

Aus der Professur Pflanzenbau

der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

## **Wechselseitiger Einfluss des Wassergehaltes des Bodens und der Phytin-Zufuhr auf die Phosphor-Ernährung von Pflanzen**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Agrarwissenschaften (doctor agriculturae (Dr. agr.))

an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

der Universität Rostock

vorgelegt von

Dipl. agr. Ing. Christine Brandt M.A.

aus Rostock

## **Gutachter**

### 1. Gutachter:

PD Dr. habil. Bettina Eichler-Löbermann  
Professur Pflanzenbau, Universität Rostock

### 2. Gutachter:

Prof. Dr. Jörg-Michael Greef  
Julius Kühn Institut, Bundesanstalt für Kulturpflanzen, Braunschweig

### 3. Gutachter:

Prof. Dr. Hartmut Stützel  
Institut für Biologische Produktionssysteme, Universität Hannover

**Datum der Einreichung:** 06. Juni 2013

**Datum der Verteidigung:** 19. Dezember 2013

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung und Problemstellung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand des Wissens.....</b>	<b>3</b>
2.1 Trockenstress.....	3
2.1.1 Anpassungen von Kulturpflanzen an Trockenstress.....	3
2.1.2 Einfluss von Trockenstress auf die P-Aufnahme von Pflanzen.....	6
2.2 Phosphor in Boden und Pflanze .....	7
2.2.1 P-Verfügbarkeit im Boden .....	7
2.2.2 Anpassungen von Kulturpflanzen an P-Mangel.....	9
2.3 Wirkung von P-Zufuhr auf die Trockentoleranz von Pflanzen .....	13
<b>3 Zielstellung und Hypothesen .....</b>	<b>15</b>
<b>4 Materialien und Methoden .....</b>	<b>18</b>
4.1 Charakterisierungen der verwendeten Böden.....	18
4.2 Aufbau und Durchführung der Gefäßversuche .....	20
4.3 Analysen .....	25
4.3.1 Analyse der Pflanzenparameter .....	25
4.3.2 Analyse der chemischen Parameter im Boden.....	27
4.3.3 Analyse der biologischen Parameter im Boden .....	29
4.4 Statistische Auswertung .....	29
<b>5 Ergebnisse .....</b>	<b>30</b>
5.1 Wirkung von Ca-Phytat auf die P-Nutzung verschiedener Fruchtarten in Abhängigkeit von der Wasserzufuhr auf einem schwach lehmigen Sand .....	30
5.1.1 Wirkung auf die Pflanzenparameter .....	30
5.1.2 Wirkung auf die chemischen Bodeneigenschaften .....	34
5.1.3 Aktivität der Enzyme des P-Kreislaufes im Boden.....	37
5.2 Wirkung von Ca-Phytat auf die P-Nutzung verschiedener Fruchtarten in Abhängigkeit von der Wasserzufuhr im Vergleich zu Tripel-Superphosphat auf einem stark lehmigen Sand.....	39
5.2.1 Wirkung auf die Pflanzenparameter .....	39
5.2.2 Wirkung der P-Zufuhr auf die Photosyntheseleistung der Fruchtarten im Tagesverlauf.....	47
5.2.3 Wirkung auf die chemischen Bodeneigenschaften .....	50

5.2.4 Aktivität der Enzyme des P-Kreislaufes im Boden.....	54
5.3 Wirkung von permanentem und periodischem Trockenstress auf die P-Nutzung von Sorghum und Amarant in Abhängigkeit von der P-Quelle .....	56
5.3.1 Wirkung auf die Pflanzenparameter .....	56
5.3.2 Wirkung auf die chemischen Bodeneigenschaften .....	62
5.3.3 Aktivität der Enzyme des P-Kreislaufes im Boden.....	65
<b>6 Diskussion .....</b>	<b>67</b>
6.1 Einfluss der Wasserzufuhr auf die P-Nutzung der untersuchten Fruchtart.....	67
6.2 Wirkung von Ca-Phytat auf die P-Nutzung der untersuchten Fruchtarten.....	72
6.2.1 Wirkung von Ca-Phytat in Abhängigkeit von Wasserzufuhr und Bodenart im Vergleich zu Tripel-Superphosphat.....	72
6.2.2 Bedeutung pflanzlicher Anpassungen zur P-Mobilisierung unter Trockenstress .....	75
6.3 Wirkung von Ca-Phytat auf die P-Verfügbarkeit im Boden.....	78
6.4 Einfluss der Aktivität der Enzyme des P-Kreislaufes im Boden auf die P-Nutzung der untersuchten Fruchtarten .....	80
<b>7 Zusammenfassung und Schlussfolgerung .....</b>	<b>85</b>
<b>8 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>93</b>
<b>Erklärung.....</b>	<b>109</b>
<b>Danksagung.....</b>	<b>110</b>
<b>Wissenschaftlicher Lebenslauf.....</b>	<b>111</b>
<b>Thesen zur Dissertationsschrift.....</b>	<b>113</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>117</b>

## Abkürzungsverzeichnis

ABA	Abcisinsäure
AcP	saure Phosphatase
Al <sub>ox</sub>	oxalatlösliches Aluminium
AIP	alkalische Phosphatase
BBCH	einheitliche Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien mono- u. dikotyle Pflanzen
DHA	Dehydrogenase-Aktivität
DPS	Grad der P-Sättigung
Fe <sub>ox</sub>	oxalatlösliches Eisen
K <sub>dl</sub>	doppellaktatlösliches Kalium
NK	Kontrolle ohne Phosphor
NPQ	nicht-photochemisches Quenching
Mg <sub>dl</sub>	doppellaktatlösliches Magnesium
ns	nicht signifikant
OBS	organische Bodensubstanz
PAC	Ca-Inositolhexaphosphat (Phytin Acid Calcium)
P <sub>dl</sub>	doppellaktatlöslicher Phosphor
P <sub>min</sub>	mineralischer Phosphor vor Veraschung
P <sub>org</sub>	organischer P-Gehalt
P <sub>ox</sub>	oxalatlöslicher Phosphor,
P <sub>va</sub>	mineralischer Phosphor nach Veraschung
P <sub>w</sub>	wasserlöslicher Phosphor
PS	periodischer Trockenstress
PSC	Phosphor-Sorptionskapazität
P <sub>t</sub>	Gesamtgehalt an Phosphor
TM	Trockenmasse
TSP	Tripel-Superphosphat
WHK	Wasserhaltekapazität
WNE	Wassernutzungseffizienz
ΦPSII	effektive Quantenausbeute des Photosystems II

## Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: ANPASSUNG VON PFLANZEN AN WASSER- UND P-MANGEL .....	10
ABBILDUNG 2: P-AUSNUTZUNG DER UNTERSUCHTEN FRUCHTARTEN, IM VERSUCH A.....	32
ABBILDUNG 3: P-AUSNUTZUNG DER UNTERSUCHTEN FRUCHTARTEN, IM VERSUCH B.....	44
ABBILDUNG 4-7: EINFLUSS DER P-ZUFUHR AUF DIE $\Phi$ PSII IM TAGESVERLAUF UNTER TROCKENSTRESS.....	49
ABBILDUNG 8: P-AUSNUTZUNG VON SORGHUM UND AMARANT, IM VERSUCH C.....	59

## Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: CHARAKTERISIERUNG DER P-FRAKTIONEN DER IN DEN GEFÄßVERSUCHEN VERWENDETEN BÖDEN. ....	19
TABELLE 2: CHARAKTERISIERUNG WEITERER KENNGRÖßEN DER IN DEN GEFÄßVERSUCHEN VERWENDETEN BÖDEN. ....	19
TABELLE 3: VERSUCHSAUFBAU IM GEFÄßVERSUCH A. ....	21
TABELLE 4: VERSUCHSAUFBAU IM GEFÄßVERSUCH B. ....	22
TABELLE 5: VERSUCHSAUFBAU IM GEFÄßVERSUCH C. ....	23
TABELLE 6: EINFLUSS DER WASSER- UND P-ZUFUHR AUF DEN TM-ERTRAG, DIE P-AUFNAHME, DIE WASSERNUTZUNGSEFFIZIENZ UND DIE PROLIN-KONZENTRATION, IM VERSUCH A. ( <i>BRANDT ET AL. 2011</i> ) ....	33
TABELLE 7: VERÄNDERUNGEN DER P-PARAMETER $\Delta P_W$ , $\Delta P_{DL}$ , $\Delta P_T$ , $\Delta P_{OX}$ , $\Delta DPS$ UND $\Delta PSC$ IM BODEN ZUM VERSUCHSENDE IM VERGLEICH ZUM VERSUCHSBEGINN, IM VERSUCH A. ....	34
TABELLE 8: EINFLUSS DER WASSER- UND P-ZUFUHR SOWIE DER FRUCHTART AUF DEN PH-WERT UND DIE GEHALTE AN LEICHT PFLANZENVERFÜGBAREN P IM BODEN, IM VERSUCH A. ( <i>BRANDT ET AL. 2011</i> ) ....	35
TABELLE 9: EINFLUSS DER P-ZUFUHR SOWIE DER FRUCHTART AUF DEN GESAMT-P-GEHALT UND DIE P-SORPTIONSEIGENSCHAFTEN IM BODEN, IM VERSUCH A. ( <i>BRANDT ET AL. 2011</i> ) ....	36
TABELLE 10: EINFLUSS DER WASSER- UND P-ZUFUHR SOWIE DER FRUCHTART AUF DIE AKTIVITÄT DER PHOSPHATASEN UND DER DEHYDROGENASE, IM VERSUCH A. ( <i>BRANDT ET AL. 2011</i> ) ....	38
TABELLE 11: PROZENTUALER RÜCKGANG DES ERTRAGES IN SPROSS UND WURZEL UNTER TROCKENSTRESS IM VERGLEICH ZUR OPTIMALEN BEWÄSSERUNG, IM VERSUCH B. ....	40
TABELLE 12: EINFLUSS DER WASSER- UND P-ZUFUHR AUF DAS WURZEL-SPROSS-VERHÄLTNIS, IM VERSUCH B. ....	41
TABELLE 13: EINFLUSS DER WASSER- UND P-ZUFUHR AUF DEN SPROSS- UND WURZEL- TM-ERTRAG SOWIE DIE WASSERNUTZUNGSEFFIZIENZ, IM VERSUCH B. ....	42
TABELLE 14: PROZENTUALER RÜCKGANG DER P-AUFNAHME IN SPROSS UND WURZEL UNTER TROCKENSTRESS IM VERGLEICH ZUR OPTIMALEN BEWÄSSERUNG, IM VERSUCH B. ....	44

TABELLE 15: EINFLUSS DER WASSER- UND P-ZUFUHR AUF DIE P-AUFNAHME VON SPROSS UND WURZEL, IM VERSUCH B. ....	45
TABELLE 16: EINFLUSS DER WASSERZUFUHR AUF DIE PROLIN-KONZENTRATION (MMOL G <sup>-1</sup> TM), IM VERSUCH B. ....	46
TABELLE 17: EINFLUSS VON WASSER- UND P-ZUFUHR AUF DIE EFFEKTIVE QUANTENAUSBEUTE DES PSII UND DAS NICHT-PHOTOCHEMISCHE QUENCHING (MITTEL TAGESVERLAUF).....	48
TABELLE 18: EINFLUSS VON WASSER- UND P-ZUFUHR AUF DEN PROZENTUALEN ABFALL DER MAXIMALEN ZUR MINIMALEN EFFEKTIVEN QUANTENAUSBEUTE IM TAGESVERLAUF. ....	48
TABELLE 19: VERÄNDERUNGEN DER P-PARAMETER $\Delta P_w$ , $\Delta P_{DL}$ , $\Delta P_T$ , $\Delta P_{OX}$ , $\Delta DPS$ UND $\Delta PSC$ IM BODEN ZUM VERSUCHSENDE IM VERGLEICH ZUM VERSUCHSBEGINN, IM VERSUCH B. ....	50
TABELLE 20: EINFLUSS DER WASSER- UND P-ZUFUHR SOWIE DER FRUCHTART AUF DEN PH-WERT UND DIE GEHALTE AN LEICHT PFLANZENVERFÜGBAREN P IM BODEN, IM VERSUCH B. ....	51
TABELLE 21: EINFLUSS DER WASSER- UND P-ZUFUHR SOWIE DER FRUCHTART AUF DEN GESAMT-P-GEHALT UND DIE P-SORPTIONSEIGENSCHAFTEN IM BODEN, IM VERSUCH B. ....	53
TABELLE 22: EINFLUSS DER WASSER- UND P-ZUFUHR SOWIE DER FRUCHTART AUF DIE AKTIVITÄT DER PHOSPHATASEN UND DER DEHYDROGENASE, IM VERSUCH B. ....	55
TABELLE 23: PROZENTUALER RÜCKGANG DES ERTRAGES UND DER P- AUFNAHME UNTER PERMANENTEM UND PERIODISCHEM TROCKENSTRESS IM VERGLEICH ZUR OPTIMALEN BEWÄSSERUNG, IM VERSUCH C.....	57
TABELLE 24: EINFLUSS DER WASSER- UND P-ZUFUHR AUF DEN TM-ERTRAG, DIE P-AUFNAHME UND DIE WASSERNUTZUNGSEFFIZIENZ, IM VERSUCH C.....	60
TABELLE 25: EINFLUSS DER WASSER- UND P-ZUFUHR AUF DIE PROLIN- KONZENTRATION (MMOL G <sup>-1</sup> TM), IM VERSUCH C. ....	61
TABELLE 26: VERÄNDERUNGEN DER P-PARAMETER $\Delta P_w$ , $\Delta P_{DL}$ , $\Delta P_T$ , $\Delta P_{OX}$ , $\Delta DPS$ UND $\Delta PSC$ IM BODEN ZUM VERSUCHSENDE IM VERGLEICH ZUM VERSUCHSBEGINN, IM VERSUCH C.....	62
TABELLE 27: EINFLUSS DER WASSER- UND P-ZUFUHR SOWIE DER FRUCHTART AUF DEN PH-WERT UND DIE GEHALTE AN LEICHT PFLANZENVERFÜGBAREN P IM BODEN, IM VERSUCH C. ....	63

TABELLE 28: EINFLUSS DER P-ZUFUHR SOWIE DER FRUCHTART AUF DEN GESAMT-P-GEHALT UND DIE P-SORPTIONSEIGENSCHAFTEN IM BODEN, IM VERSUCH C. ....	64
---	----

TABELLE 29: EINFLUSS DER WASSER- UND P-ZUFUHR SOWIE DER FRUCHTART AUF DIE AKTIVITÄT DER PHOSPHATASEN UND DER DEHYDROGENASE, IM VERSUCH C. ....	66
--	----

## 1 Einleitung und Problemstellung

Die effiziente Nutzung begrenzter Ressourcen wie Wasser und Phosphor (P) ist ausschlaggebend für einen nachhaltigen Pflanzenbau.

Vor dem Hintergrund des Klimawandels ist in Mitteleuropa häufiger mit Trockenperioden zu rechnen. Auch für Deutschland konnten bereits regionale Verminderungen der Regenmengen während der Frühjahrs- und Sommermonate nachgewiesen werden (WECHSUNG et al. 2008, WENKEL et al. 2011). Dies kann besonders auf leichten Böden zu Ertragsrückgängen führen (JACOB et al. 2008). Unter Trockenstress kommt es zudem häufig zu Nährstoffmangel. Das betrifft wegen der geringen Mobilität im Boden insbesondere das für die Pflanze essentielle Element P (GE et al. 2010).

Der überwiegende Teil der mineralischen P-Düngemittel wird aus Rohphosphat gewonnen. So wurden im Jahr 2012 weltweit ca. 220 Millionen Tonnen abgebaut und bis 2015 wird ein weiterer Anstieg des Abbaus um zusätzliche 20 % prognostiziert (JASINSKI 2012, 2013). Bei steigendem Verbrauch werden die natürlichen P-Lagerstätten in ca. 60 bis 100 Jahren erschöpft sein (ROSEMARIN et al. 2009). Daher ist in Zukunft mit einer Verknappung und einem weiteren Preisanstieg für die mineralischen P-Düngemittel zu rechnen (CRASWELL et al. 2010, TIESSEN et al. 2011).

Die P-Versorgung landwirtschaftlich genutzter Flächen in Deutschland ist in den letzten zwei Jahrzehnten regional stark zurückgegangen. Dies resultiert aus dem verminderten Einsatz mineralischer P-Dünger infolge zunehmender Kosten wie auch aus dem höheren P-Output aus den Flächen aufgrund des vermehrten Marktfruchtanbaues und der gestiegenen Erträge (ZORN et al. 2012).

Um die P-Versorgung von Boden und Pflanze nachhaltig zu sichern, sind eine bilanzierte P-Düngung sowie die Nutzung der bereits im Stoffkreislauf vorhandenen P-Ressourcen erforderlich. Insbesondere die optimale Ausnutzung organischer P-Quellen wird für den Pflanzenbau weiter an Bedeutung gewinnen. Der Anteil des organischen P am Gesamt-P-Gehalt des Bodens liegt auf landwirtschaftlich genutzten Flächen normalerweise zwischen 30 und 60 %. Dabei machen die Phytate, die Salze der Phytinsäure mit ca.

60 % den Hauptanteil des organischen P im Boden aus (TURNER et al. 2005). Zudem kann Phytin dem Boden über Wirtschaftsdünger (z. B. Geflügelmist, Schweinegülle) zugeführt werden. Um pflanzenverfügbar zu sein muss organischer P mineralisiert werden. Dabei spielen die Enzyme des P-Kreislaufes eine wesentliche Rolle (NURUZZAMAN et al. 2006).

Fruchtarten unterscheiden sich in ihrer Anpassung an Wasser- und P-Mangel. Der Anbau von trockenoleranten Kulturpflanzen kann zur Sicherung der Erträge unter Wassermangel beitragen. Des Weiteren kann der Anbau von Kulturpflanzen mit einer hohen P-Effizienz, die P-Versorgung unter verschiedenen Umweltbedingungen erhöhen.

Bei zunehmender Trockenheit trägt eine ausreichende P-Ernährung zur Ertragssicherung bei. Der positive Einfluss mineralischer P-Düngung zur Erhöhung der Trockenoleranz von Fruchtarten wurde bereits in verschiedenen Studien nachgewiesen (JONES et al. 2005, BURMAN et al. 2009, SONG et al. 2010). Dagegen wurde die Effektivität der Wirkung von Phytin auf die P-Ernährung von Pflanzen unter Trockenstress bisher nur unzureichend untersucht.

Mit dem Ziel ein besseres Verständnis über die Eignung von organischen P-Quellen für die P-Ernährung von Pflanzen unter Trockenstress zu gewinnen, wurden in der vorliegenden Arbeit drei Gefäßversuche angelegt und der wechselseitige Einfluss des Wassergehaltes des Bodens und der Phytin-Zufuhr auf die P-Ernährung von Sorghum, Amarant, Raps und Roggen untersucht. Dabei wurde die Wirkung der organischen P-Quelle Ca-Phytat auf die Pflanze sowie auf die chemischen und biologischen Bodenparameter im Vergleich zu einer P-armen Kontrolle und einer leicht löslichen mineralischen P-Quelle (Triple-Superphosphat) in Abhängigkeit von der Wasserzufuhr ermittelt.

## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Trockenstress

Trockenstress ist einer der am meisten limitierenden Faktoren für die landwirtschaftliche Produktion. Die geringe Wasserverfügbarkeit im Boden hat einen direkten Einfluss auf die Entwicklung und den Ertrag der Pflanze. Die Auswirkung von Trockenstress auf Kulturpflanzen wird dabei durch die Dauer der Stressphase, die Intensität und den Entwicklungsgrad der Pflanze zum Zeitpunkt des Trockenstresses beeinflusst (CECCARELLI et al. 1991). Insbesondere in den **frühen Entwicklungsphasen** vermindert ein Wasserdefizit den Stoffwechsel in der Pflanze sowie die **Nährstoffaufnahme** aus dem Boden (LAMBERS et al. 1998, LÖSCH 2001).

#### 2.1.1 Anpassungen von Kulturpflanzen an Trockenstress

Um den negativen Effekten des Trockenstresses entgegen zu wirken haben Pflanzen verschiedene Anpassungsmechanismen entwickelt.

Primär reagieren Pflanzen mit kurzfristigen **physiologischen** Reaktionen auf eintretenden Wassermangel, um ihren Wasserhaushalt zu erhalten und zu stabilisieren (BARTELS & SUNKAR 2005) (s. Abb. 1). Das Phytohormon Abscisinsäure (ABA) spielt eine zentrale Rolle in der Wurzel-Spross-Signalübertragung bei eintretendem Wassermangel (CHAVES et al. 2003, DAVIES et al. 2005). ABA wird bereits bei beginnendem Trockenstress in der Wurzel gebildet und über das Xylem in den Spross geleitet. Hier erfolgte eine Reaktion auf den Stress bereits bevor sich der Sprosswassergehalt reduziert. Der Anstieg von ABA in den Blättern führt zum **Schließen der Stomata** und damit zur Verringerung der Transpirationsrate und zur Aufrechterhaltung des Turgordrucks (DAVIES & ZHANG 1991, SING & SING 1995, MAHAJAN & TUTEJA 2005).

Bei anhaltendem Trockenstress wird infolge des Stomataverschlusses der CO<sub>2</sub>-Gaswechsel herabgesetzt und der Transport zu den Chloroplasten verringert. Verminderte Wasser- und CO<sub>2</sub>-Gehalte in den Chloroplasten führen zu Veränderungen im photosynthetischen Elektronentransport und zum Absinken

der photochemischen Prozesse (CORNIC & BRIANTAIS 1991, XU & ZHOU 2006, MONTANARO et al. 2007). Trockenstress bewirkt Schädigungen am Photosynthese-Apparat und reduziert die Photosyntheserate (BURMAN et al. 2004).

**Wassersparende Assimilationsmechanismen** sind bei CAM und **C<sub>4</sub>-Pflanzen** zu finden. CAM-Pflanzen können während der Tagesstunden ihre Spaltöffnungen geschlossen halten, da die CO<sub>2</sub>-Fixierung (Nacht) und die Photosynthese (Tag) zeitlich voneinander getrennt ablaufen. Dadurch wird eine effektive Konservierung von Wasser erreicht (ca. 50-100 g Wasser pro g Trockenmasse) (MOHR & SCHOPFER 1992, LAMBERS et al. 1998). Bei den C<sub>4</sub>-Pflanzen verlaufen die beiden Abschnitte des C<sub>4</sub>-Dicarboxylatzykluses räumlich getrennt ab (MOHR & SCHOPFER 1992). Innerhalb der C<sub>4</sub>-Pflanze findet eine CO<sub>2</sub>-Vorfixierung durch Phosphoenolpyruvatcarboxylase (PEPCase) in den Mesophyllzellen statt, welche als C<sub>4</sub>-Säure in die Bündelscheidezellen transportiert wird. Hier erfolgt die Decarboxilierung des C<sub>4</sub>-Körpers und das CO<sub>2</sub> wird im Calvin Zyklus fixiert (HATCH 1987). Unter trockenen Bedingungen arbeitet die PEPCase länger im CO<sub>2</sub>-gesättigten Bereich als die Rubiscose der C<sub>3</sub>-Pflanzen. Des Weiteren wird die Photorespiration unterdrückt. C<sub>4</sub>-Pflanzen können somit ihre Stomata unter Trockenstress weiter und länger schließen als C<sub>3</sub>-Pflanzen und verringern dadurch ihren Wasserverlust (GHANNOUM 2009). Nach LARCHER (1994) verbrauchen C<sub>4</sub>-Pflanzen ca. 250 bis 300 g Wasser pro fixiertem g Trockenmasse. Der Verbrauch bei C<sub>3</sub>-Pflanzen ist dagegen zwei bis dreimal so hoch. Eine hohe Wassernutzungseffizienz erreichen C<sub>4</sub>-Pflanzen gleichfalls durch ihre gesteigerte Kohlenstofffixierung, da sie hohe Beleuchtungsstärken photosynthetisch ausnutzen können. Das Optimum wird allerdings erst bei Temperaturen von 30 bis 40°C erreicht, welches wesentlich über dem der C<sub>3</sub>-Pflanzen (15-20°C) liegt. Der Energiebedarf von C<sub>4</sub>-Pflanzen pro fixiertem CO<sub>2</sub>-Molekül ist damit höher als der von C<sub>3</sub>-Pflanzen (MOHR & SCHOPFER 1992, LAMBERS et al. 1998).

Zur **Aufrechterhaltung des osmotischen Potentials** unter Wassermangel akkumulieren Pflanzen verschiedene organische Osmotika, wie lösliche Zucker, Glycinbetain, Sorbitol und **Prolin** (HARE et al. 1998, KUZNETSOV & SHEVYAKOVA

1999). Die Aminosäure Prolin wird unter Trockenstress im Cytoplasma synthetisiert. Prolin regelt das intrazelluläre osmotische Potenzial und trägt darüber hinaus zur Reduzierung der Zellzerstörung und zum Schutz der Proteine vor Denaturierung bei (HARE et al. 1998, TUTEJA 2009). Der positive Effekt von Prolin als osmoproduktive Substanz wurde in verschiedenen Studien nachgewiesen (FATIMA et al. 2002, JAVED et al. 2011, MAJEED et al. 2011, LOUTFY et al. 2012). Generell zeigte sich, dass die Akkumulation von Prolin mit der Stresstoleranz der untersuchten Fruchtarten korrelierte (BARRÓN & DE MEJÍA 1998, SOMAL & YAPA 1998, ASHRAF & FOOLAD 2007). Ebenfalls wurde eine erhöhte Prolin-Konzentration in stresstoleranten im Vergleich zu stresssensitiven Genotypen bei gleichen Fruchtarten nachgewiesen (FATIMA et al. 2002, MAFAKHERI et al. 2010, MAN et al. 2011).

Andererseits kann von einer niedrigen Prolin-Akkumulation nicht grundsätzlich auf eine niedrige Trockentoleranz geschlossen werden. Während einige Fruchtarten vorwiegend osmotische Anpassungsmechanismen nutzen reagieren andere verstärkt mit alternativen physiologischen oder morphologischen Mechanismen auf Wassermangel (DELAUNEY & VERMA 1993, STODDARD et al. 2006).

Bei länger anhaltendem Wassermangel reagieren Pflanzen mit **morphologischen Anpassungen** auf Trockenstress, um Wachstum und Entwicklung aufrecht zu erhalten (s. Abb. 1). Die **Verminderung der Blattoberfläche** sowie das Blattrollen verringern Evaporation und Strahlungsabsorption und schränken den Wasserverlust der Pflanze ein (LÖSCH 2001). Wurzel und Spross stehen dabei in einem funktionellen Zusammenhang. Während das Blattwachstum bei Wassermangel gehemmt wird tritt bei mäßiger Bodentrockenheit eine Förderung des Wurzelwachstums auf (BRUNHOLD et al. 1996). Diese bewirkt Veränderungen in der Wurzelcharakteristik. Erhöhte **Wurzellänge, -dicke und -tiefe** steigern das Wasseraneignungsvermögen der Pflanze (VAMERALI et al. 2003, ASCH et al. 2005). Bei starker Trockenheit kommt es dagegen zu einer Verringerung der Wurzelentwicklung (BRUNHOLD et al. 1996).

Die Erhöhung des **Wurzel-Spross-Verhältnisses**, als Anpassung an Trockenstress führte zu einer effektiveren Balance zwischen wasser-

verlierenden und wasserbewahrenden Pflanzenorganen (LIU & STÜTZEL 2004). Die Transpiration wird eingeschränkt und die Wasseraufnahme der Pflanze erhöht. Zudem werden Assimilate aus der Photosynthese zu Gunsten des Wurzelwachstums verlagert, was das Überleben der Pflanze sichert, jedoch negative Auswirkungen auf die Bildung der oberirdischen Trockenmasse haben kann (EHLERS 1996).

### **2.1.2 Einfluss von Trockenstress auf die P-Aufnahme von Pflanzen**

Pflanzen wachsen oftmals unter Stressbedingungen, die in Kombination miteinander auftreten. So wird der Ertrag von Kulturpflanzen durch additive oder synergetische Stresseffekte stärker limitiert als durch den individuellen Stresseffekt an sich (VAMERALI et al. 2003, TESTER & BACIC 2005). Trockenstress ist häufig mit P-Mangelerscheinungen verbunden (SARDANS et al. 2007, GE et al. 2010).

Generell führt ein Rückgang des Bodenwassergehaltes zu Einschränkungen in der Beweglichkeit der Nährstoffionen im Massefluss und in der Nährstoffdiffusion zur Pflanze. Das betrifft insbesondere Nährstoffe mit einer geringen Mobilität im Boden, wie P (JUNGK & CLAASSEN 1989, GARCIA et al. 2008). Da sich der P-Transport zur Wurzel reduziert, verringert sich die P-Aufnahme in die Pflanze und somit das Pflanzenwachstum (PINKERTON & SIMPSON 1986, CLAASSEN & STEINGROBE 1999, HU & SCHMIDTHALTER 2005). So kann bereits unter beginnendem Trockenstress ein P-Mangel für die Pflanze entstehen (TURNER 1985). Darüber hinaus fördert ein anhaltender geringer Bodenwassergehalt die Bildung stabiler P-Verbindungen im Boden. Feldversuche von SARDANS et al. (2007, 2008) belegen eine Erhöhung des Gesamt-P-Gehaltes im Boden infolge anhaltender Trockenheit.

## 2.2 Phosphor in Boden und Pflanze

P liegt im Boden sowohl in anorganischer als auch in organischer Form vor. Ein großer Teil des im Boden vorliegenden P ist jedoch in stabilen Fraktionen gebunden und durch seine geringe Löslichkeit nur mäßig bis schwer pflanzenverfügbar (SCHILLING 2000).

### 2.2.1 P-Verfügbarkeit im Boden

Der labile, direkt pflanzenverfügbare **anorganische P** ( $\text{HPO}_4^{2-}/\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) macht mit 0,1 % den geringsten Anteil der P-Verbindungen in der Bodenlösung aus. Darüber hinaus kommen lösliche Ca-Phosphatkomplexe wie  $\text{CaH}_2\text{PO}_4^+$  und  $\text{CaHPO}_4$  in der Bodenlösung vor, die ebenfalls pflanzenverfügbar sind (SCHACHTSCHABEL et al. 1998). Primär oder sekundär gebundene Ca-Phosphate und physikalisch austauschbar gebundene Phosphate stehen als labile P-Pools mit der Bodenlösung im Austausch. Die Löslichkeit von Ca-Phosphaten nimmt mit steigender  $\text{H}^+$ -Konzentration in der Bodenlösung zu und verringert sich mit steigender  $\text{Ca}^{2+}$ -Konzentration (BLUME et al. 2010).

Die P-Konzentration in der Bodenlösung steht auch im Austausch mit dem an die Oberflächen von Fe- und Al-Oxiden sowie an Tonminerale sorbiertem P (BLUME et al. 2010). Da P gegen  $\text{OH}^-$  Ionen der Sorbenten ausgetauscht werden kann, ist die P-Sorption stark pH-Wert abhängig. In Böden mit saurem pH-Wert wird P verstärkt an Oberflächen von Tonmineralen sowie Fe- und Al-Oxide/-Hydroxide sorbiert. Im alkalischen Bereich findet ebenfalls eine P-Sorption durch Fe-Oxide statt, außerdem kommt es zur Bindung an  $\text{CaCO}_3$  (SCHILLING 2000). Bei Abnahme der P-Konzentration in der Bodenlösung wird sorbiertes P in die Lösungsphase abgegeben, bei Zunahme in der Lösungsphase an den Boden gebunden (BLUME et al. 2010).

Des Weiteren liegt P in stabiler Form im Boden vor. So kann P in organische und mineralische Bodenbestandteile okkuliert werden. Dieses P kann durch kurz- bis mittelfristige Transformationsprozesse nicht mehr gelöst werden und ist daher von geringer Verfügbarkeit für die Pflanze (BLUME et al. 2010). Zudem liegt P im Boden als Ca-Phosphate, Apatit, Strengit, Variscit oder Vivianit vor. Das P-Anionen ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) geht mit den  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  und  $\text{Ca}^{2+}$  Kationen schwer lösliche Verbindungen ein (SCHILLING 2000).

Der Anteil von **organisch gebundenem P** liegt normalerweise zwischen 30 und 60 % des Gesamt-P-Gehaltes im Boden und wird von den Bodenart, dem Klima sowie der kultivierten Fruchtart beeinflusst (CHEN et al. 2003, TURNER et al. 2003b, BLUME et al. 2010).

Ein sehr geringer Teil des organischen P im Boden liegt in Form von Phosphorlipiden, Zuckerphosphaten und Phosphorproteinen (1 bis 2 %) sowie als Nukleinsäure (5 bis 10 %) vor (SCHACHTSCHABEL et al. 1998, TURNER et al. 2002). Mit über 60 % machen die **Phytate**, die Salze der Phytinsäure, den größten Anteil des organischen P im Boden aus (DALAL 1977, Dunger & Fiedler 1997, TURNER et al. 2005). Phytinsäure ist der Hexaphosphorsäureester des sechswertigen Alkohols *myo*-Inositol und hat als potenziell verfügbare P-Quelle große Bedeutung für die P-Ernährung von Pflanzen (COSGROVE 1962, MARTIN & WICKEN 1966, TURNER et al. 2002).

Organischer P wird, wie auch anorganischer P, an Al-, Fe- und Ca-Ionen sorbiert, was zu schwer löslichen organischen P-Verbindungen und einer verringerten Mineralisierbarkeit im Boden führt (SCHILLING 2000, BLUME et al. 2010). Zudem erhöht sich die Sorption von Phytin mit steigendem Tongehalt im Boden (TURNER et al. 2003a). Darüber hinaus kommt es zu Bindungen über Ca-Brücken an Huminstoffe und an organisch gebundenes Al und Fe (BLUME et al. 2010).

Um für Pflanzen verfügbar zu sein, muss organisch gebundener P zunächst mineralisiert werden (SCHACHTSCHABEL et al. 1998, SMITH et al. 2003). Dabei spielen die Enzyme des P-Kreislaufes (Phosphatasen) sowie abiotische Faktoren, wie pH-Wert, Temperatur und Wasserverfügbarkeit eine wesentliche Rolle (HAYES et al. 2000, SARDANS et al. 2008, SULAS et al. 2012, VASSILEV et al. 2012).

### 2.2.2 Anpassungen von Kulturpflanzen an P-Mangel

P gilt neben N und K als **essentielles Element** für die Pflanzenernährung und nimmt im Stoffwechsel der Pflanze eine bedeutende Funktion ein (SCHACHTMAN et al. 1998). Als Bestandteil von Membranlipiden, Nukleinsäuren, Phosphoproteinen und als Coenzym für Assimilate und Dissimilate (ATP, NADPH) ist P für Prozesse des Energiestoffwechsels und der Photosynthese unerlässlich (MOHR & SCHOPFER 1992, HU & SCHMIDHALTER 2001, BLUME et al. 2010).

Wie Wassermangel hat auch eine geringe P-Verfügbarkeit im Boden einen direkten Einfluss auf die Entwicklung und den Ertrag der Pflanze. Unter P-Mangel werden insbesondere die Nukleinsäure- und Proteinsynthese gestört sowie die Einlagerung von P-Reserven in die Pflanze reduziert (SINCLAIR & VADEZ 2002). Darüber hinaus führt die Verminderung des Blattwachstums der Pflanze infolge von P-Mangel zur Verringerung der Photosyntheserate (BROOKS 1986).

Generell unterscheiden sich Fruchtarten in ihrer P-Effizienz. Einerseits wird der von der Pflanze aufgenommene P unterschiedlich effizient für die Ertragsbildung verwertet (SATTELMACHER et al. 1994, BHADORIA et al. 2002). So wurden Unterschiede in der **Verwertungseffizienz** zwischen verschiedenen Fruchtarten (SCHIEMENZ & EICHLER-LÖBERMANN 2010) und zwischen verschiedenen Sorten einer Fruchtart (HORST et al. 1996) nachgewiesen. Des Weiteren ist die **P-Aufnahmeeffizienz**, die Befähigung des Wurzelsystems zur P-Aneignung aus dem Boden, entscheidend für die P-Aufnahme in die Pflanze (SATTELMACHER et al. 1994, BHADORIA et al. 2002). Zur Erhöhung ihrer P-Aufnahme haben Pflanzen unterschiedliche physiologische und morphologische Aneignungsstrategien entwickelt (BERTIN et al. 2003, VANCE et al. 2003, RICHARDSON et al. 2011). Sie können sich somit in gewissem Maße (wie auch an Wassermangel) an P-Mangel anpassen und diesem entgegen wirken (s. Abb. 1).

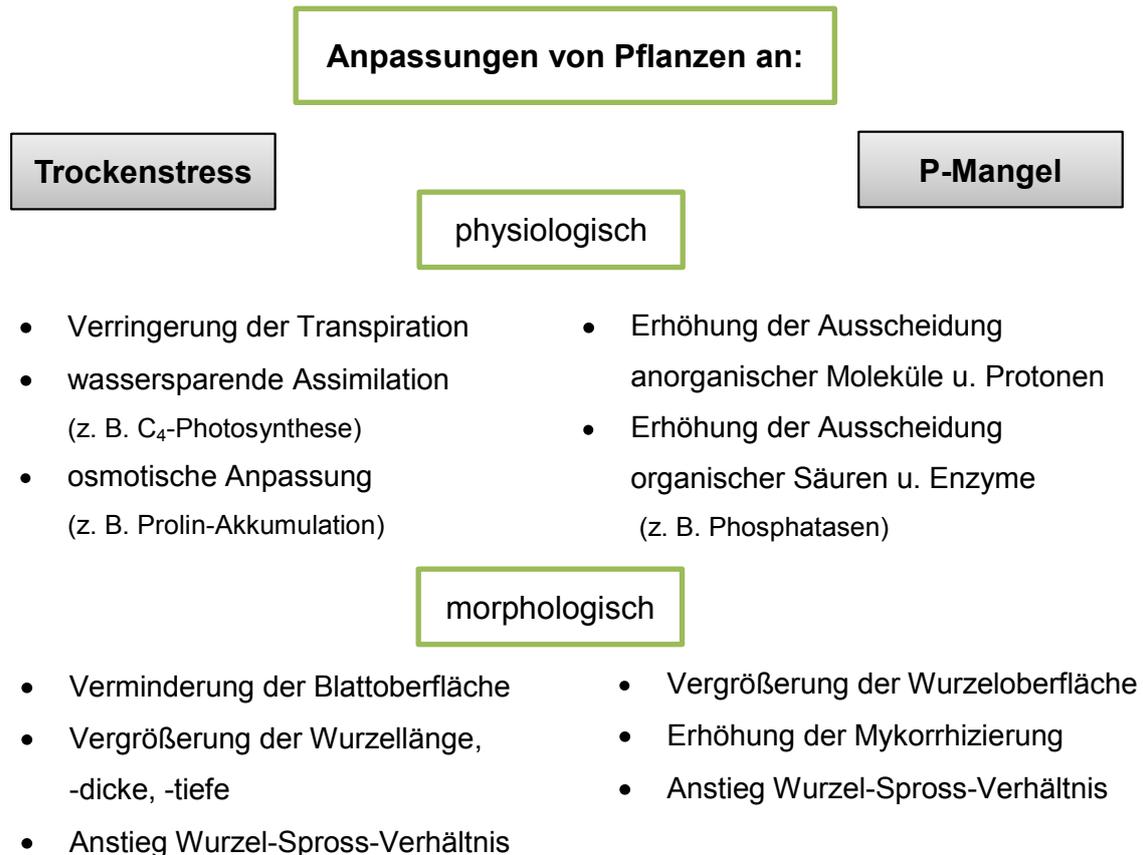


Abbildung 1: Anpassung von Pflanzen an Wasser- und P-Mangel.

(Quellen: LARCHER 1994, LÖSCH 2001, VANCE et al. 2003, BARTELS & SUNKAR 2005, TARAFDAR & CLAASSEN 2005, WITTENMAYER & MEHRBACH 2005, STODDARD et al. 2006, RAMAEKERS et al. 2010)

Im Allgemeinen ist der Umsatz von P-Verbindungen besonders stark in der Rhizosphäre ausgeprägt. In Böden mit niedrigem P-Gehalt führt jedoch die geringe P-Diffusionsrate zu einer Verarmung von P-Ionen um die Wurzelzone (SMITH 2002). Um dem entgegen zu wirken nutzen P-effiziente Pflanzen **morphologischen** Anpassungen, welche die Wurzeloberfläche vergrößern. Dazu zählen die **Zunahme der Wurzelhaardichte und Wurzellänge** sowie die **Ausbildung von Feinwurzeln** (HENDRIKS et al. 1981, BATES & LYNCH 2001, MA et al. 2001, ABEL et al. 2002) und der **Anstieg des Wurzel-Spross-Verhältnisses** (RAMAEKERS et al. 2010) (s. Abb. 1).

Das von P-effizienten Pflanzen erschlossene Bodenvolumen ist somit größer als das von P-ineffizienten. Durch die vergrößerte Wurzeloberfläche erhöht sich der Influx pro Einheit Bodenvolumen und somit die P-Aufnahme (LEITNER et al. 2010). FÖHSE et al. (1988) konnte für Fruchtarten, die eine mittlere oder hohe P-

Aufnahme aufwiesen entweder eine hohe P-Influxrate (Raps, Spinat) oder ein hohes Wurzel-Spross-Verhältnis (Weizen, Deutsches Weidelgras) nachweisen. Auch die Ausbildung von Proteoidwurzeln bei verschiedenen Pflanzenfamilien führt, durch die Vergrößerung der Wurzeloberfläche zur Anpassung an eine geringe P-Verfügbarkeit im Boden und zu erhöhter P-Aufnahme (GERKE et al. 2000, HAGESTRÖM et al. 2001, VANCE et al. 2003).

Des Weiteren verbessert die **Mykorrhizierung** bei bestimmten Fruchtarten die Wasser- und Nährstoffaufnahme (NELSEN & SAFIR 1982, AUGÈ 2001). Durch Ansiedlung von Pilzen an die Pflanzenwurzeln kommt es zu einer Vergrößerung der aufnahmeaktiven Oberfläche (BAON et al. 1994). Zudem sind die Hyphen der Mykorrhizen in der Lage, Phosphatasen auszuschleiden und organisch gebundenen P zu hydrolysieren (TARAFDAR & MARSCHNER 1994).

Darüber hinaus kann auch das Sprosswachstum die P-Effizienz beeinflussen. Pflanzen mit einem hohen Wachstumspotenzial haben im Allgemeinen auch ein gut ausgeprägtes Wurzelsystem, um die Pflanze entsprechend mit Nährstoffen zu versorgen (BHADORIA et al. 2002). Die Integration von P-effizienten Pflanzen in die Fruchtfolge (z. B. Zwischenfrüchte zur Gründüngung) kann die P-Verfügbarkeit im Boden für die nachfolgenden Kulturen verbessert und somit zur besseren P-Versorgung der gesamten Fruchtfolge beitragen (EICHLER-LÖBERMANN et al. 2008).

Durch **physiologische** Anpassung an P-Mangel können Pflanzen die chemischen Bedingungen im Wurzelbereich beeinflussen und die P-Löslichkeit im Boden erhöhen (SCHILLING et al. 2000) (s. Abb. 1).

Die P-Sorptions- und Transformationsprozesse im Boden sind stark vom pH-Wert abhängig (HINSINGER, 2001). Die **Ausscheidung anorganische Moleküle** sowie die **Ausscheidung von Protonen** modifizieren den pH-Wert in der Rhizosphäre und erhöhen damit die P-Verfügbarkeit im Boden (DAKORA & PHILLIPS 2002, WITTENMAYER & MEHRBACH 2005). So wurde von LI et al. (2008) am Beispiel von Bohnen nachgewiesen, dass sich infolge erhöhter Kationenaufnahme die Protonenausscheidung der Pflanze erhöhte und dies zu einer Reduzierung des pH-Wertes im Boden und zu einer höher P-Aufnahme führte. Untersuchungen von ZHU (2002) zeigten, dass Buchweizen durch die verstärkte Exkretion von H<sup>+</sup>-Ionen die Rhizosphäre ansäuern und somit einen

hohen Anteil von Ca-gebundenem P lösen konnte. Zudem ist die P-Passage durch die Zellmembran der Wurzel pH-Abhängig. Sie verläuft bei einem pH-Wert von 4 etwa 3mal so schnell wie bei einem pH-Wert von 7 (SCHACHTSCHABEL et al. 1998, HINSINGER 2001).

Die **Ausscheidung von organischen Säuren** aus der Wurzel trägt ebenfalls zur P-Mobilisierung aus dem Boden bei. Unter P-Mangel scheiden besonders dikotyle Fruchtarten verstärkt niedermolekulare organische Anionen wie Citrat, Malat und Oxalat aus (RÖMER 2006). Diese verringern den pH-Wert des Bodens, setzen durch Ligantenaustausch an Fe- und Al-Oxihydraten sorbierten P im Boden frei und erhöhen somit die P-Löslichkeit und P-Verfügbarkeit (BHADORIA et al. 2002, CARVALHAIS et al. 2011). Studien von SURIYAGODA et al. (2011) zeigten, dass die Exsudation von Citrat durch Leguminosen und Weidelgras die Verfügbarkeit von schwer löslichem  $\text{FePO}_4$  im Boden erhöhte. Untersuchungen von ZHANG et al. (1997) wiesen nach, dass Raps durch die Ausscheidung von organischen Säuren P aus schwerlöslichen Ca-Phosphatverbindungen nutzen konnte. Das  $\text{Ca}^{2+}$  wurde als Calciummalat und Calciumcitrat gebunden. Dies führte dazu, dass der somit zur Verfügung stehende P von der Pflanze aufgenommen werden konnte.

