

Aus der Professur Acker- und Pflanzenbau
der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

Nutzung von Biomasseaschen für die Phosphor-Versorgung im Pflanzenbau

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

doctor agriculturae (Dr. agr.)

an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

der Universität Rostock

vorgelegt von:

M.Sc. Katja Schiemenz

aus Rostock

Gutachter:

PD Dr. habil. B. Eichler-Löbermann, Universität Rostock

Prof. Dr. T. Müller, Universität Hohenheim

Prof. Dr. D. Trautz, Hochschule Osnabrück

Eingereicht: 07.10.2011

Verteidigung: 24.02.2012

urn:nbn:de:gbv:28-diss2012-0041-3

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS	I
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	III
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IV
TABELLENVERZEICHNIS	V
1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG.....	1
2 LITERATURÜBERBLICK	5
2.1 GLOBALE P-RESERVEN UND DIE ENTWICKLUNG DES P-BEDARFS IN DER LANDWIRTSCHAFT	5
2.2 P-DYNAMIK UND P-VERFÜGBARKEIT IM BODEN	7
2.3 ENERGETISCHE BIOMASSENUTZUNG UND ALLGEMEINE VORTEILE DER VERWERTUNG VON BIOMASSEASCHEN	9
2.4 QUANTITATIVES VERWERTUNGSPOTENTIAL VON BIOMASSEASCHE ZUR P-DÜNGUNG: BEISPIEL STROHASCHE – ABGELEITET VOM ENERGETISCHEN STROHNUTZUNGSPOTENTIAL IN DEUTSCHLAND.....	10
2.5 RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN ZUR PFLANZENBAULICHEN VERWERTUNG VON BIOMASSEASCHEN	13
2.6 EIGENSCHAFTEN VON BIOMASSEASCHEN UND DEREN NUTZUNGSMÖGLICHKEITEN IN DER LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT	15
2.7 P-MOBILISIERUNGSPOTENTIAL VON FELDFRÜCHTEN UND BEISPIELE ZUR P-AUSNUTZUNG AUS BIOMASSEASCHEN	20
3 HYPOTHESEN UND ZIELSTELLUNG	25
4 MATERIAL UND METHODEN	27
4.1 AUSWAHL UND CHARAKTERISIERUNG DER VERWENDETEN BIOMASSEASCHEN	27
4.2 FELDVERSUCHE IN ROSTOCK UND TRENTHORST	28
4.2.1 STANDORTCHARAKTERISIERUNG	28
4.2.2 VERSUCHSAUFBAU.....	31
4.3 GEFÄßVERSUCHE – AUFBAU UND DURCHFÜHRUNG	33
4.4 UNTERSUCHUNGEN UND ANALYSEN	35
4.4.1 ERMITTLUNG DER ERTRÄGE UND NÄHRSTOFFAUFNAHMEN IN DEN FELD- UND GEFÄßVERSUCHEN	35
4.4.2 WURZELUNTERSUCHUNGEN IN DEN GEFÄßVERSUCHEN	36
4.4.3 BODENUNTERSUCHUNGEN IN DEN FELD- UND GEFÄßVERSUCHEN	36
4.4.4 ANALYSEN DER ASCHEN UND DES DÜNGERS TRIPLESUPER-P	39
4.5 STATISTISCHE AUSWERTUNG	40

5	ERGEBNISSE	41
5.1	P-FRAKTIONEN DER BIOMASSEASCHEN UND DES DÜNGERS TRIPLESUPER-P	41
5.2	STANDORTABHÄNGIGE EFFEKTE DER DÜNGUNG MIT BIOMASSEASCHEN UND DES ZWISCHENFRUCHTANBAUS IN DEN FELDVERSUCHEN	42
5.2.1	ERTRAG UND NÄHRSTOFFAUFNAHMEN DER HAUPT- UND ZWISCHENFRÜCHTE.....	42
5.2.2	NÄHRSTOFFVERFÜGBARKEIT IM BODEN DER FELDVERSUCHE	48
5.2.3	SCHWERMETALLGEHALTE IM BODEN.....	54
5.3	DÜNGEEFFEKTE VON BIOMASSEASCHEN UND TRIPLESUPER-P IN DEN GEFÄß- VERSUCHEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER FRUCHT- UND BODENART	54
5.3.1	BIOMASSEERTRAG, NÄHRSTOFFAUFNAHME UND WURZELMORPHOLOGIE VERSCHIEDENER FRUCHTARTEN	55
5.3.2	NÄHRSTOFFVERFÜGBARKEIT IM BODEN DER GEFÄßVERSUCHE	63
5.3.3	P-AUFNAHMEEFFIZIENZ UND TATSÄCHLICHE P-AUSNUTZUNG	73
6	DISKUSSION	77
6.1	P-VERFÜGBARKEIT/P-FRAKTIONEN IN DEN BIOMASSEASCHEN	78
6.2	STANDORTABHÄNGIGE EFFEKTE DER BIOMASSEASCHEN UND DES ZWISCHEN- FRUCHTANBAUS AUF PFLANZENERTRAG UND P-AUFNAHME SOWIE DIE NÄHR- STOFFVERFÜGBARKEIT IM BODEN	79
6.3	EFFEKT DER BIOMASSEASCHEN AUF DIE SCHWERMETALLGEHALTE IM BODEN	85
6.4	FRUCHTARTEN- UND BODENABHÄNGIGE DÜNGEEFFEKTE DER BIOMASSE- ASCHEN IM VERGLEICH ZU TRIPLESUPER-P IM GEFÄßVERSUCH	86
6.5	P-EFFIZIENZ IM GEFÄßVERSUCH MIT VERSCHIEDENEN FRUCHTARTEN ZUR BEURTEILUNG DER BIOMASSEASCHE-DÜNGEWIRKUNG	97
6.6	PRÜFUNG DER HYPOTHESEN	101
7	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	105
8	LITERATURVERZEICHNIS	111
	THESEN ZUR DISSERTATIONSSCHRIFT	135
	ANHANG	139

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Kurzform	Bezeichnung	Kurzform	Bezeichnung
Alox	Aluminium, oxalatlöslich	Ls	sandiger Lehm
Anz.	Anzahl	Mgdl	doppellaktatlösliches Magnesium
Aufn.	Aufnahme	MgSO ₄	Magnesiumsulfat
AVV	Abfallverzeichnis-Verordnung	MW	Mittelwert
BBCH	einheitliche Codierung der phänolog. Entwicklungsstadien mono- u. dikotyle Pflanzen; die Kurzbezeichnung leitet sich ab aus der Zusammenarbeit der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, des Bundessortenamtes und der Chem. Industrie	NaHCO ₃	Natriumhydrogencarbonat
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz	NaOH	Natriumhydroxid
BBodSchV	Bundesbodenschutzverordnung	n.b.	nicht bestimmt
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung	NH ₄ NO ₃	Ammoniumnitrat
BioAbfV	Bioabfallverordnung	ns	nicht signifikant
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz	NS	Niederschlag
CaCl ₂	Calciumchlorid	oTS	organische Trockensubstanz
DepV	Deponieverordnung	P ₂ O ₅	(Di)phosphorpentoxid
DPS	Grad der P-Sättigung	Parz.	Parzelle
Düng.	Düngung	Pcit	zitronensäurelöslicher Phosphor
DüngG	Düngegesetz	Pdl	doppellaktatlöslicher Phosphor
DüMV	Düngemittelverordnung	Pfl.	Pflanze(n)
DüV	Düngeverordnung	Pox	P, oxalatlöslich
FA	Fruchtart	PSC	P-Sorptionskapazität
Feox	Eisen, oxalatlöslich	Pt	P total bzw. Gesamt-P
FM	Frischmasse	Pw	P, wasserlöslich
GA	Getreideasche	RESA	Rapsextraktionsschrotasche
Gef.	Gefäß	SA	Strohasche
H ₂ O	Wasser	sign.	signifikant
H ₂ SO ₄	Dihydrogensulfat (Schwefelsäure)	Sl	lehmiger Sand
HCl	Chlorwasserstoff (in H ₂ O gelöst: Salzsäure)	So	Sommer (z.B. bei So-Raps)
HE	Haupternte	T	Ton
HNO ₃	Hydrogennitrat (Salpetersäure)	TA	Tatsächliche Nährstoffausnutzung
K ₂ O	Kaliumoxid	Temp.	Temperatur
KAS	Kalkammonsalpeter	TM	Trockenmasse
KCl	Kaliumchlorid	TSP	Triplesuperphosphat
Kdl	doppellaktatlösliches Kalium	U	Schluff
keimf.	keimfähig	VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
Kö.	Körner	WHG	Wasserhaushaltsgesetz
KON	Kontrolle (ohne P/K-Düngung)	W-S-V	Wurzel-Spross-Verhältnis
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz	ZE	Zwischenernte
		ZF	Zwischenfrucht
		Zn	Zink

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Biomasseaschenutzung als Beitrag zur Schließung von Nährstoffkreisläufen.	2
Abb. 2: Rohphosphat-Abbau: Länder und deren Anteile (%) am weltweiten Abbau im Jahr 2009.	5
Abb. 3: Rohphosphat-Reserven: Länder und deren Anteile (%) an den weltweiten Rohphosphat-Reserven.	5
Abb. 4: Witterungsbedingungen im Versuchszeitraum März 2007 bis September 2008 am Standort Rostock.	30
Abb. 5: Witterungsbedingungen im Versuchszeitraum April 2007 bis August 2008 am Standort Trenthorst.	30
Abb. 6: Entwicklung der Pw-Gehalte im Oberboden ohne P-Düngung (Kontrolle) beeinflusst durch den Zwischenfruchtanbau, Feldversuch Rostock 2007– 2008.	51
Abb. 7: Entwicklung der Pdl-Gehalte im Oberboden ohne P-Düngung (Kontrolle) beeinflusst durch den Zwischenfruchtanbau, Feldversuch Rostock 2007– 2008.	51
Abb. 8: Spross-TM-Ertrag, P-, K- und Mg-Aufnahmen im Spross in Abhängigkeit von der Düngung und der Bodenart, Gefäßversuche 2007 und 2008.	56
Abb. 9: Abweichung des Spross-TM-Ertrages und der P-Aufnahme im Spross der P-Düngevarianten von der Kontrolle in Abhängigkeit von der Fruchtart und Bodenart, Gefäßversuche 2007 und 2008.	59
Abb. 10: Gegenüberstellung von K-Aufnahme in den Spross und Δ Kdl im Boden nach mehrwöchigen Gefäßversuchen mit verschiedenen Fruchtarten auf Sand bzw. Lehm (Kontrollvariante ohne P-Zufuhr).	60
Abb. 11: Pt-Gehalte im Boden in Abhängigkeit von der Düngung, Gefäßversuche 2007 und 2008.	67
Abb. 12: Grad der P-Sättigung (DPS) im Mittel der Fruchtarten in Abhängigkeit von der Düngung, Gefäßversuche 2007 und 2008.	68
Abb. 13: Relative Anteile der P-Fractionen im Boden der Gefäßversuche 2007 und 2008, in Abhängigkeit von der Bodenart und den Fruchtarten.	69
Abb. 14: Einfluss der P-Düngung auf die P-Fractionen den Gefäßversuchen 2007 und 2008, relativer Vergleich der Varianten TSP, RESA, SA und GA zur Kontrolle.	72
Abb. 15: Gegenüberstellung von P-Aufnahme in den Spross und Δ Pdl im Boden nach mehrwöchigen Gefäßversuchen mit verschiedenen Fruchtarten auf Sand bzw. Lehm (Kontrollvariante ohne P-Zufuhr).	74
Abb. 16: P-Aufnahmeeffizienz (prozentuales Verhältnis aus P-Aufnahme in den Spross zu P-Angebot aus Boden und Düngung) in den Gefäßversuchen 2007 und 2008.	75
Abb. 17: Tatsächliche P-Ausnutzung (%) in den P-Düngevarianten, Gefäßversuche 2007 und 2008.	76
Abb. 18: Chemische und räumliche P-Verfügbarkeit im Boden und deren Einfluss- faktoren.	89

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1: Energetisch nutzbares Getreidestroh in Deutschland.	12
Tab. 2: Regelwerke für die flächenhafte Verwertung von mineralischen Abfällen/ Biomasseaschen in und auf Böden.	14
Tab. 3: Ascheanteile in Abhängigkeit vom Brennstoff, Angaben in Gewichts-%.	15
Tab. 4: P-Konzentrationen verschiedener Biomasseaschen pflanzlichen Ursprungs.....	17
Tab. 5: P-Konzentrationen von Biomasseaschen tierischer Exkremente und von Klärschlammaschen.	18
Tab. 6: Produktionsbedingungen der Aschen.....	27
Tab. 7: pH-Werte und Nährstoffzusammensetzung der untersuchten Biomasseaschen... 28	
Tab. 8: Bodeneigenschaften (Beprobungstiefe 0–30 cm) zu Beginn der Feldversuche 2007 mit Zuordnung zu Gehaltsklassen und pH-Klassen.....	29
Tab. 9: Durchschnittstemperaturen und Niederschlagssummen der Standorte Rostock und Trenthorst in den Versuchsjahren 2007–2008 und im lang- jährigen Mittel.	29
Tab. 10: Düngevarianten und Nährstoffkonzentrationen/-zufuhr in den Feldversuchen... 31	
Tab. 11: Versuchstechnische/pflanzenbauliche Informationen zu den Feldversuchen 2007–2008.	32
Tab. 12: Bodeneigenschaften zu Beginn der Gefäßversuche (vor der Düngung) mit Zuordnung zu Gehaltsklassen und pH-Klassen.	33
Tab. 13: P-Fraktionen im Boden (mg kg^{-1}) zu Beginn der Gefäßversuche.	33
Tab. 14: Düngevarianten der Gefäßversuche, ihre Nährstoffkonzentrationen und Dünger-/Nährstoffzufuhr (bezogen auf Gefäße mit 6 kg Boden).....	34
Tab. 15: P-Fraktionen der Aschen und des TSP-Düngers.	41
Tab. 16: TM-Ertrag (dt ha^{-1}) und Nährstoffaufnahmen (kg ha^{-1}) zu den Zwischen- ernten (Ganzpflanze) und zur Haupternte (Korn) der So-Gerste in Abhängig- keit von der Düngung, Feldversuch Rostock 2007.	43
Tab. 17: TM-Ertrag (dt ha^{-1}) und Nährstoffaufnahmen (kg ha^{-1}) zur Zwischen- und Haupternte von Mais (Ganzpflanze) in Abhängigkeit von der Düngung und der Zwischenfrucht, Feldversuch Rostock 2008.....	44
Tab. 18: TM-Ertrag (dt ha^{-1}) und Nährstoffaufnahmen (kg ha^{-1}) der Zwischenfrüchte (Ganzpflanze) in Abhängigkeit von der Zwischenfruchtart und Düngung, Feldversuch Rostock, Herbst 2007.	45
Tab. 19: TM-Ertrag (dt ha^{-1}) und Nährstoffaufnahmen (kg ha^{-1}) zu Zwischenernten (Ganzpflanze) und zur Haupternte (Korn und Stroh) von So-Weizen in Abhängigkeit von der Düngung, Feldversuch Trenthorst 2007.	46
Tab. 20: TM-Ertrag (dt ha^{-1}) und Nährstoffaufnahmen (kg ha^{-1}) zur Zwischen- und Haupternte der Blauen Lupine in Abhängigkeit von der Düngung und der Zwischenfrucht, Feldversuch Trenthorst 2008.....	47
Tab. 21: pH-Wert, Bodennährstoffgehalte und P-Sorptionsparameter zum Ernte- termin in Abhängigkeit von der Düngung, Feldversuch Rostock 2007.....	48
Tab. 22: pH-Wert, Bodennährstoffgehalte und P-Sorptionsparameter zur Boden- probenahme im Februar 2008 in Abhängigkeit von der Düngung und der Zwischenfrucht, Feldversuch Rostock.	49
Tab. 23: pH-Wert, Bodennährstoffgehalte und P-Sorptionsparameter zum Ernte- termin von Mais in Abhängigkeit von der Düngung und der Zwischenfrucht, Feldversuch Rostock 2008.....	50
Tab. 24: pH-Wert, Bodennährstoffgehalte und P-Sorptionsparameter zum Ernte- termin 2007 in Abhängigkeit von der Düngung, Feldversuch Trenthorst.....	52

Tab. 25: pH-Wert, Bodennährstoffgehalte und P-Sorptionsparameter am 01.04.2008 und zum Erntetermin 2008 in Abhängigkeit der Düngung, Feldversuch Trenthorst.	53
Tab. 26: Schwermetallgehalte im Boden (0–30 cm) der Feldversuche im Vergleich vor und nach Aschezufuhr sowie im Vergleich zu Vorsorgewerten nach Anhang 2 der BBodSchV.	54
Tab. 27: Sprossertrag in Abhängigkeit von der Düngung, Fruchtart und Bodenart, Gefäßversuche 2007 und 2008.	57
Tab. 28: P-Aufnahme im Spross in Abhängigkeit von der Düngung, Fruchtart und Bodenart, Gefäßversuche 2007 und 2008.	58
Tab. 29: Wurzelmorphologische Kriterien in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche auf Sand (Sl3), 2007.	62
Tab. 30: Wurzelmorphologische Kriterien in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche auf Lehm (Ls3), 2008.	63
Tab. 31: pH-Werte im Boden zu Versuchsende in Abhängigkeit von der Düngung, Fruchtart und Bodenart, Gefäßversuche 2007 und 2008.	64
Tab. 32: Pw-Gehalte im Boden zu Versuchsende in Abhängigkeit von der Düngung, Fruchtart und Bodenart, Gefäßversuche 2007 und 2008.	65
Tab. 33: Δ Pdl im Boden der Gefäßversuche in Abhängigkeit von der pflanzlichen P-Aufnahme.	66
Tab. 34: Pdl-Gehalte im Boden zu Versuchsende in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche 2007 und 2008.	66
Tab. 35: Pt-Gehalte im Boden zu Versuchsende in Abhängigkeit von der Düngung, Fruchtart und Bodenart, Gefäßversuche 2007 und 2008.	68
Tab. 36: P-Fraktionen im Boden (mg kg^{-1}) zu Versuchsende in Abhängigkeit von der Düngung, Gefäßversuche 2007 und 2008.	71
Tab. 37: Saure und alkalische Phosphatase ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$) im Boden zu Versuchsende in Abhängigkeit von der Fruchtart, Düngung und Wechselwirkung, Gefäßversuch auf Sand (Sl3), 2007.	73
Tab. 38: Empfehlenswerteste Kombination aus Hauptfrucht, Boden und Biomasseasche bezüglich Steigerung des Spross-Ertrages und der P-Aufnahmeeffizienz.	99
Tab. 39: Empfehlenswerteste Kombination aus Zwischenfrucht, Boden und Biomasseasche bezüglich P-Aufnahmeeffizienz.	100

1 Einleitung und Problemstellung

Neben Stickstoff (N) und Kalium (K) zählt Phosphor (P) zu den wichtigsten Hauptnährstoffen der Pflanzen und ist in seiner physiologischen Funktion durch keinen anderen Stoff ersetzbar. P-Verbindungen sind essentiell für den Zellaufbau und für biologische Prozesse, wie z. B. Photosynthese, Zucker- und Energiestoffwechsel, Signaltransduktion sowie für den Aufbau von DNA und RNA (Taiz und Zeiger 2000). P-Mangel kann zu Zwergwuchs, Starrtracht und dunkel- bis blaugrüner Verfärbung (Hyperchlorophyllierung) teilweise auch rötlicher Färbung (Anthocyanbildung) der Blätter führen (Bergmann 1993, Schilling 2000, Larcher 2001, Blume et al. 2010).

Zur P-Düngung werden in der Pflanzenproduktion neben Wirtschaftsdüngern wie Gülle, die intern im landwirtschaftlichen Stoffkreislauf anfallen, auch erhebliche Mengen an mineralischen Düngemitteln aus externen Quellen zugeführt. Aschen aus der Verbrennung biogenen Ausgangsmaterials gehören zu den ältesten mineralischen Düngemitteln der Menschheit. Bei der Urbarmachung von Land durch Brandrodung wurde als Nebeneffekt die Düngewirkung von Holzasche erkannt (Radkau 2002), welche später systematisch genutzt wurde und heute noch Teil des „shifting cultivation“ – einer in den inneren Tropen beheimateten Form des Ackerbaus – ist (Whitmore und Turner 2001, Adeniyi 2010). Brandrodung führt zu erhöhten pH-Werten und einem Anstieg des extrahierbaren P und anderer Nährstoffe im Boden (Nye und Greenland 1960).

Holzasche wurde noch im 19. Jahrhundert als vorzügliches Düngemittel betrachtet (Heiden 1887), auch wenn um 1830 bereits die Anwendung von Handelsdüngern begann (Finck 2007). Mit der Entdeckung und Entwicklung neuartiger Düngemittel trat die Nutzung von Aschen als Düngemittel eher in den Hintergrund. Statt dessen fanden Guano und Superphosphat ab den 1840er Jahren Verwendung. Im Zuge der fortschreitenden Industrialisierung und des vermehrten Düngebedarfs kamen weitere Düngemittel wie z.B. Thomasphosphat ab 1879 und Nitrophoska (erster NPK-Dünger) im Jahre 1927 hinzu (Finck 2007).

Die Phosphatdüngerproduktion basiert überwiegend auf Rohphosphaten (Pradt 2007), womit konzentrierte Apatitvorkommen bezeichnet werden (Schilling 2000), die innerhalb von 10–15 Mio. von Jahren entstanden sind (CEEP 2011). Die Aufbereitungsverfahren zur Produktion von P-Düngern aus Rohphosphat sind sehr energie- bzw. ressourcenintensiv (Dockhorn 2008). Etwa 90 % des abgebauten Rohphosphats finden im landwirtschaftlichen Bereich Verwendung (Gleisberg 1988, Heintz und Reinhardt 1996, Gross 2010).

1 Einleitung und Problemstellung

P ist eine endliche, d.h. nicht erneuerbare Ressource, die nicht substituierbar ist (Ludwig 2009). Da absehbar ist, dass aufgrund des begrenzten P-Angebots (siehe *Kap. 2.1*) und bei zunehmenden Energie- und Produktionskosten auch die Preise für Düngemittel weiterhin steigen werden (Steen 1998, Vetter 2008), und außerdem die Rohphosphate häufig mit Cadmium und Uran verunreinigt sind und somit zu entsprechend hohen Belastungen der P-Düngemittel mit toxischen Elementen führen (Von Plessen und Schimmel 1987, Kratz und Schnug 2006, Schmitt et al. 2007), wächst das Interesse an Möglichkeiten des P-Recyclings. Spätestens im Jahr 2030 wird die P-Rückgewinnung in den Industrieländern etabliert und wirtschaftlich tragfähig sein, wobei unter anderem die P-Rückgewinnung aus Klärschlammaschen und aus Abwässern an Bedeutung zunehmen wird (Von Horn et al. 2010). Eine weitere Möglichkeit des P-Recyclings bietet die Nutzung von Abfallprodukten aus der Bioenergieproduktion. Bei der Biomasseverbrennung ist in Bezug auf nachhaltiges Wirtschaften nicht nur der Kohlenstoff-Kreislauf zu beachten und die CO₂-Neutralität der Biomasse positiv zu beurteilen. Vor dem Hintergrund der angesprochenen P-Verknappung und dem Ziel eines umweltgerechten Pflanzenbaus ist auch der P-Kreislauf bei der zukünftigen Verwertung von Biomasse und deren Rückständen von Relevanz (siehe *Abb. 1*).

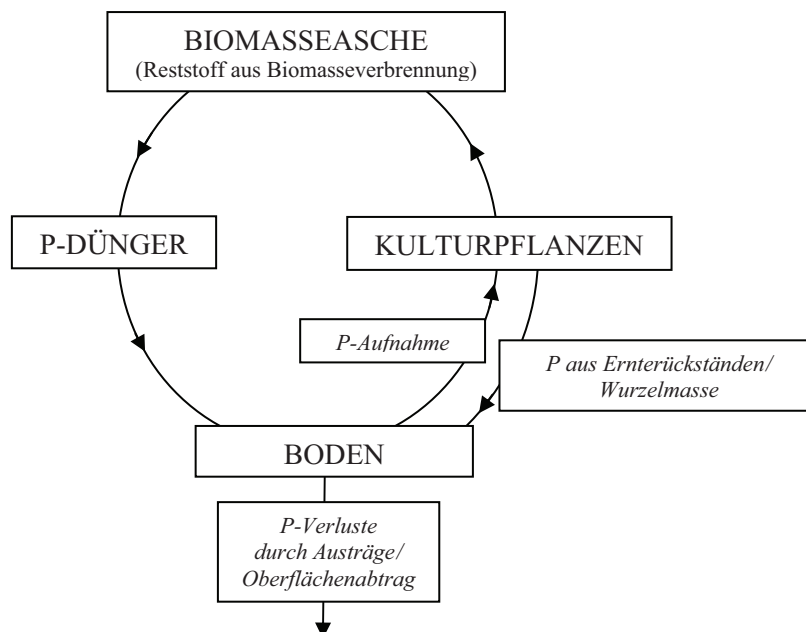


Abb. 1: Biomasseaschenutzung als Beitrag zur Schließung von Nährstoffkreisläufen.
(eigene Darstellung)

1 Einleitung und Problemstellung

Aus ökonomischen und ökologischen Gründen (Einsparung von Ascheentsorgungs- und Düngemittelkosten, Nährstoffrecycling, Kreislaufwirtschaft) sollten nährstoffreiche Biomasseaschen als Düngemittel dem Boden wieder zugeführt werden. Ferner kann zur Einsparung von P-Düngemitteln und zur Ausnutzung der Boden- und Düngerphosphate der Anbau von solchen Fruchtarten beitragen, die ein hohes P-Aneignungsvermögen und eine möglichst hohe P-Nutzungseffizienz besitzen (Eichler 1997). Die bei verschiedenen Pflanzenarten unterschiedlich ausgeprägten Nährstoffaufnahme-strategien sind hinsichtlich der Versorgung mit P besonders wichtig, da dieser Nährstoff im Boden vorwiegend gebunden ist und nur ca. 0,1 % des Gesamt-P in der Bodenlösung vorliegt (Blume et al. 2010).

Die Verwertung von Holzasche zwecks Nährstoffrecyclings ist bereits recht umfangreich untersucht worden (siehe z.B. Holzner 1999, Vance und Mitchell 2000, Stahl und Doetsch 2008). Die Nährstoffverfügbarkeit anderer Biomasseaschen in Kombination mit verschiedenen Fruchtarten und in Abhängigkeit unterschiedlicher Bodenbedingungen sind bislang noch unzureichend erforscht. Vor diesem Hintergrund wurden Feld- und Gefäßversuche angelegt und Proben der verwendeten Biomasseaschen sowie Boden- und Pflanzenproben hinsichtlich P und weiterer Elemente untersucht. Dabei wurde nicht nur die Nährstoffverfügbarkeit und Ertragswirkung verschiedener Aschen zueinander in Beziehung gesetzt, sondern diese auch mit der Düngewirkung des leichtlöslichen P-Düngers Triplesuperphosphat verglichen.

2 Literaturüberblick

2.1 Globale P-Reserven und die Entwicklung des P-Bedarfs in der Landwirtschaft

Rohphosphate werden in über 30 Ländern abgebaut. Die Hauptförderländer sind China, die USA, Marokko und Russland (USGS 2010, siehe auch *Abb. 2*).

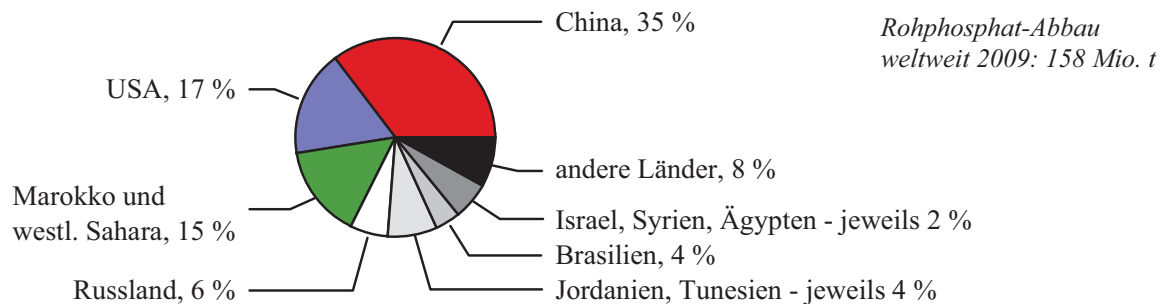


Abb. 2: Rohphosphat-Abbau: Länder und deren Anteile (%) am weltweiten Abbau im Jahr 2009. (Datenquelle: USGS 2010)

Die Vorkommen, der in großem Umfang abbauwürdigen Lagerstätten sind jedoch auf wenige Länder konzentriert, allen voran Marokko mit 1/3 und China mit fast 1/4 der Phosphatreserven (*Abb. 3*). Deutschland besitzt keine eigenen Rohphosphatvorkommen und ist daher zu 100 % auf den Import von Rohphosphaten bzw. den daraus hergestellten Produkten angewiesen (UBA 2007).

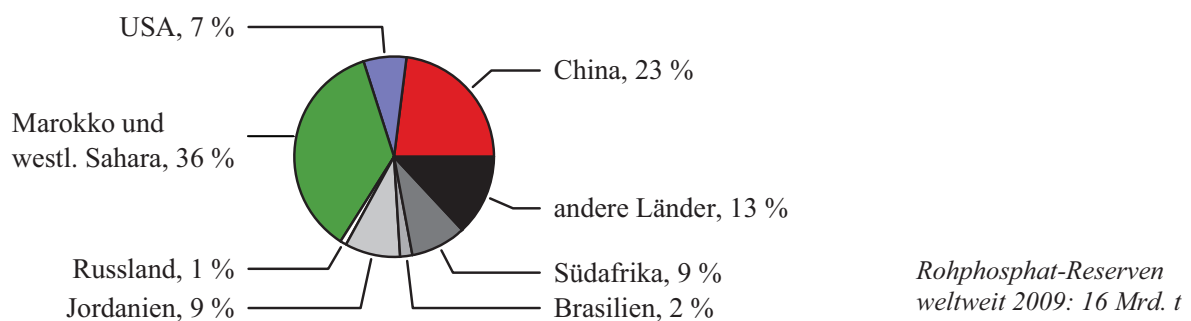


Abb. 3: Rohphosphat-Reserven: Länder und deren Anteile (%) an den weltweiten Rohphosphat-Reserven. (Datenquelle: USGS 2010)

Der globale Bedarf an P wird sich, ähnlich wie der N- und K-Bedarf, in den kommenden Jahren weiter erhöhen (FAO 2008). Es ist mit einer steigenden Phosphatabbaurrate weltweit jährlich um ca. 2,5–3,0 % zu rechnen (Steen 1998, FAO 2008, Gilbert 2009). Jedoch sind die globalen P-Ressourcen limitiert, und die noch verfügbaren, kostengünstig abbauwürdigen P-Reserven reichen beim heutigen Nutzungsniveau nach verschiedenen Schätzungen

noch zwischen 60–130 Jahre (Steen 1998, Haarr 2005, Pradt 2007, Gilbert 2009, Römer 2009, Rosemarin et al. 2009). Entsprechend den Berechnungen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe beträgt die statistische Lebensdauer 115 Jahre, beruhend auf den Welt-Phosphatreserven von 18 Mrd. t (2007) und einer Abbaurate von 156 Mio. t (2007) (BGR 2007, Elsner 2008).

