiculit) gebunden. Hieraus entsteht die Quelle für das austauschbar gebundene und das in der Bodenlösung freie K. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die drei K-Fractionen im Boden. Eine pflanzenverfügbare Fraktion ist in Form von gelösten K-Ionen in der Bodenlösung vorhanden. Als zweite Fraktion liegt K in sorptiv, austauschbar gebundener Form an der Oberfläche von negativ geladenen Bodenbestandteilen, meist Tonmineralen und organischer Bodensubstanz, vor. Ebenso wie die zweite Fraktion ist die dritte Fraktion für die Pflanzen nicht direkt verfügbar. Hierbei handelt es sich um K-Ionen, die in den Zwischenschichten von Tonmineralen spezifisch gebunden sind. Diese Fraktion ist in den Tonmineralen fixiert und kann nur aufgrund der Gleichgewichtsbeziehung zur Bodenlösung aus den Zwischenschichten gelöst werden. Damit geht die Zerstörung zunächst durch Aufweitung, später durch Auseinanderfallen der Tonminerale einher (BLUME *et al.*, 2010). Der K-Gehalt nimmt, bedingt durch die Substitution von K durch bspw. Magnesium (Mg) oder andere Kationen, von Feldspäten, über Illite und Vermikulite zu Smektiten ab.

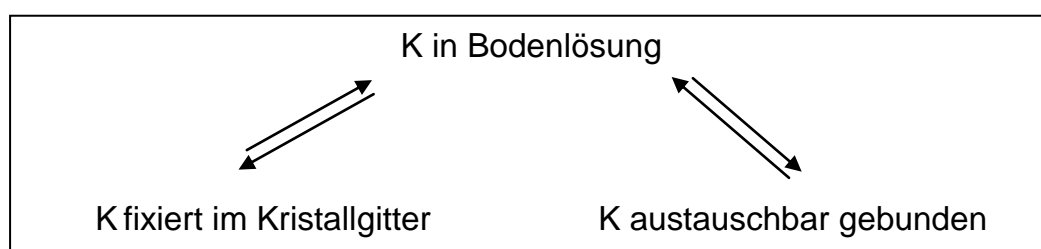


Abbildung 1. Gleichgewichtsbeziehung der K-Fractionen im Boden (verändert nach SCHUBERT (2006a)). K für Pflanzen frei verfügbar in der Bodenlösung, austauschbar gebunden an negativen Bindungsstellen, fixiert im Kristallgitter der Tonminerale

Sobald K durch Pflanzen der Bodenlösung entzogen wird, wird es aufgrund des chemischen Gleichgewichts der drei Fraktionen über einen langen Zeitraum nachgeliefert. Als erstes wird hierbei der austauschbar gebundene Pool aufgebraucht, zuletzt wird das fixierte K aus dem Kristallgitter und den Zwischenschichten der 2:1-Tonminerale herausgelöst. Aufgrund des hohen pedogenen Anteils von K und der Wechselwirkung der drei erwähnten K-Fraktionen im Boden dauert es mitunter viele Jahre, ehe ein K-Mangel bei unterlassener Düngung an Pflanzen sichtbar wird (SCHILLING, 2000). Weiterhin beschreiben SCHILLING (2000) und BLUME *et al.* (2010), dass dann bei einer Wiederaufnahme der K-Düngung zunächst die Gleichgewichtsbeziehung wiederhergestellt wird und der Aufbau von Tonmineralen und damit die Fixierung im Kristallgitter und den Zwischenschichten große Mengen an K verbrauchen.

1.2 Nährstofftransport zur Wurzeloberfläche

Für den Transport von Nährstoffen zur Wurzel stehen prinzipiell drei Möglichkeiten zur Verfügung: Interzeption, Massenfluss und Diffusion. Wachsen Wurzeln gezielt zu den Nährstoffen im Boden hin, so wird dies als Interzeption bezeichnet (SCHUBERT (2006a)). Durch die Interzeption gelangt nach MARSCHNER (1995) nur ein geringer Teil von Nährstoffen zur Wurzel. Für Nitrat und Magnesium ist der Weg des Massenflusses der wichtigste Mechanismus. Dabei werden die im Bodenwasser gelösten Nährstoffe mit dem Wasserstrom zur Wurzel geleitet. Der Hauptmechanismus für die Nährstoffe Kalium und Phosphor ist die Diffusion. Hierbei ist die treibende Kraft der Konzentrationsgradient. Dieser wird zwischen angrenzendem Boden und der Wurzeloberfläche gebildet, wenn die Aufnahme der Nährstoffe größer ist als die Nachlieferung durch den Massenfluss (MARSCHNER 1995). Das Erste Ficksche Diffusionsgesetz beschreibt, dass der Teilchenfluss F entlang dem Konzentrationsgradienten $\delta C / \delta x$ direkt proportional ist. Die Formel für das

Erste Ficksche Diffusionsgesetz lautet:

$$F = -D_e * \frac{\delta C}{\delta x}$$

Der Diffusionskoeffizient D ist eine stoffspezifische Konstante, deren Vorzeichen negativ ist, da der Teilchenfluss in Richtung des kleineren chemischen Potentials verläuft (MUNK, 2000). Der Konzentrationsgradient und damit die Anlieferung von Nährstoffen durch Diffusion wird umso größer, je höher die Ausgangskonzentration ist (GRIMME, 1978).

NYE und TINKER (1977) bezeichnen den Diffusionskoeffizient als effektiven Diffusionskoeffizient (D_e) (zit. nach MARSCHNER, 1995 sowie KUCHENBUCH und JUNGK 1984). In reinem Wasser liegt der Diffusionskoeffizient für verschiedene Nährstoffe nahezu einheitlich bei $1,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Betrachtet man aber einen porösen Boden, so wird der effektive Diffusionskoeffizient für Phosphor und Kalium sehr viel kleiner. Für Phosphor wird ein Diffusionskoeffizient von $10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ angegeben und für Kalium beträgt er $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (MARSCHNER, 1995). In unmittelbarer Nähe der Wurzeloberfläche entsteht somit eine Verarmungszone (MARSCHNER, 1995). In dem wurzelnahen Bereich sind das freie und das austauschbar gebundene K bis weit in den nichtaustauschbaren Anteil ausgeschöpft, während in wurzelfernen Bodenbereichen sogar das austauschbar gebundene K weitgehend ungenutzt bleibt. Diese Beobachtung haben KUCHENBUCH und JUNGK (1984) bei Betrachtung von Einzelwurzeln festgestellt. Im gut durchwurzelten Boden liegen die Verarmungszonen sehr dicht beieinander, teilweise überlappen sie sich sogar stark.

Durch die gestörte Diffusion aufgrund von mangelhaftem Wasserangebot im Boden wird die Aneignung von Kalium und Phosphor gehemmt (SCHUBERT und REEB, 2006). Die Mechanismen des Nährstofftransportes sind auf ausreichende Bodenfeuchtigkeit angewiesen, denn der Weg der Ionen zur Wurzel (x) wird bei Trockenheit länger, da die Ionen nur entlang der Hydrathüllen der Bodenteilchen diffundieren können (SCHUBERT, 2006a). Bei niedrigem Wassergehalt im Boden kann der Kontakt zwischen Bodenlösung und Wurzeloberfläche verloren gehen (vgl. MARSCHNER, 1995), und die Nährstoffaufnahme kann nicht erfolgen. Für die Etablierung einer Modellrechnung haben KUCHENBUCH *et al.* (1986) bewiesen, dass bei abnehmendem Wassergehalt im Boden, „der K-Transport im Boden zur Wurzel stark abnimmt, die K-Konzentration an der Wurzeloberfläche rascher sinkt, und daher zunehmend steilere K-Konzentrationsgradienten in Wurzelnähe entstehen“. Bei gleicher Wurzeldichte nimmt die K-Konzentration im durchwurzelten, feuchten Boden

annähernd gleichmäßig ab. Allerdings wird bei Trockenheit, KUCHENBUCH *et al.* (1986) folgend, in dem Raum zwischen den Wurzeln K fast nicht aufgenommen. Dies stützt die These von KUCHENBUCH und JUNGK (1984), dass im Verarmungsprofil direkt an den Wurzeln das nichtaustauschbare K aufgenommen wird, während es im Zwischenbereich zweier Wurzeln zu keiner Konzentrationsänderung von K kommen kann.

Weiterhin beschreibt MARSCHNER (1995), dass lange Wurzelhaare diesen Kontakt mit der Bodenlösung länger bestehen lassen können als kurze Wurzelhaare. GRIMME (1978) schreibt der vertikalen und horizontalen Verteilung der Wurzeln eine große Bedeutung zu, da ein gut verzweigtes Wurzelnetz zu kurzen Transportwegen führt. Trocknet der Boden weiter aus, so wird der Durchdringungswiderstand des Bodens größer. Dadurch wird das Wurzelwachstum erschwert, das Nährstoffangebot über Diffusion sinkt weiter ab. Es wird aber beobachtet, dass das Wurzelwachstum gerade unter trockenen Bedingungen erhöht ist, dies stellt eine Variante der Kompensation eines Nährstoffmangels dar (MARSCHNER, 1995), denn die Vergrößerung der Wurzeln verringert die Diffusionsstrecke von Nährstoffen in der Bodenlösung.

1.3 Salinität

Von der weltweiten Anbaufläche sind etwa 7% durch Salinität bedroht (SHABALA und CUIN, 2008). Gerade in den ariden und semiariden Gebieten kommt es aufgrund der hohen Evapotranspiration sowie bei unzureichender Versickerung von Regenwasser zu einer Anreicherung von Kationen im Boden (MARSCHNER, 1995; RENGASAMY, 2006). Große betroffene Flächen befinden sich einer Tabelle bei RENGASAMY und OLSSON (1991) folgend in Afrika, Asien und Australien, die Summe beträgt ihrer Auflistung nach knapp $3 \cdot 10^6$ km². Im Bewässerungsfeldbau sind bereits 10 bis 15% der bewirtschafteten Flächen durch Salinität beeinträchtigt (WILD, 2003). Denn neben der Menge spielt auch die Qualität des Bewässerungswassers eine große Rolle bei der Salzanreicherung. Daneben gibt es auch Salzeinträge durch den Aufstieg von salzhaltigem Grundwasser (RENGASAMY und OLSSON 1991; RENGASAMY, 2006). Besonders schädlich für die Bodenstruktur erweist sich dabei eine steigende Akkumulation von Natrium (SO und AYLMOORE, 1993).

Eine Definition von salinen Böden liefert das US Salinity Laboratory (ANONYMUS, 1954) anhand der elektrischen Leitfähigkeit eines wasser-gesättigten Bodenextraktes. Liegt die elektrische Leitfähigkeit über 4 dS m^{-1} , gelten die Böden als versalzt. Dies entspricht einer Konzentration von etwa 40 mM NaCl (MARSCHNER 1995). Meliorative Maßnahmen bei versalzten Böden liefern BETHUNE und BATEY (2002) sowie QADIR *et al.* (2000). Es kann erstens durch eine kontrollierte Bewässerung mit salzarmen Wasser versucht werden, eine Auswaschung bzw. Verlagerung von Salzen in tiefere Bodenschichten bei gleichzeitiger Drainage zu erreichen. Die zweite Variante baut auf hohe Winterniederschläge, die ebenfalls zu einer Auswaschung von Salzen beitragen können. Für den Boden bedeuten vor allem hohe Konzentrationen von Natrium (Na), dass die Bodenstruktur durch die einwertigen Natrium-Ionen (Na^+) verschlechtert wird. Na^+ hat eine große Hydrathülle und damit eine peptisierende Wirkung (SO und AYLMOORE, 1993; SCHUBERT, 2006a). Rheologische Untersuchungen von HOLTHUSEN *et al.* (2009) belegen eindeutig den dispergierenden Effekt von Na^+ auf die Bodenstruktur. Weiterhin wird das Bodenwasserpotential mit steigender elektrischer Leitfähigkeit abgesenkt. Eine Abbildung bei MARSCHNER (1995) zeigt, dass das osmotische Potential im Boden um $-0,036 \text{ MPa pro dS m}^{-1}$ sinkt. Somit müssen sich die Pflanzen ebenfalls osmotisch anpassen, um Wasser aufnehmen zu können (PARIDA und DAS, 2005). Es kommt folglich bei steigender Salinität zu einem salzinduzierten Wasserstress für die Pflanzen. Auf hohe Salzkonzentrationen reagieren Pflanzen zunächst mit einer starken Wachstumsreduktion infolge osmotischen Stresses in der Rhizosphäre (MUNNS, 1993; MUNNS, 2002). MUNNS (1993) bezeichnet dies als Phase 1. In Phase 2 dieses Modells wird das Wachstum weiter gestört, da die Pflanzen aufgrund von Na^+ -toxischen Reaktionen Nekrosen aufweisen. Eine hohe Aufnahme von Na^+ durch Pflanzen sorgt aufgrund des Ionenantagonismus für einen induzierten Nährstoffmangel von K, Ca und Mg (KHAN *et al.*, 2000; PARIDA und DAS, 2005).

1.4 Kalium als essentieller Pflanzennährstoff

Kalium (K) gilt für Pflanzen als essentieller Nährstoff (MARSCHNER, 1995; SCHUBERT, 2006a; MENGEL, 2007). In Pflanzen erfüllt K vor allem drei wesentliche Funktionen. Als erstes ist die Funktion als Aktivator von Enzymen in der Proteinbiosynthese zu nennen. Bei einem Mangel von K wird nach MENGEL (2007) die Funktion von Chloroplasten und Mitochondrien beeinträchtigt, was einen immensen Einschnitt in die Energieversorgung der Zelle bedeutet. Als zweites trägt K durch seine gute Beweglichkeit innerhalb der Zelle und Pflanze zum elektrostatischen Ausgleich bei. Nicht zuletzt besitzt K eine osmotische Funktion und hat so einen direkten Einfluss auf das Wachstum und den Wasserhaushalt der Pflanzen. Hohe Konzentrationen von K in den Vakuolen dienen zum einen als Speicher, zum anderen aber auch über den osmotischen Effekt zum Aufbau des Turgors in der Zelle (MENGEL, 2007). Die Regulation der Stomata ist auf eine ausreichende K-Versorgung angewiesen. Durch eine Mangelversorgung mit K sinkt die Wassernutzungseffizienz (water use efficiency, WUE) und unproduktive Wasserverluste, vor allem über die Stomata, treten auf.

Wachsen Pflanzen ohne Kalium auf, und ist ihr samenbürtiger Vorrat aufgebraucht, treten sehr schnell Mangelsymptome auf. Zunächst sind unspezifische Wachstumsreduzierungen festzustellen (MARSCHNER, 1995). Dann jedoch treten sehr schnell chlorotische und nekrotische Symptome, vorwiegend an älteren Blättern, von der Blattspitze beginnend bis zur völligen Zerstörung auf (MENGEL, 2007). Dass die Mangelsymptome zunächst an alten Blättern auftreten, zeigt, dass K gut im Phloem verlagerbar ist. Sind die K-Konzentration im Boden und die Aufnahme in die Pflanzen ausreichend hoch, so wird die Trockenstressresistenz von Pflanzen gesteigert (HU und SCHMIDHALTER, 2005). Dies erfolgt durch eine verbesserte Regulation der Stomata, einer Anreicherung von K als Osmotikum, einer Erhöhung des Energiestatus der Zelle sowie einer Verbesserung des Ladungsausgleiches.

1.5 Zielsetzung

Im Rahmen dieser Untersuchung soll auf den Einfluss der Kaliumdüngung auf die Aufnahme von K in der Pflanze sowie auf das Wachstum und auf die Wassernutzungseffizienz eingegangen werden. Als Versuchspflanzen wurden drei unterschiedliche Pflanzengattungen verwendet. Zunächst ist die Ackerbohne (*Vicia faba* L.) zu nennen; sie zeichnet sich als eine Pflanze aus, die hohe Ansprüche (LÜTKE ENTRUP, 1986) an eine gleichmäßige und gute Wasserversorgung hat. Besonders in der Blühphase wird viel Kalium gebraucht. Gleichzeitig besitzt sie ein schlechtes Wurzelsystem. Die geringe Ausbildung eines verzweigten Faserwurzelsystems führt bei Trockenheit sehr schnell zu Welkesymptomen und zu stark reduziertem Wachstum. Unter Trockenstress ist u.a. die Anlieferung von K an die Wurzel über Diffusion gestört. Es wird in den Experimenten versucht, durch eine hohe K-Konzentration im Boden, die Aufnahme zu erhöhen. Die Ackerbohne ist eine glycophile Pflanze, zu hohe Konzentrationen von Na zeigen sich schnell in Punktnekrosen an den Blättern. Es wird ebenfalls versucht, durch eine hohe K-Konzentration im Boden aufgrund des Ionenantagonismus zwischen K und Na, die Konzentration von Na in der Pflanze zu verringern. Nach MAKOWSKI (2000) gedeiht die Ackerbohne „am besten auf kalk- und humusreichen Lehm- und Tonböden in niederschlagsreichen und luftfeuchten Lagen“.

Die zweite Versuchspflanze ist der Sommerweizen (*Triticum aestivum* L.). Als monokotyle Pflanze hat Weizen ein gutes und feines Wurzelsystem, das im Boden eine sehr große Oberfläche zur Wasser- und Nährstoffaufnahme aufweist. Weizen stellt an den Boden hohe Ansprüche, besonders die Wasserversorgung in der Phase zwischen Schossen und Blüte ist ausschlaggebend für die Ertragsbildung. Der Ertrag ist abhängig von der Bestandesdichte, der Kornanzahl je Ähre und dem Tausendkorngewicht (TKG). Höchste Bestandesdichten werden zum Schossbeginn erreicht. Danach wird die Anzahl der Triebe aufgrund intraspezifischer Konkurrenz um Wasser, Nährstoffe und Licht wieder reduziert. Diese Reduktion ist umso stärker, je knapper das Wasser- und Nährstoffangebot in dieser Entwicklungsphase ist. Weiter beschreiben HAUMANN und DIETZSCH (2000), dass ein Hitzestress mit Temperaturen über 28°C zur physiologischen Austrocknung der Weizen-

pflanzen führt, was schlecht ausgebildete und geschrumpfte Körner mit entsprechenden Mindererträgen zur Folge hat.

Die dritte verwendete Pflanzenart in dieser Forschungsarbeit ist die Tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Sie zeichnet sich als Starkzehrer durch einen sehr hohen Nährstoffbedarf in Bezug auf die Makronährstoffe N, P, K, Ca und Mg aus (RATHER, 2007). Des Weiteren benötigt auch sie eine gute Wasserversorgung.

Im Rahmen dieses Promotionsvorhabens wird der Einfluss von K auf das Wachstum von den oben genannten Pflanzen bei Dürre- und Salzstress in verschiedenen Wachstumsphasen untersucht. Besonders im Bezug auf hohe Konzentrationen von Na im salinen Substrat, den damit verbundenen negativen Auswirkungen auf die Wasserversorgung und die Konkurrenz in der Aufnahme von K kann eine hohe K-Düngung positiv wirken. K tritt dann vor allem als Antagonist zu Na auf. Durch eine gute K-Versorgung der Pflanzen konnten EAKES *et al.* (1991) zeigen, dass die Dürresistenz, die Wassernutzungseffizienz (WUE) und das Pflanzenwachstum allgemein bei *Salvia splendis* L. verbessert werden

konnten. K verbessert die WUE von Pflanzen und führt so auch unter Trocken- bzw. Salzstressbedingungen zu höheren Erträgen. Es wird untersucht, ob durch eine Kaliumdüngung die WUE durch mehr Trockenmassenbildung (TM) verbessert werden kann. Ein anderer Aspekt, der zu einer Verbesserung der WUE beiträgt, könnte ein geringerer Wasserverbrauch sein, der ebenfalls überprüft wird.

In diesem Zusammenhang werden folgende Hypothesen überprüft:

1. Unter Trockenstress und Salinität ist eine bessere Versorgung der Pflanzen mit K notwendig, damit der Stress reduziert werden kann.
2. Eine gute K-Versorgung verbessert die WUE.
3. K verbessert speziell unter Dürrestress bzw. salinen Bodenverhältnissen die WUE
4. K führt zu einem geringeren Wasserverbrauch und/oder zu einer besseren TM-Produktion.

2 Material und Methoden

Im Rahmen dieses Promotionsvorhabens wurden verschiedene Versuche mit wechselnder Versuchstechnik und verschiedenen Versuchspflanzen durchgeführt. Ein kurzer Überblick über die Versuche ist in Tabelle 1 zusammengefasst dargestellt. Die jeweilige Versuchstechnik wird in den folgenden Kapiteln umfassend erläutert.

Tabelle 1. Zeitlicher Ablauf der Versuche in Abhängigkeit der Versuchstechnik

Jahr	Versuchstechnik	Versuchspflanze	Versuchszeitraum
2007	Kunststoffgefäße und keramische Platten	Ackerbohne	vegetative Phase
2008	Container	Ackerbohne	bis Abreife
2008	Mitscherlichgefäße	Ackerbohne	Kaliumsteigerung
2009	Pflanzgefäße	Ackerbohne	K flüssig Applikation
2009	Container	Ackerbohne	vegetative Phase
2009	Container	Ackerbohne	bis Abreife
2009	Container	Sommerweizen	bis Abreife
2009	Mitscherlichgefäße	Tomaten	vegetative Phase

2.1 Versuchsgefäße

2.1.1 Keramische-Platten-Versuche 2007

Als Versuchspflanzen wurden Ackerbohnen *Vicia faba* L. cv. Fuego der Firma NPZ (Norddeutsche Pflanzenzucht Hans-Georg Lembke KG) verwendet. An dieser Stelle wird die Vorbehandlung des Saatgutes für die folgenden Versuche mit Ackerbohnen beschrieben. Zunächst wurde die Oberfläche der Samen vor dem Vorquellen zusätzlich sterilisiert. Dies erfolgte mittels Eintauchen für 30 s in eine 70%-Ethanollösung (C₂H₆O) und anschließendem fünfminütigem Untertauchen in 5%-Natriumhypochloridlösung (NaOCl). Danach wurden die Samen mit destilliertem Wasser abgespült und für 14 h in einer belüfteten 1 mM Calcium-Sulfatlösung (CaSO₄) vorgequollen. Eine Inokulation mit Rhizobienbakterien (Kapitel 2.3) erfolgte bei dieser Versuchstechnik nicht.

Die Aussaat von je drei Ackerbohnsensamen erfolgte direkt in die Versuchsgefäße, die Samen wurden in einer Tiefe von 8 cm ausgelegt und mit Boden bedeckt. Dies entspricht der üblichen Aussaattiefe in der landwirtschaftlichen Praxis. Nachdem die Pflanzen aufgelaufen waren, wurden sie auf eine Pflanze je Gefäß reduziert.

Als Versuchsgefäße wurden Röhren aus Kunststoff verwendet; die Höhe betrug 30 cm und der Durchmesser 20 cm (Abbildung 2). Die Bewässerung des Bodens in den Gefäßen erfolgte über keramische Platten (0,1 MPa keramische Platte, UMS München), die wiederum durch eine Zuleitung aus den unter ihnen stehenden Vorratsgefäßen versorgt wurden. Bevor die keramischen Platten zur Bewässerung verwendet werden konnten, mussten sie für 2 d unter Wasser getaucht werden, damit die Luft aus den Platten verdrängt werden konnte. Da die Zylinder nicht die gesamte Platte abdeckten und eine Evaporation über die Platten verhindert werden sollte, wurde die restliche Oberfläche der keramischen Platten mit Aluminiumfolie abgedeckt (Abbildung 3).

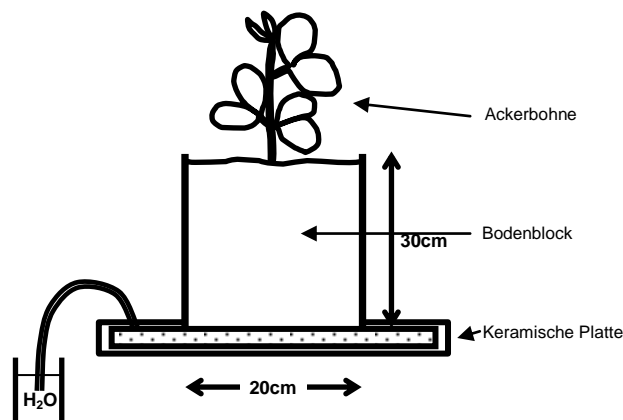


Abbildung 2. Schematische Darstellung der Versuchstechnik. Der Abstand zwischen der keramischen Platte und dem Wassergefäß ist nicht maßstabsgetreu wiedergegeben.



Abbildung 3. Versuchsaufbau mit acht Gefäßen in einer Klimakammer. Die Wasservorratsflaschen standen unter dem Tisch und waren über eine Zuleitung mit den keramischen Platten verbunden.

Die Versuchsgefäße wurden mit 11 kg eines nährstoffarmen Unterbodens aus Kleinlinden 2005 (Tabelle 2) befüllt, mit den Düngersalzen (Tabelle 3) gründlich vermischt und auf 30% der maximalen Wasserkapazität aufgegossen. Das restliche Wasser musste durch kapillaren Aufstieg über die keramische Platte in den Boden und zu den Pflanzen gelangen. Der lufttrockene Boden wurde zuvor in drei Fraktionen gesiebt und zu gleichen Teilen in die Gefäße gefüllt. Die erste Fraktion umfasst den Körnungsbereich bis 1 mm, die zweite bis 2,5 mm und die dritte bis 5 mm.

Tabelle 2. Charakterisierung des Versuchsbodens Kleinlinden 2005

pH-Wert (0,01 M CaCl ₂)	6,0
CAL-P	11,3 mg (kg Boden) ⁻¹
CAL-K	79,5 mg (kg Boden) ⁻¹
Sand	33%
Schluff	47%
Ton	20%

Die Pflanzen wuchsen in einer Klimakammer im Biotechnikum des Interdisziplinären Forschungszentrums für biowissenschaftliche Grundlagen der Umweltsicherung Gießen (IFZ) mit 16 h Beleuchtung bei 20°C und 8 h Dunkelheit bei 16°C. Die relative Luftfeuchtigkeit betrug 80%.

Es wurden zwei Varianten in achtfacher Wiederholung angezogen. Zunächst eine Kontrollvariante, die zusätzlich zu den Nährstoffen (Tabelle 3) weitere

150 mg K (kg Boden)⁻¹ als KCl enthielt, in der zweiten Variante wurde K äquimolar durch Na als NaCl (88 mg (kg Boden)⁻¹) substituiert.

Tabelle 3. Nährstoffe, die jeweilige Menge in mg (kg Boden)⁻¹ sowie ihre Darreichungsform

Nährstoffe	mg (kg Boden ⁻¹)	Form
N	260	NH ₄ NO ₃
P	260	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ x H ₂ O
Mg	43	MgSO ₄ x 7 H ₂ O
Cu	0,3	CuSO ₄ x 5 H ₂ O
Zn	1,9	ZnSO ₄ x 7 H ₂ O

Bei diesen Versuchen wurden der Wasserverbrauch, ebenso wie die Frisch- und Trockenmassen (Kapitel 2.2.3) des Aufwuchses ermittelt. Die Ernte der Pflanzen erfolgte 42 d nach der Aussaat. Aufgrund der kleinen Bodenmenge war es möglich, auch die Wurzeln zu erfassen und neben der Kationenkonzentration (Kapitel 2.2.5) auch die Wurzellänge und -feinheit zu messen (Kapitel 0).

2.1.2 Containerversuch Ackerbohnen 2008

Als Versuchsgefäße für die Containerversuche wurden Großgefäße aus Kunststoff (GMT Standardbehälter 120 L, Fa. SSI Schäfer, Neunkirchen) mit einer Oberfläche von 0,16 m², einer Höhe von 0,9 m und einem Volumen von 120 L verwendet. Die Container standen in der Vegetationshalle der Gefäßversuchsstation des Institutes für Pflanzenernährung am Launsbacher Weg in Gießen. Der Vorteil der Container besteht in einem großen Bodenvolumen mit einer effektiven Durchwurzelungstiefe von 0,9 m (REEB, 2006; SCHUBERT, 2006b; SCHUBERT und REEB, 2006). Die Container wurden mit einem Boden-Sandgemisch (50% Kleinlinden 2007 und 50% Quarzsand [Dorsilit 7 FG 0,6-1,2 mm, Fa. Dorfner, Hirschau]) schichtweise befüllt. Mithilfe einer Wiegeeinrichtung war eine exakte Erfassung des Wasserverbrauchs während des Versuchszeitraumes möglich (REEB, 2006). Der Boden Kleinlinden 2007 (Tabelle 4) zeichnet sich als ein sehr nährstoffarmer und stark kaliumfixierender Unterboden aus. So lagen die Konzentrationen für das pflanzenverfügbare Kalium bei 47,3 mg K (kg Boden)⁻¹ und für den pflanzenverfügbaren Phosphor bei

7,1 mg P (kg Boden)⁻¹ (nach CAL-Methode). Ordnet man diese beiden Werte in die Gehaltssklassen des VDLUFA (KERSCHBERGER, 1997) ein, so liegen beide Pflanzennährstoffe in der Klasse A (starker Mangel). Darüber hinaus ist die trockene Kaliumfixierungskapazität mit 488 mg K (kg Boden)⁻¹ ebenfalls recht hoch (WAKEEL, 2008; WAKEEL *et al.*, 2010). Der niedrige pH-Wert des Bodens von pH = 5,1 und der Anspruch der Ackerbohne an die Bodenreaktion erforderten eine Kalkung mit 0,5 g CaCO₃ (kg Boden)⁻¹.

Tabelle 4. Charakterisierung des Versuchsbodens Kleinlinden 2007

pH-Wert (0,01 M CaCl ₂)	5,1
Mg	319,2 mg (kg Boden) ⁻¹
CAL-P	7,1 mg (kg Boden) ⁻¹
CAL-K	47,3 mg (kg Boden) ⁻¹
C _t	0,20%
N _t	0,04%
S _t	0,04%
Sand	28%
Schluff	47%
Ton	25%

Nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (ECKELMANN, 2005), wird der Boden Kleinlinden 2007 als Ls2 (schwachsandiger Lehm) eingeteilt. Da in den Versuchen aber zur Hälfte Quarzsand beigemischt wurde, liegt das Substrat, wie es nachfolgend bezeichnet wird, an der Grenze zwischen Ls3 (mittelsandiger Lehm) und SI4 (stark lehmiger Sand).

In allen Containern wurde Kalk (CaCO₃) in das komplette Profil eingearbeitet, in den salinen Varianten außerdem NaCl. Eine Verdünnung des Bodens mit Quarzsand war erforderlich, um eine weitere Verknappung mit Kalium zu erreichen, damit durch eine gezielte zusätzliche Düngung kontrollierte Bedingungen gerade im Hinblick auf den Nährstoff Kalium erzielt werden konnten. Die Düngung erfolgte nur in den oberen 30 cm, da dies dem A_p-Horizont eines Ackerbodens entspricht.

Die maximale Wasserkapazität wurde für diesen Versuch aus Experimenten mit Mitscherlichgefäßen hochgerechnet. Die Wassermenge in den Containern ist in Tabelle 5 gezeigt.

Tabelle 5. Anteil der WK_{max} , die im Container enthaltene Menge an Wasser sowie das Gesamtgewicht des Containers

WK_{max}	L Wasser	kg Container
100%	32,8	184,3
60%	19,7	171,2
40%	9,6	161,3
0%	0,0	151,5

Bei dem Containerversuch 2008 wurden sechs Varianten mit jeweils vier Wiederholungen hergestellt. Jeweils eine K-Mangel-Variante (-K mit 50 kg K ha^{-1} als KCl) und eine K-Volldüngung (+K mit 50 kg K ha^{-1} als KCl und zusätzlich 200 kg K ha^{-1} als K_2SO_4) wurden entweder als Kontrollvarianten auf 60% bzw. als Trockenstressvariante auf 30% WK_{max} gehalten. Außerdem wurden zwei Salinitätsvarianten (-K, +K) mit einer elektrischen Leitfähigkeit (EC) von 9 dS m^{-1} (in Form von NaCl) und 60% der maximalen Wasserkapazität hergestellt. Stickstoff wurde in Form von NH_4NO_3 mit 40 kg N ha^{-1} sehr restriktiv gedüngt, da die Ackerbohnen durch die Symbiose mit den Rhizobien in der Lage sind, Stickstoff aus der Luft zu fixieren. Die Düngung der restlichen Nährstoffe ist in Tabelle 6 beschrieben. Ziel war es, die Pflanzen optimal mit diesen Nährstoffen zu ernähren, großer Wert wurde auch auf die Versorgung mit den Mikronährstoffen Kupfer, Zink, Mangan und Bor gelegt.

Tabelle 6. Nährstoffe, die jeweilige Menge in kg ha^{-1} und $\text{mg (kg Substrat)}^{-1}$ sowie ihre Darreichungsform

Nährstoffe	kg ha^{-1}	$\text{mg (kg Substrat)}^{-1}$	Form
N	40	10,7	NH_4NO_3
P	100	26,7	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \times \text{H}_2\text{O}$
Mg	30	8,0	$\text{MgSO}_4 \times 7 \text{ H}_2\text{O}$
Cu	10	2,7	$\text{CuSO}_4 \times 5 \text{ H}_2\text{O}$
Zn	20	5,3	$\text{ZnSO}_4 \times 7 \text{ H}_2\text{O}$
Mn	9,4	2,5	$\text{MnSO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$
B	1,9	0,5	H_3BO_3

Der Zeitraum für die Voranzucht der Pflanzen betrug 21 d, danach wurden zunächst zwölf Pflanzen pro Container eingesetzt, und nach weiteren 7 d wurde die Bestandesdichte auf zehn Pflanzen je Container reduziert. Das

Vorziehen der Pflanzen war notwendig, damit die empfindliche Keimphase nicht durch die hohe NaCl-Konzentration in den salinen Varianten gestört wurde. MUNNS (2002) beschreibt, dass es bei fehlender oder zu schneller Adaptation an hohe NaCl-Konzentrationen zur Plasmolyse der Wurzelzellen kommt, die direkten Kontakt zu NaCl haben. Zu Beginn der Blüte wurden bei einer Zwischenernte für die Analytik der Kationen weitere zwei Pflanzen je Container herausgenommen; damit war die für die Praxis empfohlene Bestandesdichte von 64 Pflanzen je m² erreicht.

2.1.3 Kaliumsteigerungsversuch Ackerbohnen 2008

Um die optimale Menge für eine Düngung von Kalium bei dem Substrat (Kleinelinden 2007 + Quarzsand) herauszufinden, wurde in den Herbst- und Wintermonaten des Jahres 2008 ein Kaliumsteigerungsversuch in kleinen Mitscherlichgefäßen hoher Ausführung ($h_{\text{eff}} = 25 \text{ cm}$, $\varnothing = 20 \text{ cm}$) in einer Klimakammer auf der Gefäßversuchsstation Launsbacher Weg durchgeführt. Die Wachstumsbedingungen waren mit 16 h Beleuchtung bei 20°C und 8 h Dunkelphase bei 16°C festgelegt. Es wurden fünf Varianten unter nichtsalinen und fünf Varianten unter salinen Bedingungen (EC: 9 dS m⁻¹) erstellt. Die Kaliumsteigerung ging von jeweils einer K0-Variante (0 kg K ha⁻¹), über 150 kg K ha⁻¹, 200 kg K ha⁻¹, 400 kg K ha⁻¹ und in der höchsten Stufe 500 kg K ha⁻¹ (K500). Jede Variante wurde in einer vierfachen Wiederholung angebaut. Die Düngung der restlichen Nährstoffe erfolgte unter Berücksichtigung der kleineren Oberfläche analog zum Containerversuch (Tabelle 6). Jedes Mitscherlichgefäß wurde mit 5,25 kg Boden (Kleinelinden 2007) und 5,25 kg Quarzsand befüllt. Die Ackerbohnen wurden, wie bereits in Kapitel 2.1.1 beschrieben, vor der Aussaat sterilisiert und vorgequollen. Nachdem sie in den Anzuchtplatten aufgelaufen und mit Rhizobien (Kapitel 2.3) geimpft waren, wurden vier Pflanzen in jedes Mitscherlichgefäß gepflanzt. Nach einer Woche wurde die Bestandesdichte auf drei Pflanzen reduziert. Zum Zeitpunkt der Blüte wurde eine Pflanze für die Nährstoffanalyse geerntet. Die verbliebenen zwei wurden weiterkultiviert und zu Beginn der Abreife geerntet, damit Wachstums- und Ernteparameter (Bestockungstriebe, Körner und Hülsen pro Pflanze, TKG, Trockenmasse von Blättern, Stängel, Hülsen und

Bohnen) erfasst werden konnten. Während der Wachstumsperiode wurde der Wasserverbrauch kontinuierlich auf 60% WK_{max} gehalten, der Verbrauch wurde notiert, und die 40 Gefäße wurden ständig randomisiert.

2.1.4 Versuch zur Verträglichkeit einer K_2SO_4 -Blattapplikation

Dieser Versuch wurde durchgeführt, um die Verträglichkeit einer flüssigen K_2SO_4 -Applikation auf die Blätter der Ackerbohnen im Vorfeld des Containerversuches 2009 zu ermitteln. In dreifacher Wiederholung wurden je drei Ackerbohnen in kleinen Pflanzgefäßen kultiviert. Das Substrat war eine Mischung aus dem Unterboden Kleinlinden 2007, Torfkultursubstrat 2 (Floragard TKS 2 Instant, Oldenburg) und Quarzsand. Die Düngung erfolgte mit allen Nährstoffen im Optimum. Sobald die Ackerbohnenpflanzen sich einen Monat nach Aussaat ausreichend entwickelt hatten, wurden je m^2 100 mL der K_2SO_4 -Lösung auf den Blattapparat gesprüht. Die K_2SO_4 -Lösungen hatten vier unterschiedliche Konzentrationen. Als Kontrollvariante wurde entionisiertes Wasser gesprüht, dann erfolgte eine Steigerung von 2,5%- über 5%- zu einer 10%- K_2SO_4 -Lösung. Die Pflanzen wuchsen in einer Klimakammer mit 16-h-Licht- und einer 8-h-Dunkelphase, bei Licht wurde eine Temperatur von 23°C und in Dunkelheit eine Temperatur von 18°C eingestellt. Die Pflanzen wurden einen Monat nach der flüssigen Applikation geerntet, in alte und junge Blätter separiert und gewogen. Um eine eventuelle Kontamination mit K auf den gespritzten Blättern und damit falsche Ergebnisse in der weiteren Analyse zu verhindern, wurden alle Pflanzenteile mit entionisiertem Wasser gespült.

2.1.5 Containerversuch Ackerbohnen 2009

Damit die richtige maximale Wasserkapazität (WK_{max}) des Substrates bestimmt werden konnte, wurde dieses luftgetrocknet, zusammengemischt und in einen Container gefüllt. Anschließend wurde der Container unter Wasser getaucht. Das Wasser konnte nur durch Löcher am Boden in ihn eindringen. Der Außenwasserstand war höher, als die Füllgrenze mit dem Substrat, aber

niedriger als der Rand des Containers. Sobald das Wasser durch das Substrat gestiegen und dieses folglich mit Wasser übersättigt war, wurde der Container aus dem Tauchbehälter herausgenommen. Das überschüssige Wasser tropfte aus dem Container bis zur Gewichtskonstanz ab. Aus der Gewichtsänderung aus luftgetrocknetem und dem vom Substrat gehaltenen Wasser sowie dem Substratgewicht wurde die Wassermenge für die maximale Wasserhaltekapazität bestimmt (WK_{max}). Bei den Containerversuchen mit dem Substratgemisch Kleinlinden 2007 und Quarzsand entsprechen 0,1533 L Wasser pro kg Substrat 100% WK_{max} . Tabelle 7 zeigt die Wassermenge und das Gesamtgewicht der Container bei den jeweiligen Anteilen der WK_{max} . Bei dem Containerversuch 2008 war die Wassermenge ausgehend von Mitscherlichgefäßen hochgerechnet und mit 100% = 0,2167 L Wasser pro kg Substrat überschätzt worden.

Tabelle 7. Anteil der WK_{max} , die im Container enthaltene Menge an Wasser sowie das Gesamtgewicht des Containers

WK_{max}	L Wasser	kg Container
100%	25,8	203,8
60%	15,5	193,5
40%	10,3	188,3
0%	0,0	178,0

Der zweite Containerversuch startete im zeitigen Frühjahr 2009. Die Vorbereitungen der Versuchsgefäße erfolgten analog zu dem Containerversuch 2008 (Kapitel 2.1.2). Ebenso wurden die Ackerbohnen zunächst in Anzuchtplatten vorgezogen. Die Düngung ist in Tabelle 6 beschrieben. Eine Ausnahme bildete die Stickstoffdüngung, da die Vermehrung der Rhizobien nicht funktionierte. So wurden, nachdem die Ackerbohnen in die Container umgesetzt worden waren, nochmals 240 kg N ha^{-1} in Form von NH_4NO_3 nachgedüngt. Folgende neun Varianten wurden erstellt und in achtfacher Wiederholung angebaut (vier für die vegetative Wachstumsphase und vier für die komplette Wachstumsphase). Je eine K-Mangel-Variante ($-K$ mit 50 kg K ha^{-1} als K_2SO_4) und eine K-Volldüngung ($+K$ mit 400 kg K ha^{-1} als K_2SO_4) sowie eine K-Volldüngung mit zusätzlicher Flüssigapplikation von K ($+K+\text{flüssig}$ mit 400 kg K ha^{-1} als K_2SO_4 und 40 kg K ha^{-1} als 5%ige K_2SO_4 -Lösung in BBCH

15 (WEBER und BLEIHOLDER, 1990)) wurden entweder als Kontrollvariante auf 60% WK_{max} bzw. als Trockenstressvariante auf 40% WK_{max} gehalten. Außerdem wurden die drei Kaliumvarianten unter salinen Bedingungen (EC 9 dS m^{-1} mit NaCl im gesamten Bodenprofil eingestellt) und 60% WK_{max} angezogen.