Zudem ist die Exsudation von organischen Zuckern und Enzymen durch die Pflanze für die P-Mobilisierung aus dem Boden bedeutsam (BIELESKI 1973, MARSCHNER 1998). **Phosphatasen** hydrolysieren organischer P-Verbindungen im Boden und können somit zur P-Versorgung der Pflanze beitragen (TARAFDAR & CLAASSEN 1988, VANCE et al. 2003, WANG et al. 2008, DING et al. 2011). In Abhängigkeit vom pH-Wert des Bodens kommen saure sowie alkalische Phosphatase vor (EIVAZI & TABATABAI 1977, HEBRIEN & NEAL 1990). Die saure Phosphatase (AcP) entstammt sowohl Pflanzenwurzeln als auch Bodenmikroorganismen (Tarafdar & Marschner 1994, SCHINNER & SONNLEITNER 1996). Alkalische Phosphatase (AIP) sind hingegen hauptsächlich mikrobiellen Ursprungs (EIVAZI & TABATABAI 1977, DICK et al. 2000). Untersuchungen zur AcP-Aktivität im Boden ergaben deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von der kultivierten Fruchtart (EICHLER et al. 2004, NURUZZAMAN et al. 2006). So fanden beispielsweise NURUZZAMAN et al. (2006) Unterschiede in der AcP-Aktivität im Boden nach Anbau von Weißer Lupine, Bohnen, Erbsen und Weizen, wobei die AcP-Aktivität bei den Leguminosen am höchsten war.

Auch die Hydrolyse von Phytin ist abhängig von der Aktivität der Enzyme des P-Kreislaufes (FINDENEGG & NELEMANS 1993, LUNG & LIM 2006) und der kultivierten Fruchtart (STEFFENS et al. 2010). So konnten LI et al. (2004) eine effizientere P-Aufnahme von Kichererbse aus Na-Phytat im Vergleich zu Mais nachweisen, welche auf die höhere AcP-Aktivität der Kichererbsen zurückzuführen war. Zudem können die verschiedenen Phytinsalze unterschiedlich effektiv von Pflanzen ausgenutzt werden. LUNG & LIM (2006) belegten beispielsweise, dass Tabak den P aus Mg-Phytat besser aufnehmen konnte als aus Ca-Phytat.

### **2.3 Wirkung von P-Zufuhr auf die Trockentoleranz von Pflanzen**

Die Zufuhr von mineralischem P kann die P-Aufnahme und das Pflanzenwachstum unter Trockenstressbedingungen fördern und den negativen Effekten des Trockenstresses entgegen wirken (RODRIGUEZ & OYARZABAL 1996, JIN et al. 2006, SONG et al. 2010). Die zusätzliche P-Zufuhr erhöht die Trockentoleranz dabei aus mehreren Gründen.

Der mineralische P steht der Pflanze zunächst direkt zur Verfügung und kann relativ schnell aufgenommen werden, bevor es zu Einschränkungen der P-Diffusion im Boden kommt (JONES et al. 2005). Die erhöhte P-Aufnahme steigert das Wachstum der gesamten Wurzel, infolge dessen kann ein größeres Bodenvolumen erschlossen werden. Damit verbessert sich das Wasser- und Nährstoffaneignungsvermögen der Pflanze und führt zu einer gesteigerten Biomasseproduktion (SING & SALE 1998). Untersuchungen von AL-KARAKI et al. (1995) wiesen beispielsweise ein erhöhtes Spross- und Wurzelwachstum nach mineralischer P-Zufuhr für verschiedene Bohnen- und Sorghumsorten unter Trockenstress nach.

Des Weiteren wirkt sich die mineralische P-Düngung positiv auf unterschiedliche physiologische Stoffwechselprozesse der Pflanze aus. Die P-Zufuhr trägt unter Trockenstress zur Stabilisierung des Blattwasserpotentials und zur Aufrechterhaltung des Turgordrucks bei. Dadurch erhöht sich die stomatäre Leitfähigkeit, was sich positiv auf die Photosyntheserate der Pflanze auswirkt (WARAICH et al. 2011). Untersuchungen von GARG et al. (2004) zeigten, dass eine erhöhte mineralische P-Zufuhr ( $40 \text{ kg P ha}^{-1}$ ) unter

Trockenstressbedingungen den Chlorophyllgehalt und die Photosyntheserate bei Mottenbohnen signifikant steigerte. SHUBHRA et al. (2004) wiesen eine erhöhte Polysaccharidsynthese und infolge dessen einen höheren Guarangehalt in den Samen von Büschelbohnen durch die Zufuhr von mineralischem P im Vergleich zur Kontrolle unter Trockenstressbedingungen nach. Auch Untersuchungen von BURMANN et al. (2009) belegen einen förderlichen Einfluss der mineralischer P-Zufuhr auf den Blattstoffwechsel und die Effizienz der Photosynthese von Büschelbohnen unter Trockenstress im Vergleich zur Kontrolle ohne P-Düngung. Andererseits wurde in der Studie aber auch ein erhöhter Rückgang des relativen Blattwassergehaltes unter Trockenstressbedingungen infolge der erhöhten P-Zufuhr im Vergleich zur ungedüngten Kontrolle nachgewiesen. Dieser Effekt ging auf die größere Blattfläche und das höhere Pflanzenwachstum nach zusätzlicher P-Zufuhr zurück, was zu einer stärkeren Erschöpfung des Bodenwassergehaltes führte.

Zur Wirkung von organischen P-Quellen wie Phytin auf die Trockentoleranz von Pflanzen liegen bisher nur wenige Untersuchungen vor. Im Allgemeinen wirkt sich eine organische Düngung positiv auf die Bodenstruktur aus und kann somit auch die Wasserbindung des Bodens verbessern (SCHACHTSCHABEL et al. 1998, SCHILLING 2000). So können beispielsweise regelmäßige Kompostgaben einen hohen P-Düngungseffekt haben und gleichzeitig die Parameter der Bodenstruktur, den Wasserhaushalt sowie die biologische Aktivität im Boden verbessern (LARCHEVEQUE et al. 2006, EGHBALLA & POWERA 2007, KLUGE 2007). Dies führt dazu, dass Pflanzen Perioden von Trockenstress besser überstehen (KLUGE 2007).

Die Wirkung von organischen P-Quellen unter Trockenstress ist aber in hohem Maße an die Aufrechterhaltung der Mineralisierungsprozesse bei geringem Bodenwassergehalt gebunden. Die Verminderung des Pflanzenwachstums und der mikrobiellen Aktivität im Boden unter Trockenstress kann zu einer Verringerung der Aktivität der Enzyme des P-Kreislaufes im Boden führen (PASCUAL et al. 2007, SARDANS et al. 2008). Zudem verringern sich auch die Ausscheidung von organischen Säuren, Protonen und Chelatoren in den Boden (BELNAP et al. 2011). Damit kann sich auch die Wirkung von organischem P auf die P-Aufnahme und den Ertrag von Pflanzen unter Trockenstress reduzieren.

### 3 Zielstellung und Hypothesen

Pflanzen verfügen über unterschiedliche Anpassungsmechanismen um Wasser- und P-Mangel entgegen zu wirken. Bessere Kenntnisse über das spezifische P-Aneignungsvermögen von Fruchtarten unter Trockenstress können, vor dem Hintergrund begrenzter Ressourcen, zu einer effizienteren Wasser- und P-Nutzung beitragen.

Die Zufuhr von mineralischem P kann den negativen Effekten des Trockenstresses durch die Förderung physiologischer und morphologischer Pflanzenparameter entgegen wirken und somit die Trockentoleranz der Pflanze erhöhen. Die Eignung der im Boden prädominanten organischen P-Quelle Phytin für die P-Ernährung von Pflanzen unter Trockenstressbedingungen wurde dagegen bisher nur unzureichend untersucht.

Da organische Düngemittel Schwankungen in den P-Gehalten aufweisen sowie neben P andere Nährstoffe in unterschiedlicher Zusammensetzung enthalten, wurde für die vorliegende Arbeit Ca-Inositolhexaphosphat als definierte Phytin-Quelle verwendet.

Um pflanzenverfügbar zu sein müssen organische P-Verbindungen wie Phytin zunächst hydrolisiert werden. Auch hinsichtlich des Einflusses der Aktivität der Enzyme des P-Kreislaufes im Boden auf die P-Ernährung von Pflanzen in Abhängigkeit von der Wasserzufuhr besteht noch ein hoher Forschungsbedarf.

#### **Ziel der Arbeit war es daher,**

- I. die P-Nutzung verschiedener Fruchtarten in Abhängigkeit von der Wasserversorgung zu bestimmen,
- II. die Wirkung von Ca-Phytat auf Pflanzen- und Bodenparameter in Abhängigkeit von der Wasserzufuhr und im Vergleich zu einer P-armen Kontrolle und einer leicht löslichen mineralischen P-Quelle zu ermitteln und
- III. den Einfluss der Aktivität der Enzyme des P-Kreislaufes im Boden auf die P-Ernährung der Fruchtarten in Abhängigkeit von der P-Quelle und der Wasserzufuhr zu erfassen.

Aus dem derzeitigen Stand des Wissens ließen sich die folgenden wissenschaftlichen Hypothesen für die Arbeit ableiten:

*Hypothese 1:*

Die Ausnutzung des mit Ca-Phytat applizierten P wird durch die angebaute Fruchtart, die Wasserzufuhr und durch die Bodeneigenschaften beeinflusst.

*Hypothese 2:*

Die Anpassung von Sorghum und Amarant ( $C_4$ -Pflanzen) an Trockenstress führt zu einer effizienteren P-Aufnahme unter Wassermangel im Vergleich zu Raps und Roggen ( $C_3$ -Pflanzen).

*Hypothese 3:*

Infolge der verminderten mikrobiellen Aktivität im Boden und des verminderten Pflanzenwachstums unter Trockenstress wird die Aktivität der Phosphatasen im Boden ebenfalls zurückgehen, was Einfluss auf die Hydrolyse des Ca-Phytates hat. Damit vermindert sich die Wirkung von Ca-Phytat im Vergleich zu einer mineralischen P-Zufuhr.

Zur Umsetzung der Arbeitsziele und zur Prüfung der Hypothesen wurden drei Gefäßversuche angelegt.

**Versuch A:** Wirkung von Ca-Phytat auf die P-Nutzung verschiedener Fruchtarten in Abhängigkeit von der Wasserzufuhr auf einem schwach lehmigen Sand.

**Versuch B:** Wirkung von Ca-Phytat auf die P-Nutzung verschiedener Fruchtarten in Abhängigkeit von der Wasserzufuhr im Vergleich zu Tripel-Superphosphat auf einem stark lehmigen Sand.

**Versuch C:** Wirkung von permanentem und periodischem Trockenstress auf die P-Nutzung von Sorghum und Amarant in Abhängigkeit von der P-Quelle.

In den Versuchen erfolgte die Prüfung verschiedener Pflanzenparameter sowie chemischer und biologischer Bodenparameter in Abhängigkeit von der Wasser- und P-Zufuhr.

#### Pflanzenparameter:

- Spross- und Wurzelertrag
- Wassernutzungseffizienz
- P-Aufnahme von Wurzel- und Spross
- Prolin-Konzentration
- Photosyntheseleistung

#### chemische Parameter im Boden:

- pH-Wert
- leicht pflanzenverfügbare P-Pools im Boden
- Gesamt-P-Gehalt im Boden und P-Sorptionseigenschaften

#### biologische Parameter im Boden:

- Aktivität der sauren und alkalischen Phosphatase
- Dehydrogenase-Aktivität

## 4 Materialien und Methoden

### 4.1 Charakterisierungen der verwendeten Böden

Um Rückschlüsse auf den Einfluss verschiedener Bodeneigenschaften ziehen zu können wurde in der vorliegenden Arbeit zwei unterschiedliche Böden verwendet.

Der für die **Gefäßversuche A und C** genutzte Boden wurde aus dem A-Horizont eines Dauerversuches der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät Rostock entnommen. Dabei handelt es sich um einen **schwach lehmigen Sand** (Pseudogley-Parabraunerde) (SI2). Der für den **Gefäßversuch B** verwendete Boden entstammt dem A-Horizont eines Versuchsfeldes des Instituts für Ökologischen Landbau am Johann Heinrich von Thünen-Institut in Trenthorst, Schleswig-Holstein. Bei der Bodenart handelt es sich nach eigenen Untersuchungen um einen **stark lehmigen Sand** (Ls4).

Vor Versuchsbeginn wurde der pH-Wert, die doppelaktatlöslichen P-, K-, und Mg-Gehalte ( $P_{dl}$ ,  $K_{dl}$ ,  $Mg_{dl}$ ), der wasserlösliche P ( $P_w$ ) sowie die oxalatlöslichen P-, Fe-, und Al-Gehalte ( $P_{ox}$ ,  $Fe_{ox}$ ,  $Al_{ox}$ ), die P-Sorptionskapazität (PSC), der P-Sättigungsgrad (DSP) und der Gesamt-P-Gehalt ( $P_t$ ) der Böden bestimmt (s. Tab. 1 u. 2). Des Weiteren erfolgte die Bestimmung der organischen Bodensubstanz (OBS) und des gesamt organischen P-Gehaltes ( $P_{org}$ ), aus der Differenz des gesamt mineralischen P nach Veraschung ( $P_{va}$ ) und des gesamt mineralischen unveraschten P ( $P_{min}$ ) (s. Tab. 1 u. 2).

In den Gefäßversuchen mit schwach lehmigem Sand lag der  $P_{dl}$ -Gehalt im Boden zu Versuchsbeginn bei  $40,6 \text{ mg kg}^{-1}$  (Versuch A) bzw. bei  $43,5 \text{ mg kg}^{-1}$  (Versuch C) (s. Tab. 1). Damit entsprachen beide Böden mit schwach lehmigem Sand der Gehaltsklasse B und waren als P-arm einzustufen (ANONYMUS 2004).

Im Gefäßversuch B mit stark lehmigem Sand lag der  $P_{dl}$ -Gehalt zu Versuchsbeginn bei  $24,1 \text{ mg kg}^{-1}$  (s. Tab. 1). Der Boden war ebenfalls suboptimal mit P versorgt und der Gehaltsklasse A zu zuordnen (ANONYMUS, 2004). Des Weiteren wies der stark lehmige Sand geringere Gehalte an wasserlöslichem P ( $P_w$ ) und einen geringeren Gesamt-P-Gehalt ( $P_t$ ) sowie eine geringere P-Sättigung, als der schwach lehmige Sand auf (s. Tab. 1).

Der prozentuale Anteil des organischen P ( $P_{\text{org}}$ ) am  $P_{\text{va}}$  lag auf dem stark lehmigen Sand bei ca. 20,0 %, auf beiden Böden mit schwach lehmigem Sand bei ca. 30,0 % (s. Tab. 1).

Für den stark lehmigen Sand wurde eine höhere OBS (5,17 %) im Vergleich zum schwach lehmigen Sand ermittelt. Darüber hinaus wies der stark lehmige Sand höhere Gehalte an oxalatlöslichem Fe ( $50,0 \text{ mmol kg}^{-1}$ ) auf, als die Böden mit schwach lehmigen Sand (Versuch A: 29,7; Versuch C:  $28,4 \text{ mmol kg}^{-1}$ ) (s. Tab. 2).

Tabelle 1: Charakterisierung der P-Fractionen der in den Gefäßversuchen verwendeten Böden.

Bodenart	$P_t$ $\text{mg kg}^{-1}$	$P_w$ $\text{mg kg}^{-1}$	$P_{\text{dl}}$ $\text{mg kg}^{-1}$	$P_{\text{ox}}$ $\text{mmol kg}^{-1}$	PSC $\text{mmol kg}^{-1}$	DPS %	$P_{\text{va}}$ $\text{mg kg}^{-1}$	$P_{\text{min}}$ $\text{mg kg}^{-1}$	$P_{\text{org}}$ $\text{mg kg}^{-1}$
A: SI2	573	6,15	40,6	16,9	26,2	49,3	449	304	145
B: Ls4	538	3,83	24,1	8,23	37,0	22,2	332	266	66,0
C: SI2	545	9,43	43,5	14,0	28,0	50,1	455	303	152

$P_t$  = Gesamt-P;  $P_w$  = wasserlöslicher P;  $P_{\text{dl}}$  = doppelactatlösliches P;  $P_{\text{ox}}$  = oxalatlösliches P; PSC = P-Sorptionskapazität; DPS = Grad der P-Sättigung;  $P_{\text{va}}$  = gesamt mineralisches P verascht;  $P_{\text{min}}$  = gesamt mineralischer P unverascht;  $P_{\text{org}}$  = gesamt organischer P

Tabelle 2: Charakterisierung weiterer Kenngrößen der in den Gefäßversuchen verwendeten Böden.

Bodenart	pH CaCl <sub>2</sub>	OBS %	$K_{\text{dl}}$ $\text{mg kg}^{-1}$	$Mg_{\text{dl}}$ $\text{mg kg}^{-1}$	$Fe_{\text{ox}}$ $\text{mmol kg}^{-1}$	$Al_{\text{ox}}$ $\text{mmol kg}^{-1}$
A: SI2	4,91	2,43	64,9	140	29,7	22,6
B: Ls4	6,10	5,17	101	214	50,0	24,1
C: SI2	5,85	2,06	57,0	148	28,4	27,7

OBS = organische Bodensubstanz;  $K_{\text{dl}}$ ,  $Mg_{\text{dl}}$  = doppelactatlösliches K, Mg;  $Fe_{\text{ox}}$ ,  $Al_{\text{ox}}$  = oxalatlösliches Fe, Al

## 4.2 Aufbau und Durchführung der Gefäßversuche

Die in der Arbeit durchgeführten Gefäßversuche wurden dreifaktoriell (Fruchtart, Wasser, Düngung) angelegt.

Um die P-Nutzung unterschiedlicher **Fruchtarten** in Abhängigkeit von der Wasserzufuhr und der P-Quelle zu ermitteln wurden für die Gefäßversuche zwei Fruchtarten mit C<sub>4</sub>- (Sorghum, Amarant) und zwei Fruchtarten mit C<sub>3</sub>-Photosynthesezyklus (Raps, Roggen) kultiviert. Gleichzeitig beinhalteten die Versuche damit je zwei monokotylen (Sorghum, Roggen) und zwei dikotylen (Amarant, Raps) Pflanzen.

- Sorghum                    (*Sorghum bicolor x Sorghum sudanense*, Inka)
- Amarant                    (*Amarantus cruentus*, Bärnkrafft),
- Raps                        (*Brassica napus*, Palma)
- Roggen                     (*Secale cereal*, Arantes)

Zur Prüfung des Faktors **Wasser** wurde vor Versuchsbeginn die maximale Wasserhaltekapazität (WHK) des Bodens ermittelt und daraus ableitend die jeweilige Bewässerungsstufe (60 % WHK: optimal versorgte Kontrollvariante; 30 % WHK: Trockenstressvariante) errechnet und eingestellt. Die Bestimmung der WHK erfolgte in der Laboranalyse nach DIN ISO 111465 (ANONYMUS 1996). Der Wassergehalt in den Gefäßen fiel im Tagesverlauf aufgrund der Pflanzenaufnahme und der Transpiration unter die jeweils angestrebte prozentuale WHK der jeweiligen Varianten. Die Differenz zum Soll wurde daher durch tägliches Wiegen der Gefäße ermittelt und die entsprechende Wassermenge mit destilliertem Wasser zugeführt.

Der Trockenstress wurde für alle Fruchtarten einheitlich ab BBCH 13 (ANONYMUS 2001) eingestellt. Unterschiede bei Keimung und Auflaufen wurden somit ausgeglichen. Des Weiteren waren zu diesem Entwicklungszeitpunkt mögliche P-Reserven aus dem Saatgut aufgebraucht (Phytinsäure als P-Speicher in den Samen).

Durch die Zunahme der Biomasse erhöhte sich das Gesamtgewicht der Gefäße im Versuchsverlauf. Um dies bei der Berechnung der Wasserzufuhr zu berücksichtigen, wurden zu jeder Variante Referenzpflanzen angezogen und im Versuchsverlauf geerntet. Die ermittelten Biomassen wurden bei der

Berechnung der WHK entsprechend kalkuliert. Der Anbau der Fruchtarten erfolgte unter teilkontrollierten Bedingungen unter einem lichtdurchlässigen, Regen abweisenden Shelter.

Die Wirkung der organischen **P-Zufuhr** auf die Pflanzen- und Bodenparameter wurde im Vergleich zu einer Kontrolle ohne P-Zufuhr (NK) und einer leicht löslichen mineralischen P-Quelle (Triple-Superphosphat) geprüft. Dabei wurde Ca-Inositolhexaphosphat ( $C_6H_{16}CaO_{24}P_6$ ) der Firma Sigma-Aldrich, im Folgenden kurz als PAC (*Phytic Acid Calcium*) bezeichnet, als organische P-Quelle genutzt.

Die Anlage der Gefäßversuche wurde wie folgt gestaltet:

**Versuch A:** Wirkung von Ca-Phytat auf die P-Nutzung verschiedener Fruchtarten in Abhängigkeit von der Wasserzufuhr auf einem schwach lehmigen Sand.

Der Gefäßversuch A wurde im Mai 2009 als dreifaktorielle Anlage in vierfacher Wiederholung mit vier Fruchtarten, zwei Düngungsvarianten und zwei Wasservarianten ausgesät (s. Tab. 3).

Tabelle 3: Versuchsaufbau im Gefäßversuch A.

---

**A Fruchtart**

- a1 Sorghum
- a2 Amarant
- a3 Raps
- a4 Roggen

**B Düngung**

- b1 Kontrolle ohne P (NK)
- b2 organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat (PACII: 0,40 g P Gefäß<sup>-1</sup>)

**C Bewässerung**

- c1 60 % WHK
- c2 30 % WHK

---

4 x 2 x 2 x 4 = 64

Für den Versuch wurden 6 kg des lufttrockenen Bodens nach dem Sieben (2 mm) in Mitscherlich-Gefäße eingewogen. Vor der Aussaat wurden dem Boden die Hauptnährstoffe in Form einer Nährlösung zugeführt. Die Nährlösung enthielt pro Gefäß 1,4 g  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (0,5 g N), 1,4 g  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (0,14 g Mg) und 1,9 g KCl (0,7 g K). Die organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat (PACII) erfolgte mit 0,40 g P Gefäß<sup>-1</sup>. Zum Vergleich diente eine Kontrolle ohne P-Zufuhr (NK) (s. Tab. 3).

Die Aussaat der verschiedenen Fruchtarten erfolgte am 12.05.2009. Der Trockenstress wurde bei Sorghum zum 22.05.2009 und bei Amarant, Raps und Roggen zum 25.05.2009 eingestellt (jeweils mit BBCH 13). Die Ernte erfolgte am 30.06.2009 nach 50tägiger Versuchsdauer.

**Versuch B:** Wirkung von Ca-Phytat auf die P-Nutzung verschiedener Fruchtarten in Abhängigkeit von der Wasserzufuhr im Vergleich zu Tripel-Superphosphat auf einem stark lehmigen Sand.

Der Gefäßversuch B wurde im Mai 2010 als dreifaktorielle Anlage in vierfacher Wiederholung mit vier Fruchtarten, drei Düngungsvarianten und zwei Wasservarianten ausgesät (s. Tab. 4).

Tabelle 4: Versuchsaufbau im Gefäßversuch B.

---

**A Fruchtart**

- a1 Sorghum
- a2 Amarant
- a3 Raps
- a4 Roggen

**B Düngung**

- b1 Kontrolle ohne P (NK)
- b2 organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat (PAC: 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>)
- b3 mineralische P-Zufuhr mit Tripel-Superphosphat (TSP: 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>)

**C Bewässerung**

- c1 60 % WHK
- c2 30 % WHK

---

4 x 3 x 2 x 4 = 96

Für den Gefäßversuch B wurde ebenfalls 6 kg Boden in Mitscherlich-Gefäße eingewogen. Vor Aussaat der Fruchtarten erfolgte die Düngung mit 2,5 g  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 1,4 g  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  und 1,9 g KCl. Um die Wirksamkeit einer geringeren organischen P-Zufuhr zu ermitteln erfolgte die P-Düngung mit Ca-Inositolhexaphosphat in halber Applikationsmenge ( $0,20 \text{ g P Gefäß}^{-1}$ ) wie im Versuch A. Zum Vergleich dienten eine P-armen Kontrolle (NK) und eine leicht löslichen mineralischen P-Quelle (TSP) (s. Tab. 4).

Die Aussaat des Gefäßversuches B erfolgte am 05.05.2010, die Ernte am 23.06.2010 nach 50tägiger Versuchszeit. Der Trockenstress wurde wiederum ab BBCH 13 zum 20.05.2010 für Raps und Roggen, sowie zum 23.05.2010 für Sorghum und Amarant eingestellt.

Darüber hinaus wurde im Versuch B die Chlorophyllfluoreszenz der Fruchtarten in der Variante mit mineralischer P-Zufuhr im Vergleich zur NK-Variante ermittelt. Die Messungen zur Ermittlung der effektiven Quantenausbeute des PSII erfolgten am 15. 06. 2010.

**Versuch C:** Wirkung von permanentem und periodischem Trockenstress auf die P-Nutzung von Sorghum und Amarant in Abhängigkeit von der P-Quelle.

Der Gefäßversuch C wurde im April 2011 als dreifaktorielle Anlage in vierfacher Wiederholung mit zwei Fruchtarten, vier Düngungsvarianten und drei Wasservarianten angelegt (s. Tab. 5).

Tabelle 5: Versuchsaufbau im Gefäßversuch C.

---

**A Fruchtart**

- a1 Sorghum
- a2 Amarant

**B Düngung**

- b1 Kontrolle ohne P (NK)
- b2 organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat (PAC:  $0,20 \text{ g P Gefäß}^{-1}$ )
- b3 organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat (PACII:  $0,40 \text{ g P Gefäß}^{-1}$ )
- b3 mineralische P-Zufuhr mit Tripel-Superphosphat (TSP:  $0,20 \text{ g P Gefäß}^{-1}$ )

**C Bewässerung**

- c1 60 % WHK
  - c2 30 % WHK
  - c3 periodischer Trockenstress (PS)
- 

$2 \times 4 \times 3 \times 4 = 96$

Die Nährstoffzufuhr von N, Mg und K erfolgte entsprechend den vorherigen Gefäßversuchen. Die P-Zufuhr wurde zur besseren Vergleichbarkeit und zur Validierung der Ergebnisse der Versuche A und B in vier P-Düngungsvarianten ausgebracht. Die organische P-Zufuhr mit Ca-Inositolhexaphosphat erfolgte daher in zwei Applikationsstufen (PAC, PACII). Als Vergleich dienten wiederum eine Variante ohne P-Zufuhr (NK) sowie eine mineralisch gedüngte Variante (TSP) (s. Tab. 5).

Die Aussaat erfolgte am 29.04.2011, die Ernte am 17.06.2011 wiederum nach 50tägiger Versuchszeit.

Die Einstellung des permanenten Trockenstresses mit 30 % WHK erfolgte ab BBCH 13 für beide Fruchtarten zum 12.05.2011. Der periodische Trockenstress wurde ebenfalls erstmals ab BBCH 13 induziert. Die Pflanzen durchliefen in dieser Variante zwei Austrocknungszyklen. Im Zeitraum vom 12.05.2011 bis zum 21.05.2011 wurde den Pflanzen für 10 Tage kein Wasser zugeführt. Der Bodenwassergehalt lag zum 21.05.2011 nahe Null. Anschließend erfolgte für 7 Tage eine Wiederbewässerung entsprechend der optimalen Bewässerungsstufe mit 60 % WHK. Ein nochmaliger Trockenstress ohne Wasserzufuhr wurde in dieser Variante ab BBCH 33 während des Längenwachstums von 30.05.2011 bis zum 03.06.2011 für 5 Tage induziert. Da zu diesem Zeitpunkt bereits mehr Biomasse durch die Fruchtarten gebildet worden war, erfolgte die vollständige Austrocknung des Bodens schneller als im ersten Zyklus. Anschließend wurde bis zum Versuchsende optimal bewässert (60 % WHK).

### 4.3 Analysen

#### 4.3.1 Analyse der Pflanzenparameter

Zur **Bestimmung der Erträge** erfolgte die Ernte der gesamten oberirdischen Biomasse. Jeder Variante wurden zum Versuchsende Blattproben zur späteren Prolin-Analyse entnommen und bis zur weiteren Verwendung, bei  $-21^{\circ}\text{C}$  gelagert.

Die Sprossmasse wurde bei  $60^{\circ}\text{C}$  bis zur Gewichtskonstante getrocknet und erneut gewogen. Anschließend wurde das TM-Gewicht in g pro Gefäß bestimmt.

Im Gefäßversuch B wurde zudem der Wurzelertrag ermittelt. Nach Wägung der Frischmassen wurden die Wurzeln ebenfalls bei  $60^{\circ}\text{C}$  bis zur Gewichtskonstante getrocknet und anschließend das TM-Gewicht in g pro Gefäß bestimmt.

**Die Wassernutzungseffizienz (WNE)** der Fruchtarten wurde je Variante über das Verhältnis von erzeugter Trockenmasse zu verbrauchter Wassermenge zwischen Aussaat und Ernte errechnet.

$$\text{WNE} = \text{Trockenmasse g Gefäß}^{-1} / \text{Wasserverbrauch l Gefäß}^{-1}$$

Zur **Nährstoffbestimmung im Pflanzenmaterial** wurden je 2 g der getrockneten und gemahlten Pflanzenproben im Muffelofen bei  $550^{\circ}\text{C}$  verascht und anschließend mit 30 %iger HCl aufgeschlossen. Nach Anfärben mit einem Molybdat-Vanadat-Gemisch erfolgte die photometrische P-Bestimmung (Spekol, Carl Zeiss Jena) (PAGE et al., 1982). Die Messung der K- und Ca-Gehalte wurde mit einem Flammenphotometer (Elex 6361, Eppendorff) durchgeführt. Die Messung der Mg-Gehalte im Filtrat erfolgte mit einem Spektralphotometer (EPOS Analyser 5060, Eppendorf). Der N-Gehalt im Pflanzenmaterial wurde nach dem Nassaufschlussverfahren nach Kjeldahl (Destillation/Titration) mit der Gerhardt-Apparatur bestimmt (PAGE et al., 1982). Aufgrund der geringen Menge an getrocknetem Pflanzenmaterial (geringer Ertrag) im Versuch A konnte die N-Bestimmung nur in den Versuchen B und C durchgeführt werden.

Die Nährstoffaufnahme wurde aus dem TM-Ertrag und den Nährstoffgehalten errechnet. Die P-Ausnutzung der Pflanze wurde rechnerisch nach KRATZ & SCHNUG (2008) bestimmt:

$$\text{P-Ausnutzung} = \frac{(\text{P-Aufnahme}_{\text{gedüngt}} - \text{P-Aufnahme}_{\text{ungedüngt}}) * 100}{\text{P-Zufuhr des Düngers}}$$

Die **Prolin-Analysen** wurden nach der Methode von BATES et al. (1973) durchgeführt. Die Methode basiert auf dem Aminosäure-Nachweis mit Ninhydrin, dabei färbt das Additionsprodukt Prolin-Ninhydrin die Extraktionslösung gelb bis orange. Die Messung erfolgte bei 520 nm am Spektrophotometer. Die Analysen wurden am Julius Kühn-Institut (Institut für Züchtungsforschung an landwirtschaftlichen Kulturen, Institut für Resistenzforschung und Stresstoleranz), in Groß Lüsewitz durchgeführt.

Im Gefäßversuch B erfolgte vier Wochen nach Beginn des Trockenstresses die Messung der **Chlorophyllfluoreszenz** mit einem PAM-Fluorometer (LI-6400XT, Licor). Die Messung beruht auf dem Prinzip der Puls-Amplituden-Modulation (SCHREIBER, 1986) und dient auch als sensitive Methode zur Analyse von Stresseffekten auf den Photosyntheseapparat von Pflanzen. Die Untersuchungen wurden in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Ökologie der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock durchgeführt. Da zum Zeitpunkt der Analyse keine sichtbaren Ertragsunterschiede zwischen der Ca-Phytat-Variante und der Kontrolle ohne P-Zufuhr erkennbar waren, wurden die Messungen in den Varianten mit mineralischer P-Zufuhr (TSP) im Vergleich zur Kontrolle (NK) durchgeführt. Zur Analyse wurden die effektive Quantenausbeute des PSII ( $\Phi\text{PSII}$ ) und das nicht-photochemische Quenching (NPQ) der untersuchten Fruchtarten im Tagesverlauf bestimmt. Dabei wurden die durch einen Sättigungsimpuls induzierte maximale dunkel- bzw. lichtadaptierte Fluoreszenz ( $F_m$ ,  $F_m'$ ) sowie die jeweilige Grundfluoreszenz ( $F_o$ ,  $F_s$ ) gemessen.

effektive Quantenausbeute des PSII:	$\Phi\text{PSII} = (F_m' - F_s) / F_m'$
nicht-photochemisches Quenching:	$\text{NPQ} = (F_m - F_m') / F_m'$

### 4.3.2 Analyse der chemischen Parameter im Boden

Nach der Ernte der oberirdischen Biomasse wurden mit einem Bohrstock 6 Bodenproben (3 cm Durchmesser) pro Gefäß entnommen. Der eine Teil der Bodenproben wurde für spätere biochemische Analysen verwendet und direkt nach der Entnahme bei  $-18^{\circ}\text{C}$  eingefroren. Der andere Teil diente chemischen Bodenuntersuchungen und wurde luftgetrocknet und gesiebt (2 mm) bis zur Analyse aufbewahrt.

Der **pH-Wert des Bodens** wurde mit einem pH-Meter in 0,01 M  $\text{CaCl}_2$ -Lösung bestimmt. Dazu wurden 10 g Boden in 25 ml  $\text{CaCl}_2$ -Lösung suspendiert (BLUME et al. 2000). Die organische Bodensubstanz (**OBS**) wurde ebenfalls nach BLUME et al. (2000) ermittelt.

Zur Bestimmung der P-Pools des Bodens wurden folgende Analysemethoden genutzt. Der **wasserlösliche Phosphor** ( $P_w$ ) wurde nach der Methode von VAN DER PAAUW et al. (1971) ermittelt. Dabei lag das Boden-Wasser-Verhältnis bei 1:25. Die P-Konzentration wurde mit der Molybdänblau-Methode analysiert und mittels Fließinjektion (FIAstar 5012 Flow Injection Analyser, Foss Tecator AB, Schweden) bei 720 nm gemessen.

Die Gehalte an **doppellactatlöslichem P** ( $P_{dl}$ ), Kalium ( $K_{dl}$ ) und Magnesium ( $Mg_{dl}$ ) wurden nach der Methode von BLUME et al. (2000) analysiert. Dabei wurden 12 g Boden mit 150 ml Doppellactat (DL)-Extrakt für 1 ½ h geschüttelt und anschließend zur P-Bestimmung 25 ml der Bodenlösung mit 15 ml Vandat-Molybdat-Gemisch angefärbt. Der doppellactatlösliche P wurde mit einem Spektralphotometer (Spekol 11) bei 430 nm bestimmt. Die Analyse des doppellactatlöslichen K erfolgte mittels Flammenphotometer (Elex 6361) und die Analyse des doppellactatlöslichen Mg mittels Spektralphotometer (EPOS Analyser 5060).

Der **oxalatlösliche Gehalt an P** ( $P_{ox}$ ), sowie die Gehalte an oxalatlöslichem Aluminium ( $Al_{ox}$ ) und Eisen ( $Fe_{ox}$ ) im Boden wurden nach der Methode von SCHWERTMANN (1964) analysiert. Dazu wurden 2 g Boden für 1 h in 100 ml Ammoniumoxalat geschüttelt. Die Messung der Konzentration der Elemente im Extrakt erfolgte mittels induktiv gekoppelter Plasmaemissionsspektroskopie

(ICP) (OES-ICP, Jobin Yvon 238 Ultrace). Aus diesen Daten wurde die P-Sorptionskapazität und der Grad der P-Sättigung entsprechend LOOKMAN et al. (1995) und SCHOUMANS (2000) errechnet.

P-Sorptionskapazität:  $PSC = (Al_{ox} + Fe_{ox}) / 2 \text{ (mmol kg}^{-1}\text{)}$

Grad der P-Sättigung:  $DPS [\%] = P_{ox} / PSC * 100$

Der Gehalt des **gesamt organischen P** im Boden wurde nach SAUNDERS & WILLIAMS (1955) ermittelt. Von jeder Variante wurden zwei Proben mit 0,5 g Boden eingewogen, wobei eine der Proben bei 550°C im Muffelofen verascht wurde ( $P_{va}$ ). Durch die Veraschung wurde der Anteil der organischen P in mineralischen P überführt, somit konnte der gesamt P-Gehalte des Bodens bestimmt werden. Zur Ermittlung der mineralischen P-Gehalte wurden die veraschte ( $P_{va}$ ) und die unveraschte Probe ( $P_{min}$ ) gleichermaßen für 16 h mit 25 ml 1N  $H_2SO_4$  geschüttelt. Der mineralische P-Gehalt des Bodens wurde mit der Molybdat-Blau-Methode nach MURPHY & RILEY (1962) analysiert und nach 1 h bei 882 nm am Spektralphotometer (Analytik Jena, Spekord 40) gemessen. Der gesamt organische P-Gehalt ( $P_{org}$ ) des Bodens wurde anschließend wie folgt berechnet:

organischer P-Gehalt des Bodens:  $P_{org} = P_{va} - P_{min}$

Der **Gesamt-P-Gehalt** im Boden ( $P \text{ total} = P_t$ ) wurde durch Königswasser-aufschluss bestimmt. Dazu wurden 0,5 g Boden mit 6 ml 37 % HCL und 2 ml 65 %  $HNO_3$  versetzt (DIN 13346:2000) und im Mikrowellenofen (Mars Xpress, CEM GmbH, Kamp-Lintfort, Germany) aufgeschlossen. Die Bestimmung des P im Extrakt erfolgte mittels ICP-Spektroskopie (OES-ICP, Jobin Yvon 238 Ultrace).

### 4.3.3 Analyse der biologischen Parameter im Boden

Die **Aktivität der sauren (AcP)** und **alkalischen Phosphatase (AIP)** im Boden wurde nach der Methode von TABATABAI & BREMNER (1969) ermittelt. Dabei wurde die Freisetzung von p-Nitrophenol aus einer p-Nitrophenylphosphat-Lösung, nach einstündiger Bebrütung beim 37°C durch extrazelluläre Phosphatasen im Boden gemessen. Die Bestimmung erfolgte am Spektralphotometer bei 420 nm (Spekol 11).

Zur Messung der **Dehydrogenase-Aktivität (DH)** im Boden wurde 1g Boden mit 1 ml 0,8 % TTC-Lösung (2,2,5-Triphenyltetrazoliumchlorid) versetzt und für 24 Stunden bei 37 °C bebrütet (THALMANN 1968). Die Bestimmung erfolgte am Spektralphotometer bei 546 nm (Spekol 11).

### 4.4 Statistische Auswertung

Zur statistischen Bewertung der Ergebnisse wurden Varianz-, Regressions- und Korrelationsanalysen mit dem Statistikprogramm SPSS 15.0 durchgeführt. Die Beurteilung der Unterschiede zwischen den verschiedenen Wasser-, Düngungs- und Fruchtartvarianten erfolgte mittels Duncan-Test ( $p \leq 0,05$ ). Die Auswertung erfolgte entsprechend:  $p > 0,05$  nicht signifikant; \* ( $p \leq 0,05$ ) signifikant; \*\* ( $p \leq 0,01$ ) hoch signifikant; \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) höchst signifikant. Um den Effekt der Versuchsfaktoren auf die Untersuchungskriterien besser beurteilen zu können, wurde zudem das partielle  $\eta^2$  ermittelt. Zur Beschreibung von Korrelationen wurde der Korrelationskoeffizient nach Pearson ( $r$ ) verwendet.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Wirkung von Ca-Phytat auf die P-Nutzung verschiedener Fruchtarten in Abhängigkeit von der Wasserzufuhr auf einem schwach lehmigen Sand

Der **Gefäßversuch A** wurde angelegt, um die Wirkung von Ca-Phytat auf die P-Nutzung der Fruchtarten in Abhängigkeit von der Wasserzufuhr im Vergleich zu einer P-armen Kontrolle auf einem schwach lehmigen Sand zu untersuchen. Dabei wurde zunächst generell ermittelt ob eine Wirkung der organischen P-Verbindung Ca-Phytat auf die P-Ernährung von Sorghum, Amarant, Raps und Roggen unter Trockenstressbedingungen besteht.

#### 5.1.1 Wirkung auf die Pflanzenparameter

Die Pflanzenparameter wurden hoch signifikant durch die Versuchsfaktoren beeinflusst, zudem konnten Wechselwirkungen zwischen den Prüffaktoren nachgewiesen werden (s. Tab. A-1).

Im Allgemeinen erhöhte sich der **Ertrag** nach Zufuhr von Ca-Phytat und mit höherem Wassergehalt des Bodens. Dabei war im Versuch A der Effekt der P-Zufuhr auf den Ertrag höher als der Effekt der Wasserzufuhr ( $\text{Eta}^2$  0,822 vs. 0,587) (s. Tab. A-1).

Die Zufuhr von Ca-Phytat (0,40 g P Gefäß<sup>-1</sup>) führte im Vergleich zur NK-Variante im Versuchsmittel zu einem Ertragsanstieg um 29,9 %. Die Wirkung der P-Zufuhr auf den Ertrag unterschied sich aber in Abhängigkeit von der kultivierten Fruchtart und der Wasserzufuhr. Unter optimaler Bewässerung steigerte die Zufuhr von Ca-Phytat die Erträge aller Fruchtarten im Vergleich zur NK-Variante. Unter Trockenstressbedingungen kam es dagegen nach P-Zufuhr nur bei Amarant und Roggen zu einem Ertragsanstieg im Vergleich zur P-armen Kontrolle (s. Tab. 6).

Infolge des Trockenstresses verringerte sich der Ertrag im Mittel der Fruchtarten um 13,5 % im Vergleich zur optimalen Bewässerung. Roggen (22,6 %), Sorghum (19,6 %) und Raps (9,58 %) zeigten einen deutlichen

Ertragsrückgang unter Trockenstress. Für Amarant konnte dagegen kein Einfluss der Wasserzufuhr festgestellt werden (s. Tab. 6).

Der prozentuale Ertragsrückgang infolge des Trockenstressses war für Sorghum (NK: 7,46 %, PACII: 25,9 %) und Roggen (NK: 15,3 %, PACII: 28,0 %) nach Zufuhr von Ca-Phytat höher als in der NK-Variante. Für Raps (NK: 9,25 %, PACII: 9,41 %) ergaben sich dagegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten.

Für Roggen konnten insgesamt hohe Erträge ermittelt werden. Sorghum bildete dagegen nur geringe Biomassen aus (s. Tab. 6).

Die **P-Aufnahme** der untersuchten Fruchtarten wurde durch die organische P-Zufuhr positiv beeinflusst. Im Versuchsmittel kam es nach Zufuhr von Ca-Phytat zu einem Anstieg der P-Aufnahmen um 36,7 % im Vergleich zur NK-Variante. Die Wirkung von Ca-Phytat auf die P-Aufnahmen unterschied sich ebenfalls in Abhängigkeit von der kultivierten Fruchtart und der Wasserzufuhr. Für Amarant, Raps und Roggen erhöhten sich die P-Aufnahmen nach Zufuhr von Ca-Phytat im Vergleich zur Kontrolle in beiden Wasserstufen. Wohingegen für Sorghum kein Effekt der organischen P-Zufuhr nachweisbar war (s. Tab. 6).

Infolge des Trockenstressses verringerten sich die P-Aufnahmen von Sorghum und Roggen im Vergleich zur optimalen Bewässerung. Bei Roggen war der prozentuale Rückgang der P-Aufnahme infolge des Trockenstressses nach Zufuhr von Ca-Phytat signifikant höher als in der NK-Variante (NK: 13,3 %, PACII: 22,01 %). Bei Sorghum (wo kein Düngungeffekt durch Ca-Phytat nachweisbar war) kam es in den Düngungsvariante zu vergleichbaren Rückgängen der P-Aufnahmen (NK: 34,9 %, PACII: 30,5 %). Die P-Aufnahmen von Amarant und Raps reduzierten sich dagegen unter Trockenstress im Vergleich zur optimalen Bewässerung nicht (s. Tab. 6).

Für Amarant konnte insgesamt eine hohe P-Ausnutzung aus Ca-Phytat nachgewiesen werden. Die P-Ausnutzung von Raps und Roggen war unter Trockenstress (trotz höherer P-Aufnahme von Raps) vergleichbar hoch (s. Abb. 2 u. Tab. 6).