Der „P-Peak“ (Zeitpunkt der größten Rohphosphat-Abbaurate) wird ab 2050 (Vance 2010), eventuell auch schon ab 2030 erwartet (CEEP 2011). Dabei ist zu berücksichtigen, dass P eine nicht erneuerbare Ressource ist, wie z.B. Erdöl (Cordell et al. 2009), und nicht ersetzbar (Weikard und Seyhan 2009, Gilbert 2009).

Ohne Dünger ist eine moderne Landwirtschaft undenkbar (UBA 2011). Infolge der Abfuhr von Ernteprodukten von landwirtschaftlichen Flächen ist eine P-Düngung (entsprechend des P-Versorgungszustandes des Bodens und des zu erwartenden P-Gehalts des Erntegutes) zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit notwendig (Blume et al. 2010).

In Bezug auf den P-Versorgungszustand der Böden und die jährliche P-Zufuhr auf landwirtschaftlichen Flächen gibt es nicht nur global sondern auch auf EU-Ebene große Unterschiede. Die jährliche Netto-P-Düngung (P-Zufuhr minus P-Entzug) war beispielsweise in den Niederlanden im Jahr 2005 mit über 20 kg P ha⁻¹ (Smit et al. 2009) relativ hoch. In Deutschland sank der jährliche P-Überschuss von ca. 25 kg P ha⁻¹ Ende der 1980er Jahre (Sibbesen und Runge-Metzger 1995, Weikard und Seyhan 2009) auf derzeit akzeptable 2,2 kg P ha⁻¹ (Mittel der Jahre 2000 bis 2002, Rogasik et al. 2004). Im Bereich der EU27 liegt der durchschnittliche P-Überschuss bei ca. 8 kg P ha⁻¹ (Richards und Dawson 2008). Trotz verringerter Anwendung von P-Düngern in vielen westeuropäischen Ländern in den letzten Jahren, ist die durchschnittliche P-Zufuhr größer als die Abfuhr, so dass eine P-Akkumulation die Folge ist (Tunney et al. 2003). Während in einigen Regionen Europas (Westeuropa, Zentral- und Osteuropa) sowie den USA somit die Mehrzahl der landwirtschaftlichen Flächen mit P überversorgt sind, besteht in vielen Entwicklungsländern ein Defizit in der P-Versorgung (Steen 1998, Nelson et al. 2005, Gilbert 2009). In mehr als 30 afrikanischen Staaten wurde seit 30 Jahren ein jährliches Nährstoffdefizit von durchschnittlich 22 kg N, 2,5 kg P und 15 kg K je ha landwirtschaftlicher Nutzfläche ermittelt (Sanchez 2002). Derzeit existieren jedoch noch keine großmaßstäbigen Alternativen zur Nutzung und Verarbeitung von Rohphosphat, mit denen sich der globale P-Bedarf adäquat decken ließe (Cordell et al. 2009, CEEP 2011), so dass verschiedene Möglichkeiten des P-Recyclings untersucht und bewertet werden müssen.

2.2 *P-Dynamik und P-Verfügbarkeit im Boden*

Über 30 % der weltweit landwirtschaftlich genutzten Flächen werden in der Ertragsleistung vom Nährstoff P limitiert (Vance et al. 2003). Um die Effizienz der P-Düngung bewerten und ggf. beeinflussen zu können, gilt es neben der P-Dynamik im Boden, gekennzeichnet durch die chemische P-Verfügbarkeit, auch die räumliche P-Verfügbarkeit (Zugänglichkeit) zu untersuchen. Die P-Aufnahme der Pflanzen ist von verschiedenen Bodeneigenschaften (chemisch/biologisch/physikalisch) und Pflanzeigenschaften (siehe auch *Kap. 2.7*) abhängig. Die P-Verfügbarkeit wird zudem von der Düngung (mineralisch/organisch/Kalk) und ackerbaulichen Maßnahmen (Bodenbearbeitung) sowie pflanzenbaulichen Maßnahmen (u.a. Fruchtfolge) beeinflusst (Werner und Trimborn 2008).

Zu den speziellen Einflussfaktoren auf die P-Dynamik und P-Verfügbarkeit zählen der Gesamt-P-Gehalt, der leicht pflanzenverfügbare P-Gehalt (P_w , P_{dl}), aber auch der schwerer verfügbare P-Anteil des Bodens (P-Nachlieferungsvermögen) (Stumpe et al. 1994), der pH-Wert (Amberger 1984), der Ton- und Humusgehalt (Amberger und Amann 1984), die Bodenfeuchte (Steffens 1987), die Witterung (Köster und Schachtschabel 1983, Stumpe et al. 1994), die Pflanzenart (Steffens 1987, Eichler 1997, Deubel et al. 2002) und der Aufbau und das Leistungsvermögen des Wurzelsystems (Amann und Amberger 1989).

Der P-Vorrat des Bodens sowie diesbezügliche Umwandlungsprozesse werden durch die Intensität und Form der P-Düngung (Pagel et al. 1996) bzw. durch komplexe Effekte von Anbausystem und Nutzungsart (Oberson et al. 1993, Leinweber 1996) beeinflusst, sind jedoch vor allem von den Bodeneigenschaften abhängig (O'Halloran et al. 1978, Schweitzer und Pagel 1998). Generell ist Phosphat in Böden der gemäßigten Klimate in ausreichenden Mengen ($200\text{--}800\text{ mg P kg}^{-1}$) vorhanden (Blume et al. 2010), wobei jedoch nur ein sehr geringer Teil direkt pflanzenverfügbar ist (Leppin 2007). Auch ein Großteil des Dünger-P verbleibt in gering pflanzenverfügbarer Form im Boden. Die P-Verfügbarkeit im Boden wird von Sorptions- und Desorptionsprozessen (Börling et al. 2001) beeinflusst. In jedem Boden besteht zwischen dem gelösten und gebundenen P ein spezielles Löslichkeitsgleichgewicht, dessen Veränderungen maßgeblich vom Puffervermögen des Bodens beeinflusst werden (Frossard et al. 2004, Blume et al. 2010). Einer geringen Löslichkeit von P-Mineralen steht die starke Bindung an Partikeloberflächen gegenüber, wodurch eine meist geringe P-Konzentration in der Bodenlösung resultiert (Weißhaidinger 2009). Infolge dessen lassen sich die limitierte Verfügbarkeit von P für die Pflanze (Frossard et al. 2004) und die geringen P-Austräge über die Auswaschung ins Grundwasser erklären (Gisi et al. 1997).

Die P-Verfügbarkeit von Böden ist durch unterschiedliche Anteile labiler und nicht-labiler bzw. stabiler P-Formen gekennzeichnet. Direkt pflanzenverfügbar ist das Phosphat, welches in der Bodenlösung vorliegt (HPO_4^{2-} / H_2PO_4^-). Die labile P-Fraktion (z.B. primäre oder sekundäre Ca-Phosphate und physikalisch austauschbar gebundene Phosphate) befindet sich mit der Bodenlösung in stetigem Austausch und gilt ebenfalls als pflanzenverfügbar. Zur stabilen Fraktion gehören (nach Mengel und Kirkby 2001):

- organische P-Verbindungen (z.B. Phytat)
- definierte Ca-, Fe-, und Al-Phosphate (z.B. Apatit, Strengit, Vivianit, Variscit)
- adsorbierte Phosphate (kovalente Bindung) (Fe- und Al-Oxide/-Hydroxide)
- okkludierte Phosphate (kristallisch eingeschlossenes Phosphat).

Nach neueren Erkenntnissen sind stabile P-Formen nicht auf Dauer nicht pflanzenverfügbar. Organische P-Verbindungen, die einen Anteil von 30–50 % des Gesamt-P im Boden einnehmen (Paul 2007), müssen zunächst über die Enzyme des P-Kreislaufs (Phosphatasen) mineralisiert, d.h. in anorganisches P umgewandelt werden, bevor sie in größerem Umfang von den Pflanzen aufgenommen werden können (Bielecki 1973, Šarapatka 2003, Leppin 2007). Phosphatasen können pflanzlichen und mikrobiellen Ursprungs sein (Tarafdar et al. 2001), d.h. diese Enzyme werden von Pflanzenwurzeln (Dinkelaker und Marschner 1992), Mycorrhizapilzen (Tarafdar und Marschner 1994) und Bodenbakterien (Tarafdar und Claassen 1988) produziert. Es werden saure und alkalische Phosphatasen unterschieden, je nachdem ob ihr optimaler pH-Wert zur Katalyse über oder unter pH 7,0 liegt (Eivazi und Tabatabai 1977, Vincent et al. 1992). Alkalische Phosphatasen gehören zu den mikrobiellen Enzymen; saure Phosphatasen können von Pflanzen und Mikroorganismen generiert werden (Tarafdar und Claassen 1988).

Zur zweiten Gruppe stabiler P-Verbindungen gehören die Calcium-, Eisen- und Aluminium-Phosphate, die in Abhängigkeit des pH-Wertes auftreten. Bevor sie von Pflanzen aufgenommen werden können, müssen sie gelöst werden (Leppin 2007). Aus Ca-Phosphaten kann P durch Ansäuerung der Rhizosphäre freigesetzt werden. Verschiedene Pflanzenarten sind in der Lage, unter P-Mangel organische Säuren (z.B. Zitronensäure, Apfelsäure) in die Rhizosphäre abzuscheiden, um den pH-Wert zu senken und P zu lösen. Nach Yan et al. (2002) erfolgt bei der Abgabe organischer Säuren über die Pflanzenwurzeln die Exsudation von organischen Anionen und Protonen separat. Während mittels Protonen eine Ansäuerung der Rhizosphäre erfolgt (Amann und Amberger 1989, Petersen und Böttger 1991), haben organische Säuren (insbesondere Citrat) desorbierenden Effekt bezüglich adsorbierter Phosphate aufgrund der Konkurrenz mit Phosphat um Sorptionsstellen an Oxid-/

Hydroxidoberflächen (Geelhoed et al. 1999). Wird das Phosphat in die Kristallstruktur der Oxide eingebaut, wodurch es den Pflanzen nicht mehr direkt zur Verfügung steht, spricht man von okkludierten Phosphaten. Ob diese Phosphate durch Abgabe von reduzierenden Stoffen, wie beispielsweise Phenolen in Kombination mit organischen Säuren, freigesetzt werden können, ist noch nicht nachgewiesen (Leppin 2007).

2.3 Energetische Biomassenutzung und allgemeine Vorteile der Verwertung von Biomasseaschen

Eine rasant anwachsende Weltbevölkerung, die für das Jahr 2050 auf über 9 Mrd. Menschen geschätzt wird (Bongaarts 2009, Swiaczny und Schulz 2009), mit einem großen Bedarf an Energie und Nahrungsmitteln (einschließlich tierischer Veredelungsprodukte) fordert immer höhere Erntemengen. Diese Entwicklung wird begleitet von steigendem Mineraldüngerverbrauch, begrenzten landwirtschaftlichen Nutzflächen und vermehrter Flächeninanspruchnahme für die Energiepflanzenproduktion.

Biomassenutzung bietet nicht nur Vorteile im Hinblick auf die angestrebte Reduktion anthropogen bedingter CO₂-Emissionen (Kaltschmitt et al. 2003). Nach Einschätzung des EU-Energiekommissars Günther Oettinger stellt Biomasse eine umweltfreundliche, sichere und wettbewerbsfähige Energiequelle dar, mittels deren Nutzung bereits mehr als die Hälfte des Verbrauchs von erneuerbarer Energie in der EU gedeckt werden kann (Ostermann 2010). Der Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch in Deutschland stieg innerhalb von 10 Jahren von 3,4 % (1999) auf 10,3 % (2009). Dabei entfallen etwa zwei Drittel der erneuerbaren Energien auf die Bioenergie (BMU 2010).

Infolge steigender Energiepreise ist mit einer verstärkten Nutzung biogener Festbrennstoffe zu rechnen (Hartmann 2001), wodurch zunehmend auch Verbrennungsrückstände (Biomasseaschen) für die Wiederverwendung zur Verfügung stehen werden. Während der Heizwert von halmgutartiger Biomasse (z. B. Landschaftspflegeheu, Stroh, Getreidekorn) mit 16–17 MJ/kg TS nur minimal unter dem Heizwert von Holz liegt, sind die Aschegehalte bei Halmgut wesentlich höher (Oechsner und Maurer 2004). Der Aschegehalt von Biomassebrennstoffen schwankt üblicherweise zwischen 0,5 Gew.% d. TS (Weichholz) und 5,0–8,0 Gew.% d. TS (Rinde und Halmgut) (Oberberger 1997, Oechsner und Maurer 2004). Getreidekorn liegt mit 2–3 % diesbezüglich im Mittelfeld (Oechsner und Maurer 2004). Höhere Werte weisen die Abfallprodukte aus der Ölgewinnung auf, wobei die Aschegehalte von Rapsextraktionsschrot bzw. Rapspresskuchen bei ca. 6–8 % (Launhardt et al. 2000, Kaltschmitt und Hartmann 2001, Piotrowska et al. 2010) und von Mohnpresskuchen bei etwa 13 % (Schweiger 2006) liegen können.

In Deutschland beträgt das Aufkommen an Asche aus Biomasseverbrennungsanlagen 435.000 t pro Jahr, die auf verschiedenen Wegen entsorgt oder verwertet werden (Reichenberger et al. 2008a). Eine Verwendung in der Bauindustrie wird aufgrund der chemischen Zusammensetzung, möglicher Inhomogenität und der für diesen Zweck zu geringen Anfallsmengen bisher nicht praktiziert (Tritthart 2000, Reichenberger et al. 2008a). Die Hauptverwertungswege für Biomasseaschen sind nach Düngemittel- (DüMV) und Versatzverordnung (VersatzV) geregelt. Bei Erfüllung düngerechtlicher Vorgaben können Biomasseaschen als Sekundärrohstoffdünger genutzt werden (Reichenberger et al. 2008a).

Die Verwertung der Rückstände aus der energetischen Nutzung von Biomasse im Pflanzenbau kann wirtschafts-, umwelt- und gesellschaftsrelevante Vorteile mit sich bringen. Positive finanzielle Aspekte liegen bei dieser Form der Wiederverwertung in der Einsparung von Deponievolumen und in den reduzierten Kosten für die Düngemittelproduktion (Sander und Andrén 1997, Liebhard et al. 2009). Zudem könnte der Betrieb von Biomasse-Heizwerken wirtschaftlicher werden, wenn sich die Entsorgungskosten für die Aschen verringern bzw. sich sogar Einnahmen mit den Aschen erzielen ließen. Die Wiederverwertung von Reststoffen und Einsparung von Düngerressourcen kann sich förderlich auf die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Landwirtschaft auswirken. Gleichzeitig wird mit der Ausbringung von Biomasseaschen als Düngemittel auf landwirtschaftlichen Flächen – und der damit verbundenen Rückführung von Nährstoffen, wie z.B. P – ein Beitrag zur Schließung von Nährstoffkreisläufen und zur nachhaltigen Erzeugung von Biomasse geleistet. Idealerweise ist dabei der Wuchsort der Biomasse, aus der die Asche gewonnen wurde, bei der Ascherückführung zu berücksichtigen. Demnach sollten halmgutartige Biomasseaschen auf Ackerflächen und Holz-/Rindenasche primär auf Forst- bzw. Energieholzflächen ausgebracht werden, um eine Kreislaufwirtschaft zu gewährleisten (Oberberger 1997).

2.4 Quantitatives Verwertungspotential von Biomasseasche zur P-Düngung: Beispiel Strohasche – abgeleitet vom energetischen Strohnutzungspotential in Deutschland

Knapper werdende Ressourcen und das Bestreben, einen nachhaltigen Pflanzenbau mit praktizierter Kreislaufwirtschaft zu betreiben, führen zu der Frage nach dem Ausmaß des energetisch nutzbaren Biomassepotentials landwirtschaftlicher Abfall- und Nebenprodukte. In dem Zusammenhang lässt sich die Menge anfallender Biomasseasche abschätzen, die aufgrund ihres P-Gehaltes zur P-Düngung zur Verfügung steht. Im Folgenden wurde am Beispiel der energetischen Strohnutzung eine Potentialabschätzung der in Deutschland

theoretisch zur Verfügung stehenden Strohasche unter Zuhilfenahme von Literaturangaben vorgenommen.

Die energetische Strohnutzung erfolgt in Europa bisher schwerpunktmäßig in den Ländern Dänemark und Großbritannien (Thrän und Junold 2008), obwohl Deutschland nach Frankreich über das größte Strohpotential innerhalb der EU verfügt (Kaltschmitt und Thrän 2001). In Deutschland ist das energetische Potential von Stroh noch weitgehend ungenutzt (Blanck und Bahrs 2009). Dies liegt einerseits an den hohen emissionsrechtlichen Anforderungen (1. BImSchV, 4. BImSchV mit TA Luft) (Peisker 2007, Hering 2011) und andererseits an rohstoff- und verbrennungstechnischen Aspekten wie z.B. dem geringen Energiegehalt von Stroh, dem hohen Aschegehalt (ca. 5 %) und dem niedrigen Schmelzpunkt, wodurch Probleme bei der thermo-chemischen Umwandlung entstehen können (Behrendt et al. 2008). Halmgutartige Brennstoffe sind (aufgrund der höheren N-, S-, Cl- und K-Gehalte) aus verbrennungstechnischer Sicht problematischer als holzartige Brennstoffe und benötigen daher eine aufwendigere Anlagentechnik (Oberberger 2000). Damit eine saubere Verbrennung erfolgen kann, bedarf es einer speziellen Feuerungstechnik, die bisher nur in größeren Heizwerken möglich ist. Brenntechnische Probleme können vermieden werden, wenn Stroh mit anderen Brennstoffen gemischt wird (DRL 2005). Generell wird der Technikstand der Strohverbrennung aber als marktreif eingeschätzt (Müller-Langer et al. 2007). Beispiele aus der Praxis belegen diese These. Auf dem Gut Dennin, ein Demonstrationsbetrieb der Bioenergieberater Mecklenburg-Vorpommerns, wird seit 1995 eine 600 kW-Strohverbrennungsanlage eines dänischen Herstellers betrieben. Diese verbraucht ca. 300 t Stroh pro Jahr, was einem Anteil von 12 % des betrieblichen Gesamtstrohaufkommens entspricht. Die P- und K-haltige Asche wird dem anfallenden Dung untergemischt und als Dünger wieder ausgebracht. Somit dient die Anlage nicht zur Einsparung von Brennstoffkosten, sondern trägt auch zum Nährstoffrecycling und zur Reduktion der Düngemittelkosten bei (Schroll 2011).

In Deutschland ist von einem jährlichen Gesamtaufkommen von ca. 36 Mio. t FM Getreidestroh auszugehen (*Tab. 1*). Davon könnten unter Berücksichtigung konkurrierender Nutzungsformen (wie z.B. Strohdüngung zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit und Humusbilanz, Einstreubedarf und Futter in der Tierhaltung, Gärtnereibedarf etc.) entsprechend verschiedener Potentialstudien 10–60 % des jährlichen Gesamtstrohaufkommens energetisch genutzt werden (*Tab. 1*). Dabei handelt es sich um so genanntes Überschussstroh, welches vor dem Hintergrund der Flächenkonkurrenz von Nahrungsmittel- und Energie-

2 Literaturübersicht

pflanzen zunehmend an Interesse gewinnt und mit dem sich bei energetischer Nutzung 0,7 % des deutschen Primärenergiebedarfes decken ließen (Blanck und Bahrs 2009).

Tab. 1: Energetisch nutzbares Getreidestroh in Deutschland.

Quelle	Leible et al. 2003	Kaltschmitt et al. 2003	BMU 2004	UBA 2007	Schütte 2008	Münch 2008	Simon und Wiegmann 2009
Getreidestrohmenge gesamt (Mio. t FM)	43	38	32–36	36	36	-	-
Energetisch nutzbarer Getreidestrohanteil (%)	37–52	20	12–20	11	20–60	ca. 33	20–35
Energetisch nutzbare Getreidestrohmenge (Mio. t FM)	16–22	7,6	4–6,3	4	7–22	-	-

Basierend auf eher zurückhaltenden Schätzungen des Getreidestrohnutzungspotentials von 4 Mio. t pro Jahr (UBA 2007) bis 7,6 Mio. t (Kaltschmitt et al. 2003), wäre es bei einem Heizöläquivalent für Getreidestroh von $2,1 \text{ kg l}^{-1}$ (TFZ 2008) möglich, 1,9 bzw. 3,6 Mrd. l Heizöl (= 1,6 bzw. 3,1 Mio. t*) einzusparen. Ausgehend vom Heizölverbrauch des Jahres 2009 in Deutschland, der bei 26 Mio. t lag (AGEB 2010), ließe sich der bundesweite Heizölverbrauch jährlich um 6 bis 12 % reduzieren.

Darüber hinaus ist vor dem Hintergrund der begrenzten P-Ressourcen ebenso von großem Interesse, wie viel P – nach der energetischen Verwertung der oben genannten Stroh-mengen – mit der Strohasche zur Verfügung stehen könnte. Wird als Grundlage für weitere Berechnungen die oben genannte Spanne des Strohnutzungspotentials angenommen und ein durchschnittlicher Aschegehalt von 5 % (Vetter 2001, Obernberger 2005a) angesetzt, so ergäbe dies eine Strohaschemenge von 200.000 bis 380.000 t – eine nicht unwesentliche Menge in Anbetracht des tatsächlich derzeitigen Biomasseascheaufkommens von 435.000 t, wovon ca. 1/3 nicht aus der Altholzverbrennung stammt (Reichenberger et al. 2008a und 2008b). Bei einem P-Gehalt von durchschnittlich 1 % (entsprechend der Strohasche aus den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit) würde diese Aschemenge zwischen 2.000 t und 3.800 t P beinhalten. Entsprechend des Inlandsumsatzes 2008/2009 von 76.736 t P (Statistisches Bundesamt 2009) könnten 3 % bis 5 % des zur Düngung benötigten P aus Strohaschen gedeckt werden. Würden auch andere Aschen zur P-Düngung verwendet wie z.B. Klärschlammaschen, mit denen sich nach Schick (2010) bis zu 55 % der konventionellen P-Düngemittel substituieren ließen, wäre es möglich, mittels Nährstoffrecycling auf verschiedenen Wegen einen Beitrag zur Schonung der Rohphosphatvorkommen zu leisten.

* 1 Barrel Öl = 159 Liter Öl; 7,33 Barrel Öl = 1 Tonne Öl

2.5 Rechtliche Rahmenbedingungen zur pflanzenbaulichen Verwertung von Biomasseaschen

Ein wichtiger Aspekt bei der Nutzung von Biomasse für Energiezwecke ist die Frage des Verbleibs der Rückstände. Da bei der energetischen Verwendung von Biomasse primär die Erzeugung von Energie bezweckt wird, ist die anfallende Asche entsprechend Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (§ 3 Abs. 1 und 3 KrW-/AbfG) rechtlich als Abfall einzustufen. Im Hinblick auf eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft ist die Abfallverwertung der Abfallbeseitigung vorzuziehen (§ 5 Abs. 2 KrW-/AbfG). Eine stoffliche Verwertung beinhaltet (nach § 4 Abs. 3 KrW-/AbfG) die Substitution von Rohstoffen durch das Gewinnen von Stoffen aus Abfällen (Sekundärrohstoffe), wobei der Hauptzweck der Maßnahme in der Nutzung des Abfalls und nicht in der Beseitigung des Schadstoffpotentials liegt. Nach § 8 Abs. 1 und 2 KrW-/AbfG ist die Düngemittelverordnung (DüMV) eine Rechtsverordnung, in der Anforderungen zur Sicherung einer ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung von Abfällen als Sekundärrohstoffdünger auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzten Böden festgelegt werden.

Bei der Verbrennung von Biomasse bleiben die meisten Nährstoffe in der Asche enthalten, so dass es sinnvoll ist, bestimmte Aschefractionen unter Berücksichtigung gesetzlicher Rahmenbedingungen in den natürlichen Stoffkreislauf zurückzuführen (Rotheneder 2005). Bereits während der Verbrennung kann laut Kaltschmitt et al. (2009) die Aschezusammensetzung durch Feuerungs- und Abscheidetechnologie so beeinflusst werden, dass evtl. vorhandene Schwermetalle gezielt in der Feinstflugaschefraction angereichert werden. Diese Aschefraction ist getrennt zu sammeln, nach der Deponieverordnung (DepV) ordnungsgemäß zu deponieren bzw. entsprechend anderweitig zu verwerten. Entsprechend der DüMV, die maßgebend ist für das Inverkehrbringen von Düngemitteln, sind in Deutschland für eine Nutzung in der Forst- und Landwirtschaft Rost- und Grobaschen (= Brennraumaschen) zugelassen sowie Aschen, die nicht der letzten filternden Einheit im Rauchgasweg entstammen. Es dürfen generell nur Aschen verwendet werden, die die Grenzwerte für Schwermetalle und weitere Schadstoffe nach DüMV Anlage 2, Tab. 1.4 (siehe *Tab. A-1* im Anhang) nicht überschreiten. Düngemittel, zu deren Aufbereitung „Aschen aus pflanzlichen Rückständen“ entsprechend Tab. 7.3, Zeile 7.3.16 verwendet werden, welche die Grenzwerte nach DüMV überschreiten, dürfen laut Übergangsvorschriften noch bis zum 31.12.2013 gewerbsmäßig in den Verkehr gebracht werden (§ 9 Abs. 2 Nr. 1 DüMV).

Verwertungsmöglichkeiten für Biomasseaschen im Hinblick auf ihre Düngewirkung sind der DüMV zu entnehmen (siehe auch *Tab. A-2* im Anhang). Werden Aschen als Hauptbe-

2 Literaturübersicht

standteil für Düngemittel genutzt, müssen diese nach Vorgaben der DüMV in granulierter oder staubgebundener Form verwendet werden (Angaben zum Siebdurchgang siehe DüMV, Anlage 2, Tab. 7.3, Zeile 7.3.16).

Weitere Regelwerke aus dem nationalen Recht, die direkt oder indirekt im Zusammenhang mit einer Verwertung von mineralischen Abfällen/Aschen stehen, sind nachfolgend aufgeführt (siehe *Tab. 2*). Aus dem Bereich des sekundären EU-Rechts ist die Verordnung (EG) Nr. 2003/2003 über Düngemittel von Relevanz.

Tab. 2: Regelwerke für die flächenhafte Verwertung von mineralischen Abfällen/ Biomasseaschen in und auf Böden.

Rechtsbereich	Gesetz/ Verordnung	Paragraph	Titel bzw. Regelungsinhalt
Abfallrecht	KrW-/AbfG	§ 3	Begriffsbestimmungen
		§ 4	Grundsätze der Kreislaufwirtschaft
		§ 5	Grundpflichten der Kreislaufwirtschaft
		§ 8	Anforderungen an die Kreislaufwirtschaft im Bereich der landwirtschaftlichen Düngung
		§ 10	Grundsätze der gemeinwohlverträglichen Abfallbeseitigung
		§ 11	Grundpflichten der Abfallbeseitigung
	BioAbfV	§ 4	Anforderungen hinsichtlich der Schadstoffe und weiterer Parameter
		§ 5	Anforderungen an Gemische
		§ 9	Bodenuntersuchungen
	AVV	Anlage zu § 2	Abfallschlüssel 10 (Abfälle aus thermischen Prozessen)
Düngemittel recht	DüngG	§ 2	Begriffsbestimmungen (→ Definition Düngemittel)
		§ 3	Anwendung
	DüMV	§ 3	Zulassung von Düngemitteltypen (→ mineralische Produktionsrückstände)
		Anlage 1	Zugelassene Düngemittel
		Anlage 2	Hauptbestandteile von Düngemitteln
	DüV	§ 3	Grundsätze für die Anwendung von Düngemitteln
		§ 8	Anwendungsbeschränkungen
Bodenschutz recht	BBodSchG	§ 3	Anwendungsbereich
		§ 6	Auf- und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden
		§ 7	Vorsorgepflicht
	BBodSchV	§ 10	Vorsorgeanforderung
		§ 11	Zulässige Zusatzbelastung
		§ 12	Anforderungen an das Aufbringen und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden
Naturschutzrecht	BNatSchG	§ 18	Eingriffe in Natur und Landschaft
Wasserrecht	WHG	§ 48	Reinhaltung des Grundwassers

2.6 *Eigenschaften von Biomasseaschen und deren Nutzungsmöglichkeiten in der Land- und Forstwirtschaft*

Je nach Art der Biomasse, die verbrannt wird, fallen unterschiedliche Aschegehalte an, wobei Holz mit ca. 0,5 % der TM den geringsten Aschegehalt hat (Kaltschmitt et al. 2009, siehe auch *Tab. A-3* im Anhang). Biomasseaschen unterscheiden sich in Bezug auf ihre physikalischen und chemischen Eigenschaften, da diese abhängig sind von der Brennstoffart, der genutzten Verbrennungstechnik und dem Anfallort in der Verbrennungsanlage (Obernberger 1997, Neurauter et al. 2004, Reichenberger et al. 2008b).

Die Asche aus Biomassefeuerungen setzt sich nach Obernberger (1997) und Neurauter et al. (2004) aus drei unterschiedlichen Fraktionen zusammen:

Grob- und Rostasche: Überwiegend mineralischer Rückstand, der im Verbrennungsteil der Feuerungsanlage anfällt und meist mit Verunreinigungen, wie Sand, Erde und Steinen durchsetzt ist. In dieser Aschefraktion sind häufig gesinterte Aschenteile und Schlackebrocken enthalten.

Zyklonasche: Feste, überwiegend anorganische Brennstoffbestandteile, die als feine Partikel in den Rauchgasen mitgeführt werden und als Stäube im Wendekammer- und Wärmetauscherbereich der Feuerung sowie in dem Kessel nachgeschalteten Fliehkraftabscheidern (Zyklonen) anfallen.

Feinstflugasche: Flugaschen, die in (den Multizyklonen meist nachgeschalteten) Elektro- und Gewebefiltern anfallen bzw. in Rauchgaskondensationsanlagen als Kondensatschlamm vorzufinden sind. Sofern anlagebedingt keine Feinstflugaschenabscheidung erfolgen kann, verbleibt dieser Ascheanteil im Rauchgas.

Bei den aufgeführten Anteilen der Aschefraktionen an der Gesamtasche (*Tab. 3*) handelt es sich um Durchschnittswerte, da die Mengenverteilung abhängig ist vom Brennstoff und dessen Korngröße, der Feuerraumgeometrie und Feuerungstechnik, der Luftzufuhrregelung und Flugstaubabscheidetechnologie. Nach Obernberger (1997, 2005b) entfallen meist >90 % der anfallenden Asche auf die beiden Aschefraktionen Grob- und Zyklonflugasche.