Nachdem die Pflanzen gut aufgelaufen waren, wurden jeweils zehn Pflanzen in einen Container umgepflanzt. Der Trockenstress wurde 21 d nach dem Umpflanzen, sobald die Pflanzen in den Containern angewachsen waren, begonnen. Zu Beginn der Hauptblüte der Ackerbohnen wurden alle Pflanzen von vier Wiederholungen jeder Variante geerntet. Von den Pflanzen wurden von den jüngsten, vollentwickelten Blättern mit der Scholander-Bombe das Wasserpotential sowie nachfolgend mit dem Mikro-Osmometer das osmotische Potential bestimmt, um letztlich den Turgor zu berechnen (Kapitel 2.2.7, 2.2.8 sowie 2.2.9). Des Weiteren wurden die Blattfläche und die Frischmasse der oberen und unteren Blätter sowie der Stängel erfasst. Das Pflanzenmaterial wurde bei 80°C im Trockenschrank getrocknet und bei Erreichen der Gewichtskonstanz die Trockenmasse gewogen. Da besonders die unteren Blätter der Flüssigdüngungsvariante noch mit K verunreinigt waren, wurden alle Pflanzenteile vor dem Trocknen mit entionisiertem Wasser abgespült, damit keine Artefakte bei der Kationenanalyse auftraten. Die Pflanzen der verbliebenen vier Wiederholungen wurden bis zur Totreife weiter kultiviert. Während der gesamten Vegetationsperiode wurde der Anteil der WK_{max} kontinuierlich durch Wiegen und Nachgießen konstant gehalten. Der Wasserverbrauch wurde für spätere Berechnungen exakt erfasst und die Container ständig randomisiert. Sobald die Hülsen reif waren, wurden die Pflanzen geerntet. Als Ernteparameter wurden die Stängel, Hülsen und Ackerbohnen je Container gezählt sowie die Länge der Stängel gemessen.

2.1.6 Containerversuch Sommerweizen 2009

Ein weiterer Containerversuch wurde mit Sommerweizen (*Triticum aestivum* L. cv. Thasos von der Saaten Union, Isernhagen) auf der Gefäßversuchsstation Launsbacher Weg in Gießen im Sommerhalbjahr 2009 durchgeführt. Die Aufteilung der Varianten sah wie im Folgenden beschrieben aus. Zunächst gab

es eine Kaliummangelvariante –K, die mit 50 kg K ha^{-1} in Form von K_2SO_4 sehr knapp versorgt war. Im Vergleich dazu gab es eine gut mit Kalium versorgte Variante (+K) mit 400 kg K ha^{-1} (je 200 kg K ha^{-1} als KCl und K_2SO_4). Die beiden Varianten wurden unter optimaler Wasserversorgung ($60\% \text{ WK}_{\text{max}}$) und unter Dürrestress ($30\% \text{ WK}_{\text{max}}$), ab dem Stadium BBCH 31 (WEBER und BLEIHOLDER, 1990) in vierfacher Wiederholung kultiviert. Die Aussaatstärke betrug $575 \text{ Körner m}^{-2}$, hierfür wurden die Weizenkörner in vier Reihen je Container à 23 Körner je Reihe ausgelegt, mit Erde bedeckt und angedrückt. Nachdem die Pflanzen aufgelaufen waren, wurden sie auf $450 \text{ Pflanzen m}^{-2}$ vereinzelt. Zu den Wachstumsstadien BBCH 33, 57, 65 und 71 wurden insgesamt zehn Pflanzen pro Container für Zwischenernten zur Bestimmung der Chlorophyllkonzentration und der Kationenanalyse herausgenommen. Folglich standen bis zur Abreife noch $387 \text{ Pflanzen m}^{-2}$ bzw. 62 in jedem Container. Die allgemeine Nährstoffversorgung ist in Tabelle 8 zu sehen. Die N-Düngung wurde in drei Gaben aufgeteilt, N1 wurde zu Versuchsbeginn in die oberen 30 cm des Substrates gemischt, N2 erfolgte zur Bestockung und N3 wurde zum Ährenschieben verabreicht. Die beiden letzten N-Gaben (N2 und N3) wurden flüssig auf den Boden appliziert.

Tabelle 8. Nährstoffe, die jeweilige Menge in kg ha^{-1} bzw. $\text{mg (kg Substrat)}^{-1}$ sowie ihre Darreichungsform

	kg ha^{-1}	$\text{mg (kg Substrat)}^{-1}$	Form
N1	187,5	50,0	NH_4NO_3
N2	62,5	16,7	NH_4NO_3
N3	60	16,0	NH_4NO_3
P	100	26,7	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \times \text{H}_2\text{O}$
Mg	30	8,0	$\text{MgSO}_4 \times 7 \text{ H}_2\text{O}$
Ca	375	100,1	CaCO_3
Zn	20	5,3	$\text{ZnSO}_4 \times 7 \text{ H}_2\text{O}$
Cu	10	2,7	$\text{CuSO}_4 \times 5 \text{ H}_2\text{O}$
Mn	10	2,7	$\text{MnSO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$

2.1.7 Mitscherlichgefäßversuch Tomaten 2009

In kleinen Mitscherlichgefäßen ($h_{\text{eff}} = 15 \text{ cm}$, $\varnothing = 20 \text{ cm}$) wurden 6 kg Boden (Kleinlinden 2009 Tabelle 9) mit den Düngersalzen (Tabelle 10) vermischt und auf 50% WK_{max} aufgegossen. Es gab drei Kalium-Varianten, die in vierfacher Wiederholung unter optimal feuchten Bedingungen (60% WK_{max}) und unter Trockenstressbedingungen (35% WK_{max}) in einer Klimakammer kultiviert wurden. Die Bedingungen in der Kammer betragen bei 16 h Beleuchtung 20°C und 8 h Dunkelheit bei 16°C. Die drei Kaliumvarianten gliederten sich in eine – K-Variante ($0 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$), in eine gut mit Kalium versorgte +K-Variante ($450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$ als K_2SO_4) sowie in eine über den Boden gut mit Kalium versorgte Variante mit zusätzlicher Kaliumflüssigapplikation auf die Blätter. Diese Variante wurde als +K+flüssig bezeichnet und entsprach folgenden K-Mengen $450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$ als K_2SO_4 und $8,3 \text{ mg K Gefäß}^{-1}$ als 5%ige K_2SO_4 -Lösung auf die Blätter der Tomatenpflanzen.

Tabelle 9. Charakterisierung des Versuchsbodens Kleinlinden 2009

pH-Wert (0,01 M CaCl_2)	7,3
CAL-P	$5,5 \text{ mg (kg Boden)}^{-1}$
CAL-K	$38,8 \text{ mg (kg Boden)}^{-1}$
Sand	48%
Schluff	34%
Ton	18%

Tabelle 10. Nährstoffe, die jeweilige Menge $\text{mg (kg Boden)}^{-1}$ sowie ihre Darreichungsform

	mg (kg Boden)⁻¹	Form
N	260	NH_4NO_3
P	100	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \times \text{H}_2\text{O}$
Mg	60	$\text{MgSO}_4 \times 7 \text{ H}_2\text{O}$
Zn	15	$\text{ZnSO}_4 \times 7 \text{ H}_2\text{O}$
Cu	10	$\text{CuSO}_4 \times 5 \text{ H}_2\text{O}$
Mn	40	$\text{MnSO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$
B	2	H_3BO_3
Mo	0,1	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \times 4 \text{ H}_2\text{O}$

Das Saatgut der Tomatenpflanzen (*Solanum lycopersicum* L. cv. Gaheris RZ) stammte von der Firma Rijk Zwaan Welter GmbH und ist F1-Hybridsaatgut. In die vorbereiteten Mitscherlichgefäße wurden acht Samen ausgesät und 14 d nach dem Auflaufen in zwei Stufen auf fünf Pflanzen je Gefäß reduziert. Mit der Bestandesdichte von fünf Pflanzen pro Gefäß wurde auch der Trockenstress appliziert, innerhalb von 3 d waren die 35% WK_{max} erreicht. Für die optimal feuchten Bedingungen wurde auf 60% WK_{max} aufgegossen. Nach weiteren 7 d erfolgte auf den Pflanzen der +K+flüssig-Variante die Blattapplikation der 5%- K_2SO_4 -Lösung mit 100 mL m^{-2} . Von da ab wurden in Abständen von 7 und 21 d zwei Ernten durchgeführt. Es wurde je eine Pflanze aus dem Gefäß entnommen, von einem Blatt wurde das Wasserpotential sowie das osmotische Potential bestimmt, die restliche Frischmasse wurde gewogen, bei 80°C getrocknet und für die Kationenanalyse aufbewahrt.

2.2 Analyseverfahren

2.2.1 Ermittlung und Einstellung der Salinität auf 9 dS m^{-1}

In den Versuchen, die saline Varianten enthielten, wurde zuvor die Menge an NaCl ermittelt, die notwendig ist, um die elektrische Leitfähigkeit auf 9 dS m^{-1} zu steigern. Hierfür wurde in einem Vorversuch nach der Methode, die bei QADIR (2000) beschrieben ist, vorgegangen. Zunächst wurden 150 g luftgetrockneter Boden mit 150 g Quarzsand vermischt und mit Wasser befeuchtet, so dass eine WK_{max} von 110% vorherrschte. Zu den einzelnen Proben wurde dann 0,5 g Kalk pro kg Substrat als $CaCO_3$ zugegeben. Es erfolgte in dreifacher Wiederholung eine Zugabe von NaCl (Abbildung 4). Die Proben wurden über Nacht bei Raumtemperatur inkubiert, am folgenden Tag nochmals aufgerührt und über einen Büchner-Trichter mit Weißbandfilter und einer Vakuumpumpe abfiltriert. In dem Eluat wurde mit einem Leitfähigkeitsmessgerät unter Beachtung der Temperatur die elektrische Leitfähigkeit gemessen. Abbildung 4 zeigt den linearen Zusammenhang der elektrischen Leitfähigkeit mit steigender NaCl-Zugabe. Die lineare Regression ist durch das Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,99$ validiert.

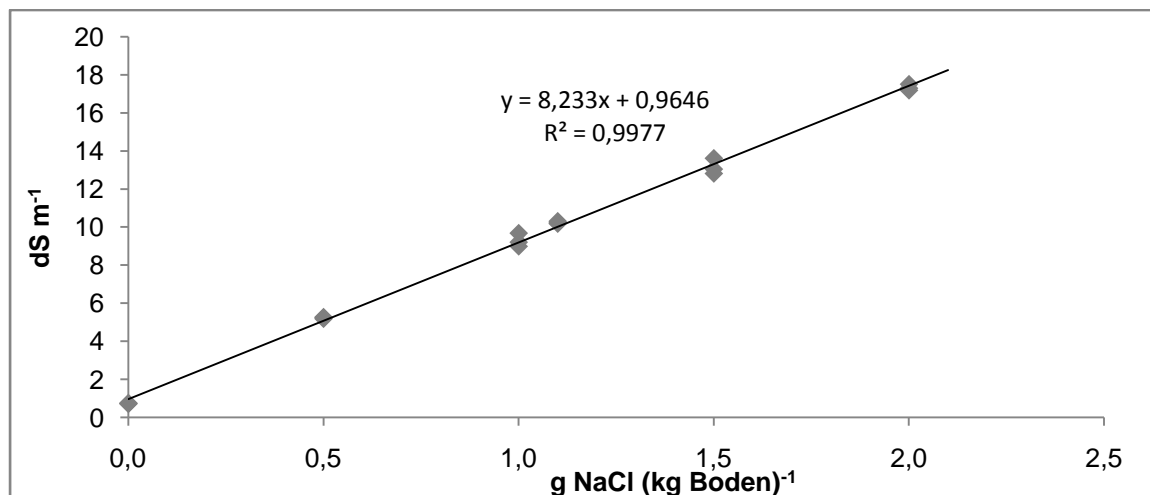


Abbildung 4. Einfluss der NaCl-Menge pro kg Substrat auf die elektrische Leitfähigkeit im gesättigten Wasserextrakt

Anhand der Geraden in Abbildung 4 kann dann die nachfolgende Formel abgeleitet werden. Damit kann berechnet werden, welche Menge NaCl nötig ist, um das Substrat auf eine elektrische Leitfähigkeit von 9 dS m^{-1} einzustellen.

$$NaCl (g) = \frac{EC (dS m^{-1}) - 0,9646(dS m^{-1})}{8,233}$$

2.2.2 Wurzellängenmessung

Für die Messung der Wurzellänge aus den Versuchen 2007 mussten die Wurzeln aus den Gefäßen ausgewaschen werden. Nachdem die oberirdische Biomasse abgeschnitten worden war, wurden die Gefäße ausgeleert. Der Inhalt wurde in Eimer gegeben, die mit Wasser befüllt waren. Danach wurde mit Wasser auf einem Sieb mit einer Maschenweite von 5 mm die Erde ausgewaschen. Damit keine Ungenauigkeit in den darauffolgenden Analysen auftrat, wurden die Wurzeln sehr genau von sonstigem organischem und anorganischem Material gesäubert, welches an ihnen haftete. Beispielsweise wurden in den Wurzelproben Flügel von Insekten, Moos und Holzstückchen gefunden.

Des Weiteren war es relevant, dass die Wurzeln immer feucht gehalten wurden, damit sie nicht austrockneten. Sobald alle Wurzeln eines Gefäßes ausgewaschen und gereinigt worden waren, wurde das überschüssige

Wasser mit Tüchern abgetupft. Anschließend wurde die Wurzelprobe in ungefähr 1 cm große Stücke geschnitten und die Frischmasse bestimmt. Von jeder Probe wurden zweimal 3 g zur späteren Wurzellängenmessung entnommen und in einem Gemisch aus 10% konzentriertem Eisessig und 90% Ethanol (70%ig) konserviert. Der verbleibende Teil der Probe wurde bei 80°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

Die Messung der Wurzellänge erfolgte mit dem Wurzellängenmessgerät von Comair (Comair Root Length Scanner). Die in Ethanol-Eisessig konservierten Wurzelproben wurden über ein Sieb abgossen, dann auf die Scheibe des Wurzelscanners gebracht und mit 1 L entionisiertem Wasser auf der Scheibe so verteilt, dass die Wurzeln sich nicht überlappten. Das Prinzip dieser Methode beruht darauf, dass eine definierte Menge von Wurzeln auf eine Scheibe gebracht wird, die dann von einem Lichtstrahl durchleuchtet wird. Der Scanner erfasst jede Wurzel und errechnet anhand eines hinterlegten Algorithmus die Wurzellänge. Diese Messung wurde zur Bestimmung der Wiederholungen vier- bis fünfmal durchgeführt.

2.2.3 Messung der Blattfläche

Die Messung der Blattfläche von *Vicia faba* L. erfolgte unmittelbar nach der Ernte. Es wurde zunächst die Frischmasse von zwei repräsentativen Blättern je Gefäß und die gesamte Blattfrischmasse ermittelt. Anschließend wurden die beiden Blätter auf die Auflagefläche des Blattflächencanners gelegt und mit der Erfassungseinheit langsam über die Fläche gefahren, so dass bei optimaler Kontrasteinstellung nur die Fläche der Blätter erfasst wurde. Es wurde das Area Meter (ADC BioScientific Ltd. Herts, England) verwendet. Mit dem Wert der Blattfläche der beiden Blätter wurde über die Frischmasse hochgerechnet, wie groß die Blattfläche je Pflanze insgesamt war. Stängelanteile wurden bei der Bestimmung der Blattfläche weder für das Einscannen noch für die Hochrechnung berücksichtigt.

2.2.4 Nacherntebehandlung des Pflanzenmaterials

Das Pflanzenmaterial wurde nach der Ernte und Bestimmung der Frischmasse unverzüglich bei 80°C in einem Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Im Anschluss wurde die Trockenmasse ermittelt und das Pflanzenmaterial mittels einer Labormühle auf eine Partikelgröße < 2 mm vermahlen.

2.2.5 Kationenanalyse mittels Flammen-Atomabsorptions-Spektrofotometrie (Flammen-AAS)

Für die Kationenanalyse mittels Flammen-AAS wurde jeweils 0,5 g der getrockneten und gemahlten Probe in einen Porzellantiegel eingewogen und für 14 h in einem Muffelofen (Heraeus) bei 550°C trocken verascht. Nachdem die Tiegel abgekühlt waren, wurde die Asche mit 1 mL bidest. Wasser angefeuchtet und mit 2,5 mL einer 5 M HNO₃ 1 + 2 Lösung zum Lösen der Carbonate versetzt. Die Salpetersäurelösung bestand aus einem Teil 65% HNO₃ und zwei Teilen bidest. Wasser. Die Suspension aus Asche und Salpetersäure wurde auf einer Heizplatte fast bis zum Sieden erhitzt und anschließend quantitativ über einen Weißbandfilter in einen 50 mL-Messkolben überspült. Der Tiegel und das Filterpapier wurden mehrfach mit heißem bidest. Wasser nachgespült. Sobald die Lösung in den Kölbchen auf Raumtemperatur abgekühlt war, wurde mit bidest. Wasser bis zur Markierung aufgefüllt und gut geschüttelt (STEFFENS, 2004). Die Messung von Kalium (404 nm), Natrium (589 nm), Magnesium (202 nm) und Calcium (422 nm) wurde dann später am Flammen-AAS der Firma Varian (SpektrAA 220FS) in einer Acetylen-Luftflamme durchgeführt. Um Ionisationsinterferenzen bei der Messung der Alkali- und Erdalkalielemente zu verhindern, wurde der Messlösung vor dem Zerstäuben und nachfolgendem Verbrennen noch eine 2%ige Cäsium-Lanthanchlorid-Pufferlösung (10 g L⁻¹ CsCl + 100 mg L⁻¹ LaCl₂) zugesetzt.

Die Lösung wird mit Druckluft in ein Aerosol überführt und dann der Flamme zugeführt, das Lösungsmittel verdampft, die festen Probenbestandteile schmelzen, verdampfen und dissoziieren. Der durch die Atomwolke ge-

schickte Lichtstrahl einer definierten Wellenlänge wird geschwächt, diese Intensität wird hinter der Atomisierungseinheit gemessen und mit der ursprünglichen Intensität verglichen. Nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz (BOUGER, 1729) wird die Extinktion von Kalibrierungsstandards mit bekannten Konzentrationen aufgenommen, daraus wird eine Kalibrierungskurve erstellt. Die Extinktionen der Proben mit unbekannter Konzentration werden gegen diese Kalibrierungskurve gestellt und die Konzentration abgelesen. Die Selektivität der Flammen-AAS-Analyse beruht auf dem Einsatz von element-spezifischen Hohlkathodenlampen, die ein elementspezifisches, elektromagnetisches Spektrum aufweisen, das gezielt von dem gleichen, zu untersuchenden Element absorbiert wird.

2.2.6 Phosphorbestimmung in pflanzlichem Material mit der Ammoniumvanadat-Molybdat-Methode

Aus der Lösung, die bei der Analyse der Kationen entstanden war, wurden 10 mL entnommen und in einen 25 mL-Kolben gegeben. Diese wurde mit 0,75 mL HNO_3 (5 M) und 7,5 mL Ammoniumvanadat-Molybdatreagenz versetzt und auf 25 mL aufgefüllt.

In der sauren Lösung bilden Molybdate und Vanadate unter Wasserabspaltung Polymolybdate und Polyvanadate, die aus verknüpften Oktaedern aufgebaut sind. In diese wird das Phosphation eingebaut, und es entstehen gelbgefärbte Heteropolymolybdate bzw. Heteropolyvanadate. Die Menge der gebildeten Heteropolyverbindungen ist proportional zur Konzentration des Phosphations (GERICKE und KURMIES, 1952a; GERICKE und KURMIES, 1952b; SCHEFFER und PAJENKAMP, 1953). Die Messung der Phosphorkonzentration erfolgte an einem Durchflussspektralfotometer bei einer Wellenlänge von 450 nm. Aus den gemessenen Extinktionen wurde anhand einer Eichgeraden die Konzentration ermittelt.

2.2.7 Messung des Wasserpotentials ψ in Blättern mit der Scholander-Bombe

Der Wasserfaden im Xylem transpirierender Pflanzen steht unter einem Unterdruck. Sobald ein Blatt abgeschnitten wird, entspannt sich dieser Unterdruck und der Meniskus des Xylemsaftes wird in die Gefäße zurückgezogen. Wird dieses Blatt in eine Druckkammer eingespannt, so dass der angeschnittene Stiel nach außen zeigt, und diese Kammer dann mit einem Überdruck beaufschlagt, steigt der Meniskus an. Sobald der Überdruck in der Kammer dem Unterdruck im Xylem entspricht, tritt Xylemsaft an der Schnittfläche aus. Dieser Wert kann näherungsweise mit dem Blattwasserpotential ψ gleichgesetzt werden (SCHOLANDER *et al.*, 1964; SCHOLANDER *et al.*, 1965). Bei dieser Messung ist es wichtig, dass das abgeschnittene Blatt sehr schnell in die Druckkammer eingespannt wird, ohne dass es zu Verletzungen der Epidermis kommt. Des Weiteren darf der Druck in der Kammer nur sehr langsam, etwa 0,002 bis 0,02 MPa s⁻¹, verändert werden. Eine zu schnelle Änderung hat zur Folge, dass es zu einer Erhöhung der Temperatur kommen kann, die sich auf die Transpiration auswirkt und somit einen Verlust von Flüssigkeit zur Folge hat. Es hat sich als äußerst zweckmäßig erwiesen, diese Messung mit zwei Personen durchzuführen. Eine Person überwacht den langsamen Druckanstieg, die zweite beobachtet mit einer Lupe den abgeschnittenen Stiel, bis das Wasser austritt.

2.2.8 Messung des osmotischen Potentials ψ_0

Für die Messung des osmotischen Potentials ψ_0 musste zunächst Presssaft aus dem Blattmaterial gewonnen werden. Nach der Bestimmung des Wasserpotentials wird das Blatt unverzüglich aus der Druckkammer entfernt, zerkleinert, in einer 20 mL-Spritze verstaut und bei -20°C tiefgefroren. Vor der Presssaftgewinnung wird flüssiger Stickstoff in den Kolben der Spritze geleitet und die Probe anschließend bei Raumtemperatur aufgetaut. Durch Zusammendrücken des Stempels der Spritze wird der Presssaft gewonnen und in ein Eppendorf-Reaktionsgefäß überführt. Die Bestimmung des osmotischen Potentials ψ_0 im Presssaft erfolgt nach dem Prinzip der Gefrierpunktserniedrigung mit dem digitalen Mikro-Osmometer der Firma Roebling. Ein

Aliquot (100 μL) wird in ein 1,5 mL-Eppendorf-Reaktionsgefäß gegeben und in das Gerät eingespannt. Die Probelösung wird langsam thermoelektrisch auf $-6,2^\circ\text{C}$ heruntergekühlt. Sobald diese Temperatur erreicht ist, wird durch das Einbringen von Kristallisationskeimen mit einer Nadel das schlagartige Gefrieren ausgelöst. Dabei wird Kristallisationswärme freigesetzt und die Temperatur der Probe erhöht sich wieder, bis der Gefrierpunkt erreicht ist.

Der Gefrierpunkt kann nicht überschritten werden, da die Probe weiterhin gekühlt wird und ganz einfriert. Sobald die Probe komplett gefroren ist, sinkt die Temperatur wieder ab. Die kurzzeitig auftretende Temperaturkonstanz repräsentiert den Gefrierpunkt. Durch den Vergleich des Gefrierpunktes der unbekanntes Lösung mit Eichlösungen bekannter Osmolaritäten kann der genaue Wert für die Probelösung errechnet werden.

Für die Berechnung des osmotischen Potentials ψ_0 gilt folgender Zusammenhang:

$$\psi_0 (\text{kPa}) = O \cdot R \cdot T$$

mit ψ_0 = osmotisches Potential (kPa)

O = vom Osmometer abgelesener Wert (Osmol L^{-1})

R = allgemeine Gaskonstante ($8,3141 \text{ kPa L}^{-1}\text{mol}^{-1}\text{K}^{-1}$)

T = absolute Temperatur (K)

(NONAMI und SCHULZE, 1989; VON WILLERT *et al.*, 1995)

2.2.9 Berechnung des Turgors ψ_P in Pflanzenzellen

Aus dem Wasserpotential ψ und dem osmotischen Potential ψ_0 kann mit folgender Formel der Turgor ψ_P errechnet werden (SCHUBERT, 2006a):

$$(-)\psi = (-)\psi_0 + \psi_P$$

2.2.10 Rohproteinanalyse nach Kjeldahl

Bei der Stickstoffanalyse nach Kjeldahl werden 0,5 g der zu analysierenden Probe in einen Glaskolben mit 10 mL konzentrierter Schwefelsäure (H_2SO_4) und einer Kjeldahltablette, die Katalysatoren zur Verringerung der

Aktivierungsenergie enthält, gegeben und in einem Heizblock für 1 h intensiv am Sieden gehalten. Die Kjeldahltablette enthält als Katalysatoren Kaliumsulfat (K_2SO_4), Kupfersulfat ($CuSO_4$) und Titandioxid (TiO_2). Nach dem Probenaufschluss in dem Aufschlussblock (Büchi 430 Digestor) liegen sämtliche Stickstoffverbindungen in Form von Ammoniumsulfat ($(NH_4)_2SO_4$) in der Lösung vor. An den Aufschluss schließt sich die Wasserdampfdestillation mit der Büchi-Distillation Unit B-324 an. Durch Zugabe von konzentrierter Natronlauge wird die Schwefelsäure neutralisiert und Ammoniak ausgetrieben, das mittels Wasserdampfdestillation quantitativ in eine Säurevorlage eingeleitet wird. Als Säurevorlage wird eine schwache Säure (Borsäure) verwendet. Mit der Rücktitration (Mettler DL 40 GP Memo Titrator) mit 0,1 M NaOH kann auf die Ammoniumkonzentration bzw. Stickstoffkonzentration zurückgerechnet werden. Den Rohproteingehalt der Probe ermittelt man, indem die Stickstoffkonzentration mit dem Faktor 6,25 multipliziert wird (ARNOLD, 1885; ARNOLD, 1886; STEFFENS, 2004).

2.3 Inokulation der Ackerbohnsamen

Durch die Sterilisation der Keimoberfläche und die Tatsache, dass die N-Ernährung nicht auf mineralischem Weg sondern über Symbiose erfolgen sollte, ist eine Impfung mit *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* unabdingbar. Der erforderliche Rhizobienstamm 6044 stammte von der deutschen Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen GmbH, Braunschweig (DSMZ, Braunschweig). Die Kultivierung dieses Stammes erfolgte institutsintern nach den Vorgaben der DSMZ. Hierfür wurde zunächst ein autoklavierter und filtrierter Bodenextrakt (80 g Gartenboden, 0,2 g Na_2CO_3 und 200 mL entionisiertes Wasser) hergestellt. Nach den Angaben von PEITER (2002) beschleunigt dieser Extrakt das Wachstum der Kulturen erheblich.

Eine lyophilisierte Kultur von *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* Stamm 6044 (DSMZ, Braunschweig) wurde in DSMZ-Medium 98 *Rhizobium leguminosarum* (10 g L^{-1} Mannitol, 1 g L^{-1} Hefeextrakt, 200 mL L^{-1} Bodenextrakt) resuspendiert. Danach wurde die Suspension auf Schrägagarröhrchen (Flüssigmedium mit zusätzlich 15 g L^{-1} Bactoagar) ausgestrichen und 6 d bei 25°C inkubiert. Zur Inokulation von Pflanzen wurde die Kultur eines Agar-

röhrchens in 100 mL Flüssigmedium überführt und 3 d bei 25°C und 120 U min⁻¹ schüttelnd inkubiert. Anschließend wurden pro Pflanze 5 mL der Rhizobien-Flüssigkultur auf das Substrat der Anzuchtplatten appliziert. Dieser Rhizobienstamm wird halbjährlich nach den Vorgaben der DSMZ weiterkultiviert.

2.4 Statistische Auswertung

Alle Varianten der Versuche wurden in vierfacher Wiederholung angebaut. Es war gewährleistet, dass die Pflanzen regelmäßig vollständig randomisiert wurden. Die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgte zum einen mit Microsoft Excel Version 2007, dabei wurde als statistischer Lageparameter das arithmetische Mittel \bar{x} und als Streuungsmaß für die Stichprobe der Standardfehler $\sigma_{\bar{x}}$ berechnet, zum anderen wurden mit dem Programm SPSS for Windows Version 11 Varianzanalysen zur Bestimmung von signifikanten Beziehungen durchgeführt.

Das arithmetische Mittel \bar{x} ist der Quotient aus der Summe der gemessenen Werte x_i und der Anzahl der biologischen Wiederholungen n (KÖHLER *et al.*, 2001).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Für die tatsächliche Streuung einer Zufallsvariablen um ihren Mittelwert kann als positive Quadratwurzel aus deren Varianz die Standardabweichung σ_x berechnet werden. Der Quotient aus Standardabweichung σ_x und der Quadratwurzel der Wiederholungen $\sqrt[2]{n}$ gibt als Streuungsmaß für die Stichprobe den Standardfehler $\sigma_{\bar{x}}$ an. Der Standardfehler ist in den Diagrammen der vorliegenden Arbeit als Fehlerbalken um die Mittelwerte dargestellt (KÖHLER *et al.* 2001).

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt[2]{n}}$$

Unter Zuhilfenahme von SPSS wurden einfaktorielle Varianzanalysen (ANOVA) durchgeführt. Sie wurden immer innerhalb der jeweiligen Wasserversorgungsstufe (optimal feucht, Trockenstress, bzw. Salinität) berechnet; Faktorstufen innerhalb der univariaten Varianzanalyse waren die Kaliumversorgungen. Das Signifikanzniveau lag bei allen Untersuchungen bei $p = 0,05$. Bevor eine ANOVA durchgeführt werden konnte, mussten die Voraussetzungen überprüft werden. Mit SPSS wurde hierfür der Datensatz jeweils auf Varianzhomogenität und Normalverteilung getestet.

Waren mehr als zwei Faktorstufen vorhanden, so mussten im Fall einer signifikanten Beziehung der ANOVA mit einem Nachfolgetest (post hoc) multiple Mittelwertvergleiche angestellt werden. Als Post-Hoc-Test wurde der Tukey-B-Test bei einem Signifikanzniveau von $p = 0,05$ verwendet. Die signifikanten Beziehungen werden dann mit unterschiedlichen Buchstaben in den Diagrammen gezeigt. Bei zwei Faktorstufen kann das Ergebnis direkt anhand des F-Testes der ANOVA abgelesen werden und wird in den Diagrammen mit * gekennzeichnet.

3 Ergebnisse

3.1 Keramische Platten

Die Pflanzen des im Folgenden gezeigten Versuches wurden 42 d nach der Aussaat geerntet. Innerhalb des Versuchszeitraumes produzierten die Ackerbohnen bei einer KCl-Düngung 11 g Spross- und 6 g Wurzelrockenmasse (Abbildung 5) Wurde K durch Na substituiert, so verringerte sich die Trockenmassenbildung signifikant auf 6 g oberirdisch, resp. auf 4 g unterirdisch gebildete Biomasse.

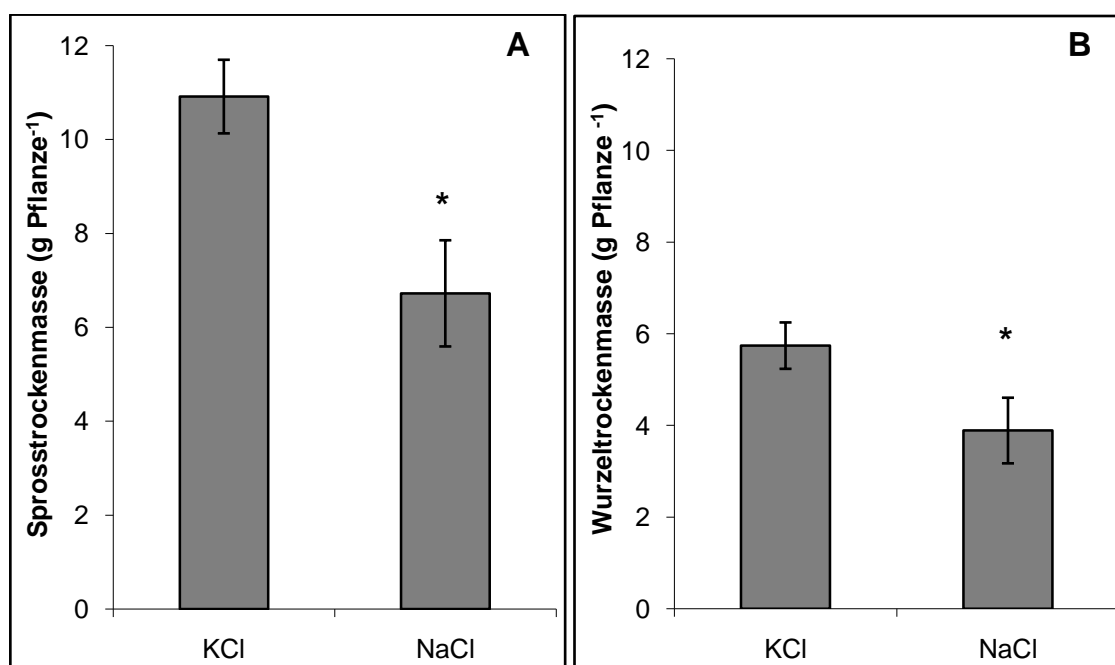


Abbildung 5. Einfluss von KCl ($150 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$) bzw. NaCl ($88 \text{ mg Na (kg Boden)}^{-1}$) auf die Produktion von **oberirdischer Trockenmasse (A)** (Spross und Blätter) und **Wurzelrockenmasse (B)** bei *Vicia faba* 42 d nach Aussaat. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ($n = 8$). * kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p = 0,05$).

Die Analyse der Konzentrationen von Kalium (K) und Natrium (Na) zeigt Abbildung 6. Wurde in der als NaCl bezeichneten Variante die Kaliumdüngung durch Natrium substituiert, verringerte sich die Konzentration von K signifikant von $33 \text{ mg K (g TM)}^{-1}$ auf $15 \text{ mg K (g TM)}^{-1}$, die Konzentration von Na stieg im Gegenzug signifikant von $1 \text{ mg Na (g TM)}^{-1}$ auf $10 \text{ mg Na (g TM)}^{-1}$ an.

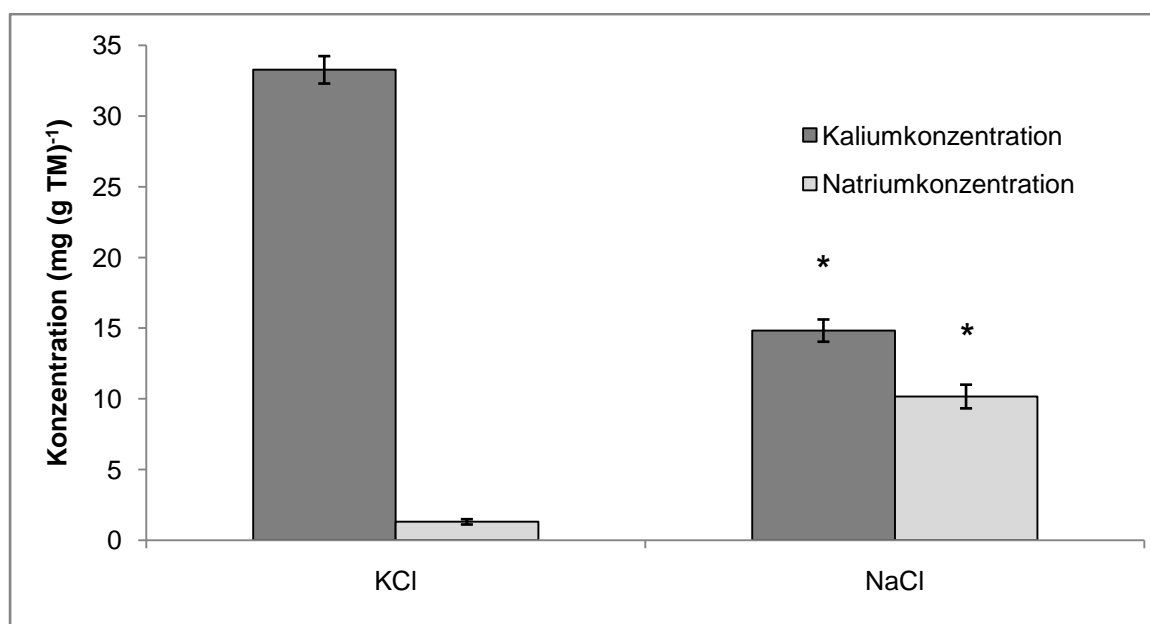


Abbildung 6. Einfluss von KCl ($150 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$) bzw. NaCl ($88 \text{ mg Na (kg Boden)}^{-1}$) auf die Konzentrationen von **Kalium** und **Natrium** von *Vicia faba* 42 d nach Aussaat. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ($n = 8$). * kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p = 0,05$).

Die Wurzelfeinheit (Abbildung 7 **A**), ausgedrückt als Verhältnis von Länge pro Wurzelfrischmasse (WFM), wurde durch die Substitution von K durch Na nicht verringert, allerdings wurde die gesamte Wurzellänge (**B**) signifikant um ein Drittel reduziert.

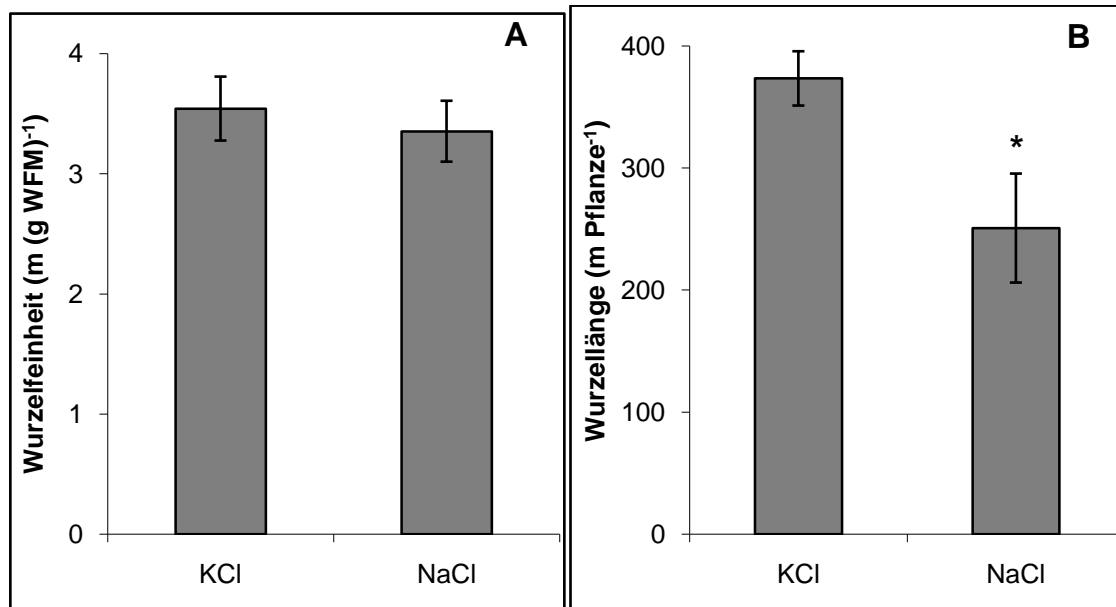


Abbildung 7. Einfluss von KCl (150 mg K (kg Boden)⁻¹) bzw. NaCl (88 mg Na (kg Boden)⁻¹) auf die **Wurzelfeinheit (A)** und die **Wurzellänge (B)** von *Vicia faba* 42 d nach Aussaat. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 8). * kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05).

Wuchsen die Pflanzen in einem kaliumarmen Boden auf, bei dem die K-Düngung durch Na ersetzt wurde, so verbrauchten diese Pflanzen mit 5 L gegenüber der KCl-Variante mit 7 L signifikant weniger Wasser. Dies zeigt Abbildung 8, weiterhin ist dort auf der rechten Seite (B) zu sehen, dass die WUE, bezogen auf die Trockenmassenproduktion, durch KCl höher war, als in der NaCl-Variante. Allerdings konnte das nicht statistisch abgesichert werden.