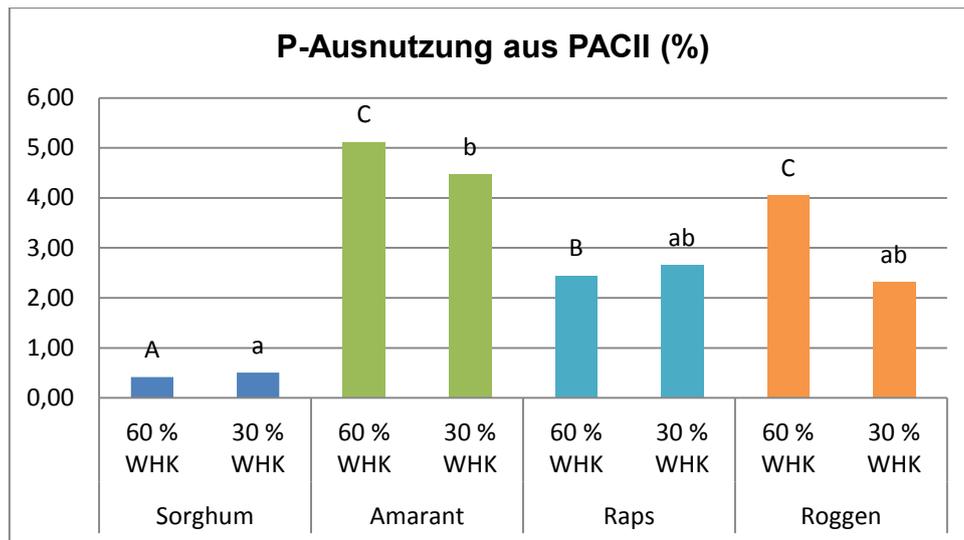


Abbildung 2: P-Ausnutzung der untersuchten Fruchtarten, im Versuch A.

unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtarten in der jeweiligen Wasservariante

Die Zufuhr von Ca-Phytat erhöhte die **Wassernutzungseffizienz** (WNE) der Fruchtarten im Vergleich zur NK-Variante im Versuchsmittel um 20,4 %. Unter optimaler Bewässerung wirkte sich die Zufuhr von Ca-Phytat positiv auf die WNE von Amaranth, Raps und Roggen aus. Dies war tendenziell auch in der Trockenstressvariante für alle Fruchtarten nachweisbar, jedoch nur für Amaranth signifikant.

Infolge des Trockenstresses erhöhte sich die WNE bei Amaranth, Raps und Roggen im Vergleich zur optimal bewässerten Variante. Roggen konnte unter Trockenstress die höchste Trockenmasse aus der zugeführten Wassermenge bilden. Für Sorghum wurde eine geringe WNE festgestellt (s. Tab. 6).

Die zum Versuchsende analysierte **Prolin-Konzentration** in den Blättern der Pflanzen wurde maßgeblich durch die Wasserzufuhr beeinflusst (s. Tab. A-1). Roggen und insbesondere Raps zeigten eine deutliche Prolin-Akkumulation unter Trockenstress im Vergleich zur optimalen Bewässerung. Für Roggen kam es unter Trockenstress zudem zu einer Erhöhung der Prolin-Konzentration nach P-Zufuhr. Die Prolin-Konzentration von Sorghum und Amaranth unterschied sich dagegen nicht in Abhängigkeit von der Wasserzufuhr (s. Tab. 6).

Tabelle 6: Einfluss der Wasser- und P-Zufuhr auf den TM-Ertrag, die P-Aufnahme, die Wassernutzungseffizienz und die Prolin-Konzentration, im Versuch A. (BRANDT *et al.* 2011)

WHK %	Düngung	Sorghum	Amarant	Raps	Roggen
<b>TM-Ertrag</b> (g Gefäß <sup>-1</sup> )					
60	NK	6,70 a	12,7 a	17,3 a*	23,6 a*
	PAC II	11,6 b*	16,6 b	20,2 b	33,2 b*
<b>Mittel</b>		<b>9,20 A*</b>	<b>14,7 B</b>	<b>18,8 C*</b>	<b>28,4 D*</b>
30	NK	6,20 a	12,9 a	15,7 a	20,0 a
	PAC II	8,60 a	17,2 b	18,3 a	23,9 b
<b>Mittel</b>		<b>7,40 A</b>	<b>15,1 B</b>	<b>17,0 C</b>	<b>22,0 D</b>
<b>P-Aufnahme</b> (mg Gefäß <sup>-1</sup> )					
60	NK	18,6 a*	35,9 a	38,1 a	37,7 a*
	PAC II	20,3 a*	56,4 b	47,9 b	53,9 b*
<b>Mittel</b>		<b>19,5 A*</b>	<b>46,2 B*</b>	<b>43,0 B*</b>	<b>45,8 B*</b>
30	NK	12,1 a	43,6 a	42,0 a	32,7 a
	PAC II	14,1 a	61,5 b	52,6 b	42,0 b
<b>Mittel</b>		<b>13,1 A</b>	<b>52,6 D</b>	<b>47,3 C</b>	<b>37,4 B</b>
<b>WNE</b> (g l <sup>-1</sup> )					
60	NK	1,02 a	1,75 a	1,79 a*	2,54 a*
	PAC II	1,66 a	2,22 b*	2,16 b	3,06 b
<b>Mittel</b>		<b>1,34 A</b>	<b>1,99 B*</b>	<b>1,98 B*</b>	<b>2,80 C*</b>
30	NK	1,23 a	2,25 a	2,34 a	2,99 a
	PAC II	1,53 a	2,67 b	2,55 a	3,22 a
<b>Mittel</b>		<b>1,38 A</b>	<b>2,46 B</b>	<b>2,45 B</b>	<b>3,11 C</b>
<b>Prolin</b> (µmol g <sup>-1</sup> TM)					
60	NK	1,61 a	2,11 a	3,80 a*	0,84 a
	PAC II	0,90 a	1,50 a	18,6 a*	0,68 a*
<b>Mittel</b>		<b>1,25 A</b>	<b>1,84 A</b>	<b>12,3 B*</b>	<b>0,76 A*</b>
30	NK	1,51 a	2,24 a	78,4 a	4,75 a
	PAC II	1,13 a	1,93 a	75,2 a	23,2 b
<b>Mittel</b>		<b>1,32 A</b>	<b>2,09 A</b>	<b>76,8 B</b>	<b>14,0 A</b>

NK = Kontrolle ohne P; PACII = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,40 g P Gefäß<sup>-1</sup>; TM = Trockenmasse; WNE = Wassernutzungseffizienz; WHK = Wasserhaltekapazität; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtarten; \* kennzeichnet signifikante Unterschiede zwischen den Wasservarianten (p<0,05 Duncan Test nach zweifaktorieller ANOVA)

### 5.1.2 Wirkung auf die chemischen Bodeneigenschaften

Die chemischen Bodeneigenschaften wurden hauptsächlich durch die Faktoren Düngung und Fruchtart beeinflusst, der Faktor Wasser hatte hingegen einen geringen Einfluss auf die Bodenparameter (s. Tab. A-2 u. A-3).

Im Versuchsverlauf kam es durch die organische P-Düngung mit Ca-Phytat (Zufuhr) und durch die P-Aufnahme der Pflanzen (Entzug) zu Veränderungen der P-Parameter im Boden. In der Bilanz waren zum Versuchsende infolge der Ca-Phytat Zufuhr insbesondere erhöhte Gesamt-P-Gehalte ( $P_t$ ) im Boden nachweisbar (s. Tab. 7). In der NK-Variante ergab sich hinsichtlich des  $P_t$ -Gehaltes zum Versuchsende ein Anstieg um 1,06 %. Dieser ist vermutlich auf analytische Ungenauigkeiten zurückzuführen.

Tabelle 7: Veränderungen der P-Parameter  $\Delta P_w$ ,  $\Delta P_{dl}$ ,  $\Delta P_t$ ,  $\Delta P_{ox}$ ,  $\Delta DPS$  und  $\Delta PSC$  im Boden zum Versuchsende im Vergleich zum Versuchsbeginn, im Versuch A.

Düngung	$\Delta P_w$ (mg kg <sup>-1</sup> )	$\Delta P_{dl}$ (mg kg <sup>-1</sup> )	$\Delta P_t$ (mg kg <sup>-1</sup> )	$\Delta P_{ox}$ (mmol kg <sup>-1</sup> )	$\Delta DPS$ (%)	$\Delta PSC$ (mmol kg <sup>-1</sup> )
NK	-1,05	-8,50	6,13	-4,40	-7,00	3,40
PACII	0,18	-6,30	101	-1,60	1,30	4,00

$P_w$  = wasserlöslicher P;  $P_{dl}$  = doppelaktatlöslicher P;  $P_t$  = P total;  $P_{ox}$  = oxalatlöslicher P; DPS = Grad der P-Sättigung; PSC = P-Sorptionskapazität; NK = Kontrolle ohne P; PACII = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,40 g P Gefäß<sup>-1</sup>

Der **pH-Wert** wurde hauptsächlich durch die kultivierte Fruchtart beeinflusst. Im Vergleich zum Versuchsbeginn (pH 4,91) (s. Kap. 4.1, Tab. 2) senkten die Fruchtarten den pH-Wert im Versuchsverlauf ab. Die Kultivierung von Amarant führte dabei zu den niedrigsten pH-Werten (s. Tab. 8).

Die Zufuhr von Ca-Phytat hatte insgesamt einen positiven Effekt auf die leicht pflanzenverfügbaren P-Pools  $P_w$  und  $P_{dl}$  des Bodens. Insbesondere der Gehalt des wasserlöslichen P ( $P_w$ ) erhöhte sich nach Zufuhr von Ca-Phytat im Vergleich zur NK-Variante (Versuchsmittel:  $P_w$ : um 24,1 %;  $P_{dl}$ : um 6,85 %). Trotz der hohen P-Aufnahmen durch Amarant konnten zum Versuchsende hohe  $P_w$ -Werte im Boden nach Anbau dieser Fruchtart nachgewiesen werden (s. Tab. 8).

Der Einfluss der Wasserzufuhr auf die P-Pools des Bodens war geringer als auf die Pflanzenparameter (s. Tab. A-1 u. A-2). Die leicht pflanzenverfügbaren P-Pools wurden vielmehr durch die Bilanz von P-Zufuhr und P-Aufnahme der Pflanzen bestimmt. So wurden unter Trockenstressbedingungen für Sorghum erhöhte  $P_{dl}$ -Gehalte im Vergleich zur optimalen Bewässerung festgestellt. Diese stehen vermutlich im Zusammenhang mit der niedrigeren P-Aufnahme der Fruchtart in dieser Variante (s. Tab. 6). Diese Annahme bestätigte sich durch die nachgewiesene negative Korrelation zwischen der P-Aufnahme der Pflanzen und dem  $P_{dl}$ -Gehalt des Bodens (60 % WHK:  $r = -0,482^{**}$ ; 30 % WHK:  $r = -0,597^{**}$ ) (s. Tab. A-5 u. A-6).

Tabelle 8: Einfluss der Wasser- und P-Zufuhr sowie der Fruchtart auf den pH-Wert und die Gehalte an leicht pflanzenverfügbarem P im Boden, im Versuch A. (Brandt et al. 2011)

WHK %	Düngung	Sorghum	Amarant	Raps	Roggen
pH (CaCl <sub>2</sub> )					
60	NK	4,62 a	4,35 a	4,76 a	4,73 a
	PAC II	4,69 b	4,44 a	4,76 a	4,84 a
<b>Mittel</b>		<b>4,66 B</b>	<b>4,40 A</b>	<b>4,76 C</b>	<b>4,79 C</b>
30	NK	4,66 a	4,43 a	4,69 a	4,79 a
	PAC II	4,68 a	4,41 a	4,81 a	4,88 b
<b>Mittel</b>		<b>4,67 B</b>	<b>4,42 A</b>	<b>4,75 C</b>	<b>4,84 D</b>
$P_w$ (mg kg <sup>-1</sup> )					
60	NK	4,99 a	5,37 a	5,38 a	4,72 a
	PAC II	6,50 b	6,53 a	5,77 a	6,24 b
<b>Mittel</b>		<b>5,75 A</b>	<b>5,95 A</b>	<b>5,58 A*</b>	<b>5,48 A</b>
30	NK	4,53 a	5,68 a	4,85 a	5,23 a
	PAC II	6,99 b	6,88 b	5,40 a	6,30 a
<b>Mittel</b>		<b>5,76 AB</b>	<b>6,28 B</b>	<b>5,13 A</b>	<b>5,77 AB</b>
$P_{dl}$ (mg kg <sup>-1</sup> )					
60	NK	35,8 a	32,0 a	31,5 a	29,5 a
	PAC II	39,9 b	31,7 a	32,9 a	31,3 a
<b>Mittel</b>		<b>37,9 B*</b>	<b>31,9 A</b>	<b>32,2 A</b>	<b>30,4 A</b>
30	NK	37,2 a	30,4 a	31,0 a	29,1 a
	PAC II	42,7 b	31,5 a	31,2 a	32,9 b
<b>Mittel</b>		<b>40,0 B</b>	<b>31,0 A</b>	<b>31,1 A</b>	<b>31,0 A</b>

$P_w$  = wasserlöslicher P;  $P_{dl}$  = doppellaktatlöslicher P; NK = Kontrolle ohne P; PAC II = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,40 g P Gefäß<sup>-1</sup>; WHK = Wasserhaltekapazität; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtarten; \* kennzeichnet signifikante Unterschiede zwischen den Wasservarianten ( $p \leq 0,05$  Duncan Test nach zweifaktorieller ANOVA)

Die Zufuhr von Ca-Phytat erhöhte den Gesamt-P-Gehalt ( $P_t$ ) des Bodens im Vergleich zur NK-Variante im Versuchsmittel um 16,4 %. Die höchsten  $P_t$ -Gehalte im Boden wurden nach dem Anbau von Sorghum ermittelt.

Die Zufuhr von Ca-Phytat erhöhte ebenfalls den oxalatlöslichen P-Gehalt ( $P_{ox}$ ) (Versuchsmittel: 22,4 %) und den Grad der P-Sättigung (**DPS**) des Bodens (Versuchsmittel: 19,6 %) im Vergleich zur NK-Variante.

Nach Anbau von Amarant wurden die niedrigsten  $P_{ox}$ -Gehalte sowie die geringste P-Sättigung im Boden nachgewiesen (s. Tab. 9).

Die Wasserzufuhr hatte keinen signifikanten Einfluss auf den Gesamt-P-Gehalt und die P-Sorptionseigenschaften im Boden (s. Tab. A-3). Die P-Sorptionskapazität (**PSC**) wurde darüber hinaus auch nicht durch die Versuchsfaktoren Fruchtart und Düngung beeinflusst (s. Tab. 9, Tab. A-3).

Tabelle 9: Einfluss der P-Zufuhr sowie der Fruchtart auf den Gesamt-P-Gehalt und die P-Sorptionseigenschaften im Boden, im Versuch A. (Brandt et al. 2011)

Düngung	Sorghum	Amarant	Raps	Roggen
$P_t$ (mg kg <sup>-1</sup> )				
NK	599 a	572 a	563 a	584 a
PACII	697 b	645 b	681 b	675 b
<b>Mittel</b>	<b>648 B</b>	<b>609 A</b>	<b>622 A</b>	<b>629 AB</b>
$P_{ox}$ (mmol kg <sup>-1</sup> )				
NK	14,1 a	10,4 a	13,3 a	12,3 a
PACII	16,6 b	13,4 b	16,6 b	14,4 b
<b>Mittel</b>	<b>15,3 C</b>	<b>11,9 A</b>	<b>14,9 C</b>	<b>13,3 B</b>
<b>DPS</b> (%)				
NK	46,2 a	35,2 a	45,3 a	42,5 a
PACII	53,8 b	44,0 b	55,1 b	49,5 b
<b>Mittel</b>	<b>50,0 C</b>	<b>39,6 A</b>	<b>50,2 C</b>	<b>46,0 B</b>
<b>PSC</b> (mmol kg <sup>-1</sup> )				
NK	30,5 a	29,5 a	29,3 a	28,9 a
PACII	31,0 a	30,5 a	30,1 a	29,0 a
<b>Mittel</b>	<b>30,7 A</b>	<b>30,0 A</b>	<b>29,7 A</b>	<b>29,0 A</b>

$P_t$  = P total;  $P_{ox}$  = oxalatlöslicher P; DPS = Grad der P-Sättigung; PSC = P-Sorptionskapazität; NK = Kontrolle ohne P; PAC II = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,40 g P Gefäß<sup>-1</sup>; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtarten (p≤0,05 Duncan Test nach zweifaktorieller ANOVA)

### 5.1.3 Aktivität der Enzyme des P-Kreislaufes im Boden

Die Aktivität der untersuchten Enzyme im Boden unterschied sich in Abhängigkeit von der Wasser- und P-Zufuhr sowie von der angebauten Fruchtart. Zudem konnten Wechselwirkungen zwischen den Prüffaktoren nachgewiesen werden (s. Tab. A-4).

Insgesamt erhöhte sich die Aktivität der **sauren Phosphatase** (AcP) infolge der Zufuhr von Ca-Phytat im Vergleich zur NK-Variante bei allen angebauten Fruchtarten (Versuchsmittel: 14,7 %). Wobei es unter optimaler Bewässerung zu einem Anstieg bei Amarant, Raps und Roggen kam und unter Trockenstress bei Sorghum und Amarant.

Nach Anbau von Raps und Roggen konnte unter Trockenstress kein Unterschied in der AcP-Aktivität zwischen den Düngungsvarianten festgestellt werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die AcP-Aktivität auch in der NK-Variante infolge des Trockenstressses deutlich erhöhte (s. Tab. 10).

Die Aktivität der **alkalischen Phosphatase** (AIP) war insgesamt wesentlich geringer als die AcP-Aktivität. Nach Anbau von Sorghum und Amarant verringerte sich die AIP-Aktivität infolge des Trockenstressses in der NK-Variante, wohingegen es in den Varianten mit Ca-Phytat zu einem Anstieg kam. Dieser Effekt bestätigte sich tendenziell auch für Roggen.

Nach Anbau von Raps wurde kein Einfluss der Wasser- und P-Zufuhr auf die AIP-Aktivität nachgewiesen. Im Vergleich der Fruchtarten wurde (in beide Wasservarianten) eine hohe AIP-Aktivität für Sorghum und Roggen festgestellt (s. Tab. 10).

Die **Dehydrogenase-Aktivität** (DH), welche als Indikator für die mikrobielle Aktivität Aufschluss über den Nährstoffumsatz im Boden geben kann, war im Gesamtversuch mit durchschnittlich  $12,5 \mu\text{g TPF g}^{-1} \text{TS h}^{-1}$  gering. Die DH-Aktivität erhöhte sich nach Zufuhr von Ca-Phytat vor allem unter Trockenstress (Amarant, Raps und Roggen). Die höchste DH-Aktivität wurden in beiden Wasserstufen nach dem Abbau von Roggen ermittelt (s. Tab. 10).

Tabelle 10: Einfluss der Wasser- und P-Zufuhr sowie der Fruchtart auf die Aktivität der Phosphatasen und der Dehydrogenase, im Versuch A. (Brandt et al. 2011)

WHK %	Düngung	Sorghum	Amarant	Raps	Roggen
<b>AcP</b> (mg p-Nitrophenol kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )					
60	NK	178 a	149 a*	161 a*	207 a*
	PAC II	190 a*	196 b*	221 b	219 b*
<b>Mittel</b>		<b>184 B</b>	<b>173 A*</b>	<b>191 B*</b>	<b>213 C*</b>
30	NK	181 a	186 a	230 a	226 a
	PAC II	219 b	222 b	231 a	242 a
<b>Mittel</b>		<b>200 A</b>	<b>204 A</b>	<b>231 B</b>	<b>234 B</b>
<b>AIP</b> (mg p-Nitrophenol kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )					
60	NK	12,4 a*	9,42 a*	11,6 a	12,4 a
	PAC II	13,3 a*	10,8 b*	11,3 a	12,6 a
<b>Mittel</b>		<b>12,8 C</b>	<b>10,1 A*</b>	<b>11,4 B</b>	<b>12,5 C</b>
30	NK	8,12 a	7,80 a	11,5 a	12,3 a
	PAC II	17,3 b	14,7 b	11,4 a	13,5 b
<b>Mittel</b>		<b>12,7 B</b>	<b>11,3 A</b>	<b>11,4 A</b>	<b>12,9 B</b>
<b>DH</b> (µg TPF g <sup>-1</sup> TS h <sup>-1</sup> )					
60	NK	11,1 a	10,8 a	10,5 a	12,5 a*
	PAC II	12,8 a	10,6 a*	12,8 b	13,2 a*
<b>Mittel</b>		<b>12,0 B</b>	<b>10,7 A*</b>	<b>11,7 B*</b>	<b>12,9 C*</b>
30	NK	12,0 a	9,36 a	11,8 a	13,9 a
	PAC II	13,0 a	12,6 b	14,0 b	18,7 b
<b>Mittel</b>		<b>12,5 B</b>	<b>11,0 A</b>	<b>12,9 B</b>	<b>16,3 C</b>

AcP = saure Phosphatase; AIP = alkalische Phosphatase; DH = Dehydrogenase-Aktivität; NK = Kontrolle ohne P; PAC II = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,40 g P Gefäß<sup>-1</sup>; WHK = Wasserhaltekapazität; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtarten; \* kennzeichnet signifikante Unterschiede zwischen den Wasservarianten (p≤0,05 Duncan Test nach zweifaktorieller ANOVA)

## 5.2 Wirkung von Ca-Phytat auf die P-Nutzung verschiedener Fruchtarten in Abhängigkeit von der Wasserzufuhr im Vergleich zu Tripel-Superphosphat auf einem stark lehmigen Sand

Der Gefäßversuch B wurde angelegt um die Wirkung von Ca-Phytat im Vergleich zu einer leicht pflanzenverfügbaren mineralischen P-Quelle (TSP) und einer P-armen Variante (NK) in Abhängigkeit von Wasserzufuhr und Fruchtart zu untersuchen. Zudem wurde der Versuch auf einem stark lehmigen Sand angelegt, um im Vergleich zu den Versuchen A und C auf schwach lehmigem Sand Rückschlüsse über den Einfluss verschiedener Bodeneigenschaften ziehen zu können.

Um die Wirkung einer geringeren Ca-Phytat Zufuhr zu ermitteln erfolgte die Düngung in halber Applikationsmenge ( $0,20 \text{ g P Gefäß}^{-1}$ ) wie im Versuch A. Darüber hinaus wurden im Versuch B der Wurzeletrag und die P-Aufnahme der Wurzel sowie der Einfluss von Wasser- und P-Zufuhr auf die Photosyntheseleistung der Fruchtarten ermittelt.

### 5.2.1 Wirkung auf die Pflanzenparameter

Die Pflanzenparameter wurden auch im Versuch B hoch signifikant durch die Versuchsfaktoren beeinflusst, Wechselwirkungen bestanden insbesondere zwischen den Prüffaktoren Fruchtart und Wasser (s. Tab. A-1).

Im Versuch B war der Effekt der P-Zufuhr (anders als im Versuch A) geringer als der Effekt der Wasserzufuhr ( $\text{Eta}^2$  0,507 vs. 0,972) (Tab. A-1).

Die Zufuhr von Ca-Phytat ( $0,20 \text{ g P Gefäß}^{-1}$ ) führte nicht zu einer Erhöhung des **Sprossertrages** im Vergleich zur NK-Variante. Dem gegenüber kam es nach Zufuhr des mineralischen P (TSP:  $0,20 \text{ g P Gefäß}^{-1}$ ) zu einem signifikantem Anstieg des Sprossertrages um 14,9 % (Versuchsmittel). Zudem hatte die TSP-Zufuhr auch unter Trockenstress einen positiven Effekt auf den Ertrag von Sorghum, Amarant und Roggen im Vergleich zur NK-Variante (s. Tab. 13).

Bei allen untersuchten Fruchtarten war (unabhängig von der P-Zufuhr) ein Ertragsrückgang unter Trockenstress im Vergleich zur optimal bewässerten Variante festzustellen. Dieser lag im Versuchsmittel bei 58,2 % und war damit

wesentlich stärker ausgeprägt als auf den Böden mit schwach lehmigem Sand (Versuch A: 13,5 %, Versuch C: 27,7 %).

Unter optimaler Bewässerung zeigte Sorghum hohe Erträge, wies aber unter Trockenstressbedingungen einen geringen Sprossertrag und (im Mittel der Düngungsvarianten) einen Ertragsrückgang im Vergleich zur optimalen Bewässerung um 69,7 % auf. Bei Amarant (54,1 %), Raps (52,7 %) und Roggen (54,6 %) war der Ertragsrückgang infolge des Trockenstresses geringer (s. Tab. 13).

Der prozentuale Rückgang des Spross- und Wurzelertrages infolge des Trockenstresses wurde durch die P-Zufuhr im Vergleich zur NK-Variante nicht nachweislich gemildert. Lediglich bei Roggen kam es hinsichtlich des Sprossertrages zu einer tendenziellen Minderung im Ertragsrückgang nach mineralischer P-Zufuhr (s. Tab. 11).

Tabelle 11: Prozentualer Rückgang des Ertrages in Spross und Wurzel unter Trockenstress im Vergleich zur optimalen Bewässerung, im Versuch B.

	Düngung	Sorghum	Amarant	Raps	Roggen
<b>Spross-TM-Ertrag</b>	NK	68,0 a	57,7 a	53,1 a	55,0 ab
	PAC	72,0 a	53,6 a	52,7 a	60,3 b
	TSP	69,1 a	51,0 a	52,3 a	48,8 a
<b>Wurzel-TM-Ertrag</b>	NK	43,1 a	43,8 a	56,5 a	62,4 a
	PAC	40,6 a	43,4 a	57,2 a	59,3 a
	TSP	43,4 a	39,5 a	48,4 a	52,2 a

NK = Kontrolle ohne P; PAC = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; TSP = mineralische P-Zufuhr mit Tripel-Superphosphat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>

Der **Wurzelertrag** wurde, ebenso wie der Sprossertrag, hauptsächlich durch die Wasserzufuhr beeinflusst ( $\text{Eta}^2$  0,833). Der Effekt der P-Zufuhr war vergleichsweise gering ( $\text{Eta}^2$  0,230) (s. Tab. A-1).

Die Zufuhr von Ca-Phytat hatte auch beim Wurzelertrag keine ertragssteigernde Wirkung im Vergleich zur NK-Variante. Die mineralische P-Zufuhr erhöhte den Wurzelertrag hingegen im Versuchsmittel um 9,72 %. Nach Aufteilung der Daten nach Fruchtarten kam es aber nur bei Amarant unter optimaler Bewässerung zu einem signifikantem Anstieg des Wurzelertrages durch die TSP-Zufuhr im Vergleich zur NK-Variante (s. Tab. 13).

Unter Trockenstress reduzierte sich der Wurzelertrag bei allen Fruchtarten im Versuchsmittel um 46,6 % im Vergleich zur optimal bewässerten Variante. Die höchsten Wurzelerträge wurden unter Trockenstress für die C<sub>4</sub>-Fruchtarten Sorghum und Amarant ermittelt (s. Tab. 13). Des Weiteren war der Rückgang der Wurzelmasse unter Trockenstress im Vergleich zur optimalen Bewässerung bei Sorghum (um 42,4 %) und Amarant (um 42,0 %) geringer, als bei den C<sub>3</sub>-Fruchtarten Raps (um 53,9 %) und Roggen (um 57,9 %).

Trockenstresstolerante Pflanzen weisen allgemein ein hohes **Wurzel-Spross-Verhältnis** auf, d. h. sie investieren unter Wassermangel verstärkt in das Wurzelwachstums der Pflanze. Für Sorghum wurde insgesamt ein hoher Wurzelertrag im Verhältnis zum Sprossertrag ermittelt (s. Tab. 12 u. 13). Unter Trockenstress war dieses Verhältnis zudem höher als in der optimal bewässerten Variante. Auch Amarant bildete unter Trockenstress mehr Wurzelmasse im Verhältnis zum Spross aus, als bei optimaler Bewässerung. Im Gegensatz dazu führte der Trockenstress bei den C<sub>3</sub>-Fruchtarten Raps und Roggen zu keinen Veränderungen des Wurzel-Spross-Verhältnisses in Abhängigkeit von der Wasserzufuhr.

Die Düngung mit mineralischem P verminderte das Wurzel-Spross-Verhältnis bei Sorghum, Amarant und Roggen im Vergleich zur NK- und zur Ca-Phytat-Variante (s. Tab. 12). Nach Aufteilung der Daten in Wasserstufen bestätigte sich dieses Ergebnis unter Trockenstress nur nach Anbau von Amarant.

Tabelle 12: Einfluss der Wasser- und P-Zufuhr auf das Wurzel-Spross-Verhältnis, im Versuch B.

<b>Faktor</b>		<b>Sorghum</b>	<b>Amarant</b>	<b>Raps</b>	<b>Roggen</b>
Düngung	NK	0,57 b	0,20 b	0,13 b	0,17 a
	PAC	0,68 b	0,27 c	0,14 b	0,18 a
	TSP	0,43 a	0,16 a	0,11 a	0,14 a
WHK %	60	0,38 a	0,18 a	0,12 a	0,16 a
	30	0,73 b	0,24 b	0,12 a	0,16 a

NK = Kontrolle ohne P; PAC = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; WHK = Wasserhaltekapazität; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Düngungs- bzw. Wasservarianten ( $p \leq 0,05$  Duncan Test nach zweifaktorieller ANOVA)

Sowohl die Zufuhr von Ca-Phytat als auch die TSP-Zufuhr steigerten die **WNE** der Fruchtarten im Versuchsmittel im Vergleich zur NK-Variante ohne P-Zufuhr

(PAC: um 6,89 %; TSP: um 16,6 %). Dies wurde unter besonders bei Raps und Roggen deutlich (s. Tab. 13).

Auch infolge des Trockenstresses erhöhte sich die WNE bei Raps und Roggen, wohingegen es bei Sorghum zu einer Verringerung im Vergleich zur optimalen Bewässerung kam. Für Amarant konnte in beiden Wasserstufen eine hohe WNE nachgewiesen werden.

Tabelle 13: Einfluss der Wasser- und P-Zufuhr auf den Spross- und Wurzel- TM-Ertrag sowie die Wassernutzungseffizienz, im Versuch B.

WHK %	Düngung	Sorghum	Amarant	Raps	Roggen
<b>Spross TM-Ertrag</b> (g Gefäß <sup>-1</sup> )					
60	NK	42,4 a*	39,8 b*	40,5 a*	37,1 a*
	PAC	43,9 a*	33,6 a*	40,5 a*	40,8 ab*
	TSP	52,4 b*	42,7 b*	41,4 a*	43,7 b*
<b>Mittel</b>		<b>46,2 B*</b>	<b>38,7 A*</b>	<b>40,8 A*</b>	<b>40,5 A*</b>
30	NK	13,5 a	16,8 a	19,0 a	16,7 a
	PAC	12,3 a	15,6 a	19,1 a	16,2 a
	TSP	16,2 b	20,9 b	19,8 a	22,3 b
<b>Mittel</b>		<b>14,0 A</b>	<b>17,8 B</b>	<b>19,3 C</b>	<b>18,4 BC</b>
<b>Wurzel TM-Ertrag</b> (g Gefäß <sup>-1</sup> )					
60	NK	17,2 a*	6,93 b*	5,13 a*	6,73 a*
	PAC	15,3 a*	6,38 a*	4,55 a*	6,33 a*
	TSP	18,9 a*	7,85 c*	5,23 a*	6,80 a*
<b>Mittel</b>		<b>17,1 C*</b>	<b>7,05 B*</b>	<b>4,97 A*</b>	<b>6,62 B*</b>
30	NK	9,78 a	3,90 a	2,23 ab	2,53 a
	PAC	9,08 a	3,61 a	1,95 a	2,58 a
	TSP	10,7 a	4,75 a	2,70 b	3,25 a
<b>Mittel</b>		<b>9,85 D</b>	<b>4,09 C</b>	<b>2,29 A</b>	<b>2,79 A</b>
<b>WNE Spross</b> (g l <sup>-1</sup> )					
60	NK	5,27 a*	5,01 a	3,52 a*	3,62 a
	PAC	5,81 a*	4,82 a	3,99 b*	4,28 b
	TSP	6,76 a*	5,09 a	3,64 a*	4,22 b
<b>Mittel</b>		<b>5,95 C*</b>	<b>4,97 B</b>	<b>3,72 A*</b>	<b>4,04 A*</b>
30	NK	3,53 a	4,76 a	3,89 a	4,07 a
	PAC	3,54 a	4,64 a	4,58 b	4,30 a
	TSP	4,14 a	5,17 a	5,43 c	4,84 b
<b>Mittel</b>		<b>3,74 A</b>	<b>4,86 C</b>	<b>4,63 BC</b>	<b>4,40 B</b>

NK = Kontrolle ohne P; PAC = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; TSP = mineralische P-Zufuhr mit Tripel-Superphosphat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; TM = Trockenmasse; WNE = Wassernutzungseffizienz; WHK = Wasserhaltekapazität; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtarten; \* kennzeichnet signifikante Unterschiede zwischen den Wasservarianten (p≤0,05 Duncan Test nach zweifaktorieller ANOVA)

Die **P-Aufnahme** wurde durch die Wasser- und P-Zufuhr beeinflusst ( $\eta^2$  0,951 vs. 0,713). Dabei war der Einfluss der P-Zufuhr auf die P-Aufnahme höher als auf den Ertrag (s. Tab. A-1).

Nach mineralischer P-Zufuhr ergab sich im Versuchsmittel eine Steigerung der P-Aufnahme um 37,5 % im Vergleich zur NK-Variante. Die P-Aufnahmen von Amarant, Raps und Roggen wurden nach TSP-Zufuhr im Vergleich zur NK-Variante in beiden Wasserstufen erhöht. Die Zufuhr von Ca-Phytat zeigte dagegen (wie auch beim Ertrag) keine signifikante Wirkung auf die P-Aufnahme der Fruchtarten (s. Tab. 15).

Trockenstress reduzierte die P-Aufnahmen aller Fruchtarten in allen Düngungsvarianten im Vergleich zur optimalen Bewässerung (Versuchsmittel: 59,0 %). Für Sorghum zeigte sich vermutlich aufgrund des geringen Sprossertrages unter Trockenstress auch ein hoher Rückgang in der P-Aufnahme (71,4 %). Auch für Amarant (63,1 %), Raps (48,0 %) und Roggen (54,6 %) ergaben sich (im Gegensatz zu Versuch A) hohe Rückgänge in den P-Aufnahmen unter Trockenstress im Vergleich zur optimalen Bewässerung.

Für die dikotylen Fruchtarten Amarant und Raps konnten (wie auch im Versuch A) unter Trockenstressbedingungen höhere P-Aufnahmen im Vergleich zu den monokotylen Fruchtarten Sorghum und Roggen nachgewiesen werden (s. Tab. 15). Roggen zeigte trotz geringerer P-Aufnahmen vergleichbar hohe Erträge wie Amarant und Raps (s. Tab. 13) und hatte unter Trockenstress eine vergleichbar hohe P-Ausnutzung aus TSP wie Amarant (s. Abb. 3).

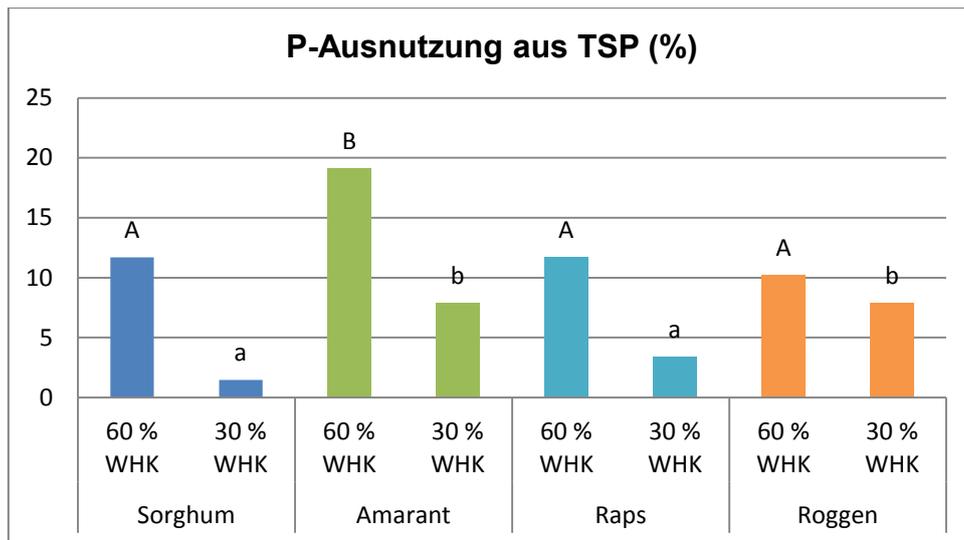


Abbildung 3: P-Ausnutzung der untersuchten Fruchtarten, im Versuch B.

unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtarten in der jeweiligen Wasservariante

Der prozentuale Rückgang der P-Aufnahme infolge des Trockenstresses wurde (wie beim Ertrag) durch die P-Zufuhr im Vergleich zur NK-Variante nicht gemindert. Für Raps ergab sich ein negativer Effekt nach mineralischer P-Zufuhr hinsichtlich der Spross P-Aufnahme (s. Tab. 14).

Tabelle 14: Prozentualer Rückgang der P-Aufnahme in Spross und Wurzel unter Trockenstress im Vergleich zur optimalen Bewässerung, im Versuch B.

	Düngung	Sorghum	Amarant	Raps	Roggen
<b>Spross P-Aufnahme</b>	NK	67,6 a	64,2 a	45,4 a	55,9 a
	PAC	72,7 a	63,2 a	45,0 a	63,9 a
	TSP	72,4 a	62,3 a	48,0 b	46,3 a
<b>Wurzel P-Aufnahme</b>	NK	48,0 a	61,1 a	57,8 a	54,2 a
	PAC	52,7 a	58,5 a	54,4 a	59,0 a
	TSP	54,0 a	61,1 a	47,9 a	54,0 a

NK = Kontrolle ohne P; PAC = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; TSP = mineralische P-Zufuhr mit Tripel-Superphosphat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>

Die **P-Aufnahme der Wurzel** wurde, wie auch der Wurzelertrag, durch die Wasser- und P-Zufuhr beeinflusst ( $\text{Eta}^2$  0,856 vs. 0,454) (s. Tab. A-1). Wobei auch hier der Effekt der P-Zufuhr auf die P-Aufnahme höher war als auf den Wurzelertrag.

Die Zufuhr von Ca-Phytat zeigte auch hinsichtlich der P-Aufnahme in die Wurzel keine positive Wirkung. Die mineralische P-Zufuhr erhöhte die P-Aufnahme im Vergleich zur NK-Variante dagegen im Versuchsmittel um 36,6 %. Nach Aufteilung der Daten nach Fruchtarten bestätigte sich dies für Amaranth und Raps in beiden Wasserstufen (s. Tab.15).

Trockenstress reduzierte die P-Aufnahme der Wurzel im Vergleich zur optimalen Bewässerung bei allen Fruchtarten (Versuchsmittel: um 45,1 %). Beide C<sub>4</sub>-Fruchtarten hatten im Vergleich zu den C<sub>3</sub>-Fruchtarten höhere P-Aufnahmen in die Wurzel, was im Wesentlichen auf die höheren Wurzelmassen zurückzuführen ist (s. Tab. 15).

Tabelle 15: Einfluss der Wasser- und P-Zufuhr auf die P-Aufnahme von Spross und Wurzel, im Versuch B.

WHK %	Düngung	Sorghum	Amarant	Raps	Roggen
<b>Spross P-Aufnahme</b> (mg Gefäß <sup>-1</sup> )					
60	NK	67,3 a*	90,4 a*	68,3 a*	50,3 a*
	PAC	77,7 a*	85,0 a*	65,8 a*	58,1 a*
	TSP	90,7 a*	129 b*	91,8 b*	70,7 b*
<b>Mittel</b>		<b>78,6 B*</b>	<b>101 C*</b>	<b>75,3 B*</b>	<b>59,7 A*</b>
30	NK	21,8 a	32,4 a	37,3 a	22,2 a
	PAC	21,1 a	31,2 a	36,2 a	21,0 a
	TSP	24,7 a	48,2 b	44,1 b	38,0 b
<b>Mittel</b>		<b>22,5 A</b>	<b>37,3 C</b>	<b>39,2 C</b>	<b>27,1 B</b>
<b>Wurzel P-Aufnahme</b> (mg Gefäß <sup>-1</sup> )					
60	NK	20,7 a*	13,5 a*	6,25 a*	4,85 a
	PAC	23,0 a*	14,0 a*	5,90 a*	5,59 a
	TSP	27,8 a*	21,1 b*	8,26 b*	5,77 a*
<b>Mittel</b>		<b>23,8 C*</b>	<b>16,2 B*</b>	<b>6,80 A*</b>	<b>5,40 A*</b>
30	NK	10,7 a	5,25 a	2,64 a	2,22 a
	PAC	11,1 a	5,81 a	2,69 a	2,29 a
	TSP	12,8 a	8,22 b	4,30 b	2,61 a
<b>Mittel</b>		<b>11,5 C</b>	<b>6,43 B</b>	<b>3,21 A</b>	<b>2,37 A</b>

NK = Kontrolle ohne P; PAC = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; TSP = mineralische P-Zufuhr mit Tripel-Superphosphat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; TM = Trockenmasse; WHK = Wasserhaltekapazität; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtarten; \* kennzeichnet signifikante Unterschiede zwischen den Wasservarianten (p≤0,05 Duncan Test nach zweifaktorieller ANOVA)

Die **Prolin-Konzentration** wurde durch die Wasserzufuhr und die Fruchtart beeinflusst. Im Versuch B zeigte die P-Zufuhr keinen Einfluss auf die Prolin-Konzentration in den Blättern der Pflanzen (s. Tab. A-1).

Die höchste Prolin-Konzentration konnte (wie im Versuch A) bei Raps festgestellt werden. Diese stieg unter Trockenstress im Vergleich zur optimal bewässerten Variante an. Auch bei Sorghum erhöhten sich die Prolin-Gehalte infolge von Trockenstress. Für Amarant und Roggen konnte hingegen keine signifikante Erhöhung der Prolin-Konzentration unter Trockenstress im Vergleich zur optimalen Bewässerung ermittelt werden (s. Tab. 16).

Tabelle 16: Einfluss der Wasserzufuhr auf die Prolin-Konzentration ( $\mu\text{mol g}^{-1}$  TM), im Versuch B.

Düngung	WHK %	Sorghum	Amarant	Raps	Roggen
NK	60	3,01 a	3,03 a	16,0 a	3,41 a
	30	4,69 b	2,61 a	138 b	2,75 a
PAC	60	2,93 a	2,54 a	14,6 a	2,62 a
	30	3,90 a	2,81 a	129 b	2,47 a
TSP	60	2,92 a	3,05 a	10,5 a	3,47 a
	30	4,40 b	2,81 a	141 b	4,99 a
<b>Mittel</b>		<b>3,64 A</b>	<b>2,81 A</b>	<b>74,7 B</b>	<b>3,45 A</b>

NK = Kontrolle ohne P; PAC = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; TSP = mineralische P-Zufuhr mit Tripel-Superphosphat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; WHK = Wasserhaltekapazität; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Wasservarianten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtarten ( $p \leq 0,05$  Duncan Test nach zweifaktorieller ANOVA)

### 5.2.2 Wirkung der P-Zufuhr auf die Photosyntheseleistung der Fruchtarten im Tagesverlauf

Im Gefäßversuch B wurde die Photosyntheseleistung (Chlorophyllfluoreszenz) der Fruchtarten im Tagesverlauf in der Variante mit mineralischer P-Zufuhr im Vergleich zur NK-Variante gemessen. Die Versuchsfaktoren Wasser und Fruchtart hatten im Versuchsmittel einen signifikanten Einfluss auf die effektive Quantenausbeute des PSII ( $\Phi$ PSII) und das nicht-photochemische Quenching (NPQ) (s. Tab. A-14). Die von den Chlorophyllmolekülen absorbierte Lichtenergie wird als photochemisches Quenching durch Energietransformation an den Reaktionszentren des Photosystems II für photosynthetische Prozesse genutzt. Die nicht genutzte Lichtenergie wird dagegen als Wärme abgegeben oder als Fluoreszenz abgestrahlt (NPQ).

Die Ergebnisse zeigen, dass sich im Tagesverlauf die  $\Phi$ PSII bei allen Fruchtarten reduzierte. Gleichzeitig stieg das NPQ an. In den Abendstunden kam es wieder zu einem Anstieg der  $\Phi$ PSII und einem Rückgang des NPQ (s. Tab. A-12 u. A-13).

Die Differenz zwischen der maximalen und der minimalen effektiven Quantenausbeute war im Tagesverlauf in den NK-Varianten unter optimaler Bewässerung höher als unter Trockenstress (s. Tab. 18). Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass unter optimaler Bewässerung (60 % WHK) der Wassergehalt des Bodens im Tagesverlauf in den Gefäßen stärker absank als in den Varianten mit geringer Wasserhaltekapazität (30 % WHK) und somit auch der Wassergehalt in den Pflanzen stärker vermindert wurde. Bei Sorghum, Raps und Roggen führte dies zu signifikanten Unterschieden zwischen den Wasserstufen. In der TSP-Variante zeigten sich dagegen keine Unterschiede in Abhängigkeit von der Wasserzufuhr (s. Tab. 17).