Tab. 3: Ascheanteile in Abhängigkeit vom Brennstoff, Angaben in Gewichts-%.

Brennstoff	Grobasche	Zyklonflugasche	Feinstflugasche
Waldhackgut	60–90	10–30	2–10
Rinde	65–85	10–25	2–10
Sägespäne	20–30	50–70	10–20
Stroh- und Getreideganzpflanzen	80–90	2–5	5–15

Quelle: Obernberger (1997)

Eine Mischung aus Grob- und Zyklonflugasche im heizwerkspezifischen Mengenverhältnis ist aufgrund der in der Regel geringen Schwermetallgehalte und hohen Nährstoffgehalte (siehe *Tab. A-4* im Anhang) prädestiniert, als Sekundärrohstoff mit Kalk- und Düngewirkung eingesetzt zu werden, wie Feldversuche auf land- und forstwirtschaftlichen Flächen zeigten (Obernberger et al. 1997, Obernberger und Supancic 2009).

Die P-Gehalte der Aschen sind vor allem abhängig von der Art der verbrannten Biomasse (*Tab. 4* und *Tab. 5*). Biomasse, die für energetische Nutzung und zur potentiellen Bereitstellung von Biomasseaschen zur Verfügung steht, kann in folgende Gruppen unterteilt werden:

- Holz, Holzabfälle, Rinde
- Energiepflanzen
- Landwirtschaftliche Neben-/Abfallprodukte
(z.B. Stroh, Spelzen, tierische Exkremente)

Innerhalb dieser Gruppen unterscheidet sich der P-Gehalt von Biomasseaschen z.B. in Abhängigkeit der Pflanzenart (*Tab. 4*). Dabei fällt auf, dass sich die Literaturangaben bezüglich der P-Konzentration in der Asche der gleichen Brennstoffart in erheblichem Maße unterscheiden können, wodurch die Charakteristik eines Naturprodukts widerspiegelt wird. Dieser Aspekt muss auch bei der Bemessung der Aschemenge für Düngezwecke und beim Vergleich der Düngewirkung berücksichtigt werden.

2 Literaturübersicht

Tab. 4: P-Konzentrationen verschiedener Biomasseaschen pflanzlichen Ursprungs.

Biomasse-Brennstoff	P-Konzentration in der Asche		Quelle
	P total (%)	P verfügbar (%)	
Bagasse *		0,01	Jamil et al. (2004)
	0,4		Hiltunen et al. (2008)
Reisspelzen	0,2		Hiltunen et al. (2008)
Kakaoschoten	0,4		Onwuka et al. (2007)
	0,5–2,5		Ayeni (2010a, b, c)
Siedlungsabfälle		0,5	Rosen et al. (1994)
Gartenbauabfälle	0,8–1,5	0,3–0,6	Zhang et al. (2002)
Luzerne		0,9	Mozaffari et al. (2002)
Zuckerrohr	1,3		Lopez et al. (2009)
Torf	1,3		Hytönen (2003)
Holz, Rinde u. Holzabfälle	0,3–5,7		Vassilev et al. (2010)
Sägemehl		1,3	Awodun (2007)
Holzabfälle	0,6		Patterson et al. (2004a, b)
Holz		1,0	Mbah et al. 2010
		1,2	Erich und Ohno (1992)
		1,3	Saarsalmi et al. (2001)
		0,9–1,7	Hytönen (2003)
		2,4	Uckert (2004)
▪ Kiefernholz	0,8		Misra et al. (1993)
▪ Pappelholz	1,2		Misra et al. (1993)
▪ Eichenholz	0,6–1,6		Misra et al. (1993)
▪ Olivenholz	3,7–7,5		Vamvuka und Zografos (2004)
Stroh	0,8–1,7		Biertümpfel (2010)
	0,2–6,7		Van Loo und Koppejan (2008)
	0,6		Arvelakis et al. (2004)
		2,1	Sander und Andrén (1997)
	0,7		Hiltunen et al. (2008)
	0,8		Arvelakis et al. (2004)
	1,3		Sander und Andrén (1997)
	1,6–1,7		Sander und Andrén (1997)
	2,9		Arvelakis et al. (2004)
Erdnusschülsen	1,8		Umamaheswaran und Batra (2008)
Miscanthus	2,2		Scurlock (1999)
Betelnussschalen	3,2		Umamaheswaran und Batra (2008)
Baumwollentkörnungsreste	4,1		Arvelakis et al. (2003)
Getreidekorn (Weizen/Triticale)	4,3		Biedermann und Obernberger (2005)
	4,5–6,8		Van Loo und Koppejan (2008)
Olivenkerne	6,5		Vamvuka und Zografos (2004)
Cashewnussschalen	6,5		Umamaheswaran und Batra (2008)
Sonnenblumenstängel	8,1		Hiltunen et al. (2008)
Pfirsichkerne	8,2		Arvelakis et al. (2003)
Rapssaar-Expeller	18,1		Hiltunen et al. (2008)

* Bagasse = Überreste der Zuckerfabrikation aus Zuckerrohr oder Sorghumhirse

2 Literaturübersicht

Tab. 5: P-Konzentrationen von Biomasseaschen tierischer Exkremente und von Klärschlammaschen.

Biomasse-Brennstoff	P total (%)	P verfügbar (%)	Quelle
Geflügelmist	4,8		Yusiharni (2001)
	7,9		Pagliari et al. (2009)
	8,5		Kaikake et al. (2009)
	5,3–11,4		Codling et al. (2002), Codling (2006)
Klärschlamm	0,9–7,5		Vamvuka und Kakaras (2011)
	2,1–2,7		Jakobsen und Willett (1986)
	2,3–3,1	0,6–1,3	Zhang et al. (2002)
	3,9–9,2		Franz (2008)
	6,2–11,0		Adam et al. (2009)

Neben P enthalten Biomasseaschen fast alle für das Pflanzenwachstum benötigten Nährstoffe, außer N, da dieser bei der Verbrennung nahezu vollständig entweicht (Etiégni und Campbell 1991, Zimmermann und Frey 2002, Obernberger 2005b). Werden Rinden-, Hackgut-, Stroh- und Ganzpflanzenaschen hinsichtlich ihrer Nährstoffgehalte miteinander verglichen (siehe dazu auch *Tab. A-4* im Anhang), so lässt sich Folgendes feststellen: Die K-Gehalte liegen in den Stroh- und Ganzpflanzenaschen (u.a. aufgrund K-Düngung der Feldfrüchte) deutlich höher als in den Rinden- und Hackgutaschen, während sich die Mg-Gehalte kaum unterscheiden und die Ca-Gehalte wesentlich geringer sind.

Biomasseaschen können außerdem aufgrund des Kalkungseffektes, d.h. wegen ihrer Wirkung auf den pH-Wert des Bodens, für die land- oder forstwirtschaftliche Nutzung interessant sein (Clapham und Zibilske 1992, Mozaffari et al. 2002, Nkana et al. 2002, Odlare 2005, Mandre 2006). In Versuchen auf Forstflächen im Süden Finnlands hatten sich 16 Jahre nach Holzascheausbringung die pH-Werte um 0,6 bis 1,0 Einheiten erhöht (Saarsalmi et al. 2001). Um mittels Holzascheapplikation die gleiche Kalkungswirkung bzw. die gleiche pH-Werterhöhung zu erzielen wie mit Ca(OH)_2 , ermittelten Van Reuler und Janssen (1996) in ihren Versuchen, dass eine um 1,7-fach höhere Menge an Asche im Vergleich zu Ca(OH)_2 nötig sei.

Der pH-Wert von Holz- und Rindenaschen (gemessen in 0,1 M CaCl_2 -Lösung) liegt zwischen 11,5 und 13,0 (Uckert 2004). Bei Biomasseaschen anderen Ausgangsmaterials (Stroh, Ganzpflanze) wurden (aufgrund der niedrigeren Ca-Gehalte und höheren S- und Cl-Konzentrationen) pH-Werte zwischen 9,0 und 11,5 dokumentiert (Obernberger 1997, Reichenberger et al. 2007), weshalb Strohasche eine etwas geringere basische Wirkung als Holzasche aufweist (Schicker 2003). Nach Sander und Andrén (1997) hat Asche aus Rapsstroh eine bessere Kalkungswirkung als Getreidestrohasche.

2 Literaturübersicht

Biomasseaschen beinhalten nicht nur wertvolle Nährstoffe wie P, K, Mg und Ca, sondern können auch Schwermetalle enthalten, die abhängig von der Art der Aschenutzung berücksichtigt werden müssen (Pradt 2007, Obernberger und Supancic 2009). Die flüchtigen Schwermetalle wie z.B. Cd, Pb, Zn reichern sich in der Feinstflugasche an (siehe *Tab. A-4* im Anhang und UBA 2005). Deshalb sollten nach Obernberger und Supancic (2009) nur die nährstoffreichen und eher schwermetallarmen Aschefractionen (Grob- und Zyklonflugasche) zur Düngung und Bodenverbesserung genutzt und die Feinstflugaschefraktion industriell verwertet oder entsorgt werden. Nach Obernberger (1997, 2005b) ist halmgutartige Biomasse (Stroh, Getreideganzpflanzen, Heu) deutlich schwermetallärmer als holzartige Biomasse, was sich in den jeweiligen Aschezusammensetzungen widerspiegelt (siehe *Tab. A-4* im Anhang). Mögliche Gründe sind nach Van Loo und Koppejan (2008) die höheren Schwermetalleinträge bzw. -akkumulationen durch Nass- und Trockendepositionen auf Waldflächen aufgrund längerer Umtriebszeit als bei landwirtschaftlichen Einjahrespflanzen sowie ein niedrigerer pH-Wert im Waldboden, der viele Schwermetalle (z.B. Cd, Zn) mobiler macht und damit die pflanzliche Aufnahme fördert. Der wesentlich höhere Aschegehalt von Stroh und Ganzpflanzen trägt zusätzlich zu einer geringeren Aufkonzentration von Schadstoffen in der Asche von halmgutartiger Biomasse bei.

Abhängig vom Verbrennungsgut und dessen Aschegehalt sowie der chemischen Zusammensetzung muss das geeignetste Verbrennungsverfahren gewählt werden, damit technische Schwierigkeiten – z.B. hinsichtlich des Ascheschmelzverhaltens – reduziert werden können. Stroh, Ganzpflanzen und Getreidekorn mit geringen Ca- und hohen Si- und K-Gehalten haben niedrigere Ascheschmelzpunkte als Holz (Obernberger et al. 2006, siehe dazu auch *Tab. A-5* im Anhang). Außer dem zur Verbrennung genutzten Rohmaterial hat auch der Verbrennungsprozess selbst einen Einfluss auf die chemische Zusammensetzung der Aschen. Die Aschequalität und -zusammensetzung wird nach Stahl (2006) beeinflusst von der Verbrennungstemperatur, den Sauerstoffverhältnissen, der Luftzufuhr, aber auch vom Anfallort der Aschen in der Verbrennungsanlage und eventuell möglichen Schwermetalleinträgen während der Verbrennung z.B. durch Korrosion von Anlagenteilen (Brennkammer, Rost). Der Einfluss der Verbrennungstemperatur war in Untersuchungen von Thy et al. (2006) bei Holzasche mit P-Gehalten zwischen 1,4 % (bei 525 °C) und 2,1 % (bei 1425 °C) größer als bei Strohasche mit relativ konstanten 0,5 % P (bei 524–962 °C). Dagegen nahm der P-Gehalt in Strohasche laut Xiao et al. (2011) mit höherer Verbrennungstemperatur ab; er betrug bei 600 °C ca. 1 % und sank bei Verbrennung mit 815 °C auf 0,6 %. In Untersuchungen von Eitégni und Campbell (1991) variierten die P-Konzen-

trationen in Holzasche in Abhängigkeit der Verbrennungstemperatur zwischen 1,7 % (bei 538 °C) und 2,6 % (bei 1093 °C). Die Verbrennungstemperatur wirkt sich ebenfalls auf den Karbonatgehalt in der Asche aus; dieser nimmt mit steigender Temperatur ab (Kaltschmitt et al. 2009).

Bezüglich der Nährstoffverfügbarkeit in Aschen wurden verschiedene Untersuchungsergebnisse gefunden. Nach Ohno und Ehrich (1990) scheint nur ein kleiner Teil des mit der Asche zugeführten P pflanzenverfügbar zu sein. Eine geringe Löslichkeit des P in Biomasseaschen wurde auch von Pels et al. (2005) beschrieben, die davon ausgehen, dass P-Zufuhr mittels Biomasseaschen nur auf sauren Waldböden eine Option ist, wo eine langsame P-Freisetzung kein Problem darstellt. Andererseits stellten Mozaffari et al. (2002) positive Effekte von Luzerneasche auf den Gehalt an Olsen-P (Extraktion mit NaHCO_3) in lehmigem Boden fest. Sie beschrieben das Verhältnis zwischen Applikationsrate und extrahierbarem P-Gehalt im Boden mittels linearer Regression. Nach Onwuka et al. (2007) kam es nach einer Düngung mit Kakaoschotenasche zu einer Zunahme des verfügbaren P-Gehaltes im Boden und zu höheren TM-Erträgen bei Mais.

Ascheausbringung kann auch stimulierend auf die mikrobielle Aktivität im Boden wirken, sowie für Mineralisationsprozesse im Boden förderlich sein, indem chemische und physikalische Bodenparameter verbessert werden (Demeyer et al. 2001). Perucci et al. (2006) ermittelten Veränderungen der mikrobiellen Biomasse und Aktivität infolge Holzascheapplikation auf landwirtschaftlichen Flächen. Die Hemmung von bodenbürtigen Pilzen und die Förderung von Bakterien auf den untersuchten Böden war auf einen pH-Wert-Anstieg zurückzuführen.

2.7 P-Mobilisierungspotential von Feldfrüchten und Beispiele zur P-Ausnutzung aus Biomasseaschen

In vielen Böden weltweit ist Phosphor (P) häufig ein wesentlicher oder der ausschließlich limitierende Faktor für das Pflanzenwachstum (Gyaneshwar et al. 2002). Dies gilt besonders auf P-Mangelstandorten mit hohen Fe/Al- oder Ca-Gehalten im Boden (Bhadoria et al. 2002). Begrenzte P-Ressourcen und steigende Düngemittelpreise sprechen zudem für die ökologische und ökonomische Notwendigkeit einer effizienten P-Verwertung.

Die biologische Verfügbarkeit von anorganischem P in der Rhizosphäre ist abhängig von der Charakteristik des Bodens und dessen Nährstoffstatus sowie den angebauten Pflanzen-

arten (Khan et al. 2009a). Nährstoffeffiziente Pflanzenarten und -sorten können aufgrund verschiedener physiologischer Strategien und morphologischer Anpassungen in der Lage sein, in ihrer Wachstumsphase P und andere Nährstoffe aus schwer verfügbaren Nährstoffreserven zu mobilisieren.

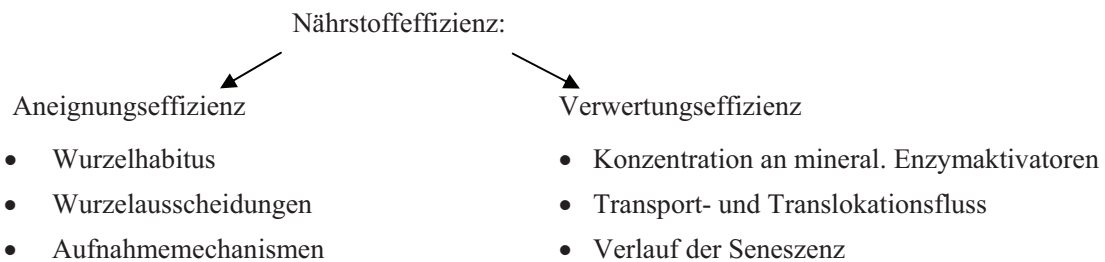
Die P-Aneignungseffizienz (auch als P-Aufnahmeeffizienz bezeichnet) verschiedener Fruchtarten/-sorten wird generell beeinflusst durch:

- Größe und Aufbau des Wurzelsystems (Kirk 1999, Neumann und Römheld 2002, Bhadoria et al. 2004),
- Wurzelhaare (Gahoonia et al. 1997, Jungk 2001, Bates und Lynch 2001, Kristoffersen et al. 2005),
- kinetische Aufnahmeparameter (Nielsen und Schjorring 1983, Machado und Furlani 2004a),
- wurzelinduzierte pH-Veränderungen in der Rhizosphäre (Gahoonia et al. 1992, Morel und Hinsinger 1999, Neumann und Römheld 2002, Hinsinger et al. 2003),
- Exsudation von Chelaten, wie z.B. Citrat (Marschner et al. 1986, Kirk 2002) und
- Phosphataseaktivität in der Rhizosphäre (Asmar et al. 1995, Yun und Kaeppler 2001, Machado und Furlani 2004b, Eichler-Löbermann und Schnug 2006).

Verschiedene Untersuchungen haben ergeben, dass der Anbau von Zwischenfrüchten zu einer besseren P-Verfügbarkeit führen kann (Bünemann et al. 2004, Bah et al. 2006). Nach dem Mulchen oder Einarbeiten der Zwischenfrüchte und anschließender Zersetzung der pflanzlichen Reststoffe, kann der organisch gebundene P eine leicht verfügbare P-Quelle für die Folgefrucht darstellen (Li et al. 1990, Horst et al. 2001, McLenaghan et al. 2004). Ebenfalls positiven Effekt auf den Boden-P-Gehalt kann die Einarbeitung von Ernteresten haben. So führten beispielsweise die pflanzlichen Reste von Sojabohne und Weizen zur Erhöhung des labilen anorganischen und organischen P sowie der moderat labilen organischen P-Fractionen, zu abnehmender P-Sorptionskapazität (PSC) und allmählich verbesserter Verfügbarkeit stabiler P-Verbindungen im Boden (Reddy et al. 2001). Die Zufuhr von Pflanzenresten in den Boden (z.B. nach Strohdüngung oder Zwischenfruchtanbau) stimuliert die bodenmikrobielle Aktivität durch Bereitstellung von organischer Masse, hat eine Verbesserung der physikalischen, chemischen und biologischen Bodeneigenschaften zur Folge und fördert die Nährstoffkreisläufe im Boden (Ros et al. 2003, Bhupinderpal-Singh und Rengel 2007). Durch die Zufuhr organischer Substanz wird auch das C/N-Verhältnis im Boden verringert (Guppy et al. 2005) und somit die N-Verfügbarkeit für die Folgefrucht verbessert.

Organische Substanz und die Wirkung bestimmter Vorfrüchte sind bedeutsam für die Effizienz der P-Düngung und für die P-Verfügbarkeit, wie vielfach in Veröffentlichungen (Eichler 1997, Kamh et al. 2002, Werner und Trimborn 2008, Eichler-Löbermann et al. 2009) belegt werden konnte. P-effiziente (Zwischenfrucht-)Arten können das P-Angebot innerhalb einer Fruchtfolge erhöhen (Horst et al. 2001), indem sie z.B. Symbiosen mit Mykorrhizapilzen eingehen (Koide 1991, Bagayoko et al. 2000) oder die wachstumsfördernde Wirkung von Rhizobakterien (Ezawa et al. 2002, Vessey 2003) nutzen.

Eine hohe Nährstoffaufnahmeeffizienz und diverse Mobilisierungsmechanismen der Fruchtarten sind wesentlich für eine gute P-Ausnutzung aus Düngemitteln (Schilling et al. 1998, Neumann 2007). Nach Gerath und Balko (1998) ist neben der Aneignungs- bzw. Aufnahmeeffizienz für eine hohe Nährstoffeffizienz auch die Verwertungseffizienz der Pflanzen von Bedeutung (siehe nachfolgende Übersicht).



Im Folgenden werden an ausgewählten Beispielen aus der Literatur Untersuchungsergebnisse zur P-Ausnutzung von Biomasseaschen durch einzelne Fruchtarten vorgestellt. Van Reuler und Janssen (1996) berichten von signifikant angestiegenen Erträgen und P-Aufnahmen bei Hochlandreis infolge einer Düngung mit Holzasche und dass für die gleiche P-Aufnahme das 1,5-fache an Asche-P im Vergleich zu P in Form von Triplesuperphosphat (TSP) ausgebracht werden muss. Dennoch war die P-Nutzungseffizienz (Einheit Kornertrag pro absorbierte P-Einheit) des durch die Pflanzen aufgenommenen Asche-P höher als bei der Vergleichsvariante mit TSP. Somit wurden direkte P-Düngungseffekte der Holzasche und indirekt auch positive Einflüsse hinsichtlich der Nutzung absorbierter Nährstoffe festgestellt.

Weitere positive Ertragseffekte aufgrund von Holzascheapplikation wurden für Winterweizen, Spinat, Hafer und Bohne festgestellt (Clapham und Zibilske 1992, Krejzl und Scanlon 1996). Untersuchungen von Patterson et al. (2004b) ergaben nach Düngung mit Holzasche (25 t ha⁻¹) plus N-Zufuhr einen Ertragsanstieg bei Gerste um bis zu 50 % im Vergleich zur Kontrollvariante ohne Asche (nur N-Düngung). Im selben Feldversuch wurde der Raps-Samenertrag um 124 % von 0,62 t ha⁻¹ (Kontrollvariante) auf 1,39 t ha⁻¹ infolge einer Holzasche-Zufuhr von 12,5 t ha⁻¹ erhöht.

Innerhalb eines 10-jährigen Feldversuches am Standort Dornburg in Thüringen, in dem verschiedene Feldfrüchte wie Weizen, Gerste, Raps, Erbse und Mais mit Strohasche gedüngt wurden, konnten positive Effekte auf die Erträge ermittelt werden (Biertümpfel et al. 2010). Die Strohasche vom Strohheizwerk Schkölen wies ein Mineraldüngeräquivalent von ca. 1 auf, d.h. die P- und K-Wirkung aus den Aschen war genauso hoch wie die P- und K-Wirkung der mineralisch optimal versorgten Kontrollvariante (Vetter 2008). Ob die Strohasche zur Aussaat in den Boden eingearbeitet oder später als Kopfdüngung ausgebracht wurde, wirkte sich nicht auf die Kornerträge aus. Diese Versuchsergebnisse führten zu der Schlussfolgerung, dass sich Strohasche sehr gut als P- bzw. K-Dünger im landwirtschaftlichen Bereich eignet und eine Alternative zur herkömmlichen mineralischen Düngung darstellt. Bei mehrjähriger Aschedüngung ist jedoch besonderes Augenmerk auf den pH-Wert des Bodens zu legen, der sich durch die Alkalität der Asche in den basischen Bereich verschieben und somit eventuell negativ auf die Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe auswirken kann (Biertümpfel et al. 2010). Eine Abstufung der Aschemenge aufgrund ihrer alkalischen Wirkung oder der Anbau von Zwischenfrüchten mit dem Ziel der Erhöhung der Nährstoffverfügbarkeit fand im Dornburger Feldversuch nicht statt.

Obwohl die vorgenannten Untersuchungsergebnisse ein allgemeines Potential der Biomasseaschen hinsichtlich Ertragszuwachs und Nährstoffaufnahme zeigen, gibt es kaum Forschung, die sich mit den Wechselbeziehungen zwischen Düngewirkung von Biomasseaschen und spezifischem Fruchtartenpotential zur P-Ausnutzung beschäftigt.

3 Hypothesen und Zielstellung

Mit Biomasseaschen wurden bereits pflanzenbauliche Versuche zu diversen Forschungsschwerpunkten durchgeführt. Dennoch fehlen bisher vergleichende Untersuchungen zur P-Düngewirkung verschiedener Aschen unter Berücksichtigung der kultivierten Fruchtarten und Standortgegebenheiten. Aus dem derzeitigen Kenntnisstand (siehe *Kap. 2*) ließen sich die Versuchsfaktoren (Düngung / Aschen, Fruchtarten) bzw. weitere Einflussgrößen (wie z.B. Bodenart) für die eigenen Untersuchungen sowie folgende vier **Hypothesen** ableiten:

- 1. Biomasseaschen verschiedener Ausgangssubstrate unterscheiden sich in ihren P-Gehalten und P-Löslichkeiten.**
- 2. Aufgrund der geringeren Anteile an leicht löslichem P in den Biomasseaschen ist deren P-Düngewirkung geringer als jene von TSP.**
- 3. Die Ausnutzung des in Biomasseaschen enthaltenen P wird durch die angebaute Fruchtart und die Bodeneigenschaften beeinflusst.**
- 4. Der Anbau von Zwischenfrüchten kann zu verbesserter P-Ausnutzung innerhalb der Fruchtfolge führen und als pflanzenbauliche Maßnahme in Kombination mit Aschedüngung empfohlen werden.**

Zur Prüfung der Hypothesen dienten folgende Aufgabenstellungen:

1. Ermittlung unterschiedlich löslicher P-Fraktionen der Biomasseaschen mittels chemischer Extraktionsverfahren
2. Untersuchung von Düngeeffekten auf die P-Pools im Boden sowie Ertrag und Nährstoffaufnahme verschiedener Fruchtarten anhand von
 - a) zweijährigen Feldversuchen mit Biomasseaschen als Düngemittel in Wechselwirkung mit Zwischenfrüchten und in Abhängigkeit der Standortgegebenheiten
 - b) Gefäßversuchen zur Düngewirkung von Biomasseaschen im Vergleich zu TSP bei Kultivierung verschiedener Fruchtarten auf zwei unterschiedlichen Böden.
3. Schlussfolgerungen und Prognostizierung der Düngewirkung von Aschen

Die **Zielstellung** der Arbeit lautete:

Die Untersuchungsergebnisse sollen dazu dienen, das mögliche P-Ausnutzungspotential bei einer Düngung mit Biomasseasche im Pflanzenbau aufzuzeigen und zu prüfen.

4 Material und Methoden

4.1 Auswahl und Charakterisierung der verwendeten Biomasseaschen

Es wurden drei verschiedene Biomasseaschen (Rapsextraktionsschrotasche (RESA), Strohasche (SA) und Getreidekornasche (GA)) hinsichtlich ihrer Eignung als P-Düngemittel im Pflanzenbau untersucht. Die Anforderungen an PK-Dünger hinsichtlich der Mindestgehalte von 2 % P_2O_5 (= 0,87 % P) und 3 % K_2O (= 2,49 % K) laut DüMV wurden mit den verwendeten Biomasseaschen eingehalten. Angaben zur Art der Verbrennung, Verbrennungstemperatur und zum Produktionsort der Aschen sind in *Tab. 6* zusammengefasst. Aufgrund der verschiedenen Verbrennungstechniken unterschieden sich die Aschen in ihrer Körnung. Die RESA war wesentlich feinkörniger als die anderen beiden Aschen, die zur Ausbringung in kleinen Mengen (für die Gefäßversuche) gemörsert werden mussten.

Tab. 6: Produktionsbedingungen der Aschen.

Asche	Ausgangsmaterial	Art der Verbrennung	Verbrennungstemperatur (°C)	Produktionsort
RESA	Rapsextraktionsschrot	Wirbelschichtverbrennung	850	Universität Rostock
SA	Stroh (Weizen + Triticale)	Rostfeuerung	750	Bio-Kraftwerk Schkölen, Thüringen
GA	Getreidekorn (Roggen)	Rostfeuerung	650–850	Landwirtschaftliche Fachschule Tulln, Österreich

Zwei der Aschen (SA und GA) wurden von Kooperationspartnern bezogen (siehe *Tab. 6*). Die RESA stand direkt an der Universität Rostock zur Verfügung, wo sie an der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik produziert wurde. Rapsextraktionsschrot ist zwar ein rohproteinreiches Futtermittel, die Kompostierung, Vergärung und Verbrennung stellen jedoch weitere Nutzungsvarianten dar (Kaltschmitt et al. 2009) – vor allem in Regionen mit wenig Tierbestand, wo die Pressrückstände nicht in vollem Umfang als Futtermittel benötigt werden. Außerdem werden aufgrund steigender Energiepreise alternative Möglichkeiten der Energiegewinnung mit bisher ungewöhnlichen Brennstoffen lukrativer. Vor diesem Hintergrund wurde neben der Stroh- und Getreidekornasche eine bislang kaum beachtete Biomasseasche – die Rapsextraktionsschrotasche – mit vergleichsweise hohem P-Gehalt in die Versuche mit einbezogen, so dass drei Aschen mit einem relativ breiten Nährstoffspektrum untersucht werden konnten.

Die pH-Werte der drei verwendeten Biomasseaschen lagen im Bereich zwischen 11 und 13. Bedingt durch die unterschiedlichen Ausgangsmaterialien und die verschiedenen Verbrennungsprozesse variierten die Aschen in ihrer Nährstoffzusammensetzung (*Tab. 7*) und in ihren Schwermetallgehalten. Die Aschen entsprachen den Anforderungen der DüMV hinsichtlich der Schwermetallgrenzwerte (mit einer Ausnahme: Ni in RESA aufgrund verbrennungsanlagenspezifischer Anreicherung) (*Tab. A-1* im Anhang).

Tab. 7: pH-Werte und Nährstoffzusammensetzung der untersuchten Biomasseaschen.

Asche	pH-Wert (in CaCl ₂)	P	K	Mg	Ca
Gesamtkonzentration* in % der Asche					
RESA	12,59	8,0	7,3	5,5	5,9
SA	11,08	1,0	5,3	1,0	5,0
GA	12,88	10,5	10,8	3,3	7,9

* Königswasserausschluss, P-, K- und Mg-Analyse durch die LUFA Rostock

4.2 Feldversuche in Rostock und Trenthorst

Um den Einfluss verschiedener Bodenbedingungen in die Untersuchung der Düngewirkung von Biomasseaschen einbeziehen zu können, wurden an zwei Standorten (Universität Rostock und vTI Trenthorst) über 2 Jahre (2007 und 2008) Feldversuche durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Fruchtarten als Haupt- und Zwischenfrüchte unter dem Einfluss der Düngung mit Asche getestet.

4.2.1 Standortcharakterisierung

Der **Feldversuch in Rostock** wurde auf Flächen der Versuchsstation der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock im Jahr 2007 angelegt. Nur 15 km von der Ostsee entfernt wird das Klima stark maritim beeinflusst. Der Standort gehört zur weichsel-glazialen Grundmoräne (Rosenthaler Staffel) und ist durch Moränen-sand über tieferem Moränenlehm gekennzeichnet. Beim Bodentyp handelt es sich um eine Sandlehm-Parabraunerde (Kahle und Kretschmer 1994). Die Flächen der Versuchsstation Rostock sind im Durchschnitt durch leichtere Böden gekennzeichnet als in Trenthorst. Die Bodenart ist schwach lehmiger Sand (SI2) über mittel lehmigem Sand (SI3) (siehe Ergebnisse der Körnungsanalyse, *Tab. A-6* im Anhang).