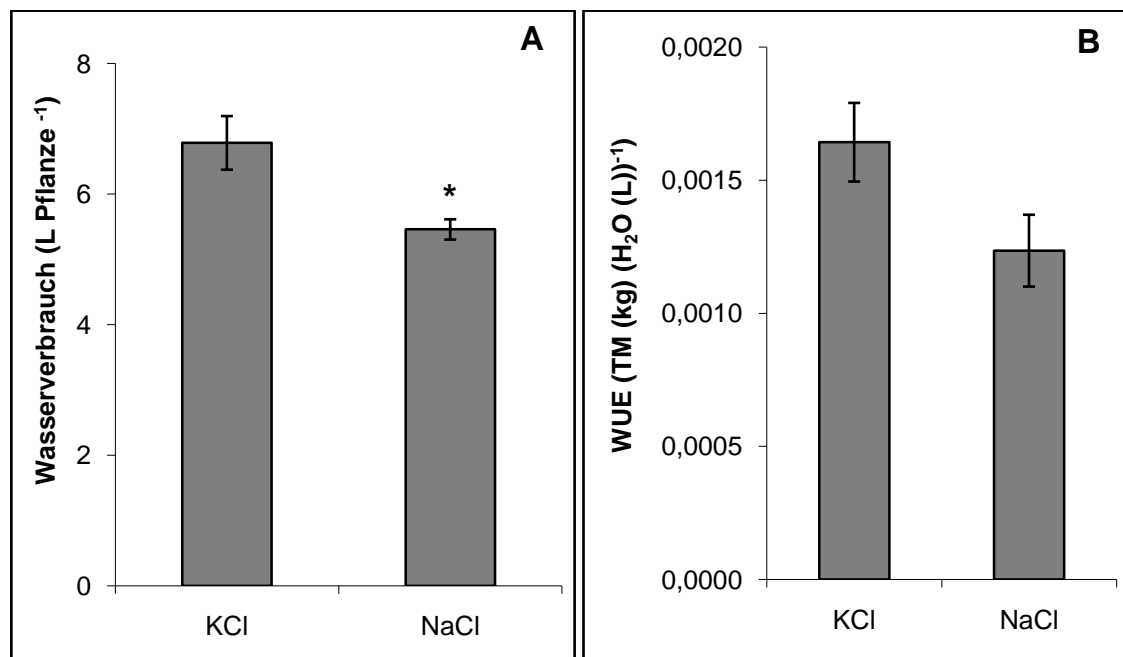


Abbildung 8. Einfluss von KCl ($150 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$) bzw. NaCl ($88 \text{ mg Na (kg Boden)}^{-1}$) auf den **Wasserverbrauch (A)** und die **Wassernutzungseffizienz (WUE) (B)** von *Vicia faba* 42 d nach Aussaat. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 8). * kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05).

Die Blattfläche (Abbildung 9) von *Vicia faba* wurde durch Kalium tendentiell erhöht: so wiesen die Pflanzen mit 1.100 cm^2 rund ein Viertel mehr Blattfläche auf, als die Pflanzen in der NaCl-Variante. Durch die hohe Streuung innerhalb der Varianten konnte diese Erhöhung statistisch nicht abgesichert werden. Die Transpiration der Pflanzen als Quotient aus verbrauchtem Wasser und Blattfläche ist in Abbildung 9 auf der rechten Seite gezeigt. Die Pflanzen beider Varianten wiesen die gleiche Transpiration auf.

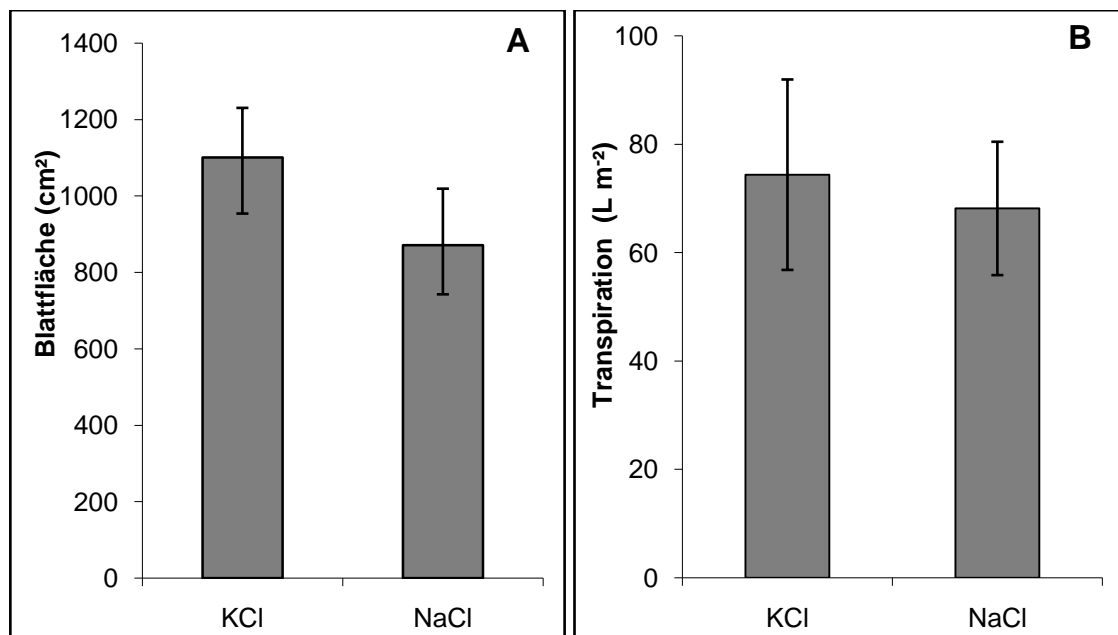


Abbildung 9. Einfluss von KCl ($150 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$) bzw. NaCl ($88 \text{ mg Na (kg Boden)}^{-1}$) auf die **Blattfläche (A)** und die **Transpiration (B)** von *Vicia faba* 42 d nach Aussaat. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ($n = 8$). keine signifikanten Unterschiede ($p = 0,05$).

Bei der verwendeten Versuchstechnik, bestehend aus keramischen Platten und Kunststoffzylindern, wurde den Pflanzen ein Bodenvolumen zur Verfügung gestellt, das nur von unten über den kapillaren Aufstieg des Wassers aus Vorratsgefäßen bewässert werden konnte. Diese Art der Bewässerung funktionierte gut, der Bodenblock wurde nach und nach durchfeuchtet, die Pflanzen wuchsen gut und die Vorratsgefäße leerten sich gleichmäßig. Durch eine Abdeckung mit Aluminiumfolie wurde sichergestellt, dass keine Evaporation über die keramischen Platten oder aus den Vorratsgefäßen erfolgen konnte.

Während des Versuches war eine Austrocknung des Bodenvolumens visuell und gravimetrisch zu beobachten. Die Pflanzen wuchsen aber ohne Welkesymptome weiter. Des Weiteren nahm auch der Wasserstand in den Vorratsgefäßen kontinuierlich ab. Bei Versuchsende wurde ein Bodenblock vorsichtig aus dem Zylinder gedrückt und fotografisch erfasst. Abbildung 10 zeigt links die Seitenansicht und rechts den mittig halbierten Boden. Es ist deutlich zu erkennen, dass ein großer Teil der Wurzeln am Rand zwischen Boden und Zylinder nach unten gewachsen war. In der aufgeschnittenen Ansicht sind kaum Wurzeln zu erkennen. Bevor der Boden aus dem Versuchsgefäß gedrückt wurde, entstand die in Abbildung 11 gezeigte Aufsicht von unten auf den Versuchsboden. Diese Schnittkante lag unmittelbar auf der keramischen Platte und stellte die Verbindung zur Bewässerung dar. Es ist ganz deutlich das stark ausgeprägte Wurzelgeflecht von *Vicia faba* zu erkennen. Sobald diese Wurzelschicht derart ausgebildet war, hatte der Boden kaum noch Anschluss an die Wasserversorgung über die keramische Platte und trocknete nach und nach aus, was sowohl optisch als auch an einer Abnahme der Gesamtgefäßmasse deutlich erkennbar war.



Abbildung 10. Bodenblock (li. Seitenansicht, re. aufgeschnitten) bei Versuchsende aus den Versuchsgefäßen entfernt. Aufgenommen nach sechswöchiger Versuchsdauer.



Abbildung 11. Sehr gut ausgeprägtes Wurzelgeflecht von *Vicia faba* L. am Boden des Versuchsgefäßes im Übergang zur keramischen Platte. Aufgenommen nach sechswöchiger Versuchsdauer.

Die Pflanzen versorgten sich direkt von der keramischen Platte mit Wasser und hatten so immens viel Wasser zur Verfügung, was sich an dem hohen Wasserverbrauch (Abbildung 8) und der sehr hohen Transpiration (Abbildung 9) zeigt. Diese Versuchstechnik eignete sich nicht, den Pflanzen eine klar definierte Menge an Wasser kontinuierlich während der Versuchsdauer über den Boden zur Verfügung zu stellen.

3.2 Containerversuch Ackerbohnen 2008

Das Bodenvolumen und der damit den Pflanzen zur Verfügung gestellte Wurzelraum waren bei der Versuchstechnik mit keramischen Platten und Kunststoffröhren sehr klein. Demgegenüber steht eine andere, seit einigen



Jahren im Institut für Pflanzenernährung etablierte Technik, bei der Container verwendet werden (REEB, 2006; SCHUBERT und REEB, 2006; LEPPIN, 2007; WAKEEL, 2008). Diese Container weisen ein Volumen von 120 L auf, die je nach Substratgemisch und Wassermenge rund 190 kg wiegen. Gleichzeitig kann bei der großen Oberfläche von 0,16 m² ein größerer Bestand etabliert werden. Damit kann der Einfluss von Randeffekten auf das Pflanzenwachstum etwas reduziert werden. Neben dem großen Bodenvolumen und der Oberfläche ist die effektive Durchwurzelungstiefe von 90 cm zu betrachten. Nach Angaben in der Literatur liegt sie für die Feldkulturen zwischen 50 cm in Sandböden und 100 cm in Schluff-, Lehm- und Tonböden (KUNTZE *et al.*, 1994).

Abbildung 12. Seitenansicht eines aus dem Container gekippten Bodenblockes. Die Aufnahme stammt aus dem Containerversuch Ackerbohne 2009 vom 20.05.2009.

Für Getreide gibt BAEUMER (1994) eine maximale Durchwurzelungstiefe von 100 bis 150 cm an. Weiter wird dort beschrieben, dass „die Hauptmenge der Wurzeln unserer Feldfrüchte [...] sich in der Regel oberhalb von 40 cm Bodentiefe“ befindet (BAEUMER, 1994). Speziellere, der Bodenart angemessene, Durchwurzelungstiefen geben DIEPENBROCK *et al.* (1999) für Getreide an. Dort nimmt der mittlere effektive Wurzelraum für Getreide von Grobsand mit 50 cm über schluffigen Sand mit 80 cm bis zu schluffigem Lehm mit 100 cm zu. Vergleicht man diese Werte mit der Literatur, so stellt man fest, dass diese Containerversuche mit Feldversuchen ohne Bodenverdichtung vergleichbar sind (SCHUBERT, 2006b; SCHUBERT und REEB, 2006). Des Weiteren wird durch die Container ein lockeres Bodensubstrat simuliert, das gezielt auf einen definierten Anteil der maximalen Wasserhaltekapazität eingestellt werden kann. Durch die hohe Mobilität der Container ist ein exaktes Erfassen der verbrauchten Wassermenge möglich. Eine Ansicht auf das Bodengefüge in einem Container liefert Abbildung 12. Man erkennt in dieser Abbildung das lockere Substratgemisch aus Boden und Quarzsand und die für die Ackerbohne doch recht gute Durchwurzelung. Die Aufnahme entstand nach der Zwischenernte der ersten vier Wiederholungen des Ackerbohnenversuches 2009.

Die Zwischenernte von zwei Pflanzen je Container erfolgte am 23.04.2008. In Abbildung 13 ist Konzentration von Kalium und Natrium in den oberen Blättern von *Vicia faba* abgebildet. Durch eine bessere Kaliumversorgung (+K) stieg unabhängig von Wasserversorgung und Bodensalinität die Konzentration von Kalium in den Blättern der Pflanzen signifikant an. Weiterhin wurde die Konzentration von Natrium verringert, bei optimal feuchten Bodenbedingungen (60% WK_{max}) und bei Trockenstress (30% WK_{max}) ist die Verringerung sogar statistisch gesichert.

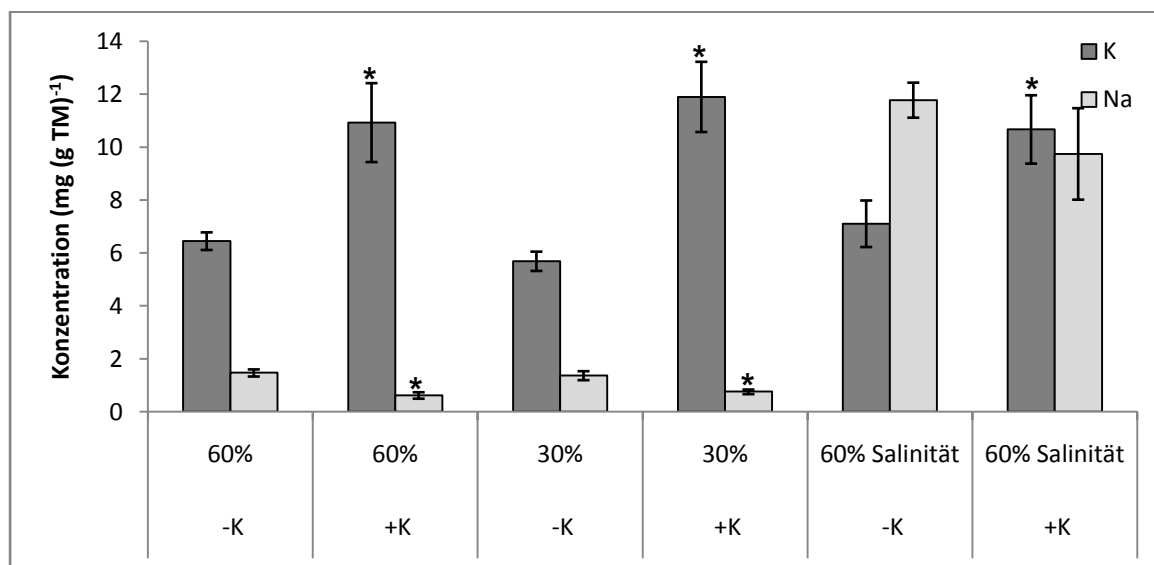


Abbildung 13. Konzentrationen von K und Na in der Trockenmasse der oberen Blätter von *Vicia faba* zum Zeitpunkt der Blüte in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 30% WK_{max}), sowie der Bodensalinität (9 dS m^{-1}). -K entspricht einer K-Bodendüngung von 50 kg K ha^{-1} , +K = 200 kg K ha^{-1} . Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). * kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p = 0,05$) in der jeweiligen Stressebene bezogen auf die -K-Variante.

Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 14, Abbildung 15 und Abbildung 16) zeigen den Ertrag, das Tausendkorngewicht (TKG) sowie die Anzahl der Körner pro Pflanze. Der Ertrag von *Vicia faba* wurde durch eine Kaliumdüngung mit 200 kg K ha^{-1} nicht signifikant verändert. Lediglich durch Trockenstress und Salinität war der Ertrag um ca. 50% im Vergleich zu den Pflanzen bei optimal feuchten ($60\% \text{ WK}_{\text{max}}$) Verhältnissen reduziert. Bei annähernd unverändertem TKG von 320 g (Abbildung 15) wurde der Ertragsrückgang durch eine niedrigere Anzahl von Körnern pro Pflanze (Abbildung 16) bedingt. Eine Kaliumdüngung hatte bei diesen Parametern keinen signifikanten Einfluss. Lediglich die Anzahl der Körner pro Pflanze reduzierte sich bei Trockenstress und Salinität um ca. 50%.

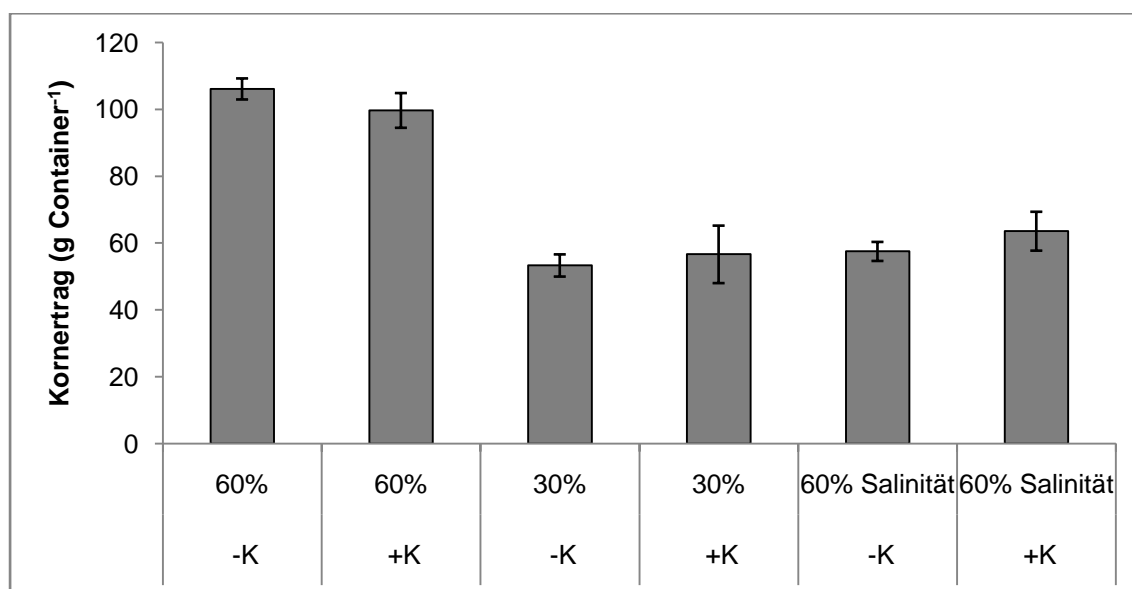


Abbildung 14. Ertrag von *Vicia faba* pro Pflanze zum Zeitpunkt der Ernte in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung ($60\% \text{ WK}_{\text{max}}$ bzw. $30\% \text{ WK}_{\text{max}}$), sowie der Bodensalinität (9 dS m^{-1}). -K entspricht einer K-Bodendüngung von 50 kg K ha^{-1} , +K = 200 kg K ha^{-1} . Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ($n = 4$). Keine signifikanten Unterschiede ($p = 0,05$) in der jeweiligen Stresstufe bezogen auf die -K-Variante.

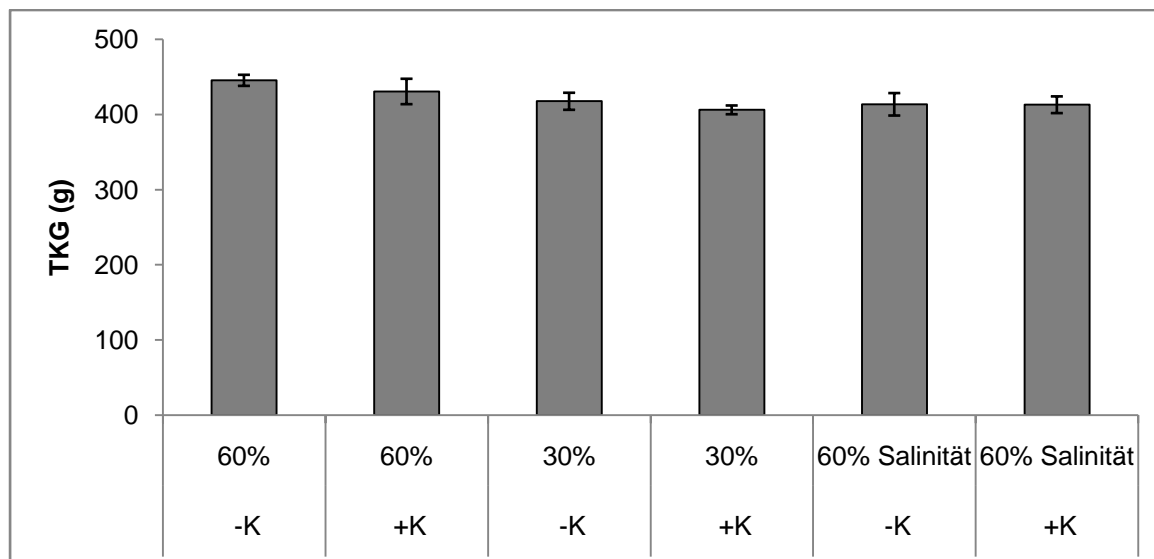


Abbildung 15. Tausendkorngewicht der Körner von *Vicia faba* pro Pflanze zum Zeitpunkt der Ernte in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 30% WK_{max}), sowie der Bodensalinität (9 dS m^{-1}). -K entspricht einer K-Bodendüngung von 50 kg K ha^{-1} , +K = 200 kg K ha^{-1} . Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Keine signifikanten Unterschiede ($p = 0,05$) in der jeweiligen Stressstufe bezogen auf die -K-Variante.

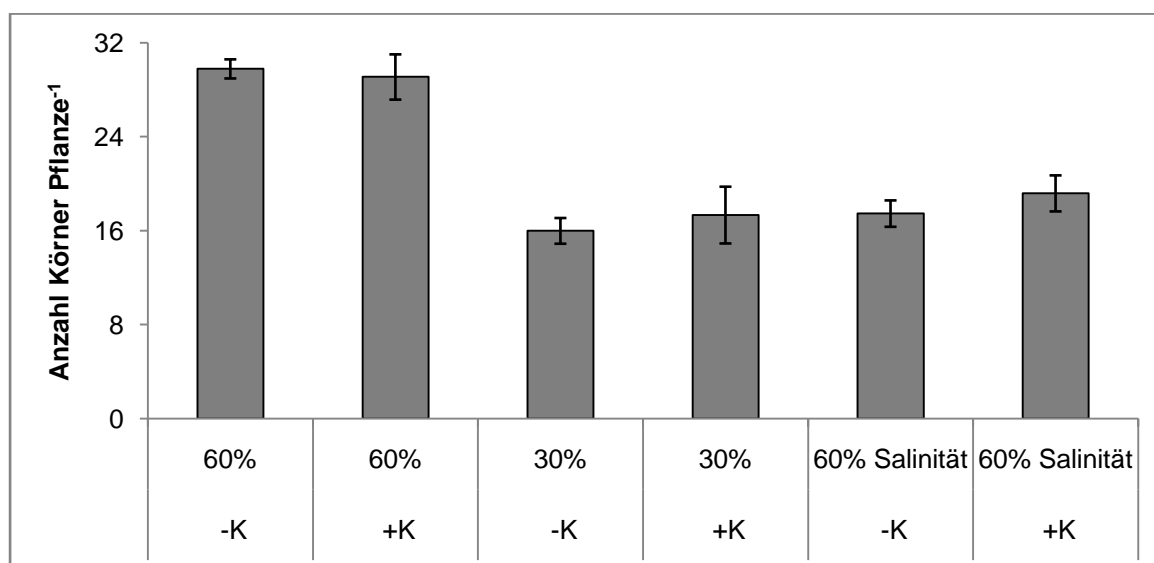


Abbildung 16. Anzahl der Körner von *Vicia faba* pro Pflanze zum Zeitpunkt der Ernte in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 30% WK_{max}), sowie der Bodensalinität (9 dS m^{-1}). -K entspricht einer K-Bodendüngung von 50 kg K ha^{-1} , +K = 200 kg K ha^{-1} . Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Keine signifikanten Unterschiede ($p = 0,05$) in der jeweiligen Stressstufe bezogen auf die -K-Variante.

Der vorab beschriebene Verlauf von Ertrag und Anzahl Körner pro Pflanze spiegelte sich im Wasserverbrauch wider. Der Wasserverbrauch pro Pflanze ist in Abbildung 17 dargestellt. Eine höhere Kaliumversorgung hatte wiederum keinen signifikanten Einfluss. Die Pflanzen, die bei 60% WK_{max} aufwuchsen, verbrauchten je ca. 13 L. Bei Trockenstress (40% WK_{max}) wurden nur rund 7 L und bei Salinität nur jeweils 9 L Wasser während der Vegetationsphase verbraucht.

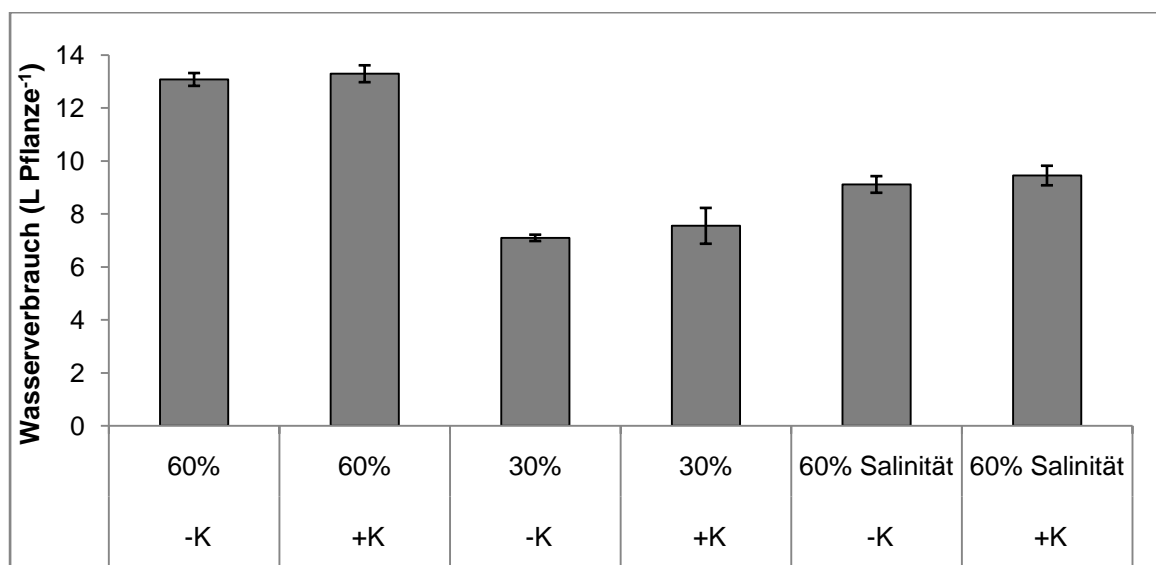


Abbildung 17. Wasserverbrauch von *Vicia faba* pro Pflanze bis zum Zeitpunkt der Ernte in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 30% WK_{max}), sowie der Bodensalinität (9 $dS\ m^{-1}$). -K entspricht einer K-Bodendüngung von 50 $kg\ K\ ha^{-1}$, +K = 200 $kg\ K\ ha^{-1}$. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ($n = 4$). Keine signifikanten Unterschiede ($p = 0,05$) in der jeweiligen Stressstufe bezogen auf die -K-Variante.

Die Wassermenge, die während der Vegetationsphase verbraucht wurde und der damit erzielte Ertrag, liefert die Wassernutzungseffizienz (WUE_Y). Sie ist in Abbildung 18 gezeigt. Eine Kaliumdüngung von 200 $kg\ K\ ha^{-1}$ konnte weder unter optimal feuchten Verhältnissen, noch unter Trockenstress bzw. Salinität einen signifikanten Einfluss ausüben.

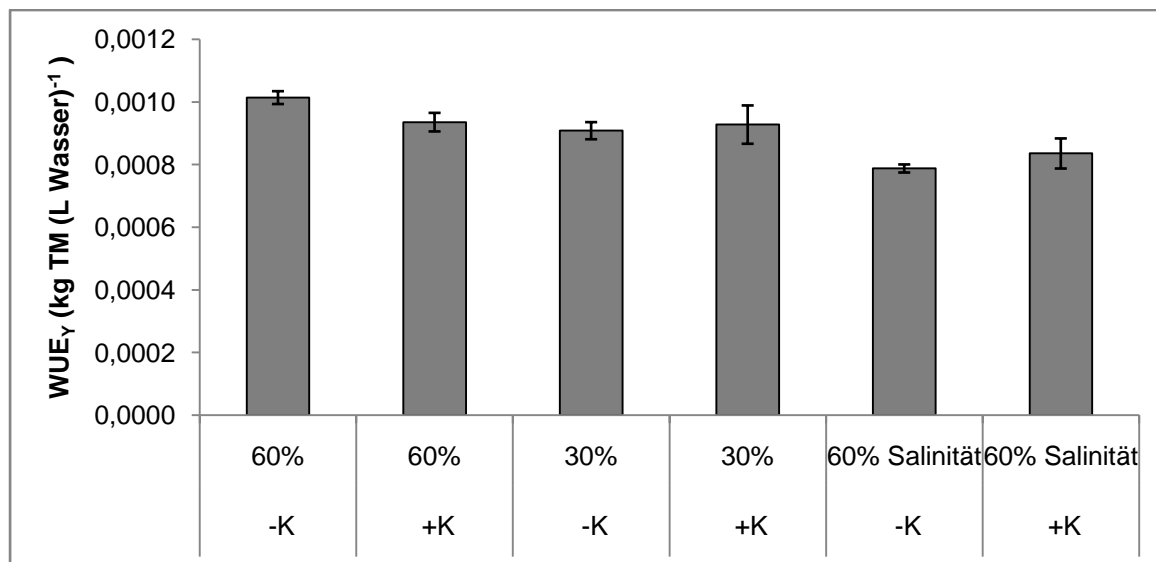


Abbildung 18. Wassernutzungseffizienz bezogen auf den Kornertrag (WUE_Y) von *Vicia faba* in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 30% WK_{max}), sowie der Bodensalinität (9 dS m^{-1}). -K entspricht einer K-Bodendüngung von 50 kg K ha^{-1} , +K = 200 kg K ha^{-1} . Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ($n = 4$). Keine signifikanten Unterschiede ($p = 0,05$) in der jeweiligen Stressstufe bezogen auf die -K-Variante.

Das Substrat in den Containern bestand aus einer Mischung eines kaliumarmen und kaliumfixierenden Unterbodens Kleinlinden 2007 (Tabelle 4) sowie zu gleichen Teilen Quarzsand. Durch diese Vermischung mit Quarzsand wurde zum einen die pflanzenverfügbare Kaliumfraktion weiter verringert, parallel dazu aber auch die Kaliumfixierungskapazität gesenkt. Die Düngung der Ackerbohnepflanzen des Containerversuches 2008 (Kapitel 2.1.2) war in der +K-Variante mit 250 kg K ha^{-1} nicht ausreichend. Denn ein Vergleich mit den Werten bei BERGMANN (1993) zeigt, dass die oberen ausgewachsenen Blätter der Ackerbohne zu Beginn der Blüte bei optimaler Versorgung eine Konzentration von $21 \text{ mg K (g TM)}^{-1}$ aufweisen sollten. Die K-Konzentration der Ackerbohnen in dem Versuch 2008 erreichte bei optimaler Düngung unabhängig vom Wasserangebot mit rund $11 \text{ mg K (g TM)}^{-1}$ diesen Wert nicht. Dieses Resultat führte in der zweiten Jahreshälfte 2008 zu dem Kaliumsteigerungsversuch in Mitscherlichgefäßen, dessen Ergebnisse nachfolgend beschrieben werden.

3.3 Vorversuche zum Containerversuch 2009

3.3.1 Kaliumsteigerungsversuch Ackerbohnen

Durch eine steigende Versorgung mit Kalium über den Boden konnte die Konzentration von K innerhalb der Pflanze weiter gesteigert werden (Abbildung 19). Gleichzeitig wurde die Konzentration von Na sowohl unter Kontrollbedingungen (nicht salin) als auch bei salinen Bodenverhältnissen gesenkt. Eine Sättigung der K-Konzentration in der Pflanze war ab der K-Düngestufe von 400 kg K ha⁻¹ zu erkennen. Optisch war dieses Ergebnis auch direkt an den Pflanzen in Abbildung 20 erkennbar. Eine höhere K-Konzentration im Boden führte visuell zu einem besseren Wachstum.

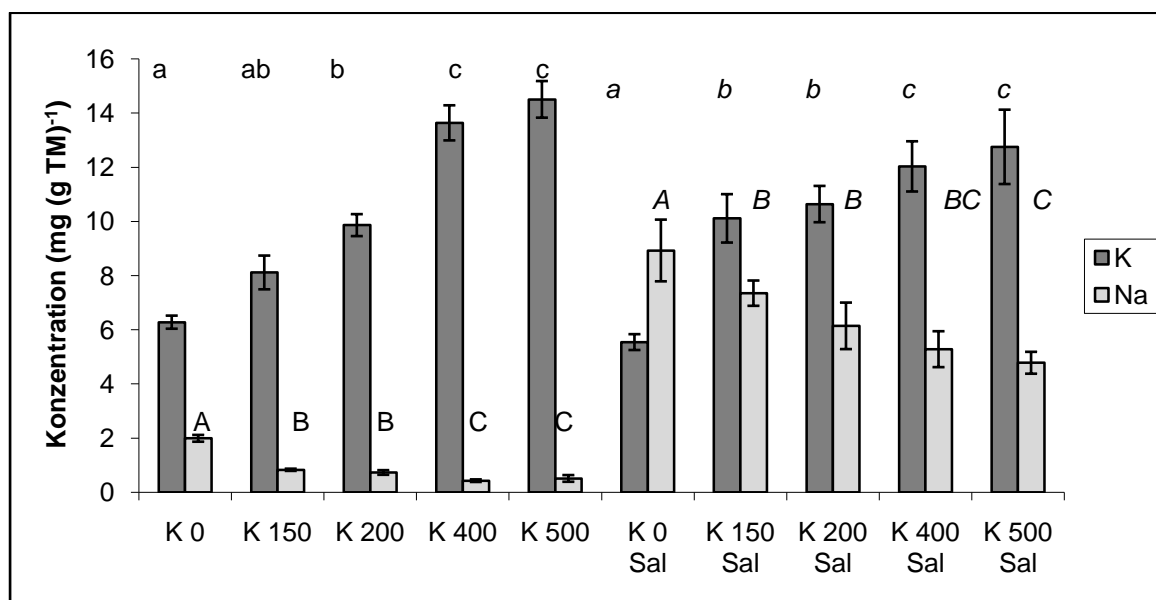


Abbildung 19. Konzentrationen von K und Na im Spross von *Vicia faba* zu Beginn der Blüte bei steigender K-Düngung (von 0 kg K ha⁻¹, über 150 kg K ha⁻¹, 200 kg K ha⁻¹, 400 kg K ha⁻¹ und 500 kg K ha⁻¹ unter Kontroll- und Salinitätsbedingungen (Sal = 9 dS m⁻¹). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) in der jeweiligen Stressstufe bezogen auf die K0-Variante.

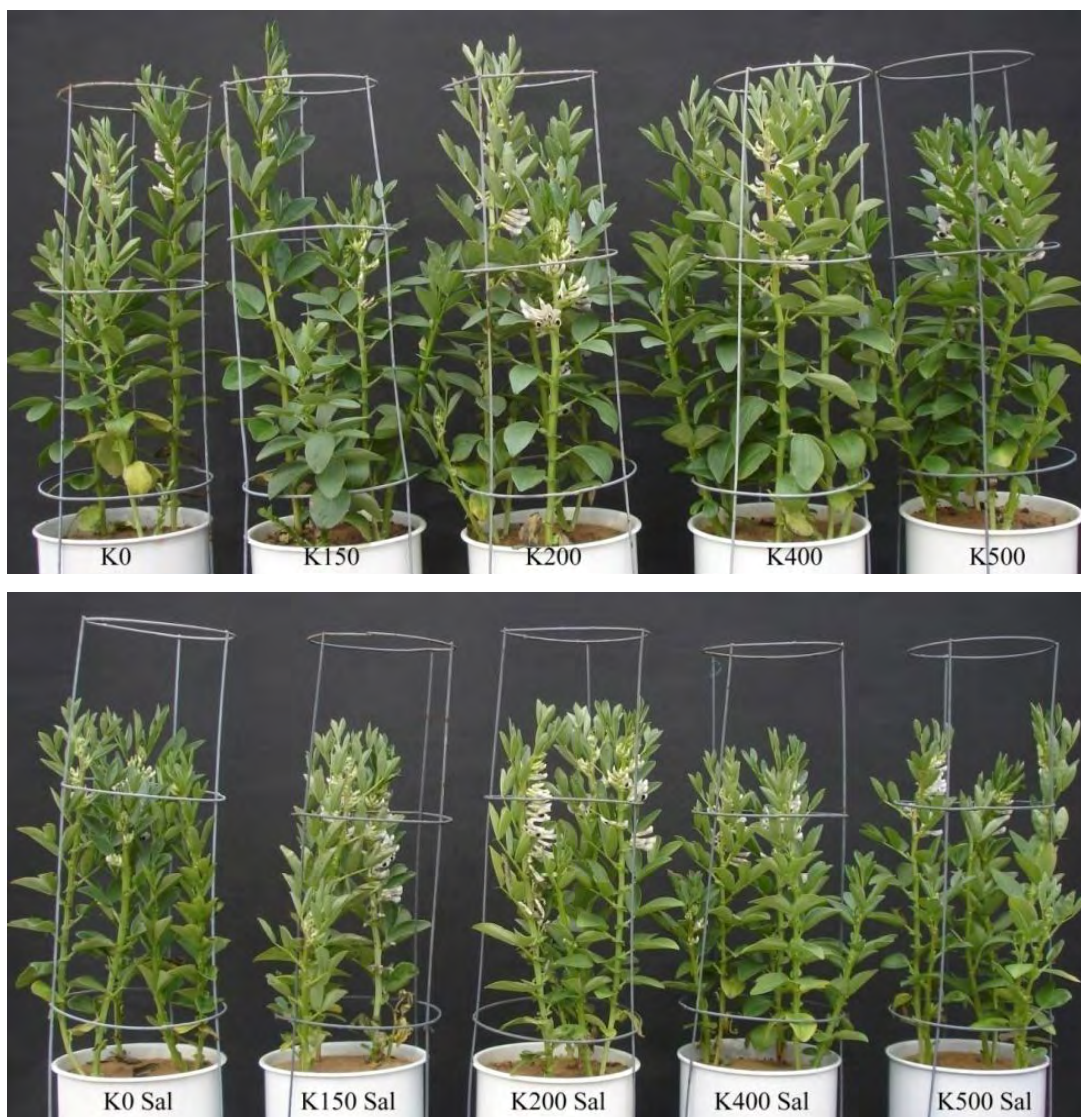


Abbildung 20. Ackerbohnenpflanzen zu Beginn der Blüte bei steigender K-Düngung (von 0 kg K ha^{-1} , über 150 kg K ha^{-1} , 200 kg K ha^{-1} , 400 kg K ha^{-1} und 500 kg K ha^{-1} unter Kontroll- (oberes Bild) und Salinitätsbedingungen mit 9 dS m^{-1} (unteres Bild).

Die Gehalte von K und Na im Spross von *Vicia faba* sind in Abbildung 21 als gestapelte Balken abgebildet. Durch die Steigerung der K-Düngung stieg unter nichtsalinen Bodenbedingungen der Gehalt von K von 30 mg (bei K 0) auf 55 g K (bei K 400 und K 500) an. Bei hoher K-Düngung (K 400 und K 500) ging der Gehalt von Na auf 3 mg pro Pflanze zurück. Betrachtet man dieses bei salinen Bodenverhältnissen, so stieg mit steigender K-Düngung der Gehalt an K (25 g bei K 0 bis 55 g bei K 400 und K 500) in der Trockenmasse der Pflanzen an, während der Na-Gehalt kontinuierlich sank.

Die Steigerung des K-Gehaltes bei salinen und nichtsalinen Bodenverhältnissen von K 0 nach K 400 betrug 220%. Die Reduzierung des Na-Gehaltes unter nicht salinen Bedingungen von K 0 nach K 400 lag bei ein Viertel und unter salinen Bedingungen wurde der Na-Gehalt in den Pflanzen der beiden Varianten um die Hälfte reduziert. Bei salinen Bodenbedingungen blieb die Summe der beiden Kationen ab der Stufe K 150 konstant, lediglich das Verhältnis zueinander wurde zugunsten von K verbessert.

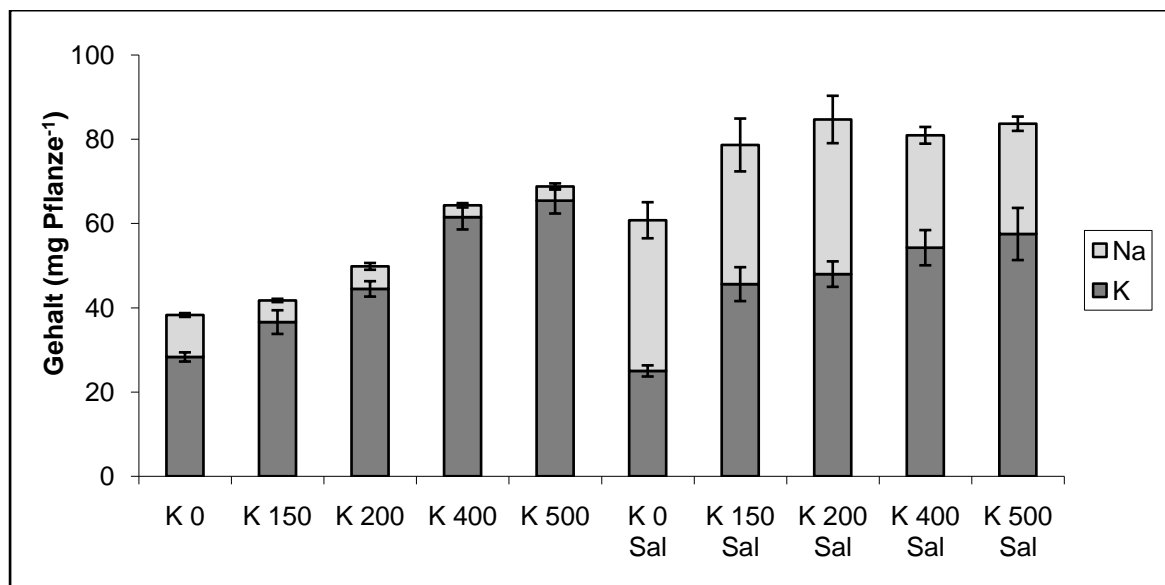


Abbildung 21. Gehalt von K und Na im Spross von *Vicia faba* zu Beginn der Blüte bei steigender K-Düngung (von 0 kg K ha⁻¹, über 150 kg K ha⁻¹, 200 kg K ha⁻¹, 400 kg K ha⁻¹ und 500 kg K ha⁻¹ unter Kontroll- und Salinitätsbedingungen (Sal, 9 dS m⁻¹). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4).