Bei Aufteilung der Daten nach Fruchtarten ergaben sich im Versuch auch Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten. Die mineralische P-Zufuhr hatte unter optimaler Bewässerung bei Raps und Roggen einen positiven Effekt auf die  $\Phi$ PSII (signifikanter Anstieg) und das NPQ (signifikanter Rückgang) im Vergleich zur NK-Variante. Unter Trockenstress kam es dagegen zu einer Reduzierung der  $\Phi$ PSII bei Sorghum und Roggen nach mineralischer P-Zufuhr im Vergleich zur NK-Variante (s. Tab. 17) (s. Abb. 4-7). Für Amarant und Raps waren kein signifikanten Unterschiede nach P-Zufuhr im Vergleich zur NK-

Variante unter Trockenstress zu verzeichnen, tendenziell wirkte sich die P-Zufuhr positiv aus (s. Tab. 17 u. 18). Amarant zeigte insgesamt einen hohen Rückgang der effektiven Quantenausbeute im Tagesverlauf (s. Tab. 18 u. Tab. A-12).

Tabelle 17: Einfluss von Wasser- und P-Zufuhr auf die effektive Quantenausbeute des PSII und das nicht-photochemische Quenching (Mittel Tagesverlauf).

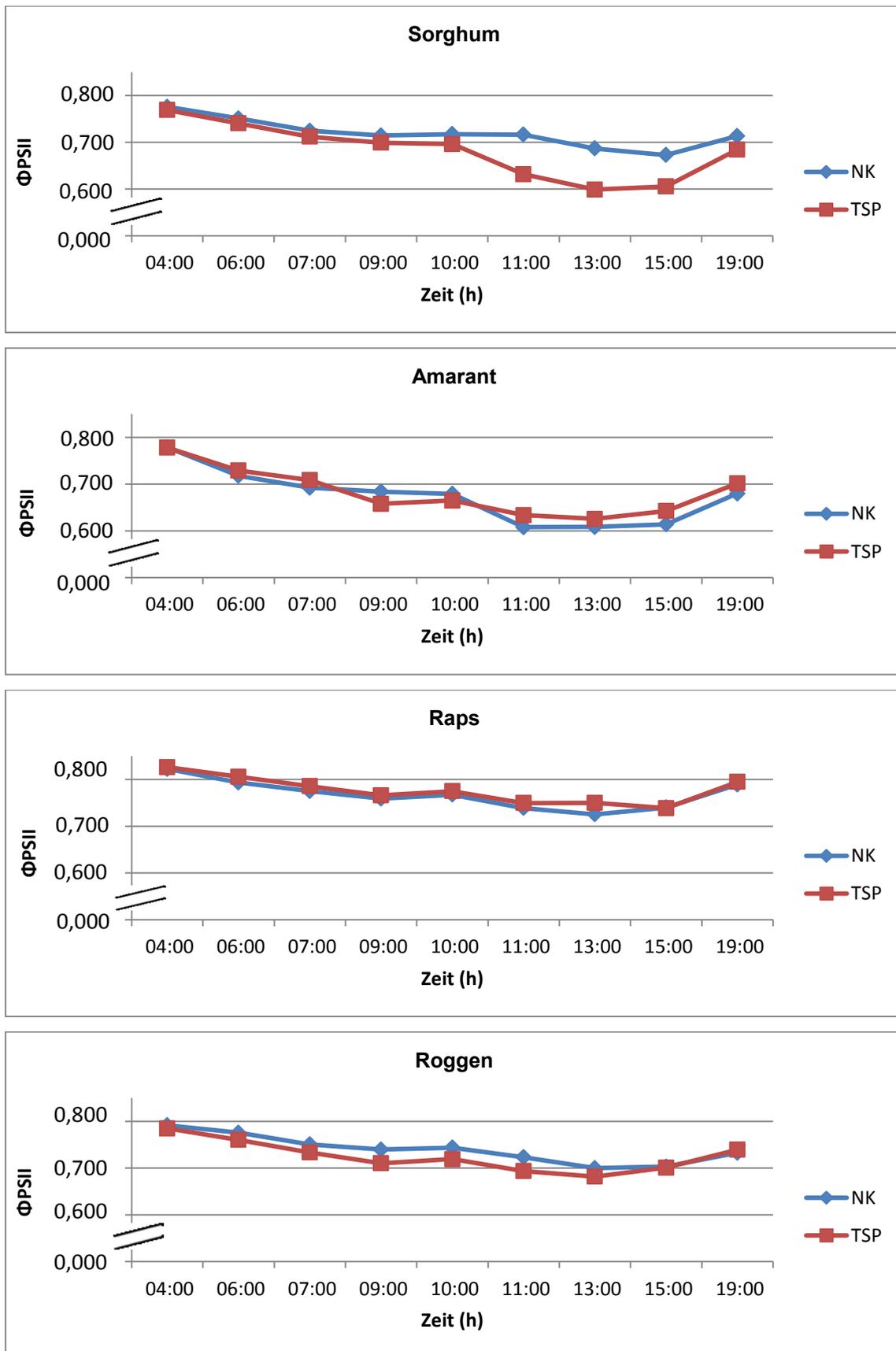
Düngung	WHK %	Sorghum	Amarant	Raps	Roggen
<b>ΦPSII</b>					
NK	60	0,688 a	0,669 a	0,755 a	0,717 a
	30	0,719 b	0,673 a	0,768 b	0,740 c
TSP	60	0,694 a	0,664 a	0,772 b	0,726 b
	30	0,682 a	0,683 a	0,777 b	0,725 ab
<b>Mittel</b>		<b>0,696 B</b>	<b>0,672 A</b>	<b>0,768 D</b>	<b>0,727 C</b>
<b>NPQ</b>					
NK	60	0,596 b	0,489 a	0,542 b	0,593 c
	30	0,488 a	0,520 a	0,444 a	0,382 a
TSP	60	0,569 ab	0,475 a	0,462 a	0,488 b
	30	0,631 b	0,434 a	0,431 a	0,446 ab
<b>Mittel</b>		<b>0,571 B</b>	<b>0,479 A</b>	<b>0,470 A</b>	<b>0,477 A</b>

NK = Kontrolle ohne P-Zufuhr; TSP = mineralische Düngung mit Tripel-Superphosphat 0,20 g Gefäß<sup>-1</sup>; ΦPSII = effektive Quantenausbeute des Photosystem II; NPQ = nicht-photochemisches Quenching; WHK = Wasserhaltekapazität; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ( $p \leq 0,05$  Duncan Test nach einfaktorieller ANOVA)

Tabelle 18: Einfluss von Wasser- und P-Zufuhr auf den prozentualen Abfall der maximalen zur minimalen effektiven Quantenausbeute im Tagesverlauf.

Düngung	WHK %	Sorghum	Amarant	Raps	Roggen
NK	60	18,6	26,4	19,0	15,6
	30	13,3	22,7	11,8	11,6
TSP	60	17,3	26,9	10,3	14,5
	30	22,1	19,6	10,6	13,1

NK = Kontrolle ohne P-Zufuhr; TSP = mineralische Düngung mit Tripel-Superphosphat 0,20 g Gefäß<sup>-1</sup>; WHK = Wasserhaltekapazität

Abbildung 4-7: Einfluss der P-Zufuhr auf die  $\Phi_{PSII}$  im Tagesverlauf unter Trockenstress.

NK = Kontrolle ohne P-Zufuhr; TSP = mineralische Düngung mit Tripel-Superphosphat  $0,20 \text{ g Gefäß}^{-1}$ ;  
 $\Phi_{PSII}$  = effektive Quantenausbeute des Photosystem II

### 5.2.3 Wirkung auf die chemischen Bodeneigenschaften

Die chemischen Bodeneigenschaften wurden signifikant durch die Faktoren Düngung und Fruchtart beeinflusst, zudem hatte auch der Faktor Wasser im Versuch B einen signifikanten Einfluss auf den Gesamt-P-Gehalt und die P-Sorptionseigenschaften im Boden (s. Tab. A-2 u. A-3).

Zum Versuchsende ergaben sich erhöhte  $P_t$ -Gehalte im Vergleich zur NK-Variante infolge der organischen und mineralischen P-Zufuhr (s. Tab. 19). Trotz höherer P-Aufnahmen in der TSP-Variante wurden hier im Vergleich der Düngungsstufen zum Versuchsende höhere  $P_w$ - und  $P_{dl}$ -Gehalte nachgewiesen. Der  $P_{ox}$ -Gehalt und der Grad der P-Sättigung erhöhten sich im Versuchsverlauf insbesondere nach Zufuhr von Ca-Phytat.

Tabelle 19: Veränderungen der P-Parameter  $\Delta P_w$ ,  $\Delta P_{dl}$ ,  $\Delta P_t$ ,  $\Delta P_{ox}$ ,  $\Delta DPS$  und  $\Delta PSC$  im Boden zum Versuchsende im Vergleich zum Versuchsbeginn, im Versuch B.

Düngung	$\Delta P_w$ (mg kg <sup>-1</sup> )	$\Delta P_{dl}$ (mg kg <sup>-1</sup> )	$\Delta P_t$ (mg kg <sup>-1</sup> )	$\Delta P_{ox}$ (mmol kg <sup>-1</sup> )	$\Delta DPS$ (%)	$\Delta PSC$ (mmol kg <sup>-1</sup> )
NK	-0,15	-5,19	-14,8	-0,96	-1,39	-1,95
PAC	0,04	-5,88	22,3	0,66	2,64	-1,15
TSP	1,91	0,29	20,0	0,29	1,25	-0,63

$P_w$  = wasserlöslicher P;  $P_{dl}$  = doppelaktatlöslicher P;  $P_t$  = P total;  $P_{ox}$  = oxalatlöslicher P; DPS = Grad der P-Sättigung; PSC = P-Sorptionskapazität; NK = Kontrolle ohne P; PAC = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; TSP = mineralische P-Zufuhr mit Tripel-Superphosphat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>

Der **pH-Wert** wurde hauptsächlich durch den Versuchsfaktor Fruchtart beeinflusst (s. Tab. A-2) und im Vergleich zum Ausgangswert abgesenkt. Wiederrum wurde zum Versuchsende der niedrigste pH-Wert nach Anbau von Amaranth analysiert (s. Tab. 20).

Die  $P_w$ - und  $P_{dl}$ -Gehalte wurden deutlich durch die mineralische P-Zufuhr beeinflusst. Die TSP-Zufuhr führte im Versuchsmittel zu einem Anstieg der  $P_w$ - (um 56 %) und  $P_{dl}$ -Gehalte (um 29 %) im Vergleich zur NK-Variante. Ein positiver Effekt der Ca-Phytat-Zufuhr auf die leicht pflanzenverfügbaren P-Pools im Boden konnte dagegen auf stark lehmigen Sand im Versuchsmittel nicht nachgewiesen werden. Nach Aufteilung der Daten nach Fruchtarten kam es lediglich bei Roggen (60 % WHK) und Sorghum (30 % WHK) zu einem Anstieg der  $P_w$ -Gehalte nach Zufuhr von Ca-Phytat im Vergleich zur NK-Variante.

Unter Trockenstress erhöhten sich die  $P_{dl}$ -Gehalte im Vergleich zur optimalen Bewässerung, was vermutlich eine Folge der geringeren P-Aufnahmen war. Zum Versuchsende konnten (wie im Versuch A) die höchsten  $P_w$ -Werte im Boden in beiden Wasservarianten nach Anbau von Amaranth nachgewiesen werden (s. Tab. 20).

Tabelle 20: Einfluss der Wasser- und P-Zufuhr sowie der Fruchtart auf den pH-Wert und die Gehalte an leicht pflanzenverfügbarem P im Boden, im Versuch B.

WHK %	Düngung	Sorghum	Amarant	Raps	Roggen
<b>pH</b> (CaCl <sub>2</sub> )					
60	NK	5,98 a	5,24 a	5,70 ab*	6,04 a*
	PAC	5,94 a	5,18 a*	5,65 a	5,98 a*
	TSP	5,88 a	5,22 a	5,78 b	5,93 a
<b>Mittel</b>		<b>5,93 C</b>	<b>5,21 A*</b>	<b>5,71 B*</b>	<b>5,98 C*</b>
30	NK	6,00 b	5,36 a	5,77 a	5,82 a
	PAC	5,90 a	5,31 a	5,75 a	5,77 a
	TSP	5,88 a	5,30 a	5,86 b	5,88 a
<b>Mittel</b>		<b>5,93 C</b>	<b>5,32 A</b>	<b>5,79 B</b>	<b>5,82 B</b>
<b>P<sub>w</sub></b> (mg kg <sup>-1</sup> )					
60	NK	3,54 a	4,01 a	3,85 a*	3,01 a
	PAC	3,87 a	4,08 a	3,82 a*	4,21 b
	TSP	5,30 b	6,03 b	5,68 b	5,21 b
<b>Mittel</b>		<b>4,24 A</b>	<b>4,71 B*</b>	<b>4,45 AB*</b>	<b>4,14 A*</b>
30	NK	3,33 a	4,61 a	3,18 a	3,89 a
	PAC	3,88 b	4,19 a	3,28 a	3,60 a
	TSP	5,77 c	6,47 b	5,66 b	5,69 b
<b>Mittel</b>		<b>4,33 A</b>	<b>5,09 B</b>	<b>4,04 A</b>	<b>4,39 A</b>
<b>P<sub>dl</sub></b> (mg kg <sup>-1</sup> )					
60	NK	19,6 a	15,4 a*	16,4 a	19,5 a
	PAC	18,3 a	16,7 a	15,2 a*	18,0 a*
	TSP	24,5 b*	23,1 b*	23,8 b	18,6 a*
<b>Mittel</b>		<b>20,8 B*</b>	<b>18,4 A*</b>	<b>18,5 A*</b>	<b>18,7 A*</b>
30	NK	23,2 a	20,3 b	16,5 a	20,4 a
	PAC	21,9 a	17,5 a	17,3 a	20,9 a
	TSP	29,0 b	27,5 c	26,9 b	21,7 a
<b>Mittel</b>		<b>24,7 B</b>	<b>21,8 A</b>	<b>20,2 A</b>	<b>21,0 A</b>

$P_w$  = wasserlöslicher P;  $P_{dl}$  = doppellaktatlöslicher P; NK = Kontrolle ohne P; PAC = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; TSP = mineralische P-Zufuhr mit Tripel-Superphosphat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtarten; \* kennzeichnet signifikante Unterschiede zwischen den Wasservarianten ( $p \leq 0,05$  Duncan Test nach zweifaktorieller ANOVA)

Der **P<sub>t</sub>-Gehalt** des Bodens war im Vergleich zur NK-Variante nach organischer und mineralischer Düngung im Versuchsmittel gleichermaßen um ca. 7 % erhöht. Nach Anbau von Sorghum und Amarant erhöhten sich die P<sub>t</sub>-Gehalte nach P-Zufuhr in der Trockenstressvariante. Für Sorghum wurde zudem (wie bereits in Versuch A) im Vergleich der Fruchtarten die höchsten P<sub>t</sub>-Gehalte in beiden Wasserstufen nachgewiesen (s. Tab. 21).

Sowohl die organische als auch die mineralische P-Zufuhr erhöhten den P<sub>ox</sub>-Gehalt und den DPS im Vergleich zur NK-Variante bei allen untersuchten Fruchtarten in beiden Wasserstufen (s. Tab. 21). Die Zufuhr von Ca-Phytat bewirkte im Versuchsmittel einen Anstieg der P<sub>ox</sub>-Gehalte des Bodens um 22,3 % sowie einen Anstieg im Grad der P-Sättigung (DPS) um 19,2 % im Vergleich zur NK-Variante. Wohingegen es nach mineralischer P-Zufuhr zu einem geringeren Anstieg kam (P<sub>ox</sub>-Gehalte: 17,4 %, DPS: 12,5 %).

Im Versuchsmittel kam es auch zu einem geringen signifikantem Anstieg der **PSC** nach Zufuhr von Ca-Phytat (2,43 %) und TSP (3,77 %) (s. Tab. A-3). Dies wird insbesondere nach Anbau von Raps deutlich (s. Tab. 21).

Im Gegensatz zu den Gefäßversuchen auf dem schwach lehmigen Sand erhöhten sich die P<sub>ox</sub>-Gehalte wie auch der Grad der P-Sättigung auf stark lehmigen Sand infolge von Trockenstress im Vergleich zur optimalen Bewässerung signifikant bei allen Fruchtarten (s. Tab. 21). Dies traf im Versuchsmittel auch auf den P<sub>t</sub>-Gehalt im Boden zu (s. Tab. 21 u. A-3).

Tabelle 21: Einfluss der Wasser- und P-Zufuhr sowie der Fruchtart auf den Gesamt-P-Gehalt und die P-Sorptionseigenschaften im Boden, im Versuch B.

WHK %	Düngung	Sorghum	Amarant	Raps	Roggen
<b>P<sub>t</sub></b> (mg kg <sup>-1</sup> )					
60	NK	536 a	505 a	525 a	532 a
	PAC	561 a	547 a*	527 a	560 a
	TSP	568 a*	548 a	539 a	553 a
<b>Mittel</b>		<b>555 B*</b>	<b>533 A</b>	<b>530 A</b>	<b>548 AB</b>
30	NK	536 a	510 a	515 a	522 a
	PAC	595 b	571 b	546 a	573 a
	TSP	619 b	552 b	520 a	563 a
<b>Mittel</b>		<b>583 C</b>	<b>544 AB</b>	<b>527 A</b>	<b>553 B</b>
<b>P<sub>ox</sub></b> (mmol kg <sup>-1</sup> )					
60	NK	7,10 a	7,12 a*	7,00 a*	7,32 a
	PAC	8,41 b	8,96 b	8,27 b	9,05 c*
	TSP	8,11 b*	7,72 b*	8,31 b	8,30 b*
<b>Mittel</b>		<b>7,87 A*</b>	<b>7,93 A*</b>	<b>7,86 A*</b>	<b>8,22 B*</b>
30	NK	7,16 a	7,56 a	7,27 a	7,60 a
	PAC	8,60 b	9,13 c	8,76 b	9,89 c
	TSP	9,40 c	8,31 b	8,89 b	9,08 b
<b>Mittel</b>		<b>8,39 A</b>	<b>8,33 A</b>	<b>8,31 A</b>	<b>8,86 B</b>
<b>DPS</b> (%)					
60	NK	21,0 a	20,0 a	21,3 a*	20,0 a
	PAC	23,5 b	26,2 c	23,5 b*	23,2 b*
	TSP	22,2 ab*	22,6 b	23,2 b	22,1 b
<b>Mittel</b>		<b>22,2 AB*</b>	<b>22,9 C*</b>	<b>22,7 BC*</b>	<b>21,8 A*</b>
30	NK	21,1 a	20,9 a	22,1 a	20,1 a
	PAC	25,1 b	26,5 c	24,3 b	26,4 c
	TSP	24,5 b	24,5 b	25,2 b	23,3 b
<b>Mittel</b>		<b>23,6 A</b>	<b>24,0 A</b>	<b>23,9 A</b>	<b>23,3 A</b>
<b>PSC</b> (mmol kg <sup>-1</sup> )					
60	NK	33,9 a	35,5 a	32,9 a	36,7 a
	PAC	35,8 a	34,2 a	35,2 b	39,1 a
	TSP	36,6 a	34,1 a	35,8 b	37,5 a
<b>Mittel</b>		<b>35,4 A</b>	<b>34,6 A</b>	<b>34,6 A</b>	<b>37,8 B</b>
30	NK	34,0 a	36,2 a	33,0 a	37,8 a
	PAC	34,3 a	34,4 a	36,1 b	37,5 a
	TSP	38,4 b	34,0 a	35,3 b	39,0 a
<b>Mittel</b>		<b>35,6 A</b>	<b>34,9 A</b>	<b>34,8 A</b>	<b>38,1 B</b>

P<sub>t</sub> = P total; P<sub>ox</sub> = oxalatlöslicher P; DPS = Grad der P-Sättigung; PSC = P-Sorptionskapazität; NK = Kontrolle ohne P; PAC = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; TSP = mineralische P-Zufuhr mit Tripel-Superphosphat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtarten; \* kennzeichnet signifikante Unterschiede zwischen den Wasservarianten (p≤0,05 Duncan Test nach zweifaktorieller ANOVA)

#### 5.2.4 Aktivität der Enzyme des P-Kreislaufes im Boden

Die Aktivität der untersuchten Enzyme im Boden unterschied sich auch im Versuch B in Abhängigkeit von der Wasser und P-Zufuhr sowie von der angebauten Fruchtart. Wechselwirkungen wurden insbesondere zwischen Fruchtart und Düngung nachgewiesen (s. Tab. A-4).

Im Versuch B wurde im Versuchsmittel nach Zufuhr von Ca-Phytat (10,3 %) und unter P-Defizit in der NK-Variante (19,7 %) eine erhöhte **AcP-Aktivität** im Vergleich zur mineralischen P-Zufuhr festgestellt.

Nach Anbau von Sorghum reduzierte sich die AcP-Aktivität unter Trockenstress im Vergleich zur optimal bewässerten Variante. Für die anderen Fruchtarten konnte dagegen kein Einfluss der Wasserzufuhr nachgewiesen werden. Roggen zeigte die höchste AcP-Aktivität im Vergleich der Fruchtarten, diese unterschied sich nicht in Abhängigkeit von der Düngungsvariante (s. Tab. 22).

Die **AIP-Aktivität** war im Versuch B um das ca. 3fache höher als in beiden Versuchen auf schwach lehmigem Sand (Versuch A u. C). Im Versuchsmittel zeigte sich (wie bereits bei der AcP festgestellt) eine höhere AIP-Aktivität nach Zufuhr von Ca-Phytat (6,54 %) und in der NK-Variante (14,4 %) im Vergleich zur mineralischen P-Zufuhr. Nach Aufteilung der Daten nach Fruchtarten bestätigte sich dieses Ergebnis nur für Roggen in der NK-Variante.

Unter Trockenstress kam es bei Roggen zur Verringerung der AIP-Aktivität im Vergleich zur optimalen Bewässerung. Die höchste AIP-Aktivität im Vergleich der Fruchtarten wurde (wie im Versuch A) für Sorghum und Roggen nachgewiesen (s. Tab. 22).

Die **DH-Aktivität** war im Versuch B um das 4 bzw. 6fache höher als in beiden anderen Versuchen. Insgesamt konnte eine hohe DH-Aktivität in der NK-Variante festgestellt werden.

Trockenstress führte (im Gegensatz zu beiden anderen Versuchen) zu einem Rückgang der DH-Aktivität nach Anbau von Sorghum, Raps und Roggen sowie tendenziell auch für Amaranth. Die höchste DH-Aktivität im Boden konnte (wie im Versuch A) nach Anbau von Sorghum und Roggen nachgewiesen werden (s. Tab. 22).

Tabelle 22: Einfluss der Wasser- und P-Zufuhr sowie der Fruchtart auf die Aktivität der Phosphatasen und der Dehydrogenase, im Versuch B.

WHK %	Düngung	Sorghum	Amarant	Raps	Roggen
<b>AcP</b> (mg p-Nitrophenol kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )					
60	NK	163 b	222 c	132 b*	270 a
	PAC	176 b*	193 b	113 ab	241 a
	TSP	131 a	161 a	85,3 a*	248 a
<b>Mittel</b>		<b>157 B*</b>	<b>192 C</b>	<b>110 A</b>	<b>253 D</b>
30	NK	126 a	215 b	117 b	264 a
	PAC	137 b	185 a	105 a	241 a
	TSP	118 a	170 a	107 a	240 a
<b>Mittel</b>		<b>127 B</b>	<b>190 C</b>	<b>110 A</b>	<b>248 D</b>
<b>AIP</b> (mg p-Nitrophenol kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )					
60	NK	44,7 a	22,2 a	39,7 a*	74,4 b
	PAC	48,9 a	20,8 a	37,5 a	57,0 a
	TSP	41,6 a	17,8 a	37,8 a	58,2 a
<b>Mittel</b>		<b>45,1 C</b>	<b>20,3 A</b>	<b>38,3 B</b>	<b>63,2 D*</b>
30	NK	42,2 a	23,3 a	34,0 a	69,3 b
	PAC	47,1 a	23,7 a	37,0 a	53,9 a
	TSP	43,1 a	18,1 a	36,2 a	52,5 a
<b>Mittel</b>		<b>44,1 C</b>	<b>21,7 A</b>	<b>35,7 B</b>	<b>58,5 D</b>
<b>DH</b> (µg TPF g <sup>-1</sup> TS h <sup>-1</sup> )					
60	NK	111 a	73,8 b	93,2 c*	103 a
	PAC	109 a*	49,2 a	75,9 b*	102 a*
	TSP	95,1 a*	71,4 b	66,3 a	88,6 a
<b>Mittel</b>		<b>105 C*</b>	<b>64,8 A</b>	<b>78,5 B*</b>	<b>97,9 C*</b>
30	NK	102 b	66,3 c	67,1 a	73,9 a
	PAC	77,4 a	55,1 a	64,0 a	84,9 a
	TSP	71,6 a	59,4 b	63,2 a	74,3 a
<b>Mittel</b>		<b>83,7 C</b>	<b>60,3 A</b>	<b>64,8 A</b>	<b>77,7 B</b>

AcP = saure Phosphatase; AIP = alkalische Phosphatase; DH = Dehydrogenase-Aktivität; NK = Kontrolle ohne P; PAC = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; TSP = mineralische P-Zufuhr mit Tripel-Superphosphat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; WHK = Wasserhaltekapazität; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtarten; \* kennzeichnet signifikante Unterschiede zwischen den Wasservarianten (p≤0,05 Duncan Test nach zweifaktorieller ANOVA)

### 5.3 Wirkung von permanentem und periodischem Trockenstress auf die P-Nutzung von Sorghum und Amarant in Abhängigkeit von der P-Quelle

Im Gefäßversuch C wurde neben der Auswirkung von permanentem Trockenstress (30 % WHK) im Vergleich zur optimalen Bewässerung auch der Effekt eines periodischen Trockenstress in Abhängigkeit von der Fruchtart und der P-Quelle untersucht.

Die P-Zufuhr erfolgte zur Validierung der Ergebnisse in zwei Düngungsstufen mit Ca-Phytat (PAC: 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>, PACII: 0,40 g P Gefäß<sup>-1</sup>). Zum Vergleich wurden eine Variante mit mineralischer P-Zufuhr (TSP: 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>) sowie eine NK-Variante ohne P-Zufuhr angelegt

#### 5.3.1 Wirkung auf die Pflanzenparameter

Die Pflanzenparameter wurden im Gefäßversuch C ebenfalls hoch signifikant durch die Versuchsfaktoren beeinflusst, zudem traten Wechselwirkungen zwischen den Prüffaktoren auf (s. Tab. A-1).

Der **Ertrag** wurde im Versuch C deutlich durch die Wasserzufuhr ( $\eta^2$  0,948) als auch durch die P-Zufuhr ( $\eta^2$  0,797) beeinflusst (s. Tab. A-1). Im Versuchsmittel erhöhte sich der Ertrag nach Zufuhr von Ca-Phytat sowie nach mineralischer P-Zufuhr im Vergleich zur NK-Variante (PAC: 4,32 %; PACII: 16,3 %; TSP: 14,0 %).

Für Sorghum konnte ein Anstieg der Erträge nach Zufuhr von PACII und TSP im Vergleich zur NK-Variante in allen Wasserstufen nachgewiesen werden. Dagegen wirkte sich die Zufuhr von Ca-Phytat in einfacher Applikationsmenge (PAC) nur unter optimaler Wasserzufuhr ertragsfördernd aus. Die Ertragswirkung von Ca-Phytat war hier jedoch vergleichbar hoch wie die Wirkung der mineralischen P-Zufuhr (s. Tab. 24).

Für Amarant wurde unter optimaler Bewässerung sowie unter permanentem Trockenstress keine Ertragssteigerung nach Zufuhr von organischem und mineralischem P im Vergleich zur NK-Variante festgestellt. Unter periodisch induziertem Trockenstress (PS) stieg der Ertrag dagegen infolge der P-Zufuhr deutlich an (s. Tab. 24).

Permanenter und periodischer Trockenstress reduzierten die Erträge beider Fruchtarten in allen Düngungsvarianten im Vergleich zur optimalen Bewässerung. Dabei war der Ertragsrückgang bei Sorghum unter permanentem Trockenstress im Vergleich zur optimalen Bewässerung stärker ausgeprägt als bei Amaranth (Sorghum 37,1 % vs. Amaranth 18,6 %). Wohingegen der Ertragsrückgang unter periodischen Trockenstress vergleichbar hoch war (Sorghum 17,6 % vs. Amaranth 15,1 %) (s. Tab. 24).

Der prozentuale Rückgang des Ertrages infolge des permanenten Trockenstress (30 % WHK) wurde bei Sorghum nach Zufuhr von Ca-Phytat im Vergleich zur NK-Variante nicht verringert. Wohingegen die mineralische P-Zufuhr eine positive Wirkung hatte und den Ertragsrückgang minderte. Für Amaranth zeigten sich (wie auch hinsichtlich der Ertragssteigerung) keine Effekte

Tabelle 23: Prozentualer Rückgang des Ertrages und der P-Aufnahme unter permanentem und periodischem Trockenstress im Vergleich zur optimalen Bewässerung, im Versuch C.

	Fruchtart	Düngung	30 % WHK	PS
<b>TM-Ertrag</b>	<b>Sorghum</b>	NK	36,6 b	21,5 b
		PAC	44,7 c	29,7 c
		PACII	37,7 b	9,23 a
		TSP	29,3 a	11,2 a
	<b>Amarant</b>	NK	18,6 a	25,2 b
		PAC	19,0 a	22,3 b
		PACII	17,3 a	5,36 a
		TSP	18,7 a	6,59 a
<b>P-Aufnahme</b>	<b>Sorghum</b>	NK	42,3 a	16,5 a
		PAC	49,3 a	18,6 a
		PACII	54,8 a	16,2 a
		TSP	51,1 a	13,3 a
	<b>Amarant</b>	NK	23,2 a	9,76 bc
		PAC	27,3 a	13,4 c
		PACII	21,9 a	- 4,81 a
		TSP	23,3 a	0,00 ab

NK = Kontrolle ohne P; PAC = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; PAC II = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,40 g P Gefäß<sup>-1</sup>; TSP = mineralische P-Zufuhr mit Tripel-Superphosphat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; PS = periodischer Stress; TM = Trockenmasse; WHK = Wasserhaltekapazität; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten innerhalb einer Wasservariante

der P-Zufuhr auf den prozentualen Ertragsrückgang im Vergleich zur NK-Variante nach permanentem Trockenstress (s. Tab. 23).

Unter periodischem Trockenstress (PS) war dagegen eine Minderung des prozentualen Ertragsrückgangs infolge der P-Zufuhr (PACII, TSP) für beide Fruchtarten nachweisbar. Zudem zeigte sich in diesen Varianten auch ein positiver Effekt auf die P-Aufnahme von Amarant (s. Tab. 23).

Auch die **P-Aufnahme** wurde durch Wasser- und P-Zufuhr ( $\text{Eta}^2$  0,807 vs. 0,797) beeinflusst (s. Tab. A-1).

Die Zufuhr von Ca-Phytat, wie auch die mineralische P-Zufuhr erhöhten die P-Aufnahmen im Vergleich zur NK-Variante (Versuchsmittel: PAC: 13,5 %; PACII: 24,1 %; TSP: 35,7 %). Für beide Fruchtarten konnte ein Anstieg der P-Aufnahme nach Zufuhr von PACII und TSP im Vergleich zur NK-Variante in allen Wasserstufen nachgewiesen werden. Für Amarant zeigte sich unter optimaler Bewässerung auch ein Anstieg der P-Aufnahme nach PAC-Zufuhr (s. Tab. 24).

Unter Trockenstress reduzierte Sorghum die P-Aufnahme (wie auch den Ertrag) im Vergleich zur optimalen Bewässerung stärker als Amarant (30 % WHK: Sorghum 49,9 % vs. Amarant 24,3 %; PS: Sorghum 15,9 % vs. Amarant 4,24 %) (s. Tab. 24).

Auch im Versuch C konnte für Amarant (wie in den Versuchen A und B) eine hohe P-Aufnahme nachgewiesen werden. Diese war durchschnittlich um das 3fache höher als die P-Aufnahme von Sorghum. Zudem hatte Amarant unter Trockenstress eine höhere P-Ausnutzung als Sorghum. Beide Fruchtarten konnten den mit TSP applizierten P deutlich besser ausnutzen als den mit Ca-Phytat zugeführten P (s. Abb. 8).

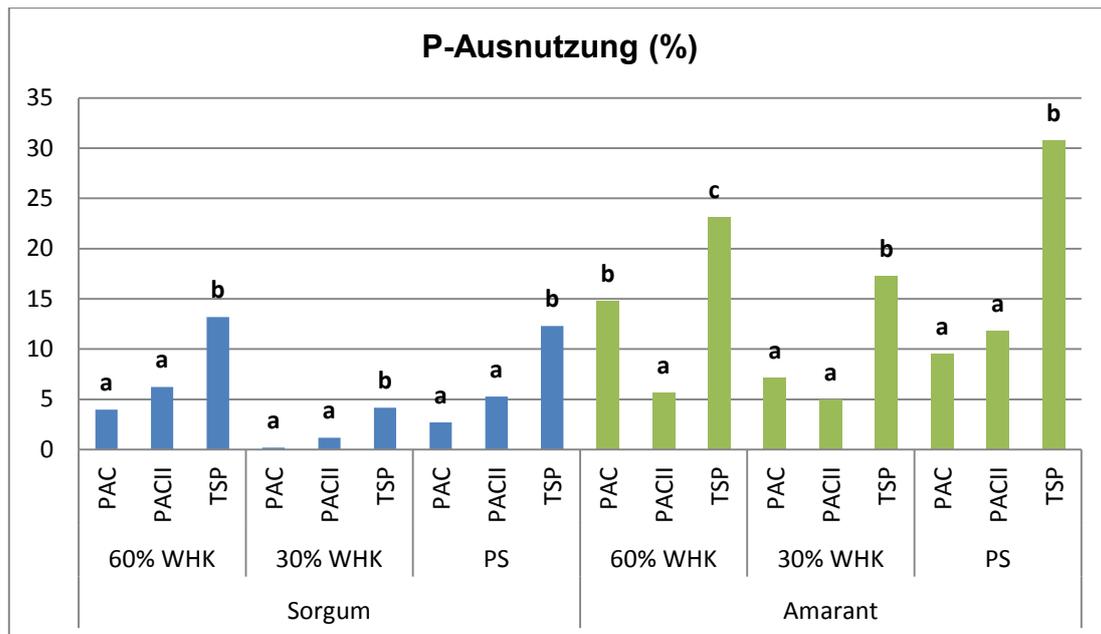


Abbildung 8: P-Ausnutzung von Sorghum und Amaranth, im Versuch C.

unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten innerhalb einer Wasserstufe

Die P-Zufuhr erhöhte die **WNE** im Vergleich zur NK-Variante, wobei auch hier die TSP-Zufuhr den höchsten Effekt hatte (Versuchsmittel: PAC: 10,7 %; PACII: 25,6 %; TSP: 29,0 %). Die positive Wirkung der P-Zufuhr auf die WNE konnte für beiden Fruchtarten in allen Wasservarianten belegt werden (s. Tab. 24).

Infolge des permanenten Trockenstresses verringerte sich die WNE bei Sorghum im Vergleich zur optimalen Bewässerung, wohingegen es bei Amaranth (insbesondere nach Zufuhr von Ca-Phytat) zu einem Anstieg kam. Unter periodischem Trockenstress erhöhte sich die WNE beider Fruchtarten im Vergleich zur optimal bewässerten Variante nach TSP-Zufuhr (s. Tab. 24).

Tabelle 24: Einfluss der Wasser- und P-Zufuhr auf den TM-Ertrag, die P-Aufnahme und die Wassernutzungseffizienz, im Versuch C.

Fruchtart	Düngung	60 % WHK	30 % WHK	PS
		<b>TM-Ertrag</b> (g Gefäß <sup>-1</sup> )		
<b>Sorghum</b>	NK	34,4 a C	21,8 a A	27,0 a B
	PAC	38,0 bc C	21,0 a A	26,7 a A
	PAC II	40,1 c C	25,0 b A	36,4 c A
	TSP	37,6 b C	26,6 b A	33,4 b A
	<b>Mittel</b>	<b>37,5 C</b>	<b>23,6 A</b>	<b>30,9 B</b>
<b>Amarant</b>	NK	38,1 a C	31,0 a B	28,5 a A
	PAC	39,9 a C	32,2 a A	31,0 b A
	PAC II	39,2 a C	32,4 a A	37,1 c B
	TSP	39,5 a C	32,1 a A	36,9 c B
	<b>Mittel</b>	<b>39,2 C</b>	<b>31,9 A</b>	<b>33,3 B</b>
		<b>P-Aufnahme</b> (mg Gefäß <sup>-1</sup> )		
<b>Sorghum</b>	NK	52,7 a B	30,4 a A	44,0 a B
	PAC	60,7 a C	30,8 a A	49,4 a B
	PAC II	77,7 b C	35,1 ab A	65,1 b B
	TSP	79,1 b C	38,7 b A	68,6 b B
	<b>Mittel</b>	<b>67,5 C</b>	<b>33,8 A</b>	<b>56,8 B</b>
<b>Amarant</b>	NK	164 a C	126 a A	148 a B
	PAC	194 b C	141 ab A	168 a B
	PAC II	187 b B	146 bc A	196 b B
	TSP	210 c B	161 c A	210 b B
	<b>Mittel</b>	<b>189 B</b>	<b>143 A</b>	<b>181 B</b>
		<b>WNE</b> (g l <sup>-1</sup> )		
<b>Sorghum</b>	NK	2,90 a B	2,63 a A	2,98 a B
	PAC	3,46 b B	2,93 b A	3,04 a A
	PAC II	4,04 d B	2,97 b A	3,84 b B
	TSP	3,67 c A	3,77 c A	4,02 b B
	<b>Mittel</b>	<b>3,52 B</b>	<b>3,08 A</b>	<b>3,47 B</b>
<b>Amarant</b>	NK	3,17 a B	3,26 a B	2,90 a A
	PAC	3,30 b A	3,75 b B	3,23 b A
	PAC II	3,67 c A	4,07 c B	3,81 c A
	TSP	3,65 c A	3,80 b A	4,08 d B
	<b>Mittel</b>	<b>3,45 A</b>	<b>3,72 B</b>	<b>3,51 A</b>

NK = Kontrolle ohne P; PAC = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; PAC II = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,40 g P Gefäß<sup>-1</sup>; TSP = mineralische P-Zufuhr mit Tripel-Superphosphat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; PS = periodischer Stress; TM = Trockenmasse; WNE = Wassernutzungseffizienz; WHK = Wasserhaltekapazität; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Wasservarianten ( $p \leq 0,05$  Duncan Test nach zweifaktorieller ANOVA)

Im Versuch C lag, neben dem Einfluss der Wasserzufuhr und der Fruchtart, auch ein signifikanter Effekt der P-Düngung auf die **Prolin-Konzentration** vor (s. Tab. A-1).

Wie auch in den Versuchen A und B wurden für beide untersuchten C<sub>4</sub>-Fruchtarten geringe Prolin-Gehalte gemessen. Bei Sorghum stieg die Prolin-Konzentration unter permanentem Trockenstress im Vergleich zur optimalen Bewässerung an, in dieser Variante ergab sich zudem ein Anstieg der Prolin-Konzentration nach P-Zufuhr im Vergleich zur NK-Variante. Dagegen reagierte Amarant nur nach TSP-Zufuhr mit einer erhöhten Prolin-Akkumulation (s. Tab. 25).

Tabelle 25: Einfluss der Wasser- und P-Zufuhr auf die Prolin-Konzentration ( $\mu\text{mol g}^{-1}$  TM), im Versuch C.

	Düngung	60 % WHK	30 % WHK	PS
<b>Sorghum</b>	NK	1,35 a	1,42 a	1,38 a
	PAC	1,48 a	2,13 b	1,72 a
	PAC II	1,80 a	1,87 b	1,84 a
	TSP	2,28 a	2,69 c	2,26 a
	<b>Mittel</b>	<b>1,73 A</b>	<b>2,03 B</b>	<b>1,80 AB</b>
<b>Amarant</b>	NK	1,34 a	1,37 a	1,37 a
	PAC	1,06 a	1,26 a	1,26 a
	PAC II	1,33 a	1,35 a	1,49 a
	TSP	1,43 a	1,86 b	1,60 a
	<b>Mittel</b>	<b>1,29 A</b>	<b>1,46 A</b>	<b>1,43 A</b>

NK = Kontrolle ohne P; PAC = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; PAC II = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,40 g P Gefäß<sup>-1</sup>; TSP = mineralische P-Zufuhr mit Tripel-Superphosphat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; PS = periodischer Trockenstress; WHK = Wasserhaltekapazität; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Wasservarianten ( $p \leq 0,05$  Duncan Test nach zweifaktorieller ANOVA)

### 5.3.2 Wirkung auf die chemischen Bodeneigenschaften

Im Versuch C wurden insbesondere die leicht pflanzenverfügbaren P-Pools des Bodens durch die Prüffaktoren beeinflusst. Der Faktor Wasser hatte (wie im Versuch A auf schwach lehmigem Sand) keinen Einfluss auf den Gesamt-P-Gehalt und die P-Sorptionseigenschaften im Boden (s. Tab. A-2, A-3).

Zum Versuchsende ergaben sich insbesondere infolge der Zufuhr von Ca-Phytat erhöhte  $P_t$ -Gehalte sowie ein höherer Grad der P-Sättigung im Boden im Vergleich zum Versuchsbeginn. Die  $P_w$ - und  $P_{dl}$ -Gehalte waren auch im Versuch C trotz hoher Pflanzenaufnahme in der mineralischen Variante am wenigsten vermindert (s. Tab. 26).

Tabelle 26: Veränderungen der P-Parameter  $\Delta P_w$ ,  $\Delta P_{dl}$ ,  $\Delta P_t$ ,  $\Delta P_{ox}$ ,  $\Delta DPS$  und  $\Delta PSC$  im Boden zum Versuchsende im Vergleich zum Versuchsbeginn, im Versuch C.

Düngung	$\Delta P_w$ (mg kg <sup>-1</sup> )	$\Delta P_{dl}$ (mg kg <sup>-1</sup> )	$\Delta P_t$ (mg kg <sup>-1</sup> )	$\Delta P_{ox}$ (mmol kg <sup>-1</sup> )	$\Delta DPS$ (%)	$\Delta PSC$ (mmol kg <sup>-1</sup> )
NK	-3,03	-8,13	2,50	-0,20	0,40	-0,70
PAC	-1,83	-8,07	63,0	0,80	4,00	-0,60
PAC II	-1,23	-5,45	95,0	1,40	5,50	-0,30
TSP	-0,13	2,47	48,5	0,80	1,50	0,70

$P_w$  = wasserlöslicher P;  $P_{dl}$  = doppelaktatlöslicher P;  $P_t$  = P total;  $P_{ox}$  = oxalatlöslicher P; DPS = Grad der P-Sättigung; PSC = P-Sorptionskapazität; NK = Kontrolle ohne P; PAC = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,20 g Gefäß<sup>-1</sup>; PACII = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,40 g Gefäß<sup>-1</sup>; TSP = mineralische P-Zufuhr mit Tripel-Superphosphat 0,20 g Gefäß<sup>-1</sup>

Der **pH-Wert** wurde wiederum hauptsächlich durch die angebaute Fruchtart beeinflusst und im Versuchsverlauf abgesenkt und war zum Versuchsende nach Abbau von Amarant geringer als nach Anbau von Sorghum (s. Tab. 27).

Die P-Zufuhr führte im Versuchsmittel zu einer Erhöhung der  $P_w$ -Werte im Vergleich zur NK-Variante. Der höchste Anstieg konnte nach TSP-Zufuhr ermittelt werden (PAC: 18,8 %; PACII: 28,1 %; TSP: 45,3 %). Die  $P_{dl}$ -Gehalte erhöhten sich im Versuchsmittel im Vergleich zur NK-Variante in der PACII- (7,63 %) und der TSP-Variante (20,9 %) signifikant. Dies bestätigte sich nach Aufteilung der Daten auch in den einzelnen Wasserstufen (s. Tab. 27).

Tabelle 27: Einfluss der Wasser- und P-Zufuhr sowie der Fruchtart auf den pH-Wert und die Gehalte an leicht pflanzenverfügbaren P im Boden, im Versuch C.