Der **Feldversuch in Trenthorst** wurde vom Institut für Ökologischen Landbau des Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI) angelegt. Dieses befindet sich mit seinem Versuchsbetrieb in der Gemeinde Westerau in Schleswig-Holstein, südöstlich von Bad Oldesloe, im Endmoränengebiet der Weichseleiszeit. Der vorherrschende Bodentyp ist Parabraunerde

(Böhm 2009). Der Versuch in Trenthorst wurde auf stark lehmigem Sand (Sl4) über stark sandigem Lehm (Ls4) angelegt (siehe Ergebnisse der Körnungsanalyse, *Tab. A-6* im Anhang).

Zu Versuchsbeginn wurden die doppelactatlöslichen P-, K- und Mg-Werte (Pdl, Kdl, Mgdl) bestimmt und der Boden jedes Feldversuches in die entsprechenden Gehaltsklassen (nach LUFA Rostock 2004 bzw. LWK Schl.-H. 2009) eingeordnet. Der Boden in Trenthorst war gut mit P versorgt (Gehaltsklasse C) und wies höhere Pdl-Gehalte, wasserlösliche P-Gehalte (Pw) und Gesamt-P-Gehalte (Pt) als der Boden in Rostock auf. Darüber hinaus wurden die P-Sorptionskapazität (PSC) und der P-Sättigungsgrad (DPS) bestimmt. Der schwach lehmige Sand der Versuchsfläche in Rostock war etwas stärker P-gesättigt als der stark lehmige Sandboden in Trenthorst (*Tab. 8*).

Tab. 8: Bodeneigenschaften (Beprobungstiefe 0–30 cm) zu Beginn der Feldversuche 2007 mit Zuordnung zu Gehaltsklassen und pH-Klassen.

Standort	Bodenart	pH	oTS	Pt	Pw	Pdl	Kdl	Mgdl	Pox	PSC	DPS
	(0–30 cm)	CaCl ₂	(%)			(mg kg ⁻¹)			(mmol kg ⁻¹)		(%)
Rostock	Sl2	5,70 (B)	1,9	576	16,9	67,2 (C)	45,2 (B)	155 (E)	15,9	29,3	54,0
Trenthorst	Sl4	6,36 (D)	3,5	706	23,8	81,9 (C)	110,1 (B)	179 (C)	17,3	42,1	41,1

oTS = organische Trockensubstanz, Pt = Gesamt-P, Pw = wasserlösliches P, Pdl/Kdl/Mgdl = doppelactatlösliches P/K/Mg, Pox = oxalatlösliches P, PSC = P-Sorptionskapazität, DPS = Grad der P-Sättigung; Buchstaben in Klammern = Gehaltsklassen (P-, K-, Mg-Gehaltsklasse nach Richtwerten der LUFA Rostock (2004) für den Feldversuch in Rostock und nach LWK Schl.-H. (2009) für den Feldversuch in Trenthorst) und pH-Klassen (für beide Standorte nach VDLUFA (2000))

Die beiden Standorte unterscheiden sich im Hinblick auf die **klimatischen Gegebenheiten** vor allem in den Niederschlagswerten. Obwohl Trenthorst entsprechend der langjährigen Mittelwerte der niederschlagsreichere Standort ist, fiel in Rostock in beiden Versuchsjahren mehr Niederschlag. Das Jahr 2007 war an beiden Standorten durch höhere Niederschlagsmengen gekennzeichnet als das Folgejahr (*Tab. 9*).

Tab. 9: Durchschnittstemperaturen und Niederschlagssummen der Standorte Rostock und Trenthorst in den Versuchsjahren 2007–2008 und im langjährigen Mittel.

Jahr	Rostock ¹		Trenthorst ²	
	Temp.mittel (°C)	NS-Summe (mm)	Temp.mittel (°C)	NS-Summe (mm)
2007	9,4	914	10,3	638
2008	9,1	610	10,0	553
Langj. Mittel	8,1	593	8,7	735

¹ Henneberg (2009)

² Daten des Standortes Trenthorst für den Zeitraum 2007–2008 von der meteorologischen Station des VtI und langj. Mittel für Trenthorst vom Deutschen Wetterdienst Lübeck Blankensee (1971–2000)

4 Material und Methoden

Die Witterungsverhältnisse der beiden Versuchsjahre waren sehr unterschiedlich (*Abb. 4* und *Abb. 5*). Während der Sommer 2007 in Rostock überdurchschnittlich regenreich war, erwiesen sich die Monate Mai bis Juli 2008 und auch der Erntemonat September 2008 als sehr niederschlagsarm. In Trenthorst waren die frühen Sommermonate 2008 ebenfalls von sehr trockenen Witterungsbedingungen geprägt. Der Winter 2007/08 war an beiden Standorten durch höhere Temperaturen als im langjährigen Mittel gekennzeichnet.

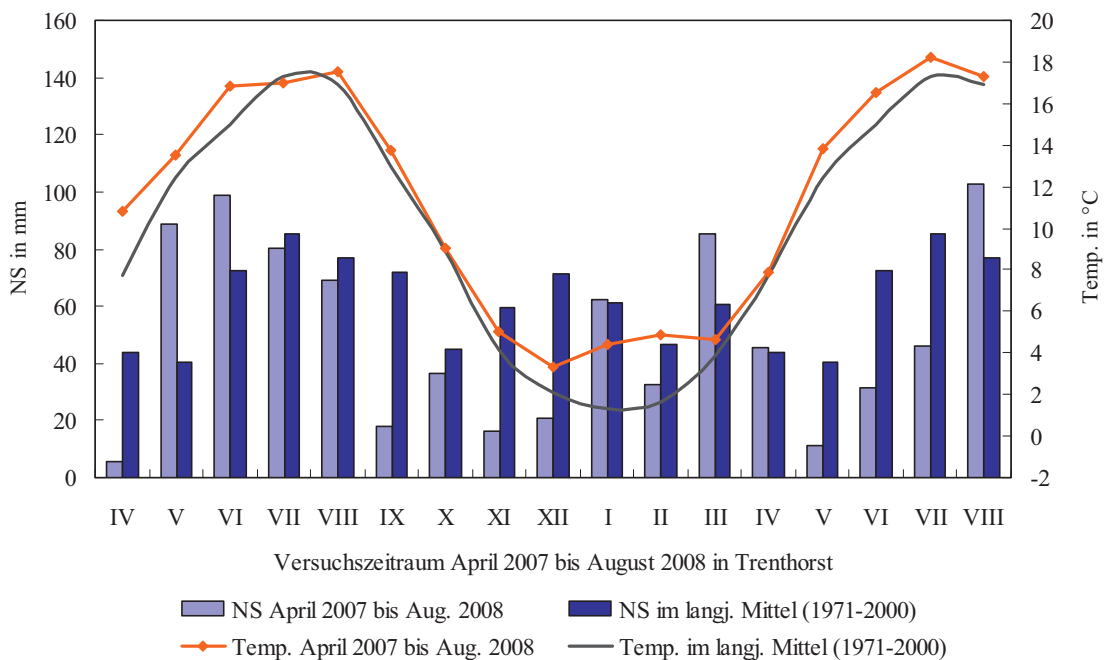
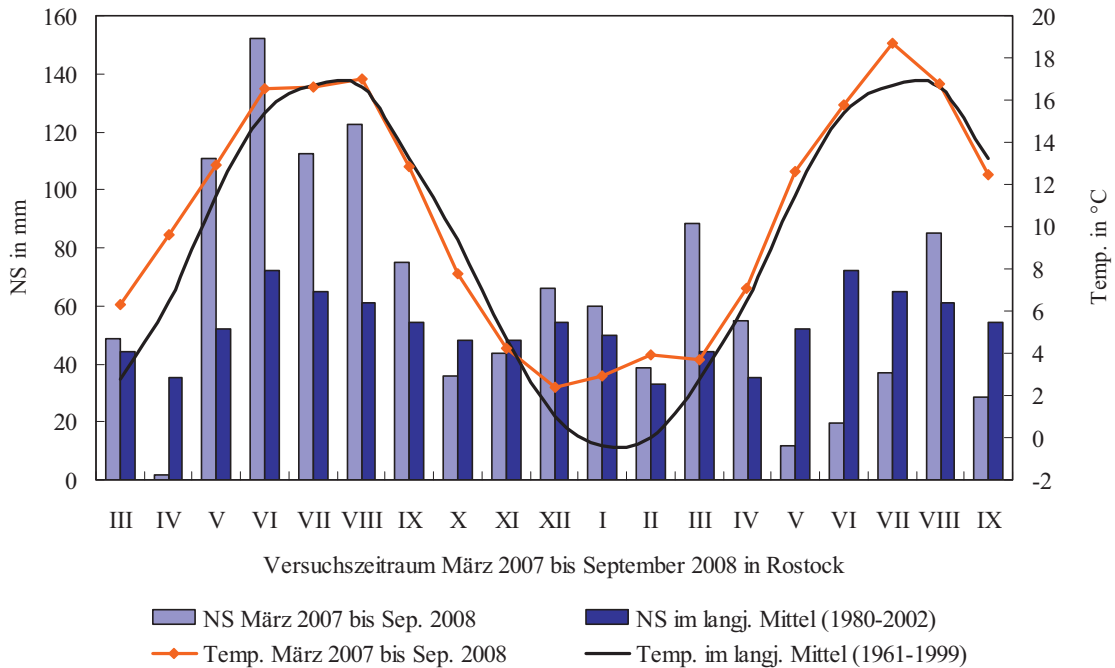


Abb. 5: Witterungsbedingungen im Versuchszeitraum April 2007 bis August 2008 am Standort Trenthorst.

Die Witterungsdaten (April 2007 bis August 2008) am Standort Trenthorst wurden im Vergleich zu langjährigen Mittelwerten des DWD aus Lübeck Blankensee dargestellt (Abb. 5).

4.2.2 Versuchsaufbau

Das **Feldversuchsdesign** in **Rostock** entsprach einer teilrandomisierten Streifenanlage mit zwei Versuchsfaktoren (Düngung, Zwischenfrucht) und vierfacher Wiederholung. Die Größe der Kleinparzellen betrug 12 m^2 ($3 \times 4 \text{ m}$).

Der Feldversuch in **Trenthorst** wurde als Spaltanlage mit zwei Versuchsfaktoren (Düngung, Zwischenfrucht) in vierfacher Wiederholung angelegt. Der Einfluss der Düngung wurde auf Großparzellenebene und die Zwischenfruchteffekte auf Kleinparzellenebene getestet. Die Größe der Kleinparzellen betrug $13,75 \text{ m}^2$ ($5,00 \times 2,75 \text{ m}$).

Die **Ascheausbringung** erfolgte an beiden Feldversuchsstandorten einmalig im Frühjahr 2007 per Hand. Die benötigten Aschemengen wurden entsprechend der Nährstoffkonzentrationen der Aschen (siehe Tab. 7) für einen zweijährigen Düngebedarf kalkuliert, wobei das Hauptaugenmerk auf dem Nährstoff P lag. Mit den Aschen RESA (8,0 % P) und GA (10,5 % P) konnte aufgrund nur geringfügigen Unterschiedes der P-Konzentrationen eine P-Zufuhr in gleicher Größenordnung (ca. 52 kg P ha^{-1}) bei einer Asche-Ausbringung von 500 kg ha^{-1} (GA) bis 650 kg ha^{-1} (RESA) erfolgen. Bezüglich der SA-Düngung musste aufgrund des geringeren P-Gehaltes ein Kompromiss gefunden werden zwischen einer nicht zu hohen Aschemenge (Vermeidung eines zu starken pH-Effektes) und einer nicht zu geringen P-Zufuhr (Tab. 10). Im Rostocker Feldversuch erfolgte außer der Nährstoffzufuhr mittels Aschen eine N-Düngung mit KAS in allen Parzellen (einschließlich Kontrolle) von 120 kg N ha^{-1} (in 2 Gaben) im Jahr 2007 und 160 kg N ha^{-1} (1 Gabe) im Jahr 2008. Aufgrund der ökologischen Wirtschaftsweise am Standort Trenthorst, wurde dort keine mineralische N-Düngung durchgeführt. Auch auf eine organische N-Zufuhr wurde dort verzichtet.

Tab. 10: Düngevarianten und Nährstoffkonzentrationen/-zufuhr in den Feldversuchen.

Dünge- variante	Kurz- form	Nährstoffkonzentrationen in den Aschen (%)			Aschemenge (kg ha^{-1}) für 2 Jahre	Nährstoffzufuhr im Jahr 2007 (kg ha^{-1}) für 2 Jahre		
		P	K	Mg		P	K	Mg
Kontrolle	KON	-	-	-	-	-	-	-
Rapsextraktions- schrotasche	RESA	8,0	7,3	5,5	650	52,0	47,5	35,8
Strohasche	SA	1,0	5,3	1,0	850	8,5	45,1	8,5
Getreide(korn)asche	GA	10,5	10,8	3,3	500	52,5	54,0	16,5

4 Material und Methoden

An den beiden Feldversuchsstandorten sollte über zwei Jahre die Düngewirkung auf verschiedene **Fruchtarten** getestet werden (Tab. 11). In Rostock wurden So-Gerste (2007) und Mais (2008) angebaut und in Trenthorst So-Weizen (2007) und Lupine (2008), so dass die Ascheeffekte in Kombination mit Bodenunterschieden und Fruchtarteneinfluss untersucht werden konnten. Hinzu kam an beiden Standorten der Versuchsfaktor **Zwischenfrucht** (ZF). Im Feldversuch Rostock wurden die ZF Phacelia und Grünroggen angebaut und deren Einfluss auf Pflanzen- und Bodenkriterien im Folgejahr im Vergleich zu einer Kontrolle (ohne ZF) untersucht. In Trenthorst wurden als ZF-Varianten Senf und Phacelia ebenfalls im Vergleich mit einer Kontrolle (ohne ZF) getestet.

Tab. 11: Versuchstechnische/pflanzenbauliche Informationen zu den Feldversuchen 2007–2008.

	Rostock	Trenthorst
Vorfrüchte: 2005	Lupine	So-Gerste
2006	Kartoffel	Blaue Lupine
Bodenprobenahme	27.03.2007	04.04.2007
Ascheausbringung	28.03.2007	05.04.2007
Anbau 2007:		
Fruchtart (Sorte)	So-Gerste (Barke)	So-Weizen (Taifun)
Saattermin	29.03.2007	07.04.2007
Saatstärke	300 keimf. Kö. je m ²	400 keimf. Kö. je m ²
Reihenabstand	15,0 cm	12,5 cm
ZE1	23.05.2007 (BBCH 30/31)	22.05.2007 (BBCH 30/31)
ZE2	05.06.2007 (BBCH 49)	01.06.2007 (BBCH 39–41)
ZE3	10.07.2007 (BBCH 85)	18.07.2007 (BBCH 83–85)
Erntetermin	02.08.2007	06.08.2007
Bodenprobenahme	06.08.2007	07.08.2007
Zwischenfrucht 2007/08:		
Fruchtart (Sorte), Saattermin	Phacelia (Boratus), 20.08.2007 Grünroggen (Borfuro), 14.09.2007 Kontrolle / keine Kultur	Phacelia (Lisette), 07.09.2007 Weißer Senf (Martigena), 07.09.2007 Kontrolle / keine Kultur
Pflanzenprobenahme	21.11.2007	06.11.2007
Bodenprobenahme	28.02.2008	01.04.2008
Anbau 2008:		
Fruchtart (Sorte)	Mais (Arabica)	Blaue Lupine (Boruta)
Saattermin	06.05.2008	23.04.2008
Saatstärke	10 Pfl. je m ²	95 Körner je m ²
Reihenabstand	75,0 cm	12,5 cm
ZE	07.07.2008 (BBCH 37)	10.06.2008 (BBCH 51–59)
Erntetermin	16.09.2008	14.08.2008
Bodenprobenahme	16.09.2008	26.08.2008

ZE = Zwischenernte (jeweils 1 "laufender Meter" Drillreihe pro Kleinparzelle)

4.3 Gefäßversuche – Aufbau und Durchführung

An der Universität Rostock wurden in den Jahren 2007 und 2008 insgesamt vier Gefäßversuche mit acht Fruchtarten, zwei verschiedenen Böden und drei unterschiedlichen Biomasseaschen durchgeführt. Im Jahr 2007 wurden die Pflanzen auf mittel lehmigem Sand (Sl3) und 2008 auf mittel sandigem Lehm (Ls3) kultiviert (Körnungsanalyse siehe *Tab. A-7* im Anhang). **Im Folgenden werden die Böden entsprechend der dominanten Hauptbodenart als „Sand“ bzw. „Lehm“ bezeichnet, um die Lesbarkeit zu vereinfachen.** Beide Böden unterschieden sich außer in der Textur im pH-Wert und in der K- und Mg-Versorgung (*Tab. 12*). Entsprechend der ermittelten Pdl-Gehalte (*Tab. 12*) sind die Böden der Gehaltsklasse B (siehe LUFA Rostock 2004) zuzuordnen, d.h. es handelt sich um Böden mit suboptimaler P-Versorgung. In den Gefäßversuchen wurden bewusst diese Böden mit geringerem P-Versorgungsstatus als in den Feldversuchen verwendet, um zu testen, ob ein stärkerer Düngeneffekt erreicht werden kann.

Tab. 12: Bodeneigenschaften zu Beginn der Gefäßversuche (vor der Düngung) mit Zuordnung zu Gehaltsklassen und pH-Klassen.

Gefäßversuche	Bodenart	pH	oTS	Pt	Pw	Pdl	Kdl	Mgdl	Pox	PSC	DPS
		CaCl ₂	(%)			(mg kg ⁻¹)			(mmol kg ⁻¹)		(%)
I + II 2007	Sl3	5,69 (C)	2,4	504	10,6	38,9 (B)	114,3 (C)	120 (C-D)	11,9	30,5	39,1
III + IV 2008	Ls3	6,17 (C)	3,6	501	7,6	39,3 (B)	84,5 (B)	220 (D-E)	9,9	37,4	26,6

oTS = organische Trockensubstanz, Pt = Gesamt-P, Pw = wasserlösliches P, Pdl = doppelactatlösliches P, Kdl = doppelactatlösliches K, Mgdl = doppelactatlösliches Mg, Pox = oxalatlösliches P, PSC = P-Sorptionskapazität, DPS = Grad der P-Sättigung; Buchstaben in Klammern = Gehaltsklassen (P-, K-, Mg-Gehaltsklasse nach Richtwerten der LUFA Rostock (2004)) und pH-Klassen (nach VDLUFA (2000))

Zur Bewertung der nach Versuchsende ermittelten P-Fractionen im Boden fand zu Versuchsbeginn (vor der Asche-/Düngerapplikation) eine P-Fraktionierung von Bodenproben des Ausgangsbodens statt (*Tab. 13*).

Tab. 13: P-Fractionen im Boden (mg kg⁻¹) zu Beginn der Gefäßversuche.

Gefäßversuche	Harz-P	NaHCO ₃ -P	NaOH-P	H ₂ SO ₄ -P	Residual-P
I + II (2007, Sand, Sl3)	19,8	64,9	219,9	92,7	106,4
III + IV (2008, Lehm, Ls3)	23,0	51,5	134,1	158,8	133,8

Für die Gefäßversuche wurden Mitscherlichgefäße verwendet, die jeweils 6 kg gesiebten und angefeuchteten Boden enthielten. Zu Versuchsbeginn (vor der Düngung) wurden von jeder Variante Mischproben zur Bestimmung der Bodeneigenschaften genommen.

4 Material und Methoden

Die Aschen/Dünger wurden oberflächlich ausgebracht und in die oberen 5 cm des Bodens eingearbeitet. Aufgrund des geringen P-Gehaltes der Strohasche, musste in den Gefäßversuchen (wie in den Feldversuchen) ein Kompromiss zwischen der vorgesehenen **Nährstoffzufuhr** und der zu applizierenden **Aschemenge** gefunden werden. Daher wurde mit dieser Düngevariante zwar mehr Asche, aber vergleichsweise weniger P zugeführt. Um zwischen P- und K-Effekt der Aschen differenzieren zu können, wurden zwei weitere Düngevarianten mit leicht löslichem TSP bzw. KCl angelegt. Außerdem wurde eine Kontrollvariante (KON) ohne P und K etabliert (*Tab. 14*).

Jedes Gefäß erhielt anschließend 100 ml Nährlösung, die 1,4 g NH_4NO_3 (=0,5 g N) und 1,46 g MgSO_4 (=0,14 g Mg und 0,19 g S) enthielt, um eine ausreichende N-, Mg- und S-Versorgung zu garantieren. Alle Düngemaßnahmen erfolgten einen Tag vor der Aussaat.

Tab. 14: Düngevarianten der Gefäßversuche, ihre Nährstoffkonzentrationen und Dünger-/Nährstoffzufuhr (bezogen auf Gefäße mit 6 kg Boden).

Düngevariante	Kurzform	Nährstoffkonzentrationen (%)			Dünger-/ Aschemenge (g Gefäß ⁻¹)	Nährstoffzufuhr (g Gefäß ⁻¹)		
		P	K	Mg		P	K	Mg
Kontrolle	KON	-	-	-	-	-	-	-
Phosphor (Triple-superphosphat)	TSP	20,2	-	-	1,0	0,2	-	-
Rapsextraktions-schrotasche	RESA	8,0	7,3	5,5	2,5	0,2	0,2	0,1
Strohasche	SA	1,0	5,3	1,0	9,8	0,1	0,5	0,1
Getreidekornasche	GA	10,5	10,8	3,3	1,9	0,2	0,2	0,1
Kalium (KCl)	KCl	-	52,4	-	1,0	-	0,5	-

Um die fruchtartenspezifische P-Ausnutzung bewerten zu können, wurden in den Gefäßversuchen insgesamt **acht Fruchtarten unterschiedlicher Pflanzenfamilien** untersucht. Entsprechend der besten Wachstumszeiten der Fruchtarten wurden pro Jahr zwei Experimente zeitlich gestaffelt mit jeweils vier Kulturen auf dem gleichen Boden angelegt. Die als Hauptfrüchte (HF) angebauten Arten (Mais, Blaue Lupine, So-Gerste und So-Raps) wurden Ende März/Anfang April gesät. Die Fruchtarten, die für eine kürzere Vegetationszeit und spätere Aussaat in Frage kamen (Ölrettich, Phacelia, Welsches Weidelgras und Buchweizen), wurden im August gesät (Angaben zu Sorten, Saatstärken und Vegetationszeiten siehe *Tab. A-8* im Anhang) und werden im Folgenden als Zwischenfrüchte (ZF) bezeichnet. Die Düngevarianten waren in allen vier Versuchen beider Jahre in Form und Menge identisch. Alle Varianten wurden in vierfacher Wiederholung angelegt (sechs Düngestufen x vier Fruchtarten x vier Wiederholungen).

Nach der Keimung befanden sich die Gefäße in einem vor Vogelfraß geschützten Käfig unter natürlichen Witterungsbedingungen. Zusätzlich zum Niederschlag wurde entsprechend des Pflanzenbedarfs ein- bis zweimal täglich mit destilliertem Wasser gegossen. Überschüssiges Sickerwasser wurde in Schalen der Mitscherlichgefäße aufgefangen und dem Boden wieder zugeführt. Die Pflanzen konnten sich bis zum Stadium der Blüte bzw. Zeitpunkt des max. Biomassezuwachs entwickeln, dann wurde die oberirdische Biomasse nach sieben bis zehn Wochen (je nach Art) geerntet. Weidelgras wurde 2007 dreimal und 2008 zweimal innerhalb der Wachstumsperiode geschnitten. Nach der Ernte der oberirdischen Biomasse erfolgte die Bodenprobenahme mit einem Bohrstock. Diese Bodenproben wurden für weitere Analysen aufbereitet (siehe *Kap. 4.4.3*) und gelagert.

4.4 Untersuchungen und Analysen

4.4.1 Ermittlung der Erträge und Nährstoffaufnahmen in den Feld- und Gefäßversuchen

Vor Ermittlung der absoluten TM-Erträge (105 °C) wurden die geernteten Biomassen (Korn oder Spross) aus den Feld- und Gefäßversuchen zunächst bis zur Gewichtskonstanz (bei 60 °C) getrocknet und Nährstoffanalysen (siehe unten) durchgeführt. Die **Erträge der Feldexperimente** wurden nach Umrechnung der erfassten Parzellenerträge auf ha-Bezugsgröße angegeben. Für die Zwischenfrucht- und Maisganzpflanzenerträge erfolgte die Berechnung bezogen auf absolute TM, bei den weiteren Feldversuchserträgen (So-Gerste, So-Weizen und Lupine) wurden 14 % Feuchte zu Grunde gelegt. Zur Ermittlung der **Erträge der Gefäßversuche** wurde die gesamte oberirdische Biomasse jedes Gefäßes geerntet, bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und auf absolute TM (105 °C) umgerechnet.

Zur Bestimmung der **Nährstoffgehalte** im Pflanzenmaterial mittels Pflanzenaufschluss wurden zunächst 2 g der getrockneten und gemahlenen Pflanzenproben bei 550 °C im Muffelofen verascht. Die Asche wurde mit Salzsäure aufgenommen, mit destilliertem Wasser verdünnt, aufgeköcht (Aschelösung) und filtriert. Im Vorfeld der photometrischen P-Bestimmung (Spekol, Carl Zeiss Jena) erfolgte das Anfärben der Lösung mit einem Molybdat-Vanadat-Gemisch (Page et al. 1982). Ca und K wurden mit dem Flammenphotometer gemessen (Elex 6361, Eppendorf), Mg mit einem Spectralphotometer (EPOS Analyzer 5060, Eppendorf).

Um die Nährstoffaufnahmen in der Ganzpflanze, im Korn oder Stroh zu ermitteln, wurden die jeweiligen Erträge mit den Nährstoffgehalten verrechnet.

4.4.2 Wurzeluntersuchungen in den Gefäßversuchen

Nach der Ernte der oberirdische Biomasse wurden mit einem Bohrstock Boden-Wurzel-Proben aus den Gefäßen entnommen. Wurzeluntersuchungen in Gefäßversuchen mittels Entnahme von Bohrkernen führte auf ähnliche Weise z.B. auch Kochler (2001) durch. Mit Hilfe verschiedener Siebe und Wasser wurde der Boden von den Wurzeln gelöst.

Zur digitalen Ermittlung der Wurzellänge wurden die Wurzelproben mit Pinzetten so ausgebreitet, dass möglichst wenig Überlappungen und Aneinanderlagerungen entstanden, da dies die Hauptfehlerquelle bei der Längenmessung von Wurzeln ist (Bouma et al. 2000). Nach der Trocknung und TM-Bestimmung wurden die Wurzelproben eingescannt. Mit Hilfe einer speziellen Bildanalyse-Software „GSA Image Analyser“ konnten die Wurzellängen pro definiertes Bohrstockvolumen bestimmt werden, womit die Gesamtwurzellänge je Gefäß errechnet wurde. Mittels einer weiteren Berechnung wurde das Wurzellängen-Sprossgewicht-Verhältnis (im Folgenden Wurzel-Spross-Verhältnis genannt) ermittelt, welches sich aus der Wurzellänge (m) je Einheit Sprossgewicht (g TM) ergibt.

Die Wurzel-TM wurde ausgehend vom Volumen der Bohrstockproben bezogen auf das Gefäßvolumen errechnet.

4.4.3 Bodenuntersuchungen in den Feld- und Gefäßversuchen

An beiden Feldversuchsstandorten wurden zu Versuchsbeginn (d.h. vor Ascheausbringung) sowie nach der Ernte 2007, im Frühjahr 2008 und im Anschluss an die Ernte 2008 Bodenproben mittels Bohrstock entnommen. Bis auf den ersten Probenahmetermin in Rostock, wo nur der Oberboden (0–30 cm) beprobt wurde, erfolgten alle anderen Bodenprobenahmen in zwei Bodentiefen (0–30 cm und 30–60 cm). Pro Kleinparzelle wurde eine Mischprobe aus 4 Bohrstockeinstichen (0–30 cm) bzw. 2 Bohrstockeinstichen (30–60 cm) genommen. Zu Versuchsbeginn wurden jeweils nur die Großparzellen beprobt.

Zur Bodenprobenahme in den Gefäßversuchen kam ein spezieller Bohrstock zum Einsatz, der die ganze Gefäßtiefe erfasste. Nach Versuchsende wurde von jedem Gefäß eine Mischprobe mehrerer Bohrstockproben genommen.

Für die Mehrzahl der Bodenuntersuchungen (pH-Wert und Nährstoffe) wurden die Bodenproben luftgetrocknet, gesiebt (<2 mm) und für die P-Fraktionierung gemörsert (<0,1 mm). Für bodenenzymatische Untersuchungen (Phosphatase) wurden ungetrocknete Bodenproben des ersten Gefäßversuches eingefroren.

Um die Böden der Feld- und Gefäßversuche entsprechenden Bodenarten zuordnen zu können, fand eine **Körnungsanalyse** statt. Dazu wurde die Pipett- bzw. Köhn-Methode nach E DIN ISO 11277 durchgeführt, die nach Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV) das für die Korngrößenbestimmung von Bodenproben empfohlene Verfahren ist. Die Ermittlung der organischen Substanz (**oTS**) erfolgte nach Blume et al. (2000). Die **pH-Werte** wurden mit einem pH-Meter in einer Suspension aus 10 g Boden und 25 ml CaCl_2 -Lösung ($c = 0,01 \text{ mol l}^{-1}$) bestimmt.

Zwecks Charakterisierung der P-Pools im Boden wurden verschiedene Analysemethoden genutzt. Zur Ermittlung der wasserlöslichen P-Gehalte (**Pw**) wurde die Methode von Van der Paauw et al. (1971) mit einem Boden-Wasser-Verhältnis von 1:25 angewandt. Die P-Konzentrationen der Extrakte wurden mit der Molybdänblau-Methode und Messung mittels Fließinjektion (FIAstar 5012 Flow Injection Analyser, Foss Tecator AB, Schweden) bei einer Wellenlänge von 720 nm bestimmt.

Die Analyse der pflanzenverfügbaren **P-, K- und Mg-Gehalte** im Boden erfolgte im Doppellactat (DL)-Extrakt nach Hoffmann (1991). Es wurden 12 g lufttrockener Boden ($< 2 \text{ mm}$) mit 150 ml DL-Lösung 1,5 h geschüttelt. Die Bestimmung der Nährstoffgehalte erfolgte photometrisch. Mit einem Spektralphotometer (Spekol 11) wurden die Boden-gehalte an DL-löslichem Phosphor (**Pdl**) bei einer Wellenlänge von 580 nm bestimmt. Zur Ermittlung des DL-löslichen Kaliums (**Kdl**) wurde das Flammenphotometer (Elex 6361) benutzt. DL-gelöstes Magnesium (**Mgdl**) wurde am Spektralphotometer (EPOS Analyzer 5060) gemessen.