Mit steigendem K-Angebot konnte die K-Konzentration (Abbildung 19) in der Pflanze gesteigert werden, zwischen K 400 und K 500 gab es keine weitere Konzentrationssteigerung. Unter salinen Bodenverhältnissen konnte bei gleicher Steigerung des K-Angebots die Konzentration von Na in der Pflanze gesenkt werden. Die Aufnahme (Abbildung 21) von Na durch *Vicia faba* konnte zwischen der K-Düngestufe K 0 Sal und K 400 Sal um 25% reduziert werden. Der aufsummierte Gehalt von K und Na blieb bereits ab der ersten Düngestufe K 150 Sal konstant bei 80 mg, dahingegen ändert sich das K : Na-Verhältnis zugunsten eines höheren K-Gehaltes in der Pflanze.

Diesen Zusammenhang zeigt Abbildung 22, während bei K 0 Sal das Verhältnis mit 1 : 0,7 noch sehr niedrig war, stieg es bei K 150 Sal und K 200 Sal über 1 : 1,5 bis auf 1 : 2 ab K 400 Sal an.

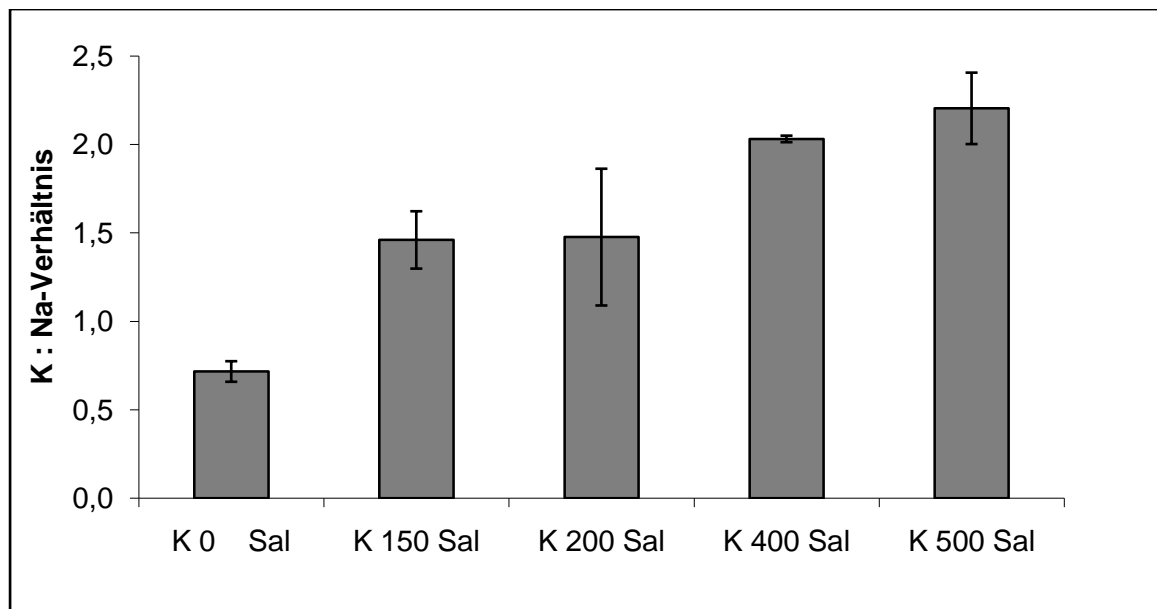


Abbildung 22. Verhältnis von K zu Na im K-Steigerungsversuch im Spross von *Vicia faba* zu Beginn der Blüte bei steigender K-Düngung (von 0 kg K ha⁻¹, über 150 kg K ha⁻¹, 200 kg K ha⁻¹, 400 kg K ha⁻¹ und 500 kg K ha⁻¹ unter Salinitätsbedingungen (Sal, 9 dS m⁻¹). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4).

3.3.2 Versuch zur Verträglichkeit einer K₂SO₄-Blattapplikation

Die Pflanzen in diesem Versuch wurden einen Monat nach der Aussaat mit 100 mL m⁻² einer K₂SO₄-Lösung unterschiedlicher Konzentration behandelt. Die Steigerung der K₂SO₄-Konzentration war von 0%, über 2,5% und 5% bis 10%. Zwei Wochen nach der Behandlung entstanden die beiden nachfolgend gezeigten Aufnahmen in Abbildung 23 und Abbildung 24. Das erste Foto zeigt die Pflanzen aufgereiht mit steigender Konzentration der K₂SO₄-Lösung. Das zweite Bild (Abbildung 24) ist eine Detailaufnahme der Pflanzen aus der höchsten Behandlungskonzentration. Zum Zeitpunkt der Behandlung waren die oberen Blätter noch nicht ausgebildet, auf den unteren sind weiße K₂SO₄-Kristalle zu erkennen. Bis zur Ernte, die einen Monat nach Behandlung erfolgte, wurden alle Blätter von allen Pflanzen einmal pro Tag mit entionisiertem Wasser besprüht.



Abbildung 23. Überblick über die Pflanzen der Kaliumblattapplikation. Die Konzentration der verwendeten K_2SO_4 -Lösung stieg von links 0% über 2,5%, 5% und schließlich 10% an. Aufnahme 14 d nach Blattapplikation.



Abbildung 24. Detailansicht der mit 10%iger K_2SO_4 -Lösung behandelten Pflanzen 14 d nach der Applikation. Untere Blätter wurden behandelt, die oberen Blätter wurden erst danach gebildet.

3.4 Containerversuch Ackerbohnen 2009

Die für das verwendete Substrat optimale K-Düngermenge wurde aufgrund der Ergebnisse des K-Steigerungsversuches für den Containerversuch 2009 auf 400 kg ha^{-1} festgesetzt. Auf den oberen Bodenhorizont von 30 cm bezogen, bedeutet dies eine Menge von $106,7 \text{ mg K (kg Substrat)}^{-1}$.

3.4.1 Vegetatives Wachstum bis zur Blüte

Die Pflanzen, die unter optimal feuchten Verhältnissen ($60\% \text{ WK}_{\text{max}}$) aufwuchsen (Abbildung 25), hatten zum Zeitpunkt der Blüte durch eine Kaliumdüngung signifikant mehr Trockenmasse (10 g) im Vergleich zur $-K$ -Variante (8 g) gebildet. Dürrestress ($40\% \text{ WK}_{\text{max}}$) schränkte die Bildung von Trockenmasse massiv ein, bei mangelhafter Wasserversorgung produzierten die Pflanzen nur rund 3 g pro Pflanze. Weiterhin ist in Abbildung 25 zu sehen, dass durch eine mit 9 dS m^{-1} hohe Salinität im Boden die Trockenmasseproduktion nicht so stark beeinflusst wurde wie durch Dürrestress. Unter salinen Bedingungen stieg die Trockenmasse durch eine Kaliumdüngung tendenziell an.

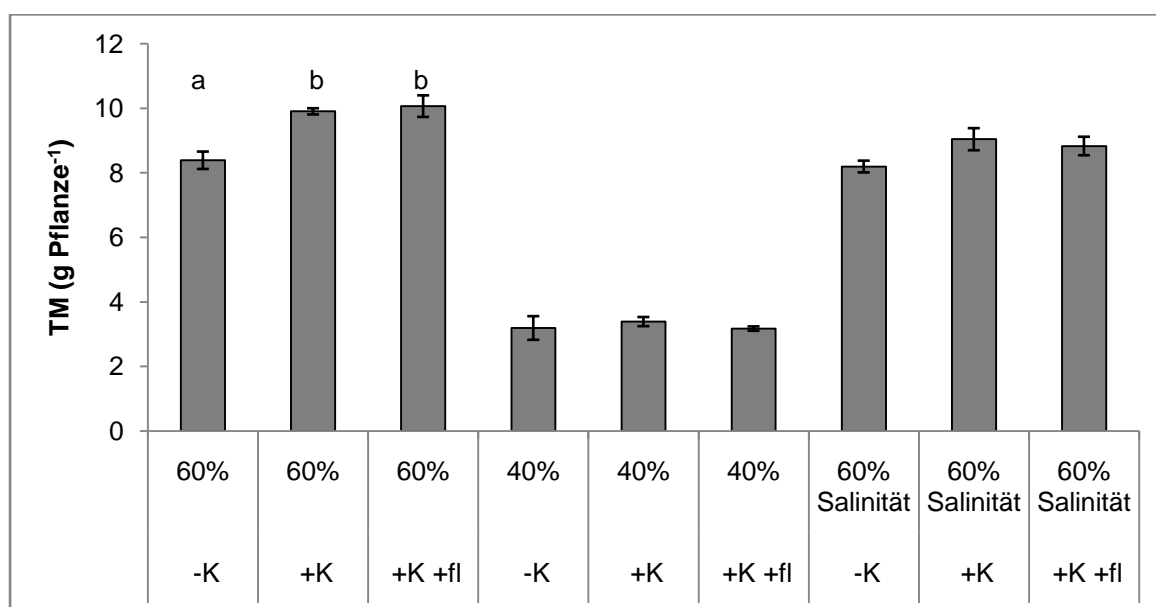


Abbildung 25. Gesamte Trockenmassebildung von *Vicia faba* bis zur Blüte in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung ($60\% \text{ WK}_{\text{max}}$ bzw. $40\% \text{ WK}_{\text{max}}$), sowie der Bodensalinität (9 dS m^{-1}). $-K$ entspricht einer K-Bodendüngung von 50 kg K ha^{-1} , $+K = 400 \text{ kg K ha}^{-1}$ und $+K +fl = 400 \text{ kg K ha}^{-1}$ zzgl. 22 kg K ha^{-1} als Blattapplikation. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ($n = 4$). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p = 0,05$) in der jeweiligen Stressebene bezogen auf die $-K$ -Variante.

Der Einfluss der jeweiligen Wassersituation (ausgelöst durch Dürre bzw. Salinität) auf das Pflanzenwachstum, und damit die Trockenmasseproduktion, veranschaulicht Abbildung 26 deutlich. In diesem Bild sind jeweils die K-Mangelvarianten (-K) aufgeführt. Von links beginnend bei 60% WK_{max} , in der Mitte die Dürrestressvariante (40% WK_{max}) und rechts die Pflanzen der Salinitätsvariante. Diese Fotografie spiegelt die Trockenmassenproduktion der oberen Abbildung wider.



Abbildung 26. *Vicia faba* zum Zeitpunkt der Blüte. Gezeigt sind die jeweiligen -K-Varianten (50 kg K ha⁻¹ als K₂SO₄). Von links bei 60% WK_{max} , 40% WK_{max} und unter salinen Bedingungen (Sal) mit 60% WK_{max} .

Die Konzentrationen von K und Na in den Pflanzen wurden durch die Düngung mit K, wie in Abbildung 27 gezeigt, beeinflusst. Die jüngsten, ausgewachsenen Blätter der Pflanzen, die unter Dürrestress aufwuchsen, wiesen durch eine K-Düngung mit $25 \text{ mg K (g TM)}^{-1}$ zum Zeitpunkt der Blüte die höchste Konzentration von K auf. Ebenso stieg die K-Konzentration durch eine bessere Versorgung mit K bei Salzstress an. Bei Dürre- und Salzstress war der Anstieg statistisch gesichert nachgewiesen, unter optimal feuchten Verhältnissen war ebenfalls ein Anstieg in der Konzentration zu erkennen, allerdings in diesem Fall nicht signifikant zur jeweiligen –K-Variante. Nach BERGMANN (1993) liegt der kritische Wert für eine ausreichende K-Konzentration von *Vicia faba* bei 21 mg g^{-1} . Die Konzentration von Na in den Blättern war in allen Varianten durch eine Düngung mit Kalium signifikant verringert.

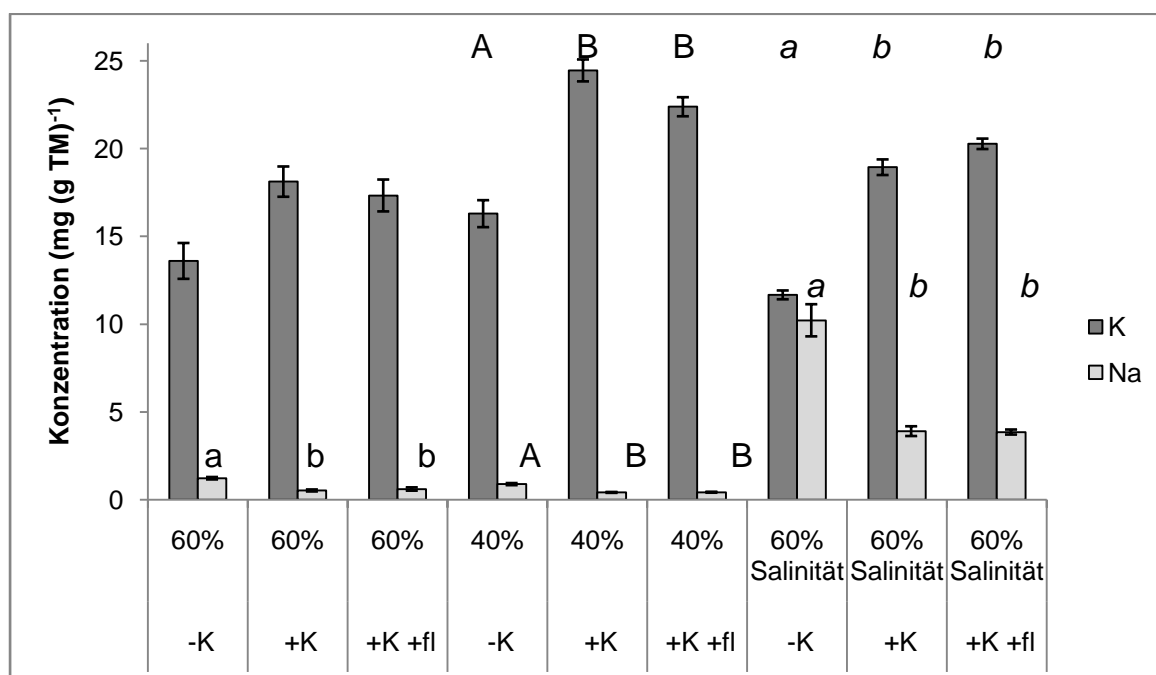


Abbildung 27. Konzentrationen von K und Na in der Trockenmasse der oberen Blätter von *Vicia faba* zum Zeitpunkt der Blüte in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 40% WK_{max}), sowie der Bodensalinität (9 dS m⁻¹). –K entspricht einer K-Bodendüngung von 50 kg K ha^{-1} , +K = 400 kg K ha^{-1} und +K +fl = 400 kg K ha^{-1} zzgl. 22 kg K ha^{-1} als Blattapplikation. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) in der jeweiligen Stressstufe bezogen auf die –K-Variante.

Das Verhältnis der Konzentrationen von K und Na spiegelt sich auch in dem Gehalt der Pflanzen wider, wie in Abbildung 28 gezeigt. In allen Varianten wurde der Gehalt von K mit steigender K-Düngung signifikant erhöht, während der Gehalt von Na signifikant verringert wurde. Der K-Gehalt innerhalb einer K-Versorgungsstufe wurde unter Trockenstress im Vergleich zu den Pflanzen bei optimaler Bodenfeuchte signifikant verringert. Die Pflanzen, die in salinen Bodenverhältnissen aufwuchsen, zeigten den gleichen K-Gehalt innerhalb einer K-Versorgungsstufe wie die Pflanzen bei optimalem Wasserangebot.

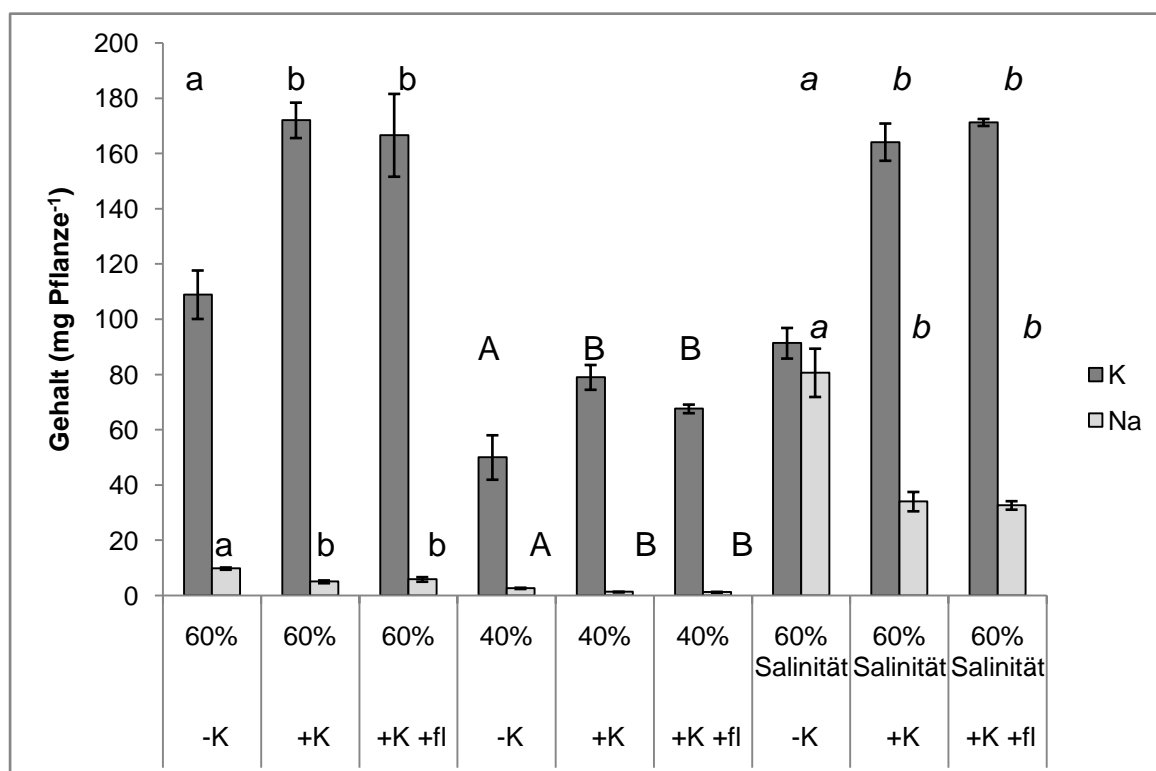


Abbildung 28. Gehalte von K und Na in der Trockenmasse von *Vicia faba* zum Zeitpunkt der Blüte in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 40% WK_{max}), sowie der Bodensalinität (9 $dS\ m^{-1}$). -K entspricht einer K-Bodendüngung von $50\ kg\ K\ ha^{-1}$, +K = $400\ kg\ K\ ha^{-1}$ und +K +fl = $400\ kg\ K\ ha^{-1}$ zzgl. $22\ kg\ K\ ha^{-1}$ als Blattapplikation. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ($n = 4$). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p = 0,05$) in der jeweiligen Stressstufe bezogen auf die -K-Variante.

Die Versorgung mit den Nährstoffen Ca, Mg und P zeigt Tabelle 11. BERGMANN (1993) liefert auch Werte für die kritische Konzentration, für Ca gilt 5 mg g^{-1} , für Mg $2,5 \text{ mg g}^{-1}$ und für P gilt eine Konzentration von $2,5 \text{ mg g}^{-1}$ als ausreichend. Die kritische Nährstoffkonzentration wurde in allen Varianten bei Ca (6 bis 13 mg g^{-1}) und Mg ($2,5$ bis 5 mg g^{-1}) erreicht. Bei Trockenstress erreichte die Konzentration von P lediglich Werte von $1,5 \text{ mg P g}^{-1}$, während bei optimal feuchten Verhältnissen Werte von 3 bis 4 mg g^{-1} erzielt wurden.

Tabelle 11. Konzentrationen von Ca, Mg und P in der Trockenmasse der oberen Blätter von *Vicia faba* zum Zeitpunkt der Blüte in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 40% WK_{max}), sowie der Bodensalinität (9 dS m^{-1}). -K entspricht einer K-Bodendüngung von 50 kg K ha^{-1} , +K = 400 kg K ha^{-1} und +K+fl = 400 kg K ha^{-1} zzgl. 22 kg K ha^{-1} als Blattapplikation. S-Fehler = Standardfehler ($n = 4$).

	Mg		Ca		P	
	mg (g TM) ⁻¹	S-Fehler	mg (g TM) ⁻¹	S-Fehler	mg (g TM) ⁻¹	S-Fehler
Grenzwert (BERGMANN 1993)	2,5		5,0		2,5	
-K 60%	4,8 ± 0,43		11,3 ± 1,02		4,4 ± 0,28	
+K 60%	3,3 ± 0,27		9,2 ± 0,86		3,5 ± 0,11	
+K+fl 60%	3,2 ± 0,25		8,9 ± 0,91		3,1 ± 0,21	
-K 40%	4,5 ± 0,15		13,1 ± 0,77		1,5 ± 0,11	
+K 40%	4,3 ± 0,13		13,4 ± 0,62		1,5 ± 0,11	
+K+fl 40%	4,2 ± 0,13		13,9 ± 0,54		1,5 ± 0,01	
-K 60% Salinität	2,7 ± 0,10		6,3 ± 0,25		3,3 ± 0,24	
+K 60% Salinität	2,5 ± 0,10		6,1 ± 0,44		3,1 ± 0,17	
+K+fl 60% Salinität	2,9 ± 0,24		6,4 ± 0,30		3,3 ± 0,07	

Die mit dem Blattflächenscanner ermittelten Blattflächen zu Beginn der Blüte sind in Abbildung 29 dargestellt. Unter optimal feuchten Verhältnissen lag die Blattfläche mit 1.200 bis 1.400 cm² pro Pflanze auf dem gleichen Niveau wie bei den Pflanzen (1.200 cm²), die in salinen Bedingungen kultiviert wurden. Lediglich Dürrestress (40% WK_{max}) reduzierte die Blattfläche auf 400 cm² pro Pflanze.

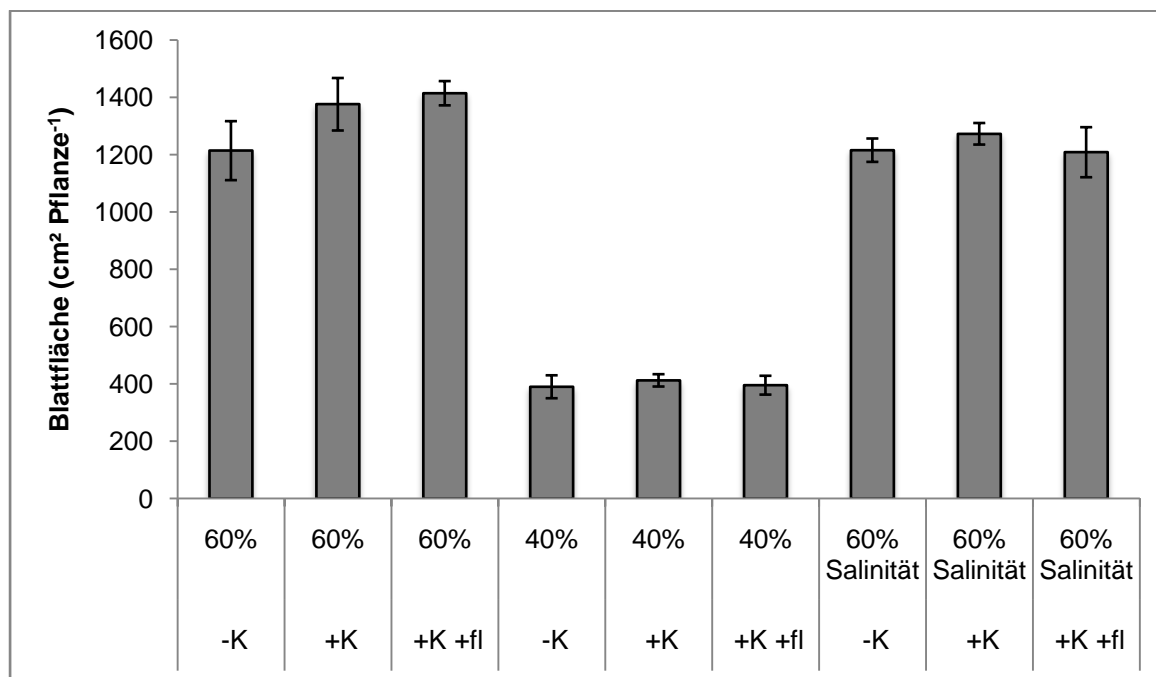


Abbildung 29. Blattfläche pro Pflanze zum Zeitpunkt der Blüte in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 40% WK_{max}), sowie der Bodensalinität (9 dS m⁻¹). -K entspricht einer K-Bodendüngung von 50 kg K ha⁻¹, +K = 400 kg K ha⁻¹ und +K +fl = 400 kg K ha⁻¹ zzgl. 22 kg K ha⁻¹ als Blattapplikation. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Keine signifikanten Unterschiede (p = 0,05) in der jeweiligen Stressstufe bezogen auf die -K-Variante.

Bis zu Beginn der Blüte verbrauchten die Pflanzen bei optimaler Wasser- und Nährstoffversorgung (in den Varianten 60% WK_{max} +K und 60% WK_{max} +K + fl) mit rund 3,5 L signifikant das meiste Wasser pro Pflanze (Abbildung 30). Bei K-Mangel und ausreichendem Wasserangebot (60% WK_{max} -K) wurden nur 3 L benötigt. Saline Bodenverhältnisse führten zu einer weiteren Senkung des Wasserverbrauchs, die Pflanzen aller salinen Varianten verbrauchten 2,7 L Wasser. Die Pflanzen, die unter Trockenstress kultiviert wurden, verbrauchten bis zur Blüte nur 0,7 L Wasser pro Pflanze.

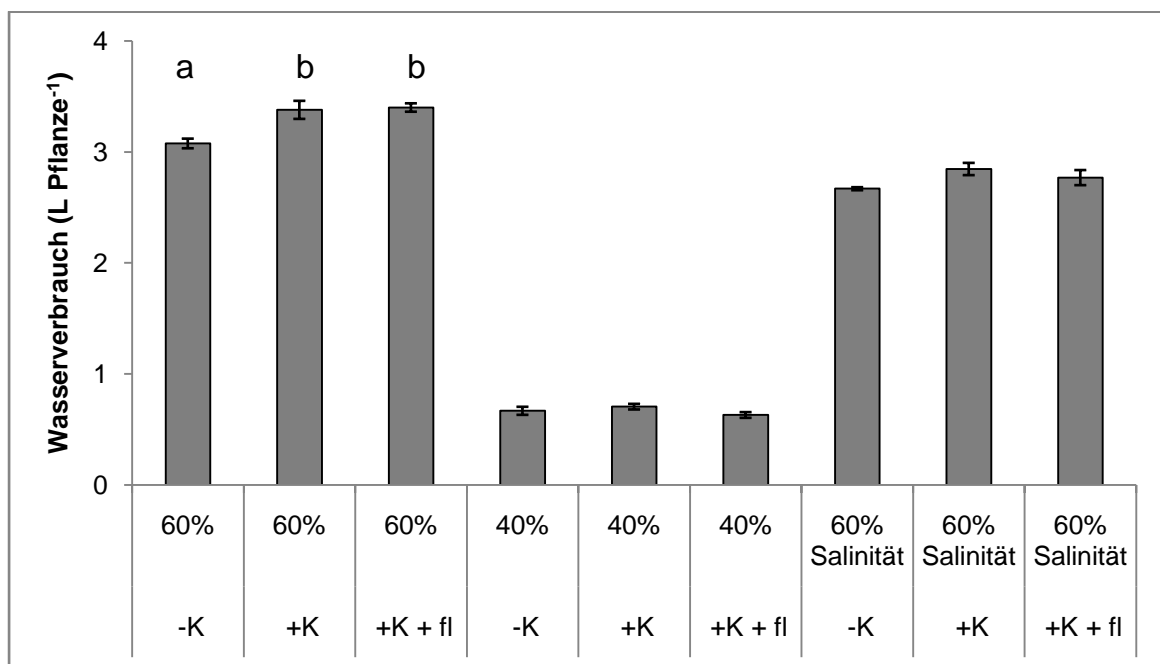


Abbildung 30. Wasserverbrauch pro Pflanze von *Vicia faba* bis zum Zeitpunkt der Blüte in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 40% WK_{max}), sowie der Bodensalinität (9 dS m⁻¹). -K entspricht einer K-Bodendüngung von 50 kg K ha⁻¹, +K = 400 kg K ha⁻¹ und +K + fl = 400 kg K ha⁻¹ zzgl. 22 kg K ha⁻¹ als Blattapplikation. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) in der jeweiligen Stressstufe bezogen auf die -K-Variante.

Während der Wachstumsphase vom 24.03.2009 bis 23.07.2009 betrug die Durchschnittstemperatur 17,7°C (Minimum Temp: -1°C, Maximum Temp: 44°C), dabei wurde eine Temperatursumme von 2.029°C erzielt. Der Temperaturverlauf in der Vegetationshalle ist zum einen durch hohe Spitzenwerte am Tag bei voller Sonneneinstrahlung sowie geringer Abkühlung in der Nacht gekennzeichnet.

Die Transpiration während der vegetativen Phase bezogen auf die Blattfläche zur Blüte zeigt Abbildung 31. Wuchsen die Pflanzen bei optimal feuchten, nichtsalinen Bodenverhältnissen, verdunsteten sie $2,5 \text{ mg Wasser cm}^{-2}$. Durch Trockenstress sank die Transpiration auf $1,7 \text{ mg Wasser cm}^{-2}$. Der Trend, dass durch eine K-Düngung die Transpiration bei $60\% \text{ WK}_{\text{max}}$ und $40\% \text{ WK}_{\text{max}}$ gesenkt wurde, ist statistisch nicht absicherbar. Bei salinen Bodenverhältnissen verdunsteten die Pflanzen rund $2,2 \text{ mg Wasser cm}^{-2}$ und brauchten damit etwas weniger als bei nichtsalinen Bedingungen.

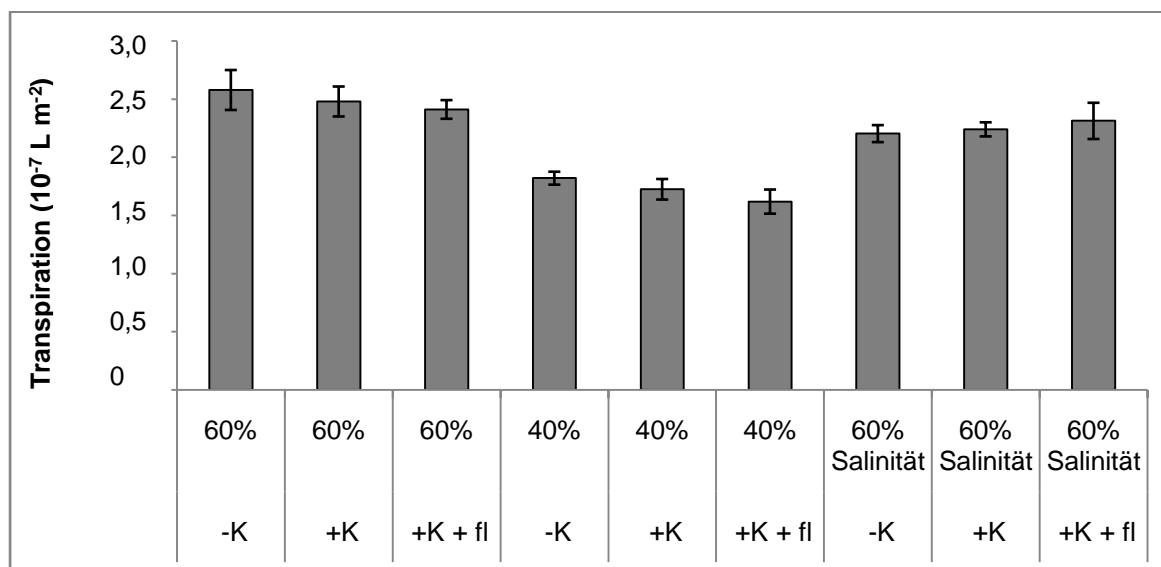


Abbildung 31. Transpiration von Wasser pro Blattfläche von *Vicia faba* bis zum Zeitpunkt der Blüte in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung ($60\% \text{ WK}_{\text{max}}$ bzw. $40\% \text{ WK}_{\text{max}}$), sowie der Bodensalinität (9 dS m^{-1}). -K entspricht einer K-Bodendüngung von 50 kg K ha^{-1} , +K = 400 kg K ha^{-1} und +K + fl = 400 kg K ha^{-1} zzgl. 22 kg K ha^{-1} als Blattapplikation. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ($n = 4$). Keine signifikanten Unterschiede ($p = 0,05$) in der jeweiligen Stressebene bezogen auf die -K-Variante.

Die Wasserpotentiale sind in Abbildung 32 als schwarze Balken, die osmotischen Potentiale als graue und die Turgorpotentiale als weiße Balken dargestellt. Bei optimal feuchten Verhältnissen im Boden lag das Wasserpotential bei $-0,6$ MPa. Das Wasserpotential wurde bei Trockenstress auf $-1,1$ MPa und bei Salinität im Boden auf $-0,8$ MPa weiter abgesenkt. Diese Absenkung ging mit der Verringerung des osmotischen Potentials einher. Lag es bei optimal feuchten Bedingungen bei $-0,8$ MPa ($-K$ 60% WK_{max}) bzw. $-0,9$ MPa ($+K$ 60% WK_{max} und $+K$ +fl 60% WK_{max}), so wurde es bei Trockenstress auf $-1,3$ MPa und $-1,0$ MPa bei salinen Zuständen gesenkt. Der Turgor blieb mit $0,3$ MPa in allen Varianten annähernd konstant.

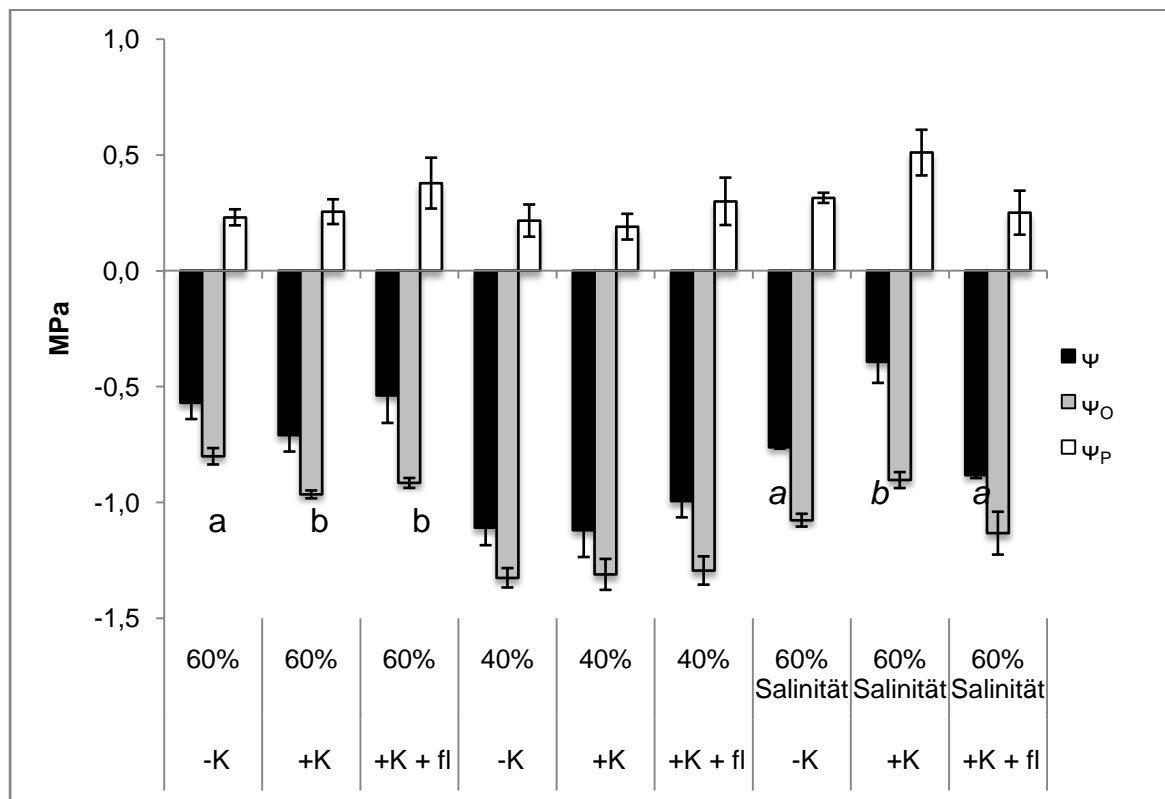


Abbildung 32. Wasserpotential ψ , osmotisches Potential ψ_o und Turgor ψ_p von *Vicia faba* zum Zeitpunkt der Blüte in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 40% WK_{max}), sowie der Bodensalinität (9 dS m^{-1}). $-K$ entspricht einer K-Bodendüngung von 50 kg K ha^{-1} , $+K = 400 \text{ kg K ha}^{-1}$ und $+K + fl = 400 \text{ kg K ha}^{-1}$ zzgl. 22 kg K ha^{-1} als Blattapplikation. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ($n = 4$). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p = 0,05$) in der jeweiligen Stressstufe bezogen auf die $-K$ -Variante.

Der Quotient aus TM und Wasserverbrauch liefert die Wassernutzungseffizienz (WUE_{DM}). In Abbildung 33 ist der Quotient aus gebildeter Trockenmasse des kompletten Aufwuchses von *Vicia faba* bis zur Blüte in kg und verbrauchtem Wasser in L abgebildet. Die Pflanzen bildeten bei optimaler Bodenfeuchte sowohl unter nichtsalinen als auch unter salinen Bodenbedingungen knapp $3 \text{ g TM (L Wasser)}^{-1}$ aus. Ein positiver Einfluss der Kaliumdüngung konnte nicht statistisch abgesichert werden. Jedoch produzierten die Pflanzen bei Trockenstress zwischen $4,4 \text{ g TM (L Wasser)}^{-1}$ bei K-Mangel und $5 \text{ g TM (L Wasser)}^{-1}$ bei optimaler K-Düngung mit zusätzlicher Blattapplikation signifikant mehr Trockenmasse pro L verbrauchtem Wasser.

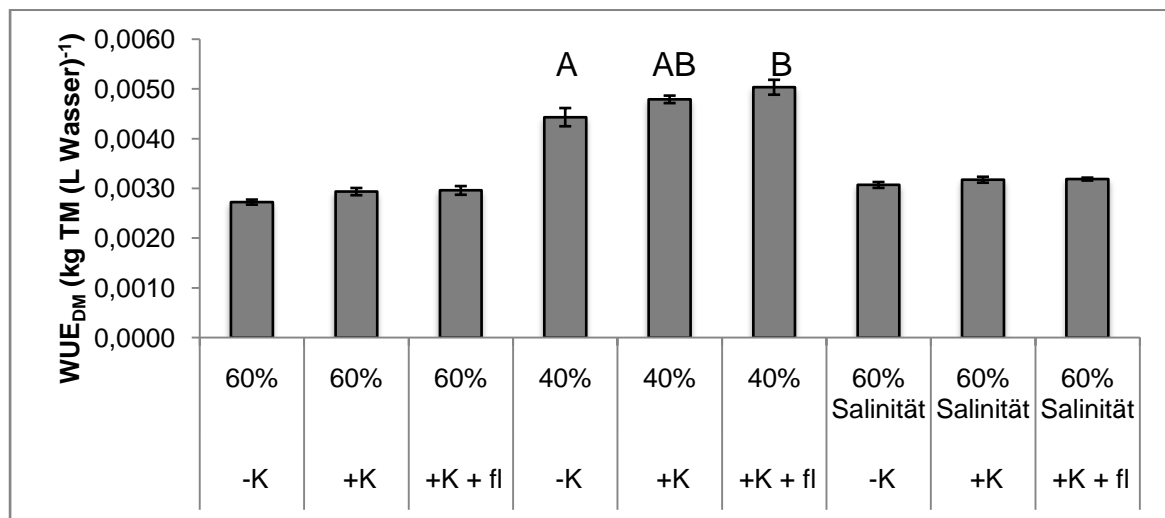


Abbildung 33. WUE_{DM} von *Vicia faba* L. zum Zeitpunkt der Blüte in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 40% WK_{max}), sowie der Bodensalinität (9 dS m^{-1}). -K entspricht einer K-Bodendüngung von 50 kg K ha^{-1} , +K = 400 kg K ha^{-1} und +K + fl = 400 kg K ha^{-1} zzgl. 22 kg K ha^{-1} als Blattapplikation. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ($n = 4$). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p = 0,05$) in der jeweiligen Stressebene bezogen auf die -K-Variante.

Die WUE_{DM} wurde durch eine bessere Kaliumversorgung nur bei den Pflanzen verbessert, die unter Trockenstress aufwuchsen (Abbildung 33). Die Betrachtung der prozentualen Beziehung zwischen K-Düngung und WUE_{DM} , wie in Abbildung 34 dargestellt, zeigt, dass die WUE_{DM} bis zum Zeitpunkt der Blüte in allen Varianten im Vergleich zur jeweiligen -K-Variante gesteigert wurde. Bei optimalem Wasserangebot betrug die Steigerung 8%, bei salinen Bodenverhältnissen immerhin noch 4%. Bei Dürrestress konnte die WUE_{DM} um 8%

in der +K-Variante und sogar um 14% in der +K+fl-Variante gesteigert werden. Mit steigender K-Versorgung stieg der Wasserverbrauch der Pflanzen um 5 bis 10% an, mit einer Ausnahme in der Variante, bei der die Pflanzen eine zusätzliche K_2SO_4 -Blattapplikation erhielten. Diese Pflanzen verbrauchten bei relativer Betrachtung 5% weniger Wasser als bei K-Mangel. Mit steigender K-Versorgung und ansteigendem Wasserverbrauch wurden bei optimaler Bodenfeuchte 20% mehr TM und bei salinen Bodenbedingungen 10% mehr TM gebildet. Der Anstieg der TM bei Dürrestress in der +K-Variante betrug rund 6%, während die Pflanzen mit zusätzlicher Blattapplikation nicht mehr TM bilden konnten als bei K-Mangel.