	Düngung	60 % WHK	30 % WHK	PS
<b>pH</b> (CaCl <sub>2</sub> )				
<b>Sorghum</b>	NK	5,57 a A	5,49 b A	5,64 a A
	PAC	5,52 a A	5,49 b A	5,52 a A
	PAC II	5,47 a A	5,37 a A	5,44 a A
	TSP	5,42 a A	5,48 b A	5,48 a A
	<b>Mittel</b>	<b>5,50 A</b>	<b>5,46 A</b>	<b>5,52 A</b>
<b>Amarant</b>	NK	4,99 a A	5,02 a A	5,12 b B
	PAC	5,10 a A	5,06 a A	5,12 b A
	PAC II	5,03 a A	5,08 a A	5,07 b A
	TSP	5,02 a A	5,08 a A	4,99 a A
	<b>Mittel</b>	<b>5,04 A</b>	<b>5,06 AB</b>	<b>5,08 B</b>
<b>P<sub>w</sub></b> (mg kg <sup>-1</sup> )				
<b>Sorghum</b>	NK	7,33 a B	6,43 a A	7,18 a B
	PAC	7,72 a A	7,51 a A	8,73 b B
	PAC II	9,11 b A	8,10 ab A	8,09 ab A
	TSP	10,5 c A	9,42 b A	10,1 c A
	<b>Mittel</b>	<b>8,66 B</b>	<b>7,87 A</b>	<b>8,51 B</b>
<b>Amarant</b>	NK	6,05 a A	5,31 a A	6,04 a A
	PAC	6,71 a A	7,54 b B	7,64 b B
	PAC II	8,43 b A	7,79 b A	7,42 b A
	TSP	9,04 b A	8,81 c A	8,04 b A
	<b>Mittel</b>	<b>7,56 A</b>	<b>7,36 A</b>	<b>7,29 A</b>
<b>P<sub>dl</sub></b> (mg kg <sup>-1</sup> )				
<b>Sorghum</b>	NK	35,8 a A	36,0 a A	39,2 a A
	PAC	37,5 a A	38,9 ab B	39,6 a B
	PAC II	36,7 a A	43,2 b B	44,5 b B
	TSP	52,8 b A	56,6 c A	53,2 c A
	<b>Mittel</b>	<b>40,7 A</b>	<b>43,7 B</b>	<b>44,1 B</b>
<b>Amarant</b>	NK	34,4 b A	35,3 ab A	31,5 a A
	PAC	29,7 a A	33,0 a B	33,9 a B
	PAC II	34,5 b B	37,2 b C	32,2 a A
	TSP	34,8 b A	40,1 c A	38,3 b A
	<b>Mittel</b>	<b>33,4 A</b>	<b>36,4 B</b>	<b>34,0 A</b>

P<sub>w</sub> = wasserlöslicher P; P<sub>dl</sub> = doppellaktatlöslicher P; NK = Kontrolle ohne P; PAC = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; PAC II = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,40 g P Gefäß<sup>-1</sup>; TSP = mineralische P-Zufuhr mit Tripel-Superphosphat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; PS = periodischer Stress; WHK = Wasserhaltekapazität; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Wasservarianten (p≤0,05 Duncan Test nach zweifaktorieller ANOVA)

Der Trockenstress wirkte sich auf die leicht pflanzenverfügbaren P-Fractionen des Bodens aus. Unter permanentem Trockenstress reduzierten sich die  $P_w$ -Gehalte bei Sorghum im Vergleich zu den beiden anderen Wasserstufen. Nach Anbau von Amarant kam es dagegen infolge des Trockenstressses nicht zu einer Verminderung der  $P_w$ -Gehalte im Boden. Die  $P_{dl}$ -Gehalte stiegen unter permanentem Trockenstress bei beiden Fruchtarten im Vergleich zur optimalen Bewässerung an. Dies ließ sich für Sorghum auch unter periodischem Stress nachweisen (s. Tab. 27).

Der Gesamt-P-Gehalt ( $P_t$ ) des Bodens war infolge der P-Zufuhr erhöht. Dabei wirkte sich die PACII-Variante im Vergleich zur NK-Variante im Versuchsmittel am deutlichsten auf den  $P_t$ -Gehalt aus (PAC: 10,9 %; PACII: 16,8 %, TSP: 8,39 %). Die höchsten  $P_t$ -Gehalte wurden auch im Versuch C nach Anbau von Sorghum gemessen (s. Tab. 28).

Auf die  $P_{ox}$ -Gehalte im Boden wirkte sich die PACII-Zufuhr im Versuchsmittel mit einem Anstieg um 11,6 % im Vergleich zur NK-Variante aus. Der Anstieg nach Zufuhr von PAC und TSP lag bei jeweils 7,25 %.

Der Grad der P-Sättigung war bei beiden Fruchtarten nach Zufuhr mit Ca-Phytat stärker erhöht als nach mineralischer P-Zufuhr. Die höchste PSC konnte nach Anbau von Sorghum in der TSP-Variante nachgewiesen werden.

Die Wasserezufuhr hatte keinen Einfluss auf den Gesamt-P-Gehalt und die P-Sorptionsparameter des Bodens (s. Tab. A-3).

Tabelle 28: Einfluss der P-Zufuhr sowie der Fruchtart auf den Gesamt-P-Gehalt und die P-Sorptionseigenschaften im Boden, im Versuch C.

Bodenparameter	Fruchtart	NK	PAC	PACII	TSP	Mittel
$P_t$ (mg kg <sup>-1</sup> )	Sorghum	558 a	629 c	640 c	593 b	<b>608 B</b>
	Amarant	537 a	587 b	640 c	594 b	<b>590 A</b>
$P_{ox}$ (mmol kg <sup>-1</sup> )	Sorghum	13,4 a	14,6 b	15,8 c	15,1 bc	<b>14,7 A</b>
	Amarant	14,1 a	15,0 b	15,1 b	14,5 ab	<b>14,7 A</b>
DPS (%)	Sorghum	51,6 a	54,1 b	55,9 b	51,7 a	<b>53,3 A</b>
	Amarant	49,4 a	54,1 c	55,2 c	51,4 b	<b>52,5 A</b>
PSC (mmol kg <sup>-1</sup> )	Sorghum	26,1 a	27,0 ab	28,1 bc	29,3 c	<b>27,6 A</b>
	Amarant	28,6 a	27,8 a	27,3 a	28,2 a	<b>28,0 A</b>

$P_t$  = P total;  $P_{ox}$  = oxalatlöslicher P; DPS = Grad der P-Sättigung; PSC = P-Sorptionskapazität; NK = Kontrolle ohne P; PAC = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; PAC II = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,40 g P Gefäß<sup>-1</sup>; TSP = mineralische P-Zufuhr mit Tripel-Superphosphat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtarten ( $p \leq 0,05$  Duncan Test nach zweifaktorieller ANOVA)

### 5.3.3 Aktivität der Enzyme des P-Kreislaufes im Boden

Im Versuch C wurde eine geringere die **AcP-Aktivität** im Vergleich zu den Versuchen A und B nachgewiesen. Diese lag im Durchschnitt der Fruchtarten bei  $95,6 \text{ mg p-Nitrophenol kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ . Die P-Zufuhr wirkte sich im Versuchsmittel nicht signifikant auf die AcP-Aktivität aus (s. Tab. A-4), was vermutlich auf die höheren Gehalte an pflanzenverfügbarem P im Ausgangsboden zurückzuführen ist (s. Kap. 4.1, Tab. 1). Die Faktoren Wasser und Fruchtart hatten dagegen einen signifikanten Einfluss auf die AcP-Aktivität im Boden (s. Tab. A-4).

Unter permanentem Trockenstress verringerte sich die AcP-Aktivität bei Sorghum im Vergleich zur optimalen Bewässerung. Wohingegen für Amarant (im Mittel der Düngungsvarianten) ein Anstieg der AcP-Aktivität im Vergleich zur optimalen Bewässerung nachweisbar war (s. Tab. 29).

Auch die **AIP-Aktivität** im Boden wurde im Versuchsmittel nicht signifikant durch die P-Zufuhr beeinflusst (s. Tab. A-4). Die Wasserzufuhr wirkte sich dagegen deutlicher aus. Unter permanentem Trockenstress verringerte sich die AIP-Aktivität nach Anbau von Sorghum im Vergleich zur optimalen Bewässerung, wohingegen es unter periodischem Trockenstress zu einem Anstieg kam. Für Amarant war ein Anstieg der AIP-Aktivität unter permanentem Trockenstress im Vergleich zur optimalen Bewässerung nachweisbar (s. Tab. 29).

Die **DH-Aktivität** wurde im Gegensatz zur Phosphatase-Aktivität auch durch die P-Zufuhr beeinflusst (s. Tab. A-4). Im Versuchsmittel steigerte sich die DH-Aktivität nach mineralischer P-Zufuhr im Vergleich zur NK-Variante um 17,8 %. Nach organischer P-Zufuhr war lediglich ein tendenzieller Anstieg in der PAC-Variante im Vergleich zur NK-Variante (Versuchsmittel: 8,12 %) nachweisbar. Sowohl permanenter als auch periodischer Trockenstress führte nach Anbau von Amarant zu einer gesteigerten DH-Aktivität im Vergleich zur optimalen Bewässerung. Nach Anbau von Sorghum wurde ein Anstieg unter permanentem Trockenstress festgestellt (s. Tab. 29).

Tabelle 29: Einfluss der Wasser- und P-Zufuhr sowie der Fruchtart auf die Aktivität der Phosphatasen und der Dehydrogenase, im Versuch C.

Fruchtart	Düngung	60 % WHK	30 % WHK	PS
<b>AcP</b> (mg p-Nitrophenol kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )				
<b>Sorghum</b>	NK	108 a B	76,0 a A	107 a B
	PAC	121 b C	74,0 a A	99,2 a B
	PAC II	106 a B	67,8 a A	92,9 a AB
	TSP	101 a C	71,4 a A	87,5 a B
	<b>Mittel</b>	<b>109 C</b>	<b>72,3 A</b>	<b>96,8 B</b>
<b>Amarant</b>	NK	92,8 a AB	114 a B	80,3 a A
	PAC	97,6 a A	113 a A	92,7 a A
	PAC II	101 a A	110 a A	96,0 a A
	TSP	93,3 a A	107 a A	85,1 a A
	<b>Mittel</b>	<b>96,2 A</b>	<b>111 B</b>	<b>88,5 A</b>
<b>AIP</b> (mg p-Nitrophenol kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )				
<b>Sorghum</b>	NK	17,6 a B	12,1 a A	16,6 a B
	PAC	18,5 a A	16,7 a A	19,4 b A
	PAC II	15,2 a A	12,9 a A	18,3 ab B
	TSP	14,7 a A	14,8 a A	20,4 b B
	<b>Mittel</b>	<b>16,5 B</b>	<b>14,1 A</b>	<b>18,7 C</b>
<b>Amarant</b>	NK	13,7 a A	16,5 a A	14,7 a A
	PAC	13,9 a A	15,8 a B	14,6 a AB
	PAC II	14,8 a A	17,4 ab A	16,3 a A
	TSP	14,2 a A	19,3 b A	15,9 a A
	<b>Mittel</b>	<b>14,2 a A</b>	<b>17,3 B</b>	<b>15,4 A</b>
<b>DH</b> (µg TPF g <sup>-1</sup> TS h <sup>-1</sup> )				
<b>Sorghum</b>	NK	18,7 a A	34,6 a B	15,4 a A
	PAC	23,3 b B	28,2 a C	18,9 a A
	PAC II	18,4 a A	25,7 a B	17,8 a A
	TSP	23,2 b A	34,4 a B	27,1 b AB
	<b>Mittel</b>	<b>20,9 A</b>	<b>30,7 B</b>	<b>19,8 A</b>
<b>Amarant</b>	NK	12,0 a A	17,9 a B	19,6 a B
	PAC	16,8 b A	20,1 a A	20,6 a A
	PAC II	12,8 a A	21,0 a B	18,2 a AB
	TSP	16,3 b A	18,3 a A	20,0 a A
	<b>Mittel</b>	<b>14,5 A</b>	<b>19,3 B</b>	<b>19,6 B</b>

AcP = saure Phosphatase; AIP = alkalische Phosphatase; DH = Dehydrogenase-Aktivität; NK = Kontrolle ohne P; PAC = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; PACII = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,40 g P Gefäß<sup>-1</sup>; TSP = mineralische P-Zufuhr mit Tripel-Superphosphat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; WHK = Wasserhaltekapazität; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Wasservarianten (p≤0,05 Duncan Test nach zweifaktorieller ANOVA)

## 6 Diskussion

### 6.1 Einfluss der Wasserzufuhr auf die P-Nutzung der untersuchten Fruchtart

Mit dem Ziel die P-Nutzung von Sorghum, Amarant, Raps und Roggen in Abhängigkeit der Wasserzufuhr zu bestimmen, wurde in den Gefäßversuchen neben einer optimal bewässerten Variante mit 60 % WHK des Bodens, ein permanenter Trockenstress (30 % WHK) sowie ein periodischer Trockenstress induziert.

In den unter teilkontrollierten Bedingungen angelegten Versuchen erwies sich der Faktor Wasser als Hauptursache für die Unterschiede in den P-Aufnahmen und Erträgen der Fruchtarten. Lediglich im Versuch A, der unter geringen Temperaturen durchgeführt wurde, hatte die P-Zufuhr einen höheren Einfluss als die Wasserzufuhr (s. Kap. 5.1, Tab. A-1).

**Sowohl permanenter als auch periodischer Trockenstress reduzierten die P-Aufnahmen und die Erträge** der untersuchten Fruchtarten.

**Wie stark der Trockenstress die untersuchten Pflanzenparameter beeinflusste war dabei abhängig von der angebauten Fruchtart.** Amarant und Raps wiesen unter Trockenstressbedingungen in allen Versuchen hohe P-Aufnahmen auf. Roggen erreichte unter Trockenstress trotz geringerer P-Aufnahmen vergleichbare Erträge wie Amarant und Raps. Für Sorghum wurden hohe Ertragsrückgänge infolge des Trockenstresses ermittelt. Dies spiegelte sich auch in der P-Aufnahme und der Wassernutzungseffizienz (WNE) wieder (s. Kap. 5, Tab. 6; 13; 24).

Der unterschiedliche Einfluss des Trockenstresses auf die P-Aufnahme und den Ertrag lässt sich durch die verschiedenen Anpassungsmechanismen der Fruchtarten an Wasser- und P-Mangel erklären. In der vorliegenden Arbeit konnten **spezifische Reaktionen der untersuchten Fruchtarten als Anpassung an die verminderte Wasserzufuhr** nachgewiesen werden.

Für **Sorghum** wurde in allen durchgeführten Gefäßversuchen ein hoher Ertragsrückgang nach permanentem Trockenstress im Vergleich zur optimalen Bewässerung festgestellt. Auch Untersuchungen von ZEGADA-LIZARAZU et al. (2012), welche unter kontrollierten Bedingungen (Rhizotron) durchgeführt wurden, wiesen einen Rückgang der Biomasse von Sorghum infolge von andauerndem Trockenstress um 38 % im Vergleich zur Kontrolle nach und bestätigen die eigenen Ergebnisse.

Als Erklärung für die hohen Ertragsrückgänge kann angeführt werden, dass Sorghum während anhaltender Trockenperioden das Wachstum unterbricht und eine **Trockenstarre** aufweist (ZANDER 2012). Dies führt zu stark verminderten Erträgen und zu verringerten Nährstoffaufnahmen. Zudem führen **Veränderungen der Blattstellung** und das auch in den eigenen Versuchen beobachtete **Blattrollen** als Anpassung an Trockenstress zu einer verringerten Lichtaufnahme und damit zu einer Verminderung der Wachstumsrate (DUENSING et al. 2011). Ein daraus resultierender Rückgang der Photosyntheseleistung ist zu erwarten und konnte anhand der eigenen Ergebnisse für Sorghum tendenziell bestätigt werden (prozentualer Abfall der effektiven Quantenausbeute im Tagesverlauf TSP-Variante: 60 % WHK: 16,9 % vs. 30 % WHK: 22,1 %) (s. Kap. 5.2.2, Tab. 18). Untersuchungen von HARTMANN (2012) wiesen im Feldversuch eine verringerte Blattbildung sowie ein vermindertes Längenwachstum für die auch in der vorliegenden Arbeit untersuchte Sorghumhybride Inka infolge von Trockenstress nach. Die Ertragsreduktion lag im Vergleich zur optimalen Bewässerung bei 21 %. HARTMANN (2012) schlussfolgerte, dass auch für den Sorghumanbau zur Absicherung hoher TM- und Methanerträge ausreichend Wasser benötigt wird. Dies bestätigt sich ebenfalls in einem Feldversuch von SCHITTENHELM (2010). Hier zeigte sich, dass Sorghum seine Biomasseerträge bei geringen Bodenwassergehalten (15 bis 30 % des pflanzenverfügbaren Bodenwassers) im Vergleich zur optimalen Bewässerung (60 bis 80 %) um bis zu 35 % reduzierte. Bei mittlerer Wassergabe (40 bis 50 %) konnten dagegen maximale Biomassen erreicht werden.

Die Züchtung von „stay green“-Hybriden, deren Blätter unter Wassermangel während und nach der Blüte verzögert absterben, kann zu Erhöhung der Ertragssicherheit von Sorghum unter Trockenstress beitragen (HEYLAND et al.

2006). Ein Nachteil dieser Sorten ist jedoch die verzögerte Abreife der vegetativen Organe.

In der vorliegenden Studie war zudem die Dauer des Trockenstresses ausschlaggebend für die Verringerung der Erträge und P-Aufnahmen bei Sorghum. Während sich der Ertrag nach anhaltendem Trockenstress um 37,1 % reduzierte kam es nach periodische induziertem Trockenstress lediglich zu einer Verminderung um 17,6 % (s. Kap. 5.3.1, Tab. 24). Bei Sorghum kann es nach Wiederbewässerung zu einer schnellen Wachstumsregeneration kommen, so dass bei periodisch auftretendem Trockenstress die Entwicklungsverzögerungen nach Beendigung der Trockenheit rasch ausgeglichen werden (AL-KARAKI et al. 1995, KHALILI et al. 2008).

Die insgesamt niedrige Biomasse von Sorghum im Gefäßversuch A ist auf die geringen Temperaturen während der Vegetationszeit zurückzuführen. Sorghum ist bekannt für eine hohe Kältestresssensibilität (ANDA et al. 1994, HANUS et al. 2008). Des Weiteren ist davon auszugehen, dass der niedrige pH-Wert in diesem Versuch (4,91 CaCl<sub>2</sub>) zu geringen Erträgen bei Sorghum führte. Studien von DUNCAN (1991) belegen ebenfalls Ertragsrückgänge aufgrund niedriger pH-Werte im Boden bei verschiedenen Sorten von *Sorghum bicolor*.

Als morphologische Anpassung an den Trockenstress wurde in den eigenen Untersuchungen für die **C<sub>4</sub>-Fruchtarten Sorghum und Amarant ein Anstieg des Wurzel-Spross-Verhältnisses** nachgewiesen (s. Kap. 5.2.1, Tab. 12). Dies traf insbesondere auf Sorghum zu. Die Anpassung der C<sub>4</sub>-Fruchtarten an den Trockenstress resultierte unter den gegebenen Versuchsbedingungen jedoch nicht in höheren Sprossmassen im Vergleich zu den C<sub>3</sub>-Fruchtarten (s. Kap. 5.2.1 Tab. 13). Dabei muss beachtet werden, dass in Gefäßversuchen eine Änderung des Wurzel-Spross-Verhältnisses weniger effektiv ist als im Feld, da keine tieferen, wasserführenden Bodenschichten erreicht werden können. Außerdem kann davon ausgegangen werden, dass es zu einer Verlagerung von Assimilaten aus dem Spross zu Gunsten des Wurzelwachstums kam, wodurch die Sprossentwicklung zusätzlich eingeschränkt wurde (Quarrie et al. 1999).

Im Gefäßversuch mit stark lehmigem Sand war der Effekt des Trockenstresses auf die Pflanzenparameter stärker ausgeprägt als auf den Böden mit schwach lehmigem Sand. Dies führte auch bei **Amarant** zu hohen Ertragsrückgängen (s. Kap. 5.2.1, Tab. 13). Dagegen zeigte Amarant in den Versuchen auf schwach lehmigem Sand geringe Rückgänge hinsichtlich P-Aufnahme und Ertrag infolge des Trockenstresses (s. Kap. 5.1.1, Tab. 6; s. Kap. 5.3.1, Tab. 24).

Für Amarant wurden bereits, in mehreren Studien physiologische und morphologische Anpassungen an Trockenstressbedingungen nachgewiesen. Untersuchungen von LIU & STÜTZEL (2002) belegen, dass infolge osmotischer Anpassungen der Turgordruck in den Blättern von Amarant unter Trockenstress aufrechterhalten werden kann und dies zu einer Stabilisierung der Biomasseproduktion führt. Weitere Untersuchungen von LIU & STÜTZEL (2004) wiesen für Amarant (wie auch in den eigenen Studien bestätigt) eine Erhöhung des Wurzel-Spross-Verhältnisses unter Trockenstress im Vergleich zur optimal bewässerten Kontrolle nach. HUERTA-OCAMPO et al. (2011) stellten eine Akkumulation von Prolin sowie von löslichen Zuckern in den Wurzeln von Amarant als Reaktion auf Trockenstress fest. Diese Anpassung trägt ebenfalls zur Aufrechterhaltung des Turgordrucks bei und dient darüber hinaus dem Schutz von Proteinen und Zellmembranen.

Die aufgeführten Anpassungen können die Nährstoffaufnahme von Pflanzen bei geringeren Bodenwassergehalten fördern (s. Kap. 2.3) und die hohen P-Aufnahmen von Amarant unter Trockenstress in den durchgeführten Gefäßversuchen mit erklären. Umgekehrt kann sich aber auch die effiziente P-Mobilisierung von Amarant aus dem Boden unter Trockenstressbedingungen positiv auf die unterschiedlichen physiologischen Stoffwechselprozesse der Pflanze und damit auf die Erträge ausgewirkt haben (s. Kap. 6.2.1).

**Raps** reagierte in den Gefäßversuchen auf Trockenstress mit einer (um das 6 bis 10fache) **erhöhten Prolin-Akkumulation** in den Blättern der Pflanze. So konnten für Raps die höchsten Prolin-Gehalte im Vergleich der Fruchtarten nachgewiesen werden (s. Kap. 5.1.1, Tab. 6; s. Kap. 5.2.1, Tab. 16). Auch MÜLLER et al. (2010) stellte fest, dass Raps unter Trockenstress als physiologische Anpassung mit einer Zunahme von organischen Osmotika reagiert um die Stoffwechselaktivität im Blatt aufrecht zu erhalten. Dies

ermöglicht eine rasche Wachstumsaufnahme nach Erhöhung der Bodenwassergehalte ist aber gleichfalls mit einem energetischem Aufwand für die Pflanze verbunden. Für Raps kann ebenfalls eine positiven Wechselwirkung zwischen der Anpassung an den Trockenstress und der effizienten P-Aufnahmen unter Wassermangel angenommen werden (s. Kap. 6.2.1).

Im Versuch A (unter geringern Temperaturen) konnte für **Roggen** der höchste Ertrag und die höchste WNE im Vergleich der Fruchtarten in beiden Wasserstufen nachgewiesen werden. Zudem war die P-Ausnutzung von Roggen, trotz geringerer P-Aufnahme unter Trockenstress vergleichbar hoch (s. Kap. 5.1.1 Abb. 2) bzw. höher als bei Raps (s. Kap. 5.2.1 Abb. 3). Das kann damit erklärt werden, dass Roggen generell einen geringeren P-Bedarf als die P-anspruchsvolleren Blattfrüchte Raps (ANONYMUS 2009) und Amarant (AUFHAMMER 2000) hat und daher zur Bildung einer vergleichbaren Biomasse weniger P aus dem Boden aufnehmen muss. Im Vergleich zu anderen C<sub>3</sub>-Getreidearten, wie beispielsweise Weizen, hat Roggen zudem einen relativ geringen Wasserbedarf (HANUS et al. 2008) und verfügt als Anpassung an Trockenheit über ein gut entwickeltes Wurzelsystem mit großer Wurzellänge und -dichte (ZEGADA-LIZARAZOU & IJIMA 2004). In den eigenen Untersuchungen wurde nur eine relativ geringe Wurzelmasse für Roggen nachgewiesen. Allerdings ist anzumerken, dass Wurzellänge, -volumen und -oberfläche großen Einfluss auf die Wasseraufnahme aus dem Boden haben und in dieser Studie lediglich der Trockenmasseertrag der Wurzel erfasst wurde.

Für Amarant, Raps und Roggen konnte in den vorliegenden Untersuchungen eine **erhöhte WNE nach permanentem Trockenstress** im Vergleich zur optimal bewässerten Kontrolle nachgewiesen werden, was für eine gute Anpassung der Fruchtarten an die verminderte Wasserzufuhr spricht. BLUME (2009) weist allerdings darauf hin, dass die WNE von Fruchtarten unter Trockenstress nicht als Züchtungskriterium herangezogen werden sollte, da diese in der Regel an eine verringerte Photosynthese und verminderte Erträge infolge von Anpassungen zur Verringerung der Transpiration gekoppelt ist.

## 6.2 Wirkung von Ca-Phytat auf die P-Nutzung der untersuchten Fruchtarten

Die Ausnutzung des mit Ca-Phytat applizierten P wurde in den durchgeführten Gefäßversuchen gemäß der *Hypothese 1* sowohl durch die angebaute Fruchtart, als auch durch die Wasserzufuhr und die Bodeneigenschaften beeinflusst.

### 6.2.1 Wirkung von Ca-Phytat in Abhängigkeit von Wasserzufuhr und Bodenart im Vergleich zu Tripel-Superphosphat

Ein weiteres Ziel der Arbeit war es, die P-Nutzung der untersuchten Fruchtarten aus der organischen P-Quelle Ca-Phytat im Vergleich zu einer P-armen Kontrolle und einer leicht löslichen mineralischen P-Quelle (Triple-Superphosphat) in Abhängigkeit von der Wasserzufuhr und der Bodenart zu ermitteln. Aus den Ergebnissen der Untersuchungen lassen sich Rückschlüsse über die Eignung von Ca-Phytat für die P-Ernährung von Pflanzen unter Trockenstress ziehen.

In den Gefäßversuchen auf schwach lehmigem Sand wurde eine positive Wirkung von Ca-Phytat (beide Applikationsstufen) auf die P-Aufnahme und den Ertrag sowie die WNE der Fruchtarten im Vergleich zur P-armen NK-Variante ermittelt. Diese verminderte sich unter Trockenstress im Vergleich zur optimalen Bewässerung insbesondere aufgrund des verminderten Pflanzenwachstums. Insgesamt war aber auch **unter Trockenstressbedingungen ein Anstieg der P-Aufnahmen und Erträge nach Zufuhr von Ca-Phytat** in doppelter Applikationsmenge (0,40 g P Gefäß<sup>-1</sup>) im Vergleich zur NK-Variante nachweisbar (s. Kap. 5.1.1, Tab. 6; Kap. 5.3.1, Tab. 24). Die Zufuhr von **Ca-Phytat trug somit zur P-Ernährung der untersuchten Fruchtarten unter Trockenstress bei**.

Im Gegensatz dazu konnte der auf stark lehmigen Sand mit Ca-Phytat applizierte P weniger durch die Fruchtarten genutzt werden (s. Kap. 5.2.1, Tab. 13 u. 15). Hier wurde nach Zufuhr von Ca-Phytat (in beiden Wasserstufen) kein

Anstieg der P-Aufnahmen und Erträge im Vergleich zur NK-Variante ermittelt. Als mögliche Ursache dafür sind die hohen Fe- und Tongehalte auf diesem Boden anzusehen, welche vermutlich die Bindung von Ca-Phytat an den Boden verstärkten und somit die P-Aufnahme durch die Pflanze verringerten (DE GROOT & GOLTERMAN 1993, CELI et al. 1999, LUNG & LIM 2006). Eine Fixierung von Phytin an aktive Al- und Fe-Oxydhydrate wurde bereits von IVANOV & SAUERBECK (1971) beschrieben. Vor Versuchsbeginn wurde auf dem stark lehmigen Sand ein  $\text{Fe}_{\text{ox}}$ -Gehalt von  $50,0 \text{ mmol kg}^{-1}$  ermittelt, wohingegen die  $\text{Fe}_{\text{ox}}$ -Gehalte auf schwach lehmigem Sand deutlich geringer waren ( $29,7$  bzw.  $28,4 \text{ mmol kg}^{-1}$ ). Für ein hohes P-Sorptionsvermögen des stark lehmigen Sandes sprechen auch die zu Versuchsbeginn analysierte hohe P-Sorptionskapazität sowie die mäßige P-Sättigung dieses Bodens (s. Kap. 4.1, Tab. 2).

Zudem weist Phytin generell eine starke Bindung an die Bodenaustauscher auf, diese ist auf die hohe Anzahl der sechs P-Gruppen im Phytatmolekül zurückzuführen (MC KERCHER & ANDERSON 1989, TURNER et al. 2002). Darüber hinaus ist die P-Verfügbarkeit von Ca-Phytat pH-Abhängig und im sauren pH-Bereich bis 5,5 höher als auf dem verwendeten stark lehmigen Sand mit einem pH-Wert von 6,10 (IVANOV & SAUERBECK 1971).

**Die Wirkung von Ca-Phytat auf die P-Nutzung** der untersuchten Fruchtarten **blieb hinter der Wirkung der mineralischen P-Zufuhr (TSP) zurück.** Ein Anstieg der P-Aufnahmen und Erträge war nach Zufuhr des leicht pflanzenverfügbaren mineralischen P bereits bei einer Applikationsmenge von  $0,20 \text{ g P Gefäß}^{-1}$  (auf beiden untersuchten Böden) nachweisbar, wohingegen erst die doppelte Menge an Ca-Phytat zu vergleichbar hohen Ergebnissen führte. Auch unter Trockenstressbedingungen konnte eine höhere P-Ausnutzung der Pflanzen und eine höhere P-Düngewirkung der mineralischen P-Quelle im Vergleich zu Ca-Phytat bestätigt werden. Die enzymatische Hydrolyse von organischen P durch Phosphatasen erfolgt nur langsam und in unmittelbarer Nähe der Wurzel, wohingegen mineralischer P schneller und in höherem Maße für die Pflanze zur Verfügung steht. So konnten TARAFDAR & CLAASSEN (2005) beispielsweise für Weizen eine 2 bis 6mal höhere P-Aufnahme aus einem Boden mit hohem mineralischem P-Gehalt im Vergleich

zu einem Boden mit hohem organischem P-Gehalt nachweisen. Eine mineralische P-Zufuhr kann somit durch die schnellere Verfügbarkeit für die Pflanze unter Trockenstress zu einer verbesserten Nährstoff- und Wasseraufnahme führen und das Pflanzenwachstum begünstigen (JONES et al. 2005) (s. Kap. 2.3).

Bei einer längeren Versuchslaufzeit ist (insbesondere auf schwach lehmigem Sand) mit einer höheren Wirkung von Ca-Phytat auf die P-Nutzung der Fruchtarten zu rechnen, da mit der fortschreitenden Hydrolyse der organischen P-Verbindung weiterhin P aus dem Boden für die Pflanze nachgeliefert werden kann.

Unter periodischem Trockenstress, mit einem Wechsel von Austrocknungs- und Bewässerungsphasen, **erhöhte die P-Zufuhr die Trockentoleranz der untersuchten Fruchtarten**. Der prozentuale Rückgang der Erträge von Sorghum und Amarant war nach Zufuhr von Ca-Phytat ( $0,40 \text{ g Gefäß}^{-1}$ ) und TSP ( $0,20 \text{ g P Gefäß}^{-1}$ ) deutlich geringer als in der NK-Variante. Dies ließ sich auch für die P-Aufnahme von Amarant nachweisen (s. Kap. 5.3.1, Tab. 23). In den bewässerten Phasen konnten sich die Pflanzen regenerieren und auch verstärkt P aufnehmen. Dies kann zu einer Verringerung der negativen Effekte des Trockenstress beigesteuert haben.

Im Gegensatz dazu war der prozentuale Rückgang der P-Aufnahmen und Erträge infolge des permanenten Trockenstresses (30 % WHK) nach Zufuhr von Ca-Phytat sowie nach mineralischer P-Zufuhr für die untersuchten Fruchtarten (trotz der nachgewiesenen positiven P-Düngewirkungen) nicht signifikant geringer als in der NK-Variante (s. Kap. 5.1.1, 5.2.1, 5.3.1). **Die Wirkung des permanenten Trockenstresses wurde durch die P-Zufuhr unter den gegebenen Versuchsbedingungen nicht abgeschwächt** und es kann somit nicht von einer Erhöhung der Trockentoleranz als Konsequenz aus der P-Zufuhr ausgegangen werden. Eine Erklärung für dieses Ergebnis könnte das gesteigerte Pflanzenwachstum infolge erhöhter P-Zufuhr unter Trockenstress sein, welches zu einem höheren Wasserbedarf der Pflanzen führte und den Effekt des Trockenstress verstärkte (HU & SCHMIDTHALER 2005, BURMANN et al. 2009, BRANDT et al. 2011). Ein Hinweis darauf ist auch die erhöhte Prolin-Konzentration nach P-Zufuhr im Vergleich zur Kontrolle unter permanentem

Trockenstress (s. Tab 6 u. 25). Die kleineren Pflanzen in der NK-Variante hatten einen geringeren Wasserverbrauch.

Eine differenzierte Prüfung der Wirkung von organischer und mineralischer P-Zufuhr auf die Trockentoleranz von Fruchtarten unter Feldbedingungen wäre empfehlenswert, um genauere Aussagen über eine angepasste P-Zufuhr zur Erhöhung der Trockentoleranz von Pflanzen bei geringen Bodenwassergehalten treffen zu können.

### **6.2.2 Bedeutung pflanzlicher Anpassungen zur P-Mobilisierung unter Trockenstress**

Wie bereits in 6.1 beschrieben **wiesen die dikotylen Fruchtarten Amarant und Raps unabhängig von der P-Quelle unter Trockenstress eine höhere P-Aufnahme als die monokotylen Fruchtarten Sorghum und Roggen auf.**

Die eingangs gestellte *Hypothese 2*, dass die Anpassung der C<sub>4</sub>-Pflanzen Sorghum und Amarant an Trockenstress zu einer effizienteren P-Aufnahme unter Wassermangel im Vergleich zu den C<sub>3</sub>-Pflanzen Raps und Roggen führt ließ sich explizit nur für Amarant bestätigen. Eine hohe P-Aufnahme unter Trockenstress scheint vielmehr aus der Kombination einer effektiven Anpassung der Pflanze an Trockenstress und dem hohen P-Mobilisationsvermögen aus dem Boden zu resultieren. Zudem unterscheiden sich Fruchtarten in ihrem P-Bedarf bei der Bildung von Biomasse (hohe P-Ausnutzung Roggen) und ihrer Reaktion auf Wassermangel (Trockenstarre Sorghum), was die P-Aufnahme unter Trockenstress ebenfalls beeinflussen kann.

Es kann zunächst davon ausgegangen werden, dass Amarant und Raps generell hohe P-Aufnahmen haben, um ihren P-Bedarf zu decken. Auch andere Studien belegen eine hohe Nährstoffaufnahme sowie eine hohe P-Aufnahme für Amarant (ESCUDERO et al. 1999, AUFHAMMER 2000, LIANG et al. 2009, OJO et al. 2010, BACHMANN et al. 2011) und für Raps (SCHIEMENZ & EICHLER-LÖBERMANN 2010, KREY et al. 2011). Darüber hinaus deuten die vergleichsweise höheren P-Aufnahmen unter Trockenstress in den eigenen

Untersuchungen aber auch auf entsprechende Anpassungen der Fruchtarten zur P-Mobilisierung aus dem Boden unter P-Defizit hin.

Nach Anbau von **Amarant** wurde im Vergleich der Fruchtarten (in allen Versuchen) der niedrigste pH-Wert im Boden ermittelt. Es kann daher angenommen werden, dass es durch die Ausscheidung von Wurzelexsudaten zu einer Ansäuerung der Rhizosphäre und somit zu einer verbesserten P-Löslichkeit im Boden kam, was eine verstärkte P-Aufnahme in die Pflanze ermöglichte. Laut Blume (2010) führt die Absenkung des pH-Wertes auch zur verstärkten Löslichkeit von Ca-Phosphat. Dies könnte in den vorliegenden Untersuchungen zu einer erhöhten Ausnutzung der eingesetzten organischen Ca-Phytat Verbindung geführt haben. Darüber hinaus zeigte Amarant im Vergleich der Fruchtarten insgesamt eine hohe Ca-Aufnahme in die Pflanze (s. Tab. A-16, A-18, A-20).

Auch die hohe P-Mobilisierung von **Raps** ist insbesondere auf die Ausscheidung von Wurzelexsudaten zurückzuführen (ZHANG et al. 1997). So wurde beispielsweise in Untersuchungen von BERTRAND et al. (1999) eine hohe Ausnutzung aus P-Calcit durch Raps und eine Ansäuerung der Rhizosphäre infolge der Ausscheidung von anorganischen  $H^+$  Molekülen nachgewiesen.

Wurzelexsudate spielen unter Trockenstress eine wichtige Rolle für die Aufrechterhaltung des Wurzel-Bodenkontaktes, wenn die Kontinuität der Wasserversorgung verloren geht und sich die P-Diffusionsrate im Boden in Richtung Pflanze verringert (WALKER et al. 2003). Die Abgabe von anorganischen  $H^+$  sowie  $OH^-/HCO_3^-$  Ionen ist besonders häufig in ariden Gebieten als Anpassung von Pflanzen an P-Mangel zu finden (MA et al. 2009). Zudem war die Ausscheidung von organischen Säuren, welche besonders bei dikotylen Pflanzen unter P-Mangel erhöht ist (RÖMER 2006), in den Versuchsgefäßen uneingeschränkt möglich. SURIYAGODA et al. (2011) wies für verschiedenen Leguminosen nach, dass die Ausscheidung von Citrat auch unter Trockenstress aufrechterhalten werden kann, ebenso wie die besonders bei dikotylen Pflanzen ausgeprägte Förderung der Kationen- gegenüber der Anionenaufnahme der Wurzel unter P-Mangel (BELNAP 2011). BELNAP (2011) sieht diesen Anpassungsmechanismus als einen Grund für die dominante Verbreitung dikotyler Pflanzen in ariden Regionen.

Des Weiteren können die bereits beschriebenen Anpassungen von Amarant und Raps zur Aufrechterhaltung des Wassergehaltes in der Pflanze unter Trockenstress (s. Kap. 6.1) auch zur Sicherung der P-Aufnahme beigetragen haben.

Unter Trockenstressbedingungen ist der Anbau von Fruchtarten mit einer hohen P-Aufnahme jedoch nicht uneingeschränkt empfehlenswert. Hohe P-Entzüge aus dem Oberboden können das P-Angebot für nachfolgende Fruchtarten stark verringern und somit Effekte des Trockenstresses weiter erhöhen. In den vorliegenden Untersuchungen traf dies nach Anbau von Amarant nicht zu. Bemerkenswerter Weise wurden für Amarant (trotz hoher P-Aufnahmen) nach Versuchsende auch unter Trockenstress hohe Gehalte an leicht pflanzenverfügbarem wasserlöslichem P im Boden ( $P_w$ ) nachgewiesen (s. Kap. 5.1.2, Tab. 8; Kap. 5.2.3, Tab. 20). Dieser könnte von der Nachfrucht als leicht verfügbare P-Quelle genutzt werden.

Die höhere P-Aufnahme der dikotylen gegenüber den monokotylen Fruchtarten unter Trockenstress in der vorliegenden Studie kann jedoch nicht verallgemeinert werden. Eine mögliche Ursache für die geringere P-Aufnahme der monokotylen Fruchtarten unter Trockenstress könnte das begrenzte Bodenvolumen in den Gefäßversuchen sein. Gräser wirken einer niedrigen P-Konzentration im Boden besonders mit einem extensiven Wurzelsystem entgegen. Dieses konnten die Pflanzen im Gefäßversuch nur bedingt ausbilden. Insbesondere Tiefwurzler wie Sorghum können ihren Vorteil zur Wasser- und Nährstoffaufnahme im Gefäß nicht voll ausspielen (s. Kap. 6.1 Wurzel-Spross-Verhältnis). Auch die von ZEGA-LIZARAZOU & IJIMA (2004) für Roggen nachgewiesene hohe hydraulische Leitfähigkeit der Wurzel unter Trockenstress war im Gefäß begrenzt. Durch diese Anpassung an Trockenstress wird Wasser aus tiefer liegenden Bodenschichten in den Oberboden befördert und erhöht hier die Durchfeuchtung, wodurch die Nährstoffaufnahme aufrecht erhalten werden kann. Die Bedeutung der Wurzelmorphologie würde im Feldversuch deutlicher werden.

### 6.3 Wirkung von Ca-Phytat auf die P-Verfügbarkeit im Boden

Die Zufuhr von organischem P kann die P-Verfügbarkeit im Boden erhöhen. In den durchgeführten Gefäßversuchen wurde daher die Wirkung von Ca-Phytat auf ausgewählte P-Pools im Boden untersucht. Zudem wurde ermittelt, inwieweit der Bodenwassergehalt die Wirkung von Ca-Phytat auf die P-Verfügbarkeit im Boden beeinflusst.

Insgesamt **erhöhten sich auf schwach lehmigem Sand die leicht pflanzenverfügbaren P-Pools  $P_w$  und  $P_{dl}$  im Boden nach der Zufuhr von Ca-Phytat** im Vergleich zur P-armen NK-Variante. Dies traf insbesondere auf  $P_w$ , den am leichtesten pflanzenverfügbaren P-Pool des Bodens zu. Das Ergebnis deutet darauf hin, dass Ca-Phytat in diesem Boden in pflanzenverfügbare P-Form überführt wurde, was sich auch in den erhöhten P-Aufnahmen der Fruchtarten widerspiegelte (s. Kap. 6.2.1).

Auf **stark lehmigem Sand** konnte dagegen **keine positive Wirkung von Ca-Phytat auf den Gehalt an pflanzenverfügbaren P im Boden** nachgewiesen werden, dies ist vermutlich auf die bereits beschriebene höhere Bindung des Ca-Phytat auf diesem Boden zurückzuführen (s. Kap. 6.2.1). Die mineralische P-Zufuhr erhöhte die  $P_w$ - und  $P_{dl}$ -Gehalte im Vergleich zur NK-Variante dagegen auf beiden untersuchten Böden und zeigte eine höhere Wirkung als die organische P-Zufuhr. Auch Untersuchungen von BACHMANN et al. (2011) belegen, dass der Gehalt an  $P_w$  im Boden nach Zufuhr von organischem P (aus Gülle bzw. Gärresten: 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>) insbesondere auf stark lehmigem Sand weniger erhöht wurde als nach Zufuhr von mineralischem P (TSP: 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>).

Auf beiden untersuchten Böden **erhöhte die Zufuhr von Ca-Phytat den Gehalt an oxalatlöslichen P ( $P_{ox}$ ) sowie den Grad der P-Sättigung und den Gesamt-P-Gehalt im Boden** im Vergleich zur NK-Variante. Auf stark lehmigem Sand war der Anstieg der  $P_{ox}$ -Gehalte nach Zufuhr von Ca-Phytat aufgrund erhöhter Sorption zudem höher als in der TSP-Variante.

Der Einfluss der Wasserzufuhr auf die P-Pools des Bodens war geringer als auf die Pflanzenparameter (s. Tab. A-1, A-2 u. A-3). Die **leicht pflanzenverfügbaren P-Pools wurden vielmehr durch die Bilanz von P-Zufuhr und P-Aufnahme der Pflanzen bestimmt**. Unter Trockenstress wurden höhere Gehalte an pflanzenverfügbarem P ( $P_{dl}$ ) im Vergleich zur optimal bewässerten Kontrolle gemessen. Das kann in erster Linie auf das verringerte Pflanzenwachstum und die damit verbundene geringere P-Aufnahme zurückgeführt werden und spricht nicht für eine Erhöhung der P-Verfügbarkeit unter Trockenstress. In allen durchgeführten Versuchen konnte eine negative Korrelation zwischen der P-Aufnahme der Pflanze und dem  $P_{dl}$ -Gehalt im Boden unter Trockenstress nachgewiesen werden (Versuch A:  $r = -0,597^{**}$ ; Versuch B:  $r = -0,139^*$ ; Versuch C:  $r = -0,647^{**}$ ).

Auf **stark lehmigem Sand erhöhten sich der  $P_{ox}$ -Gehalte, der Grad der P-Sättigung sowie der Gesamt-P-Gehalt im Boden auch infolge des Trockenstress** im Vergleich zu optimal bewässerten Variante (s. Kap. 5.2.3, Tab. 21). Durch das verringerte Bodenwasservolumen unter Trockenstress ist die P-Konzentration in der Bodenlösung zunächst höher als in der Bodenmatrix, so dass die P-Diffusion aufgrund des Konzentrationsgradienten in Richtung Boden erfolgt, wo es verstärkt zur Bindung an die Bodenaustauscher kommt. Darüber hinaus führt der geringe Bodenwassergehalt auch zu einer verminderten Diffusionsrate von gebundenem P aus der Bodenmatrix zurück in die Bodenlösung (BARROW 1983, GARCIA et al. 2008), das trifft insbesondere auf Böden mit einer hohen P-Sorptionskapazität zu und kann die erhöhten P-Gehalte infolge des Trockenstress auf stark lehmigem Sand erklären. Auch GARCIA et al. (2008) belegten diese Effekte des Trockenstress auf die P-Pools in einem Boden mit hohem Tongehalt. Im Gegensatz zu den eigenen Untersuchungen verringerte sich in der Studie von GARCIA et al. (2008) zudem der Gehalt an pflanzenverfügbarem P im Boden unter Trockenstress (um 32 %) im Vergleich zur optimal bewässerten Kontrolle.