Das hauptsächlich an pedogene Aluminium- und Eisen-Oxide adsorbierte P wurde als oxalatlösliches P bestimmt (Schoumans 2000, Frossard et al. 2004) und gilt als labiler, nachlieferbarer P-Pool. Um die Gehalte an oxalatlöslichem Aluminium (**Alox**), Eisen (**Feox**) und Phosphor (**Pox**) zu ermitteln, fand nach Schwertmann (1964) eine Extraktion mit Ammoniumoxalat statt. Die Elementkonzentrationen in den Extrakten ließen sich mit ICP-Spektroskopie (ICP-OES, Jobin Yvon 238 Ultrace, Instruments S.A. GmbH, D-85630 Grasbrunn, Germany) bei 214,914 nm (P), 396,152 nm (Al) und 234,349 nm (Fe) messen. Mit den Alox-, Feox- und Pox-Gehalten konnten nach Lookman et al. (1995) und Schoumans (2000) die P-Sorptionskapazität und der Grad der P-Sättigung (DPS = Degree of P saturation) errechnet werden:

$$\text{PSC} [\text{mmol kg}^{-1}] = (\text{Alox} + \text{Feox})/2$$

$$\text{DPS} [\%] = \text{Pox}/\text{PSC} * 100$$

Der Grad der P-Sättigung drückt das Verhältnis vom langfristig verfügbaren P des Bodens zur P-Speicherkapazität im Boden aus.

Für die Bestimmung der **Schwermetallgehalte** (Pb, Cd, Cu, Ni und Zn) im Boden sowie des Gesamtgehaltes an Phosphor (**Pt**) und für die P-Fraktionierung wurden von jeder zu untersuchenden Probe 0,5 g Boden (<0,1 mm) verwendet. Die Analyse der Schwermetallgehalte und des Pt erfolgte mittels Königswasseraufschluss (6 ml HCl (37 %) und 2 ml HNO₃ (65 %), (DIN EN 13346)) in einem Mikrowellensystem (Mars Xpress, CEM GmbH, Kamp-Lintfort, Germany) und anschließender Messung der Elemente mittels ICP-OES bei folgenden Wellenlängen: 220,353 nm (Pb), 214,438 nm (Cd), 324,754 nm (Cu), 231,604 nm (Ni), 213,856 nm (Zn) und 214,914 nm (P).

Um die Effekte der Ascheausbringung auf die Schwermetallgehalte im Boden der Feldversuche zu ermitteln und ein Gefährdungsrisiko abschätzen zu können, wurde die Menge an Schwermetallen in mg kg⁻¹ Boden für jeden Standort und jedes Element bezogen auf das Krumengewicht (4,5 x 10⁶ kg ha⁻¹) der obersten Bodenschicht (30 cm) einer Fläche von 1 ha (Trockenrohdichte 1,5 g pro cm³) berechnet.

Die sequentielle **P-Fraktionierung** wurde in Anlehnung an Tiessen et al. (1983) und deren modifizierte Methode nach Hedley et al. (1982) durchgeführt – jedoch ohne Separation des organisch und anorganisch gebundenen P. Für die Analyse wurden jeweils 0,5 g lufttrockener Boden, ein Anionen-Austauscher-Harz (Anion-exchange membrane, VWR International Ltd, Poole, BH15 1TD England) sowie verschiedene Extraktionsmittel verwendet. Die Extraktionsmittel wirken über Austausch- oder Lösungsreaktionen und erfassen in der Reihenfolge ihrer Verwendung labil bis stabil gebundene P-Formen bzw. abnehmend pflanzenverfügbares P. Die folgenden vier P-Fraktionen wurden extrahiert: Harz-P (pH 7), NaHCO₃-P (pH 8,5), NaOH-P (pH 13) und H₂SO₄-P (pH ~0). Aus der Differenz zwischen Pt und der Summe der extrahierten P-Fraktionen wurde die Menge des Residual-P ermittelt. Für detaillierte Angaben zur Methode der P-Fraktionierung wird auf *Abb. A-1* im Anhang verwiesen. Die P-Konzentrationen in den Extrakten aus der Fraktionierung und der Pt-Analyse wurden mittels ICP-Spektroskopie bestimmt.

Für die Bestimmung der sauren und alkalischen **Phosphatase-Aktivität** im Gefäßversuch I (Hauptfrüchte auf Sand, 2007) wurde die Methode von Tabatabai und Bremner (1969) angewandt. Das Messprinzip beruht auf der Bestimmung der Freisetzung von p-Nitrophenol aus p-Nitrophenylphosphat-Lösung während Bebrütung bei 37 °C (1 h) durch extrazelluläre Phosphatasen im Boden. Die Messung erfolgte am Spektralphotometer (Spekol 11). Die ermittelten Analyseergebnisse wurden in µmol p-Nitrophenol g⁻¹ h⁻¹ umgerechnet.

4.4.4 Analysen der Aschen und des Düngers Triplesuper-P

Die Bestimmung der **pH-Werte** der Biomasseaschen erfolgte in gleicher Weise wie bei den Bodenproben (siehe *Kap. 4.4.3*).

Die **P-Fraktionierung** der Aschen und des TSP-Düngers wurde ohne Anionen-Austauscher-Harz durchgeführt. Voruntersuchungen hatten ergeben, dass die Bindungskapazität des Anionen-Austauscher-Harzes bei sehr hohen leicht-löslichen P-Gehalten nicht ausreichte, um den wahren P-Gehalt dieser Fraktion (vor allem jenen von TSP) widerzuspiegeln. Daher wurde die erste P-Fraktion der Aschen und des TSP nur mit Reinstwasser extrahiert. Bei hohen wasserlöslichen P-Gehalten von $>400 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ wählten auch Negassa et al. (2010) bei der Untersuchung landwirtschaftlich-industrieller Nebenprodukte diese Vorgehensweise und ersetzten die Harz-P-Fraktion durch eine H_2O -P-Fraktion.

Wie bei der P-Fraktionierung der Bodenproben wurde die Residualfraktion aus der Differenz von Pt und der Summe der analysierten Fraktionen bestimmt. Überstieg die Summe der Fraktionen die Pt-Gehalte (wie bei SA und GA der Fall), wurde dies mit „-“ gekennzeichnet (*Kap. 5.1, Tab. 15*). Diese Werte resultierten aus der Tatsache, dass die Aschen mittels Königswasseraufschluss nicht vollständig aufgelöst wurden und somit Pt möglicherweise etwas unterschätzt wird. Um genauere Gesamt-P-Ergebnisse zu erhalten, müssten die Aufschlüsse mit einer noch aggressiveren Säure (z.B. Flusssäure) erfolgen, wie auch von Štrimaityte (2005) als Alternative beschrieben wurde.

Um den **zitronensäurelöslichen P-Anteil (Pcit)** der Aschen zu bestimmen, fand eine Extraktion in 2%iger Zitronensäurelösung statt. Dazu wurden die Ascheproben (jeweils 1 g) wie in Untersuchungen von Eichler-Löbermann et al. (2008a) in 200 ml Zitronensäurelösung 2 h geschüttelt. Nach einer Ruhephase von 22 h erfolgte eine nochmalige Schüttelung von 1 h. Anschließend wurden die Proben verdünnt und die Pcit-Gehalte mittels ICP-Spektroskopie gemessen.

Die Bestimmung der **Schwermetallgehalte** in den Biomasseaschen erfolgte durch die LUFA Rostock (nach DIN-Vorschriften DIN EN ISO 11885-E22 (Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn) und DIN EN 1483-E12 (Hg)). Die Analysewerte sind in *Tab. A-1* im Anhang in Relation zu Vorsorge- und Grenzwerten relevanter Verordnungen aufgeführt.

4.5 Statistische Auswertung

Die Varianzanalysen (ANOVA) und Korrelationsberechnungen wurden mit dem Programm SPSS 15.0 vorgenommen. Die Beurteilung der Unterschiede zwischen den verschiedenen Dünge- oder Fruchtartenvarianten erfolgte mittels Duncan-Test ($p \leq 0,05$). Das Signifikanzniveau wurde wie folgt gekennzeichnet: * ($p \leq 0,05$); ** ($p \leq 0,01$); *** ($p \leq 0,001$). Zur Beschreibung von Korrelationen wurde der Korrelationskoeffizient nach Pearson (r) verwendet.

Um die Effekte der Versuchsfaktoren auf die Untersuchungskriterien besser beurteilen zu können, wurde das partielle Eta-Quadrat ermittelt. Dieses Effektstärkenmaß gibt den Anteil der aufgeklärten Varianz auf der Stichprobenebene an (Rasch et al. 2010).

5 Ergebnisse

5.1 P-Fractionen der Biomasseaschen und des Düngers Triplesuper-P

Mit dem Ziel, erste Orientierungswerte hinsichtlich der P-Düngewirkung der Biomasseaschen zu gewinnen, sollte deren P-Wirksamkeit wie bei konventionellen Mineraldüngern durch verschiedene chemische Extraktionsverfahren charakterisiert werden. Die Biomasseaschen unterschieden sich untereinander und im Vergleich zu TSP sowohl in den **Pt-Gehalten** (Werte der Aschen zwischen 1 % (SA) und 10,5 % (GA); TSP enthielt 20,2 %), als auch hinsichtlich der analysierten P-Fractionen (*Tab. 15*). So hatten RESA und GA, die Pt-Gehalte ähnlicher Größenordnung aufwiesen, sehr unterschiedliche Anteile an den einzelnen P-Fractionen, wie z.B. an der **H₂O-P**-Fraktion (RESA: 0,5 % des Pt vs. GA: 19,5 % des Pt). Im TSP-Dünger wurden >80 % des Pt in der H₂O-P-Fraktion ermittelt. Die Aschen hatten zwar höhere Gehalte an **NaHCO₃-P** als TSP, der Großteil des Pt in den Aschen wurde jedoch in der schwer verfügbaren **H₂SO₄-P**-Fraktion mit bis zu 75 % (in der SA) nachgewiesen.

Tab. 15: P-Fractionen der Aschen und des TSP-Düngers.

Asche/ Dünger	Pt *	H ₂ O-P	NaHCO ₃ -P	NaOH-P	H ₂ SO ₄ -P	Residual-P
	mg 100 g ⁻¹					
				mg 100 g ⁻¹ (% von Pt)		
SA	1000	95 (9,5)	173 (17,3)	40 (4,0)	754 (75,4)	-
RESA	8000	37 (0,5)	890 (11,1)	522 (6,5)	5886 (73,6)	665 (8,3)
GA	10500	2044 (19,5)	805 (7,7)	1147 (10,9)	6972 (66,4)	-
TSP	20200	16787 (83,1)	62 (0,3)	23 (0,1)	1074 (5,3)	2254 (11,2)

* Königswasseraufschluss, P-Analyse durch die LUFA Rostock

Pt = P total; SA = Strohasche, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, GA = Getreideasche, TSP = Triplesuperphosphat

Die Analyse des zitronensäurelöslichen P-Gehaltes (**Pcit**) am Beispiel einer Asche ergab, dass 81,3 % des Pt der SA mit dieser Methode extrahiert werden konnten. Dieser Anteil am Pt war somit wesentlich höher als die Summe der beiden leichtesten verfügbaren P-Fractionen (H₂O-P + NaHCO₃-P = 26,8 % von Pt).

5.2 Standortabhängige Effekte der Düngung mit Biomasseaschen und des Zwischenfruchtanbaus in den Feldversuchen

An den beiden Feldversuchsstandorten Rostock und Trenthorst wurden die gleichen Biomasseaschen zu unterschiedlichen Hauptfrüchten (HF) und Zwischenfrüchten (ZF) ausgebracht. Die Düngewirkung der Biomasseaschen war von den standortspezifischen Bodenbedingungen und den angebauten Fruchtarten abhängig.

5.2.1 Ertrag und Nährstoffaufnahmen der Haupt- und Zwischenfrüchte

Im **Feldversuch in Rostock** wurden auf dem schwach lehmigen Sand die **Nährstoffaufnahmen der Pflanzen** und die **Erträge** durch Aschedüngung positiv beeinflusst. Zur Haupternte von So-Gerste und Mais konnten signifikante Düngeeffekte ermittelt werden. Die Kornerträge der So-Gerste lagen im ersten Versuchsjahr zwischen 30 und 36 dt ha⁻¹, und im zweiten Jahr wurden Mais-Biomasseerträge zwischen 162 und 180 dt ha⁻¹ ermittelt (*Tab. 16* und *Tab. 17*). Während im Jahr 2007 vor allem die Düngevarianten SA und RESA zu signifikant erhöhten Gersteerträgen (Kornmehrertrag von bis zu 5,3 dt ha⁻¹ = 18 %) führten (*Tab. 16*), reagierte der Mais 2008 auf SA oder GA mit Mehrerträgen (bis zu 18 dt ha⁻¹ = 11 %) und signifikant erhöhten P- und K-Aufnahmen im Vergleich zur Kontrolle (ohne P) (*Tab. 17*).

5 Ergebnisse

Tab. 16: TM-Ertrag (dt ha^{-1}) und Nährstoffaufnahmen (kg ha^{-1}) zu den Zwischenernten (Ganzpflanze) und zur Haupternte (Korn) der So-Gerste in Abhängigkeit von der Düngung, Feldversuch Rostock 2007.

Termin	Düng.	TM-Ertrag	P-Aufn.	K-Aufn.	Mg-Aufn.	Ca-Aufn.
ZE1	<i>p</i>	0,138 ns	0,149 ns	0,046*	0,128 ns	0,317 ns
	KON	7,86	3,33	22,4 a	1,78	4,40
	SA	9,89	4,29	28,9 ab	1,93	5,52
	RESA	9,89	4,33	31,6 b	2,17	5,09
	GA	8,57	3,49	23,8 a	1,68	4,33
	MW	9,05	3,86	26,7	1,89	4,84
ZE2	<i>p</i>	0,369 ns	0,607 ns	0,447 ns	0,853 ns	0,636 ns
	KON	24,8	9,2	51,6	5,02	10,0
	SA	27,3	10,3	60,7	4,96	10,8
	RESA	30,4	11,9	69,4	5,55	11,8
	GA	26,9	11,0	64,0	5,26	12,2
	MW	27,3	10,6	61,4	5,20	11,2
ZE3	<i>p</i>	0,189 ns	0,552 ns	0,159 ns	0,778 ns	0,547 ns
	KON	65,5	18,5	66,6	8,57	14,6
	SA	73,8	22,1	87,1	9,24	18,9
	RESA	90,7	22,6	94,7	8,95	17,1
	GA	70,3	19,2	77,4	7,83	15,2
	MW	75,1	20,6	81,4	8,65	16,4
HE/Korn ¹⁾	<i>p</i>	0,039*	0,261 ns	0,105 ns	0,837 ns	0,801 ns
	KON	30,2 a	11,6	12,1	4,01	1,15
	SA	35,3 b	13,0	14,0	3,90	1,22
	RESA	35,5 b	13,1	14,5	3,79	1,21
	GA	33,6 ab	12,7	14,0	3,71	1,22
	MW	33,6	12,6	13,6	3,85	1,20

¹⁾ Kornertrag bei 14 % Feuchte

TM = Trockenmasse; ZE = Zwischenernte; HE = Haupternte; KON = Kontrolle, SA = Strohasche, RESA = Rapsextraktionschrotasche, GA = Getreideasche; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngewarianten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; ns = nicht sign.

5 Ergebnisse

Der **Zwischenfruchtanbau** in **Rostock** führte zu positiven Effekten auf die Hauptkultur des zweiten Versuchsjahres. Dies wurde vor allem zur Zwischenernte deutlich. Zu diesem Zeitpunkt waren die P- und K-Aufnahmen von Mais, der nach Phacelia bzw. Grünroggen angebaut wurde, im Vergleich zur Kontrolle ohne Zwischenfrucht erhöht. Zur Haupternte vom Mais (Ganzpflanze) wurden aufgrund des ZF-Effektes erhöhte Mg- und Ca-Aufnahmen ermittelt (Tab. 17).

Tab. 17: TM-Ertrag (dt ha^{-1}) und Nährstoffaufnahmen (kg ha^{-1}) zur Zwischen- und Haupternte von Mais (Ganzpflanze) in Abhängigkeit von der Düngung und der Zwischenfrucht, Feldversuch Rostock 2008.

Termin	Düng./ZF	TM-Ertrag	P-Aufn.	K-Aufn.	Mg-Aufn.	Ca-Aufn.
ZE	$p(\text{Düng.} \times \text{ZF})$	0,921 ns	0,979 ns	0,925 ns	0,885 ns	0,937 ns
	$p(\text{Düng.})$	0,725 ns	0,651 ns	0,156 ns	0,822 ns	0,759 ns
	KON	17,9	5,24	26,4	6,23	7,06
	SA	17,8	5,38	30,5	5,80	6,64
	RESA	19,6	5,75	33,6	6,35	7,36
	GA	18,3	5,32	31,8	5,93	6,88
	$p(\text{ZF})$	0,149 ns	0,045*	0,007**	0,055 ns	0,114 ns
	Kontrolle	17,0	4,94 a	29,4 a	5,30	6,17
	Roggen	18,4	5,49 ab	35,9 b	6,06	7,41
	Phacelia	19,8	5,83 b	26,3 a	6,88	7,38
	MW	18,4	5,42	30,6	6,08	6,98
HE	$p(\text{Düng.} \times \text{ZF})$	0,064 ns	0,358 ns	0,171 ns	0,487 ns	0,917 ns
	$p(\text{Düng.})$	0,012*	0,007**	0,003**	0,457 ns	0,410 ns
	KON	162 a	32,2 a	102 a	38,0	35,6
	SA	180 b	39,2 c	126 b	40,5	39,2
	RESA	165 a	33,3 ab	113 ab	39,3	39,2
	GA	179 b	37,0 bc	126 b	40,7	40,2
	$p(\text{ZF})$	0,058 ns	0,080 ns	0,077 ns	0,041*	0,022*
	Kontrolle	156	32,6	105	35,8 a	34,9 a
	Roggen	191	41,4	139	43,7 c	44,0 b
	Phacelia	167	32,3	105	39,3 b	36,7 a
	MW	172	35,4	117	39,6	38,5

TM = Trockenmasse; ZF = Zwischenfrucht; ZE = Zwischenernte; HE = Haupternte; KON = Kontrolle, SA = Strohasche, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, GA = Getreideasche; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düng- oder Zwischenfruchtvarianten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; ns = nicht sign.

5 Ergebnisse

Zum Probenahmetermin im November 2007 wiesen Phacelia und Grünroggen fruchtartenspezifische Unterschiede in den **Biomassen und Nährstoffaufnahmen** auf. Phacelia bildete fast das Dreifache an Biomasse des Grünroggens (*Tab. 18*) und hatte wesentlich höhere Nährstoffgehalte (siehe *Tab. A-9* im Anhang) und Nährstoffaufnahmen (*Tab. 18*). Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass Grünroggen später ausgesät wurde als Phacelia (siehe *Kap. 4.2.2, Tab. 11*).

Der Biomasseertrag und die Nährstoffaufnahmen der Zwischenfrüchte waren zum Zeitpunkt der Probenahme nicht von der Düngung beeinflusst (*Tab. 18*). Es gab keine Wechselwirkungen zwischen den Versuchsfaktoren Düngung und Zwischenfrucht.

Tab. 18: TM-Ertrag (dt ha⁻¹) und Nährstoffaufnahmen (kg ha⁻¹) der Zwischenfrüchte (Ganzpflanze) in Abhängigkeit von der Zwischenfruchtart und Düngung, Feldversuch Rostock, Herbst 2007.

ZF	Düng.	TM-Ertrag	P-Aufn.	K-Aufn.	Mg-Aufn.	Ca-Aufn.
	<i>p</i> (Düng.)	0,829 ns	0,737 ns	0,705 ns	0,806 ns	0,942 ns
	<i>p</i> (Düng. x ZF)	0,994 ns	0,979 ns	0,969 ns	0,914 ns	0,953 ns
	<i>p</i> (ZF)	0,001***	0,001***	0,002**	0,002**	0,002**
Roggen	MW	13,0 a	5,3 a	27,1 a	2,0 a	2,7 a
Phacelia	MW	36,4 b	18,4 b	78,4 b	12,2 b	122,8 b
Roggen	<i>p</i>	0,588 ns	0,581 ns	0,564 ns	0,555 ns	0,536 ns
	KON	15,0	6,31	33,2	2,31	3,17
	SA	9,5	3,31	17,0	1,47	1,88
	RESA	13,3	5,50	28,5	2,04	2,67
	GA	14,3	5,89	29,7	2,18	2,92
Phacelia	<i>p</i>	0,949 ns	0,901 ns	0,869 ns	0,868 ns	0,943 ns
	KON	37,8	18,8	82,1	12,7	125,7
	SA	32,4	16,0	64,9	10,4	109,2
	RESA	38,4	19,7	86,2	13,5	130,2
	GA	37,1	19,2	80,3	12,1	126,2

TM = Trockenmasse; KON = Kontrolle, SA = Strohasche, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, GA = Getreideasche; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Zwischenfruchtvarianten im Mittel der Düngevarianten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA) und zwischen den Düngevarianten einer Zwischenfrucht ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

In **Trenthorst** ließen sich Effekte der Versuchsfaktoren hinsichtlich des Ertrages und der Nährstoffaufnahme weder im ersten Versuchsjahr bei So-Weizen (durchschnittlicher Korn-ertrag von 31,5 dt ha⁻¹, *Tab. 19*) noch im zweiten Jahr bei Blauer Lupine (durchschnittlicher Kornertrag von 36,2 dt ha⁻¹, *Tab. 20*) nachweisen.

5 Ergebnisse

Tab. 19: TM-Ertrag (dt ha^{-1}) und Nährstoffaufnahmen (kg ha^{-1}) zu Zwischenernten (Ganzpflanze) und zur Haupternte (Korn und Stroh) von So-Weizen in Abhängigkeit von der Düngung, Feldversuch Trenthorst 2007.

Termin/ Erntepartie	Düng.	TM-Ertrag	P-Aufn.	K-Aufn.	Mg-Aufn.	Ca-Aufn.
ZE1	<i>p</i>	0,702 ns	0,804 ns	0,653 ns	0,703 ns	0,345 ns
	KON	7,61	3,14	24,8	0,62	2,95
	SA	7,22	2,98	23,5	0,57	2,74
	RESA	7,37	3,03	23,5	0,58	2,76
	GA	7,08	2,96	22,9	0,59	2,69
	MW	7,32	3,03	23,7	0,59	2,79
ZE2	<i>p</i>	0,747 ns	0,736 ns	0,794 ns	0,938 ns	0,818 ns
	KON	17,6	6,51	45,2	1,28	4,73
	SA	18,2	6,75	46,3	1,29	4,70
	RESA	17,7	6,58	44,7	1,27	4,51
	GA	18,4	6,92	47,3	1,32	4,78
	MW	18,0	6,69	45,9	1,29	4,68
ZE3	<i>p</i>	0,696 ns	0,735 ns	0,744 ns	0,668 ns	0,889 ns
	KON	52,9	14,1	32,4	6,46	4,64
	SA	54,8	14,4	33,2	6,64	4,78
	RESA	57,6	15,4	35,4	7,04	4,94
	GA	55,2	14,6	33,2	6,75	4,84
	MW	55,1	14,6	33,6	6,72	4,80
HE/Korn ¹⁾	<i>p</i>	0,370 ns	0,418 ns	0,608 ns	0,912 ns	0,011 *
	KON	32,4	11,6	11,9	3,00	0,87 b
	SA	31,3	11,3	11,7	2,95	0,82 a
	RESA	30,9	11,1	11,4	2,94	0,80 a
	GA	31,3	11,3	11,6	2,98	0,82 a
	MW	31,5	11,3	11,7	2,97	0,83
HE/Stroh	<i>p</i>	0,910 ns	0,762 ns	0,629 ns	1,000 ns	0,804 ns
	KON	25,1	3,20	14,5	2,51	3,39
	SA	25,0	3,16	14,6	2,50	3,27
	RESA	24,1	3,03	13,5	2,51	3,20
	GA	24,4	3,02	13,7	2,50	3,26
	MW	24,6	3,10	14,1	2,50	3,28

¹⁾ Kornertrag bei 14 % Feuchte

TM = Trockenmasse; ZE = Zwischenernte; HE = Haupternte; KON = Kontrolle, SA = Strohasche, RESA = Rapsextraktions-schrotasche, GA = Getreideasche; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngewarianten eines Erntetermins/einer Erntepartie ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; ns = nicht sign.

5 Ergebnisse

Tab. 20: TM-Ertrag (dt ha^{-1}) und Nährstoffaufnahmen (kg ha^{-1}) zur Zwischen- und Haupternte der Blauen Lupine in Abhängigkeit von der Düngung und der Zwischenfrucht, Feldversuch Trenthorst 2008.

Termin/ Erntepartie	Düng./ZF	TM-Ertrag	P-Aufn.	K-Aufn.	Mg-Aufn.	Ca-Aufn.
ZE/Ganzpflanze	p (Düng. x ZF)	0,960 ns	0,835 ns	0,895 ns	0,805 ns	0,952 ns
	p (ZF)	0,915 ns	0,737 ns	0,757 ns	0,842 ns	0,797 ns
	p (Düng.)	0,096 ns	0,210 ns	0,271 ns	0,148 ns	0,326 ns
	KON	12,2	4,45	18,5	4,04	20,5
	SA	12,8	4,64	19,9	4,22	21,2
	RESA	14,0	5,11	20,6	4,56	22,4
	GA	12,7	4,48	19,5	4,23	20,8
	MW	13,0	4,67	19,6	4,26	21,2
HE/Korn ¹⁾	p (Düng. x ZF)	0,666 ns	0,320 ns	0,377 ns	0,687 ns	0,671 ns
	p (ZF)	0,252 ns	0,790 ns	0,152 ns	0,244 ns	0,135 ns
	p	0,184 ns	0,134 ns	0,241 ns	0,200 ns	0,142 ns
	KON	37,2	11,0	45,7	4,56	9,46
	SA	37,0	10,7	46,0	4,53	9,22
	RESA	33,6	9,8	40,0	4,13	8,48
	GA	36,9	10,5	45,6	4,55	9,26
	MW	36,2	10,5	44,3	4,44	9,10
HE/Stroh	p (Düng. x ZF)	0,757 ns	0,674 ns	0,902 ns	0,510 ns	0,303 ns
	p (ZF)	0,707 ns	0,901 ns	0,514 ns	0,914 ns	0,957 ns
	p	0,098 ns	0,301 ns	0,012*	0,344 ns	0,227 ns
	KON	21,9	2,47	28,1 b	6,09	37,7
	SA	20,9	2,03	26,5 b	5,40	33,0
	RESA	18,0	1,70	21,9 a	4,72	28,6
	GA	20,9	2,17	26,5 b	5,67	35,1
	MW	20,4	2,09	25,8	5,47	33,6

¹⁾ Kornertrag bei 14 % Feuchte

TM = Trockenmasse; ZE = Zwischenernte; HE = Haupternte; KON = Kontrolle, SA = Strohasche, RESA = Rapsextraktions-schrotasche, GA = Getreideasche; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngewarianten eines Erntetermins/einer Erntepartie ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; ns = nicht sign.

Düngeeffekte auf die TM-Erträge und Nährstoffgehalte der **Zwischenfrüchte Senf und Phacelia** konnten im Herbst 2007 in **Trenthorst** nicht festgestellt werden (Tab. A-10 im Anhang). Im ZF-Vergleich hatte Phacelia höhere Gehalte an P, K, Mg und Ca im Spross als Senf.

5.2.2 Nährstoffverfügbarkeit im Boden der Feldversuche

Um den Einfluss der Versuchsfaktoren (Düngung und Zwischenfrucht) auf die Bodennährstoffgehalte zu prüfen, wurden sowohl die Unterschiede zwischen den Düngevarianten als auch die Veränderungen über die Zeit im Rahmen der Bodenprobenahmetermine berücksichtigt.

Hinsichtlich der **pH-Werte** und der **Bodennährstoffgehalte** konnten in Rostock in beiden Versuchsjahren keine signifikanten Unterschiede zwischen den mit Asche gedüngten Parzellen und der Kontrolle festgestellt werden. Im Oberboden lagen die Pt-Gehalte und DPS-Werte zum Erntetermin 2007 und die Pw-, Pdl- und Kdl-Gehalte zu allen Beprobungsterminen in den Asche-Düngevarianten tendenziell über denen der Kontrolle (Tab. 21, Tab. 22 und Tab. 23).

Tab. 21: pH-Wert, Bodennährstoffgehalte und P-Sorptionsparameter zum Erntetermin in Abhängigkeit von der Düngung, Feldversuch Rostock 2007.

Probe- nahme- tiefe	Düng.	pH- Wert	Pw	Pdl	Kdl	Mgdl	Pox	PSC	DPS	Pt
			(mg kg ⁻¹)				(mmol kg ⁻¹)		(%)	(mg kg ⁻¹)
0–30 cm	<i>p</i>	0,398 <i>ns</i>	0,733 <i>ns</i>	0,701 <i>ns</i>	0,288 <i>ns</i>	0,677 <i>ns</i>	0,910 <i>ns</i>	0,635 <i>ns</i>	0,782 <i>ns</i>	0,728 <i>ns</i>
	KON	5,60	13,5	61,7	35,1	157	15,4	29,9	51,4	576
	SA	5,60	15,3	64,3	40,4	158	15,3	28,8	53,3	590
	RESA	5,63	13,9	64,3	39,8	156	15,8	29,7	53,3	599
	GA	5,67	14,3	66,4	40,0	162	15,3	29,0	52,6	596
	MW	5,62	14,2	64,2	38,8	158	15,5	29,4	52,7	590
30–60 cm	<i>p</i>	0,470 <i>ns</i>	0,794 <i>ns</i>	0,912 <i>ns</i>	0,317 <i>ns</i>	0,371 <i>ns</i>	0,776 <i>ns</i>	0,306 <i>ns</i>	0,502 <i>ns</i>	0,967 <i>ns</i>
	KON	5,16	3,13	18,5	28,9	128	7,33	29,7	25,2	310
	SA	5,10	3,59	17,8	34,9	154	6,29	29,7	21,3	295
	RESA	5,29	3,38	20,0	32,0	127	7,34	27,9	25,9	288
	GA	5,38	3,80	20,8	31,7	136	7,04	26,7	26,2	300
	MW	5,23	3,47	19,3	31,9	136	7,00	28,5	24,6	298

Pw = wasserlösliches P, Pdl/Kdl/Mgdl = doppellaktatlösliches P/K/Mg, Pox = oxalatlösliches P, PSC = P-Sorptionskapazität, DPS = Grad der P-Sättigung, Pt = P total; KON = Kontrolle, SA = Strohasche, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, GA = Getreideasche; MW = Mittelwert; $p \leq 0,05$ (Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); ns = nicht sign.

5 Ergebnisse

Der **Zwischenfruchtanbau** hingegen hatte die **Nährstoffverfügbarkeit** erhöht. Zu den Beprobungsterminen 2008 lagen die Pw-, Pdl- und Pox-Gehalte in beiden Bodenschichten signifikant über denen der Kontrolle ohne Zwischenfrucht (*Tab. 22* und *Tab. 23*). Dabei wurden nach Phacelia-Anbau im Oberboden höhere Werte ermittelt als nach Grünroggen-ZF (*Tab. 22* und *Tab. 23* sowie *Abb. 6* und *Abb. 7*). Die P-Aufnahmen der Zwischenfrüchte (siehe *Kap. 5.2.1, Tab. 18*) waren mit den Pw-Gehalten im Boden im Februar 2008 positiv korreliert ($r = 0,507^{**}$).