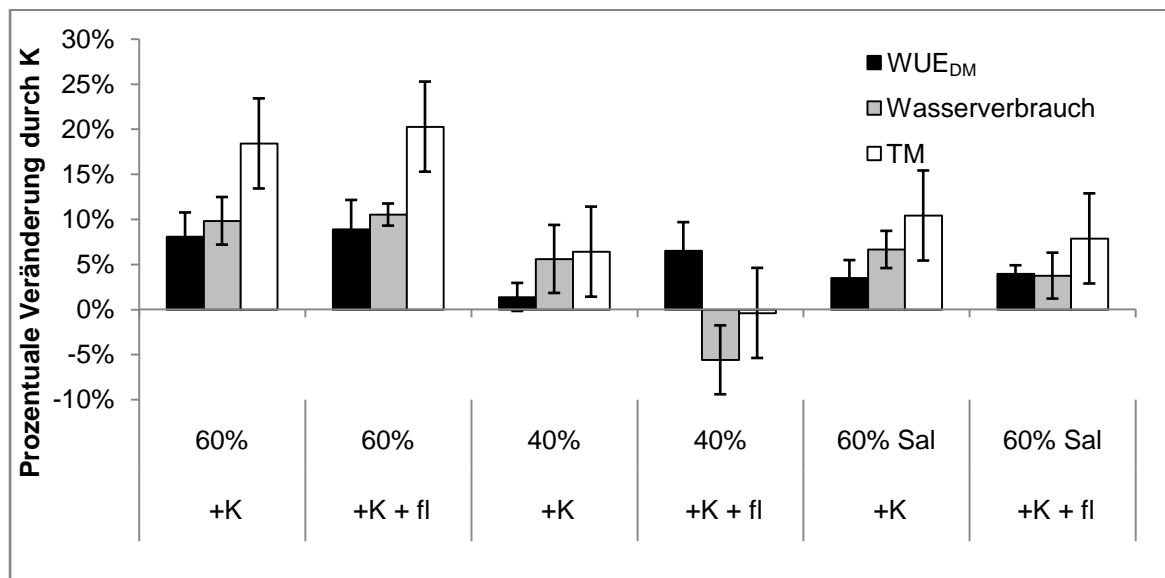


Abbildung 34. Prozentuale Steigerung der WUE_{DM} (schwarze Balken) von *Vicia faba* pro Pflanze im Vergleich zur prozentualen Steigerung des Wasserverbrauches (graue Balken) und der prozentualen Steigerung der TM-Produktion (weiße Balken). Mittelwert der jeweiligen -K-Variante = 0%. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ($n = 4$). WUE_{DM} bezogen auf die Trockenmasse (TM) zum Zeitpunkt der Blüte in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 40% WK_{max}) sowie der Bodensalinität (9 dS m^{-1}). -K entspricht einer K-Bodendüngung von 50 kg K ha^{-1} , +K = 400 kg K ha^{-1} und +K + fl = 400 kg K ha^{-1} zzgl. 22 kg K ha^{-1} als Blattapplikation.

3.4.2 Kornertrag und Wassernutzungseffizienz von Ackerbohnen bis zur Reife

Am 23.07.2009 wurden die Ackerbohnenpflanzen reif geerntet. In diesem Versuchsjahr reagierten die Pflanzen auf die Kaliumdüngung positiv. Bei optimal feuchten Bodenbedingungen (60% WK_{max}) stieg der Kornertrag von 300 g Container⁻¹ auf 370 g Container⁻¹ an (s. Abbildung 35). Auch unter Trockenstress konnte eine Ertragssteigerung von 65 g Container⁻¹ bei -K über 75 g Container⁻¹ bei +K nach 80 g Container⁻¹ bei +K +fl festgestellt werden, allerdings war dieser Anstieg nicht statistisch abzusichern. Bei salinen Bodenverhältnissen stieg der Kornertrag durch eine bessere K-Versorgung signifikant um 25 g Container⁻¹ an.

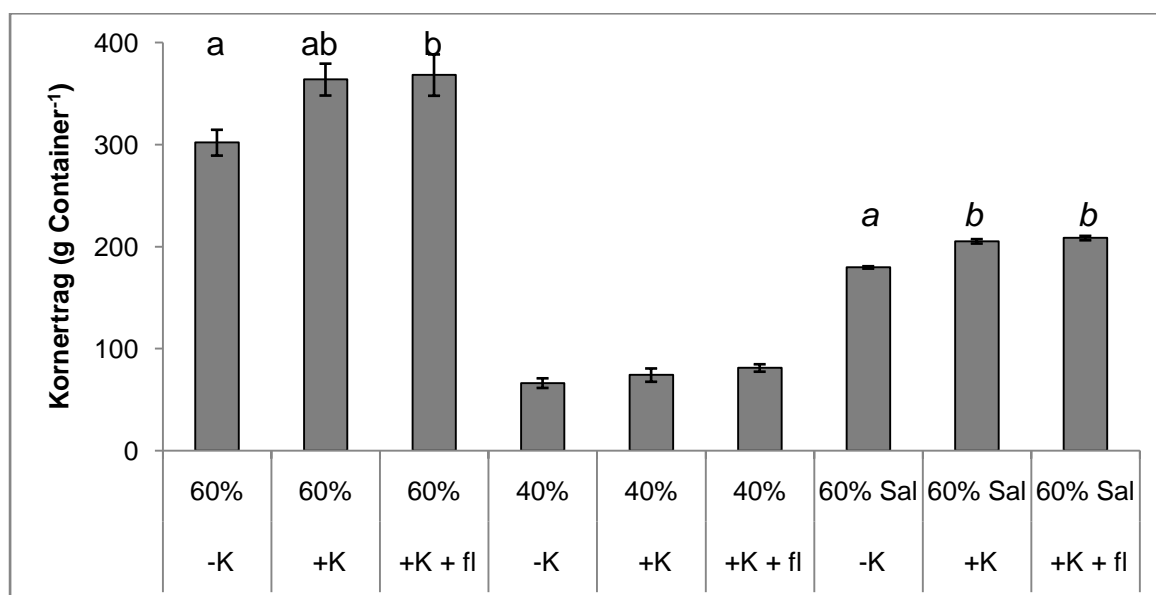


Abbildung 35. Kornertrag von *Vicia faba* pro Pflanze zum Zeitpunkt der Ernte in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 30% WK_{max}), sowie der Bodensalinität (9 dS m^{-1}). -K entspricht einer K-Bodendüngung von 50 kg K ha^{-1} , +K = 400 kg K ha^{-1} und +K +fl = 400 kg K ha^{-1} zzgl. 22 kg K ha^{-1} als Blattapplikation. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) in der jeweiligen Stressebene bezogen auf die -K-Variante.

Das Tausendkorngewicht (TKG) wurde bei optimal feuchten Bedingungen durch eine gute K-Versorgung von 510 g bei –K auf 540 g +K +fl signifikant gesteigert. Weiterhin zeigt Abbildung 36, dass das TKG bei Trockenstress mit 580 g höher war, als bei optimalem Wasserangebot. Bei salinem Boden hatte die K-Düngung keinen Einfluss auf das TKG, mit 520 g lag es in dem Bereich der nichtsalinen Varianten.

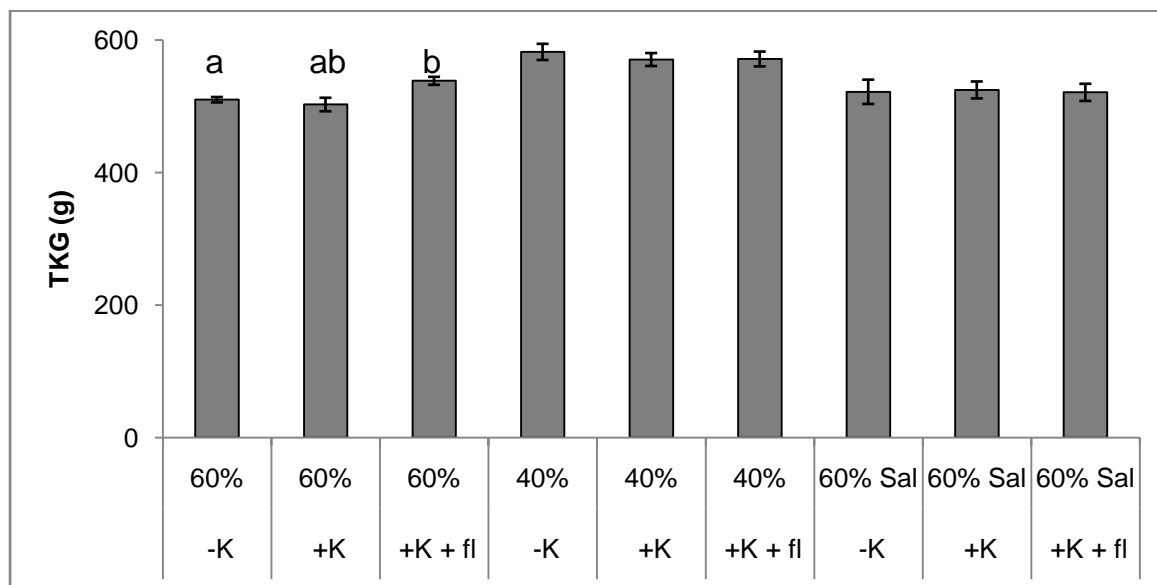


Abbildung 36. Tausendkorngewicht (TKG) von *Vicia faba* zum Zeitpunkt der Ernte in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 30% WK_{max}), sowie der Bodensalinität (9 dS m^{-1}). –K entspricht einer K-Bodendüngung von 50 kg K ha^{-1} , +K = 400 kg K ha^{-1} und +K +fl = 400 kg K ha^{-1} zzgl. 22 kg K ha^{-1} als Blattapplikation. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ($n = 4$). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p = 0,05$) in der jeweiligen Stressstufe bezogen auf die –K-Variante.

Als weiterer ertragsbestimmender Parameter ist die Anzahl der Körner pro Pflanze in Abbildung 37 gezeigt. Eine K-Düngung bewirkte einen Anstieg in der Anzahl der Körner pro Pflanze, dies ist bei optimalem Wasserangebot sowohl unter Kontrollverhältnissen als auch bei salinen Bodenverhältnissen signifikant nachweisbar. Bei nicht salinen Bodenverhältnissen stieg die Anzahl von 60 Körnern pro Pflanze bei K-Mangel auf 70 Körner pro Pflanze bei +K an. Bei Trockenstress wurden generell weniger Körner pro Pflanze ausgebildet. Durch K-Mangel und Trockenstress waren die Pflanzen nur in der Lage elf Körner auszubilden, eine verbesserte Kaliumversorgung erhöhte die Anzahl im Mittel um drei Körner pro Pflanze. Bei versalztem Boden produzierten die Pflanzen bei K-Mangel 35 Körner und durch eine Kaliumdüngung wurden rund 40 Körner pro Pflanze gebildet.

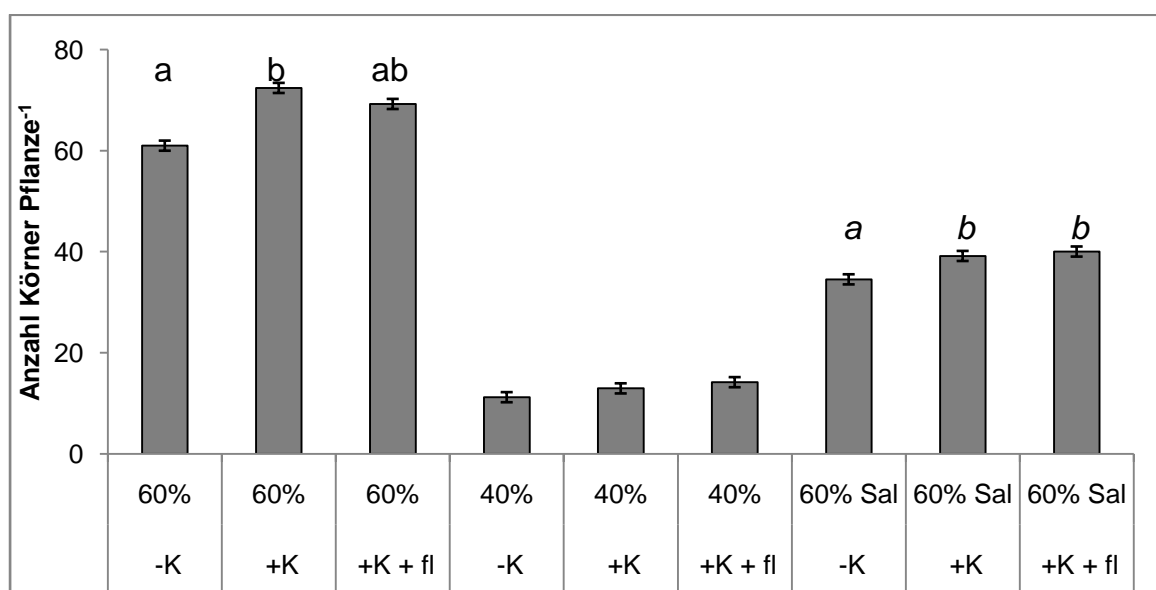


Abbildung 37. Anzahl Körner von *Vicia faba* pro Pflanze zum Zeitpunkt der Ernte in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 30% WK_{max}), sowie der Bodensalinität (9 $dS\ m^{-1}$). -K entspricht einer K-Bodendüngung von $50\ kg\ K\ ha^{-1}$, +K = $400\ kg\ K\ ha^{-1}$ und +K + fl = $400\ kg\ K\ ha^{-1}$ zzgl. $22\ kg\ K\ ha^{-1}$ als Blattapplikation. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ($n = 4$). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p = 0,05$) in der jeweiligen Stressstufe bezogen auf die -K-Variante.

Während der Vegetationsphase wurde kontinuierlich der Wasserverbrauch erfasst. In Abbildung 38 ist der Wasserverbrauch pro Pflanze dargestellt. Die Ackerbohnen reagierten durch eine bessere K-Versorgung tendentiell mit einem steigenden Wasserverbrauch. Stand den Pflanzen kontinuierlich ausreichend Wasser zur Verfügung (60% WK_{max}), stieg der Wasserverbrauch von 19 L bei -K auf 22 L bei optimalem K-Angebot an. Bei Trockenstress stieg der Wasserverbrauch von 4,7 L bei K-Angebot nur leicht an. Ein signifikanter Anstieg des Wasserbedarfes durch Kalium ist bei den Pflanzen nachweisbar, die unter salinen Bodenbedingungen kultiviert wurden. Generell verbrauchten diese Pflanzen weniger als die Kontrollpflanzen. Aber mit steigendem K-Angebot wuchs der Wasserverbrauch von 10 L (-K) auf 11,5 L (+K +fl) an.

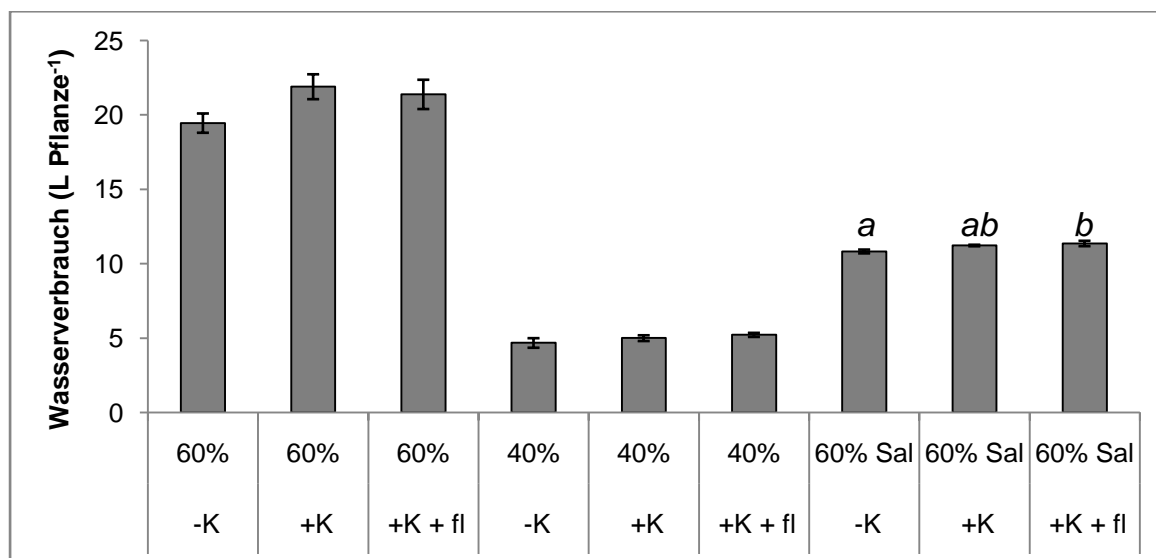


Abbildung 38. Wasserverbrauch von *Vicia faba* pro Pflanze bis zum Zeitpunkt der Ernte in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 30% WK_{max}), sowie der Bodensalinität (9 dS m^{-1}). -K entspricht einer K-Bodendüngung von 50 kg K ha^{-1} , +K = 400 kg K ha^{-1} und +K +fl = 400 kg K ha^{-1} zzgl. 22 kg K ha^{-1} als Blattapplikation. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p = 0,05$) in der jeweiligen Stressebene bezogen auf die -K-Variante.

Während der Wachstumsphase vom 24.03.2009 bis 23.07.2009 betrug die Durchschnittstemperatur 17,9°C (Minimum Temp: -1°C, Maximum Temp: 44°C), dabei wurde eine Temperatursumme von 2.484°C erzielt.

Die Wassernutzungseffizienz von *Vicia faba* bezogen auf den gebildeten Kornertrag (WUE_Y) zeigt Abbildung 39. Mit einer verbesserten Kaliumversorgung über den Boden, resp. zusätzlich über die Blätter, kam es zu einer besseren Ausnutzung des verfügbaren Wassers. Bei 60% WK_{max} (nicht salin und salin) stieg die WUE_Y signifikant um 10% durch Kalium an. Unter Trockenstress (40% WK_{max}) ist der Anstieg nicht statistisch nachweisbar. Mit ca. 15 g TM (L Wasser)⁻¹ liegt die WUE_Y bei 40% WK_{max} unterhalb der –K-Variante 60% WK_{max} (16 g TM (L Wasser)⁻¹).

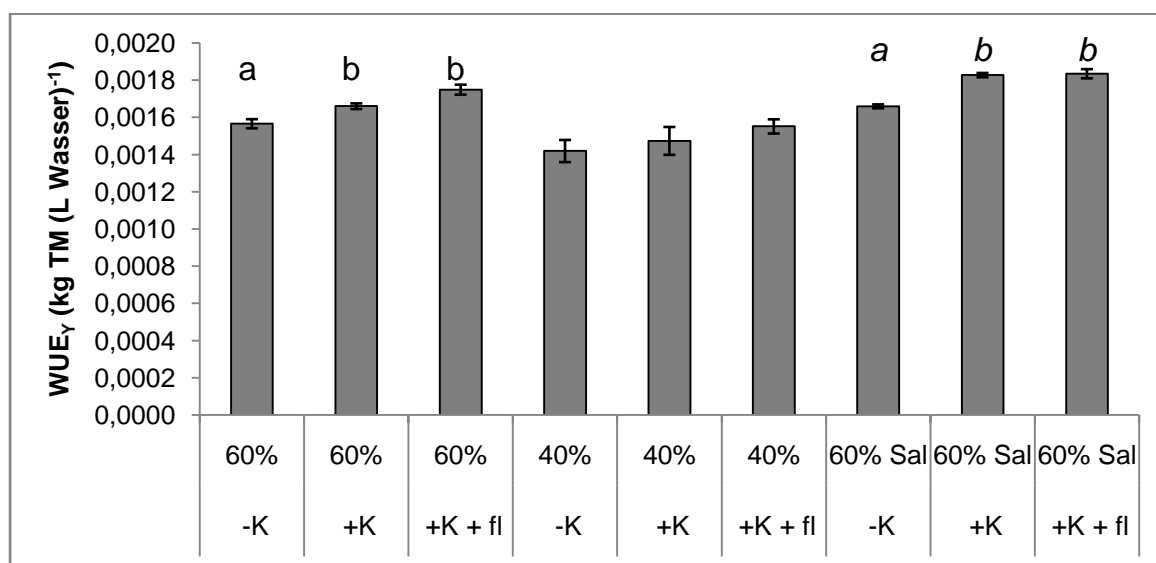


Abbildung 39. Wassernutzungseffizienz von *Vicia faba* pro Pflanze bezogen auf den Ertrag (WUE_Y) zum Zeitpunkt der Ernte in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 30% WK_{max}) sowie der Bodensalinität (9 dS m⁻¹). –K entspricht einer K-Bodendüngung von 50 kg K ha⁻¹, +K = 400 kg K ha⁻¹ und +K + fl = 400 kg K ha⁻¹ zzgl. 22 kg K ha⁻¹ als Blattapplikation. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p = 0,05) in der jeweiligen Stressstufe bezogen auf die –K-Variante.

Die WUE_Y stieg durch eine bessere K-Versorgung an, dieser Anstieg wird bei prozentualer Betrachtung deutlich. In Abbildung 40 zeigen die schwarzen Balken die prozentuale Verbesserung der WUE_Y in den Varianten bezogen auf die jeweilige –K-Variante. Bei optimalem Wasserangebot betrug der Anstieg 5% (+K) bzw. 12% (+K+fl), die Pflanzen verbrauchten ca. 12% mehr Wasser (graue Balken), jedoch konnten die Pflanzen zwischen 16% (+K) und 22% (+K+fl) mehr TM bilden. Wuchsen die Pflanzen in einem salinen Bodensubstrat auf, so konnte auch die WUE_Y signifikant gesteigert werden, die prozentuale Steigerung betrug 10%. Ebenfalls wie bei nichtsalinen Bodenbedingungen stieg der Wasserverbrauch um 5% an. Dennoch überwog der Anstieg der TM-Produktion. Durch eine bessere K-Versorgung der Pflanzen konnte auch bei salinen Bedingungen die TM um 15% gesteigert werden.

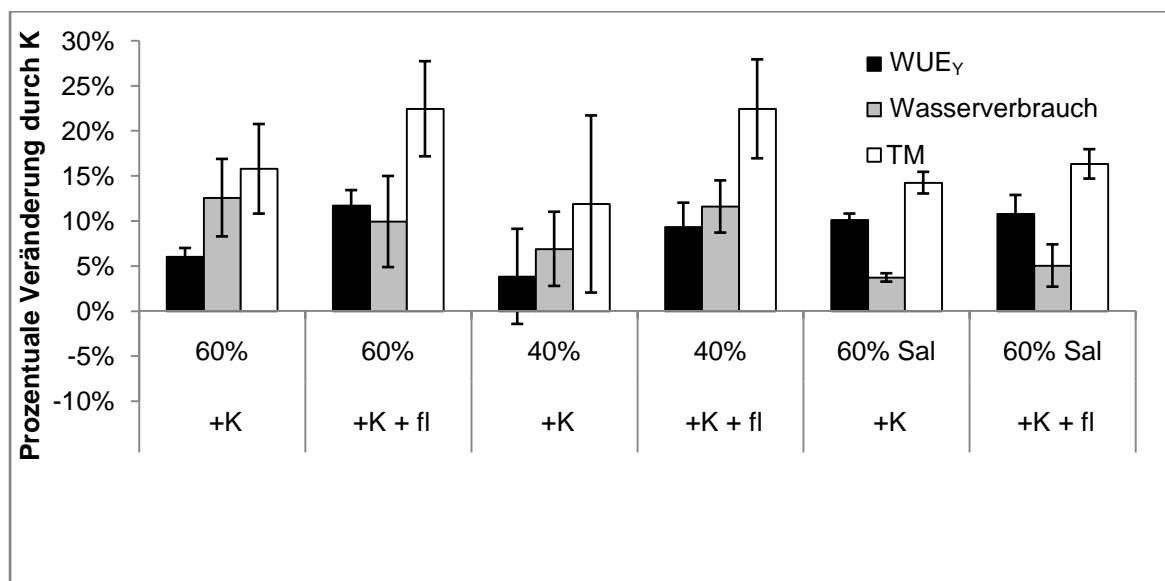


Abbildung 40. Prozentuale Steigerung der WUE_Y (schwarze Balken) von *Vicia faba* pro Pflanze im Vergleich zur prozentualen Steigerung des Wasserverbrauches (graue Balken) und der prozentualen Steigerung der TM-Produktion (weiße Balken). Mittelwert der jeweiligen –K-Variante = 0%. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). WUE_Y bezogen auf den Kornertag in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 40% WK_{max}) sowie der Bodensalinität (9 dS m^{-1}). –K entspricht einer K-Bodendüngung von 50 kg K ha^{-1} , +K = 400 kg K ha^{-1} und +K +fl = 400 kg K ha^{-1} zzgl. 22 kg K ha^{-1} als Blattapplikation.

3.5 Containerversuch Sommerweizen

3.5.1 Vegetatives Wachstum

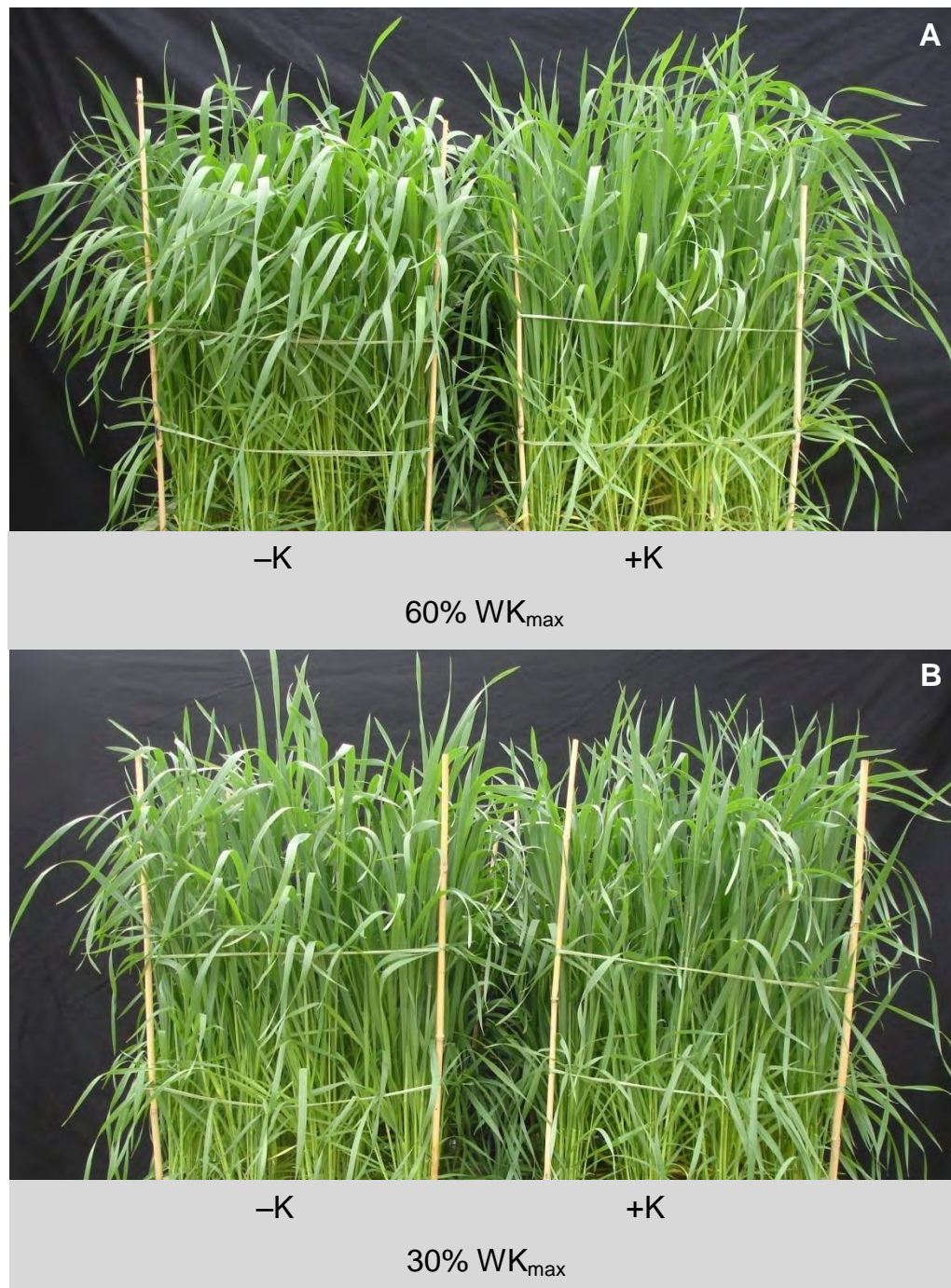


Abbildung 41. Einfluss der K-Versorgung auf das Wachstum von *Triticum aestivum* bei **A** optimal feuchten Bodenbedingungen (60% WK_{max}) und **B** Dürrestress (30% WK_{max}). -K = 50 kg K ha^{-1} , +K = 400 kg K ha^{-1} . Entwicklungsstadium EC 41 Aufnahme vom 05.05.2009.

Der Einfluss der Kaliumversorgung und des Wasserangebotes auf das Wachstum der Weizenpflanzen in der vegetativen Wachstumsphase ist in Abbildung 41 im Stadium BBCH 41 (WEBER und BLEIHOLDER, 1990) gezeigt. Der Ernährungszustand der Weizenpflanzen für Kalium wurde anhand von drei Zwischenernten zu den Wachstumsstadien BBCH 57 (eine Woche vor der Blüte), BBCH 65 (während der Hauptblüte) und BBCH 71 (eine Woche nach der Blüte) überprüft. In Abbildung 42 sind die Konzentrationen von Kalium im Spross der Weizenpflanzen zu den jeweiligen Wachstumsstadien abgebildet. Von links beginnend sind die Mittelwerte der Varianten bei optimal feuchten Bodenverhältnissen zu sehen, die beiden rechten Blöcke zeigen die Mittelwerte der Pflanzen, die unter Wasserstress (30% WK_{max}) ab BBCH 31 kultiviert wurden. Innerhalb einer Wasserversorgungsstufe sind links die Mittelwerte der Pflanzen der Kaliummangelvariante (-K, 50 kg K ha⁻¹) und rechts die der optimal mit K (+K, 400 kg K ha⁻¹) versorgten Pflanzen abgebildet. Durch eine K-Düngung wurde die Konzentration in den Weizenpflanzen sowohl bei optimal feuchten Bodenverhältnissen als auch unter Wasserstress in den drei Wachstumsstadien signifikant erhöht. Nach dem Wechsel von der vegetativen Phase (BBCH 57) in die generative Phase (BBCH 71) sank die Konzentration von K in allen Varianten ab.

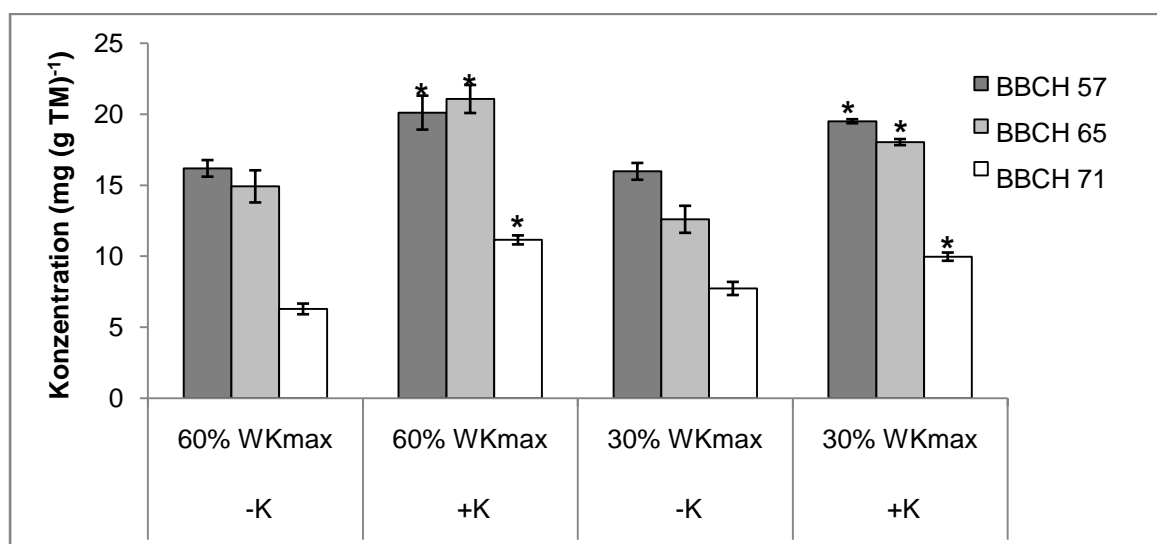


Abbildung 42. Kaliumkonzentration im Spross der Weizenpflanzen in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 30% WK_{max}) zu verschiedenen Entwicklungsstadien (BBCH 57, 65, 71). -K entspricht einer Bodendüngung mit 50 kg K ha⁻¹, +K = 400 kg K ha⁻¹. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). * kennzeichnet signifikante Unterschiede (p = 0,05) in der jeweiligen Wasserversorgungsstufe bezogen auf die jeweilige -K-Variante.

Der Gehalt von Kalium in den Weizenpflanzen ist in Abbildung 43 abgebildet. Analog zu der K-Konzentration in der Pflanze stieg der Gehalt durch eine K-Düngung signifikant sowohl bei optimaler Bodenfeuchte als auch bei Dürrestress an. Die Gehalte an K unterschieden sich nicht im Bezug auf die Bodenfeuchtigkeit.

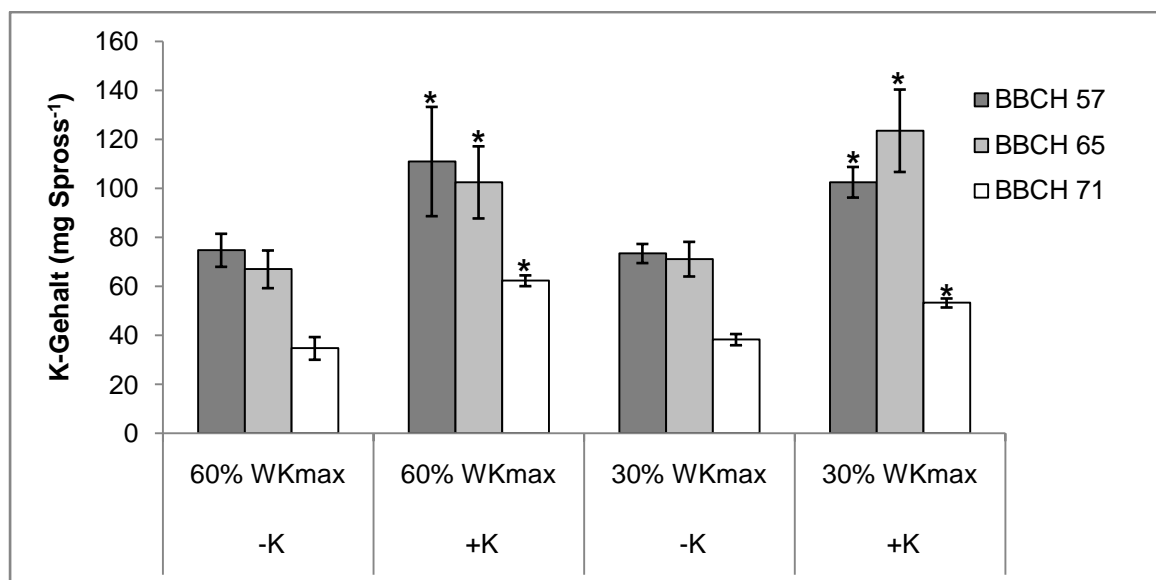


Abbildung 43. Kaliumgehalt im Weizenspross in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 30% WK_{max}) zu verschiedenen Entwicklungsstadien (BBCH 57, BBCH 65, BBCH 71). -K entspricht einer Bodendüngung mit 50 kg K ha⁻¹, +K = 400 kg K ha⁻¹. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). * kennzeichnet signifikante Unterschiede (p = 0,05) in der jeweiligen Wasserversorgungsstufe bezogen auf die jeweilige -K-Variante.

3.5.2 Ertrags- und Qualitätsparameter von Sommerweizen

Sobald die Weizenpflanzen erntereif waren, wurden nachfolgend beschriebene Ertrags- und Qualitätsparameter erfasst. Zunächst zeigt Abbildung 44 den Korn- und Strohertrag in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung. Der Kornertrag wurde durch eine Kaliumdüngung nicht beeinflusst, bei optimal feuchten Bodenverhältnissen lag der Ertrag mit $220 \text{ g Container}^{-1}$ höher als bei Trockenstress ($200 \text{ g Container}^{-1}$). Die Strohproduktion wurde bei feuchten Bodenverhältnissen durch eine K-Düngung signifikant um $10 \text{ g Container}^{-1}$ gesteigert. Bei Trockenstress konnte kein Einfluss der K-Düngung auf die Strohproduktion festgestellt werden, die Pflanzen dieser Varianten produzierten jeweils $130 \text{ g Stroh Container}^{-1}$.

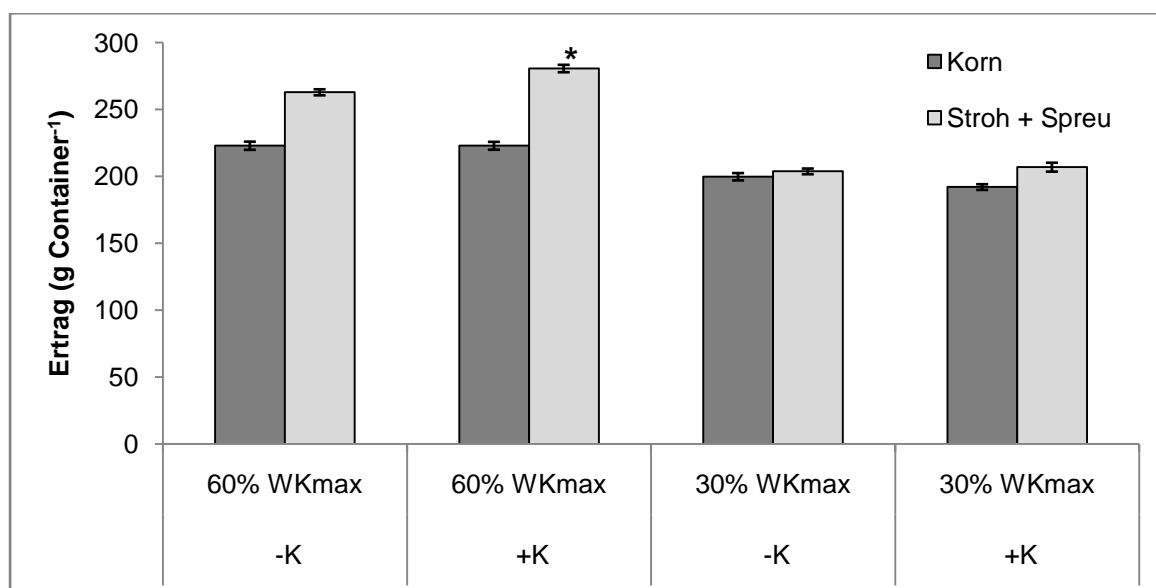


Abbildung 44. Korn- und Strohertrag von *Triticum aestivum* in Abhängigkeit von der Kalium- und Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 30% WK_{max}) zum Zeitpunkt der Totreife. -K entspricht einer Bodendüngung mit 50 kg K ha^{-1} , +K = 400 kg K ha^{-1} . Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). * kennzeichnet signifikante Unterschiede (p = 0,05) in der jeweiligen Wasserversorgungsstufe bezogen auf die jeweilige -K-Variante.

Während eine K-Versorgung keinen Einfluss auf das TKG ausübte, wurden durch Trockenstress, wie in Abbildung 45 gezeigt, signifikant schwerere Körner produziert. Stand den Pflanzen während der gesamten Wachstumsphase ausreichend Wasser zur Verfügung, lag das TKG bei rund 38 g, durch Trockenstress wurde ein TKG von 42 g erzielt.