#### **6.4 Einfluss der Aktivität der Enzyme des P-Kreislaufes im Boden auf die P-Nutzung der untersuchten Fruchtarten**

Phosphatasen stellen organischen P für die Pflanzenernährung zur Verfügung (DUNGER & FIEDLER 1997). Die Aktivität der Phosphatasen ist dabei, neben abiotischen Faktoren wie pH-Wert und Bodenwassergehalt auch von der kultivierten Fruchtart und der mikrobiellen Aktivität im Boden abhängig (HAYES et al. 2000, RICHARDSON et al. 2011). Um bessere Kenntnisse über den Einfluss der Aktivität der Enzyme des P-Kreislaufes auf die P-Ernährung der untersuchten Fruchtarten unter Trockenstress zu erlangen wurde in den Gefäßversuchen der vorliegenden Arbeit die Aktivität der sauren und alkalischen Phosphatase sowie der Dehydrogenase im Boden in Abhängigkeit von der P-Quelle und der Wasserzufuhr untersucht.

**Die Aktivität der sauren (AcP) und alkalischen (AIP) Phosphatase im Boden wurde wesentlich durch die P-Zufuhr und die Bodenart beeinflusst.**

Die erhöhte Gehalt an pflanzenverfügbarem P im Boden ( $P_w$ ) sowie die höheren P-Aufnahmen und Erträgen nach Zufuhr von Ca-Phytat im Vergleich zur NK-Variante auf schwach lehmigem Sand lassen den Schluss zu, dass die **erhöhte Aktivität der Phosphatasen (AcP, AIP) nach Zufuhr von Ca-Phytat zur Hydrolyse der organischen P-Quelle** auf diesem Boden **führte und somit zur P-Ernährung der Fruchtarten beitrug** (s. Kap. 5.1.3, Tab 10).

Auf stark lehmigem Sand konnte selbiges während der Versuchslaufzeit für die untersuchten Fruchtarten nicht nachgewiesen werden. Trotz erhöhter Phosphatase-Aktivität kam es, vermutlich aufgrund des höheren Sorptionsvermögens dieses Bodes, nur bedingt zur Hydrolyse des Ca-Phytates und damit zur der geringen P-Nutzung durch die Pflanzen.

Auch Phosphatasen selbst können an Tonminerale im Boden sowie an die organische Bodensubstanz gebunden und damit in ihrer Aktivität eingeschränkt werden, entscheidender für den Abbau von Phytinsalzen ist aber in erster Line ihre Löslichkeit im Boden (LUNG & LIM 2006, GIAVENO et al. 2010).

Der Anstieg der Phosphatase-Aktivität in NK- und Ca-Phytat-Variante auf stark lehmigem Sand im Vergleich zur mineralischen P-Zufuhr ist daher als Reaktion auf den geringen pflanzenverfügbaren P-Gehalt im Boden zu bewerten (s. Kap.

5.2.4). Zu Versuchsbeginn wurden geringe P-Konzentrationen ( $P_{\text{org}}$ : 66,0 mg  $\text{kg}^{-1}$ ;  $P_{\text{min}}$ : 266 mg  $\text{kg}^{-1}$ ) für diesen Boden ermittelt (s. Kap. 4.1, Tab. 1). Die Erhöhung der Aktivität der sauren Phosphatase infolge eines P-Defizits im Boden (geringer P-Gehalt, Phytin-Quelle) im Vergleich zu einer mineralischen P-Zufuhr konnte auch in Untersuchungen von YADAV & TARAFDAR (2001) nach Anbau unterschiedlicher Fruchtarten nachgewiesen werden.

Die insgesamt geringe AcP-Aktivität im Versuch C sowie die geringen Unterschiede in der Aktivität der Phosphatasen in Abhängigkeit von der P-Quelle in diesem Versuch lassen sich dagegen auf die höheren Gehalte an pflanzenverfügbarem P im Ausgangsboden zurückführen (s. Kap. 4.1, Tab. 1).

Die Aktivität der sauren und alkalischen Phosphatase ist stark vom **pH-Wert** des Bodens abhängig (Dick et al. 2000, SINSABAUGH et al. 2008). Da die pH-Werte der untersuchten Böden im sauren Bereich lagen, war auch die Aktivität der AcP generell höher als die der AIP.

Im Versuch auf stark lehmigem Sand, welcher den höchsten pH-Wert aufwies, zeigte sich eine um das ca. 3fach höhere AIP-Aktivität als in den Versuchen auf schwach lehmigem Sand mit geringeren pH-Werten (s. Kap. 4.1, Tab. 2). Ein weiterer Grund für die hohe AIP-Aktivität in diesem Versuch könnte zudem die insgesamt höhere mikrobielle Aktivität in diesem Boden gewesen sein. Der Boden stammte aus ökologischer Bewirtschaftung und wies vergleichsweise hohe Gehalte an organischer Bodensubstanz auf (s. Kap. 4.1, Tab. 2). Auch die DH-Aktivität, welche über die mikrobielle Aktivität im Boden Aufschluss gibt, war im Vergleich zu den Böden aus konventioneller Bewirtschaftung (schwach lehmiger Sand) um das 6fache erhöht. Die vielfältigere Fruchtfolge im Ökolandbau kann zu einer größeren Diversität und Menge an Mikroorganismen im Boden führen (ENTRUP & OEHMICHEN 2000).

Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass gemäß der eingangs gestellten *Hypothese 3* infolge des verringerten Pflanzenwachstums und der verminderten mikrobiellen Aktivität im Boden unter Trockenstress die Aktivität der Enzyme des P-Kreislaufes ebenfalls zurück geht. Daher ist unter Trockenstress normalerweise mit einem verringerten Abbau von organischem P im Boden zu rechnen (SARDANS et al. 2007; BELNAP et al. 2011).

Unter den Bedingungen der in der Arbeit durchgeführten Gefäßversuche zeigte sich im Gegensatz zur formulierten Hypothese, bei der Mehrheit der Fruchtarten auf **schwach lehmigen Sand eine Erhöhung der AcP- und DH-Aktivität unter Trockenstress** im Vergleich zur optimalen Bewässerung. Auf **stark lehmigem Sand** wurde **die AcP-Aktivität** bei der Mehrheit der Fruchtarten dagegen **nicht von der Wasserzufuhr beeinflusst**. Eine Ausnahme bildete jeweils Sorghum, hier war die Aktivität der AcP auf beiden untersuchten Böden unter Trockenstress geringer als unter optimaler Bewässerung. Zudem war der Einfluss der Wasserzufuhr auf die DH-Aktivität höher als auf die AcP-Aktivität (s. Tab. A-4).

Diesen Ergebnissen können verschiedene Ursachen zu Grunde liegen.

**Die Fruchtarten wirkten dem durch Trockenstress hervorgerufenen P-Defizit mit erhöhter AcP-Aktivität im Boden entgegen.** Es kann angenommen werden, dass Amaranth, Raps und Roggen unter Trockenstress als Anpassung an den sinkenden P-Gehalt in der Pflanzen mit einer verstärkten Exsudation von AcP in den Boden reagierten um die P-Aufnahme zu erhöhen bzw. zu stabilisieren. Diese Annahme deckt sich mit Ergebnissen der Gefäßversuchen von SHARMA & KAUR (2008), wo ein intrazellulärer Anstieg der AcP-Aktivität in den Blättern von trockenintoleranten Weizengenotypen als Reaktion auf die verminderte P-Nachlieferung aus dem Boden in die Pflanze unter Trockenstress nachgewiesen wurde. Die Autoren ordnen der sauren Phosphatase eine Schlüsselrolle bei der Aufrechterhaltung des P-Niveaus in der Pflanze unter Trockenstress zu und schlussfolgern darüber hinaus, dass die Aufrechterhaltung des P-Niveaus positiv auf die osmotische Anpassung der Pflanze wirkt. Somit wird der Einfluss des Trockenstress gemildert. Auch Untersuchungen von CUNHUA et al. (2010) konnten einen Anstieg der AcP-Aktivität infolge von Trockenstress in den Blättern von Weißem Gänsefuß (*Amaranthaceae*) unter mildem (50 - 60 % WHK), moderatem (40 - 50 % WHK) und strengem Trockenstress (30 - 40 % WHK) im Vergleich zur optimal bewässerten Kontrolle (70 - 85 % WHK) nachweisen. Neben der intrazellulären ist auch eine extrazelluläre Reaktion der Pflanze zu erwarten.

In den eigenen Untersuchungen **beeinflusste die erhöhte die AcP-Aktivität im Boden unter Trockenstress das Pflanzenwachstum positiv**. Auf schwach lehmigem Sand konnte unter Trockenstress eine (wenn auch schwache) **positive Korrelation zwischen der AcP-Aktivität und dem Ertrag** (Versuch A:  $r = 0,355^{**}$ ; Versuch C:  $r = 0,408^{**}$ ), **der P-Aufnahme** (Versuch A:  $r = 0,303^*$ ; Versuch C:  $r = 0,451^{**}$ ) **und der WNE** (Versuch A:  $r = 0,592^{**}$ ; Versuch C:  $r = 0,329^{**}$ ) nachgewiesen werden (s. Tab. A-6 u. A-10).

Mit weiterer Zunahme und Dauer des Trockenstresses ist jedoch mit einem Rückgang der enzymatischen Aktivität in Pflanze und Boden zu rechnen. Bei exzessivem Trockenstress wird das Stoffwechselsystem der Pflanze so stark geschädigt, dass auch die Enzymaktivität sinkt (CUNHUA et al. 2010).

Die Exsudation von Phosphatasen ist sehr kulturenspezifisch. Da in Gefäßversuchen der gesamte verwendete Boden als Rhizosphärenboden angesehen werden kann, ist der Einfluss der Fruchtart auf die AcP-Aktivität als besonders hoch einzustufen. Die verringerte AcP-Aktivität von Sorghum unter Trockenstress (entgegen der Reaktion der anderen untersuchten Fruchtarten) kann mit dem insgesamt stark verringertem Pflanzenwachstum der Fruchtart erklärt werden. Wie bereits unter 6.1 beschrieben verminderte Sorghum das Sprosswachstum und die P-Aufnahme unter Trockenstress im Vergleich der Fruchtarten am deutlichsten. Es ist daher davon auszugehen, dass auch die AcP-Exsudation der Wurzel unter Trockenstress verringert wurde. Auch der geringere Unterschied der AcP-Aktivität zwischen den Wasservarianten auf stark lehmigem Sand im Vergleich zu den Versuchen auf schwach lehmigem Sand ließe sich durch den höheren Einfluss des Trockenstresses auf die Fruchtarten auf diesem Boden erklären.

Im Allgemeinen werden Bodenmikroorganismen schneller und stärker als Pflanzen durch unterschiedliche Umweltbedingungen beeinflusst und reagieren kurzfristig mit erhöhter bzw. verminderter physiologischer Aktivität (VASSILEV et al. 2012). Auch in der vorliegenden Studie zeigte sich insgesamt ein höherer Einfluss der Wasserzufuhr auf die DH- als auf die AcP-Aktivität (s. Tab. A-4).

Die DH-Aktivität war (wie die AcP-Aktivität) infolge des Trockenstresses auf schwach lehmigem Sand im Vergleich zur optimalen Bewässerung erhöht.

Studien von HUESCO et al. (2011) belegen ebenfalls eine Erhöhung der DH-Aktivität unter Trockenstress und führen diese auf den gesteigerten Energiebedarfs für die Reparatur von Schädigungen an den Mikroorganismen zurück, welche durch den Trockenstress verursacht werden. Dabei könnte sich die bessere Durchlüftung des Bodens positiv auf die Regeneration der Mikroorganismen auswirken haben. Da die Bodenporen unter Trockenstress nicht mit Wasser gefüllt waren, erhöhten sich der Sauerstoffgehalt sowie die Temperatur im Boden, was die Aktivität der aeroben Mikroorganismen zeitweilig steigerte.

## 7 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die effiziente Nutzung begrenzter Ressourcen wie Wasser und Phosphor (P) ist ausschlaggebend für einen nachhaltigen Pflanzenbau.

Vor dem Hintergrund des Klimawandels ist auch in Mitteleuropa häufiger mit Trockenperioden zu rechnen. Dies kann besonders auf leichten Böden zu Ertragsrückgängen führen. Unter Trockenstress kommt es zudem häufig zu Nährstoffmangel. Das betrifft wegen der geringen Mobilität im Boden insbesondere das für die Pflanze essentielle Element P.

Um die P-Versorgung von Boden und Pflanze nachhaltig zu sichern, sind eine bilanzierte P-Düngung sowie die Nutzung der bereits im Stoffkreislauf vorhandenen P-Ressourcen erforderlich. Insbesondere die optimale Ausnutzung organischer P-Quellen wird für den Pflanzenbau weiter an Bedeutung gewinnen. Der Anteil von organischem P am Gesamt-P-Gehalt des Bodens liegt auf landwirtschaftlich genutzten Flächen normalerweise zwischen 30 und 60 %. Dabei machen die Phytate, die Salze der Phytinsäure, mit ca. 60 % den Hauptanteil des organischen P im Boden aus. Zudem kann Phytin dem Boden über Wirtschaftsdünger zugeführt werden. Um pflanzenverfügbar zu sein muss Phytin zunächst hydrolysiert werden. Unter Trockenstressbedingungen kann es jedoch infolge der Verminderung der mikrobiellen Aktivität im Boden und des verminderten Pflanzenwachstums zu einer Verringerung der Aktivität der Enzyme des P-Kreislaufes im Boden kommen.

Fruchtarten unterscheiden sich bezüglich ihrer Anpassung an Wasser- und P-Mangel. Der Anbau angepasster Sorten kann zu einer effizienteren Wasser- und P-Nutzung beitragen. Zudem trägt eine ausreichende P-Ernährung bei zunehmender Trockenheit zur Ertragssicherung bei. Der positive Einfluss mineralischer P-Düngung zur Erhöhung der Trockentoleranz wurde bereits in verschiedenen Studien nachgewiesen. Dagegen wurde die Effektivität der Wirkung von Phytin unter Trockenstress im Vergleich zu einer mineralischen P-Zufuhr bisher nur unzureichend untersucht.

Mit dem Ziel ein besseres Verständnis über die Eignung von organischen P-Quellen im Boden für die P-Ernährung von Pflanzen unter Trockenstress zu gewinnen wurden in der vorliegenden Arbeit drei Gefäßversuche angelegt und

der wechselseitige Einfluss des Wassergehaltes des Bodens und der Phytin-Zufuhr auf die P-Ernährung von Sorghum, Amarant, Raps und Roggen untersucht.

**Versuch A:** Wirkung von Ca-Phytat auf die P-Nutzung verschiedener Fruchtarten in Abhängigkeit von der Wasserzufuhr auf einem schwach lehmigen Sand.

**Versuch B:** Wirkung von Ca-Phytat auf die P-Nutzung verschiedener Fruchtarten in Abhängigkeit von der Wasserzufuhr im Vergleich zu Tripel-Superphosphat auf einem stark lehmigen Sand.

**Versuch C:** Wirkung von permanentem und periodischem Trockenstress auf die P-Nutzung von Sorghum und Amarant in Abhängigkeit von der P-Quelle.

Die Versuche wurden dreifaktoriell (Fruchtart, Wasser, Düngung) angelegt. Dabei wurde die Wirkung einer organischen P-Zufuhr mit Ca-Phytat in zwei Applikationsstufen (**Phytic Acid Calcium**; PAC: 0,20; PACII: 0,40 g P Gefäß<sup>-1</sup>) im Vergleich zu einer P-armen Kontrolle (NK) und einer leicht löslichen mineralischen P-Quelle (Triple-Superphosphat; TSP: 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>) auf Pflanzen- und Bodenparameter ermittelt. Da organische Düngemittel Schwankungen in den P-Gehalten aufweisen sowie neben P andere Nährstoffe in unterschiedlicher Zusammensetzung enthalten, wurde für die vorliegende Studie Ca-Inositolhexaphosphat als definierte organische P-Quelle genutzt.

Darüber hinaus wurde die P-Nutzung der Fruchtarten in Abhängigkeit von der Wasserzufuhr erfasst. Dazu dienten neben einer optimal bewässerten Variante mit 60 % Wasserhaltekapazität (WHK) des Bodens ein permanenter Trockenstress (30 % WHK) sowie ein periodischer Trockenstress.

Um Rückschlüsse auf den Einfluss verschiedener Bodeneigenschaften ziehen zu können wurden zwei unterschiedliche, suboptimal mit P versorgte Böden (schwach lehmiger Sand, stark lehmiger Sand) verwendet.

Die P-Aufnahme, der Ertrag sowie die Prolin-Akkumulation und die Wassernutzungseffizienz (WNE) der Fruchtarten Sorghum (*Sorghum bicolor* x

*Sorghum sudanense*, Inka), Amarant (*Amaranthus cruentus*, Bärnkrafft), Raps (*Brassica napus*, Palma) und Roggen (*Secale cereale*, Arantes) wurden untersucht. Im Boden wurden der pH-Wert, ausgewählte P-Fractionen sowie der Grad der P-Sättigung ermittelt. Zudem erfolgte die Prüfung der Aktivität der Enzyme des P-Kreislaufes (saure, alkalische Phosphatase, Dehydrogenase) im Boden in Abhängigkeit von der Wasser- und P-Zufuhr.

Im **Ergebnis** der Untersuchungen lassen sich die folgenden Aussagen treffen:

### **1 Die P-Nutzung reduzierte sich unter Trockenstress in Abhängigkeit von der angebauten Fruchtart unterschiedlich stark.**

Der Faktor Wasser erwies sich im Vergleich zur P-Zufuhr als Hauptursache für die Unterschiede in den P-Aufnahmen und Erträgen der Fruchtarten. Sowohl permanenter als auch periodischer Trockenstress reduzierte die P-Nutzung im Vergleich zur optimal bewässerten Variante. Wie stark der Trockenstress die untersuchten Pflanzenparameter beeinflusste war dabei abhängig von der angebauten Fruchtart.

Amarant und Raps wiesen unter Trockenstressbedingungen in allen Gefäßversuchen hohe P-Aufnahmen auf. Roggen erreichte unter Trockenstress trotz geringerer P-Aufnahmen vergleichbare Erträge wie Amarant und Raps. Sorghum zeigte hohe Ertragsrückgänge infolge des Trockenstress, dies spiegelte sich auch in der P-Aufnahme und der WNE wieder. Der unterschiedliche Einfluss des Trockenstress auf die P-Aufnahme und den Ertrag lässt sich durch die verschiedenen Anpassungsmechanismen der Fruchtarten an Wasser- und P-Mangel erklären.

### **2 Die Fruchtarten zeigen spezifische Reaktionen auf Wasser- und P-Mangel.**

Raps reagierte auf Trockenstress mit einer verstärkten Prolin-Akkumulation in den Blättern. Der Prolin-Gehalt war im Vergleich zur Kontrolle 6-10mal höher. Für Sorghum und Amarant wurde ein erhöhtes Wurzel-Spross-Verhältnis infolge des Wasserdefizits im Boden ermittelt. Des Weiteren konnte für Amarant, Raps und Roggen eine erhöhte WNE unter Trockenstress im

Vergleich zur optimal bewässerten Kontrolle nachgewiesen werden, was für eine gute Anpassung an den geringen Bodenwassergehalt spricht.

Trotz hoher P-Aufnahmen durch Amarant wurden nach Versuchsende im Vergleich der Fruchtarten hohe Gehalte an wasserlöslichem P ( $P_w$ ) im Boden gemessen, dies stand im Zusammenhang mit einer Reduzierung des pH-Wertes im Boden, was auf eine effektive P-Mobilisierung durch Amarant hindeutet. Die hohe P-Aufnahme von Amarant unter Trockenstress, resultierte daher vermutlich aus der Kombination einer effektiven Anpassung der Pflanze an Trockenstress sowie einer hohen P-Mobilisation aus dem Boden.

Zudem unterschieden sich die Fruchtarten in ihrem P-Bedarf bei der Bildung von Biomasse (hohe P-Ausnutzung Roggen) und ihrer Reaktion auf Wassermangel (Trockenstarre Sorghum), was die P-Aufnahme unter Trockenstress ebenfalls beeinflusst.

### **3 Die Zufuhr von Ca-Phytat wirkte sich positiv auf die P-Nutzung der Fruchtarten unter Trockenstress aus, bleibt jedoch hinter der Wirkung einer mineralischen P-Düngung zurück.**

Auf schwach lehmigem Sand wurde eine positive Düngewirkung von Ca-Phytat im Vergleich zur NK-Variante ermittelt. Diese verminderte sich infolge des Trockenstress im Vergleich zur optimalen Bewässerung insbesondere aufgrund des verringerten Pflanzenwachstums, insgesamt konnte aber auch unter Trockenstressbedingungen auf schwach lehmigem Sand ein signifikanter Anstieg der P-Aufnahmen und Erträge nach Zufuhr von Ca-Phytat in doppelter Applikationsmenge ( $0,40 \text{ g P Gefäß}^{-1}$ ) im Vergleich zur NK-Variante belegt werden. Ca-Phytat eignete sich somit zur P-Ernährung der untersuchten Fruchtarten unter Trockenstress.

Die Wirkung von Ca-Phytat auf die P-Nutzung der Fruchtarten blieb hinter der Wirkung der mineralischen P-Zufuhr zurück. Ein Anstieg der P-Aufnahmen und Erträge war nach der Zufuhr des leicht pflanzenverfügbaren mineralischer P bereits mit einer Applikationsmenge von  $0,20 \text{ g P Gefäß}^{-1}$  nachweisbar, wohingegen erst die doppelte Menge an Ca-Phytat zu vergleichbar hohen Ergebnissen führte. Die enzymatische Hydrolyse von organischem P erfolgt langsam und in unmittelbarer Nähe der Wurzel, wohingegen mineralischer P schneller und in höherem Maße für die Pflanze zur Verfügung steht.

Unter periodisch induziertem Trockenstress, mit einem Wechsel von Austrocknungs- und Bewässerungsphasen, erhöhte die P-Zufuhr die Trockentoleranz der untersuchten Fruchtarten. Der prozentuale Rückgang der Erträge von Sorghum und Amarant war nach Zufuhr von Ca-Phytat ( $0,40 \text{ g Gefäß}^{-1}$ ) und TSP ( $0,20 \text{ g P Gefäß}^{-1}$ ) deutlich geringer als in der NK-Variante. Dies ließ sich auch für die P-Aufnahme von Amarant nachweisen.

Im Gegensatz dazu war der prozentuale Rückgang der P-Aufnahmen und Erträge infolge des permanenten Trockenstresses (30 % WHK) nach Zufuhr von Ca-Phytat sowie nach mineralischer P-Zufuhr für die untersuchten Fruchtarten (trotz der nachgewiesenen positiven P-Düngewirkungen) nicht signifikant geringer als in der NK-Variante. Als Erklärung für dieses Ergebnis kann das gesteigerte Pflanzenwachstum infolge erhöhter P-Zufuhr unter Trockenstress angeführt werden, welches zu einem höheren Wasserbedarf der Pflanzen führte und den Effekt des Trockenstresses verstärkte.

#### **4 Die Zufuhr von Ca-Phytat erhöhte die P-Verfügbarkeit im Boden.**

Nach Zufuhr von Ca-Phytat erhöhten sich die leicht pflanzenverfügbaren P-Pools ( $P_w$ ,  $P_{dl}$ ) im Boden auf schwach lehmigem Sand im Vergleich zur P-armen Kontrolle. Im Gegensatz dazu konnte auf stark lehmigem Sand kein positiver Effekt nach Zufuhr von Ca-Phytat nachgewiesen werden, was auf das höhere P-Sorptionsvermögen dieses Bodens zurückzuführen ist.

Die leicht pflanzenverfügbaren P-Pools wurden maßgeblich durch die Bilanz von P-Zufuhr und P-Aufnahme der Pflanzen bestimmt. Unter Trockenstress wurden höhere Gehalte an  $P_{dl}$  im Vergleich zur optimal bewässerten Kontrolle gemessen. Das kann in erster Linie auf das verringerte Pflanzenwachstum und die geringere P-Aufnahme zurückgeführt werden und spricht nicht für eine Erhöhung der P-Verfügbarkeit unter Trockenstress. Dies bestätigt sich in der negative Korrelation zwischen P-Aufnahme und  $P_{dl}$ -Gehalt.

#### **5 Die Aktivität der Phosphatasen trug zur Erhöhung der Verfügbarkeit des mit Ca-Phytat applizierten P für die Pflanze bei.**

Die höheren P-Verfügbarkeit im Boden ( $P_w$ ) sowie die höheren P-Aufnahmen und Erträgen nach Zufuhr von Ca-Phytat im Vergleich zur NK-Variante auf schwach lehmigem Sand lassen den Schluss zu, dass die erhöhte Aktivität der

Phosphatasen (AcP, AIP) in der Ca-Phytat-Varinate zur Hydrolyse der organischen P-Quelle auf diesem Boden führte und somit zur P-Ernährung der Fruchtarten beitrug.

Auf stark lehmigem Sand konnte selbiges während der Versuchslaufzeit für die untersuchten Fruchtarten nicht nachgewiesen werden. Trotz erhöhter Phosphatase-Aktivität kam es, vermutlich aufgrund des höheren P-Sorptionsvermögens dieses Bodens, nur zu einer geringen P-Nutzung durch die Pflanzen.

### **6 Die Aktivität der sauren Phosphatase im Boden beeinflusste die Ausnutzung von Ca-Phytat unter Trockenstress positiv.**

Unter Trockenstress kam es nach Anbau von Amaranth, Raps und Roggen auf schwach lehmigem Sand zu einem Anstieg der AcP-Aktivität im Vergleich zur optimalen Bewässerung. Es kann daher angenommen werden, dass die Fruchtarten unter Trockenstress als Anpassung an das sinkende P-Niveau in der Pflanze mit einer verstärkten Exsudation von saurer Phosphatase in den Boden reagierten um die P-Aufnahme zu stabilisieren. Die erhöhte AcP-Aktivität im Boden beeinflusste das Pflanzenwachstum unter Trockenstress positiv. Dies bestätigte sich in der positiven Korrelation zwischen der AcP-Aktivität und dem Ertrag (Versuch A:  $r = 0,355^{**}$ ; Versuch C:  $r = 0,408^{**}$ ), der P-Aufnahme (Versuch A:  $r = 0,303^{*}$ ; Versuch C:  $r = 0,451^{**}$ ) und der WNE (Versuch A:  $r = 0,592^{**}$ ; Versuch C:  $r = 0,329^{**}$ ). Bei weiterer Zunahme und Dauer des Trockenstress ist jedoch mit einem Rückgang der AcP-Aktivität zu rechnen.

Aus den aufgeführten Ergebnissen lassen sich die folgenden **Schlussfolgerungen** treffen:

- I. Die P-Nutzung unter Trockenstress ist abhängig von der angebauten Fruchtart.
- II. Die Zufuhr von Ca-Phytat trägt zur P-Ernährung von Pflanzen unter Trockenstress bei, bleibt jedoch hinter der Wirkung einer mineralischen P-Zufuhr zurück.

- III. Zur effizienten Ausnutzung von Ca-Phytat können Böden mit einem geringen P-Sorptionsvermögen empfohlen werden, da die Düngewirkung von Ca-Phytat auf Böden mit einer hohen P-Sorptionskapazität (wie stark lehmigem Sand) verringert ist.

Für zukünftige Untersuchungen lässt sich aufgrund der Ergebnisse und Schlussfolgerungen ein **weiterer Forschungsbedarf** ableiten:

1 In den vorliegenden Gefäßversuchen ließen sich höhere P-Aufnahmen von Amarant und Raps aus Ca-Phytat unter Trockenstress im Vergleich zu Sorghum und Roggen nachweisen. Unter Trockenstressbedingungen ist der Anbau von Fruchtarten mit einer hohen P-Aufnahme jedoch nicht uneingeschränkt empfehlenswert. Hohe P-Entzüge aus dem Oberboden können das P-Angebot für nachfolgende Fruchtarten stark verringern und somit Effekte des Trockenstress weiter erhöhen. Der Anbau von Fruchtarten mit einem hohen P-Mobilisierungsvermögen aus organischen P-Quellen bei geringen Bodenwassergehalten ist aber für weitere wissenschaftliche Untersuchungen von Interesse.

2 Anhand der vorliegenden Untersuchungen lassen sich nur bedingt Aussagen für den Feldanbau ableiten, da in den Gefäßversuchen die morphologischen Wurzelanpassungen (insbesondere für Tiefwurzler wie Sorghum) nicht entsprechen ausgebildet werden konnten. Hier sind weitere Studien im Feldversuch notwendig.

3 Die Auswirkung des Trockenstress auf die Pflanzen ist von ihrem Entwicklungsgrad abhängig. Eine differenzierte Prüfung der Effekte des Trockenstress auf den Ertrag und verschiedene physiologische Pflanzenparameter in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium kann Hinweise auf die Regulierung und Regenerierung des Wasserhaushaltes von Pflanzen geben. Untersuchungen hierzu wären insbesondere in Anhängigkeit von einer gestaffelten organischen und mineralischen P-Zufuhr empfehlenswert.

4 Darüber hinaus sollte die Wirkung praxisüblicher organischer P-Quellen, wie beispielsweise Gülle oder Kompost im Vergleich zu einem mineralischen P-Dünger unter Trockenstress sowie deren Wirkung auf Bodenstruktur und Wasserhaltekapazität des Bodens geprüft werden.

5 Forschungsbedarf liegt außerdem in der Weiterentwicklung existierender Methoden zur Analyse und Quantifizierung von organischen P-Verbindungen im Boden sowie in der konkreteren Zuordnung der hydrolisierenden Enzyme.

## 8 Literaturverzeichnis

- Abel, S.; Ticconi, C.A.; Delatorre, C.A. (2002): Phosphate sensing in higher plants. *Physiol. Plant.* 115, 1-8
- Al-Karaki, G.N.; Clark, R.B.; Sullivan, C.Y. (1995): Effects of phosphorus and water stress levels on growth and phosphorus uptake of bean and sorghum cultivars. *J. Plant Nutr.* 18, 563-578
- Anda, A.; Pinter, L. (1994): Sorghum germination and development as influenced by soil temperature and water content. *Agron. J.* 86, 621-624
- Anonymus (1996): DIN ISO 11465 Deutsche Norm. Bodenbeschaffenheit. Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehaltes auf Grundlage der Masse. Gravimetrisches Verfahren (ISO 11465:1993). Deutsches Institut für Normen e. V.
- Anonymus (2001): Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen. BBCH Monographie. 2. Aufl. Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft
- Anonymus (2004): Düngung - Hinweise und Richtwerte für die landwirtschaftliche Praxis. Leitfaden zur Umsetzung der Düngeverordnung. Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei
- Anonymus (2009): Düngungsniveau und Nährstoffbilanz auf dem Ackerland von MV - Phosphor und Kalium. Fachinformation der zuständigen Stelle für landwirtschaftliches Fachrecht und Beratung (LFB). Ministerium für Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Mecklenburg-Vorpommern
- Asch, F.; Dingkuhn, M.; Sow, A.; Audebert, A. (2005): Drought-induced changes in rooting patterns and assimilate partitioning between root and shoot in upland rice. *Field Crops Res.* 93, 223-236
- Aufhammer, W. (2000): Pseudogetreidearten – Buchweizen, Reismelde und Amarant. Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co, Stuttgart
- Augè, R.M. (2001): Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza* 1, 3-42
- Ashraf, M.; Foolad, M.R. (2007): Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environ Exp. Bot.* 59, 206-216
- Bachmann, S.; Wentzel, S.; Eichler-Löbermann, B. (2011): Codigested dairy slurry as a phosphorus and nitrogen source for *Zea mays* L. and *Amaranthus cruentus* L., *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 174, 908-915

- Baon, J.B.; Smith, S.E.; Alston, A.M. (1994): Growth response and phosphorus uptake of rye with long and short root hairs: Interactions with mycorrhizal infection. *Plant Soil* 167, 247-254
- Barròn, M.C.; de Mejía, E.G. (1998): Comparative study of enzymes related to proline metabolism in tepary bean (*Phaseolus acutifolius*) and common bean (*Phaseolus vulgaris*) under drought and irrigated conditions, and various urea concentrations. *Plant Foods Human Nutr.* 52, 119-132
- Barrow, N.J. (1983): A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. *J. Soil Sci.* 34, 733-750
- Bartels, D.; Sunkar, R. (2005): Drought and salt tolerance in plants. *Crit. Rev. Plant Sci.* 24, 23-58
- Bates, L.S.; Waldren, R.P.; Teare, J.D. (1973): Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant Soil* 39, 205-207
- Bates, T.R.; Lynch, J.P. (2001): Root hairs confer a competitive advantage under low phosphorus availability. *Plant Soil* 236, 243-250
- Belnap, J. (2011): Biological phosphorus cycling in dryland regions. *In: Bünemann, E.K.; Oberson, A.; Frossard, E. (eds.): Phosphorus in action. Biological Processes in soil phosphorus cycling.* Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 169-198
- Bertin, C.; Yang, X.; Weston, L.A. (2003): The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere. *Plant Soil* 256, 67-83
- Bertrand, I.; Hinsinger P.; Jaillard B.; Arvieu, J.C. (1999): Dynamics of phosphorus in the rhizosphere of maize and rape grown on synthetic, phosphated calcite and goethite. *Plant Soil* 211, 111-119
- Bhadoria, P.S.; Steingrobe, B.; Claassen, N.; Liebersbach, H. (2002): Phosphorus efficiency of wheat and sugar beet seedlings grown in soils with mainly calcium, or iron and aluminium phosphate. *Plant Soil* 246, 41-52
- Bieleski, R.L. (1973): Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 24, 225-252
- Blum, A. (2009): Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Res.* 112, 119-123
- Blume, H.P.; Deller, B.; Leschber, R.; Paetz, A.; Schmidt, S.; Wilke, B-M. (2000): *Handbuch der Bodenuntersuchung. Terminologie, Verfahrensvorschriften und Datenblätter. Physikalische, chemische und biologische Untersuchungsverfahren. Gesetzliche Regelwerke.* Wiley-VCH, Weinheim

- Blume, H.P.; Brümmer, G.W.; Horn, R.; Kandeler, E.; Kögel-Knabner, I.; Kretschmar, R.; Stahr, K.; Wilke, B.M. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde - Scheffer/Schachtschabel, 16. Aufl., Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg
- Brandt, C.; Balko, C.; Eichler-Löbermann, B. (2011): Interactive effects of soil water content and phytin supply on phosphorus nutrition of different crops species. *Landbauforsch.* 61, 317-325
- Brooks, A. (1986): Effects of phosphorus nutrition on ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase activation, photosynthetic quantum yield and amount of some calvin-cycle metabolites in spinach leaves. *Aus. J. Plant Physiol.* 13, 221-271
- Brunhold, C.; Rügsegger, A.; Brändle, R. (1996): Stress bei Pflanzen. Wilhelm Fink Verlag, Stuttgart
- Burman, U.; Garg, B.K.; Kathju, S. (2004): Interactive effects of thiourea and phosphorus on clusterbean under water stress. *Biol. Plant.* 48, 61-65
- Burman, U.; Garg, B.K.; Kathju, S. (2009): Effect of phosphorus application on clusterbean under different intensities of water stress. *J. Plant Nutr.* 32, 668-680
- Carvalhais, L.C.; Dennis, P.G.; Fedoseyenko, D.; Hajirezaei, M.R.; Borriss, R.; von Wirèn, N. (2011): Root exudation of sugars, amino acids, and organic acids by maize as affected by nitrogen, phosphorus, potassium, and iron deficiency. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 174, 3-11
- Ceccarelli, S.; Acevedo, E.; Grando, S. (1991): Breeding for yield stability in unpredictable environments - singel traits, interaction between traits, and architecture of genotype. *Euphytica* 56, 169-185
- Celi, L.; Lamacchia, S.; Marsan, F.A.; Barberis, E. (1999): Interaction of inositol hexaphosphate on clay: Adsorption and charging phenomena. *Soil Sci.* 164, 574-585
- Chaves, M.M.; Maroco, J.P.; Pereira, J.S. (2003): Understanding plant responses to drought - from genes to the whole plant. *Funct. Plant Biol.* 30, 239-264
- Chen, C.R.; Condrón, L.M.; Davis, M.R., Sherlock, R.R. (2002): Phosphorus dynamics in the rhizosphere of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and radiata pine (*Pinus radiata* D. Don.). *Soil Biol. Biochem.* 34, 487-499
- Chen, C.R.; Condrón, L.M.; Sinaj, S.; Davis, M.R.; Sherlock, R.R.; Frossard, E. (2003): Effect of plant species on phosphorus availability in a range of grassland soils. *Plant Soil* 256, 115-130

- Claasen, N.; Steingrobe, B. (1999): Mechanistic simulation models of nutrient uptake. *In: Rengel, Z. (eds.): Mineral nutrition of crops, fundamental mechanisms and implications.* Haworth Press, Inc., New York, 327-367
- Cornic, G.; Briantais, J.M. (1991): Partitioning of photosynthetic electron flow between CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> reduction in a C<sub>3</sub> leaf (*Phaseolus-Vulgaris* L.) at different CO<sub>2</sub> concentration and during drought stress. *Planta* 183, 178-184
- Cosgrove, D.J. (1962): Forms of inositol hexaphosphate in soil. *Nature* 194, 1265-1266
- Craswell, E.T.; Vlek, P.L.G.; Tiessen, H. (2010): Peak phosphorus – Implication for soil productivity and global food security. *In: Proceedings 19<sup>th</sup> World Congress of Soil Science: Soil solutions for a changing world 1-6 August, 2010, Brisbane, Australia.* Published on DVD, Warragul, Australia
- Cunhua, S.; Wei, D.; Xiangling, C.; Xinna, X.; Yahong, Z.; Dong, S.; Jianjie, S. (2010): The effects of drought stress on the activity of acid phosphatase and its protective enzymes in pigweed leaves. *Afr. J. Biotechnol.* 9, 825-833
- Dakora, F.D.; Phillips, D.A. (2002): Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant Soil* 245, 35-47
- Dalal, R.C. (1977): Soil organic phosphorus. Band 29 der Reihe *Advances in Agronomy*, Academic Press, San Diego, 83-117
- Davies, W.J.; Zhang, J. (1991): Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 42, 55-76
- Davies, W.J.; Kudoyarova, G.; Hartung, W. (2005): Long-distance ABA signaling and its relation to other signaling pathways in the detection of soil drying and the mediation of the plant's response to drought. *J. Plant Growth Regul.* 24, 285-295
- De Groot, C.J.; Golterman, H.L. (1993): On the presence of organic phosphate in some Camargue sediments: evidence for the importance of phytate. *Hydrobiologia* 252, 117-126
- Delauney, A.J.; Verma, D.P.S. (1993): Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. *Plant J.* 4, 215-223
- Dick, W.A.; Cheng, L.; Wang, P. (2000): Soil acid and alkaline phosphatase activity as pH adjustment indicators. *Soil Biol. Biochem.* 32, 1915-1919

- Ding, X.; Fu, L.; Liu, C.; Chen, F.; Hoffland, E.; Shen, J.; Zhang, F.; Feng, G. (2011): Positive feedback between acidification and organic phosphate mineralisation in the rhizosphere of maize (*Zea Mays* L.). *Plant Soil* 349, 13-24
- Duensing, R.; Stützel, H.; Uptmoor, R. (2011): Blattrollen von Sorghum bei Trockenstress. *In: Mitteilung der GPW, Tagungsband; Ges. f. Pflanzenbauwissenschaften (Hrsg.) 54. Jahrestagung der GPW: Stickstoff in Pflanze, Boden und Umwelt.* 23, 184
- Duncan, R.R. (1991): The influence of soil pH on sorghum grain yields. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 22, 1605-1611
- Dunger, W.; Fiedler, H.J. (1997): *Methoden der Bodenbiologie.* 2. Aufl., Gustav Fischer Verlag, Jena
- Eghballa, B.; Power, J.F. (1999): Phosphorus- and nitrogen-based manure and compost applications: Corn production and soil phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 895-901
- Ehlers, W. (1996): *Wasser in Boden und Pflanze. Dynamik des Wasserhaushalts als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag.* Ulmer Verlag, Stuttgart
- Eichler, B.; Caus, M.; Schnug, E.; Köppen, D. (2004): Soil acid and alkaline phosphatase activities in regulation to crop species and fungal treatment. *Landbauforsch.* 54, 1-5
- Eichler-Löbermann, B.; Schiemenz, K.; Makadi, M.; Vago, I.; Köppen, D. (2008): Nutrient cycling by using residues of bioenergy production - II Effects of biomass ashes on plant and soil parameters. *Cereal. Res. Commun.* 36, 1259-1262
- Eivazi, F.; Tabatabai, M.A. (1977): Phosphatases in soil. *Soil Biol. Biochem.* 9, 167-172
- Entrup, N.L.; Oehmichen, J. (2000): *Lehrbuch des Pflanzenbaues. Band 1: Grundlagen.* Verlag Th. Mann, Bonn
- Escudero, N.L.; Albarracin, G.; Fernández, S.; de Arellano, L.M.; Mucciarelli, S. (1999): Nutrient and antinutrient composition of *Amaranthus muricatus*. *Plant Food Human Nutr.* 54, 327-336
- Fatima, S.; Farooqi, A.H.; Sharam, S. (2002): Physiological and metabolic responses of different genotypes of *Cymbopogon martinii* and *C. winterianus* to water stress. *Plant Growth Regul.* 37, 143-149
- Findenegg, G.R.; Nelemans, J.A. (1993): The effect of phytase on the availability of P from *myo*-inositol hexaphosphate (phytate) for maize roots. *Plant Soil* 154, 189-196

- Föhse, D.; Claassen, N.; Jungk, A. (1988): Phosphorus efficiency of plants. *Plant Soil* 110, 101-109
- Garcia, I.; Mendoza, R.; Pomar, M.C. (2008): Deficit and excess of soil water impact on plant growth of *Lotus tenuis* by affecting nutrient uptake and arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Plant Soil* 304, 117-131
- Garg, B.K.; Burman, U.; Kathju, S. (2004): The influence of phosphorus nutrition on the physiological response of moth bean genotypes to drought. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 167, 503-508
- Ge, T.D.; Sui, F.G.; Nie, S.; Sun, N.B.; Xiao, H.; Tong, C.L. (2010): Differential responses of yield and selected nutritional compositions to drought stress in summer maize grains. *J. Plant Nutr.* 33, 1811-1818
- Gerke, J.; Römer, W.; Beißner, L. (2000): The quantitative effect of chemical phosphate mobilization by carboxylate anions on P uptake by a single root. II: The importance of soil and plant parameters for uptake of mobilized P. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163, 213-219
- Ghannoum, O. (2009): C4 photosynthesis and water stress. *Ann. Bot.* 103, 635-644
- Giaveno, C.; Celi, L.; Richardson, A.E.; Simpson, R.J.; Barberis, E. (2010): Interaction of phytases with minerals and availability of substrate affect the hydrolysis of inositol phosphates. *Soil Biol. Biochem.* 42, 491-498
- Hageström, J.; James, W.M.; Skene, K.R. (2001): A comparison of structure, development and function in cluster roots of *Lupinus albus* L. under phosphate and iron stress. *Plant Soil* 232, 81-90
- Hanus, H.; Heyland, K.U.; Keller, E.R. (2008): *Handbuch des Pflanzenbaues 2. Getreide und Futtergräser.* E. Ulmer Verlag, Stuttgart
- Hare, P.D.; Cress, W.A.; Van Staden, J. (1998): Dissecting the roles of osmolyte accumulation during stress. *Plant Cell Environ.* 21, 535-553
- Hartmann, A. (2012): Sorghum als Biogassubstrat – Ertragspotential bei optimaler und reduzierter Wasserverfügbarkeit. *In: Mitteilungen der GPW, Tagungsband; Ges. f. Pflanzenbauwissenschaften (Hrsg.) 55. Jahrestagung der GPW: Bodenfruchtbarkeit – Bedeutung und Bestimmung in Pflanzenbau und Bodenkunde.* 24, 238-239
- Hatch, M.D. (1987): C<sub>4</sub> photosynthesis: A unique blend modified biochemistry, anatomy and ultrastructure. *Biochem. Biophys.* 895, 81-106
- Hayes, J.E.; Richardson, A.E.; Simpson R.J. (2000): Components of organic phosphorus in soil extracts that are hydrolysed by phytase and acid phosphatase. *Biol. Fertil. Soil* 32, 279-286

- Hendriks, L.; Claassen, N.; Jungk, A. (1981): Phosphatverarmung des wurzelnahen Bodens und Phosphataufnahme von Mais und Raps. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. 144, 486-499
- Herbien, S.A.; Neal, J.L. (1990): Soil pH and phosphatase activity. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 21, 439-456
- Heyland, K.-U.; Hanus, H.; Keller, E.R. (2006): Handbuch des Pflanzenbaues 4: Ölfrüchte, Faserpflanzen, Arzneipflanzen und Sonderkulturen. E. Ulmer Verlag, Stuttgart
- Hinsinger, P. (2001): Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. Plant Soil 237, 173-195
- Horst, W.J.; Abdou, M.; Wiesler, F. (1996): Differences between wheat cultivars in acquisition and utilization of phosphorus. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. 159, 155-161
- Hu, Y.; Schmidhalter, U. (2001): Effects of salinity and macronutrient levels on micronutrients in wheat. J. Plant. Nutr. 24, 273-281
- Hu, Y.; Schmidhalter, U. (2005): Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants. J. Plant Nutr. Soil Sci. 168, 541-549
- Huerta-Ocampo, J.A.; Leòn-Galván, M.F.; Ortega-Cruz, L.B.; Barrera-Pacheca, A.; De Leòn-Rodríguez, A.; Mendoza-Hernández, G.; Barba de la Rosa, A. P. (2011): Water stress induces up-regulation of DOF1 and MIF1 transcription factors and down-regulation of proteins involved in secondary metabolism in amaranth roots (*Amaranthus hypochondriacus* L.). Plant Biol. 13, 472-482
- Huesco, S.; Hernández, T.; García, C. (2011): Resistance and resilience of the soil microbial biomass to severe drought in semiarid soils: The importance of organic amendments. Appl. Soil Ecol. 50, 27-36
- Ivanov, I.; Sauerbeck, D. (1971): Festlegung, Umwandlung und Aufnehmbarkeit von Phytin-Phosphor im Boden. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. 129, 113-119
- Jacob, D.; Göttel, H.; Kotlarsk, I.S.; Lorenz, P.; Sieck, K. (2008): Climate Change. Klimaauswirkungen und Anpassungen in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Nr. 11/2008, Umweltbundesamt
- Jasinski, S.M. (2012): Phosphate rock. Mineral Commodity Summaries, U.S. Geological Survey.  
URL:[http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate\\_rock/mcs-2012-phosp.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/mcs-2012-phosp.pdf) (04.03.2012)