Tab. 22: pH-Wert, Bodennährstoffgehalte und P-Sorptionsparameter zur Bodenprobenahme im Februar 2008 in Abhängigkeit von der Düngung und der Zwischenfrucht, Feldversuch Rostock.

Probe- nahmetiefe	Düng./ ZF	pH- Wert	Pw	Pdl	Kdl	Mgdl	Pox	PSC	DPS
			(mg kg ⁻¹)				(mmol kg ⁻¹)		(%)
0–30 cm	<i>p (Düng.)</i>	<i>0,056 ns</i>	<i>0,850 ns</i>	<i>0,692 ns</i>	<i>0,106 ns</i>	<i>0,796 ns</i>	<i>0,779 ns</i>	<i>0,914 ns</i>	<i>0,799 ns</i>
	KON	5,90	13,6	61,8	42,4	164	15,2	30,1	50,4
	SA	5,82	14,7	63,7	46,5	166	14,7	29,9	49,1
	RESA	5,89	14,1	62,9	45,6	160	15,2	30,5	49,8
	GA	5,91	14,9	65,2	48,1	167	14,9	30,2	49,5
	<i>p (ZF)</i>	<i>0,207 ns</i>	<i>0,001***</i>	<i>0,001***</i>	<i>0,083 ns</i>	<i>0,018*</i>	<i>0,034*</i>	<i>0,048*</i>	<i>0,051 ns</i>
	Kontrolle	5,88	11,9 a	57,9 a	45,5	171 b	13,9 a	29,2 a	47,6
	Roggen	5,82	14,7 b	63,7 b	43,2	163 a	15,3 b	30,3 b	50,6
	Phacelia	5,93	16,3 c	68,6 c	48,3	159 a	15,7 b	31,0 b	50,9
	MW	5,88	14,3	63,4	45,6	164	15,0	30,2	49,7
30–60 cm	<i>p (Düng.)</i>	<i>0,321 ns</i>	<i>0,811 ns</i>	<i>0,600 ns</i>	<i>0,726 ns</i>	<i>0,893 ns</i>	<i>0,502 ns</i>	<i>0,766 ns</i>	<i>0,621 ns</i>
	KON	5,42	3,64	23,0	37,2	137	8,02	29,2	27,8
	SA	5,44	3,30	17,3	41,3	148	6,59	28,6	23,3
	RESA	5,57	3,54	18,8	39,2	142	7,69	30,2	25,2
	GA	5,61	3,76	19,0	39,7	147	6,70	28,2	24,0
	<i>p (ZF)</i>	<i>0,495 ns</i>	<i>0,832 ns</i>	<i>0,006**</i>	<i>0,014*</i>	<i>0,346 ns</i>	<i>0,007**</i>	<i>0,268 ns</i>	<i>0,128 ns</i>
	Kontrolle	5,62	3,48	16,2 a	34,5 a	146	6,42 a	27,6	23,5
	Roggen	5,47	3,68	22,1 b	38,6 a	147	7,95 b	29,5	27,0
	Phacelia	5,45	3,52	20,2 b	44,9 b	138	7,38 b	30,0	24,8
	MW	5,51	3,56	19,5	39,3	144	7,25	29,0	25,1

ZF = Zwischenfrucht; Pw = wasserlösliches P, Pdl / Kdl / Mgdl = doppelaktatlösliches P / K / Mg, Pox = oxalatlösliches P, PSC = P-Sorptionskapazität, DPS = Grad der P-Sättigung; KON = Kontrolle, SA = Strohasche, RESA = Rapsextraktionschrotrasche, GA = Getreideasche; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Zwischenfruchtvarianten einer Probenahmetiefe ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

5 Ergebnisse

Tab. 23: pH-Wert, Bodennährstoffgehalte und P-Sorptionsparameter zum Erntetermin von Mais in Abhängigkeit von der Düngung und der Zwischenfrucht, Feldversuch Rostock 2008.

Probenahmetiefe	Düng./ZF	pH-Wert	Pw	Pdl	Kdl	Mgdl	Pox	PSC	DPS
			(mg kg ⁻¹)				(mmol kg ⁻¹)		(%)
0–30 cm	<i>p (Düng.)</i>	<i>0,599 ns</i>	<i>0,840 ns</i>	<i>0,782 ns</i>	<i>0,255 ns</i>	<i>0,937 ns</i>	<i>0,897 ns</i>	<i>0,753 ns</i>	<i>0,963 ns</i>
	KON	6,00	8,77	57,6	29,4	162	14,1	28,0	50,1
	SA	5,96	9,36	59,8	32,8	166	13,8	27,0	50,8
	RESA	5,96	9,72	60,0	31,8	159	14,2	27,9	50,6
	GA	5,98	9,74	61,2	31,7	163	13,7	27,2	50,3
	<i>p (ZF)</i>	<i>0,205 ns</i>	<i>0,002**</i>	<i>0,013*</i>	<i>0,012*</i>	<i>0,887 ns</i>	<i>0,030*</i>	<i>0,013*</i>	<i>0,080 ns</i>
	Kontrolle	5,98	7,97 a	55,0 a	32,0 b	162	12,6 a	26,4 a	47,5
	Roggen	5,94	10,06 b	59,8 b	29,0 a	162	13,8 b	27,2 b	51,0
	Phacelia	6,01	10,17 b	64,1 c	33,3 b	164	15,3 c	29,0 c	52,9
	MW	5,98	9,40	59,6	31,4	163	13,9	27,5	50,4
30–60 cm	<i>p (Düng.)</i>	<i>0,166 ns</i>	<i>0,887 ns</i>	<i>0,989 ns</i>	<i>0,172 ns</i>	<i>0,781 ns</i>	<i>0,248 ns</i>	<i>0,756 ns</i>	<i>0,175 ns</i>
	KON	5,71	4,50	23,8	33,9	135	8,00	27,0	30,0
	SA	5,46	4,84	22,1	39,2	150	6,05	25,6	23,2
	RESA	5,70	4,17	23,5	40,4	140	7,64	26,6	28,3
	GA	5,88	4,19	23,3	37,4	142	7,11	25,2	28,4
	<i>p (ZF)</i>	<i>0,979 ns</i>	<i>0,030*</i>	<i>0,016*</i>	<i>0,407 ns</i>	<i>0,574 ns</i>	<i>0,009**</i>	<i>0,003**</i>	<i>0,345 ns</i>
	Kontrolle	5,69	3,60 a	19,0 a	36,7	147	6,20 a	23,8 a	25,8
	Roggen	5,67	4,79 b	26,0 b	38,4	140	7,22 b	25,4 b	28,8
	Phacelia	5,71	4,89 b	24,5 b	38,1	139	8,18 c	29,0 c	27,9
	MW	5,69	4,43	23,2	37,7	142	7,20	26,1	27,5

ZF = Zwischenfrucht; Pw = wasserlösliches P, Pdl/Kdl/Mgdl = doppellaktatlösliches P/K/Mg, Pox = oxalatlösliches P, PSC = P-Sorptionskapazität, DPS = Grad der P-Sättigung; KON = Kontrolle, SA = Strohasche, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, GA = Getreideasche; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Zwischenfruchtvarianten einer Probenahmetiefe ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; ns = nicht sign.

Um die Entwicklung der leicht verfügbaren Pw- und Pdl-Gehalte im Oberboden über den gesamten Versuchszeitraum – einschließlich der Zwischenfruchtwirkung, aber unabhängig von der Düngung – beurteilen zu können, wurde die Veränderung der Gehalte in der Kontrollvariante (ohne P) dargestellt (Abb. 6 und Abb. 7). Von Frühjahr 2007 bis Herbst 2008 kam es in der Variante ohne Zwischenfrucht (aufgrund pflanzlicher P-Aufnahme) zu einer Abnahme der Pw- und Pdl-Gehalte (rote und blaue Symbole). Nach Phacelia- und Grünroggen-Anbau waren die Pw- und Pdl-Gehalte (Februar 2008) nicht nur im Vergleich zum Erntezeitpunkt 2007 leicht angestiegen, sondern auch höher als in der Variante ohne ZF. Nach der Ernte des Silomais (September 2008) waren die Pw- und Pdl-Gehalte (im Vergleich zu Februar 2008) zwar aufgrund der P-Aufnahme der Pflanzen auch in den Parzellen mit vorheriger Zwischenfrucht signifikant abgesunken, jedoch auf weniger geringe Gehalte als im Boden ohne Zwischenfrucht.

5 Ergebnisse

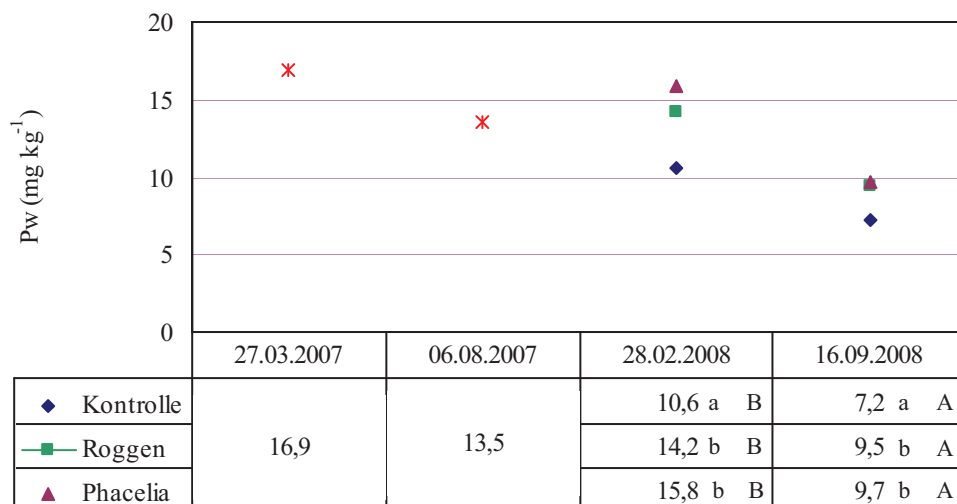


Abb. 6: Entwicklung der Pw-Gehalte im Oberboden ohne P-Düngung (Kontrolle) beeinflusst durch den Zwischenfruchtanbau, Feldversuch Rostock 2007–2008.

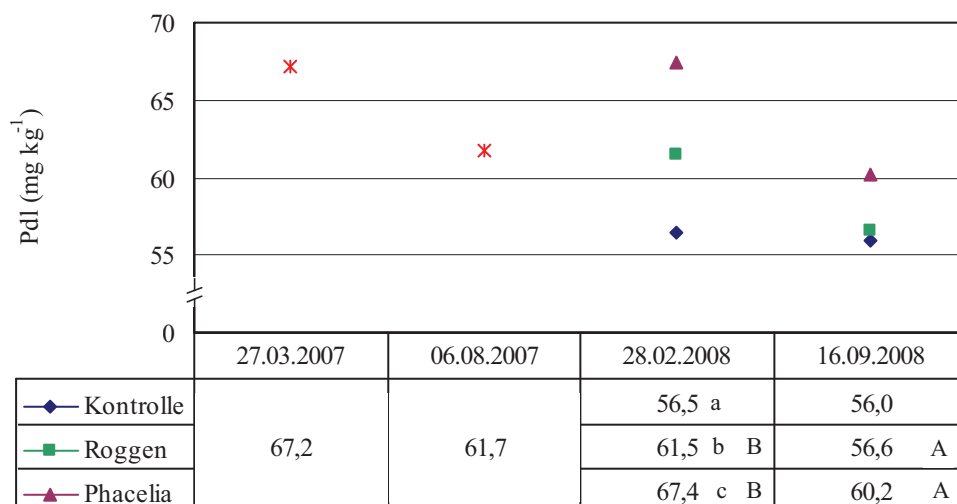


Abb. 7: Entwicklung der Pdl-Gehalte im Oberboden ohne P-Düngung (Kontrolle) beeinflusst durch den Zwischenfruchtanbau, Feldversuch Rostock 2007–2008.

In den Abbildungen 7 und 8 stellen rote Symbole die im Jahr 2007 in den Großparzellen ermittelten Gehalte dar, während die anderen Symbole für Probenahmen auf Kleinparzellenebene stehen. Unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Zwischenfruchtvarianten ($p \leq 0,05$; einfaktorielle ANOVA), unterschiedliche Großbuchstaben innerhalb einer Zeile kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen Probenahmeterminen ($p \leq 0,05$, einfaktorielle ANOVA).

5 Ergebnisse

Die Düngung mit Biomasseaschen zeigte am Standort **Trenthorst** (P-Gehaltsklasse C und pH-Klasse D) weder eine signifikante Wirkung auf die Erträge und Nährstoffaufnahmen der angebauten Kulturen (siehe Kapitel 5.2.1) noch auf die **Nährstoffgehalte im Boden**. Als einzige Folge der Ascheausbringung ließen sich tendenziell leicht erhöhte Pw-, Pdl- und Kdl-Gehalte im Oberboden zu den drei Bodenprobenahmeterminen feststellen (*Tab. 24* und *Tab. 25*). Aufgrund ungleichmäßiger Zwischenfruchtbestände (siehe *Kap. 5.2.1*) wurde auf eine Auswertung des Zwischenfruchteinflusses auf die Bodenwerte verzichtet.

Tab. 24: pH-Wert, Bodennährstoffgehalte und P-Sorptionsparameter zum Erntetermin 2007 in Abhängigkeit von der Düngung, Feldversuch Trenthorst.

Probe- nahmetiefe	Düng.	pH- Wert	Pw	Pdl	Kdl	Mgdl	Pox	PSC	DPS	Pt
			(mg kg ⁻¹)				(mmol kg ⁻¹)		(%)	(mg kg ⁻¹)
0–30 cm	<i>p</i>	0,876 <i>ns</i>	0,689 <i>ns</i>	0,051 <i>ns</i>	0,332 <i>ns</i>	0,890 <i>ns</i>	0,852 <i>ns</i>	0,801 <i>ns</i>	0,017*	0,636 <i>ns</i>
	KON	6,39	21,9	80,7	105	180	17,2	42,1	40,8 ab	719
	SA	6,40	20,9	81,0	109	184	16,9	42,3	40,1 a	740
	RESA	6,39	22,2	83,7	110	183	17,4	41,7	41,8 bc	718
	GA	6,44	22,7	84,6	115	182	17,3	40,8	42,4 c	734
	MW	6,41	21,9	82,5	109	182	17,2	41,7	41,3	728
30–60 cm	<i>p</i>	0,483 <i>ns</i>	0,886 <i>ns</i>	0,918 <i>ns</i>	0,951 <i>ns</i>	0,638 <i>ns</i>	-	-	-	-
	KON	6,59	7,04	24,8	61,7	155	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
	SA	6,48	6,72	26,0	63,9	161	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
	RESA	6,51	8,19	28,5	64,5	150	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
	GA	6,51	7,30	28,4	62,5	162	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
	MW	6,52	7,31	26,9	63,1	157	-	-	-	-

Pw = wasserlösliches P, Pdl/Kdl/Mgdl = doppellaktatlösliches P/K/Mg, Pox = oxalatlösliches P, PSC = P-Sorptionskapazität, DPS = Grad der P-Sättigung; KON = Kontrolle, SA = Strohasche, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, GA = Getreideasche; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngewarianten einer Probenahmetiefe ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; ns = nicht sign.; n.b. = nicht bestimmt

5 Ergebnisse

Tab. 25: pH-Wert, Bodennährstoffgehalte und P-Sorptionsparameter am 01.04.2008 und zum Erntetermin 2008 in Abhängigkeit der Düngung, Feldversuch Trenthorst.

Termin/ Probe- nahmetiefe	Düng.	pH- Wert	Pw	Pdl	Kdl	Mgdl	Pox	PSC	DPS
			(mg kg ⁻¹)			(mmol kg ⁻¹)		(%)	
01.04.08 0–30 cm	<i>p (Düng.)</i>	<i>0,859 ns</i>	<i>0,590 ns</i>	<i>0,038*</i>	<i>0,091 ns</i>	<i>0,733 ns</i>	<i>0,671 ns</i>	<i>0,696 ns</i>	<i>0,736 ns</i>
	KON	6,43	18,2	80,0 a	111	165	15,4	39,9	38,7
	SA	6,49	19,0	79,1 a	115	166	15,9	40,1	39,8
	RESA	6,46	19,1	80,3 a	116	163	15,4	38,5	40,0
	GA	6,49	20,3	84,6 b	119	159	15,9	40,3	39,4
	MW	6,47	19,2	81,0	115	163	15,6	39,7	39,5
01.04.08 30–60 cm	<i>p (Düng.)</i>	<i>0,950 ns</i>	<i>0,523 ns</i>	<i>0,683 ns</i>	<i>0,711 ns</i>	<i>0,317 ns</i>	<i>0,795 ns</i>	<i>0,917 ns</i>	<i>0,669 ns</i>
	KON	6,53	4,48	13,6	55,1	149	5,62	27,6	20,6
	SA	6,54	4,60	13,1	52,9	141	6,28	29,7	21,5
	RESA	6,51	5,88	16,1	58,8	133	6,52	28,5	22,9
	GA	6,55	4,97	13,5	55,7	141	6,42	30,3	21,1
	MW	6,53	4,98	14,1	55,6	141	6,21	29,0	21,5
Ernte, 0–30 cm	<i>p (Düng.)</i>	<i>0,909 ns</i>	<i>0,835 ns</i>	<i>0,236 ns</i>	<i>0,728 ns</i>	<i>0,996 ns</i>	<i>0,829 ns</i>	<i>0,809 ns</i>	<i>0,498 ns</i>
	KON	6,46	18,6	76,3	102	169	16,1	40,3	40,0
	SA	6,47	18,6	75,7	104	173	16,5	41,7	39,7
	RESA	6,48	20,0	77,6	104	171	16,6	40,5	41,0
	GA	6,49	19,6	80,1	108	171	16,4	40,8	40,2
	MW	6,47	19,2	77,4	105	171	16,4	40,8	40,2
Ernte, 30–60 cm	<i>p (Düng.)</i>	<i>0,960 ns</i>	<i>0,319 ns</i>	<i>0,551 ns</i>	<i>0,749 ns</i>	<i>0,408 ns</i>	<i>0,816 ns</i>	<i>0,975 ns</i>	<i>0,098 ns</i>
	KON	6,49	3,29	12,0	45,9	165	5,76	28,5	19,4
	SA	6,44	3,84	13,8	42,4	150	6,68	30,2	22,3
	RESA	6,46	5,54	17,3	50,2	142	6,86	28,0	24,7
	GA	6,47	4,15	13,1	44,3	148	5,71	29,1	19,5
	MW	6,46	4,20	14,0	45,7	151	6,25	28,9	21,4

Pw = wasserlösliches P, Pdl/Kdl/Mgdl = doppellaktatlösliches P/K/Mg, Pox = oxalatlösliches P, PSC = P-Sorptionskapazität, DPS = Grad der P-Sättigung; KON = Kontrolle, SA = Strohasche, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, GA = Getreideasche; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngewarianten einer Probenahmetiefe ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; ns = nicht sign.

5.2.3 Schwermetallgehalte im Boden

Zur Vermeidung von ökologischen Schäden dürfen nur solche Biomasseaschen auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht werden, die die Grenzwerte für Schwermetalle einhalten und einem zugelassenen Düngemitteltyp entsprechen (siehe DüMV). Neben der Ermittlung der Schwermetallgehalte in den Aschen (siehe *Kap. 4.1* und *Tab. A-1* im Anhang) wurden die **Schwermetallgehalte im Boden** der Feldversuche vor Versuchsbeginn und nach der Ernte des ersten Versuchsjahres bestimmt. Zwischen den beiden Probenahmetermenen gab es keine nennenswerten Unterschiede in den Bodengehalten von Pb, Cd, Cu, Ni und Zi, und die Werte lagen unter den Vorsorgewerten nach BBodSchV (*Tab. 26*).

Tab. 26: Schwermetallgehalte im Boden (0–30 cm) der Feldversuche im Vergleich vor und nach Aschezufuhr sowie im Vergleich zu Vorsorgewerten nach Anhang 2 der BBodSchV.

Versuchsstandort	Probenahmetermin	Pb	Cd	Cu	Ni	Zn
		(mg kg ⁻¹)				
Rostock	27.03.2007	19	0,1	9	4	20
	06.08.2007	19	0,1	9	4	18
Trenthorst	04.04.2007	16	0,3	6	9	51
	07.08.2007	17	0,3	7	10	52
Vorsorgewerte nach Anhang 2 der BBodSchV		40	0,4	20	15	60

Jeweils Durchschnittswerte von 12 Parzellen (3 Düngewarianten x 4 Wiederholungen)

5.3 Düngeneffekte von Biomasseaschen und Triplesuper-P in den Gefäßversuchen in Abhängigkeit von der Frucht- und Bodenart

In den Gefäßversuchen traten stärkere Düngeneffekte auf als in den Feldversuchen. Signifikante Effekte der Versuchsfaktoren (Düngung und Fruchtart) auf die Untersuchungskriterien waren sowohl 2007 auf mittel lehmigem Sand (siehe auch Schiemenz und Eichler-Löbermann 2010a), als auch 2008 auf mittel sandigem Lehm zu verzeichnen. Im Folgenden werden für die verwendeten Böden nur die Bezeichnungen der Hauptbodenarten („Sand“, „Lehm“) oder die bodenkundlichen Abkürzungen (Sl3 bzw. Ls3) entsprechend Bodenkundlicher Kartieranleitung KA5 genutzt. Außerdem werden die Fruchtarten, die zum frühen Termin (April) gesät wurden, als Hauptfrüchte bezeichnet (Mais, Blaue Lupine, So-Gerste, So-Raps) und die Fruchtarten, die zu späterem Zeitpunkt (August) gesät werden konnten/wurden, als Zwischenfrüchte (Ölrettich, Phacelia, Weidelgras, Buchweizen) benannt.

5.3.1 Biomasseertrag, Nährstoffaufnahme und Wurzelmorphologie verschiedener Fruchtarten

Zur Prüfung der Aschedüngewirkung auf das Pflanzenwachstum verschiedener Fruchtarten auf unterschiedlichen Böden, wurde der **Sprossertrag** ermittelt, die **Nährstoffgehalte und -aufnahmen vom Spross** sowie die **Wurzel-TM** und **Wurzellängen** bestimmt.

Durchschnittlich wurden in den Gefäßversuchen nach Düngung mit TSP, RESA oder GA im Vergleich zur Kontrolle die Erträge und P-Aufnahmen der Fruchtarten erhöht (*Abb. 8*). Die Erträge und P-Aufnahmen in der KCl-Variante waren vergleichbar mit der Kontrollvariante. Die SA-Düngung führte wie die KCl-Variante zu vermehrter K-Aufnahme.

Es traten Unterschiede im Nährstoffaufnahmevermögen der Fruchtarten auf. Dabei wurden im Versuch mit Zwischenfrüchten durchschnittlich höhere P-, K- und Mg-Aufnahmen als im Versuch mit Hauptfrüchten ermittelt. Bezüglich der K- und Mg-Aufnahmen wurde der K-Mg-Antagonismus deutlich, da die Pflanzen der Varianten mit hoher K-Aufnahme (SA und KCl) eher geringe Mengen an Mg aufgenommen hatten, während die Pflanzen der TSP-Variante mit relativ hoher Mg-Aufnahmerate vergleichsweise wenig K aufgenommen hatten (*Abb. 8*).

Wie sich anhand der Ertragssteigerungen infolge P-Düngung erkennen ließ (*Abb. 8*), war der Düngeeinfluss in den Versuchen mit Hauptfrüchten augenscheinlich größer als in den Zwischenfrucht-Versuchen – vor allem auf dem Lehmboden. Alle vier Hauptfrüchte reagierten mit Ertragseffekten auf die Düngung. Dabei führten Mais (auf Sand) und So-Gerste (auf Lehm) mit 47 bzw. 42 g je Gefäß zu den größten Erträgen. Buchweizen und Phacelia hatten mit 33 bis 34 g je Gefäß zwar die höchsten Erträge in den Zwischenfrucht-Versuchen, ihr Biomassewachstum wurde jedoch nicht von der P-Düngung beeinflusst. Die Erträge der anderen Fruchtarten waren vor allem auf Lehm in den Varianten RESA und GA genauso wie nach TSP-Zufuhr höher als in der Kontrolle (*Tab. 27*). Auf dem Lehmboden wurden besonders bei der Blauen Lupine wesentlich höhere Erträge als auf dem Sandboden ermittelt, wobei Sorteneinflüsse zu berücksichtigen sind (*Tab. 27* und *Tab. A-8* im Anhang).

5 Ergebnisse

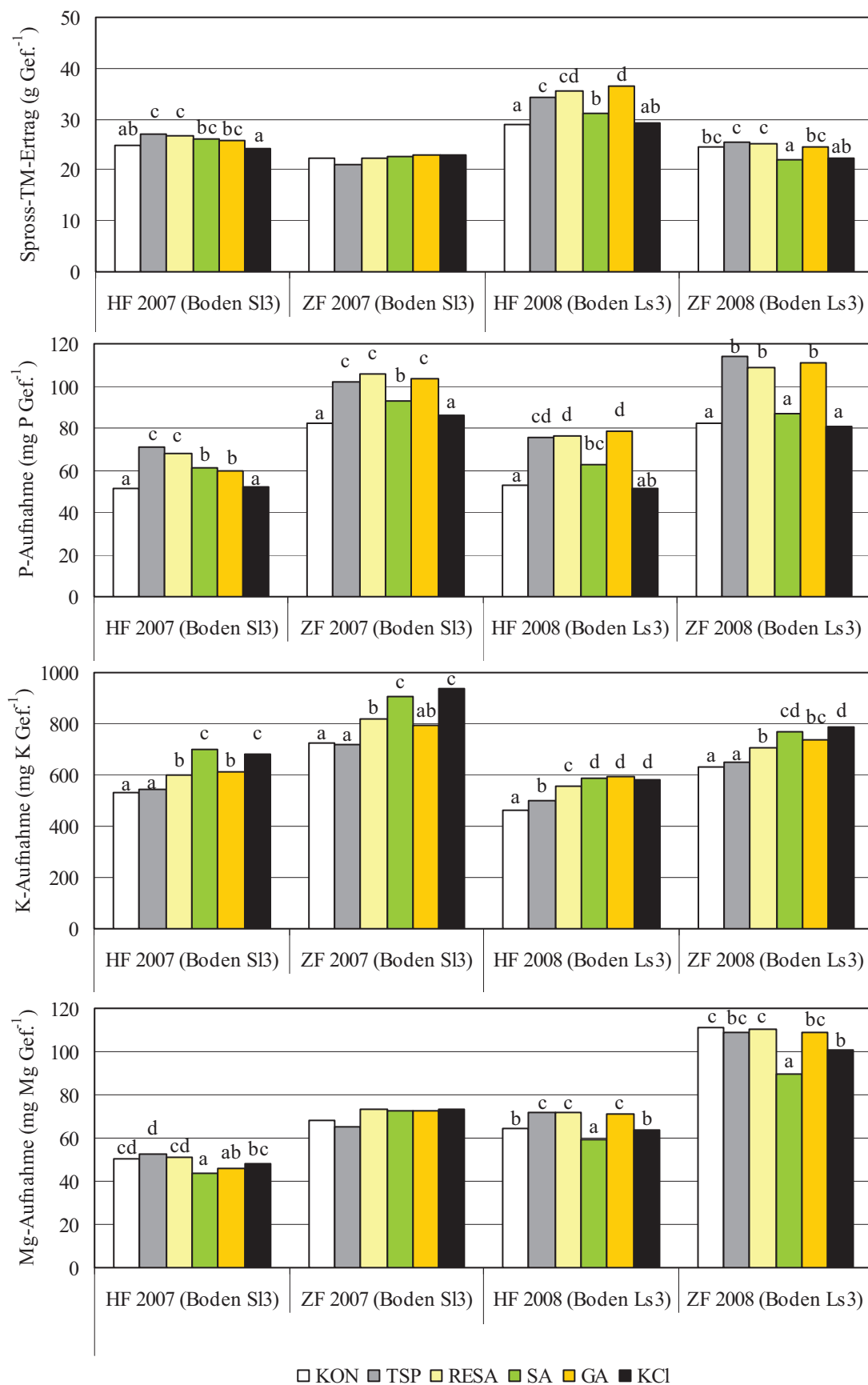


Abb. 8: Spross-TM-Ertrag, P-, K- und Mg-Aufnahmen im Spross in Abhängigkeit von der Düngung und der Bodenart, Gefäßversuche 2007 und 2008.

HF = Hauptfrüchte, ZF = Zwischenfrüchte, SI3 = mittel lehmiger Sand, Ls3 = mittel sandiger Lehm; KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen Düngesvarianten (im Mittel der Fruchtarten eines Versuchs); ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA)

5 Ergebnisse

Tab. 27: Sprossertrag in Abhängigkeit von der Düngung, Fruchtart und Bodenart, Gefäßversuche 2007 und 2008.

Düng.	Mais	Bl. Lupine	So-Gerste	So-Raps	Ölrettich	Phacelia	Weidelgras	Buchweizen
Spross-TM-Ertrag (g Gefäß ⁻¹) der Fruchtarten auf Sand (Sl3), 2007								
<i>p</i>	0,040*	0,027*	0,225 ns	0,066 ns	0,146 ns	0,271 ns	0,005**	0,440 ns
KON	46,2 ab	11,6 abc	26,4	15,3	16,8	25,9	10,8 ab	35,9
TSP	49,5 b	13,2 bc	28,1	16,7	16,2	25,5	12,4 bc	30,6
RESA	48,7 b	13,4 c	27,8	17,3	16,1	29,2	13,6 c	30,1
SA	48,4 b	12,0 abc	27,7	16,7	13,3	32,6	12,3 bc	32,2
GA	49,1 b	11,1 ab	27,9	15,2	17,6	28,1	11,6 ab	34,7
KCl	42,2 a	10,2 a	28,7	15,4	16,5	27,9	10,0 a	36,7
MW	47,4 D	11,9 A	27,8 C	16,1 B	16,1 B	28,2 C	11,8 A	33,4 D
Spross-TM-Ertrag (g Gefäß ⁻¹) der Fruchtarten auf Lehm (Ls3), 2008								
<i>p</i>	<0,001***	0,007**	0,001***	0,018*	0,011*	0,117 ns	0,011*	0,111 ns
KON	30,1 a	26,9 ab	39,5 a	18,6 a	18,7 a	34,4	15,1 bc	29,9
TSP	42,2 c	29,2 ab	44,0 b	21,9 b	21,6 c	35,6	16,1 c	29,2
RESA	42,7 c	31,1 bc	45,8 b	23,0 b	21,3 c	34,3	15,4 bc	30,0
SA	35,8 b	25,4 a	40,2 a	22,9 b	20,6 bc	33,1	14,5 ab	20,3
GA	44,7 c	34,9 c	43,9 b	22,5 b	20,1 abc	34,5	15,9 c	27,5
KCl	30,4 a	26,0 ab	40,6 a	20,6 ab	19,3 ab	34,5	13,8 a	22,1
MW	37,7 C	28,9 B	42,3 D	21,6 A	20,3 B	34,4 D	15,1 A	26,5 C

TM = Trockenmasse; KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngewarianten eines Versuches ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); unterschiedliche Großbuchstaben innerhalb einer Zeile und eines Versuches kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Fruchtarten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

Die Düngung wirkte sich generell stärker auf die P-Aufnahme im Spross als auf den Sprossertrag aus. Die P-Aufnahme stieg, wenn P mittels Asche (v.a. RESA und GA) oder TSP zugeführt wurde (Abb. 9).