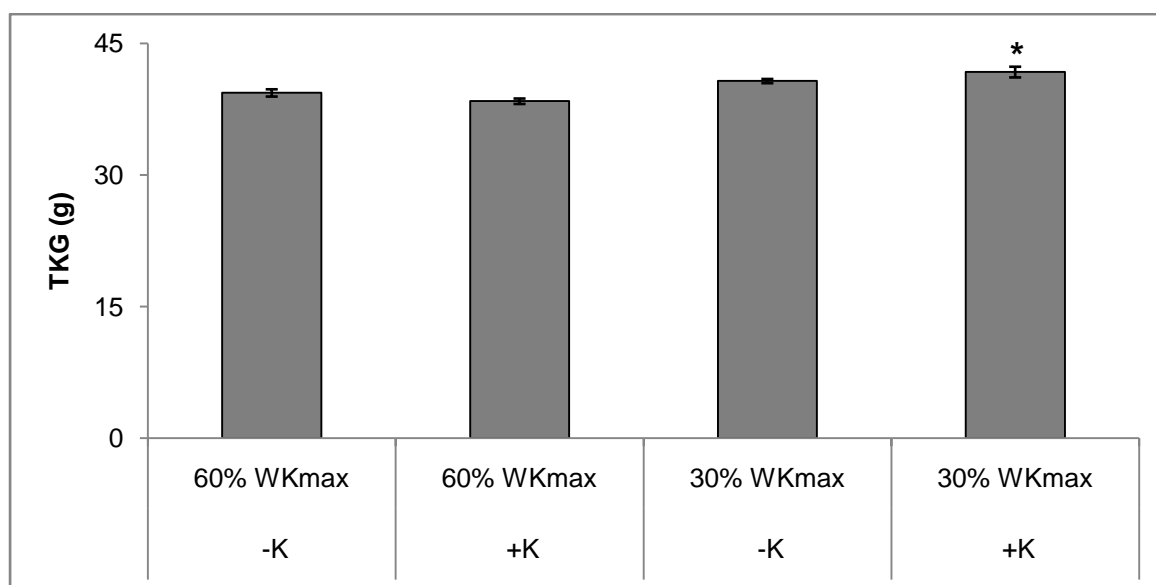


Abbildung 45. Einfluss der Kalium- und Wasserversorgung auf das Tausendkorngewicht (TKG) von *Triticum aestivum*. -K entspricht einer Bodendüngung mit 50 kg K ha⁻¹, +K = 400 kg K ha⁻¹. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). * kennzeichnet signifikante Unterschiede (p = 0,05) in der jeweiligen Wasserversorgungsstufe bezogen auf die jeweilige -K-Variante.

Bei optimal feuchten Bodenverhältnissen bildeten die Pflanzen durch eine Kaliumdüngung signifikant mehr Ähren (135 Stück) pro Container als bei Kaliummangel (Abbildung 46). Trockenstress (30% WK_{max}) reduzierte die Anzahl der Ähren pro Container auf rund 100 Stück, eine Kaliumdüngung konnte diesen Parameter nicht verändern.

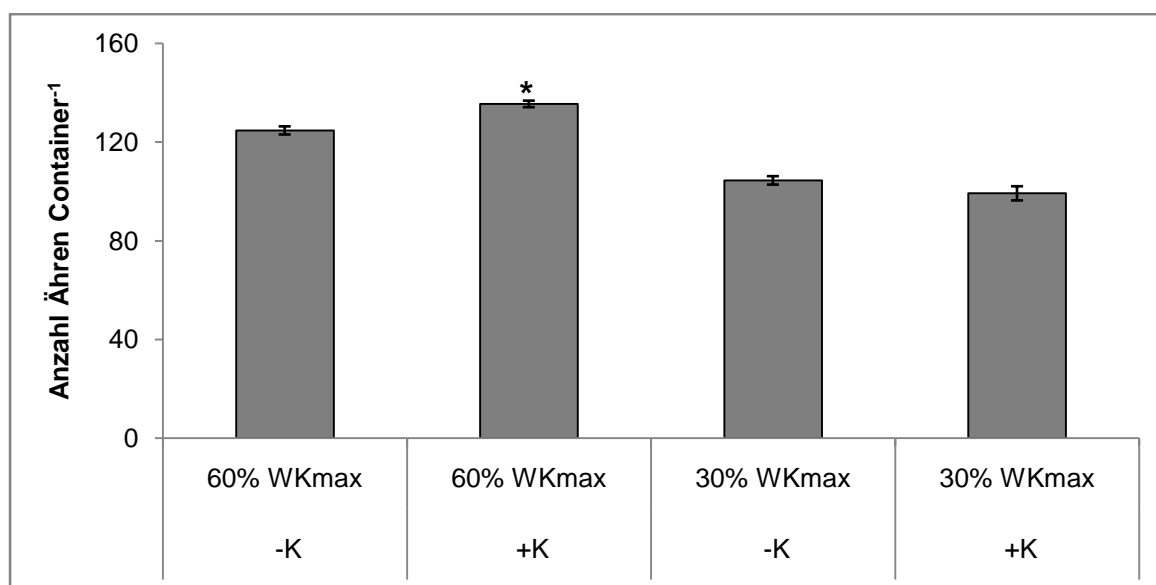


Abbildung 46. Einfluss der Kalium- und Wasserversorgung auf die Anzahl der Weizenähren pro Container. -K entspricht einer Bodendüngung mit 50 kg K ha⁻¹, +K = 400 kg K ha⁻¹. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). * kennzeichnet signifikante Unterschiede (p = 0,05) in der jeweiligen Wasserversorgungsstufe bezogen auf die jeweilige -K-Variante.

Abbildung 47 zeigt, dass bei optimal feuchten Verhältnissen die Anzahl der Körner pro Container durch eine Kaliumdüngung tendenziell von 5.600 auf 5.800 gesteigert werden konnte, allerdings war dies nicht statistisch absicherbar. Durch Trockenstress ab dem Schossen (BBCH 31) wurde die Kornanzahl pro Container durch eine Kaliumdüngung signifikant von 4.900 auf 4.600 reduziert. Generell wurden bei Trockenstress weniger Körner pro Container ausgebildet.

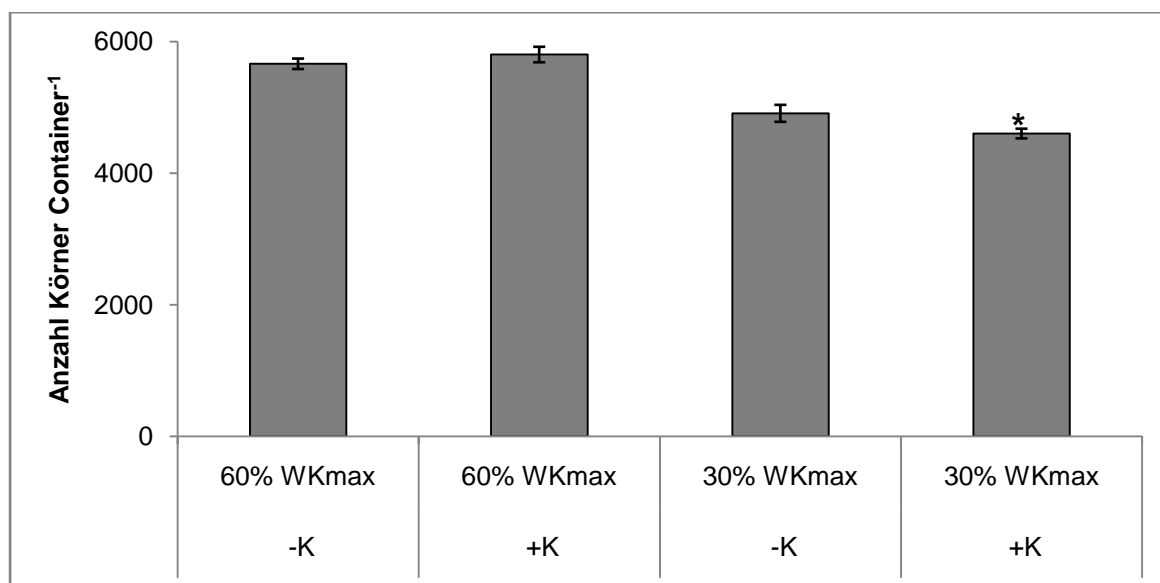


Abbildung 47. Einfluss der Kalium- und Wasserversorgung auf die Anzahl der Weizenkörner pro Container. -K entspricht einer Bodendüngung mit 50 kg K ha⁻¹, +K = 400 kg K ha⁻¹. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). * kennzeichnet signifikante Unterschiede (p = 0,05) in der jeweiligen Wasserversorgungsstufe bezogen auf die jeweilige -K-Variante.

Ein Parameter für die Qualität des Weizens ist die Rohproteinkonzentration. Den Einfluss von der Kalium- und der Wasserversorgung auf diesen Parameter zeigt Abbildung 48. Während Kalium keinen Einfluss auf die Proteinkonzentration in den Weizenkörnern hatte, wurde durch Trockenstress die Konzentration um 12 mg g^{-1} auf rund 102 mg g^{-1} im Vergleich zu optimal feuchten Bodenverhältnissen gesteigert.

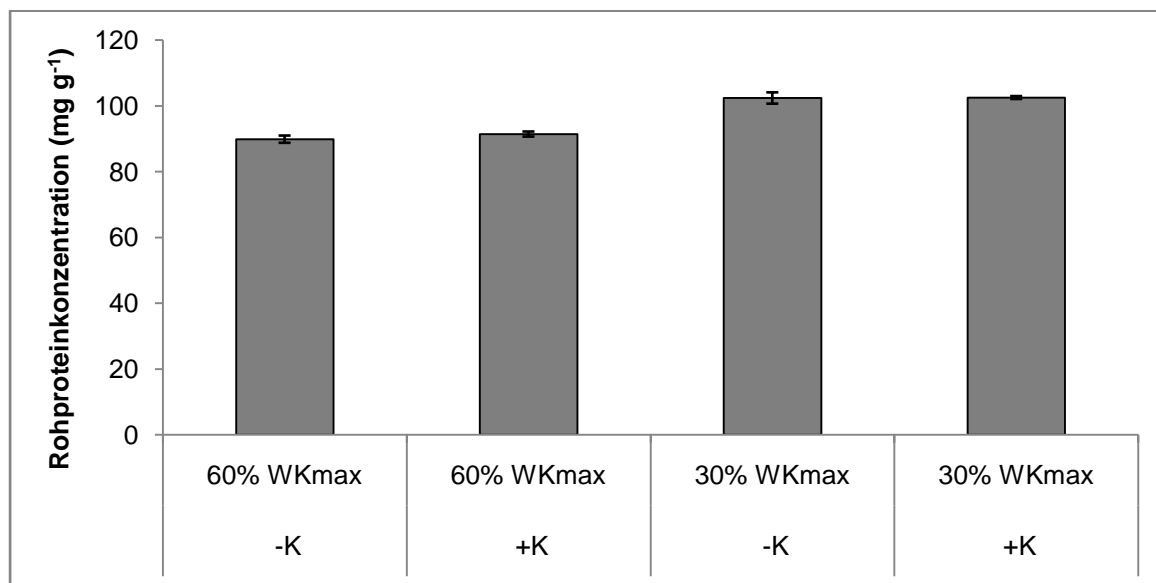


Abbildung 48. Einfluss der Kalium- und Wasserversorgung auf die Rohproteinkonzentration von *Triticum aestivum*. -K entspricht einer Bodendüngung mit 50 kg K ha^{-1} , +K = 400 kg K ha^{-1} . Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ($n = 4$). Keine signifikanten Unterschiede ($p = 0,05$) in der jeweiligen Wasserversorgungsstufe bezogen auf die jeweilige -K-Variante.

Das Verhältnis von Korn zu Stroh ist in Abbildung 49 dargestellt. Bei ausreichender Bodenfeuchtigkeit lag das Korn-zu-Stroh-Verhältnis unter K-Mangel bei 1 : 0,85 und bei Trockenstress und K-Mangel bei 1 : 0,98. Eine K-Düngung führte zu einem signifikanten Anstieg der Strohmasse. Das Korn-zu-Stroh-Verhältnis sank sowohl bei optimaler Bewässerung als auch bei Dürrestress um 4% im Vergleich zur jeweiligen K-Mangelvariante.

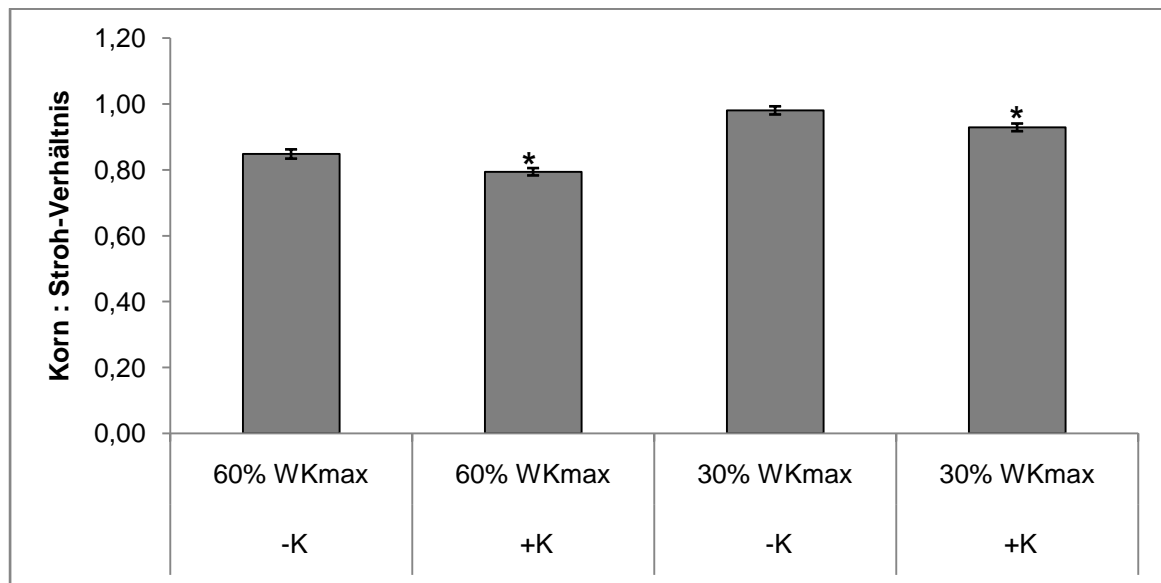


Abbildung 49. Einfluss der Kalium- und Wasserversorgung auf das Korn-zu-Stroh-Verhältnis. -K entspricht einer Bodendüngung mit 50 kg K ha⁻¹, +K = 400 kg K ha⁻¹. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). * kennzeichnet signifikante Unterschiede (p = 0,05) in der jeweiligen Wasserversorgungsstufe bezogen auf die jeweilige -K-Variante.

Während der Wachstumsphase wurde kontinuierlich der Wasserverbrauch der Pflanzen erfasst. Dieser ist in Abbildung 50 abgebildet. Hatten die Pflanzen durchweg einen optimal feuchten Boden, so verbrauchten sie unabhängig von der K-Versorgung 140 L pro Container. Bei unzureichendem Wasserangebot ab der Schossphase (BBCH 31) verbrauchten die Pflanzen bei K-Mangel mit 103 L signifikant mehr Wasser als bei einer guten K-Versorgung. Durch eine K-Düngung benötigten die Pflanzen bei Wasserstress nur 98 L Wasser pro Container.

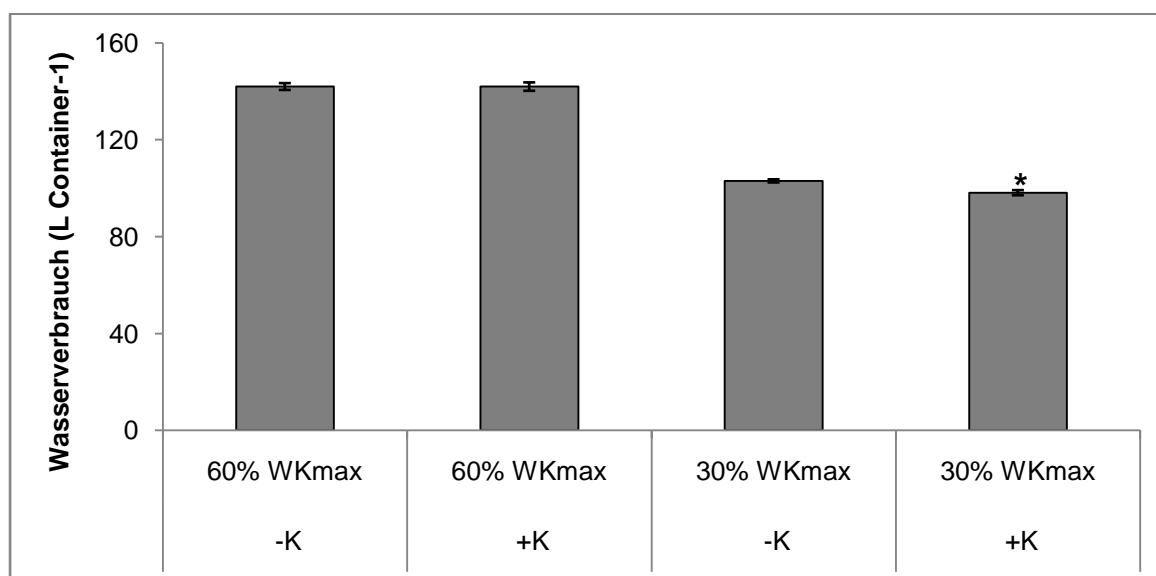


Abbildung 50. Einfluss der Kalium- und Wasserversorgung auf den Wasserverbrauch von *Triticum aestivum*. -K entspricht einer Bodendüngung mit 50 kg K ha⁻¹, +K = 400 kg K ha⁻¹. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4). * kennzeichnet signifikante Unterschiede (p = 0,05) in der jeweiligen Wasserversorgungsstufe bezogen auf die jeweilige -K-Variante.

Während der Wachstumsphase vom 25.02.2009 bis 29.07.2009 betrug die Durchschnittstemperatur 18,0°C (Minimum Temp: -2°C, Maximum Temp: 44°C), dabei wurde eine Temperatursumme von 2.915°C erzielt.

Der Einfluss der Kaliumdüngung auf die Wassernutzungseffizienz bezogen auf die komplette Trockenmassenproduktion von *Triticum aestivum* ist in Abbildung 51 gezeigt. Prinzipiell steigerte die K-Düngung die WUE_{DM} bei optimaler Bodenfeuchte und bei Trockenstress. Der Anstieg bei 60% WK_{max} von $3,4 \text{ g TM (L Wasser)}^{-1}$ auf $3,6 \text{ g TM (L Wasser)}^{-1}$ durch eine bessere K-Versorgung war statistisch abzusichern. Die Ausnutzung des angebotenen Wassers war bei Dürrestress mit $4,0 \text{ g TM (L Wasser)}^{-1}$ höher als bei ausreichender Feuchtigkeit. Der Anstieg der WUE_{DM} durch eine K-Düngung war unter Trockenstress allerdings nicht signifikant.

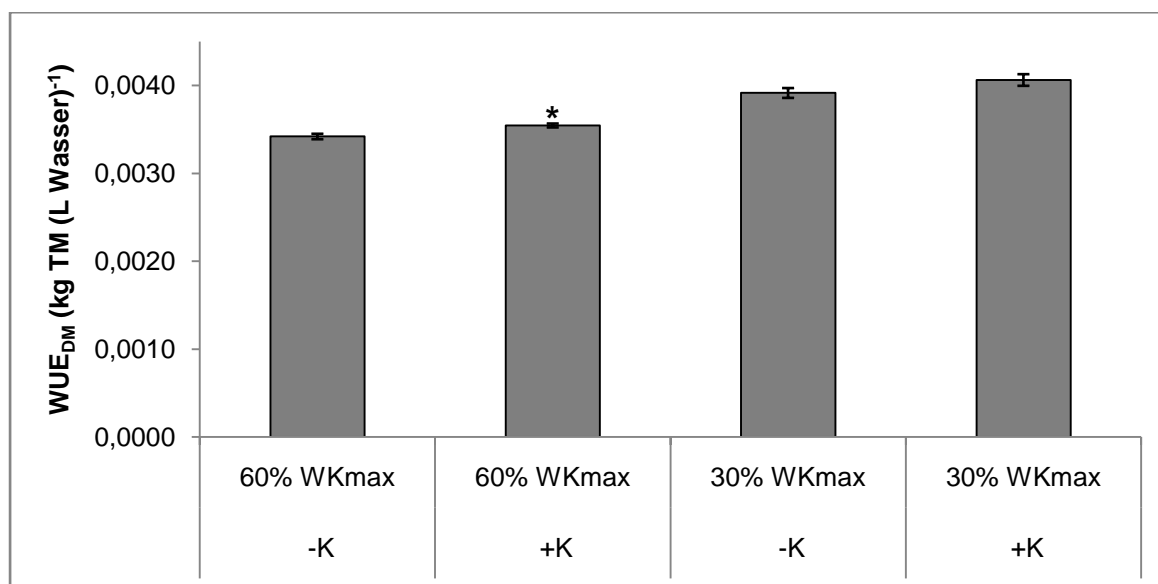


Abbildung 51. Einfluss der Kalium- und Wasserversorgung auf die Wassernutzungseffizienz (WUE_{DM}) von *Triticum aestivum*. -K entspricht einer Bodendüngung mit 50 kg K ha^{-1} , +K = 400 kg K ha^{-1} . Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ($n = 4$). * kennzeichnet signifikante Unterschiede ($p = 0,05$) in der jeweiligen Wasserversorgungsstufe bezogen auf die jeweilige -K-Variante.

3.6 Mitscherlichgefäßversuch mit Tomate 2009

Die Sprossmasse der Tomatenpflanzen zum Zeitpunkt der ersten Ernte ist in Abbildung 52 dargestellt. Gezeigt sind links die Pflanzen, die unter K-Mangelbedingungen ($-K$) aufgewachsen waren, in der Mitte sind die Pflanzen, die eine hohe K-Versorgung über den Boden ($+K$) erhalten hatten, und rechts die Pflanzen, die zusätzlich zur Bodendüngung noch K_2SO_4 über die Blätter erhielten ($+K +fl$). Im oberen Bild **A** stand den Pflanzen ausreichend Wasser ($60\% WK_{max}$) während der Vegetation zur Verfügung. Das untere Bild **B** zeigt die Pflanzen, die unter Trockenstress ($35\% WK_{max}$) aufwuchsen. Der Trockenstress zeigte sich durch kleinere und dunkelgrünere Pflanzen, die weniger Blätter ausgebildet hatten.



Abbildung 52. Einfluss der Kaliumernährung ($-K = 0 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$; $+K = 450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$ und $+K+fl. = 450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1} + 8,3 \text{ mg K Gefäß}^{-1}$) und der Wasserversorgung ($60\% WK_{max}$ bzw. $35\% WK_{max}$) auf die Sprossmasse der Tomatenpflanzen am Tag der ersten Ernte.

Die bis zu den beiden Ernteterminen gebildete Trockenmasse und die bis dahin verbrauchte Wassermenge in Abhängigkeit der K-Versorgung und dem Wasserangebot sind in Tabelle 12 gezeigt. Unter optimal feuchten Bedingungen hatten die Pflanzen durch eine Kaliumdüngung bis zur ersten und zweiten Ernte signifikant mehr TM gebildet als bei K-Mangel. Dabei war auch der Wasserverbrauch signifikant angestiegen. Bei Trockenstress stiegen die TM und der Wasserverbrauch bis zur ersten Ernte durch eine K-Düngung an, durch die zusätzliche Flüssigapplikation kann dieser Anstieg statistisch abgesichert werden. Bis zur zweiten Ernte stiegen die TM und der Wasserverbrauch durch eine K-Düngung über den Boden sowie zusätzlich über die Blätter signifikant an. Unter Trockenstress war die TM um die Hälfte reduziert.

Tabelle 12. Einfluss der Kaliumernährung ($-K = 0 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$; $+K = 450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$ und $+K+fl. = 450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1} + 8,3 \text{ mg K Gefäß}^{-1}$) und der Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 35% WK_{max}) auf die TM-Bildung (g) sowie auf den Wasserverbrauch (L) pro Pflanze bis zu den jeweiligen Ernteterminen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($n = 4$; $p = 0,05$) in der jeweiligen Wasserstufe bezogen auf die $-K$ -Variante

Variante		TM 1. Ernte	TM 2. Ernte
		g Pflanze ⁻¹	g Pflanze ⁻¹
-K	60% WK_{max}	2,67 a	8,04 a
+K	60% WK_{max}	3,18 b	13,56 b
+K +fl.	60% WK_{max}	3,91 b	12,14 b
-K	35% WK_{max}	1,51 A	4,51 A
+K	35% WK_{max}	1,85 AB	6,13 B
+K +fl.	35% WK_{max}	2,69 B	6,07 B

Variante		Wasserverbrauch bis zur 1. Ernte	Wasserverbrauch bis zur 2. Ernte
		L Pflanze ⁻¹	L Pflanze ⁻¹
-K	60% WK_{max}	0,84 a	2,29 a
+K	60% WK_{max}	0,96 b	2,92 b
+K +fl.	60% WK_{max}	0,91 b	2,78 b
-K	35% WK_{max}	0,47 A	1,34 A
+K	35% WK_{max}	0,50 AB	1,45 B
+K +fl.	35% WK_{max}	0,51 B	1,44 B

Aus der Differenz der Trockenmassenbildung zwischen zweiter und erster Ernte dividiert durch die Anzahl der Tage zwischen den Ernten kann die Wachstumsrate berechnet werden. In Abbildung 53 ist zu sehen, dass unter optimal feuchten Bodenbedingungen die Wachstumsrate durch eine K-Düngung signifikant gesteigert wurde. Tendenziell ist dieser Verlauf auch bei Trockenstress zu erkennen, allerdings konnte dies nicht statistisch nachgewiesen werden. Tendenziell wird aber auch der Stress sichtbar, den eine K_2SO_4 -Blattapplikation zunächst hervorruft.

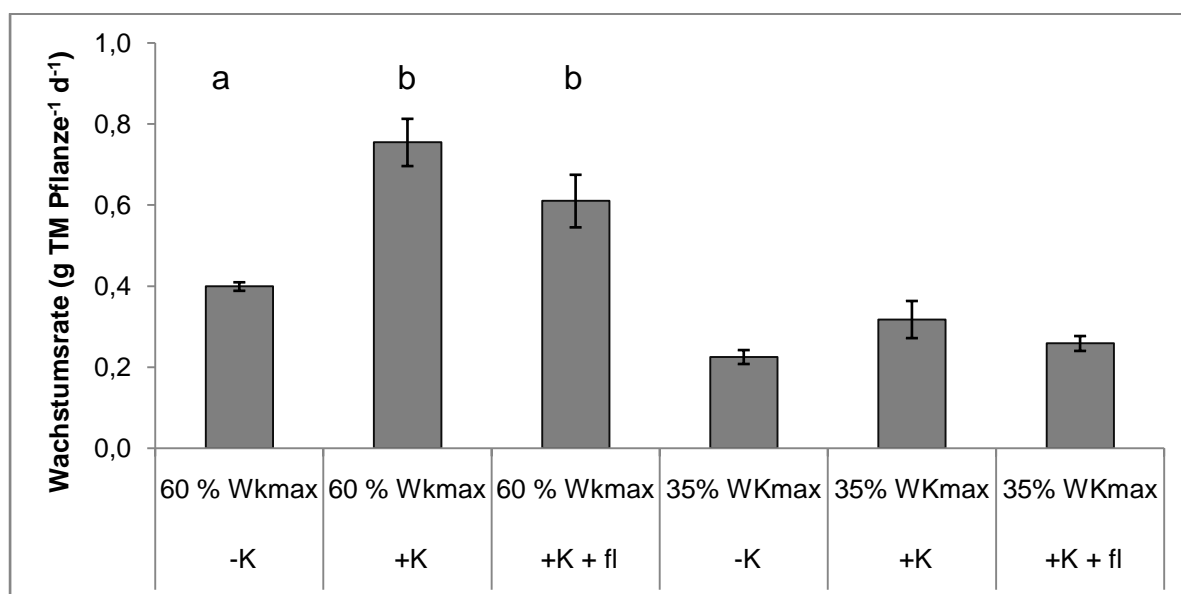


Abbildung 53. Einfluss der Kaliumernährung ($-K = 0 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$; $+K = 450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$ und $+K+fl. = 450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1} + 8,3 \text{ mg K Gefäß}^{-1}$) und der Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 35% WK_{max}) auf die Wachstumsrate von Tomatenpflanzen zwischen den beiden Ernteterminen. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($n = 4$; $p = 0,05$) in der jeweiligen Wasserstufe bezogen auf die $-K$ -Variante.

Werden die jeweiligen Kaliumdüngungsstufen (+K und +K +fl) innerhalb einer Wasserstufe in Relation zu ihrer –K-Variante gesetzt, kann der relative Einfluss einer K-Düngung gezeigt werden. In Abbildung 54 ist dies für die Wachstumsrate dargestellt. Während die Pflanzen bei optimalem Wasserangebot durch eine K-Düngung (+K) eine um 89% höhere Wachstumsrate im Vergleich zur –K-Variante aufwiesen, konnten die Pflanzen unter Dürrestress nur um 41% besser wachsen. Die zusätzliche Blattdüngung steigerte die Wachstumsrate bei 60% WK_{max} nur um 53% und bei 35% WK_{max} nur um 15%.

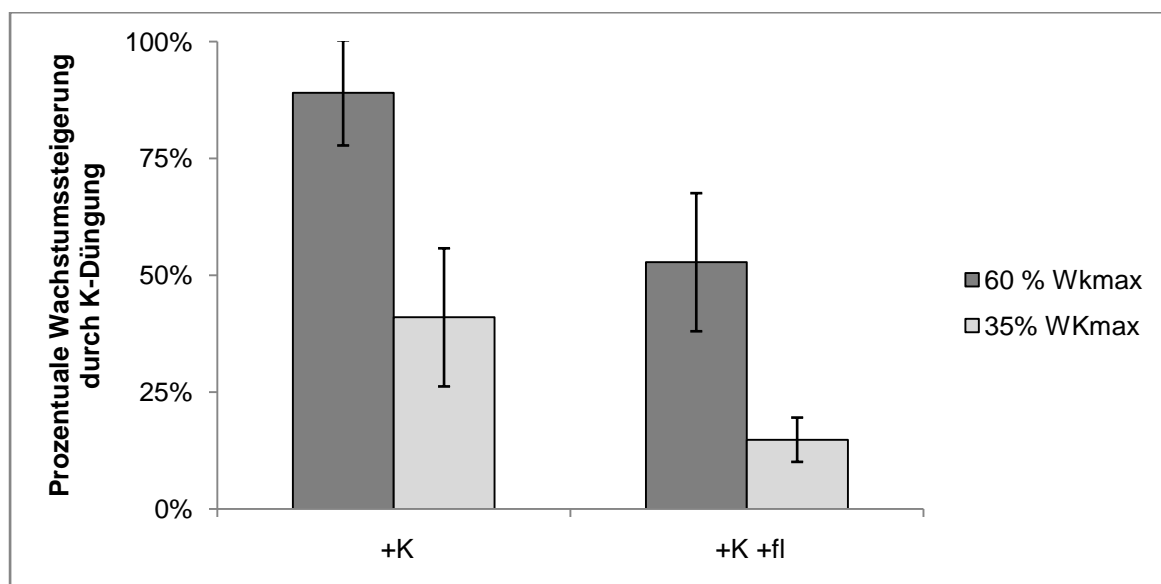


Abbildung 54. Einfluss der Kaliumernährung auf die prozentuale Wachstumssteigerung zwischen den beiden Ernteterminen. Mittelwert der jeweiligen –K-Variante = 0%; +K = 450 mg K (kg Boden)⁻¹ und +K+fl. = 450 mg K (kg Boden)⁻¹ + 8,3 mg K Gefäß⁻¹ und der Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 35% WK_{max}). Fehlerbalken zeigen Standardfehler, n = 4.

Der K-Ernährungszustand der Pflanze ist in Abbildung 55 abgebildet. Sowohl bei optimaler Bodenfeuchte als auch bei Dürrestress stieg die K-Konzentration mit der K-Düngung in dem Pflanzenmaterial zu beiden Ernteterminen signifikant an. Unter optimal feuchten Bedingungen stieg die Konzentration durch eine zusätzliche Blattdüngung zum zweiten Erntetermin zusätzlich an. Des Weiteren fällt auf, dass in der ersten Ernte der Wasserstress keinen Einfluss auf die K-Konzentration hatte.

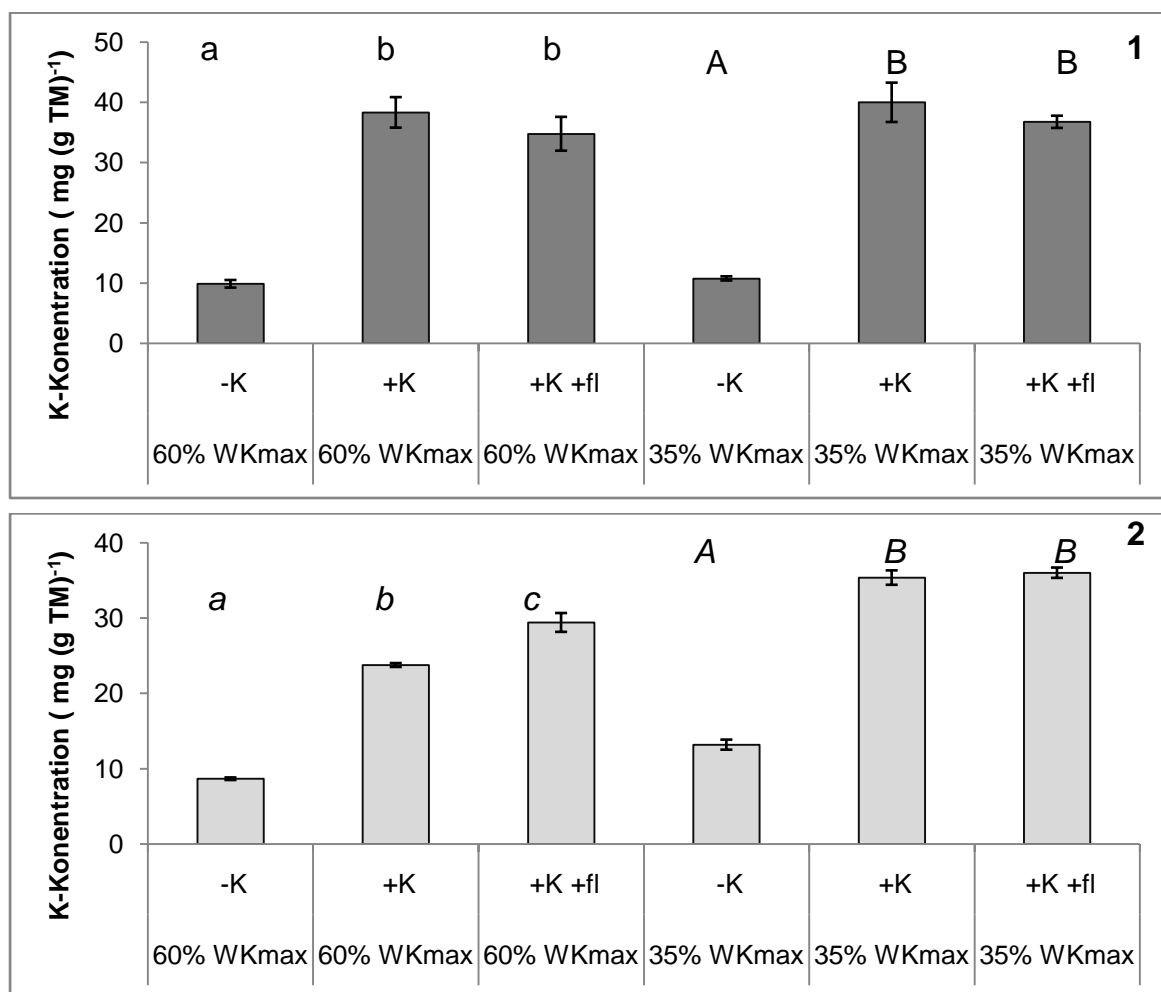


Abbildung 55. Einfluss der Kaliumernährung ($-K = 0 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$; $+K = 450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$ und $+K+fl. = 450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1} + 8,3 \text{ mg K Gefäß}^{-1}$) und der Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 35% WK_{max}) auf die K-Konzentration zu den beiden Ernteterminen (1) und (2). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($n = 4$; $p = 0,05$) in der jeweiligen Wasserstufe bezogen auf die $-K$ -Variante.

Die Aufnahme von K in die Pflanzen ist anhand des Gehaltes im Pflanzenmaterial in Abbildung 56 dargestellt. Durch eine bessere K-Versorgung stieg der Gehalt in den Pflanzen signifikant an. Durch Dürrestress ist die Aufnahme von K im Vergleich zu feuchten Bodenbedingungen allerdings stark reduziert.

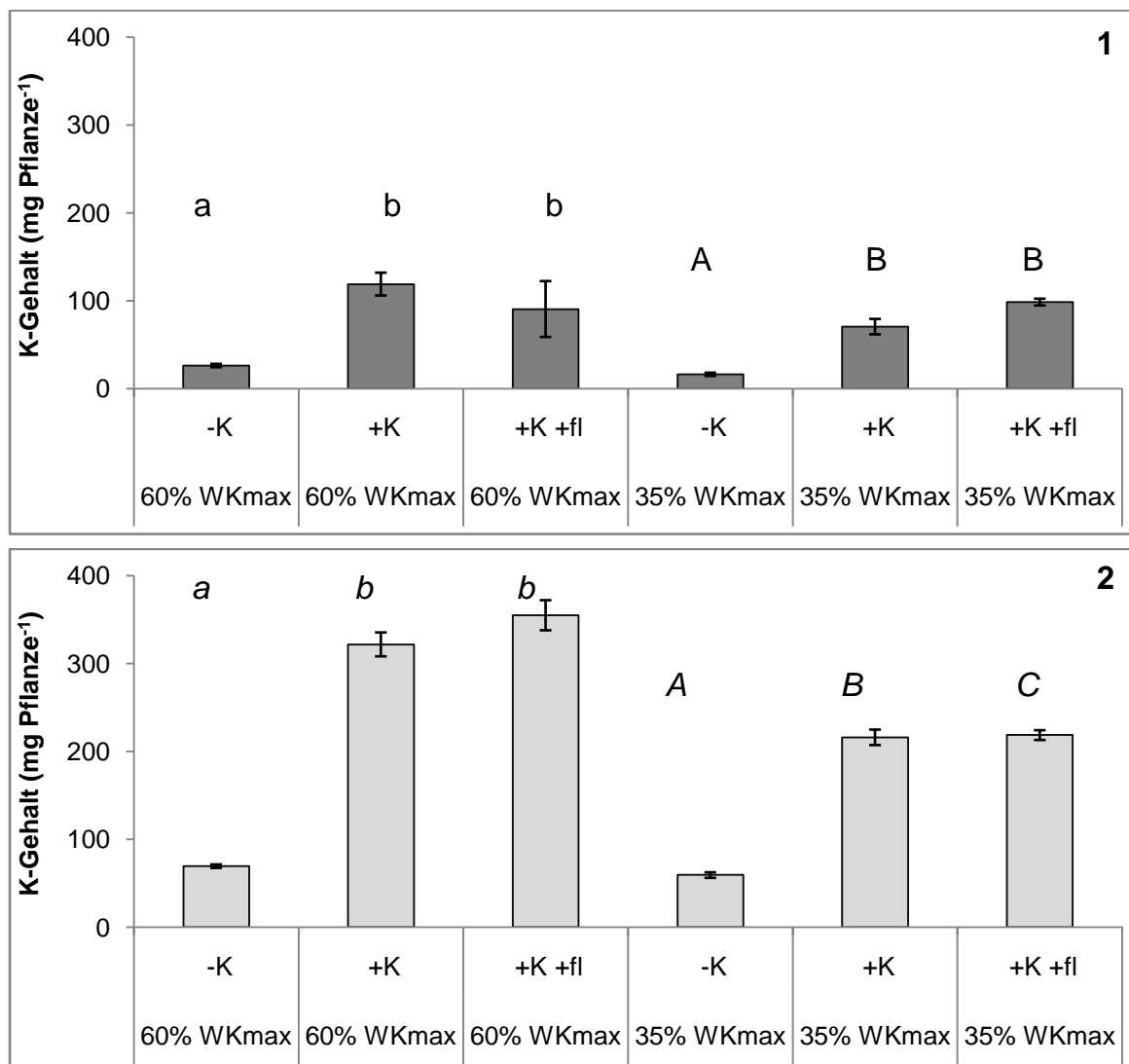


Abbildung 56. Einfluss der Kaliumernährung ($-K = 0 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$; $+K = 450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$ und $+K+fl. = 450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1} + 8,3 \text{ mg K Gefäß}^{-1}$) und der Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 35% WK_{max}) auf den K-Gehalt je Pflanze zu den beiden Ernteterminen (1) und (2). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($n = 4$; $p = 0,05$) in der jeweiligen Wasserstufe bezogen auf die $-K$ -Variante.

Unter Trockenstress wurde das osmotische Potential durch eine K-Düngung mit zusätzlicher Blattapplikation weiter gesenkt, dies hatte jedoch keinen Einfluss auf das Wasserpotential, sondern der Turgor stieg an. Abbildung 57 zeigt weiter, dass die Pflanzen bei Dürrestress und einer K-Düngung das osmotische Potential nicht veränderten, jedoch wurde das Wasserpotential zulasten des Turgors gesenkt.