- Jasinski, S.M. (2013): Phosphate rock. Mineral Commodity Summaries, U.S. Geological Survey.  
URL: [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate\\_rock/mcs-2013-phosp.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/mcs-2013-phosp.pdf) (20.02.2013)
- Javed, N.; Ashraf, M.; Akram, N.A.; Al-Qurainy, F. (2011): Alleviation of adverse effect of drought stress on growth and some potential physiological attributes in maize (*Zea mays* L.) by seed electromagnetic treatment. *Photochem. Photobiol.* 87, 1354-1362
- Jin, J.; Wang, G.; Liu, X.; Pan, X.; Herbert, S.J.; Tang, C. (2006): Interaction between phosphorus nutrition and drought on grain yield, and assimilation of phosphorus and nitrogen in two soybean cultivars differing in protein concentration in grains. *J. Plant Nutr.* 29, 1433-1449
- Jones, C.A.; Jacobsen, J.S.; Wraith, J.M. (2005): Response of Malt Barley to phosphorus fertilization under drought conditions. *J. Plant Nutr.* 28, 1605-1617
- Jungk, A.; Claassen, N. (1989): Availability in soil and acquisition by plants as the basis for phosphorus and potassium supply to plants. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* 152, 151-157
- Khalili, A.; Akbari, N.; Chaichi, M.R. (2008): Limited irrigation and phosphorus fertilizer effects on yield and yield components of grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. var. Kima). *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.* 3, 697-702
- Kluge, R. (2007): Kompostanwendung im Pflanzenbau hilft bei Trockenstress. Mit Kompost Phosphor und Kali sparen. *Getreide Magazin, Sonderdruck* 4/2007
- Kratz, S.; Schnug, E. (2008): Agronomische Bewertung von Phosphat-Düngern. Ressourcen schonender Einsatz von Phosphor in der Landwirtschaft, Symposium am 10./11.11.2008 in Braunschweig (Braunschweiger Nährstofftage des JKI-Institut f. Pflanzenbau und Bodenkunde)
- Krey, T.; Baum, C.; Ruppel, S.; Eichler-Löbermann, B. (2011): Interactive effects of plant growth-promoting rhizobacteria and organic fertilization on P nutrition of *Zea mays* L. and *Brassica napus* L.. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 174, 1-12
- Kuznetsov, V.I.V.; Shevyakova, N.I. (1999): Proline under stress: biological role, metabolism, and regulation. *Russ. J. Plant Physiol.* 46, 305-320
- Lambers, H.; Chapin, F.S.; Pons, T.L. (1998): *Plant physiological ecology.* Springer Verlag, New York
- Larcher, W. (1994): *Ökophysiologie der Pflanzen.* 5. Auflage, Ulmer Verlag, Stuttgart

- Larcheveque, M.; Ballini, C.; Korboulewsky, N.; Montes, N. (2006): The use of compost in afforestation of Mediterranean areas: Effects on soil properties and young tree seedlings. *Sci. Total Environ.* 369, 220-230
- Leitner, D.; Klepsch, S.; Bodner, G.; Schnepf, A. (2010): A dynamic root system growth model based on L-Systems. *Tropisms and coupling to nutrient uptake from soil. Plant Soil* 332, 177-192
- Li, H.; Shen, J.; Zhang, F.; Clairotte, M.; Drevon, J.J.; Cadre, E.L.; Hinsinger, P. (2008): Dynamics of phosphorus fractions in the rhizosphere of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and durum wheat (*Triticum turgidum durum* L.) grown in monocropping and intercropping systems. *Plant Soil* 312, 139-150
- Li, S.M.; Li, L.; Zhang, F.S.; Tang, C. (2004): Acid phosphatase role in chickpea/maize intercropping. *Ann. of Bot.* 94, 297-303
- Liang, L.Z.; Shen, R.F.; Yi, X.Y.; Zhao, X.Q.; Chen, Z.C.; Chen, R.F.; Dong, X.Y. (2009): The phosphorus requirement of *Amaranthus mangostanus* L. excess the change point of P loss. *Soil Use and Management* 25, 152-158
- Liu, F.; Stützel, H. (2002): Leaf water relations of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.). *Eur. J. Agron.* 16, 137-150
- Liu, F.; Stützel, H. (2004): Biomass partitioning, specific leaf area and water use efficiency of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to drought stress. *Sci. Hortic.* 102, 15-27
- Lookmann, R.; Vandeweert, N.; Merckx, R.; Vlassak, K. (1995): Geostatistical assessment of the regional distribution of phosphate sorption capacity parameters (Feox and Alox) in northern Belgium. *Geoderma* 66, 285-296
- Lösch, R. (2001): *Wasserhaushalt der Pflanzen*. Wilhelm Fink Verlag, München
- Loutfy, N.; El-Tayeb, M.A.; Hassanen, A.M.; Moustafa, M.F.M.; Sakuma, Y.; Inouhe, M. (2012): Changes in the water status and osmotic solute contents in response to drought and salicylic acid treatments in four different cultivars of wheat (*Triticum aestivum*). *J. Plant Res.* 125, 173-184
- Lung, S.C.; Lim, B.L. (2005): Assimilation of phytate-phosphorus by the extracellular phytase activity of tobacco (*Nicotiana tabacum*) is affected by the availability of soluble phytate. *Plant Soil* 279, 187-199
- Ma, B.; Zhou, Z.Y.; Zhang, C.P.; Zhang, G.; Hu, Y.J. (2009): Inorganic phosphorus fraction in the rhizosphere of xerophytic shrubs in the Alxa Desert. *J. Arid Environ.* 73, 55-61

- Ma, Z.; Bielenberg, D.G.; Brown, K.M.; Lynch, J.P. (2001): Regulation of root hair density by phosphorus availability in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell Environ.* 24, 459-467
- Mafakheri, A.; Siosemardeh, A.; Bahramnejad, B. (2010): Effect of drought stress on yield, proline and chlorophyll contents in three chickpea cultivars. *Aust. J. Crop Sci.* 4, 580-585
- Mahajan, S.; Tuteja, N. (2005): Cold, salinity and drought stresses: An overview. *Arch. Biochem. Biophys.* 444, 139-158
- Majeed, A.; Salim, M.; Bano, A.; Asim, M.; Hadee, M. (2011): Physiology and productivity of rice crop influenced by drought stress induced at different developmental stages. *Afr. J. Biotechnol.* 10, 5121-5136
- Man, D.; Bao, Y.X.; Han, L.B.; Zhang, X. (2011): Drought tolerance associated with proline and hormone metabolism in two tall fescue cultivars. *Hort. Sci.* 46, 1027-1032
- Marschner, H. (1998): Role of root growth, arbuscular mycorrhiza, and root exudates for the efficiency in nutrient acquisition. *Field Crops Res.* 56, 203-207
- Martin, J.K.; Wicken, A.J. (1966): Soil organic phosphorus: IV. Fractionation of organic phosphorus in alkaline soil extracts and the identification of inositol phosphates. *New Zealand J. Agri. Res.* 9, 529-535
- Mc Kercher, R.B.; Anderson, G. (1989): Organic phosphate sorption by neutral and basic soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 20, 723-732
- Mohr, H.; Schopfer, P. (1992): *Pflanzenphysiologie*. 4. Aufl, Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- Montanaro, G.; Dichio, B.; Xiloyannis, C. (2007): Respons of photosynthetic machinery of field-grown kiwifruit under Mediterranean conditions during drought and re-watering. *Photosynthetica* 45, 533-540
- Müller, T.; Lüttschwager, D.; Lentzsch, P. (2010): Recovery from drought stress at the shooting stage in oilseed rape (*Brassica napus*). *J. Agron. Crop. Sci.* 196, 81-89
- Murphy, J.; Riley, J.P. (1962): A modified single solution method for the determination of phosphate in natural water. *Anal. Chim. Acta.* 27, 31-36
- Nelsen, C.E.; Safir, G.R. (1982): Increased drought tolerance of mycorrhizal onion plants caused by improved phosphorus nutrition. *Planta* 154, 407-413

- Nuruzzaman, M.; Lambers, H.; Bolland, M.D.A.; Veneklaas, E.J. (2006): Distribution of carboxylates and acid phosphatase and depletion of different phosphorus fractions in the rhizosphere of a cereal and three grain legumes. *Plant Soil* 281, 109-120
- Ojo, O.D.; Akinrinde, E.A.; Akoroda, M.O. (2010): Residual effects of phosphorus sources in grain amaranth production. *J. Plant Nutr.* 33, 770-783
- Page, A.L.; Miller, R.H.; Keeney, D.R. (1982): *Methods of soil analysis. Chemical and microbiological properties.* 2nd edn., Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin
- Pascual, I.; Antolin, M.C.; Garcia, C.; Polo, A.; Sánchez-Díaz, M. (2007): Effect of water deficit on microbial characteristic in soil amended with sewage sludge or inorganic fertilizer under laboratory conditions. *Bioresour. Technol.* 98, 29-37
- Pinkerton, A.; Simpson, J.R. (1986): Interaction of surface drying and subsurface nutrient affecting plant-growth on acid soil profiles from an old pasture. *Aust. J. Exp. Agric.* 226, 681-689
- Quarrie, S.A.; Stojanović, J.; Pekić, S. (1999): Improving drought resistance in small-grained cereals: A case study, progress and prospects. *Plant Growth Regul.* 29, 1-21
- Ramaekers, L.; Remans, R.; Rao, I.M.; Blair, M.W.; Vanderleyden, J. (2010): Strategies for improving phosphorus acquisition efficiency of crop plant. *Field Crops Res.* 117, 169-176
- Richardson, A.E.; Lynch, J.P.; Ryan, P.R.; Delhaize, E.; Smith, F.A.; Smith, S.E.; Harvey, P.R.; Ryan, M.H.; Veeneklaas, E.J.; Lambers, H.; Oberson, A.; Culvenor, R.A.; Simpson, R.J. (2011): Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. *Plant Soil* 349, 121-156
- Rodriguez, D.; Oyarzabal, M. (1996): Phosphorus nutrition and water stress tolerance in wheat plants. *J. Plant Nutr.* 19, 29-39
- Römer, W. (2006): Neuere Erkenntnisse zur Phosphataufnahme von Pflanzen-Literaturbefunde. *Arch. Agron. Soil Sci.* 52, 1-17
- Rosemarin, A.; de Bruijne, G.; Caldwell, I. (2009): Peak phosphorus: The next inconvenient truth. *The Broker* 15, 6-9  
URL: [www.thebrokeronline.eu/en/Magazine/articles/Peak-phosphorus](http://www.thebrokeronline.eu/en/Magazine/articles/Peak-phosphorus) (10.12.2012)
- Sardans, J.; Peñuelas, J.; Estiarte M. (2006): Warming and drought alter soil phosphatase activity and soil P availability in a Mediterranean shrubland. *Plant Soil* 289, 227-238

- Sardans, J.; Peñuelas, J.; Estiarte, M. (2007): Seasonal patterns of root-surface phosphatase activities in a Mediterranean shrubland. Responses to experimental warming and drought. *Biol. Fertil. Soils* 43, 779-786
- Sardans, J.; Peñuelas, J.; Prieto, P.; Estiarte, M. (2008): Drought and warming induced changes in P and K concentration and accumulation in plant biomass and soil in a Mediterranean shrubland. *Plant Soil* 306, 261-271
- Sattelmacher, B.; Horst, W.J.; Becker, H.C. (1994): Factors that contribute to genetic variation for nutrient efficiency of crop plants. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* 157, 215-224
- Saunders, W.M.H.; Williams, E.G. (1955): Observation on the determination of total organic phosphorus in soils. *Soil Sci.* 6, 254-267
- Schachtman, D. P.; Reid, R.J.; Ayling, S.M. (1998): Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. *Plant Physiol.* 166, 447-453
- Schachtschabel, P.; Blume, H.P.; Brümmer, G.; Hartge, K.H.; Schwertmann, U. (1998): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 14. Aufl., Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- Schiemenz, K.; Eichler-Löbermann, B. (2010): Biomass ashes and their phosphorus fertilizing effect on different crops. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 87, 471-482
- Schilling, G. (2000): *Pflanzenernährung und Düngung*. Ulmer Verlag, Stuttgart
- Schinner, F.; Sonnleitner, R. (1996): *Bodenökologie: Mikrobiologie und Bodenenzymatik. Grundlagen, Klima, Vegetation und Bodentyp*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- Schittenhelm, S. (2010): Effect of drought stress on yield and quality of maize/sunflower and maize/sorghum intercrops for biogas production. *J. Aronomy Crop. Sci.* 196, 253-261
- Schoumans, O.F. (2000): Determination of the degree of phosphate saturation in non-calcareous soils. *Southern Cooperative Series Bulletin* 396, 31-34
- Schreiber, U. (1986): Detection of rapid induction kinetics with a new type of high-frequency modulated fluorometer. *Photosynth. Res.* 9, 261-272
- Schwertmann U. (1964): Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalatlösung. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* 105, 194-202
- Sharam, A.D.; Kaur, P. (2008): Drought-stress induced changes in the expression of acid phosphatases in drought tolerant and susceptible cultivars of wheat. *World J. Agric. Sci.* 4, 471-475

- Shubhra, T.; Dayal, J.; Goswami, C.L.; Munjal, R. (2004): Influence of phosphorus application on water relations, biochemical parameters and gum content in cluster bean under water deficit. *Biol. Plant* 48, 445-448
- Sinclair, T.R.; Vadez, V. (2002): Physiological traits for crop yield improvement in low N and P environments. *Plant Soil* 245, 1-15
- Sing, B.R.; Sing, D.P. (1995): Agronomic and physiological responses of sorghum, maize and pearl millet to irrigation. *Field Crops Res.* 42, 57-67
- Singh, D.K.; Sale, P.W.G. (1998): Phosphorus supply and growth of frequently defoliated white clover (*Trifolium repens* L.) in dry soil. *Plant Soil* 205, 155-162
- Sinsabaugh, R.L.; Lauber, C.L.; Weintraub, M.N.; Ahmed, B.; Allison, S.D.; Crenshaw, C.; Contosta, A.R.; Cusack, D.; Frey, S.; Gallo, M.E.; Gartner, T.B.; Hobbie, S.E.; Holland, K.; Keeler, B.L.; Powers, J.S.; Stursova, M.; Takacs-Vesbach, C.; Waldrop, M.P.; Wallenstein, M.D.; Zak, D.R.; Zeglin, L.H. (2008): Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale. *Ecol. Lett.* 11, 1252-1264
- Smith, F.W. (2002): The phosphate uptake mechanism. *Plant Soil* 245, 105-114
- Smith, F.W.; Mudge, S.R.; Rae, A.L.; Glassop, D. (2003): Phosphate transport in plants. *Plant Soil* 248, 71-83
- Somal, T.L.C.; Yapa, P.A.J. (1998): Accumulation of proline in cowpea under nutrient, drought, and saline stresses. *J. Plant Nutr.* 21, 2465-2473
- Song, C.J.; Ma, K.M.; Qu, L.Y.; Liu, Y.; Xu, X.L.; Fu, B.J.; Zhong, J.F. (2010): Interactive effects of water, nitrogen and phosphorus on the growth, biomass partitioning and water-use efficiency of *Bauhinia faberi* seedlings. *J. Arid Environ.* 74, 1003-1012
- Steffens, D.; Leppin, T.; Luschin-Ebengreuth, N.; Yang, Z.M.; Schubert, S. (2010): Organic soil phosphorus considerably contributes to plant nutrition but is neglected by routine soil-testing methods. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 173, 765-771
- Stoddard, F.L.; Balko, C.; Erskine, W.; Khan, H.R.; Link, W.; Sarker, A. (2006): Screening techniques and sources of resistance to abiotic stresses in cool-season food legumes. *Euphytica* 147, 167-184
- Sulas, L.; Piluzza, G.; Rochon, J.J.; Goby, J.P.; Greef, J.M.; Sölter, U.; Headon, D.; Scholefield, D. (2012): Assessing the potential for nutrient leaching from beneath grazed leguminous swards at four European sites. *Grass Forage Sci.* 67, 320-336

- Suriyagoda, L.D.B.; Ryan, M.H.; Renton, M.; Lambers, H. (2011): Above- and below-ground interaction of grass and pasture legume species when grown together under drought and low phosphorus availability. *Plant Soil* 348, 281-297
- Tabatabai, M.A.; Bremner, J. M. (1969): Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biol. Biochem.* 1, 301-307
- Tarafdar, J.C.; Claassen, N. (1988): Organic phosphorus compounds as a phosphorus source for higher plants through the activity of phosphatases produced by plant roots and microorganisms. *Biol. Fertil. Soils* 5, 308-312
- Tarafdar, J.C.; Marschner, H. (1994): Phosphatase activity in the rhizosphere and hyphosphere of VA-mycorrhizal wheat supplied with inorganic and organic phosphorus. *Soil Biol. Biochem.* 26, 387-395
- Tarafdar, J.C.; Claassen, N. (2005): Preferential utilisation of organic and inorganic sources of phosphorus by wheat plant. *Plant Soil* 275, 285-293
- Tester, M.; Bacic, A. (2005): Abiotic stress tolerance in grasses. From model plants to crop plants. *Plant Physiol.* 137, 791-793
- Thalmann, A. (1968): Zur Methodik der Bestimmung der Dehydrogenaseaktivität im Boden mittels Triphenyltetrazoliumchlorid (TTC). *Landwirtsch. Forsch.* 21, 249-258
- Tissen, H.; Ballester, M.V.; Salcedo, I. (2011): Phosphorus and global change. *In: Bünemann, E.K.; Oberson, A.; Frossard E. (eds.): Phosphorus in action. Biological Processes in soil phosphorus cycling.* Springer Verlag Berlin Heidelberg, 459-471
- Turner, B.L. (1985): Changes in the phosphorus content of *Capsicum annuum* leaves during water-stress. *J. Plant Physiol.* 121, 429-439
- Turner, B.L.; Paphazy, M.J.; Haygarth, P.M.; Mc Kelvie, I.D. (2002): Inositol phosphates in the environment. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 357, 449-469
- Turner, B.L.; Mahie, N.; Condon, L.M. (2003a): Quantification of myo-inositol hexakisphosphate in alkaline soil extracts by solution <sup>31</sup>P NMR spectroscopy and spectral deconvolution. *Soil Sci.* 168, 469-478
- Turner, B.L.; Cade-Menun, B.J.; Westermann, D.T. (2003b): Organic phosphorus composition and potential bioavailability in semi-arid arable soils of the Western United States. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67, 1168-1179.
- Turner, B.L.; Cade-Menun, B.J.; Condon, L.M.; Newman, S. (2005): Extraction of soil organic phosphorus. *Talanta* 66, 294-306

- Tuteja, N. (2009): Cold, salinity, and drought stress. *In*: Hirt, H. (eds.): Plant stress biology. From genomics to systems biology. Wiley-Blackwell Verlag, Weinheim, 137-159
- Vamerali, T.; Saccomani, M.; Bona, S.; Mosca, G.; Guarise, M.; Ganis, A. (2003): A comparison of root characteristics in relation to nutrient and water stress in two maize hybrids. *Plant Soil* 255, 157-167
- Van der Paauw, F. (1971): An effective water extraction method for the determination of plant-available soil phosphorus. *Plant Soil* 34, 467-481
- Vance, C.P.; Uhde-Stone, C.; Allan, D.L. (2003): Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a non-renewable resource. *New Phytol.* 157, 423-44
- Vassilev, N.; Eichler-Löbermann, B.; Vassileva, M. (2012): Stress-tolerant P-solubilizing microorganisms. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 95, 851-859
- Walker, T.S.; Basis, H.P.; Grotwold E.; Vivanco, J.M. (2003): Root exudation and rhizosphere biology. *Plant Physiol.* 132, 44-51
- Wang, X.; Tang, C.; Guppy, C.N.; Sale, P.W.G. (2008): Phosphorus acquisition characteristics of cotton (*Gossypium hirsutum* L.), wheat (*Triticum aestivum* L.) and white lupin (*Lupinus albus* L.) under P deficit conditions. *Plant Soil* 312, 117-128
- Waraich, E.A.; Ahmad, R.; Saifullah; Ashraf, M.Y.; Ehsanullah (2011): Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress plants. *Aust. J. Crop Sci.* 5, 764-777
- Wechsung, F.; Gerstengarbe, F.W.; Lasch, P.; Lüttger, A. (2008) Die Ertragsfähigkeit Ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel. Potsdam-Institut für Klimaforschung
- Wenkel, K.-O.; Mirschel, W.; Berg, M.; Nendel, C.; Wieland, R.; Köstner, B. (2011): Klimawandel: Fluch oder Segen für die Landwirtschaft. Forschungsreport Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz 2, 4-8
- Wittenmayer, L.; Merbach, W. (2005): Plant responses to drought and phosphorus deficiency: contribution of phytohormones in root-related processes. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168, 531-540
- Xu, Z.Z.; Zhou, G.S. (2006): Nitrogen metabolism and photosynthesis in *Leymus chinensis* in response to long-term soil drought. *J. Plant Growth Regul.* 25, 252-266
- Yadav, R.S.; Tarafdar, J.C. (2001): Influence of organic and inorganic phosphorus supply on the maximum secretion of acid phosphatase by plants. *Biol. Fertil. Soils* 34, 140-143

- Zander, D. (2012): Ergebnisse mehrjähriger Sortenversuche Sorghumhirsen. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Schriftreihe, Heft 24/2012
- Zegada-Lizarazu, W., Iijima, M. (2004): Hydrogen stable isotope analysis of water acquisition ability of deep roots and hydraulic lift in sixteen food crop species. *Plant Prod. Sci.* 7, 427-434
- Zegada-Lizarazu, W.; Zatta, A.; Monti, A. (2012): Water uptake efficiency and above- and belowground biomass development of sweet sorghum and maize under different water regimes. *Plant Soil* 351, 47-60
- Zhang, F.S.; Ma, J.; Cao, Y.P. (1997): Phosphorus deficiency enhances root exudation of low-molecular weight organic acids and utilization of sparingly inorganic phosphates by radish (*Raphanus sativus* L.) and rape (*Brassica napus* L.) plants. *Plant Soil* 196, 261-264.
- Zhu, Y.G.; He, Y.Q.; Smith, S.E.; Smith, F.A. (2002): Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) has high capacity to take up phosphorus (P) from a calcium (Ca)-bound source. *Plant Soil* 239, 1-8
- Zorn, W.; Schröter, H.; Wagner, S.; Heubach, M. (2012): Phosphordynamik im Boden nach langjähriger pflugloser Bodenbearbeitung – Konsequenzen für die P-Düngung im Trockengebiet. In: Internationale wissenschaftliche Konferenz; Hochschule Anhalt (Hrsg.): Nährstoff- und Wasserversorgung der Pflanzenbestände unter den Bedingungen der Klimaerwärmung. 18./19. 10. 2012, Bernburg-Strenzfeld, 10-11

## Erklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Doktorarbeit mit dem Titel:

*„Wechselseitiger Einfluss des Wassergehaltes des Bodens und der Phytin-Zufuhr auf die Phosphor-Ernährung von Pflanzen“*

selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst habe.

Rostock, den 06.06.2013

Christine Brandt

## **Danksagung**

Vielen Dank an alle, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen meiner Dissertation beigetragen haben.

Frau PD Dr. habil. Eichler-Löbermann danke ich für die Überlassung des Themas sowie für die Betreuung und die Begutachtung der Arbeit. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr. Greef sowie Herrn Prof. Dr. Stützel für die Erstellung der Gutachten.

Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Uptmoor für die konstruktiven Anmerkungen zur Diskussion und die Unterstützung bei der Vorbereitung der Präsentation. Frau Dr. Balko danke ich für die Möglichkeit Prolin-Analysen am JKI durchführen zu können sowie Herrn Prof. Dr. Schubert hinsichtlich der intensiven Unterstützung bei den Messungen zur Chlorophyllfluoreszenz.

Vielen, vielen Dank an Silvia Bachmann und Telse Vogel für das Lesen des Manuskriptes, die strukturgebenden Hinweise und die unermüdliche Diskussions- und Motivationsbereitschaft. Ein herzliches Dankeschön auch an Claudia, Steffi und Waed für die Tipps zur Präsentation und die zahlreichen Ermunterungen.

Mein ganz besonderer Dank gilt auch dem Laborteam Frau Claus, Frau Wego und Herrn Breuel für die Mithilfe bei der Durchführung der Analysen, für den einzigartigen Rückhalt und das Rückgrat.

Vielen Dank an Anke, Bianca und Tanja für die Freundschaft und die Normalität.

Tausend Dank an Johanna-Marie und Thomas für die Liebe, die Geduld und das Verständnis.

Mein ganz besonderer Dank gilt ebenfalls meinen Eltern für die immer währende Unterstützung in den unterschiedlichen Lebensabschnitten.

„Ein Freund ist ein Geschenk, das man sich selber macht.“

ROBERT LOUIS STEVENSON

## Wissenschaftlicher Lebenslauf

Name: Christine Brandt  
Geburtsdatum: 03.02.1974  
Geburtsort: Greifswald

### Arbeitserfahrung:

seit 09/2008	Universität Rostock, AUF Professur für Pflanzenbau wissenschaftliche Mitarbeiterin
01/2005 bis 08/2008	NABU Mittleres Mecklenburg e. V. Projektleiterin Umweltbildungsmanagement
09/2002 bis 12/2004	Erziehungsurlaub
01/2000 bis 10/2003	NORIKA GmbH, Groß Lüsewitz Leiterin des <i>in-vitro</i> Labors
01/1999 bis 01/2000	Neubrandenburger Saat- und Pflanzgut GmbH Mitarbeiterin ökologischer Getreidehandel

### Schul- und Berufsbildung

09/2004 bis 03/2007	Weiterbildendes Fernstudium „Umwelt & Bildung“ Universität Rostock Abschluss Master of Arts
09/1993 bis 10/1998	Studium der Agrarökologie, Universität Rostock Abschluss als Diplom Agraringenieur
09/1990 bis 07/1992	Abitur am Friderico Francizceum, Gymnasium zu Doberan

**Publikationen (Auswahl):**

- Brandt, C.; Eichler-Löbermann, B. (2012): Wechselseitiger Einfluss des Wassergehaltes des Bodens und der Phytin-Zufuhr auf die Phosphor-Ernährung von Pflanzen. *In: Mitteilungen der GPW, Tagungsband; Ges. f. Pflanzenbauwissenschaften (Hrsg.): 55. Jahrestagung der GPW: Bodenfruchtbarkeit – Bedeutung und Bestimmung in Pflanzenbau und Bodenkunde. 24.-27.09.2012, Berlin, 122-123*
- Brandt, C.; Eichler-Löbermann, B. (2012): Wechselseitiger Einfluss des Wassergehaltes des Bodens und der Phytin-Zufuhr auf die Phosphor-Ernährung von Pflanzen. *In: Internationale wissenschaftliche Konferenz; Hochschule Anhalt (Hrsg.): Nährstoff- und Wasserversorgung der Pflanzenbestände unter den Bedingungen der Klimaerwärmung. 18./19. 10. 2012, Bernburg-Strenzfeld, 10-11*
- Brandt, C.; Balko, C.; Eichler-Löbermann, B. (2011): Interactive effects of soil water content and phytin supply on phosphorus nutrition of different crops species. *Landbauforsch. 61, 317-325*
- Caus, M.; Brandt, C.; Eichler-Löbermann, B. (2010): Enzyme activities and their effect on P supply of different C3 and C4 crops under drought stress. *In: Universidad Central Santa Clara (eds.): IX Simposio International de Biotecnologia Vegetal. 20.-22.04.2010, Santa Clara (Cuba), 2-2*

## **Thesen zur Dissertationsschrift**

Thema:

### **„Wechselseitiger Einfluss des Wassergehaltes des Bodens und der Phytin-Zufuhr auf die Phosphor-Ernährung von Pflanzen“**

vorgelegt von: Dipl. agr. Ing. Christine Brandt M.A.

Die effiziente Nutzung begrenzter Ressourcen wie Wasser und P ist ausschlaggebend für einen nachhaltigen Pflanzenbau. Vor dem Hintergrund des Klimawandels ist auch in Mitteleuropa mit Ertragsrückgängen infolge von Trockenperioden zu rechnen. Unter Trockenstress kommt es zudem häufig zu Nährstoffmangel. Das betrifft wegen der geringen Mobilität im Boden insbesondere das für die Pflanze essentielle Element Phosphor (P).

Um die P-Versorgung von Boden und Pflanze nachhaltig zu sichern, sind eine bilanzierte P-Düngung sowie die Nutzung der bereits im Stoffkreislauf vorhandenen P-Ressourcen erforderlich. Insbesondere die optimale Ausnutzung organischer P-Quellen wird für den Pflanzenbau weiter an Bedeutung gewinnen. Phytate machen mit ca. 60 % den Hauptanteil des organischen P im Boden aus. Zudem kann Phytin dem Boden über Wirtschaftsdünger zugeführt werden.

Pflanzen verfügen über unterschiedliche Anpassungsmechanismen um Wasser- und P-Mangel entgegen zu wirken. Zudem trägt eine ausreichende P-Ernährung bei zunehmender Trockenheit zur Ertragssicherung bei. Der positive Einfluss mineralischer P-Düngung zur Erhöhung der Trockentoleranz wurde bereits in verschiedenen Studien nachgewiesen. Dagegen wurde die Effektivität der Wirkung von Phytin unter Trockenstress im Vergleich zu einer mineralischen P-Zufuhr bisher nur unzureichend untersucht.

Mit dem Ziel ein besseres Verständnis über die Eignung von organischen P-Quellen im Boden für die P-Ernährung von Pflanzen unter Trockenstress zu gewinnen wurden in der vorliegenden Arbeit drei Gefäßversuche angelegt und der wechselseitige Einfluss des Wassergehaltes des Bodens und der Zufuhr von Ca-Phytat auf die P-Ernährung von Sorghum, Amarant, Raps und Roggen untersucht.

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit können die folgenden Thesen abgeleitet werden:

1. Spezifische Anpassungsmechanismen von Fruchtarten können zu einer effizienteren Wasser- und P-Nutzung beitragen. In den Gefäßversuchen ergab sich eine hohe P-Aufnahme unter Trockenstress insbesondere für Amarant, was aus der Kombination einer Anpassung der Pflanze an Trockenstress sowie einer hohen P-Mobilisation aus dem Boden resultierte.
2. Der Anbau von Fruchtarten mit hohem P-Mobilisationsvermögen kann die P-Verfügbarkeit im Boden erhöhen. Für Amarant wurden trotz hoher P-Aufnahmen auch unter Trockenstress hohe Gehalte an pflanzenverfügbarem wasserlöslichen P im Boden ( $P_w$ ) nachgewiesen. Dieser kann von der Nachfrucht als leicht verfügbare P-Quelle genutzt werden.
3. Phytin trägt zur P-Ernährung von Pflanzen unter Trockenstress bei. In den durchgeführten Gefäßversuchen war unter Trockenstressbedingungen auf schwach lehmigem Sand ein signifikanter Anstieg der P-Aufnahmen und Erträge nach Zufuhr von Ca-Phytat ( $0,40 \text{ g P Gefäß}^{-1}$ ) im Vergleich zur P-armen Kontrolle nachweisbar. Der Düngungseffekt von Ca-Phytat blieb jedoch hinter der Wirkung einer mineralischen P-Zufuhr (TSP) zurück.
4. Eine zusätzliche P-Zufuhr kann die Effekte des Trockenstress auf die Pflanze verringern. Nach periodischem Trockenstress, mit einem Wechsel von Austrocknungs- und Bewässerungsphasen erhöhte die P-Zufuhr die Trockentoleranz der untersuchten Fruchtarten. Der prozentuale Rückgang der Erträge infolge des Trockenstress war nach Zufuhr von Ca-Phytat ( $0,40 \text{ g Gefäß}^{-1}$ ) und TSP ( $0,20 \text{ g P Gefäß}^{-1}$ ) deutlich geringer als in der NK-Variante.
5. Die Düngewirkung von Phytin wird durch die Bodeneigenschaften beeinflusst. Nach Zufuhr von Ca-Phytat erhöhten sich die leicht pflanzenverfügbaren P-Pools ( $P_w$ ,  $P_{dl}$ ) im Boden auf schwach lehmigem Sand im Vergleich zur Kontrolle. Im Gegensatz dazu konnte auf stark lehmigem Sand kein positiver Effekt nach Zufuhr von Ca-Phytat

- nachgewiesen werden, was unter anderem auf das höhere P-Sorptionsvermögen dieses Bodens zurückgeführt werden kann.
6. Der Gehalt an pflanzenverfügbaren P im Boden wird durch das Pflanzenwachstum beeinflusst. Die leicht verfügbaren P-Pools wurden maßgeblich durch die Bilanz von P-Zufuhr und P-Aufnahme der Pflanzen bestimmt. Unter Trockenstress wurden höhere Gehalte an  $P_{dl}$  im Vergleich zur optimal bewässerten Kontrolle gemessen. Das kann in erster Linie auf das verringerte Pflanzenwachstum und die geringere P-Aufnahme zurückgeführt werden und spricht nicht für eine Erhöhung der P-Verfügbarkeit unter Trockenstress. Dies bestätigte sich in der negative Korrelation zwischen P-Aufnahme und  $P_{dl}$ -Gehalt.
  7. Die Aktivität der Phosphatasen im Boden beeinflusst die Verfügbarkeit des mit Ca-Phytat applizierten P für die Pflanze. Die höhere P-Verfügbarkeit im Boden ( $P_w$ ) sowie die höheren P-Aufnahmen und Erträge nach Zufuhr von Ca-Phytat im Vergleich zur P-armen Kontrolle auf schwach lehmigem Sand lassen den Schluss zu, dass die Aktivität der Phosphatasen (AcP, AIP) zur Hydrolyse von Ca-Phytat auf diesem Boden führte und zur P-Ernährung der Fruchtarten beitrug.
  8. Phosphatasen können zur Stabilisierung des Pflanzenwachstums unter Trockenstress beitragen. Für die Mehrheit der untersuchten Fruchtarten wurde auf schwach lehmigem Sand, innerhalb der gleichen P-Stufe, eine Erhöhung der AcP-Aktivität im Boden infolge von Trockenstress nachgewiesen. Diese förderten die P-Nutzung der Fruchtarten, was sich in der positiven Korrelation zwischen der AcP-Aktivität und dem Ertrag, der P-Aufnahme sowie der WNE unter Trockenstressbedingungen bestätigte.

Schlussfolgernd kann festgestellt werden, dass Ca-Phytat zur P-Ernährung von Fruchtarten bei geringen Bodenwassergehalten beiträgt. Die Wirkung von Ca-Phytat auf die P-Nutzung der Fruchtarten bleibt jedoch hinter der Wirkung einer mineralischen P-Zufuhr zurück. Die P-Nutzung unter Trockenstress ist zudem abhängig von den kulturenspezifischen Anpassungen an Wasser- und P-Mangel. Bei periodisch auftretenden Trockenphasen kann eine angepasste P-Zufuhr die Trockentoleranz der Pflanze erhöhen.

Zur effizienten Ausnutzung des mit Ca-Phytat applizierten P durch die Pflanze können Böden mit einem eher geringen P-Sorptionsvermögen empfohlen werden, da die Düngewirkung von Ca-Phytat auf Böden mit einer hohen P-Sorptionskapazität verringert wird.

Anhand der vorliegenden Untersuchungen lassen sich nur bedingt Aussagen für den Feldanbau ableiten, da in den Gefäßversuchen die morphologischen Wurzelanpassungen (insbesondere für Tiefwurzler wie Sorghum) nicht entsprechen ausgebildet werden konnten. Eine differenziertere Prüfung der Effekte des Trockenstresses auf den Ertrag und verschiedene physiologische und morphologische Pflanzenparameter in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium kann Hinweise auf die Regulierung und Regenerierung des Wasserhaushaltes von Pflanzen geben. Untersuchungen hierzu wären insbesondere in Anhängigkeit von einer gestaffelten organischen und mineralischen P-Zufuhr empfehlenswert.

## Anhang

TABELLE A-1: EINFLUSS VON WASSER, DÜNGUNG UND FRUCHTART UND DEREN WECHSELWIRKUNGEN AUF DIE PFLANZENPARAMETER IN DEN VERSUCHEN A, B UND C. ....	119
TABELLE A-2: EINFLUSS VON WASSER, DÜNGUNG UND FRUCHTART UND DEREN WECHSELWIRKUNGEN AUF PH-WERT UND DIE GEHALTE AN LEICHT PFLANZENVERFÜGBAREM P IM BODEN IN DEN VERSUCHEN A, B UND C. ....	120
TABELLE A-3: EINFLUSS VON WASSER, DÜNGUNG UND FRUCHTART UND DEREN WECHSELWIRKUNGEN AUF DEN GESAMT P-GEHALT UND DIE P-SORPTIONSEIGENSCHAFTEN IM BODEN IN DEN VERSUCHEN A, B UND C. ....	121
TABELLE A-4: EINFLUSS VON WASSER, DÜNGUNG UND FRUCHTART UND DEREN WECHSELWIRKUNGEN AUF DIE AKTIVITÄT DER ENZYME DES P-KREISLAUFES IN DEN VERSUCHEN A, B UND C. ....	122
TABELLE A-5: KORRELATION NACH PEARSON IM VERSUCH A BEI 60 % WHK. ....	123
TABELLE A-6: KORRELATION NACH PEARSON IM VERSUCH A BEI 30 % WHK. ....	124
TABELLE A-7: KORRELATION NACH PEARSON IM VERSUCH B BEI 60 % WHK. ....	125
TABELLE A-8: KORRELATION NACH PEARSON IM VERSUCH B BEI 30 % WHK. ....	126
TABELLE A-9: KORRELATION NACH PEARSON IM VERSUCH C BEI 60 % WHK. ....	127
TABELLE A-10: KORRELATION NACH PEARSON IM VERSUCH C BEI 30 % WHK. ....	128
TABELLE A-11: KORRELATION NACH PEARSON IM VERSUCH C BEI PERIODISCHEM TROCKENSTRESS. ....	129
TABELLE A-12: EINFLUSS VON WASSER, DÜNGUNG UND FRUCHTART AUF DIE EFFEKTIVE QUANTENAUSBEUTE DES PS II IM TAGESVERLAUF, IM VERSUCH B. ....	130
TABELLE A-13: EINFLUSS VON WASSER, DÜNGUNG UND FRUCHTART AUF DAS NICHT-PHOTOCHEMISCHE QUENCHING IM TAGESVERLAUF, IM VERSUCH B. ....	131
TABELLE A-14: EINFLUSS VON WASSER, DÜNGUNG UND FRUCHTART UND DEREN WECHSELWIRKUNGEN AUF $\Phi$ PSII UND NPQ, IM VERSUCH B. ....	132
TABELLE A-15: EINFLUSS VON WASSER- UND P-ZUFUHR AUF DEN PROZENTUALEN ABFALL DER MAXIMALEN ZUR MINIMALEN $\Phi$ PSII IM TAGESVERLAUF, IM VERSUCH B. ....	132

---

TABELLE 16: EINFLUSS DER WASSER- UND P-ZUFUHR AUF DIE K-, CA- UND MG-AUFNAHME, IM VERSUCH A.....	133
TABELLE A-17: EINFLUSS DER WASSER- UND P-ZUFUHR AUF DEN DOPPELLACTATLÖSLICHEN K- UND MG-GEHALT IM BODEN, IM VERSUCH A. ....	133
TABELLE A-18: EINFLUSS DER WASSER- UND P-ZUFUHR AUF DIE K-, CA-, MG- UND N-AUFNAHME, IM VERSUCH B.....	134
TABELLE A-19: EINFLUSS DER WASSER- UND P-ZUFUHR AUF DEN DOPPELLACTATLÖSLICHEN K- UND MG-GEHALT IM BODEN, IM VERSUCH B. ....	135
TABELLE A-20: EINFLUSS DER WASSER- UND P-ZUFUHR AUF DIE K-, CA-, MG-, UND N-AUFNAHME, IM VERSUCH C.....	136
TABELLE A-21: EINFLUSS DER WASSER- UND P-ZUFUHR AUF DEN DOPPELLACTATLÖSLICHEN K- UND MG-GEHALT IM BODEN, IM VERSUCH C.....	137

Tabelle A-1: Einfluss von Wasser, Düngung und Fruchtart und deren Wechselwirkungen auf die Pflanzenparameter in den Versuchen A, B und C. (dreifaktorielle ANOVA, F-Test,  $Eta^2$ )

Merkmal	Effekt	Versuch A		Versuch B		Versuch C	
		$p$	$Eta^2$	$p$	$Eta^2$	$p$	$Eta^2$
Spross	Fruchtart	0,001 ***	0,973	0,034 *	0,117	0,001 ***	0,807
TM-Ertrag	Düngung	0,001 ***	0,822	0,001 ***	0,507	0,001 ***	0,797
	Wasser	0,001 ***	0,587	0,001 ***	0,972	0,001 ***	0,948
	FA*D	0,001 ***	0,349	0,001 ***	0,276	0,001 ***	0,280
	FA*W	0,001 ***	0,606	0,001 ***	0,557	0,001 ***	0,681
	D*W	0,001 ***	0,195	0,305 ns	0,034	0,001 ***	0,666
	FA*D*W	0,003 **	0,260	0,033 *	0,176	0,002 **	0,258
	Wurzel	Fruchtart			0,001 ***	0,947	
TM-Ertrag	Düngung			0,001 ***	0,230		
	Wasser			0,001 ***	0,833		
	FA*D			0,108 ns	0,137		
	FA*W			0,001 ***	0,494		
	D*W			0,592 ns	0,015		
	FA*D*W			0,696 ns	0,053		
	Spross	Fruchtart	0,001 ***	0,951	0,001 ***	0,759	0,001 ***
P-Aufnahme	Düngung	0,001 ***	0,779	0,001 ***	0,713	0,001 ***	0,726
	Wasser	0,383 ns	0,031	0,001 ***	0,951	0,001 ***	0,829
	FA*D	0,001 ***	0,530	0,001 ***	0,284	0,001 ***	0,295
	FA*W	0,001 ***	0,549	0,001 ***	0,601	0,006 **	0,137
	D*W	0,381 ns	0,031	0,001 ***	0,290	0,003 **	0,243
	FA*D*W	0,241 ns	0,065	0,034 *	0,175	0,129 ns	0,130
	Wurzel	Fruchtart			0,001 ***	0,934	
P-Aufnahme	Düngung			0,001 ***	0,454		
	Wasser			0,001 ***	0,856		
	FA*D			0,001 ***	0,266		
	FA*W			0,001 ***	0,651		
	D*W			0,010 **	0,124		
	FA*D*W			0,207 ns	0,112		
	WNE	Fruchtart	0,001***	0,943	0,001***	0,550	0,001***
Düngung		0,001***	0,669	0,001***	0,468	0,001***	0,908
Wasser		0,001***	0,576	0,001***	0,152	0,010**	0,124
FA*D		0,417	0,061	0,018*	0,194	0,003**	0,182
FA*W		0,001***	0,293	0,001***	0,787	0,001***	0,675
D*W		0,014*	0,128	0,003**	0,075	0,001***	0,538
FA*D*W		0,549	0,045	0,022*	0,241	0,001***	0,554
Prolin	Fruchtart	0,001 ***	0,843	0,001 ***	0,945	0,001 ***	0,474
	Düngung	0,176 ns	0,052	0,687 ns	0,011	0,001 ***	0,508
	Wasser	0,001 ***	0,633	0,001 ***	0,812	0,006 **	0,138
	FA*D	0,393 ns	0,074	0,984 ns	0,015	0,001 ***	0,250
	FA*W	0,001***	0,761	0,001 ***	0,926	0,359 ns	0,029
	D*W	0,980 ns	0,001	0,598 ns	0,015	0,236 ns	0,107
	FA*D*W	0,070 ns	0,161	0,875 ns	0,034	0,912 ns	0,029

WNE = Wassernutzungseffizienz; FA\*D = Fruchtart\*Düngung; FA\*W = Fruchtart\*Wasser; FA\*D\*W = Fruchtart\*Düngung\*Wasser; \* $p \leq 0,05$ ; \*\* $p \leq 0,01$ ; \*\*\* $p \leq 0,001$ ; ns = nicht signifikant