Auf Sand zeigte Mais die signifikant höchsten P-Aufnahmen aller Hauptfrüchte mit durchschnittlich 91,3 mg je Gefäß und eine infolge der P-Zufuhr gesteigerte P-Aufnahme um 34 % (GA) bzw. 44 % (TSP) (Tab. 28). Diese Ergebnisse stehen im Zusammenhang mit der Erhöhung der Sprosserträge von Mais nach P-Zufuhr (Tab. 27). Die Blaue Lupine hatte aufgrund geringer Erträge die mit Abstand geringste P-Aufnahme im Versuch mit Hauptfrüchten auf Sand. Auf Lehm wies Gerste mit den höchsten Erträgen auch die höchsten P-Aufnahmen der Hauptfrüchte auf (nach RESA: 94,6 mg P je Gefäß). Phacelia und Buchweizen zeigten auf beiden Böden der Zwischenfruchtversuche die höchsten P-Aufnahmen (124 bzw. 137 mg P je Gefäß) (Tab. 28) im Vergleich der vier Arten.

Es wurde eine **fruchtartenspezifische P-Düngewirkung** der Aschen festgestellt (Tab. 28), die zudem von der **Bodenart** abhängig war. Auf Sandboden führten vor allem TSP und RESA bei fast allen Arten zu erhöhten P-Aufnahmen gegenüber der Kontrolle. Auf dem

5 Ergebnisse

Lehmboden konnten Mais und Lupine jeweils nach GA-Zufuhr die signifikant höchsten P-Mengen aufnehmen, und die übrigen Arten reagierten auf TSP, RESA und GA gleichermaßen mit höheren P-Aufnahmen im Vergleich zur Kontrolle. Aufgrund der geringeren Pt-Zufuhr war die P-Aufnahme der Fruchtarten in der SA-Variante in der Regel geringer als in den anderen Asche-Varianten.

Zwischen den Versuchsfaktoren Düngung und Fruchtart gab es jedoch Wechselwirkungen (Tab. A-11 im Anhang). Phacelia nahm in der SA-Variante 28 % (auf Lehm) und 36 % (auf Sand) mehr P auf als in der jeweiligen Kontrolle. Der Effekt der SA auf die P-Aufnahme von Phacelia war sogar vergleichbar mit dem von RESA, obwohl mit SA eine geringere P-Zufuhr erfolgte. Im Gegensatz dazu wurden bei Ölrettich (auf Sand) bzw. Buchweizen (auf Lehm) geringere Werte in der SA-Variante ermittelt als in der jeweiligen Kontrolle. Auch in der GA-Variante gab es große Unterschiede zwischen den P-Aufnahmen der Fruchtarten. Mais reagierte auf die Düngung mit GA mit erhöhter P-Aufnahme um 34 % (auf Sand) bzw. 74 % (auf Lehm), während So-Gerste in dieser Variante auf Sand nicht mehr P aufnahm als in der Kontrolle (Tab. 28 und Abb. 9).

Tab. 28: P-Aufnahme im Spross in Abhängigkeit von der Düngung, Fruchtart und Bodenart, Gefäßversuche 2007 und 2008.

Düng.	Mais	Bl. Lupine	So-Gerste	So-Raps	Ölrettich	Phacelia	Weidelgras	Buchweizen
P-Aufnahme (mg Gefäß⁻¹) der Fruchtarten auf Sand (S13), 2007								
<i>p</i>	<0,001***	0,073 ns	<0,001***	<0,001***	0,006**	0,038*	<0,001***	0,567 ns
KON	75,6 a	25,3	59,1 a	43,8 a	64,2 abc	99,8 a	61,1 b	103,8
TSP	109,2 d	32,5	79,3 d	62,4 d	77,5 c	127,2 b	86,1 e	116,3
RESA	99,9 bc	35,8	75,1 cd	60,9 cd	75,0 bc	136,1 b	89,5 e	121,6
SA	91,4 b	27,2	70,1 bc	55,2 bc	54,6 a	135,9 b	70,2 c	111,0
GA	101,0 cd	25,9	61,7 a	49,3 ab	77,0 c	129,5 b	78,6 d	127,7
KCl	70,8 a	27,5	66,1 ab	43,5 a	62,6 ab	116,4 ab	51,8 a	113,1
MW	91,3 D	29,0 A	68,5 C	52,5 B	68,5 A	124,1 C	72,9 A	115,6 B
P-Aufnahme (mg Gefäß⁻¹) der Fruchtarten auf Lehm (Ls3), 2008								
<i>p</i>	<0,001***	<0,000***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***
KON	44,3 a	53,6 ab	67,1 a	47,2 a	57,2 a	110,9 a	51,5 ab	110,5 bc
TSP	69,2 c	61,6 bc	92,7 b	78,4 b	94,1 c	144,4 c	80,4 c	137,1 d
RESA	71,7 cd	64,9 c	94,6 b	73,2 b	89,3 c	150,3 c	73,5 c	120,8 cd
SA	56,7 b	56,3 bc	70,6 a	67,9 b	71,4 b	142,0 c	55,9 b	78,2 a
GA	77,0 d	74,0 d	88,6 b	73,0 b	86,7 c	150,0 c	80,1 c	127,5 cd
KCl	45,4 a	46,4 a	62,7 a	51,9 a	64,6 ab	123,5 b	47,8 a	86,6 ab
MW	60,7 A	59,5 A	79,4 C	65,2 B	77,2 B	136,8 D	64,9 A	110,1 C

TM = Trockenmasse; KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngevarianten eines Versuches ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); unterschiedliche Großbuchstaben innerhalb einer Zeile und eines Versuches kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Fruchtarten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

5 Ergebnisse

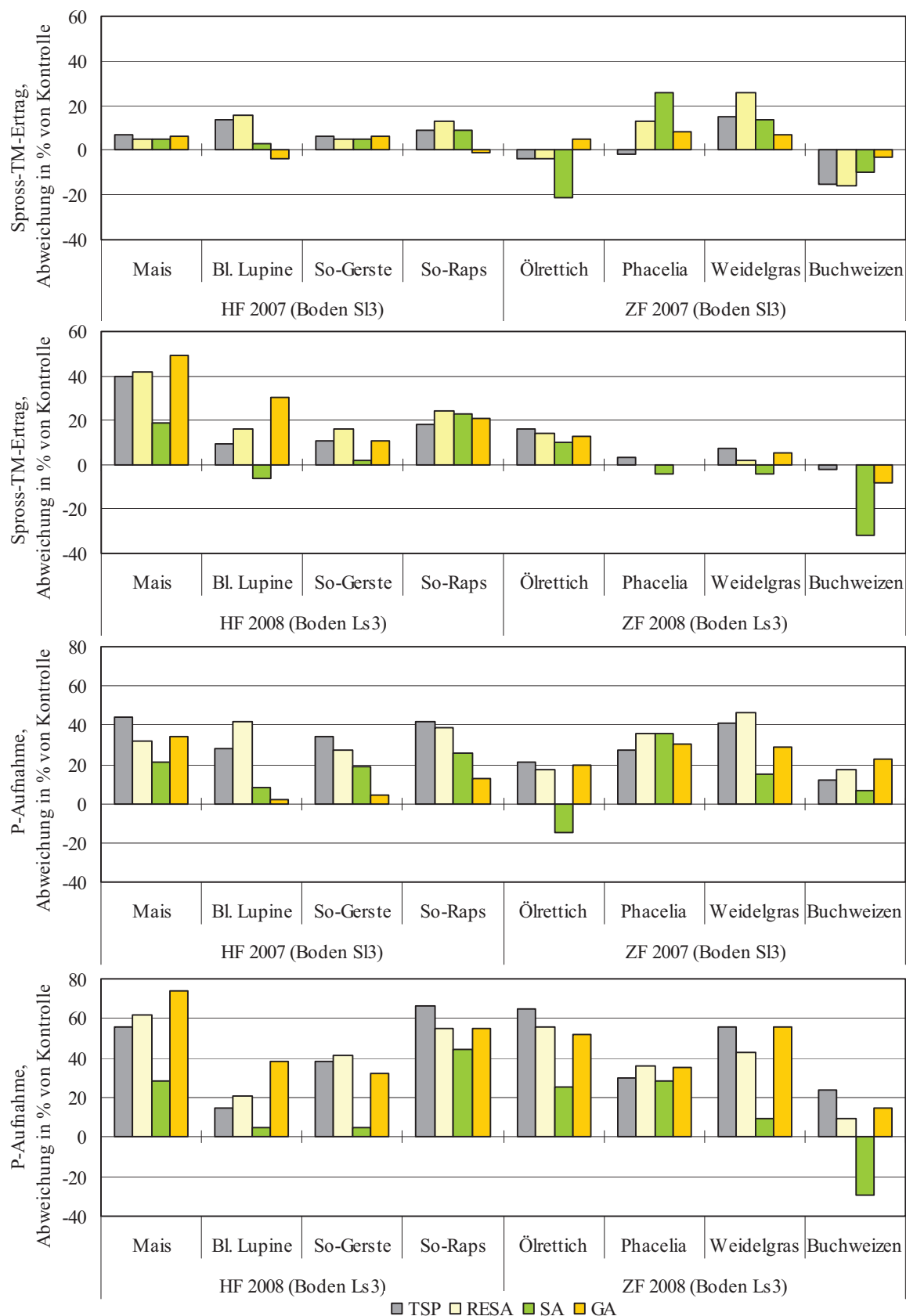


Abb. 9: Abweichung des Spross-TM-Ertrages und der P-Aufnahme im Spross der P-Düngevarianten von der Kontrolle in Abhängigkeit von der Fruchtart und Bodenart, Gefäßversuche 2007 und 2008.

HF = Hauptfrüchte, ZF = Zwischenfrüchte, SL3 = mittel lehmiger Sand, Ls3 = mittel sandiger Lehm, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche

5 Ergebnisse

Fruchtartenunterschiede wurden nicht nur im Hinblick auf die P-Aufnahme, sondern auch bei anderen Nährstoffaufnahmen deutlich. In den Gefäßversuchen gab es positive Korrelationen zwischen den P- und K-Aufnahmen der Pflanzen (Versuch I: $r = 0,852^{**}$, Versuch II: $r = 0,776^{**}$, Versuch III: $r = 0,323^{**}$, Versuch IV: $r = 0,660^{**}$). Im Vergleich der untersuchten Fruchtarten wies Phacelia neben sehr hohen P-Aufnahmen auch die höchsten K- und Ca-Aufnahmen auf (Tab. A-12, Tab. A-13 im Anhang und Abb. 10). Dies korrespondiert mit den Beobachtungen im Zwischenfruchtanbau 2007 im Feldversuch Rostock. Dort hatte Phacelia auch wesentlich mehr K und Ca aufgenommen als die Vergleichskultur Grünroggen (Kap. 5.2.1, Tab. 18).

Der Einfluss der Bodenart auf die K-Aufnahme im Spross der Pflanzen wird in der Kontrollvariante deutlich (Abb. 10). Die K-Aufnahme war bei der Mehrzahl der Fruchtarten auf Sand höher als auf Lehm. Dabei waren bei Mais, So-Raps, Ölrettich und Buchweizen die Unterschiede in den K-Aufnahmen in Abhängigkeit des Bodens besonders groß. Generell überstieg die K-Aufnahme die Kdl-Differenz, die zwischen Versuchsende und Versuchsbeginn ermittelt wurde. Dies deutet auf pflanzeninduzierte K-Mobilisierungsprozesse sowie Nachlieferungsprozesse im Boden hin.

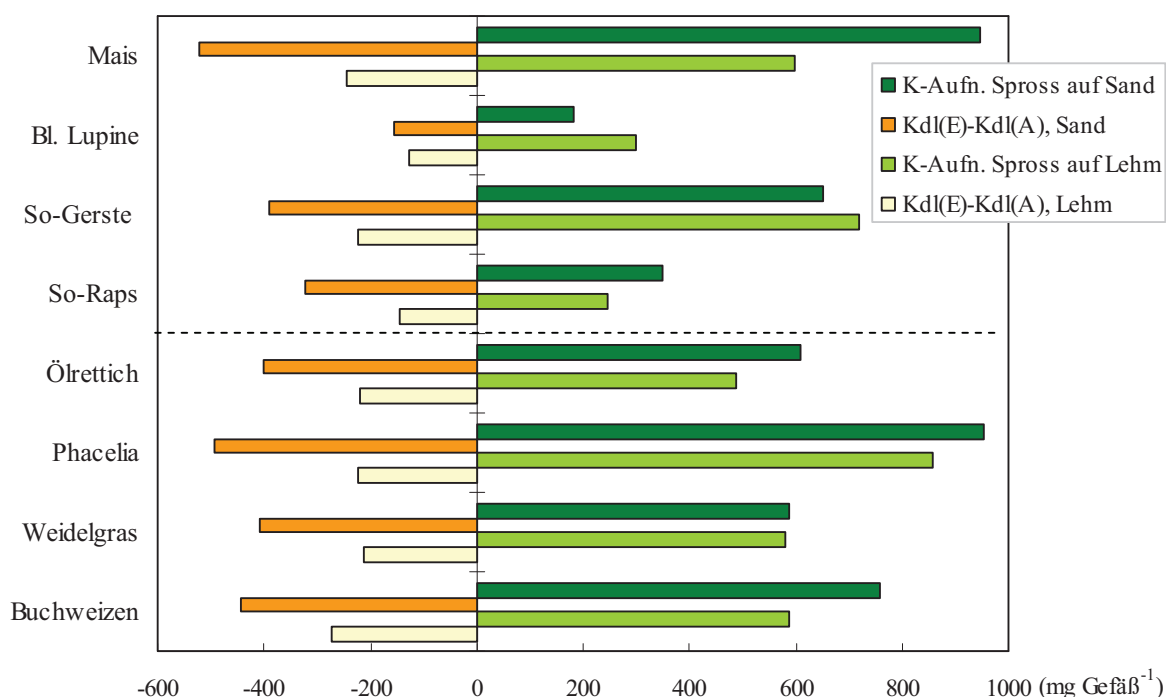


Abb. 10: Gegenüberstellung von K-Aufnahme in den Spross und Δ Kdl im Boden nach mehrwöchigen Gefäßversuchen mit verschiedenen Fruchtarten auf Sand bzw. Lehm (Kontrollvariante ohne P-Zufuhr). Kdl = doppellaktatlösliches K

Da die Nährstoffzufuhr die Ausbildung morphologischer Wurzelmerkmale beeinflussen kann, wurden in den Gefäßversuchen die **Wurzel-TM**, die **Wurzellänge** und das **Wurzel-Spross-Verhältnis** untersucht (*Tab. 29* und *Tab. 30*). Auch hier traten Unterschiede zwischen den Fruchtarten auf. Mais wies mit 14 g je Gefäß auf dem Lehm Boden die größten Wurzelmassen auf. Die monokotylen Arten Mais und Weidelgras hatten – ebenfalls auf Lehm Boden – die größten Gesamtwurzellängen mit durchschnittlich 481 m bzw. 667 m je Gefäß. Die Wurzeln der Lupine waren sowohl auf Sand- als auch auf Lehm Boden mit 40 m bzw. 118 m am kürzesten. Signifikant positive Korrelationen waren häufiger zwischen P-Aufnahme und Wurzellänge zu verzeichnen als zwischen P-Aufnahme und Wurzelgewicht (siehe *Tab. A-14* im Anhang).

Ein vergrößertes Wurzel-Spross-Verhältnis wurde bei So-Gerste und Buchweizen in den Varianten ohne P (KON und KCl) und in der SA-Variante (mit geringer P-Zufuhr) im Vergleich zu anderen P-Varianten (TSP, RESA und GA) auf Lehm Boden ermittelt (*Tab. 30*). Bei So-Gerste war der Sprossertrag mit dem Wurzel-Sprossverhältnis negativ korreliert (*Tab. A-15* im Anhang), da der Sprossertrag in den P-Mangelvarianten geringer war als in den Varianten, die gut mit P versorgt waren, während sich die Düngung nicht auf die Wurzellänge dieser Art ausgewirkt hatte. Im Gegensatz dazu reagierte z.B. die Blaue Lupine auf dem Sandboden auf fehlende P-Zufuhr bzw. P-Mangel mit reduziertem Wurzelwachstum (deutlicher Verringerung der Wurzel-TM und Wurzellänge) vor allem in der KCl-Variante (*Tab. 29*). Wurzellänge und Sprossertrag waren positiv korreliert (*Tab. A-15* im Anhang), d.h. dass die Lupine bei P-Mangel sowohl ihr Spross- als auch Wurzelwachstum reduzierte.

Mit Ausnahme von So-Raps war das Wurzelwachstum der Fruchtarten auf Sand geringer als auf Lehm (*Tab. 29* und *Tab. 30*). Dabei war auffällig, dass Mais auf dem Lehm Boden eine doppelt so hohe Wurzellänge bei nur ca. 23 % größerer Wurzel-TM ausgebildet hatte als auf Sand. Bei Lupine hingegen wurden auf Lehm sowohl für die Wurzel-TM als auch für die Wurzellänge dreifach so hohe Werte ermittelt wie auf Sand.

5 Ergebnisse

Tab. 29: Wurzelmorphologische Kriterien in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche auf Sand (SI3), 2007.

Düng.	Mais	Bl. Lupine	So-Gerste	So-Raps	Ölrettich	Phacelia	Weidelgras	Buchweizen
Wurzel-TM-Ertrag (g Gefäß ⁻¹)								
<i>p</i>	0,028*	0,011*	0,068 ns	0,687 ns	-	0,011*	0,051 ns	0,982 ns
KON	11,0 a	2,9 ab	4,6	3,9	n.b.	1,9 a	2,8	3,0
TSP	11,6 ab	5,0 bc	4,1	4,3	n.b.	1,6 a	3,0	2,9
RESA	11,1 a	4,6 bc	6,0	4,5	n.b.	1,7 a	3,4	2,9
SA	10,5 a	2,7 ab	5,9	3,6	n.b.	2,3 a	2,6	2,3
GA	12,9 b	5,7 c	5,2	3,5	n.b.	1,9 a	2,3	2,7
KCl	11,2 a	1,6 a	4,3	3,8	n.b.	3,4 b	2,1	2,5
MW	11,4 C	3,7 A	5,0 B	3,9 A	-	2,1 A	2,7 B	2,7B
Wurzellänge (m Gefäß ⁻¹)								
<i>p</i>	0,162 ns	0,001***	0,692 ns	0,002**	-	0,001***	0,066 ns	0,247 ns
KON	181	42 bc	145	158 a	n.b.	162 a	300	126
TSP	259	53 c	157	185 a	n.b.	157 a	286	108
RESA	214	54 c	181	232 b	n.b.	159 a	285	121
SA	187	29 ab	170	182 a	n.b.	236 b	273	100
GA	222	47 c	159	150 a	n.b.	165 a	244	141
KCl	201	19 a	164	166 a	n.b.	287 b	206	136
MW	211 C	40 A	162 B	179 B	-	194 B	266 C	122 A
Wurzel-Spross-Verhältnis (m g ⁻¹)								
<i>p</i>	0,321 ns	0,006**	0,710 ns	0,117 ns	-	0,040*	0,204 ns	0,471 ns
KON	3,7	3,4 bc	5,5	10,1	n.b.	6,3 a	29,0	3,5
TSP	5,2	3,8 c	5,6	10,9	n.b.	6,2 a	23,1	3,7
RESA	4,3	3,9 c	6,4	13,1	n.b.	5,6 a	21,2	3,9
SA	3,8	2,4 ab	6,2	10,8	n.b.	7,7 ab	22,2	3,1
GA	4,5	4,0 c	5,7	9,6	n.b.	6,0 a	20,8	4,1
KCl	4,7	1,7 a	5,7	10,6	n.b.	10,3 b	20,7	3,7
MW	4,4 B	3,2 A	5,8 C	10,8 D	-	7,0 B	22,8 C	3,7 A

TM = Trockenmasse; KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngevarianten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); unterschiedliche Großbuchstaben innerhalb einer Zeile und eines Versuches kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Fruchtarten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign., n.b. = nicht bestimmt

5 Ergebnisse

Tab. 30: Wurzelmorphologische Kriterien in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche auf Lehm (Ls3), 2008.

Düng.	Mais	Bl. Lupine	So-Gerste	So-Raps	Ölrettich	Phacelia	Weidelgras	Buchweizen
Wurzel-TM-Ertrag (g Gefäß⁻¹)								
<i>p</i>	0,025*	0,011*	0,491 ns	0,081 ns	0,558 ns	0,118 ns	0,048*	0,722 ns
KON	11,0 a	7,7 a	9,2	4,3	7,2	9,0	9,6 ab	9,5
TSP	13,2 abc	9,8 ab	8,7	5,2	6,7	9,0	10,1 ab	7,8
RESA	17,1 c	12,0 bc	10,0	6,9	7,4	5,6	11,3 b	10,5
SA	16,6 bc	10,7 bc	9,8	6,6	7,1	6,6	7,0 a	7,8
GA	13,2 abc	13,1 c	10,7	7,3	6,0	8,1	9,3 ab	10,2
KCl	12,6 ab	11,8 bc	10,5	5,8	8,3	8,5	6,8 a	9,9
MW	14,0 C	10,9 B	9,8 B	6,0 A	7,1 A	7,8 AB	9,0 BC	9,3 C
Wurzellänge (m Gefäß⁻¹)								
<i>p</i>	0,015*	0,425 ns	0,249 ns	0,069 ns	0,998 ns	0,196 ns	0,027*	0,285 ns
KON	454 ab	105	381	144	162	445	715 bc	200
TSP	563 bc	116	346	165	157	466	767 c	167
RESA	581 c	118	349	195	160	401	740 bc	139
SA	425 a	113	374	223	158	476	595 ab	129
GA	459 ab	128	357	237	153	434	635 abc	162
KCl	404 a	127	440	221	165	507	550 a	162
MW	481 D	118 A	374 C	198 B	159 A	455 B	667 C	160 A
Wurzel-Spross-Verhältnis (m g⁻¹)								
<i>p</i>	0,027*	0,099 ns	0,014*	0,071 ns	0,860 ns	0,107 ns	0,108 ns	0,018*
KON	15,1 c	4,0	9,6 ab	7,6	8,6	12,9	47,0	6,7 b
TSP	13,4 bc	4,0	7,9 a	7,4	7,3	13,1	47,6	5,8 ab
RESA	13,6 bc	3,8	7,6 a	8,4	7,5	11,7	48,1	4,7 a
SA	11,8 ab	4,4	9,3 ab	9,9	7,7	14,4	41,0	6,2 b
GA	10,3 a	3,7	8,1 a	10,5	7,7	12,6	39,9	5,8 ab
KCl	13,3 bc	5,0	10,8 b	10,7	8,7	14,7	39,9	7,3 b
MW	12,9 C	4,1 A	8,9 B	9,1 B	7,9 B	13,2 C	43,9 D	6,1 A

TM = Trockenmasse; KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngevarianten einer Fruchtart ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); unterschiedliche Großbuchstaben innerhalb einer Zeile und eines Versuches kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Fruchtarten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; ns = nicht sign.

5.3.2 Nährstoffverfügbarkeit im Boden der Gefäßversuche

Die Gefäßversuche dienten u.a. auch dazu, den Einfluss der Biomasseaschen auf die **Nährstoffverfügbarkeit** im Boden zu prüfen. Sowohl der pH-Wert als auch die Nährstoffgehalte Pw, Pdl, Kdl, Mgdl, Pox und Pt wurden im Boden der Gefäßversuche von den Versuchsfaktoren Düngung und Fruchtart beeinflusst; wobei zum Teil Wechselwirkungen zwi-

5 Ergebnisse

schen den Versuchsfaktoren ermittelt wurden (*Tab. A-16* und *Tab. A-17* im Anhang). Zwischen den Pw-, Pdl- und Harz-P-Gehalten wurden erwartungsgemäß signifikant positive Korrelationen gefunden (*Tab. A-19* im Anhang).

Die SA bewirkte (aufgrund relativ hoher Ascheausbringungsmenge) im Vergleich zu den anderen Düngevarianten eine Erhöhung des **pH-Wertes** im Boden (*Tab. 31*). Auch die Fruchtarten beeinflussten den pH-Wert. Nach dem Phacelia-Anbau waren die pH-Werte nicht nur geringer als zu Versuchsbeginn, sondern auch signifikant niedriger als nach Anbau der anderen Zwischenfruchtarten. Der Anbau von Buchweizen und Ölrettich hatte ebenfalls einen leichten pH-Rückgang im Vergleich zu den Ausgangswerten zur Folge. Im Versuch mit Hauptfrüchten führte die Blaue Lupine auf beiden Böden zu verringerten pH-Werten um bis zu 0,3 pH-Einheiten gegenüber den Werten zu Versuchsbeginn.

Tab. 31: pH-Werte im Boden zu Versuchsende in Abhängigkeit von der Düngung, Fruchtart und Bodenart, Gefäßversuche 2007 und 2008.

Düng.	Mais	Bl. Lupine	So-Gerste	So-Raps	Ölrettich	Phacelia	Weidelgras	Buchweizen
pH-Wert (vor der Düngung: 5,69), Sand (Sl3), 2007								
<i>p</i>	0,005**	0,036*	0,408 ns	0,336 ns	<0,001***	0,240 ns	0,002**	0,006**
KON	5,49 ab	5,54 ab	5,67	5,71	5,36 b	5,04	5,57 a	5,27 a
TSP	5,43 a	5,51 a	5,69	5,65	5,36 b	5,04	5,59 a	5,19 a
RESA	5,54 ab	5,53 a	5,69	5,67	5,47 bc	5,10	5,71 bc	5,37 a
SA	5,70 c	5,67 b	5,77	5,72	5,63 c	5,06	5,80 c	5,61 b
GA	5,58 bc	5,68 b	5,69	5,77	5,43 b	4,94	5,65 ab	5,33 a
KCl	5,44 ab	5,51 a	5,73	5,65	5,15 a	4,94	5,57 a	5,20 a
MW	5,53 A	5,57 A	5,71 B	5,70 B	5,40 C	5,02 A	5,65 D	5,33 B
pH-Wert (vor der Düngung: 6,17), Lehm (Ls3), 2008								
<i>p</i>	<0,001***	<0,001***	0,006**	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	0,002**
KON	6,05 b	5,84 a	6,08 a	6,02 ab	5,79 a	5,51 a	6,09 a	5,81 a
TSP	5,98 a	5,79 a	6,06 a	5,98 a	5,83 ab	5,60 ab	6,15 ab	5,75 a
RESA	6,12 c	5,84 a	6,15 ab	6,07 b	5,95 b	5,70 b	6,27 cd	5,77 a
SA	6,20 d	6,02 b	6,26 c	6,18 c	6,15 c	5,83 c	6,41 e	6,03 b
GA	6,09 bc	5,84 a	6,21 bc	6,03 ab	5,93 b	5,63 b	6,23 bc	5,89 ab
KCl	6,09 bc	5,82 a	6,14 ab	6,06 b	5,95 b	5,51 a	6,32 d	6,00 b
MW	6,09 C	5,86 A	6,15 D	6,06 B	5,93 C	5,63 A	6,24 D	5,88 B

KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngevarianten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); unterschiedliche Großbuchstaben innerhalb einer Zeile und eines Versuches kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Fruchtarten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

5 Ergebnisse

Eine P-Zufuhr (TSP oder Asche) führte durchschnittlich zur Erhöhung der **Pw-Gehalte** im Boden im Vergleich zur Kontrolle. In den beiden Versuchen mit Hauptfrüchten wurde in der Kontrollvariante jeweils ein enger negativer Zusammenhang zwischen der P-Aufnahme der Pflanzen und den Pw-Gehalten im Boden zu Versuchsende festgestellt (Versuch I: $r = -0,822^{**}$, Versuch III: $r = -0,748^{**}$). Beispielsweise wurden infolge der niedrigen P-Aufnahme der Lupine (v. a. auf Sand) höhere Pw-Gehalte im Boden ermittelt als bei anderen Fruchtarten. Im Gegensatz dazu führten bei den Versuchen mit Zwischenfrüchten die vergleichsweise hohen P-Aufnahmen von Phacelia und Buchweizen nicht unbedingt zu entsprechend geringeren Pw-Gehalten im Boden (Tab. 32).

Tab. 32: Pw-Gehalte im Boden zu Versuchsende in Abhängigkeit von der Düngung, Fruchtart und Bodenart, Gefäßversuche 2007 und 2008.

Düng.	Mais	Bl. Lupine	So-Gerste	So-Raps	Ölrettich	Phacelia	Weidelgras	Buchweizen
Pw-Gehalt (mg kg⁻¹), (vor der Düngung: 10,6), Sand (SI3), 2007								
<i>p</i>	<0,001***	0,018*	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	0,025*	<0,001***
KON	7,5 a	10,4 ab	7,8 a	8,0 a	8,7 a	8,1 a	9,6 a	8,0 a
TSP	10,7 bc	15,3 c	11,5 c	11,9 b	12,8 b	11,3 b	12,3 b	15,5 b
RESA	10,8 bc	12,7 abc	10,0 b	12,5 b	12,5 b	11,0 b	10,9 ab	15,7 b
SA	9,5 b	13,5 bc	10,1 b	11,5 b	15,5 c	10,9 b	10,6 ab	14,4 b
GA	11,9 c	11,7 abc	7,5 a	11,1 b	12,7 b	12,3 b	12,2 b	13,9 b
KCl	7,5 a	9,2 a	7,9 a	8,1 a	8,4 a	7,7 a	9,3 a	7,6 a
MW	9,6 A	12,1 C	9,1 A	10,5 B	11,8 B	10,2 A	10,8 A	12,5 B
Pw-Gehalt (mg kg⁻¹), (vor der Düngung: 7,6), Lehm (Ls3), 2008								
<i>p</i>	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***
KON	6,1 a	6,5 a	5,9 a	7,3 a	6,6 a	6,5 a	5,7 a	5,7 a
TSP	9,8 bc	11,1 c	10,0 b	9,8 b	11,3 b	10,2 d	10,5 b	11,4 c
RESA	10,4 bc	11,2 c	9,5 b	10,4 b	12,2 b	9,1 c	11,0 b	11,2 c
SA	9,1 b	9,2 b	8,5 b	10,3 b	10,7 b	8,1 b	9,7 b	8,6 b
GA	11,0 c	11,3 c	9,0 b	9,7 b	11,4 b	10,2 d	10,0 b	10,7 bc
KCl	5,9 a	6,8 a	5,8 a	6,5 a	5,5 a	6,0 a	6,3 a	6,3 a
MW	8,7 B	9,3 C	8,1 A	9,0 BC	9,6 B	8,3 A	8,9 A	9,0 A

Pw = wasserlösliches P; KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngewarianten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); unterschiedliche Großbuchstaben innerhalb einer Zeile und eines Versuches kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Fruchtarten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

Die **Pdl-Gehalte** waren in allen Gefäßversuchen nach TSP- und Aschedüngung im Vergleich zu den Varianten ohne P (KON und KCl) signifikant erhöht (Tab. 34). Dabei wurden auch fruchtartenspezifische Unterschiede ermittelt. Das hohe P-Aneignungsvermögen der Arten in den Zwischenfruchtversuchen (Ölrettich, Phacelia, Weidelgras und Buchweizen) spiegelte sich in den Veränderungen der **Pdl-Gehalte** (ΔPdl) im Boden wider. Diese

5 Ergebnisse

Fruchtarten (Gefäßversuch II und IV) hatten aufgrund ihrer hohen P-Aufnahmen (Kap. 5.3.1, Tab. 28) das Pdl-Angebot im Laufe des Versuchszeitraumes stärker reduziert als die Hauptfrüchte (Gefäßversuch I und III) (Tab. 33).