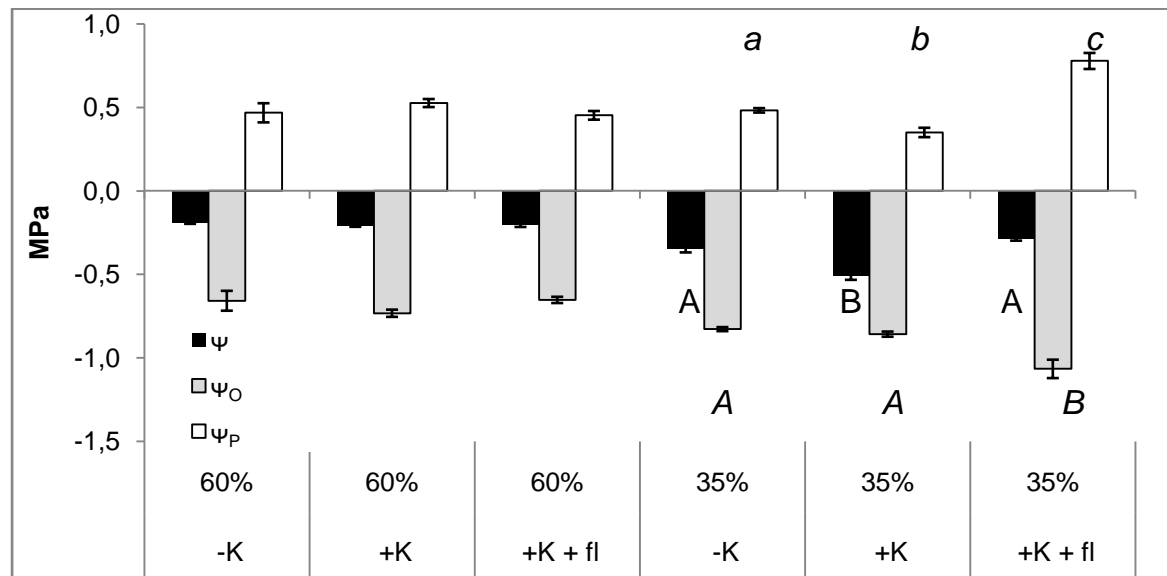


Abbildung 57. Einfluss der Kaliumernährung ($-K = 0 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$; $+K = 450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$ und $+K+fl. = 450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1} + 8,3 \text{ mg K Gefäß}^{-1}$) und der Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 35% WK_{max}) auf das Wasserpotential ψ , das osmotische Potential ψ_0 sowie den Turgor ψ_p zur ersten Ernte. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($n = 4$; $p = 0,05$) in der jeweiligen Wasserstufe bezogen auf die $-K$ -Variante.

Die Wassernutzungseffizienz (WUE) bezogen auf die gesamte Spross-TM konnte in der zweiten Ernte durch eine K-Düngung unabhängig von der Wasserversorgung signifikant gesteigert werden (Abbildung 58). Bei der ersten Ernte hatte eine K-Düngung mit zusätzlicher Blattapplikation einen verbessernden Effekt. Unter Trockenstress konnte dies statistisch gesichert werden.

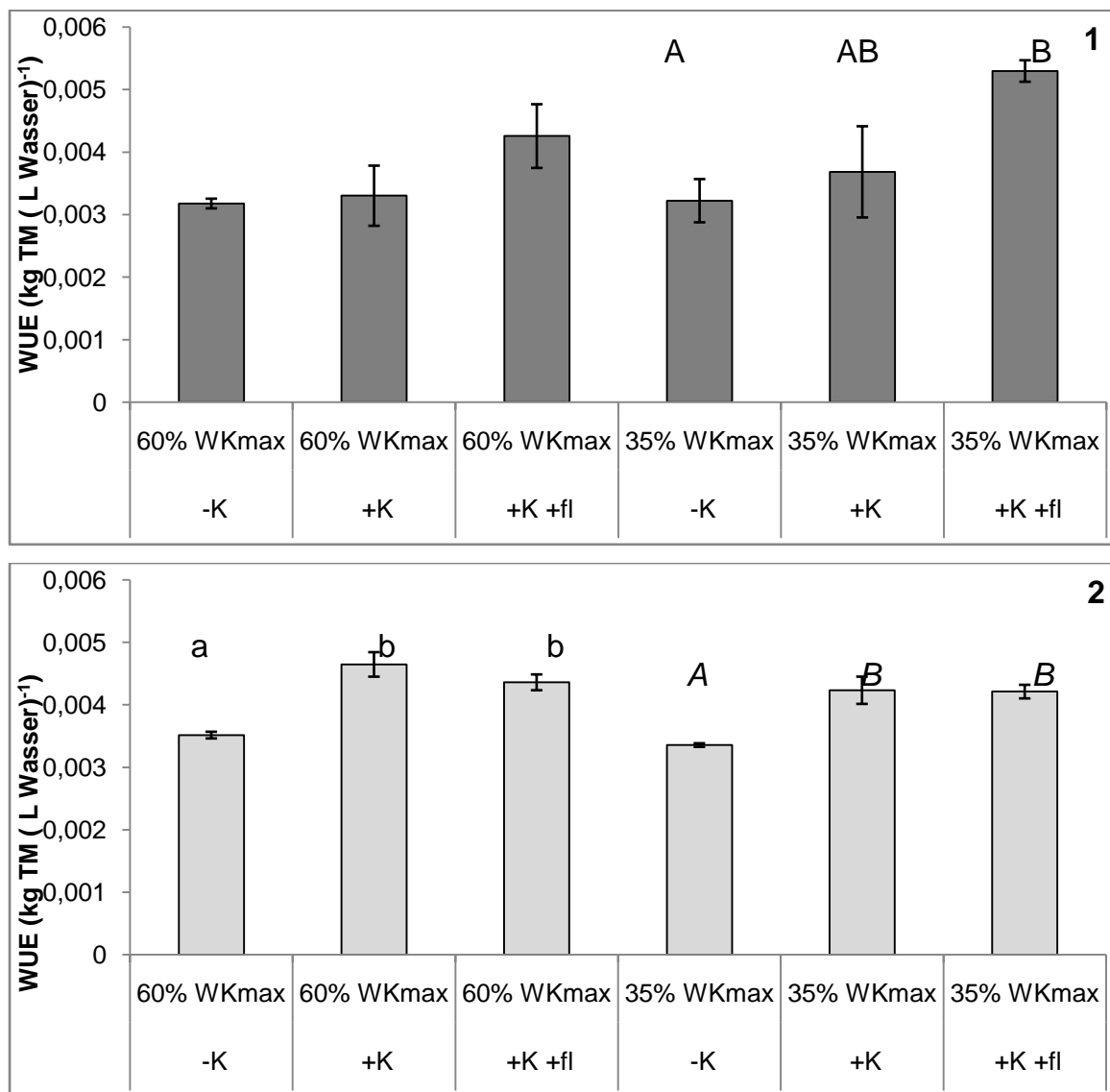


Abbildung 58. Einfluss der Kaliumernährung ($-K = 0 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$; $+K = 450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$ und $+K+fl. = 450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1} + 8,3 \text{ mg K Gefäß}^{-1}$) und der Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 35% WK_{max}) auf die Wassernutzungseffizienz (WUE) zu den beiden Ernteterminen (1) und (2). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (n = 4; p = 0,05) in der jeweiligen Wasserstufe bezogen auf die -K-Variante.

Bei Betrachtung des prozentualen Einflusses einer K-Düngung auf die WUE zeigte sich in Abbildung 59 **1**, dass die WUE relativ betrachtet, verbessert werden konnte. Durch eine Blattapplikation von K_2SO_4 betrug die prozentuale Steigerung signifikant 65%. Zu diesem Zeitpunkt war auch ein spezieller Effekt der flüssigen Blattapplikation bei Dürrestress zu erkennen, denn die WUE stieg prozentual bei Dürrestress signifikant stärker an als bei optimalem Wasserangebot. Bis zum zweiten Erntetermin verlor sich der starke Einfluss der Blattapplikation und die WUE wurde in allen Varianten um 25% verbessert (Abbildung 59 **2**).

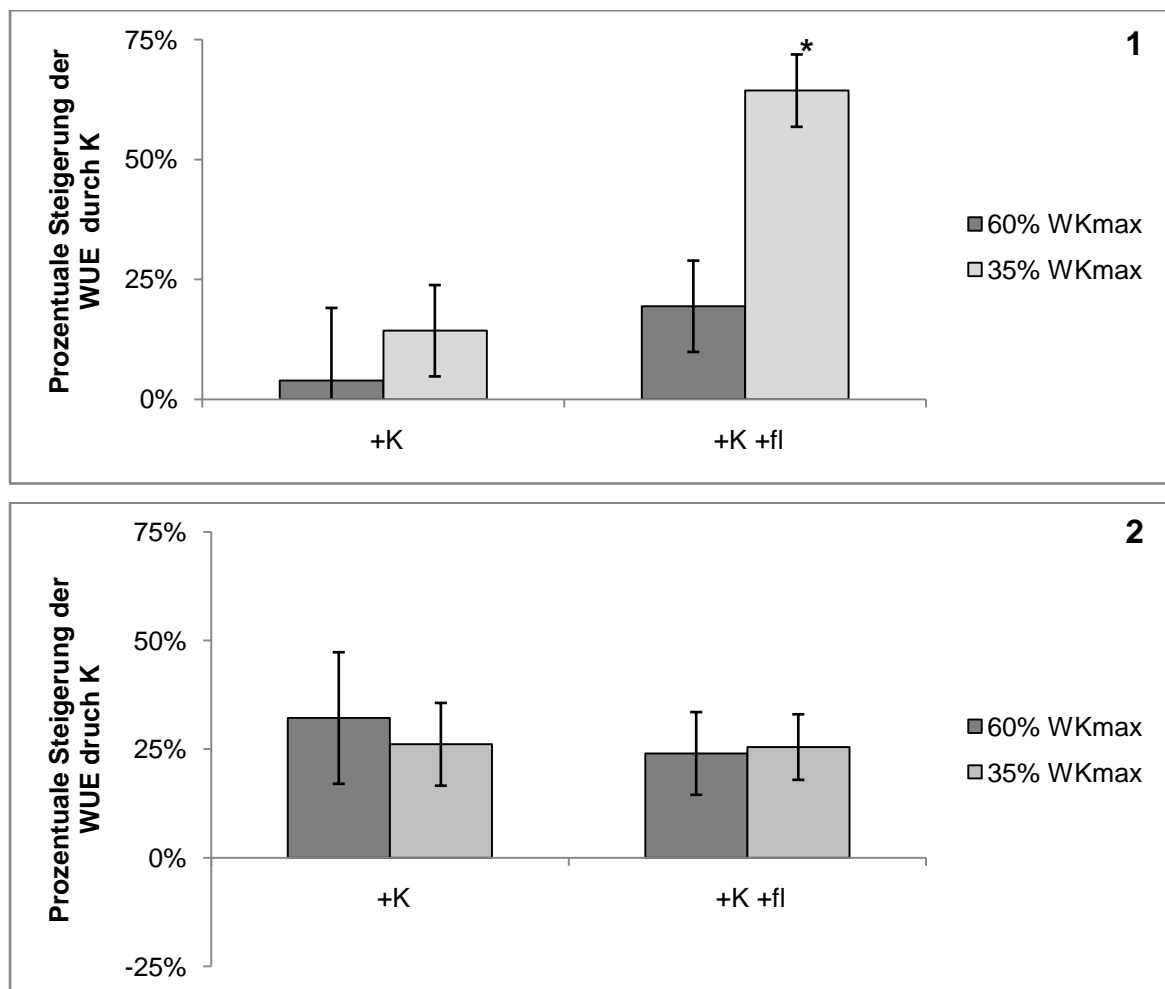


Abbildung 59. Prozentuale Steigerung der Wassernutzungseffizienz (WUE) durch K. **(1)** zur ersten und **(2)** zur zweiten Ernte. Mittelwert der jeweiligen $-K$ -Variante = 0%, $+K = 450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$ und $+K+fl. = 450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1} + 8,3 \text{ mg K Gefäß}^{-1}$) sowie Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 35% WK_{max}). * zeigt signifikante Unterschiede innerhalb der K-Versorgung bei $p = 0,05$ und $n = 4$, dabei zeigen die Fehlerbalken den Standardfehler.

Betrachtet man den relativen Einfluss einer K-Düngung auf den Faktor Wasser zum ersten Erntetermin (Abbildung 60), sieht man, dass durch K bei optimaler Bodenfeuchte der Wasserverbrauch um 15% anstieg. In den anderen Varianten betrug der Anstieg 5 bis 7%. Der zweite Faktor, die Trockenmassenproduktion (Abbildung 61), wurde in allen Varianten durch K gefördert (> 20%). In diesem Zusammenhang erwies sich die relative Vorzüglichkeit der zusätzlichen Blattapplikation bei Dürrestress zu einem frühen Zeitpunkt. Ein Vergleich mit Tabelle 12 ergibt, dass die TM-Produktion bei Dürrestress mit zusätzlicher K-Blattapplikation in Bezug auf die –K-Variante um 75% gesteigert wurde. Der spezielle Effekt der Blattapplikation auf die prozentuale Steigerung der WUE zeigte sich ebenfalls als besonderer Effekt auf die TM-Bildung.

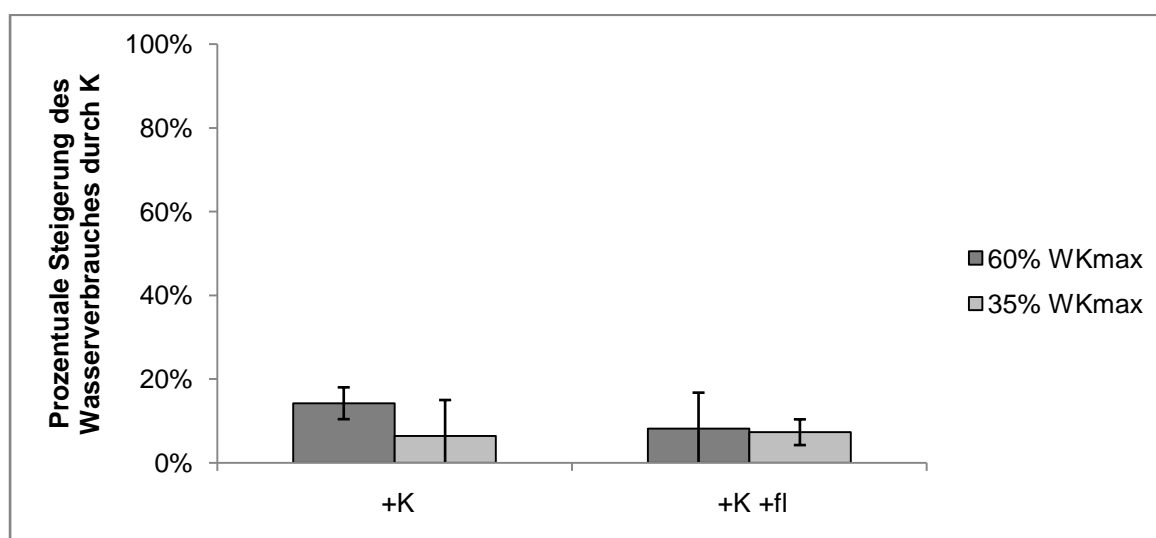


Abbildung 60. Prozentuale Steigerung des Wasserverbrauches durch K zur ersten Ernte. Mittelwert der jeweiligen –K-Variante = 0%, +K = 450 mg K (kg Boden)⁻¹ und +K+fl. = 450 mg K (kg Boden)⁻¹ + 8,3 mg K Gefäß⁻¹) sowie Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 35% WK_{max}). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (n = 4).

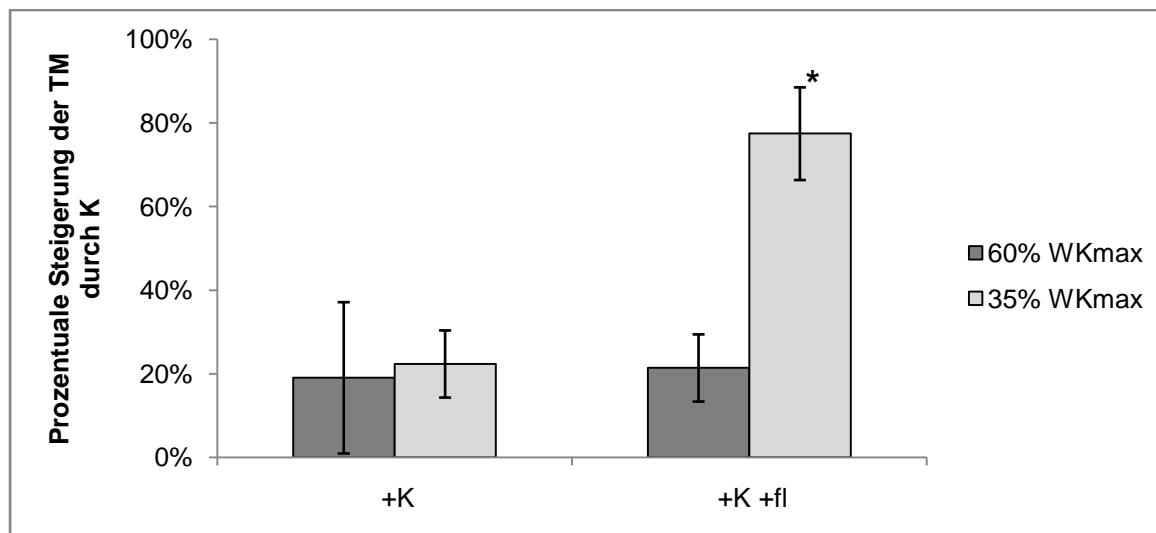


Abbildung 61. Prozentuale Steigerung der Trockenmassenproduktion (TM) durch K zur ersten Ernte. Mittelwert der jeweiligen $-K$ -Variante = 0%, $+K$ = $450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$ und $+K+fl.$ = $450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1} + 8,3 \text{ mg K Gefäß}^{-1}$ sowie Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 35% WK_{max}). * zeigt signifikante Unterschiede innerhalb der K-Versorgung bei $p = 0,05$ und $n = 4$, dabei zeigen die Fehlerbalken den Standardfehler.

Die WUE wurde auch in der zweiten Ernte durch eine bessere K-Versorgung bei optimal feuchten Bodenverhältnissen und bei Dürrestress signifikant im Vergleich zur $-K$ -Variante gesteigert. Der relative Anstieg im Wasserverbrauch (Abbildung 62) bis zur zweiten Ernte trat sowohl bei optimal feuchten Bodenverhältnissen als auch bei Trockenstress durch eine bessere K-Versorgung ($+K$ und $+K+fl$) auf.

Stand den Pflanzen ausreichend Wasser zur Verfügung, so stieg ihr relativer Wasserverbrauch um ca. 25% an. War das Wasserangebot unzureichend, stieg der Wasserverbrauch mit steigender K-Düngung um 10% an. Jedoch wurde durch eine bessere K-Versorgung die TM-Produktion wie bis zur vorhergehenden Ernte stärker verbessert (Abbildung 63). Bei ausreichendem Wasserangebot stieg die TM um 70% in der $+K$ -Variante an und um 50% in der $+K+fl$ -Variante. Bei Dürrestress konnten die Pflanzen ebenfalls mehr TM realisieren, der Anstieg betrug in beiden Varianten 35%.

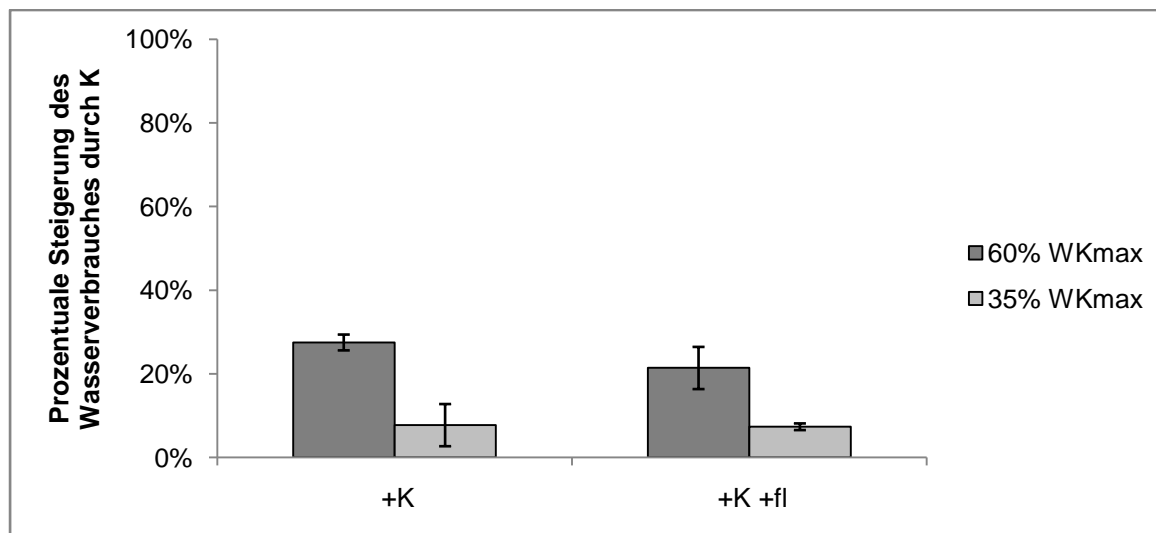


Abbildung 62. Prozentuale Steigerung des Wasserverbrauches durch K zur zweiten Ernte. Mittelwert der jeweiligen $-K$ -Variante = 0%, $+K = 450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$ und $+K+fl. = 450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1} + 8,3 \text{ mg K Gefäß}^{-1}$ sowie Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 35% WK_{max}). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ($n = 4$).

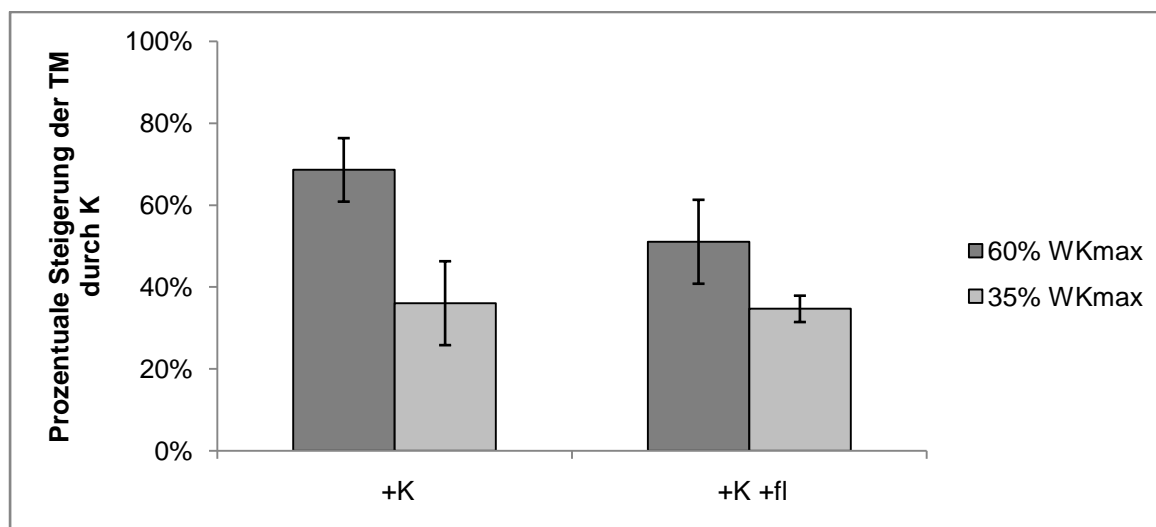


Abbildung 63. Prozentuale Steigerung der Trockenmassenproduktion (TM) durch K zur zweiten Ernte. Mittelwert der jeweiligen $-K$ -Variante = 0%, $+K = 450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1}$ und $+K+fl. = 450 \text{ mg K (kg Boden)}^{-1} + 8,3 \text{ mg K Gefäß}^{-1}$ sowie Wasserversorgung (60% WK_{max} bzw. 35% WK_{max}). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler ($n = 4$).

4 Diskussion

4.1 Unter Trockenstress und Salinität ist eine bessere Versorgung der Pflanzen mit K notwendig

In der Einleitung ist der Transportmechanismus zur Wurzel für den Nährstoff Kalium beschrieben. Es ist aufgeführt, dass die Diffusion eine wichtige Rolle bei der Anlieferung von K zur Wurzel spielt. Für die Diffusion ist nach MARSCHNER (1995) eine ausreichende Bodenfeuchtigkeit von großer Bedeutung, denn bei Trockenheit vergrößert sich die Diffusionsstrecke, und die Nährstoffe werden schlechter zur Wurzeloberfläche transportiert. Auf Trockenheit können Pflanzen durch ein erhöhtes Wurzelwachstum reagieren (MARSCHNER, 1995). Dadurch kann der Diffusionsweg der Nährstoffe verkleinert werden. Die Fähigkeit, dass Pflanzen bei extremen Situationen wachsen, ist sehr stark von der jeweiligen Art abhängig, sogar innerhalb der Arten gibt es nach KUCHENBUCH und JUNG (1988) große Unterschiede zwischen den einzelnen Sorten.

Der Versuch mit *Vicia faba* auf keramischen Platten zeigte, dass die Pflanzen, denen nur das pedogene Kalium zur Verfügung stand, auf die K-substituierte Ernährung durch Na mit einer Verringerung der Biomassebildung (Abbildung 5 A) sowie der Wurzellänge (Abbildung 7 B) reagierten. Die Wurzelfeinheit (Abbildung 7 A) wurde dabei nicht beeinflusst. Der Mangel an Kalium war im Boden so hoch, dass es den Pflanzen nicht möglich war, die Aufnahme und damit die Konzentration (Abbildung 6) sowie den Gehalt von Kalium in der Pflanze zu erhöhen. Die Pflanzen versuchten im Gegenzug durch eine erhöhte Aufnahme von Na die physiologischen Funktionen von K teilweise auszugleichen. Die von MARSCHNER (1995) aufgestellte These, dass bei Wasserstress oder Nährstoffmangel die Wurzeln länger werden, konnte in diesem Versuch nicht verifiziert werden, denn die Länge der Pflanzenwurzeln in der NaCl-Variante war signifikant kürzer.

Im Containerversuch 2009 wurde die K-Konzentration (Abbildung 27) von *Vicia faba* durch eine K-Düngung bei Dürrestress bis in den optimalen Bereich nach BERGMANN (1993) angehoben. Durch das knappe Wasserangebot war das Wachstum der Pflanzen stark reduziert, dies zeigte sich in der Trocken-

masseproduktion in Abbildung 25. Durch den Trockenstress im Boden war die Diffusion von K zur Wurzel stark gehemmt. Folglich war die Aufnahme von K stark beeinträchtigt. Vergleicht man den Gehalt von K der Pflanzen bei Dürrestress mit dem K-Gehalt der Pflanzen bei optimaler Feuchtigkeit (Abbildung 28), so ist zu erkennen, dass die Ackerbohnen bei Dürrestress, unabhängig von der K-Versorgung, nicht einmal die Hälfte der K-Menge der Pflanzen bei optimal feuchten Bodenverhältnissen aufgenommen hatten. Die hohen Werte der K-Konzentration sind folglich durch eine Anreicherung von K in der Pflanze begründet.

Der Containerversuch mit Sommerweizen zeigte, dass durch eine K-Düngung sowohl die Konzentration von K (Abbildung 42) als auch der Gehalt von K (Abbildung 43) in den vegetativen Pflanzenteilen zu verschiedenen Wachstumsstadien unabhängig von dem Wasserangebot anstieg. Dies begründet sich mit dem wesentlich besser ausgeprägten und fein verzweigteren Wurzelsystem der Poaceae (MENGEL und STEFFENS, 1985). Obwohl den Weizenpflanzen bei Dürrestress weniger Wasser ($WK_{\max} = 30\%$) zur Verfügung stand als den Ackerbohnen ($WK_{\max} = 40\%$), war das Wachstum durch Dürrestress kaum beeinträchtigt. Es zeigte sich, dass die Weizenpflanzen eine höhere Dürresistenz aufwiesen als die Ackerbohnen. Frühere Untersuchungen (REEB, 2006) von unterschiedlichem Nährstoffangebot auf das Wurzelsystem von Sommerweizen (*Triticum aestivum*) und Winterraps (*Brassica napus*) zeigten, dass Weizen bei optimalem Wasserangebot mit rund $18 \text{ m (g WFM}^*)^{-1}$ wesentlich feinere Wurzeln ausgebildet hatte als unter Dürrestress ($14 \text{ m (g WFM}^*)^{-1}$). Die Rapspflanzen wiesen in diesem Experiment unter vergleichbaren Bedingungen mit $18 \text{ m (g WFM}^*)^{-1}$ die gleiche Wurzelfeinheit auf, allerdings erreichten sie aufgrund der höheren Wurzel-trockenmasse eine wesentlich größere Wurzellänge. Die Wurzelfeinheit von *Vicia faba* war in dem Gefäßversuch 2007 mit $3,5 \text{ m (g WFM}^*)^{-1}$ (Abbildung 7) sehr grob, was für das schlechte Wurzelsystem spricht. In einem Minirhizotron-experiment mit *Hordeum vulgare* und *Vicia faba* fanden HEERAMANN und JUMA (1993) heraus, dass die Wurzeln der Gerstenpflanzen länger waren und eine höhere TM aufwiesen als die Wurzeln der Ackerbohne.

* WFM: Wurzelfrischmasse

Triticum aestivum ist in der Lage, aufgrund des besseren Wurzelsystems, das Substrat intensiver zu durchwurzeln und so auch unter ungünstigen Verhältnissen (K- bzw. Wassermangel) ausreichende K-Konzentrationen und K-Gehalte in der Pflanze aufrecht zu erhalten.

Bei Dürrestress ist die Diffusion von K im Boden zur Pflanzenwurzel stark gehemmt. Eine Möglichkeit, den Pflanzen dennoch ausreichend K zur Verfügung zu stellen, ist die flüssige Applikation auf die Blätter. In einem Experiment mit *Vigna radiata* L. (THALLOOTH *et al.*, 2006) wurde unter anderem KNO_3 auf die Blätter gesprüht und zu verschiedenen Entwicklungsstadien Dürrestress angelegt. Dabei kam heraus, dass die Ernteparameter (Anzahl Körner, TKG, Korn- und Strohertrag) sowie Qualitätsparameter (Rohproteinkonzentration) signifikant zur unbehandelten Kontrolle erhöht wurden. SAWAN *et al.* (2006) und SAWAN *et al.* (2009) zeigten, dass durch eine mehrfache K-Blattapplikation bei Baumwolle sowohl quantitative als auch qualitative Verbesserungen hervorgerufen werden konnte.

Durch eine gute K-Versorgung stieg die Konzentration (Abbildung 27 und Abbildung 55) und die Aufnahme (Abbildung 28 und Abbildung 56) von K im Spross von *Vicia faba* und *Solanum lycopersicum* sowohl unter optimal feuchten Bodenverhältnissen als auch unter Stressbedingungen an.

In der Einleitung wurde bereits auf die negative Auswirkung zu hoher NaCl-Konzentrationen in der Bodenlösung eingegangen. Eine zu hohe NaCl-Konzentration in der Bodenlösung hatte negative Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum. In Anlehnung an das Zwei-Phasenmodell von MUNNS (1993) bei Salinität, bei der die erste Phase vorrangig durch osmotischen Stress in der Pflanze gekennzeichnet ist, und es in der zweiten Phase dann durch zusätzliche Ionentoxizität zu einer weiteren Reduzierung des Wachstums kommt, ist für den Containerversuch mit *Vicia faba* 2009 zu sagen, dass sich die Pflanzen in Phase 1 befanden. Es konnten an den Pflanzen keine Symptome erkannt werden, die auf eine toxische Wirkung von NaCl hindeuteten. Schadsymptome, die auf eine toxische Wirkung zu hoher Na-Konzentrationen schließen lassen, treten bei *Vicia faba* zunächst an mittelalten Blättern in Form von Nekrosen auf (SLABU, 2005; KRANZ, 2009). Der Salzstress war mit 9 dS m^{-1} im gesamten Profil zur Aussaat bereits sehr hoch angesetzt. Weisen Böden eine elektrische Leitfähigkeit $> 4 \text{ dS m}^{-1}$ auf, gelten

sie als versalzt (ANONYMUS, 1954). Die salinen Bedingungen führten zu einem höheren Bodenwasserpotential und verringerten dadurch die Wasserverfügbarkeit für die Pflanzen. Für die Pflanzen äußerte sich dies in einem Stress, der zu einem geringeren Wachstum führte. Aufgrund der unveränderten Transpiration pro Blattfläche war die Wasseraufnahme durch die Pflanzen auch unter Salinität nicht beeinträchtigt (Abbildung 31). Folglich ist die Phase 1 des Salzstresses vergleichbar mit einer Art des Dürrestresses (MAHAJAN und TUTEJA, 2005), da auch das Wasserpotential im Boden sehr niedrig ist. Eine Abbildung bei MARSCHNER (1995) zeigt, dass das osmotische Potential im Boden um $-0,036 \text{ MPa pro dS m}^{-1}$ sinkt. Somit müssen sich die Pflanzen ebenfalls osmotisch anpassen, um Wasser aufnehmen zu können (PARIDA und DAS, 2005). Ein Wachstumsversuch mit *Arabidopsis thaliana* L. (VERSLUES *et al.*, 2006) zeigte, dass bei gleichem Wasserpotential im Substrat, einmal durch Polyethylenglycol (PEG) eingestellt und in einer zweiten Variante durch NaCl erzielt, das Wachstum der Pflanzen in gleichem Maße gehemmt wurde. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen SÜMER *et al.* (2004) bei *Zea mays* L. Für die Pflanzen war es schwieriger Wasser aufzunehmen, und es kam so zu einem physiologischen Trockenstress, an den sich die Pflanzen anpassen mussten. Dies erfolgte durch Einlagerung osmotisch wirksamer Substanzen (u.a. Ionen, Zucker) (SCHUBERT, 2006a), damit das osmotische Potential und somit das Wasserpotential gesenkt werden konnte. Eine Analyse der Leitfähigkeit im Bodenextrakt nach der Ernte der Pflanzen ergab eine Verlagerung von NaCl in die unteren Schichten der Container. Die anfänglich auf 9 dS m^{-1} eingestellte Leitfähigkeit betrug nach der Ernte in den oberen 30 cm nur noch rund 1 dS m^{-1} , während in der untersten Schicht die Leitfähigkeit auf 12 dS m^{-1} angestiegen war. In dem sehr sandigen Substrat war eine Auswaschung sehr gut möglich. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass trotz des Gradienten ein salzinduzierter Wasserstress vorlag, denn zum einen wiesen die Pflanzen in der salinen Variante eine hohe Na-Konzentration im Spross auf (Abbildung 27) und zum zweiten war ihr Wachstum im Vergleich zu denen in der nichtsalinen Variante deutlich gehemmt (Abbildung 26). Aufgrund der vorwiegend flachen Durchwurzelung des Substrates durch *Vicia faba* kamen die Wurzeln nicht mehr mit dem Bereich hoher Salzkonzentrationen in Berührung. Bei einer besseren K-Versorgung

stieg die Konzentration von K in den Pflanzen an und erreichten in der Dürrestress- und der Salinitätsvariante den von BERGMANN (1993) festgesetzten kritischen Wert von $21 \text{ mg K (g TM)}^{-1}$. Die Pflanzen der optimal feuchten Variante konnten die K-Konzentration nur auf $18 \text{ mg (g TM)}^{-1}$ steigern, aber auch sie waren optimal ernährt, da keine K-Mangelsymptome an den Blättern erkennbar waren. Die geringe Konzentration in dieser Variante kann über einen Verdünnungseffekt erklärt werden. Bei K-Mangel können einige Funktionen von K, vor allem die Funktion von K als Ladungsausgleich und die osmotische Wirkung von K durch Na teilweise ersetzt werden (KHAN *et al.*, 2000; WAKEEL, 2008; WAKEEL *et al.*, 2010). Die Ackerbohnenpflanzen hatten bei K-Mangel sowohl bei nichtsalinen als auch bei salinen Bodenbedingungen eine erhöhte Konzentration von Na. Der Ionenantagonismus von K und Na zeigte sich dann deutlich mit steigendem Angebot von K im Boden. Die Konzentration und die Aufnahme von Na gingen zugunsten der verbesserten Aufnahme von K zurück. Die erzielten Ergebnisse decken sich mit denen von ÇAKMAK (2005), dass die Pflanzen durch eine gute K-Versorgung besser gegen abiotischen Stress in Form von Trockenheit oder Salinität geschützt sind.

4.2 Eine gute K-Versorgung verbessert die WUE

Die WUE ist der Quotient aus gebildeter Pflanzenmasse und verbrauchtem Wasser. In dieser Arbeit wurde die WUE auf die gebildete Trockenmasse (WUE_{DM}) bezogen und sofern vorhanden auf den Ertrag (WUE_Y). Die WUE von *Vicia faba* (Abbildung 33 und Abbildung 39), *Triticum aestivum* (Abbildung 51) und *Solanum lycopersicum* (Abbildung 58) wurde durch eine bessere K-Versorgung bei unterschiedlichem Wasserangebot und zu verschiedenen Entwicklungsstadien und Ernteterminen um 5 bis 25% verbessert. Diese Verbesserung steht in Einklang mit den Ergebnissen bei HATFIELD *et al.* (2001), sie beschreiben, dass die WUE von Pflanzen durch eine optimierte Nährstoffversorgung um 15 bis 25% verbessert werden kann.

Wurde, wie bei der Versuchstechnik mit keramischen Platten, K durch Na substituiert, sank aufgrund des K Mangels die TM (Abbildung 5), des Weiteren sank auch der Wasserverbrauch (Abbildung 8 A) der Pflanzen in der NaCl-Variante. Bei gleicher Transpiration pro Blattfläche (Abbildung 9 B) sowie

höherer Blattfläche stieg die WUE (Abbildung 8 B) in den Pflanzen, die gut mit K versorgt waren, tendenziell an.

Auf die einmalige Applikation einer 5%-K₂SO₄-Lösung reagierten *Vicia faba* und *Solanum lycopersicum* nur kurzzeitig. So wurde die WUE_{DM} (Abbildung 34) bei *Vicia faba* unter Dürrestress durch eine Verringerung des Wasserverbrauches bei unveränderter TM-Produktion verbessert. Der Einfluss der K-Blattapplikation auf die WUE_{DM} konnte bei dem Versuch mit Tomaten nur kurzfristig (bis zum ersten Erntetermin) gesichert werden. Bis zum zweiten Erntetermin verlor sich der positive Effekt im Vergleich zur +K-Variante. Die Wirkung einer K-Blattapplikation auf die WUE konnte in diesen Versuchen nur für einen vorübergehenden Moment gezeigt werden. Es wäre in weiteren Experimenten zu klären, ob durch eine mehrfache Anwendung zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit anderen K-Verbindungen nachhaltigere Ergebnisse zu erzielen sind.

Wie zuvor erwähnt, besitzt Weizen im Vergleich zur Ackerbohne ein feines Wurzelsystem, mit dem es möglich ist auch unter ungünstigen Bedingungen Wasser und Nährstoffe, hier vor allem K, aufzunehmen. Wegen dieser Fähigkeit war der Stress in diesem Experiment mit Sommerweizen noch zu schwach, um eindeutige Ergebnisse, die eine bessere K-Versorgung auf das Wachstum und die WUE haben könnte, zu liefern. Die WUE der Pflanzen von *Vicia faba* und *Solanum lycopersicum* konnte durch eine bessere K-Versorgung um bis zu einem Viertel verbessert werden.

4.3 Spezielle Wirkung von K auf die WUE unter Dürrestress bzw. salinen Bodenverhältnissen

Für den Versuch mit *Solanum lycopersicum* konnte eine Woche nach der Applikation der K₂SO₄-Lösung auf die Blätter statistisch gesichert nachgewiesen werden, dass ein spezieller Effekt auf das Wachstum unter Dürrestress vorlag. Denn die WUE stieg prozentual bei Dürrestress mit 45%-Punkten (Abbildung 59) signifikant stärker an als bei optimalem Wasserangebot. Der spezielle Effekt der Blattapplikation bei Dürrestress auf die prozentuale Steigerung der WUE zeigte sich ebenfalls als besonderer Effekt auf die TM-Bildung (Abbildung 61). Diese wurde zum ersten Erntetermin um 56%-Punkte im Vergleich zum optimalen Wasserangebot gesteigert. Der be-

sondere K-Effekt konnte unter salinen Bodenbedingungen bei *Vicia faba* nicht erzielt werden. Die K_2SO_4 -Blattapplikation zeigte unter Trockenstressbedingungen zumindest bei Tomatenpflanzen einen kurzen positiven Effekt. Es muss nachfolgend geklärt werden, ob andere K-Salze (bspw. Kaliumnitrat oder Kaliumchlorid) mit höherer Löslichkeit und optimierten Applikationsterminen nachhaltigere Einflüsse auf die WUE besonders bei Trockenstress aufweisen.

4.4 K führt zu einem geringeren Wasserverbrauch und / oder zu einer besseren TM-Produktion

Die Ergebnisse des Containerversuches mit *Vicia faba* 2009 sowie der Mitscherlichgefäßversuch mit *Solanum lycopersicum* zeigten einen deutlich positiven Effekt einer guten K-Versorgung auf das Wachstum der Pflanzen. Durch eine gute K-Versorgung wurde bei *Vicia faba* und *Solanum lycopersicum* die Trockenmasseproduktion (Abbildung 25 sowie Tabelle 12) und die WUE (Abbildung 33, Abbildung 39 sowie Abbildung 58) signifikant erhöht. In diesem Zusammenhang zeigten Li *et al.* (1999), dass die Synthese von Cellulose und die TM-Produktion bei Baumwolle durch eine bessere K-Versorgung gesteigert wurden.

Die WUE ist das Verhältnis von zwei physiologischen (Photosynthese und Transpiration) bzw. zwei agronomischen (TM und Wasserverbrauch) Parametern (BLUM, 2005). Wird die WUE verbessert, so ist dies auf eine Reduzierung des verbrauchten Wassers oder eine Erhöhung der TM zurückzuführen.

Eine Einsparung von Wasser konnte in allen Versuchen nicht nachgewiesen werden, dies deckt sich mit den Ergebnissen bei Raps (*Brassica napus* L.) von FRITZ (2009). Die Regulation der Stomata wurde bei besserer K-Versorgung nicht dahingehend verbessert, dass es zu einer Einsparung an Wasser kam, da die Transpiration (Abbildung 31) von *Vicia faba* nicht signifikant verringert wurde. Denn bei besserer K-Versorgung und damit steigender Blattfläche (Abbildung 29), stieg auch der Wasserverbrauch (Abbildung 30) an.