Tabelle A-2: Einfluss von Wasser, Düngung und Fruchtart und deren Wechselwirkungen auf pH-Wert und die Gehalte an leicht pflanzenverfügbarem P im Boden in den Versuchen A, B und C.  
(dreifaktorielle ANOVA, F-Test,  $\text{Eta}^2$ )

Merkmal	Effekt	Versuch A		Versuch B		Versuch C	
		<i>p</i>	<i>Eta</i> <sup>2</sup>	<i>p</i>	<i>Eta</i> <sup>2</sup>	<i>p</i>	<i>Eta</i> <sup>2</sup>
pH-Wert	Fruchtart	0,001 ***	0,901	0,001 ***	0,946	0,001 ***	0,935
	Düngung	0,001 ***	0,260	0,021*	0,106	0,001 ***	0,215
	Wasser	0,620 ns	0,035	0,634 ns	0,003	0,070 ns	0,074
	FA*D	0,506 ns	0,050	0,020 *	0,191	0,002 **	0,198
	FA*W	0,576 ns	0,043	0,001 ***	0,407	0,189 ns	0,047
	D*W	0,714 ns	0,003	0,628 ns	0,013	0,029 *	0,180
	FA*D*W	0,046 *	0,161	0,319 ns	0,094	0,391 ns	0,085
P <sub>w</sub>	Fruchtart	0,001 ***	0,102	0,001 ***	0,262	0,001 ***	0,382
	Düngung	0,001 ***	0,446	0,001 ***	0,799	0,001 ***	0,753
	Wasser	0,695 ns	0,026	0,505 ns	0,006	0,024 *	0,103
	FA*D	0,001 ***	0,046	0,509 ns	0,072	0,176 ns	0,069
	FA*W	0,071 ns	0,077	0,078 ns	0,094	0,089 ns	0,065
	D*W	0,436 ns	0,054	0,083 ns	0,070	0,005 **	0,231
	FA*D*W	0,186 ns	0,046	0,310 ns	0,095	0,838	0,030
P <sub>dl</sub>	Fruchtart	0,001 ***	0,928	0,001 ***	0,549	0,001 ***	0,840
	Düngung	0,001 ***	0,572	0,001 ***	0,842	0,001 ***	0,852
	Wasser	0,620 ns	0,006	0,001 ***	0,584	0,001 ***	0,327
	FA*D	0,001 ***	0,470	0,001 ***	0,625	0,001 ***	0,652
	FA*W	0,001 ***	0,324	0,044 *	0,110	0,014 *	0,117
	D*W	0,084 ns	0,065	0,084 ns	0,069	0,041 *	0,169
	FA*D*W	0,012 **	0,119	0,063 ns	0,155	0,001 ***	0,302

P<sub>w</sub> = wasserlöslicher P; P<sub>dl</sub> = doppelaktatlöslicher P; FA\*D = Fruchtart\*Düngung; FA\*W = Fruchtart\*Wasser; FA\*D\*W = Fruchtart\*Düngung\*Wasser; \**p*≤0,05; \*\**p*≤0,01; \*\*\**p*≤0,001; ns = nicht signifikant

Tabelle A-3: Einfluss von Wasser, Düngung und Fruchtart und deren Wechselwirkungen auf den Gesamt P-Gehalt und die P-Sorptionseigenschaften im Boden in den Versuchen A, B und C.  
(dreifaktorielle ANOVA, F-Test,  $Eta^2$ )

Merkmal	Effekt	Versuch A		Versuch B		Versuch C	
		<i>p</i>	<i>Eta</i> <sup>2</sup>	<i>p</i>	<i>Eta</i> <sup>2</sup>	<i>p</i>	<i>Eta</i> <sup>2</sup>
P <sub>ox</sub>	Fruchtart	0,001 ***	0,673	0,001 ***	0,308	0,836 ns	0,001
	Düngung	0,001 ***	0,679	0,001 ***	0,864	0,001 ***	0,367
	Wasser	0,887 ns	0,001	0,001 ***	0,453	0,186 ns	0,048
	FA*D	0,461 ns	0,055	0,001 ***	0,421	0,017 *	0,137
	FA*W	0,782 ns	0,023	0,627 ns	0,025	0,051 ns	0,083
	D*W	0,177 ns	0,040	0,003 **	0,151	0,999 ns	0,005
	FA*D*W	0,635 ns	0,037	0,087 ns	0,144	0,455 ns	0,077
DPS	Fruchtart	0,001 ***	0,744	0,001 ***	0,200	0,067 ns	0,048
	Düngung	0,001 ***	0,734	0,001 ***	0,842	0,001 ***	0,559
	Wasser	0,749 ns	0,002	0,001 ***	0,434	0,460 ns	0,022
	FA*D	0,597 ns	0,041	0,001 ***	0,420	0,289 ns	0,052
	FA*W	0,880 ns	0,015	0,788 ns	0,015	0,915 ns	0,003
	D*W	0,224 ns	0,033	0,006 **	0,136	0,057 ns	0,158
	FA*D*W	0,944 ns	0,008	0,024 *	0,185	0,047 *	0,168
PSC	Fruchtart	0,112 ns	0,120	0,001 ***	0,675	0,267 ns	0,018
	Düngung	0,224 ns	0,033	0,001 ***	0,275	0,008 **	0,157
	Wasser	0,926 ns	0,001	0,352 ns	0,013	0,494 ns	0,020
	FA*D	0,902 ns	0,013	0,001 ***	0,512	0,001 ***	0,241
	FA*W	0,629 ns	0,037	0,983 ns	0,002	0,011 *	0,123
	D*W	0,511 ns	0,010	0,071 ns	0,074	0,289 ns	0,099
	FA*D*W	0,583 ns	0,042	0,018 *	0,195	0,669 ns	0,056
P <sub>t</sub>	Fruchtart	0,010 **	0,220	0,001 ***	0,350	0,018 *	0,079
	Düngung	0,001 ***	0,762	0,001 ***	0,409	0,001 ***	0,619
	Wasser	0,051 ns	0,084	0,043 *	0,058	0,436 ns	0,024
	FA*D	0,243 ns	0,088	0,111 ns	0,136	0,059 ns	0,102
	FA*W	0,640 ns	0,036	0,146 ns	0,074	0,943 ns	0,002
	D*W	0,750 ns	0,002	0,095 ns	0,066	0,045 *	0,166
	FA*D*W	0,402 ns	0,062	0,602 ns	0,062	0,277 ns	0,100

P<sub>t</sub> = P total; P<sub>ox</sub> = oxalatlöslicher P; DPS = Grad der P-Sättigung; PSC = P-Sorptionskapazität; FA\*D = Fruchtart\*Düngung; FA\*W = Fruchtart\*Wasser; FA\*D\*W = Fruchtart\*Düngung\*Wasser; \*p≤0,05; \*\*p≤0,01; \*\*\*p≤0,001; ns = nicht signifikant

Tabelle A-4: Einfluss von Wasser, Düngung und Fruchtart und deren Wechselwirkungen auf die Aktivität der Enzyme des P-Kreislaufes in den Versuchen A, B und C.  
(dreifaktorielle ANOVA, F-Test,  $\eta^2$ ).

Merkmal	Effekt	Versuch A		Versuch B		Versuch C	
		<i>p</i>	<i>Eta</i> <sup>2</sup>	<i>p</i>	<i>Eta</i> <sup>2</sup>	<i>p</i>	<i>Eta</i> <sup>2</sup>
AcP	Fruchtart	0,001 ***	0,772	0,001 ***	0,952	0,024 *	0,072
	Düngung	0,001 ***	0,762	0,001 ***	0,527	0,118 ns	0,081
	Wasser	0,001 ***	0,752	0,002 **	0,128	0,001 ***	0,179
	FA*D	0,002 **	0,285	0,001 ***	0,321	0,196 ns	0,065
	FA*W	0,004 **	0,256	0,002 **	0,192	0,001 ***	0,548
	D*W	0,036 *	0,094	0,025 *	0,102	0,864 ns	0,035
	FA*D*W	0,001 ***	0,502	0,453 ns	0,078	0,544 ns	0,066
AIP	Fruchtart	0,001 ***	0,868	0,001 ***	0,943	0,036 *	0,062
	Düngung	0,001 ***	0,925	0,001 ***	0,294	0,052 ns	0,105
	Wasser	0,001 ***	0,205	0,051 ns	0,054	0,002 **	0,170
	FA*D	0,001 ***	0,913	0,001 ***	0,054	0,003 **	0,185
	FA*W	0,001 ***	0,348	0,090 ns	0,089	0,001 ***	0,429
	D*W	0,001 ***	0,880	0,494 ns	0,020	0,067 ns	0,153
	FA*D*W	0,001 ***	0,857	0,901 ns	0,030	0,254	0,104
DH	Fruchtart	0,001 ***	0,833	0,001 ***	0,751	0,001 ***	0,588
	Düngung	0,001 ***	0,570	0,001 ***	0,349	0,001 ***	0,295
	Wasser	0,001 ***	0,726	0,001 ***	0,512	0,001 ***	0,602
	FA*D	0,001 ***	0,524	0,001 ***	0,319	0,001 ***	0,207
	FA*W	0,032 *	0,180	0,004 **	0,173	0,001 ***	0,454
	D*W	0,001 ***	0,335	0,454 ns	0,023	0,023 *	0,187
	FA*D*W	0,001 ***	0,409	0,005 **	0,230	0,003 **	0,244

AcP = saure Phosphatase; AIP = alkalische Phosphatase; DH = Dehydrogenase; FA\*D = Fruchtart\*Düngung; FA\*W = Fruchtart\*Wasser; FA\*D\*W = Fruchtart\*Düngung\*Wasser; \* $p \leq 0,05$ ; \*\* $p \leq 0,01$ ; \*\*\* $p \leq 0,001$ ; ns = nicht signifikant

Tabelle A-5: Korrelation nach Pearson im Versuch A bei 60 % WHK.

	Ertrag	P- Aufn.	WNE	Prolin	pH	P <sub>w</sub>	P <sub>dl</sub>	P <sub>ox</sub>	DPS	PSC	P <sub>t</sub>	AcP	AIP	DHA
Ertrag	1	,638**	,850**	-,108	,534**	,206	-,480**	,015	,112	-,209	,274*	,480**	,311*	,479**
P- Aufnahme	,638**	1	,578**	,275*	,156	,233	-,482**	,136	,215	-,128	,298*	,389**	-,260*	,167
WNE	,850**	,578**	1	,149	,496**	,136	-,532**	-,029	,062	-,202	,163	,688**	,319*	,682**
Prolin	-,108	,275*	,149	1	,146	-,239	-,118	,304*	,293*	,109	-,040	,455**	-,147	,285*
pH	,534**	,156	,496**	,146	1	-,058	-,154	,412**	,446**	,025	,271*	,553**	,571**	,557**
P <sub>w</sub>	,206	,233	,136	-,239	-,058	1	,316*	,210	,337**	-,220	,382**	,029	,175	,094
P <sub>dl</sub>	-,480**	-,482**	-,532**	-,118	-,154	,316*	1	,459**	,419**	,214	,363**	-,186	,258*	-,057
P <sub>ox</sub>	,015	,136	-,029	,304*	,412**	,210	,459**	1	,912**	,465**	,714**	,382**	,246	,261*
DPS	,112	,215	,062	,293*	,446**	,337**	,419**	,912**	1	,066	,687**	,425**	,299*	,325**
PSC	-,209	-,128	-,202	,109	,025	-,220	,214	,465**	,066	1	,254*	,007	-,061	-,058
P <sub>t</sub>	,274*	,298*	,163	-,040	,271*	,382**	,363**	,714**	,687**	,254*	1	,335**	,198	,258*
AcP	,480**	,389**	,688**	,455**	,553**	,029	-,186	,382**	,425**	,007	,335**	1	,426**	,658**
AIP	,311*	-,260*	,319*	-,147	,571**	,175	,258*	,246	,299*	-,061	,198	,426**	1	,543**
DHA	,479**	,167	,682**	,285*	,557**	,094	-,057	,261*	,325**	-,058	,258*	,658**	,543**	1

\*\* die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant

\* die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant

Tabelle A-6: Korrelation nach Pearson im Versuch A bei 30 % WHK.

	Ertrag	P- Aufn.	WNE	Prolin	pH	P <sub>w</sub>	P <sub>dl</sub>	P <sub>ox</sub>	DPS	PSC	P <sub>t</sub>	AcP	AIP	DHA
Ertrag	1	,574**	,814**	-,044	,476**	,214	-,522**	,001	,108	-,206	,243	,355**	,210	,468**
P- Aufnahme	,574**	1	,558**	,353**	-,034	,114	-,597**	,097	,103	,018	,208	,303*	-,008	,238
WNE	,814**	,558**	1	,094	,340**	,188	-,600**	-,126	-,035	-,211	,086	,592**	,235	,628**
Prolin	-,044	,353**	,094	1	,153	-,209	-,180	,342**	,329**	,127	-,056	,414**	-,137	,180
pH	,476**	-,034	,340**	,153	1	,010	-,087	,360**	,414**	-,009	,296*	,364**	,139	,455**
P <sub>w</sub>	,214	,114	,188	-,209	,010	1	,274*	,246*	,366**	-,169	,371**	,164	,506**	,282*
P <sub>dl</sub>	-,522**	-,597**	-,600**	-,180	-,087	,274*	1	,430**	,395**	,204	,370**	-,086	,364**	-,011
P <sub>ox</sub>	,001	,097	-,126	,342**	,360**	,246*	,430**	1	,901**	,519**	,691**	,336**	,365**	,247*
DPS	,108	,103	-,035	,329**	,414**	,366**	,395**	,901**	1	,103	,675**	,356**	,376**	,356**
PSC	-,206	,018	-,211	,127	-,009	-,169	,204	,519**	,103	1	,256*	,074	,116	-,134
P <sub>t</sub>	,243	,208	,086	-,056	,296*	,371**	,370**	,691**	,675**	,256*	1	,307*	,417**	,295*
AcP	,355**	,303*	,592**	,414**	,364**	,164	-,086	,336**	,356**	,074	,307*	1	,462**	,663**
AIP	,210	-,008	,235	-,137	,139	,506**	,364**	,365**	,376**	,116	,417**	,462**	1	,431**
DHA	,468**	,238	,628**	,180	,455**	,282*	-,011	,247*	,356**	-,134	,295*	,663**	,431**	1

\*\* die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant

\* die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant

Tabelle A-7: Korrelation nach Pearson im Versuch B bei 60 % WHK.

	Spross Ertrag	Wurzel Ertrag	Spross P-Aufnahme	Wurzel P-Aufnahme	WNE	Prolin	pH	P <sub>w</sub>	P <sub>dl</sub>	P <sub>ox</sub>	DPS	PSC	P <sub>t</sub>	AcP	AIP	DHA
Spross Ertrag	1	,575**	,764**	,507**	,195	-,561**	,000	,200	-,088	-,285**	-,291**	-,081	,129	-,075	-,077	,426**
Wurzel Ertrag	,575**	1	,391**	,885**	,540**	-,382**	,121	-,084	-,012	-,151	-,125	-,084	,229*	,013	,000	,523**
Spross P-Aufnahme	,764**	,391**	1	,554**	,274**	-,360**	-,466**	,421**	,095	-,216*	-,080	-,260*	,056	-,300**	-,529**	-,046
Wurzel P-Aufnahme	,507**	,885**	,554**	1	,628**	-,309**	-,268**	,007	-,029	-,094	,062	-,249*	,146	-,145	-,349**	,192
WNE	,195	,540**	,274**	,628**	1	,045	-,096	,254*	,307**	,165	,173	,048	,284**	-,055	-,255*	,082
Prolin	-,561**	-,382**	-,360**	-,309**	,045	1	,021	-,088	,091	,040	,232*	-,268**	-,208*	-,459**	-,251*	-,392**
pH	,000	,121	-,466**	-,268**	-,096	,021	1	-,076	,192	,050	-,209*	,387**	,149	,234*	,759**	,603**
P <sub>w</sub>	,200	-,084	,421**	,007	,254*	-,088	-,076	1	,639**	,245*	,233*	,099	,197	-,176	-,249*	-,210*
P <sub>dl</sub>	-,088	-,012	,095	-,029	,307**	,091	,192	,639**	1	,231*	,181	,156	,200	-,124	,038	-,102
P <sub>ox</sub>	-,285**	-,151	-,216*	-,094	,165	,040	,050	,245*	,231*	1	,828**	,572**	,485**	,072	,034	-,235*
DPS	-,291**	-,125	-,080	,062	,173	,232*	-,209*	,233*	,181	,828**	1	,015	,273**	-,272**	-,343**	-,423**
PSC	-,081	-,084	-,260*	-,249*	,048	-,268**	,387**	,099	,156	,572**	,015	1	,461**	,534**	,567**	,185
P <sub>t</sub>	,129	,229*	,056	,146	,284**	-,208*	,149	,197	,200	,485**	,273**	,461**	1	,164	,179	,222*
AcP	-,075	,013	-,300**	-,145	-,055	-,459**	,234*	-,176	-,124	,072	-,272**	,534**	,164	1	,651**	,371**
AIP	-,077	,000	-,529**	-,349**	-,255*	-,251*	,759**	-,249*	,038	,034	-,343**	,567**	,179	,651**	1	,547**
DHA	,426**	,523**	-,046	,192	,082	-,392**	,603**	-,210*	-,102	-,235*	-,423**	,185	,222*	,371**	,547**	1

\*\* die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant; \* die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant

Tabelle A-8: Korrelation nach Pearson im Versuch B bei 30 % WHK.

	Spross Ertrag	Wurzel Ertrag	Spross P-Aufnahme	Wurzel P-Aufnahme	WNE	Prolin	pH	P <sub>w</sub>	P <sub>dl</sub>	P <sub>ox</sub>	DPS	PSC	P <sub>t</sub>	AcP	AIP	DHA
Spross Ertrag	1	,118	,895**	,020	-,213*	-,199	,185	,098	-,298**	-,177	-,253*	,071	-,130	,048	,186	,383**
Wurzel Ertrag	,118	1	,006	,895**	-,500**	-,475**	,250*	-,063	,120	-,064	-,046	-,049	,399**	-,073	,114	,467**
Spross P-Aufnahme	,895**	,006	1	,035	-,076	-,012	,014	,265**	-,139	-,162	-,124	-,102	-,193	-,234*	-,126	,087
Wurzel P-Aufnahme	,020	,895**	,035	1	-,372**	-,351**	-,042	,000	,113	-,018	,119	-,220*	,361**	-,331**	-,211*	,179
WNE	-,213*	-,500**	-,076	-,372**	1	,303**	-,304**	,508**	,368**	,439**	,422**	,155	,004	,005	-,318**	-,459**
Prolin	-,199	-,475**	-,012	-,351**	,303**	1	,052	-,134	-,063	-,084	,139	-,382**	-,300**	-,589**	-,339**	-,412**
pH	,185	,250*	,014	-,042	-,304**	,052	1	-,101	,078	-,019	-,228*	,310**	,045	,099	,659**	,554**
P <sub>w</sub>	,098	-,063	,265**	,000	,508**	-,134	-,101	1	,655**	,289**	,247*	,149	,145	-,039	-,208*	-,233*
P <sub>dl</sub>	-,298**	,120	-,139	,113	,368**	-,063	,078	,655**	1	,296**	,259*	,140	,272**	-,125	-,093	-,169
P <sub>ox</sub>	-,177	-,064	-,162	-,018	,439**	-,084	-,019	,289**	,296**	1	,843**	,506**	,544**	,091	,001	-,179
DPS	-,253*	-,046	-,124	,119	,422**	,139	-,228*	,247*	,259*	,843**	1	-,036	,447**	-,256*	-,362**	-,328**
PSC	,071	-,049	-,102	-,220*	,155	-,382**	,310**	,149	,140	,506**	-,036	1	,290**	,590**	,582**	,171
P <sub>t</sub>	-,130	,399**	-,193	,361**	,004	-,300**	,045	,145	,272**	,544**	,447**	,290**	1	,059	,084	,040
AcP	,048	-,073	-,234*	-,331**	,005	-,589**	,099	-,039	-,125	,091	-,256*	,590**	,059	1	,655**	,367**
AIP	,186	,114	-,126	-,211*	-,318**	-,339**	,659**	-,208*	-,093	,001	-,362**	,582**	,084	,655**	1	,565**
DHA	,383**	,467**	,087	,179	-,459**	-,412**	,554**	-,233*	-,169	-,179	-,328**	,171	,040	,367**	,565**	1

\*\* die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant; \* die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant

Tabelle A-9: Korrelation nach Pearson im Versuch C bei 60 % WHK.

	Ertrag	P- Aufn.	WNE	Prolin	pH	P <sub>w</sub>	P <sub>dl</sub>	P <sub>ox</sub>	DPS	PSC	P <sub>t</sub>	AcP	AIP	DHA
Ertrag	1	,345**	,169	-,248*	-,130	,080	-,280**	,144	,207*	-,058	,148	,201*	-,235*	-,495**
P-Aufnahme	,345**	1	-,043	-,542**	-,875**	-,313**	-,670**	-,183	,021	-,246*	-,049	-,063	-,356**	-,582**
WNE	,169	-,043	1	,377**	,086	,529**	,378**	,413**	,310**	,150	,546**	,057	,256*	,298**
Prolin	-,248*	-,542**	,377**	1	,573**	,574**	,833**	,102	-,118	,258*	,155	-,183	,144	,588**
pH	-,130	-,875**	,086	,573**	1	,427**	,626**	,198	,114	,113	,112	,016	,314**	,541**
P <sub>w</sub>	,080	-,313**	,529**	,574**	,427**	1	,673**	,217*	,104	,148	,397**	-,033	,165	,344**
P <sub>dl</sub>	-,280**	-,670**	,378**	,833**	,626**	,673**	1	,147	-,186	,393**	,144	-,217*	,199	,641**
P <sub>ox</sub>	,144	-,183	,413**	,102	,198	,217*	,147	1	,624**	,495**	,306**	,102	,206*	,174
DPS	,207*	,021	,310**	-,118	,114	,104	-,186	,624**	1	-,369**	,485**	,042	,131	-,035
PSC	-,058	-,246*	,150	,258*	,113	,148	,393**	,495**	-,369**	1	-,175	,071	,107	,251*
P <sub>t</sub>	,148	-,049	,546**	,155	,112	,397**	,144	,306**	,485**	-,175	1	,083	,124	,118
AcP	,201*	-,063	,057	-,183	,016	-,033	-,217*	,102	,042	,071	,083	1	,245*	-,181
AIP	-,235*	-,356**	,256*	,144	,314**	,165	,199	,206*	,131	,107	,124	,245*	1	,226*
DHA	-,495**	-,582**	,298**	,588**	,541**	,344**	,641**	,174	-,035	,251*	,118	-,181	,226*	1

\*\* die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant

\* die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant

Tabelle A-10: Korrelation nach Pearson im Versuch C bei 30 % WHK.

	Ertrag	P-Aufn.	WNE	Prolin	pH	P <sub>w</sub>	P <sub>dl</sub>	P <sub>ox</sub>	DPS	PSC	P <sub>t</sub>	AcP	AIP	DHA
Ertrag	1	,721**	,522**	-,325**	-,547**	,089	-,242*	,282**	,035	,285**	-,034	,408**	,106	-,665**
P-Aufnahme	,721**	1	,297**	-,599**	-,876**	-,198	-,647**	,055	-,006	,061	-,098	,451**	,048	-,731**
WNE	,522**	,297**	1	,168	-,184	,448**	,276**	,412**	,196	,275**	,326**	,329**	,474**	-,107
Prolin	-,325**	-,599**	,168	1	,690**	,541**	,844**	,061	-,028	,105	,181	-,404**	,108	,587**
pH	-,547**	-,876**	-,184	,690**	1	,391**	,725**	-,015	,104	-,118	,160	-,556**	-,060	,721**
P <sub>w</sub>	,089	-,198	,448**	,541**	,391**	1	,645**	,263**	,230*	,074	,370**	-,142	,232*	,195
P <sub>dl</sub>	-,242*	-,647**	,276**	,844**	,725**	,645**	1	,144	-,022	,198	,155	-,384**	,120	,570**
P <sub>ox</sub>	,282**	,055	,412**	,061	-,015	,263**	,144	1	,567**	,570**	,209*	,127	,208*	-,123
DPS	,035	-,006	,196	-,028	,104	,230*	-,022	,567**	1	-,353**	,426**	-,112	,076	-,029
PSC	,285**	,061	,275**	,105	-,118	,074	,198	,570**	-,353**	1	-,190	,252*	,168	-,110
P <sub>t</sub>	-,034	-,098	,326**	,181	,160	,370**	,155	,209*	,426**	-,190	1	-,088	,155	,134
AcP	,408**	,451**	,329**	-,404**	-,556**	-,142	-,384**	,127	-,112	,252*	-,088	1	,343**	-,488**
AIP	,106	,048	,474**	,108	-,060	,232*	,120	,208*	,076	,168	,155	,343**	1	-,158
DHA	-,665**	-,731**	-,107	,587**	,721**	,195	,570**	-,123	-,029	-,110	,134	-,488**	-,158	1

\*\* die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant

\* die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant

Tabelle A-11: Korrelation nach Pearson im Versuch C bei periodischem Trockenstress.

	Ertrag	P-Aufn.	WNE	Prolin	pH	Pw	Pdl	Pox	DPS	PSC	Pt	AcP	AIP	DHA
Ertrag	1	,516**	,513**	-,138	-,395**	,095	-,145	,192	,094	,138	,117	,096	-,152	-,343**
P-Aufnahme	,516**	1	,088	-,535**	-,883**	-,339**	-,705**	-,124	-,029	-,127	-,071	,033	-,422**	-,415**
WNE	,513**	,088	1	,355**	-,044	,482**	,403**	,331**	,142	,259*	,355**	,038	,320**	,305**
Prolin	-,138	-,535**	,355**	1	,561**	,561**	,820**	,213*	-,049	,320**	,114	-,228*	,292**	,591**
pH	-,395**	-,883**	-,044	,561**	1	,419**	,696**	,135	,132	,025	,189	-,133	,384**	,361**
Pw	,095	-,339**	,482**	,561**	,419**	1	,696**	,227*	,082	,198	,299**	-,026	,368**	,394**
Pdl	-,145	-,705**	,403**	,820**	,696**	,696**	1	,195	-,069	,326**	,156	-,235*	,361**	,623**
Pox	,192	-,124	,331**	,213*	,135	,227*	,195	1	,636**	,537**	,204*	-,016	,254*	,132
DPS	,094	-,029	,142	-,049	,132	,082	-,069	,636**	1	-,308**	,387**	-,067	,101	-,133
PSC	,138	-,127	,259*	,320**	,025	,198	,326**	,537**	-,308**	1	-,172	,054	,208*	,314**
Pt	,117	-,071	,355**	,114	,189	,299**	,156	,204*	,387**	-,172	1	-,019	,190	,081
AcP	,096	,033	,038	-,228*	-,133	-,026	-,235*	-,016	-,067	,054	-,019	1	,248*	-,334**
AIP	-,152	-,422**	,320**	,292**	,384**	,368**	,361**	,254*	,101	,208*	,190	,248*	1	,171
DHA	-,343**	-,415**	,305**	,591**	,361**	,394**	,623**	,132	-,133	,314**	,081	-,334**	,171	1

\*\* die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant

\* die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant

Tabelle A-12: Einfluss von Wasser, Düngung und Fruchtart auf die effektive Quantenausbeute des PS II im Tagesverlauf, im Versuch B.

Fruchtart	Düngung	WHK %	04:00 Uhr	06:00 Uhr	07:00 Uhr	09:00 Uhr	10:00 Uhr	11:00 Uhr	13:00 Uhr	15:00 Uhr	19:00 Uhr
Sorghum	NK	60	0,765	0,736	0,705	0,699	0,683	0,641	0,622	0,648	0,697
		30	0,776	0,751	0,725	0,714	0,717	0,716	0,687	0,673	0,713
	TSP	60	0,768	0,741	0,711	0,691	0,682	0,636	0,637	0,665	0,717
		30	0,769	0,741	0,712	0,699	0,696	0,632	0,599	0,605	0,684
Amarant	NK	60	0,779	0,727	0,678	0,635	0,654	0,574	0,620	0,649	0,704
		30	0,779	0,718	0,692	0,684	0,679	0,608	0,608	0,614	0,680
	TSP	60	0,778	0,726	0,671	0,667	0,663	0,624	0,568	0,609	0,672
		30	0,778	0,729	0,709	0,658	0,665	0,634	0,626	0,643	0,702
Raps	NK	60	0,821	0,801	0,774	0,758	0,751	0,730	0,665	0,722	0,777
		30	0,823	0,794	0,775	0,759	0,767	0,739	0,725	0,740	0,789
	TSP	60	0,824	0,795	0,777	0,766	0,771	0,740	0,741	0,753	0,783
		30	0,826	0,806	0,786	0,766	0,775	0,750	0,750	0,739	0,795
Roggen	NK	60	0,791	0,766	0,733	0,705	0,714	0,671	0,667	0,669	0,733
		30	0,792	0,776	0,751	0,740	0,744	0,723	0,700	0,703	0,733
	TSP	60	0,789	0,765	0,742	0,729	0,716	0,694	0,687	0,674	0,738
		30	0,785	0,760	0,734	0,710	0,719	0,694	0,682	0,701	0,739

NK = Kontrolle ohne P-Zufuhr; TPS = mineralische Düngung mit Tripel-Superphosphat 0,20 g Gefäß<sup>-1</sup>; WHK = Wasserhaltekapazität

Tabelle A-13: Einfluss von Wasser, Düngung und Fruchtart auf das nicht-photochemische Quenching im Tagesverlauf, im Versuch B.

Fruchtart	Düngung	WHK %	04:00 Uhr	06:00 Uhr	07:00 Uhr	09:00 Uhr	10:00 Uhr	11:00 Uhr	13:00 Uhr	15:00 Uhr	19:00 Uhr
Sorghum	NK	60	0	0,157	0,607	0,814	0,948	0,818	0,922	0,729	0,367
		30	0	0,157	0,609	0,789	0,780	0,416	0,579	0,646	0,414
	TSP	60	0	0,162	0,575	0,854	0,961	0,854	0,747	0,602	0,368
		30	0	0,161	0,584	0,786	0,834	0,859	1,004	0,962	0,490
Amarant	NK	60	0	0,085	0,470	0,868	0,802	0,869	0,572	0,472	0,260
		30	0	0,133	0,487	0,718	0,766	0,920	0,625	0,699	0,329
	TSP	60	0	0,123	0,550	0,648	0,771	0,539	0,665	0,644	0,337
		30	0	0,119	0,412	0,741	0,831	0,537	0,551	0,482	0,230
Raps	NK	60	0	0,166	0,534	0,741	0,913	0,645	0,988	0,612	0,275
		30	0	0,157	0,509	0,712	0,692	0,564	0,586	0,587	0,192
	TSP	60	0	0,166	0,567	0,733	0,739	0,579	0,600	0,493	0,282
		30	0	0,130	0,465	0,734	0,724	0,520	0,455	0,621	0,235
Roggen	NK	60	0	0,165	0,527	0,854	0,881	0,816	0,852	0,880	0,363
		30	0	0,029	0,347	0,560	0,610	0,473	0,559	0,563	0,298
	TSP	60	0	0,103	0,442	0,660	0,769	0,732	0,627	0,749	0,310
		30	0	0,114	0,481	0,745	0,730	0,562	0,598	0,505	0,276

NK = Kontrolle ohne P-Zufuhr; TPS = mineralische Düngung mit Tripel-Superphosphat 0,20 g Gefäß<sup>-1</sup>; WHK = Wasserhaltekapazität

Tabelle A-14: Einfluss von Wasser, Düngung und Fruchtart und deren Wechselwirkungen auf  $\Phi$ PSII und NPQ, im Versuch B. (zweifaktorielle ANOVA, F-Test).

Effekt	$\Phi$ PSII	NPQ
	<i>p</i>	<i>p</i>
Fruchtart	0.001	0.001
Düngung	ns	ns
Wasser	0.001	0.001
Fruchtart*Düngung	0.004	0.029
Fruchtart*Wasser	ns	0.017
Düngung*Wasser	0.007	0.004
Fruchtart*Düngung*Wasser	0.003	0.009

$\Phi$ PSII = effektive Quantenausbeute des Photosystem II;

NPQ = nicht-photochemisches Quenching; ( $p \leq 0,05$  Duncan Test; ns = nicht signifikant)

Tabelle A-15: Einfluss von Wasser- und P-Zufuhr auf den prozentualen Abfall der maximalen zur minimalen  $\Phi$ PSII im Tagesverlauf, im Versuch B.

Fruchtart	Düngung	WHK %	$\Phi$ PSII	$\Phi$ PSII	$\Phi$ PSII
			max	min	diff. %
Sorghum	NK	60	0,765	0,622	18,6
		30	0,776	0,673	13,3
	TSP	60	0,768	0,636	17,3
		30	0,769	0,599	22,1
Amarant	NK	60	0,779	0,574	26,4
		30	0,779	0,602	22,7
	TSP	60	0,778	0,568	26,9
		30	0,778	0,626	19,6
Raps	NK	60	0,821	0,665	19,0
		30	0,823	0,725	11,8
	TSP	60	0,824	0,740	10,3
		30	0,826	0,739	10,6
Roggen	NK	60	0,791	0,667	15,6
		30	0,792	0,700	11,6
	TSP	60	0,789	0,674	14,5
		30	0,785	0,682	13,1

$\Phi$ PSII max = maximale Quantenausbeute im PSII;  $\Phi$ PSII min = minimale Quantenausbeute im PSII;  
 $\Phi$ PSII diff. = prozentualer Abfall zwischen maximaler und minimaler Quantenausbeute des PSII in Prozent;  
 NK = Kontrolle ohne P-Zufuhr; TSP = mineralische Düngung mit Tripel-Superphosphat 0,20 g Gefäß<sup>-1</sup>;  
 WHK = Wasserhaltekapazität

Tabelle 16: Einfluss der Wasser- und P-Zufuhr auf die K-, Ca- und Mg-Aufnahme, im Versuch A.

Düngung	WHK %	Sorghum	Amarant	Raps	Roggen
			<b>K-Aufnahme</b> (mg Gefäß <sup>-1</sup> )		
NK	60	223 a	497 a	583 a	619 b
	30	163 a	505 a	606 a	513 a
PACII	60	325 b	704 b	724 b	798 c
	30	246 ab	725 b	696 b	633 b
<b>Mittel</b>		<b>239 A</b>	<b>608 B</b>	<b>652 C</b>	<b>641 BC</b>
			<b>Ca-Aufnahme</b> (mg Gefäß <sup>-1</sup> )		
NK	60	48,2 a	357 a	295 b	83,4 b
	30	55,6 a	356 a	225 a	67,2 a
PACII	60	62,4 a	416 ab	308 b	98,2 c
	30	59,6 a	492 b	275 b	77,8 b
<b>Mittel</b>		<b>56,5 A</b>	<b>405 D</b>	<b>276 C</b>	<b>81,7 B</b>
			<b>Mg-Aufnahme</b> (mg Gefäß <sup>-1</sup> )		
NK	60	14,3 a	75,1 a	59,4 a	33,0 b
	30	14,3 a	74,6 a	57,1 a	27,4 a
PACII	60	20,7 b	98,1 b	66,4 b	39,9 c
	30	17,2 ab	101 b	67,6 b	32,8 b
<b>Mittel</b>		<b>16,6 A</b>	<b>91,4 D</b>	<b>62,6 C</b>	<b>33,3 B</b>

NK = Kontrolle ohne P; PACII = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,40 g P Gefäß<sup>-1</sup>; WHK = Wasserhaltekapazität; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtarten; (p≤0,05 Duncan Test nach einfaktorieller ANOVA)

Tabelle A-17: Einfluss der Wasser- und P-Zufuhr auf den doppellactatlöslichen K- und Mg-Gehalt im Boden, im Versuch A.

Düngung	WHK %	Sorghum	Amarant	Raps	Roggen
			<b>K<sub>dl</sub></b> (mg kg <sup>-1</sup> )		
NK	60	116 a	88,5 a	64,4 a	71,0 a
	30	133 b	102 a	83,9 b	90,0 b
PACII	60	147 c	86,5 a	114 c	103 c
	30	168 d	106 a	122 c	125 d
<b>Mittel</b>		<b>141 B</b>	<b>95,8 A</b>	<b>96,1 A</b>	<b>97,3 A</b>
			<b>Mg<sub>dl</sub></b> (mg kg <sup>-1</sup> )		
NK	60	141 ab	129 a	129 a	123 a
	30	148 b	124 a	142 a	128 b
PACII	60	136 a	123 a	132 a	121 a
	30	133 a	120 a	130 a	133 c
<b>Mittel</b>		<b>140 C</b>	<b>124 A</b>	<b>133 B</b>	<b>126 A</b>

NK = Kontrolle ohne P; PACII = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,40 g P Gefäß<sup>-1</sup>; WHK = Wasserhaltekapazität; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtarten; (p≤0,05 Duncan Test nach einfaktorieller ANOVA)

Tabelle A-18: Einfluss der Wasser- und P-Zufuhr auf die K-, Ca-, Mg- und N-Aufnahme, im Versuch B.

Düngung	WHK %	Sorghum	Amarant	Raps	Roggen
<b>K-Aufnahme</b> (mg Gefäß <sup>-1</sup> )					
NK	60	1150 b	1521 c	1058 c	1014 c
	30	402 a	705 ab	744 a	610 ab
PAC	60	1310 bc	1407 c	1064 c	1052 c
	30	357 a	645 a	802 a	547 a
TSP	60	1406 c	1517 c	968 b	1092 c
	30	445 a	793 b	733 a	709 b
<b>Mittel</b>		<b>845 AB</b>	<b>1098 C</b>	<b>895 B</b>	<b>837 A</b>
<b>Ca-Aufnahme</b> (mg Gefäß <sup>-1</sup> )					
NK	60	225 b	1308 c	835 b	169 cd
	30	90,4 a	790 a	401 a	91,7 a
PAC	60	224 b	1212 c	780 b	155 c
	30	76,6 a	784 a	361 a	84,2 a
TSP	60	298 c	1064 b	795 b	179 d
	30	104 a	713 a	358 a	115 b
<b>Mittel</b>		<b>170 B</b>	<b>979 D</b>	<b>558 C</b>	<b>132 A</b>
<b>Mg-Aufnahme</b> (mg Gefäß <sup>-1</sup> )					
NK	60	96,2 b	242 c	111 b	59,8 c
	30	26,6 a	113 a	67,3 a	26,3 a
PAC	60	94,3 b	213 b	109 b	57,2 c
	30	21,4 a	113 a	67,5 a	24,9 a
TSP	60	140 c	231 bc	107 b	68,8 d
	30	33,2 a	124 a	64,1 a	39,0 b
<b>Mittel</b>		<b>68,6 B</b>	<b>173 D</b>	<b>87,7 C</b>	<b>46,0 A</b>
<b>N-Aufnahme</b> (mg Gefäß <sup>-1</sup> )					
NK	60	821 b	875 d	818 b	743 c
	30	362 a	505 ab	584 a	386 a
PAC	60	782 b	777 c	806 b	727 c
	30	304 a	463 a	636 a	355 a
TSP	60	887 b	871 d	823 b	857 d
	30	385 a	560 b	641 a	549 b
<b>Mittel</b>		<b>590 A</b>	<b>675 B</b>	<b>718 B</b>	<b>603 A</b>

NK = Kontrolle ohne P; PAC = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; TSP = mineralische P-Zufuhr mit Tripel-Superphosphat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; WHK = Wasserhaltekapazität; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtarten; (p≤0,05 Duncan Test nach einfaktorieller ANOVA)

Tabelle A-19: Einfluss der Wasser- und P-Zufuhr auf den doppellactatlöslichen K- und Mg-Gehalt im Boden, im Versuch B.

Düngung	WHK %	Sorghum	Amarant	Raps	Roggen
<b>K<sub>dl</sub></b> (mg kg <sup>-1</sup> )					
NK	60	101 ab	101 a	103 a	109 a
	30	131 c	130 b	126 b	143 c
PAC	60	109 b	103 a	113 a	119 ab
	30	156 d	149 c	140 c	168 d
TSP	60	96,9 a	98,8 a	108 a	108 a
	30	129 c	127 b	130 bc	129 b
<b>Mittel</b>		<b>120 A</b>	<b>118 A</b>	<b>120 A</b>	<b>129 B</b>
<b>Mg<sub>dl</sub></b> (mg kg <sup>-1</sup> )					
NK	60	233 bc	189 a	207 a	255 b
	30	219 a	196 ab	210 a	255 b
PAC	60	222 ab	189 a	207 a	242 b
	30	237 c	203 b	219 c	244 b
TSP	60	229 abc	189 a	215 ab	213 a
	30	225 abc	206 b	213 ab	213 a
<b>Mittel</b>		<b>228 C</b>	<b>195 A</b>	<b>212 B</b>	<b>237 D</b>

NK = Kontrolle ohne P; PAC = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; TSP = mineralische P-Zufuhr mit Tripel-Superphosphat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; WHK = Wasserhaltekapazität; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtarten; ( $p \leq 0,05$  Duncan Test nach einfaktorieller ANOVA)

Tabelle A-20: Einfluss der Wasser- und P-Zufuhr auf die K-, Ca-, Mg-, und N-Aufnahme, im Versuch C.

Fruchtart	Düngung	WHK %	K-Aufnahme	Ca-Aufnahme (mg Gefäß <sup>-1</sup> )	Mg-Aufnahme	N-Aufnahme
Sorghum	NK	60	724 cd	167 bc	96,2 d	387 bc
		30	562 ab	125 a	61,2 a	353 a
		PS	730 cd	157 b	75,6 b	409 cd
	PAC	60	808 ef	184 de	104 de	410 cd
		30	530 a	124 a	62,0 a	361 ab
		PS	703 c	161 b	76,7 b	394 cd
	PACII	60	902 h	190 e	119 f	473 f
		30	580 ab	137 a	71,2 b	353 a
		PS	834 fg	182 cde	97,2 d	421 de
	TSP	60	873 gh	198 e	112 ef	442 e
		30	614 b	153 b	75,7 b	388 bc
		PS	770 de	169 bcd	87,5 c	396 cd
<b>MW</b>			<b>719 A</b>	<b>162 A</b>	<b>86,6 A</b>	<b>399 A</b>
Amarant	NK	60	1024 bc	515 abc	199 cd	490 b
		30	924 a	468 ab	180 abc	447 a
		PS	1025 bc	461 ab	173 ab	526 bcd
	PAC	60	1103 cde	538 c	198 cd	529 bcd
		30	1004 b	512 abc	189 abcd	523 bcd
		PS	1042 bcd	458 a	167 a	539 cd
	PACII	60	1139 ef	576 cd	207 d	539 cd
		30	1060 bcd	525 abc	192 bcd	541 cd
		PS	1204 f	547 c	192 bcd	532 bcd
	TSP	60	1201 f	662 e	232 e	561 d
		30	1120 de	527 bc	196 cd	510 bc
		PS	1153 ef	620 de	205 d	501 bc
<b>MW</b>			<b>1083 B</b>	<b>534 B</b>	<b>194 B</b>	<b>520 B</b>

NK = Kontrolle ohne P; PAC = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; PACII = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,40 g P Gefäß<sup>-1</sup>; TSP = mineralische P-Zufuhr mit Tripel-Superphosphat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; PS = periodischer Trockenstress; WHK = Wasserhaltekapazität; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtarten; ( $p \leq 0,05$  Duncan Test nach einfaktorieller ANOVA)

Tabelle A-21: Einfluss der Wasser- und P-Zufuhr auf den doppellactatlöslichen K- und Mg-Gehalt im Boden, im Versuch C.

Fruchtart	Düngung	WHK %	K <sub>dl</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	Mg <sub>dl</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )
Sorghum	NK	60	18,8 abcd	141 a
		30	32,1 ef	159 b
		PS	26,5 cdef	149 ab
	PAC	60	16,5 ab	142 a
		30	34,4 f	152 ab
		PS	23,8 bcde	152 ab
	PACII	60	17,5 abc	141 a
		30	27,3 def	150 ab
		PS	16,0 ab	155 ab
	TSP	60	12,4 a	154 ab
		30	26,3 cdef	153 ab
		PS	18,5 abcd	141 a
<b>MW</b>			<b>22,5 A</b>	<b>149 B</b>
Amarant	NK	60	19,0 ab	129 bcd
		30	27,0 cd	135 d
		PS	26,3 cd	148 f
	PAC	60	18,3 a	123 abc
		30	29,0 d	121 ab
		PS	24,3 c	125 abc
	PACII	60	16,0 a	119 a
		30	26,3 cd	123 abc
		PS	17,3 a	128 bcd
	TSP	60	18,5 a	131 cd
		30	23,0 bc	134 d
		PS	23,0 bc	134 d
<b>MW</b>			<b>22,3 A</b>	<b>129 A</b>

NK = Kontrolle ohne P; PAC = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; PACII = organische P-Zufuhr mit Ca-Phytat 0,40 g P Gefäß<sup>-1</sup>; TSP = mineralische P-Zufuhr mit Tripel-Superphosphat 0,20 g P Gefäß<sup>-1</sup>; PS = periodischer Trockenstress; WHK = Wasserhaltekapazität; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtarten; ( $p \leq 0,05$  Duncan Test nach einfaktorieller ANOVA)