Der spezifische Wasserverbrauch (Abbildung 34, Abbildung 40, Abbildung 60 und Abbildung 62) der Pflanzen stieg an. Stand den Pflanzen eine aus-

reichende Nährstoffkonzentration zur Verfügung, waren sie in der Lage im Vergleich zu den Pflanzen, die einer Mangelsituation ausgesetzt waren, mehr TM zu bilden. Die Verbesserung der WUE als Quotient aus verbrauchtem Wasser und gebildeter TM war bei diesen Versuchen auf eine erhöhte TM-Bildung zurückzuführen (Abbildung 34, Abbildung 40, Abbildung 61 und Abbildung 63). Bei optimaler Ernährung waren die Pflanzen in der Lage, das angebotene und aufgenommene Wasser effizienter auszunutzen und in mehr TM umzusetzen. Dies traf auch auf Wasserstresssituationen zu, die entweder durch Dürre oder Bodensalinität ausgelöst wurden.

Das Wachstum von Pflanzenorganen ist gekennzeichnet durch den Im- und Export von Nährstoffen. Als einen Regelfall gibt MARSCHNER (1995) an, dass in älteren Pflanzenteilen der Export von Nährstoffen den Import überwiegt und somit der Netto Gehalt der Nährstoffe sinkt. Dahingegen ist der Import in jungem, wachsendem Gewebe größer. In keimenden Samen werden Nährstoffe, die im Speichergewebe vorhanden sind, wieder mobilisiert, damit das Wurzel- und Sprosswachstum beginnen kann. Die im Speichergewebe festgelegten und mobilisierbaren Nährstoffe ermöglichen es den jungen Pflanzen einige Tage ohne externe Nährstoffversorgung, beispielsweise über die Wurzeln, zu überleben. Die vegetative Phase der Pflanze ist oftmals dadurch gekennzeichnet, dass entweder permanent nicht genügend Nährstoffe im Boden verfügbar sind, oder dass zeitweise durch einen eventuellen Wassermangel gerade die Diffusion von K eingeschränkt ist und so ein Mangel an K in Pflanzenteilen auftreten kann (MARSCHNER, 1995). Dieser Mangel kann durch die Retranslokation ausgeglichen werden, indem K von ausgewachsenen, älteren Blättern zu Bereichen transportiert werden, in denen ein erhöhter Bedarf besteht. Dieser erhöhte Bedarf besteht in wachsendem, jungem Gewebe, vor allem dort, wo es wichtig ist, dass der Lebenszyklus abgeschlossen werden kann. Wechseln Pflanzen von der vegetativen in die generative Phase ihrer Entwicklung, so spielt die Retranslokation von K ebenfalls eine wichtige Rolle. Vor allem, wenn Samen, Früchte oder andere Speicherorgane gebildet werden (MARSCHNER, 1995).

Unterliegt die Pflanze einem Wasserstress, so wird die TM-Produktion stark beeinträchtigt (SCHITTENHELM, 2010). Ab dem Schossen auftretender Wassermangel führt maßgeblich zu Ertrags- und Qualitätseinbußen

(MARSCHNER, 1995). Der Containerversuch mit Sommerweizen zeigte, dass durch einen Trockenstress ab BBCH 31 der Ertrag von Korn und Stroh (Abbildung 44), die Anzahl der Ähren (Abbildung 46) sowie die Anzahl der Körner (Abbildung 47) stark vermindert wurden. Wesentlich stärker reagierte *Vicia faba* auf ein mangelndes Wasserangebot bei Dürrestress. Der Ertrag (Abbildung 35) fiel rapide durch eine wesentlich niedrigere Ausbildung von Körnern (Abbildung 37) bei Dürrestress im Vergleich zu den Pflanzen bei ausreichendem Wasserangebot ab.

Für das Wachstum müssen die Zellwände dehnbar sein. Basierend auf der Lockhart-Gleichung (LOCKHART, 1965; verändert nach CHAVARRÍA KRAUSER, 2007):

$$d_t l = l\phi(p - Y)$$

wobei l die Länge der Zelle und Y der Grenzwert der Extensibilität darstellt, setzt sich das Streckungswachstum aus zwei überlagernden Faktoren zusammen. Zum einen die Aufnahme von Wasser, damit der Turgor (p) aufgebaut werden kann und zum zweiten aus einem Anstieg in der Zellwandnachgiebigkeit, der Zellwandextensibilität (ϕ).

Entgegen der Ergebnisse bei MENGEL und ARNEKE (1982) wurde in diesen Versuchen bei *Vicia faba* (Abbildung 32) das osmotische Potential ψ_o durch eine K-Düngung nur bei optimaler Wasserversorgung verringert, dies äußerte sich aber nicht in einer signifikanten Verringerung des Wasserpotentials ψ oder einem Anstieg des Turgors ψ_p . In den anderen Varianten mit *Vicia faba* und auch bei dem Experiment mit *Solanum lycopersicum* (Abbildung 57) konnte kein Einfluss von K auf eine Steigerung des Turgors bewiesen werden. MENGEL und ARNEKE (1982) begründeten das bessere Wachstum von *Phaseolus vulgaris* bei erhöhter K-Versorgung mit dem Anstieg des Turgors. Ihrer Meinung nach vergrößerten sich die Zellen infolge des erhöhten Zellinnendrucks (Turgor). Der Turgor wird bei Salzstress lediglich vorübergehend verringert, zu dem Zeitpunkt, an dem die Pflanzen zum ersten Mal dem Stress ausgesetzt sind. Er stabilisiert sich aber in sehr kurzer Zeit wieder auf einem normalen Niveau (MUNNS *et al.*, 2000; MUNNS, 2002). Weitere Untersuchungen zeigten aber auch, dass der Turgor nicht durch Salz- oder Wasserstress ver-

mindert wird und Unterschiede im Wachstum auf eine andere Ursache zurückzuführen sind (VAN VOLKENBURGH und BOYER, 1985; CRAMER, 1992; PULIGA *et al.*, 1996; CRAMER *et al.*, 1998; DE COSTA *et al.*, 2007). Bei Salz- und Trockenstress wird nach MUNNS *et al.* (2000) sehr schnell die Zellstreckung eingeschränkt.

Eine weitere Möglichkeit, die das Wachstum von Zellen unterstützt, ist die Förderung der Zellwandextensibilität. Hier haben vor allem Expansine eine Bedeutung (COSGROVE, 1999; COSGROVE, 2005). Sie binden an der Schnittstelle zwischen den Cellulosemicrofibrillen und den Matrixpolysacchariden in der Zellwand. Dabei induzieren sie die Dehnbarkeit, indem nichtkovalente Bindungen reversibel getrennt werden (MCQUEEN-MASON und COSGROVE, 1995). Expansine sind bekannte Proteine in der Zellwand, die in einem sauren pH-Milieu die Zellexpansion fördern können. Das Optimum liegt in einem pH-Bereich von 4,5 bis 6 (MCQUEEN-MASON *et al.*, 1992). KRANZ (2009) zeigte, dass der apoplastische pH-Wert in Blättern von *Vicia faba* unter osmotischen Stress erhöht ist. Er schlussfolgerte in Anlehnung an die Säure-Wachstum-Theorie nach HAGER *et al.* (1971) und HAGER (2003), dass durch den erhöhten pH-Wert im Apoplasten bei osmotischem Stress die Wirkung der Expansine gesenkt werde und damit die Wachstumsminderung zu erklären sei. Der genaue Mechanismus der Expansinfunktion ist allerdings derzeit noch ungeklärt (SHAROVA, 2007). Einen direkten Zusammenhang zwischen Wasserstress und einem pH-Anstieg im Apoplasten bei gleichzeitiger Verringerung der Ansäuerungsrate lieferten VAN VOLKENBURGH und BOYER (1985).

Hohe Konzentrationen von Na in halophoben Pflanzen, zu der *Vicia faba* zählt, bzw. niedrige K : Na-Verhältnisse stören wachstumswirksame, enzymabhängige Vorgänge (TESTER und DAVENPORT, 2003). Während der Proteinbiosynthese werden bspw. für die Aktivierung von Enzymen hohe K-Konzentrationen benötigt. Folglich ist auch die Synthese von Expansinen auf eine ausreichende Konzentration von K angewiesen. Das K : Na-Verhältnis im Spross von *Vicia faba* unter salinen Bodenbedingungen stieg in dem K-Steigerungsversuch 2008 bei K-Mangel von 0,8 auf 2,0 bei K 400 an (Abbildung 22). Dies führte ebenso zu einem besseren Wachstum von *Vicia faba*.

Durch die protonenpumpende ATPase (H^+ -ATPase) in der pflanzlichen Plasmamembran kommt die Ansäuerung des Apoplasten zustande. Des Weiteren entsteht in der Zelle ein Ladungsungleichgewicht aufgrund fehlender positiv geladener Protonen. Dies ist notwendig, um den sekundären Ionentransport durch die Plasmamembran zu gewährleisten (MORSOMME und BOUTRY, 2000). Der Transport von K kann zum einen als Symport mit H^+ , zum anderen durch spezifische Kanäle ablaufen. Um den durch die H^+ -ATPase aufgebauten elektrochemischen Gradienten auszugleichen, kann K aufgrund seiner guten Mobilität durch Membranen und Zellkompartimente einströmen (MARSCHNER, 1995). Damit steigt die Konzentration von K an und somit steht mehr K für die Enzymaktivierung zur Verfügung. In der ersten Phase des Salzstresses konnte gezeigt werden (PITANN *et al.*, 2009a), dass die Pumpaktivität der H^+ -ATPase in der Plasmamembran bei *Zea mays* L. vermindert war und dadurch der Apoplast einen höheren pH-Wert aufwies. Dadurch konnte die Aktivierung der für das Wachstum erforderlichen zellwandaufweichenden Enzyme gestört werden. Dies zeigte sich in einer Verminderung des Wachstums der Pflanzen (PITANN *et al.*, 2009b). Für die Aktivierung der H^+ -ATPase ist K sehr bedeutend, dies konnten GIBRAT *et al.* (1990) und GROUZIS *et al.* (1990) zeigen.

Das bessere Wachstum der Pflanzen durch eine optimale K-Versorgung, sowohl unter Kontrollbedingungen als auch bei osmotisch bedingtem Wasserstress, in den Experimenten der vorliegenden Arbeit könnte auf eine verbesserte Leistung der H^+ -ATPase zurückgeführt werden. Stand den Pflanzen ausreichend K zum Ladungsausgleich in den Zellen zur Verfügung, könnte die H^+ -ATPase effektiver arbeiten, der pH-Wert im Apoplast könnte auf einem optimal niedrigen Niveau gehalten werden. Die Zellwandextensibilität würde gefördert, dadurch konnten die Zellstreckung und damit das Wachstum erfolgen.

5 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, den speziellen Einfluss einer Kalium-(K)-Düngung auf das Pflanzenwachstum herauszustellen. Es wurde untersucht, ob der Wasserhaushalt der Pflanzen durch Kalium verbessert und inwiefern die Wassernutzungseffizienz (WUE) verändert wird. Dabei wurde auch nach speziellen Wirkungen von K auf die Verbesserung der WUE unter Trockenstress- und Salinitätsbedingungen geforscht. Die Verbesserung der WUE könnte auf eine Verringerung des Wasserverbrauches und / oder auf die gesteigerte Trockenmassebildung (TM) zurückzuführen sein.

Für die Untersuchung der Hypothesen wurden Ackerbohnen (*Vicia faba* L.), Sommerweizen (*Triticum aestivum* L.) und Tomaten (*Solanum lycopersicum* L.) unter verschiedenen Kalium- und Wasserversorgungsstufen angebaut. Kalium wurde vorrangig als K_2SO_4 in optimaler und in unzureichender Menge angeboten. Der Wasserstress wurde bei allen Pflanzen durch Dürre, bei den Ackerbohnen zusätzlich auch über saline Bodenverhältnisse induziert. Als Kontrolle wurden die Varianten bei optimaler Bodenfeuchte angezogen. Durch die salinen Bodenbedingungen wurde in den Pflanzen ein Stress ausgelöst, der zu einem geringeren Wachstum führte. Eine Ionentoxizität war an den Blättern der Ackerbohne nicht zu erkennen. Für die Versuche mit Ackerbohnen und Sommerweizen wurden Container (0,9 · 0,4 · 0,4 m, 120 L) verwendet. Damit war es möglich in einer Vegetationshalle unter kontrollierten Umwelteinflüssen (kein Niederschlag) Bedingungen wie in einem Feldversuch (Bestandesdichte, Düngung) zu simulieren. In den Containern stand den Pflanzen ein großes Bodenvolumen zur Verfügung, das gezielt gedüngt und bewässert wurde. Die Tomaten wuchsen in Mitscherlichgefäßen in einer Klimakammer.

Da die Anlieferung von K durch Diffusion an die Wurzeln bei Dürrestress erschwert ist, bot sich als weitere Möglichkeit die flüssige Applikation von K_2SO_4 auf die Blätter an. Dies wurde einmalig mit einer 5%-Lösung bei den Ackerbohnen und den Tomaten durchgeführt.

Alle Pflanzen erzielten durch eine bessere K-Versorgung einen höheren K-Entzug und damit eine höhere intrazelluläre K-Konzentration. Das Wachstum

wurde auch bei Wasserstress (Dürre und Salinität) maßgeblich durch das bessere K-Angebot gesteigert. In den Pflanzen, die im salinen Substrat mit einer optimalen K-Versorgung aufwuchsen, konnte aufgrund des Ionenantagonismus zwischen K^+ und Na^+ die Konzentration von Na signifikant verringert werden. Dabei wurde das $K^+ : Na^+$ -Verhältnis erhöht.

Die WUE konnte ebenfalls sowohl unter optimal feuchten Bodenverhältnissen als auch bei Dürrestress und Salinität durch eine höhere K-Versorgung verbessert werden. Stand den Pflanzen mehr Kalium zur Verfügung, stieg deren absoluter Wasserverbrauch an. Eine bessere K-Versorgung der Pflanzen resultierte nicht in einem verminderten Wasserverbrauch, die Transpiration bezogen auf die Blattfläche blieb unverändert. Allerdings bildeten die Pflanzen durchweg zwischen 5 und 25% in Spitzen bis zu 75% mehr TM.

Die flüssige Applikation von K_2SO_4 auf die Blätter hatte einen positiven Effekt auf die WUE. Bei den Tomaten war der Effekt bei Dürrestress sogar signifikant stärker ausgeprägt als bei optimaler Bodenfeuchte. Diese Beziehung konnte auch bei der TM-Bildung belegt werden. Die Ackerbohnen profitierten bis zum Zeitpunkt der Blüte davon. Die einmalige Applikation hatte jedoch nur einen kurzen Effekt. So verlor sich der besondere Einfluss bei den Tomaten bereits zum zweiten Erntetermin. Die Applikation zeigte im Ertrag der Ackerbohne keinen besonderen Einfluss mehr.

Der durch die bessere K-Versorgung hervorgerufene Anstieg der TM-Produktion könnte mit einer gesteigerten Effizienz der H^+ -ATPase begründet werden. Damit könnte der Apoplast stärker angesäuert werden, was nach der Säure-Wachstums-Theorie zu einem besseren Wachstum führen sollte. Außerdem würde somit das optimale Milieu für die zellwandaufweichenden Expansine hergestellt. Die Zellwandextensibilität könnte bei unverändertem Turgor erhöht werden und somit zum Streckungswachstum beitragen.

6 Summary

The aim of this work was to investigate the special effect of potassium (K) fertilization on plant growth. It was determined whether the plant water economy was improved due to a higher K application and how the water-use efficiency (WUE) was changed. It was hypothesized that plants reduce their water demand and are able to produce more dry matter (DM), due to higher K fertilization.

To test these hypotheses, field beans (*Vicia faba* L.), summer wheat (*Triticum aestivum* L.) and tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) were grown under various potassium and water supply. K was applied mainly as K_2SO_4 in optimal and deficient amounts. All plants were tested under drought stress, while the field beans additionally suffered from saline soil conditions. Under salt stress, the plants only faced osmotic problems since no ion toxicity became obvious. For the experiments with field bean and summer wheat, large containers (0,9 · 0,4 · 0,4 m; 120 L) were used to simulate field conditions. The space for each plant and fertilizer applied were according to field recommendations. Tomato plants were grown in Mitscherlich pots in a climatic chamber. Under drought stress, the diffusion of K to the roots is reduced, therefore the foliar application of a 5%- K_2SO_4 -solution was tested for field bean and tomato.

All plants showed higher intracellular K concentration and higher K content due to an improved K supply. Plant growth also increased under water stress conditions (drought and salinity) under optimal K conditions. With additional K application field beans cultivated under saline conditions were able to decrease the concentration of sodium (Na) due to the antagonism between K^+ and Na^+ . Thus, the $K^+ : Na^+$ ratio increased by which development were not affected by salt stress.

In all plants, the WUE increased after increased K fertilization under both optimal water conditions and drought as well as under salinity treatment. The total water use was increased with higher K supply in all plants and did not result in sparing water because transpiration was not decreased. However, the dry matter (DM) production of the plants increased between 5 and 25% as a result of the higher K supply.

The foliar application of K_2SO_4 showed a positive influence on the WUE. For tomatoes this effect was significantly higher under drought stress than under optimal soil water conditions. According to the increased WUE, the DM increased significantly under drought stress because of the foliar application. The field beans tended to benefit from the foliar treatment until florescence. The one-time application of K_2SO_4 showed only a short-term effect. For tomatoes this effect was disappeared at the second harvest, while yield of field beans did not benefit from the foliar application at all.

The increase of DM production as a consequence of the higher K application could base on an increase in the efficiency of the plasma membrane H^+ -ATPase. Because of this, the acidification of the apoplast could increase, which leads to an increase of cell-wall-extensibility and cell growth according to the acid-growht-theroy. Furthermore, due to the apoplastic acidification the optimum pH for cell-wall-loosening proteins such as expansions could achieve and cells were able to expand without changing the turgor.

7 Literaturverzeichnis

- ANONYMUS (1954): Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils. US Salinity Laboratory Staff, *USDA Handbook 60*. US Government Printing Office, Washington DC.
- ANONYMUS (1987): Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. Online im Internet URL: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm> Stand: 15.03.2010.
- ANDERSSON, S.; SIMONSSON, M.; MATTSON, L.; EDWARDS, A.C.; ÖBORN, I. (2007): Response of soil exchangeable and crop potassium concentrations to variable fertilizer and cropping regimes in long-term field experiments on different soil types. *Soil Use and Management* **23**, 10-19.
- ARNOLD, C. (1885): Chemisches Laboratorium der Königl. Thierarzneischule zu Hannover. Die Kjeldahl'sche Methode der Stickstoffbestimmung. *Archiv der Pharmazie* **223**, 177-185.
- ARNOLD, C. (1886): Die allgemeine Anwendbarkeit der Kjeldahl'schen Stickstoffbestimmungsmethode. *Archiv der Pharmazie* **224**, 785-794.
- ASKEGAARD, M.; ERIKSON, J.; JOHNSTON, A.E. (2004): Sustainable management of potassium. In: SCHJØNNING, P.; ELMHOLT, S.; CHRISTENSEN, B.T. (2004): Managing Soil Quality – Challenges in Modern Agriculture. *CABI Publishing*, Oxon.
- BAEUMER, K. (1994): Allgemeiner Pflanzenbau. *UTB Verlag Eugen Ulmer*, Stuttgart.

- BERGMANN, W. (1993): Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. *Gustav Fischer Verlag*, Stuttgart.
- BETHUNE, M.G. und BATEY, T.J. (2002): Impact on soil hydraulic properties resulting from irrigation salin-sodic soils with low salinity water. *Australian Journal of Experimental Agriculture* **42**, 273-279.
- BLUM, A (2005): Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential— are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? *Australian Journal of Agricultural Research* **56**, 1159-1168
- BLUME, H.P.; BRÜMER, G.W.; HORN, R.; KANDELER, E.; KÖGEL-KNABNER, I.; KRETZSCHMAR, R. STAHR, K., WILKE, B.-M. (2010): Scheffer / Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde. *Spektrum Akademischer Verlag*, Berlin, Heidelberg.
- BOUGER, P.M. (1729): Essai d'Optique sur la gradation de la Lumière. *Claude Jombert*, Paris.
- CAKMAK, I. (2005): The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **168**, 521-530.
- CHAVARRÍA KRAUSER, A. (2007): Transport phenomena in plant-internal processes: growth and carbon dioxide transport. *Dissertation*, Naturwissenschaftlich-Mathematischen Gesamtfakultät der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.
- COSGROVE, D.J. (1999): Enzymes and other agents that enhance cell wall extensibility. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* **50**, 391-417.
- COSGROVE, D.J. (2005): Growth of plant cell wall. *Nature Reviews Molecular Cell Biology* **6**, 850-861.

- CRAMER, G.; KRISHNAN, K.; ABRAMS, S. (1998): Kinetics of maize leaf elongation IV. Effects of (+)- and (-)-abscisic acid. *Journal of Experimental Botany* **49**, 191-198.
- CRAMER, G. (1992): Kinetics of maize leaf elongation: III. Silver thiosulfate increases the yield threshold of salt-stressed plants, but ethylene is not involved. *Plant Physiology* **100**, 1044-1047.
- DE COSTA, W.; ZÖRB C.; HARTUNG, W.; SCHUBERT, S. (2007): Salt resistance is determined by osmotic adjustment and abscisic acid in newly developed maize hybrids in the first phase of salt stress. *Physiologia Plantarum* **131**, 311-321.
- DIEPENBROCK, W.; FISCHBECK, G.; HEYLAND, K.U. (1999): Spezieller Pflanzenbau. *UTB Verlag Eugen Ulmer*, Stuttgart.
- DÖÖS, B.R. (2002): Population growth and loss of arable land. *Global Environmental Change* **12**, 303-311.
- EAKES, D. und WRIGHT, R.D. (1991): Water relations of *Salvia splendens* "Bonfire" as influenced by potassium nutrition and moisture conditioning. *Journal of the American Society for Horticultural Science* **116**, 712-715.
- ECKELMANN, W. (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, *Ad-Hoc-AG-Boden, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe* (Hrsg.). 5. Auflage, Hannover.
- FRITZ, A. (2009): Bedeutung der Kaliumernährung für die Dürresistenz und das vegetative Wachstum von Raps (*Brassica napus* L.). *Bachelorthesis*, Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökophologie und Umweltmanagement Justus-Liebig-Universität Gießen.

- GERICKE, S. und KURMIES, B (1952a): Colorimetrische Bestimmung der Phosphorsäure mit Vanadat-Molybdat. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry* **137**, 15-22.
- GERICKE, S. und KURMIES, B. (1952b): Die colorimetrische Phosphorsäurebestimmung mit Ammonium-Vanadat-Molybdat und ihre Anwendung in der Pflanzenanalyse. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **104**, 235-247.
- GIBRAT, R.; GROUZIS, J.P., RIGUAD, J.; GRIGNON, C. (1990): Potassium stimulation of corn root plasmalemma ATPase : II. H⁺-pumping in native and reconstituted vesicles with purified ATPase. *Plant Physiology* **93**, 1183-1189.
- GRIMME, H. (1978): Wurzelsystem und Nährstoffanlieferung. *Kali Briefe* **14**.
- GROUZIS, J.P.; GIBRAT, R.; RIGUAD, J.; AGEORGES, A.; GRIGNON, C. (1990): Potassium stimulation of corn root plasmalemma ATPase : I. Hydrolytic activity of native vesicles and purified enzyme. *Plant Physiology* **93**, 1175-1182.
- HAGER, A. (2003): Role of the plasma membrane H⁺-ATPase in auxin-induced elongation growth: historical and new aspects. *Journal of Plant Research* **116**, 483-505.
- HAGER, A.; MENZEL, H.; KRAUSS, A. (1971): Versuche und Hypothese zur Primärwirkung des Auxins beim Streckungswachstum. *Planta* **100**, 47-75.
- HATFIELD, J.L.; SAUER, T.J.; PRUEGER, J.H. (2001): Managing soils to achieve greater water use efficiency: A review. *Agronomy Journal* **93**, 271-280.

- HAUMANN, G. und DIETZSCH, H. (2000): Winter- und Sommerweizen. In: Lütke Entrup und Oehmichen: Lehrbuch des Pflanzenbaues. Band 2 Kulturpflanzen. *Verlag Thomas Mann, Gelsenkirchen*.
- HEERAMAN, D. und JUMA, N. (1993): A comparison of minirhizotron, core and monolith methods for quantifying barley (*Hordeum vulgare* L.) and fababean (*Vicia faba* L.) root distribution. *Plant and Soil* **148**, 29-41.
- HOLMQVIST, J.; ØGAARD, A.F.; ÖBORN, I.; EDWARDS, A.C.; MATTSSON, L.; SVERDRUP, H. (2003): Application of the PROFILE model to estimate potassium release from mineral weathering in Northern European agricultural soils. *European Journal of Agronomy* **20**, 149-163.
- HOLTHUSEN, D.; PETH, S.; HORN, R. (2009): Wirkung von Düngesalzen auf rheologische Stabilitätsparameter. Tagungsbeitrag zu: *Jahrestagung der DBG, Kom. VIII*. Titel der Tagung: Böden – eine endliche Ressource. September 2009.
- HU, Y. und SCHMIDHALTER, U. (2005): Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **168**, 541-549.
- KERSCHBERGER, M.; HEGE, U.; JUNGK, A. (1997): Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. *VDLUFA Darmstadt*.
- KHAN, M. A.; UNGAR, M.A.; SHOWALTER A.M. (2000): Effects of salinity on growth, water relations and ion accumulation of the subtropical perennial halophyte, *Atriplex griffithii* var. *stocksii*. *Annals of Botany* **85**, 225-232.
- KÖHLER, W; SCHACHTEL, G.; VOLESKE, P. (2001): Biostatistik. 3. Auflage. *Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg*

- KRANZ, T. (2009): Zusammenhang von Wachstumsprozessen und apoplastischem pH-Wert von *Vicia faba* unter Salzstress. *Dissertation*, Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotoxikologie und Umweltmanagement Justus-Liebig-Universität Gießen.
- KUCHENBUCH, R.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. (1986): Potassium availability in relation to soil moisture. *Plant and Soil* **95**, 221-231.
- KUCHENBUCH, R. und JUNG, J. (1988): Changes in root-shoot ratio and ion uptake of maize (*Zea mays* L.) from soil as influenced by a plant growth regulator. *Plant and Soil* **109**, 151-157.
- KUCHENBUCH, R. und JUNGK, A. (1984): Wirkung der Kaliumdüngung auf die Kaliumverfügbarkeit in der Rhizosphäre von Raps. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **147**, 435-448.
- KUNTZE, H.; ROESCHMANN, G.; SCHWERDTFEGGER, G. (1994): Bodenkunde. *UTB Verlag Eugen Ulmer*, Stuttgart.
- LEPPIN, T. (2007): Mobilisierungspotential unterschiedlicher Pflanzen für stabile Phosphatformen im Boden. *Dissertation*, Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotoxikologie und Umweltmanagement Justus-Liebig-Universität Gießen.
- LI, F.S.; XU, Y.Z. und ZHANG, C. (1999): Effects of nitrogen, phosphorus and potassium on the development of cotton bolls in summer. *Acta Gossypii Sinica* **11**, 24-30.
- LOCKHART, J. A. (1965): An analysis of irreversible plant cell elongation. *Journal of Theoretical Biology* **8**, 264-275.
- LÜTKE ENTRUP, E. (1986): Ölfrüchte und Körnerleguminosen. In OEHMICHEN, J.: Pflanzenproduktion. *Verlag Paul Parey*, Hamburg und Berlin.

- MAHAJAN, S. und TUTEJA, N. (2005): Cold, salinity and drought stresses: An overview. *Archives of Biochemistry and Biophysics* **444**, 139-158.
- MAKOWSKI, N. (2000): Körnerleguminosen. In: Lütke Entrup und Oehmichen: Lehrbuch des Pflanzenbaues Band 2 Kulturpflanzen. *Verlag Thomas Mann*, Gelsenkirchen.
- MARSCHNER, H. (1995): Mineral Nutrition of Higher Plants. *Academic Press*, London.
- MCQUEEN-MASON, S.; DURACHKO, D.M.; COSGROVE, D.J. (1992): Two endogenous proteins that induce cell wall extension in plants. *Plant Cell* **4**, 1425-1433.
- MCQUEEN-MASON, S.J. und COSGROVE, D.J. (1995): Expansin mode of action on cell walls (Analysis of wall hydrolysis, stress relaxation and binding). *Plant Physiology* **107**, 87-100.
- MENGEL, K. (2007): Potassium. In: BARKER, A. und PILBEAM, D. (2007): Handbook of Plant Nutrition. *Taylor & Francis Group*, London, New York.
- MENGEL, K. und ARNEKE, W.W. (1982): Effect of potassium on the water potential, the pressure potential, the osmotic potential and cell elongation in leaves of *Phaseolus vulgaris*. *Physiologia Plantarum* **54**, 402-408.
- MENGEL, K. und STEFFENS, D. (1985): Potassium uptake of rye-grass (*Lolium perenne*) and red clover (*Trifolium pratense*) as related to root parameters. *Biology and Fertility of Soils* **1**, 53-58.

- MILBURN, T. (2006): Living in a Changing World. In ANONYMUS: The 2nd UN World Water Development Report: "Water, a shared responsibility." UNESCO. Paris, New York
- MORSOMME, P. und BOUTRY, M. (2000): The plant plasma membrane H⁺-ATPase: structure, function and regulation. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes* **1465**, 1-16.
- MUNK, K. (2000): Biochemie, Zellbioökologie, Ökologie, Evolution. *Spektrum Akademischer Verlag GmbH*. 1. Auflage. Heidelberg, Berlin.
- MUNNS, R. (1993): Physiological processes limiting plant growth in saline soils: Some dogmas and hypotheses. *Plant, Cell & Environment* **16**, 15-24.
- MUNNS, R.; PASSIOURA, J.B.; GUO, J.; CHAZEN, O. (2000): Water relations and leaf expansion: importance of time scale. *Journal of Experimental Botany* **51**, 1495-1504.
- MUNNS, R. (2002): Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell & Environment* **25**, 239-250.
- MUNNS, R.; SCHACHTMANN, D.P.; CONDON, A.G. (1995): The significance of a two-phase growth response to salinity in wheat and barley. *Australian Journal of Plant Physiology* **22**, 561-569.
- NONAMI, H. und SCHULZE, E.D. (1989): Cell water potential, osmotic potential, and turgor in the epidermis and mesophyll of transpiring leaves. *Planta* **177**, 35-46.
- PARIDA, A.K. und DAS, A.B. (2005): Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **60**, 324-349.

- PEITER, E. (2002): Metabolitentransport in inderterminierten Leguminosenknöllchen. *Dissertation*, Justus-Liebig-Universität, Gießen.
- PITANN, B.; SCHUBERT, S., MÜHLING, K.H. (2009a): Decline in leaf growth under salt stress is due to an inhibition of H⁺-pumping activity and increase in apoplastic pH of maize leaves. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **172**, 535-543.
- PITANN, B.; KRANZ, T.; MÜHLING, K.H. (2009b): The apoplastic pH and its significance in adaptation to salinity in maize (*Zea mays* L.): Comparison of fluorescence microscopy and pH-sensitive microelectrodes. *Plant Science* **176**, 497-504.
- PITANN, B.; ZÖRB, C.; MÜHLING, K.H. (2009c): Salzstress bei Kulturpflanzen: Bedeutung für die weltweite Pflanzenproduktion. *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit* **4**, 202-206.
- PULIGA, S.; VAZZANA, C.; DAVIES, W. (1996): Control of crops leaf growth by chemical and hydraulic influences. *Journal of Experimental Botany* **47**, 529-537.
- QADIR, M.; GHAFOR, A.; MURTAZA, G. (2000): Amelioration strategies for saline soils: a review. *Land Degradation & Development* **11**, 501-521.
- RATHER, K. (2007): Nährstoffversorgung von Tomaten in Bodenkultur unter dem Aspekt der Flüssigdüngung mit Tropfbewässerung. In: Sauer und Klein: Tomaten Aktuelle Versuchsergebnisse und Informationen aus Baden-Württemberg. *Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau* (Hrsg.) Heidelberg.

- REEB, D. (2006): Einfluss von Wachstumsregulatoren auf die Nährstoffaufnahme von Winterraps (*Brassica napus* L. ssp. *oleifera*) und Sommerweizen (*Triticum aestivum* L.). *Masterthesis*, Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotoxologie und Umweltmanagement Justus-Liebig-Universität, Gießen.
- RENGASAMY, P. (2006): World salinization with emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany* **57**, 1017-1023.
- RENGASAMY, P. und OLSSON, K.A. (1991): Sodicity and Soil Structure. *Australian Journal of Soil Research* **29**, 935-952.
- SAWAN, Z. M.; HAFEZ, S.A.; BASYONY und A.E.; ALKASSAS, A.R. (2006): Cottonseed, protein, oil yields and oil properties as affected by nitrogen fertilization and foliar application of potassium and a plant growth retardant. *World Journal of Agricultural Sciences* **2**, 56-65.
- SAWAN, Z. M.; FAHMY, A.H. und YOUSEF, S.E. (2009): Direct and residual effects of nitrogen fertilization, foliar application of potassium and plant growth retardant on egyptian cotton growth, seed yield, seed viability and seedling vigor. *Acta Ecologica Sinica* **29**, 116-123.
- SCHEFFER, F. und PAJENKAMP, H. (1953): Über die colorimetrische Bestimmung der Phosphorsäure mit Vanadat-Molybdat. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry* **138**, 266-269.
- SCHEIDLER, A. (1999): Wettlauf zwischen Pflug und Storch. Deutsche Stiftung Weltbevölkerung. *Süddeutscher Verlag*.
- SCHILLING, G. (2000): Pflanzenernährung und Düngung. *UTB Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart*

- SCHITTENHELM, S. (2010): Effect of drought stress on yield and quality of maize/sunflower and maize/sorghum intercrops for biogas production. *Journal of Agronomy and Crop Science* (Article online in advance of print)
- SCHOLANDER, P. F.; BRADSTREET, E.D.; HEMMINGSEN, E.A.; HAMMEL, H.T: (1964). Hydrostatic pressure and osmotic potential in leaves of mangroves and some other plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **1**, 119-125.
- SCHOLANDER, P. F.; BRADSTREET, E.D.; HEMMINGSEN, E.A.; HAMMEL, H.T (1965): Sap pressure in vascular plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science* **148**, 339-346.
- SCHUBERT, S. (2006a): Pflanzenernährung – Grundwissen Bachelor, 1. Auflage. *UTB Verlag Eugen Ulmer*, Stuttgart.
- SCHUBERT, S. (2006b): Strategien gegen Trockenstress. *DLG-Mitteilungen* **3/2006** 65-67.
- SCHUBERT, S. und REEB, D. (2006): Pflanzenbauliche Maßnahmen zur Verbesserung der Ertragsleistung im Weizenanbau unter Trockenbedingungen. In: *Nachwachsende Rohstoffe im Pflanzenbau. Kurzfassung der Vorträge. Mitteilung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften Band 18*: Kiel.
- SHABALA, S. und CUIN, T.A. (2008): Potassium transport and plant salt tolerance. *Physiologia Plantarum* **133**, 651-669.
- SHAROVA, E. (2007): Expansins: Proteins involved in cell wall softening during plant growth and morphogenesis. *Russian Journal of Plant Physiology* **54**, 713-727.

- SIMONSSON, M.; ANDERSSON, S.; ANDRIST-RANGEL, Y.; HILLIER, S.; MATTSSON, L.; ÖBORN, I. (2007): Potassium release and fixation as a function of fertilizer application rate and soil parent material. *Geoderma* **140**, 188-198.
- SLABU, C. (2005): Physiologische Reaktionen der Ackerbohne (*Vicia faba* L.) auf Natrium und Chlorid. *Dissertation*, Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotoxologie und Umweltmanagement, Justus-Liebig-Universität, Gießen.
- SO, H.B. und AYLMOORE, A.G. (1993): How do sodic soils behave – the effects of sodicity on soil physical behavior. *Australian Journal of Soil Research* **31**, 761-777.
- STEFFENS, D. (2004): Agrikulturchemisches Praktikum. *Verlag Grauer*, Beuren, Stuttgart.
- SÜMER, A.; ZÖRB, C.; YAN, F.; SCHUBERT, S. (2004): Evidence of sodium toxicity for the vegetative growth of maize (*Zea mays* L.) during the first phase of salt stress. *Journal of Applied Botany* **78**, 135-139.
- TESTER, M. und DAVENPORT, R. (2003): Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher Plants. *Annals of Botany* **91**, 503-527.
- THALLOOTH, A.T.; TAWFIK, M.M; MOHAMED, H.M. (2006): A comparative study on the effect of foliar application of zinc, potassium and magnesium on growth, yield and some chemical constituents of mungbean plants grown under water stress conditions. *World Journal of Agricultural Sciences* **2**, 37-46.
- Tributh, H.; v.Boguslawski, E.; v.Lieres, A.; Steffens, D.; Mengel, K. (1987): Effect of potassium removal by crops in transformation of illitic clay minerals. *Soil Science* **143**, 404-409.

- VAN VOLKENBURGH, E. und BOYER, J.S. (1985): Inhibitory Effects of Water Deficit on Maize Leaf Elongation. *Plant Physiology* **77**, 190-194.
- VERSLUES, P.E.; AGARWAL, M.; KATIYAR-AGARWAL, S.; ZHU, J.; ZHU, J.K. (2006): Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. *The Plant Journal* **45**, 523-539.
- VON WILLERT, D.J.; MATYSSEK, R.; HERPPICH, W. (1995): Experimentelle Pflanzenökologie. *Thieme Verlag*, Stuttgart - New York.
- WAKEEL, A. (2008): Substitution of potassium by Sodium in Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) Nutrition with Special Reference to K-Fixing Soils. *Dissertation*, Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotoxologie und Umweltmanagement, Justus-Liebig-Universität, Gießen.
- WAKEEL, A.; STEFFENS, D.; SCHUBERT, S. (2010): Potassium substitution by sodium in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) nutrition on K-fixing soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **173**, 127-134.
- WEBER, E. und BLEIHOLDER, H. (1990): Erläuterungen zu den BBCH-Dezimal-Codes für die Entwicklungsstadien von Mais, Raps, Faba-Bohne, Sonnenblume und Erbse – mit Abbildungen. *Gesunde Pflanzen* **42**, 308-321.
- WEDER, D. J. (2003): Umwelt – Bedrohung und Bewahrung. Zeitbilder Bundeszentrale für politische Bildung. *Bonifatius Druck Buch Verlag*, Paderborn.
- WILD, A. (2003): Soils, Land and Food: Managing the Land During the Twenty-First Century. *University Press*, Cambridge.

8 Danksagung

Mein Dank gilt Professor Dr. Sven Schubert für die Überlassung des Themas und die hervorragende Betreuung.

Ganz herzlich möchte ich mich nochmals bei der K+S Kali GmbH, Kassel für die finanzielle Unterstützung bedanken.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Professor Dr. Diedrich Steffens, Svenja Bellof, Dr. Stefan Hanstein, Dr. Daniela Naujoks und Dr. Britta Pitann für die anregenden Gespräche und Diskussionen.

Bei Corinna Alles, Helga Tripp und Lutz Wilming möchte ich mich besonders für die sehr gute Pflege der Pflanzen sowie das Rangieren der Container bedanken. Die Pflanzen mussten mit über 12 m³ per Hand Wasser gegossen werden.

Bedanken möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes für Pflanzenernährung, insbesondere bei Anita Langer, Christa Lein, Edeltraud Rödiger und Roland Pfanschilling für die viele Geduld und die Arbeit im Labor.

Für die hilfreichen Tipps während der Projektgruppentreffen danke ich Professor Dr. Andreas Gransee, Professor Dr. Rainer Horn, Professor Dr. Reinhold Jahn, Dr. Bodo Hofmann und Dr. Stephan Peth.

Bei meinen Mitstreitern Dörthe Holthusen (CAU Kiel) und Sebastian Damm (MLU Halle-Wittenberg) möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit in unserem Projekt bedanken.

Ich bedanke mich bei denjenigen, die diese Arbeit auf der Suche nach Rechtschreibfehlern und Verständnisproblemen Korrektur gelesen haben.

Meiner Freundin Ann-Katrin Gerwers gebührt ein ganz besonderes Dankeschön für den Rückhalt den sie mir während dieser Zeit gegeben hat.

Das größte Dankeschön gilt meinen Eltern, ohne deren Hilfe und Unterstützung ich nie so weit gekommen wäre.

**Der Lebenslauf wurde aus der elektronischen
Version der Arbeit entfernt.**

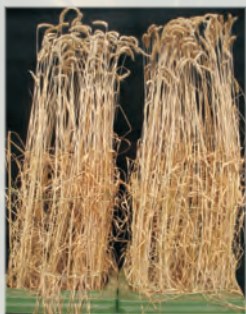
**The curriculum vitae was removed from the
electronic version of the paper.**

10 Eidesstattliche Versicherung

Ich erkläre: 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, den 30. April 2010

Dominik Reeb



édition scientifique
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

VVB LAUFERSWEILER VERLAG
STAUFENBERGRING 15
D-35396 GIESSEN

Tel: 0641-5599888 Fax: -5599890
redaktion@doktorverlag.de
www.doktorverlag.de



ISBN: 978-3-8359-5708-4



9 783835 957084