Tab. 33: Δ Pdl im Boden der Gefäßversuche in Abhängigkeit von der pflanzlichen P-Aufnahme.

Pdl-Gehalt (mg kg ⁻¹)	Gefäßversuch I (HF, SI3), 2007	Gefäßversuch II (ZF, SI3), 2007	Gefäßversuch III (HF, Ls3), 2008	Gefäßversuch IV (ZF, Ls3), 2008
vor der Düngung	38,9	38,9	39,3	39,3
zu Versuchsende in der Kontrolle	33,7	30,3	34,0	28,8
Δ Pdl (mg kg ⁻¹)	-5,2	-8,6	-5,3	-10,5

Pdl = doppellaktatlösliches P, HF = Hauptfrüchte, ZF = Zwischenfrüchte

Der Anbau von Lupine hinterließ nicht nur höhere Pw-Gehalte im Boden als die anderen Hauptfrüchte, sondern auch die höchsten Pdl-Gehalte (Tab. 34) und Kdl-Gehalte (Tab. A-20 im Anhang), was auf die vergleichsweise geringen Nährstoffaufnahmen (Kap. 5.3.1, Tab. 28 und Tab. A-12 im Anhang) (v.a. auf Sand) zurückzuführen ist.

Tab. 34: Pdl-Gehalte im Boden zu Versuchsende in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche 2007 und 2008.

Düng.	Mais	Bl. Lupine	So-Gerste	So-Raps	Ölrettich	Phacelia	Weidelgras	Buchweizen
Pdl-Gehalt (mg kg⁻¹), (vor der Düngung: 38,9), Sand (SI3), 2007								
<i>p</i>	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***
KON	33,0 a	34,7 a	33,3 a	33,8 a	31,7 a	26,4 a	33,7 a	29,5 a
TSP	39,5 b	44,9 b	41,9 b	41,2 b	39,2 b	32,1 bc	40,8 b	43,8 b
RESA	39,3 b	44,7 b	41,2 b	43,5 b	38,6 b	32,1 bc	42,0 b	42,5 b
SA	40,1 b	45,8 b	41,5 b	42,0 b	44,7 c	34,4 cd	42,0 b	45,2 b
GA	42,2 b	48,3 b	34,6 a	43,5 b	40,7 bc	35,5 d	41,2 b	41,5 b
KCl	32,8 a	34,9 a	34,1 a	32,2 a	30,6 a	30,4 b	34,2 a	31,3 a
MW	37,8 A	42,2 B	37,8 A	39,4 A	37,6 B	31,8 A	39,0 B	39,0 B
Pdl-Gehalt (mg kg⁻¹), (vor der Düngung: 39,3), Lehm (Ls3), 2008								
<i>p</i>	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***
KON	34,4 a	34,5 a	33,0 a	34,1 a	28,2 a	26,8 a	32,1 a	28,3 a
TSP	44,1 b	46,0 cd	45,4 d	43,3 b	42,5 b	39,2 c	44,1 b	43,9 b
RESA	44,7 b	43,7 bc	42,4 bc	43,4 b	42,6 b	35,8 b	45,4 b	42,2 b
SA	43,8 b	41,3 b	41,6 b	44,3 b	41,3 b	35,8 b	45,8 b	43,3 b
GA	45,8 b	47,1 d	44,6 cd	44,7 b	46,9 c	39,7 c	44,2 b	45,6 b
KCl	34,9 a	33,2 a	34,3 a	33,2 a	29,3 a	27,8 a	33,8 a	32,8 a
MW	41,3	41,0	40,2	40,5	38,5 B	34,2 A	40,9 C	39,4 B

Pdl = doppellaktatlösliches P; KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngevarianten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); unterschiedliche Großbuchstaben innerhalb einer Zeile und eines Versuches kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Fruchtarten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

5 Ergebnisse

Durch die Zufuhr von K wurden in der SA- und KCl-Variante die signifikant höchsten **Kdl-Werte** im Boden ermittelt. Die drei Aschen führten zu tendenziell erhöhten **Mgdl-Gehalten** im Boden im Vergleich zur Kontrolle (*Tab. A-20* im Anhang).

Die nach Versuchsende ermittelten **Pt-Gehalte** im Boden lagen zwischen 474 mg kg⁻¹ (KON, Lupine, Lehm) und 580 mg kg⁻¹ (RESA, Lupine, Lehm). Es lässt sich allgemein feststellen, dass die P-Zufuhr in den P-Düngevarianten (TSP, Aschen) die P-Aufnahme der Fruchtarten übertraf, was sich zu Versuchsende in erhöhten Pt-Gehalten im Vergleich zur Kontrolle widerspiegelte (*Abb. 11*) und auch in den positiven Korrelationen zwischen P-Aufnahme und Pt-Gehalten ersichtlich wird (*Tab. A-14* im Anhang). Nur im Gefäßversuch I kam es lediglich zu einer tendenziellen Erhöhung der Werte in der SA- und GA-Variante (*Abb. 11*). Die Pt-Gehalte im Lehm Boden waren infolge der Düngung stärker erhöht als im Sandboden (*Tab. 35*).

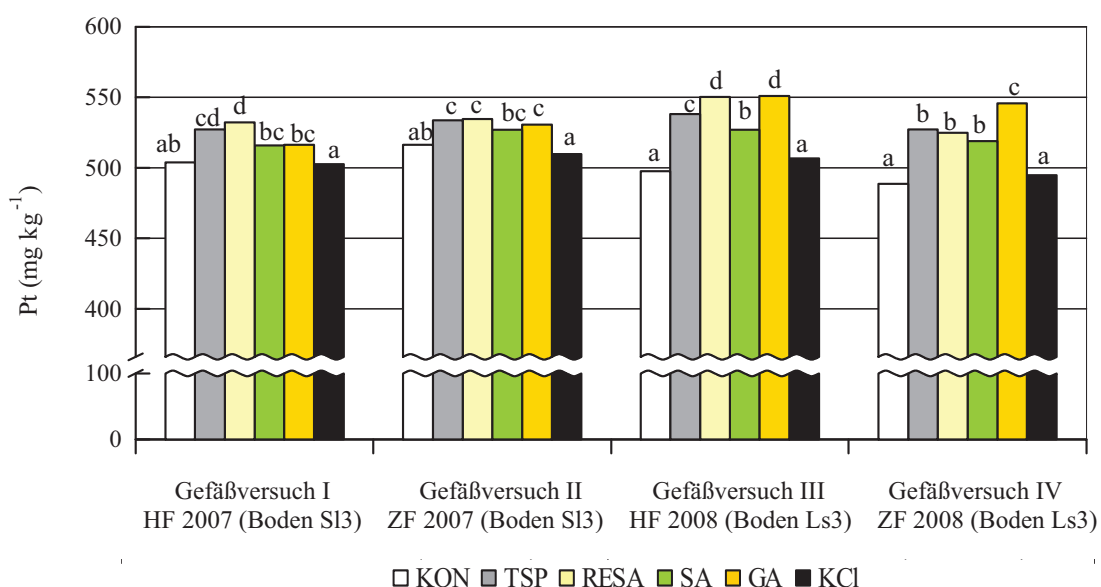


Abb. 11: Pt-Gehalte im Boden in Abhängigkeit von der Düngung, Gefäßversuche 2007 und 2008.

Pt = P total, KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen Düngevarianten (im Mittel der Fruchtarten eines Versuchs); ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA).

5 Ergebnisse

Tab. 35: Pt-Gehalte im Boden zu Versuchsende in Abhängigkeit von der Düngung, Fruchtart und Bodenart, Gefäßversuche 2007 und 2008.

Düng.	Mais	Bl. Lupine	So-Gerste	So-Raps	Ölrettich	Phacelia	Weidelgras	Buchweizen
Pt-Gehalt (mg kg⁻¹), (vor der Düngung: 504) auf Sand (Sl3), 2007								
<i>p</i>	0,037*	0,150 ns	0,002**	0,027*	<0,001***	0,844 ns	0,619 ns	0,090 ns
KON	521 b	487	493 ab	514 a	529 b	511	523	502
TSP	519 b	526	523 c	541 ab	555 c	523	536	520
RESA	526 b	518	525 c	560 b	548 bc	521	526	543
SA	512 ab	509	513 bc	529 a	545 bc	522	531	509
GA	534 b	507	483 a	541 ab	553 c	517	532	519
KCl	492 a	505	497 ab	517 a	504 a	522	524	489
MW	517 B	509 AB	506 A	534 C	539 C	520 AB	529 B	514 A
Pt (mg kg⁻¹), (vor der Düngung: 501) auf Lehm (Ls3), 2008								
<i>p</i>	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***
KON	496 b	474 a	508 a	512 a	475 a	500 a	503 ab	477 a
TSP	521 cd	539 bc	552 cd	541 b	523 c	539 b	523 bc	524 bc
RESA	534 d	580 d	539 bc	549 b	519 c	534 b	534 c	512 b
SA	506 bc	535 b	524 ab	544 b	514 c	508 a	537 c	516 b
GA	517 cd	566 cd	564 d	557 b	551 d	541 b	548 c	544 c
KCl	475 a	514 b	523 ab	515 a	494 b	496 a	487 a	501 b
MW	508 A	534 B	535 B	536 B	513 A	520 AB	522 B	512 A

Pt = P total; KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngevarianten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); unterschiedliche Großbuchstaben innerhalb einer Zeile und eines Versuches kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Fruchtarten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

Je nach P-Düngung, Fruchtart und Wechselwirkungen beider Faktoren wurden tendenzielle oder signifikante Erhöhungen der **Pox-** und **DPS-Werte** im Boden ermittelt (Tab. A-21 und Tab. A-22 im Anhang). Eine P-Zufuhr mit TSP, RESA oder GA führte im Mittel der Fruchtarten zu signifikant erhöhten P-Sättigungsgraden im Boden im Vergleich zur Kontrolle (Abb. 12).

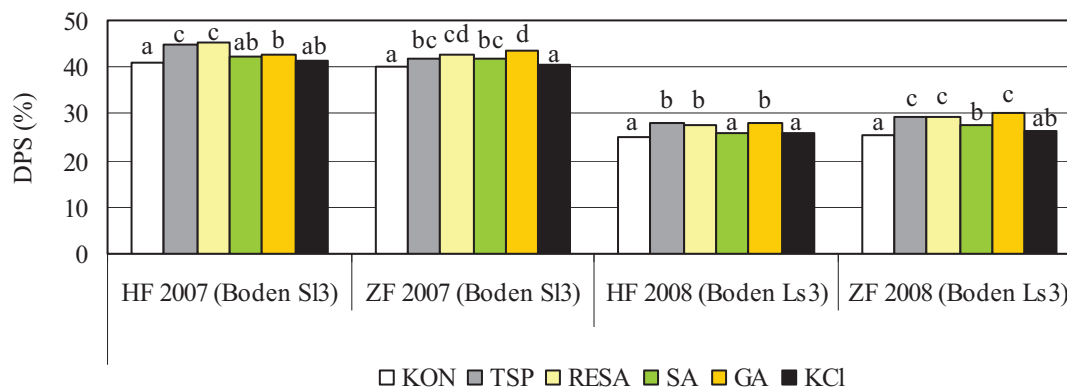


Abb. 12: Grad der P-Sättigung (DPS) im Mittel der Fruchtarten in Abhängigkeit von der Düngung, Gefäßversuche 2007 und 2008.

HF = Hauptfrüchte, ZF = Zwischenfrüchte; Sl3 = mittel lehmiger Sand, Ls3 = mittel sandiger Lehm; KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen Düngevarianten (im Mittel der Fruchtarten eines Versuches); ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA).

5 Ergebnisse

Jeweils zu Beginn und Ende der Gefäßversuche wurde der Boden hinsichtlich der Verteilung der **P-Fraktionen** untersucht (*Abb. 13* und *Tab. 36*). Die P-Fraktionen waren in starkem Maße von der Bodenart abhängig. Ihre prozentualen Anteile am Pt-Gehalt des Sandbodens unterschieden sich wesentlich von denen im Lehm Boden, wohingegen der Anbau von Haupt- oder Zwischenfrüchten darauf keinen Einfluss hatte (*Abb. 13*). Den größten Anteil am Pt nahm im Sandboden die NaOH-P-Fraktion mit ca. 40 % ein. Im Lehm Boden betrug der Anteil des NaOH-P <30 %, jedoch nahm die Summe aus H₂SO₄-P und Residual-P (ca. 60 %) auf dem bindigeren Boden einen wesentlich größeren Anteil am Pt als im Sandboden ein (ca. 40 %). Werden die Anteile der P-Fraktionen am Pt-Gehalt jedes Versuches mit den entsprechenden Ausgangswerten verglichen, so sind nur geringfügige Veränderungen feststellbar. Das heißt, die Düngung und der Anbau der verschiedenen Fruchtarten waren diesbezüglich weniger entscheidend als der Einfluss der Bodenart.

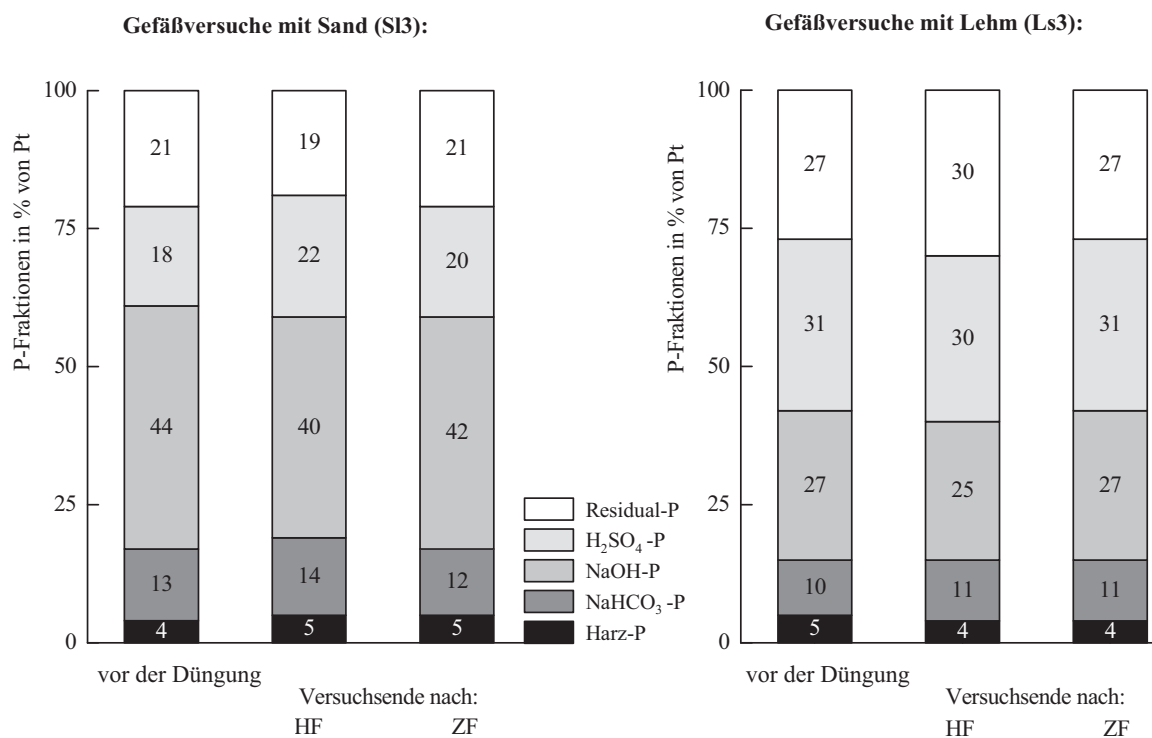


Abb. 13: Relative Anteile der P-Fraktionen im Boden der Gefäßversuche 2007 und 2008, in Abhängigkeit von der Bodenart und den Fruchtarten.

HF = Hauptfrüchte, ZF = Zwischenfrüchte; SL3 = mittel lehmiger Sand, Ls3 = mittel sandiger Lehm

Dennoch wirkten sich die beiden Versuchsfaktoren Düngung und Fruchtart auf die P-Fraktionen des Bodens aus, wobei häufig auch Wechselwirkungen verzeichnet wurden. Düngeeffekte traten besonders deutlich in der Harz-P- und NaHCO₃-P-Fraktion auf.

Die erste der beiden leicht verfügbaren P-Fraktionen, die **Harz-P-Fraktion**, wurde in drei von vier Gefäßversuchen stärker von der Düngung als von der Fruchtart beeinflusst (siehe partielles Eta-Quadrat *Tab. A-18* im Anhang). Dabei wurde die Harz-P-Fraktion durch die P-Düngevarianten (um bis zu 39 % nach SA bzw. 46 % nach TSP) im Vergleich zur Kontrolle erhöht (*Abb. 14*). Während in den Versuchen I, III und IV die P-Düngung mit Asche zu vergleichbarer Erhöhung der Werte führte wie TSP, waren die Harz-P-Gehalte im Versuch II (ZF-Versuch auf Sand) nur in der SA- und GA-Varianten signifikant erhöht (*Tab. 36*). In Abhängigkeit von der Bodenart wirkten sich die Düngevarianten fruchtartenspezifisch auf die P-Fraktionen aus. Auf dem Sandboden wurden nach Kultivierung von Mais, So-Raps, Ölrettich und Buchweizen erhöhte Harz-P-Gehalte infolge P-Düngung ermittelt (*Tab. A-23* im Anhang). Im Lehm Boden wurden nach Mais-, So-Raps-, Lupinen- und Phacelia-Anbau Düngeeffekte auf den Harz-P-Pool festgestellt (*Tab. A-25* im Anhang). Beim Anbau von Mais war die Erhöhung des Harz-P-Gehaltes nach Düngung mit Aschen besonders stark; der Harz-P-Gehalt war zwischen 83 % (RESA) und 112 % (GA) höher als in der Kontrolle.

Die **NaHCO₃-P-Fraktion** wurde nach TSP-, RESA- und GA-Zufuhr im Sandboden gegenüber der Kontrolle erhöht, während im Lehm Boden je nach Fruchtartenanbau TSP und GA (Versuch III) bzw. alle drei Aschen gleichermaßen wie TSP (Versuch IV) diese Fraktion am meisten auffüllten (*Tab. 36* und *Abb. 14*). Der Fruchtarteneinfluss wurde bei der NaHCO₃-P-Fraktion insofern deutlich, als dass in beiden Böden nach Buchweizenanbau die signifikant niedrigsten Werte ermittelt wurden (*Tab. A-23* und *Tab. A-25* im Anhang).

Die **NaOH-P-Fraktion** wurde im Mittel der Fruchtarten durch die Düngung mit GA am stärksten gegenüber der Kontrolle erhöht – im Sand tendenziell und im Lehm signifikant. Im Gegensatz dazu war die NaOH-Fraktion in der SA-Variante (die stets zu erhöhten pH-Werten geführt hatte) je nach angebauter Fruchtart tendenziell oder signifikant niedriger als in den anderen P-Varianten (*Tab. 36* und *Abb. 14*). Unter P-Mangelbedingungen (Kontrolle) war die NaOH-P-Fraktion in beiden Böden nach Buchweizenanbau im Vergleich zum Ausgangswert stärker verringert als nach Kultivierung der anderen Zwischenfruchtarten (*Tab. A-23* und *Tab. A-25* im Anhang).

Die **H₂SO₄-P-Fraktion** wurde durch die P-Düngung und P-Aufnahme nur bei wenigen Fruchtartenvarianten beeinflusst. Nach Buchweizenanbau und SA-Düngung kam es zu höheren H₂SO₄-P-Gehalten im Boden als in der Kontrolle und den anderen Varianten (*Tab. A-23* und *Tab. A-25* im Anhang).

5 Ergebnisse

Tab. 36: P-Fractionen im Boden (mg kg^{-1}) zu Versuchsende in Abhängigkeit von der Düngung, Gefäßversuche 2007 und 2008.

Gefäßversuch	Düng.	Harz-P	$\text{NaHCO}_3\text{-P}$	NaOH-P	$\text{H}_2\text{SO}_4\text{-P}$	Residual-P
I + II, Versuchsbeginn		19,8	64,9	220	93	106
I (HF; Sl3) Versuchsende	<i>p</i>	<0,001***	<0,001***	0,062 ns	<0,001***	0,047*
	KON	23,0 a	69,1 b	198	108 a	105 ab
	TSP	29,7 b	77,3 c	214	112 a	95 ab
	RESA	27,4 b	77,4 c	204	114 ab	109 b
	SA	30,0 b	71,7 b	197	118 b	99 ab
	GA	27,9 b	76,9 c	216	110 a	86 a
	KCl	21,8 a	63,6 a	212	120 b	85 a
	MW	26,6	72,7	207	114	97
II (ZF; Sl3) Versuchsende	<i>p</i>	<0,001***	<0,001***	0,390 ns	<0,001***	0,608 ns
	KON	24,3 a	61,0 a	227	105 b	100
	TSP	25,3 a	68,0 bc	227	105 b	109
	RESA	24,2 a	65,8 abc	220	111 c	114
	SA	32,2 b	63,1 ab	220	99 a	113
	GA	29,9 b	71,0 c	221	99 a	110
	KCl	22,6 a	61,7 a	214	98 a	114
	MW	26,4	65,1	221	103	110
III + IV, Versuchsbeginn		23,0	51,5	134	159	134
III (HF; Ls3) Versuchsende	<i>p</i>	<0,001***	<0,001***	<0,001***	0,051 ns	<0,001***
	KON	16,8 a	55,2 a	132 ab	153	140 a
	TSP	24,5 c	60,3 bc	137 bc	158	159 b
	RESA	23,3 bc	56,0 ab	132 ab	163	176 c
	SA	21,7 bc	53,3 a	128 a	159	165 bc
	GA	20,9 b	62,3 c	141 c	159	167 bc
	KCl	14,2 a	56,2 ab	136 b	159	141 a
	MW	20,2	57,2	135	159	158
IV (ZF; Ls3) Versuchsende	<i>p</i>	0,007**	0,006**	<0,001***	0,049*	0,003**
	KON	19,7 ab	50,5 a	133 a	153 ab	133 a
	TSP	22,8 bc	59,2 b	145 cd	148 a	152 b
	RESA	24,3 c	59,9 b	142 bc	160 b	138 ab
	SA	21,0 abc	62,6 b	138 ab	158 b	139 ab
	GA	23,2 c	62,6 b	150 d	158 b	151 b
	KCl	19,2 a	55,2 ab	137 ab	155 ab	129 a
	MW	21,7	58,3	141	155	140

HF = Hauptfrüchte, ZF = Zwischenfrüchte; Sl3 = mittel lehmiger Sand, Ls3 = mittel sandiger Lehm; KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngervarianten eines Versuches ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

5 Ergebnisse

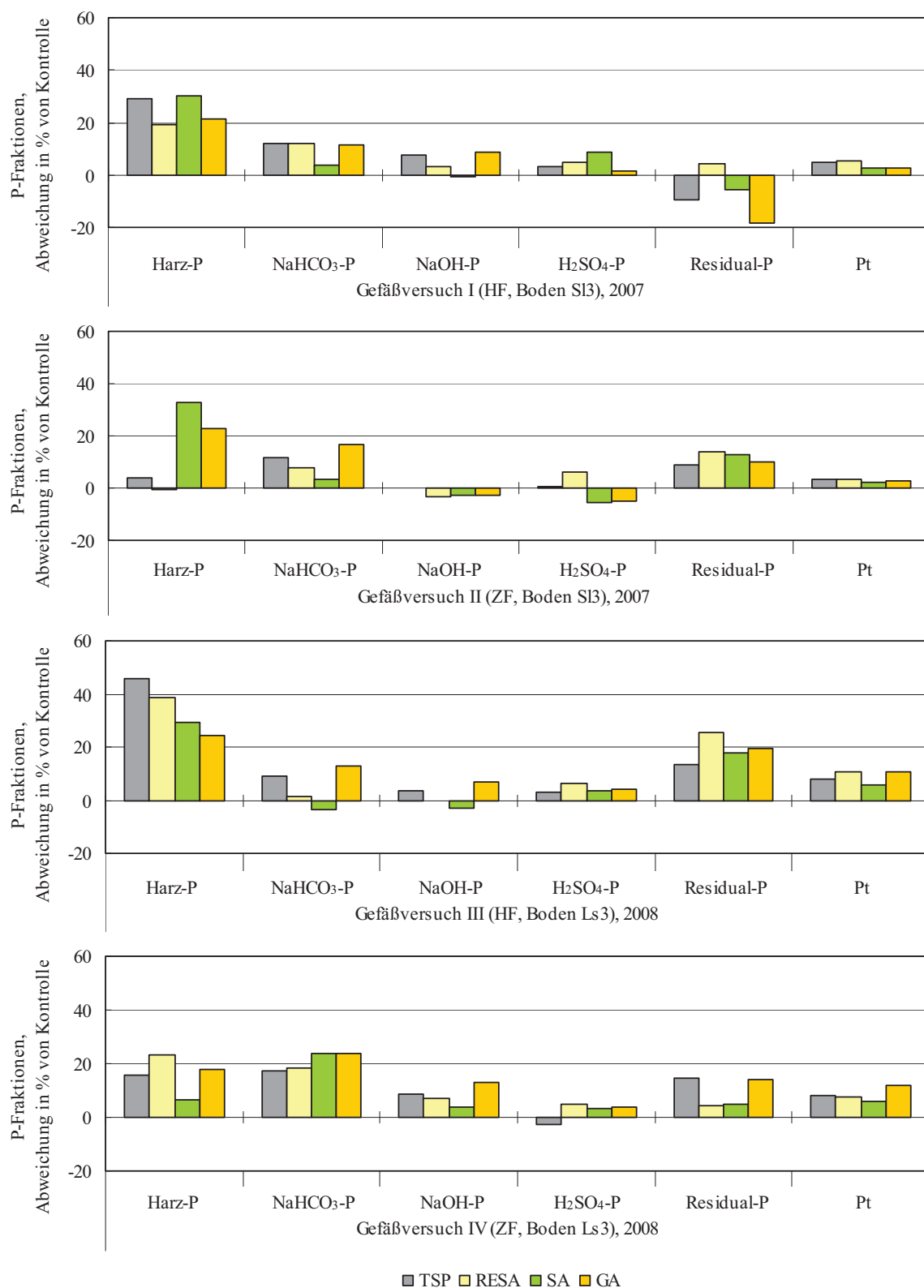


Abb. 14: Einfluss der P-Düngung auf die P-Fractionen den Gefäßversuchen 2007 und 2008, relativer Vergleich der Varianten TSP, RESA, SA und GA zur Kontrolle.

HF = Hauptfrüchte, ZF = Zwischenfrüchte, SI3 = mittel lehmiger Sand, Ls3 = mittel sandiger Lehm; TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche

Im Boden des Gefäßversuches I (Hauptfrüchte, SI3) wurde nach Versuchsende der Einfluss der Düngung und der Fruchtarten auf die **saure und alkalische Phosphataseaktivität** geprüft. Düngung und Wechselwirkung aus Düngung und Fruchtart waren nicht signifikant, aber der Versuchsfaktor Fruchtart wirkte sich nachweislich auf die Enzymaktivität aus. Saure und alkalische Phosphataseaktivität waren im Boden nach Maisanbau geringer als nach Anbau der anderen Arten. Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Aktivität der sauren Phosphatase um den Faktor 3 bis 4 (je nach Fruchtart) höher war als die der alkalischen Phosphatase (Tab. 37).

Tab. 37: Saure und alkalische Phosphatase ($\mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) im Boden zu Versuchsende in Abhängigkeit von der Fruchtart, Düngung und Wechselwirkung, Gefäßversuch auf Sand (SI3), 2007.

Fruchtart	Effekt	Saure Phosphatase	Alkalische Phosphatase
	<i>p</i> (Düng.)	0,742 ns	0,152 ns
	<i>p</i> (Düng. x FA)	0,366 ns	0,364 ns
	<i>p</i> (FA)	0,004**	<0,001***
Mais		165 a	41,5 a
Bl. Lupine		170 b	49,0 b
So-Gerste		173 b	54,7 c
So-Raps		171 b	52,1 bc
MW		170	49,3

Düng. = Düngung, FA = Fruchtart, Düng.xFA = Wechselwirkung, Unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Fruchtarten im Mittel der Düngevarianten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

5.3.3 P-Aufnahmeeffizienz und tatsächliche P-Ausnutzung

Die Düngewirkung, die sich u.a. in Form der Nährstoffeffizienz ermitteln lässt, hängt nicht nur entscheidend von der Nährstoffzusammensetzung und anderen Eigenschaften des Düngers ab, sondern wird in großem Maße auch durch das P-Aneignungsvermögen der Fruchtarten und die Bodeneigenschaften beeinflusst. Dazu soll im Folgenden beispielhaft für die Kontrolle ohne P eine Gegenüberstellung von P-Aufnahme und Δ Pdl im Boden erfolgen. Dabei muss beachtet werden, dass die P-Aufnahme der Pflanzen und die Pdl-Gehalte im Boden unterschiedlich hohen Standardabweichungen unterliegen und ferner das Nachlieferungsvermögen des Bodens nicht adäquat dargestellt werden kann. Dennoch wird der Zusammenhang zwischen P-Aufnahme im Spross und der Veränderung der Pdl-Gehalte im Boden deutlich, da sich die Pdl-Gehalte in Abhängigkeit von der P-Aufnahme verringerten (besonders bei Phacelia und Buchweizen) (Abb. 15). Dabei war die P-Aufnahme der Pflanzen (außer bei Ölrettich auf Lehm) größer als die Abnahme der Pdl-Gehalte im Boden.

5 Ergebnisse

Somit haben die Pflanzen zusätzlich P mobilisiert oder/und P aus der Nachlieferung des Bodens aufgenommen.

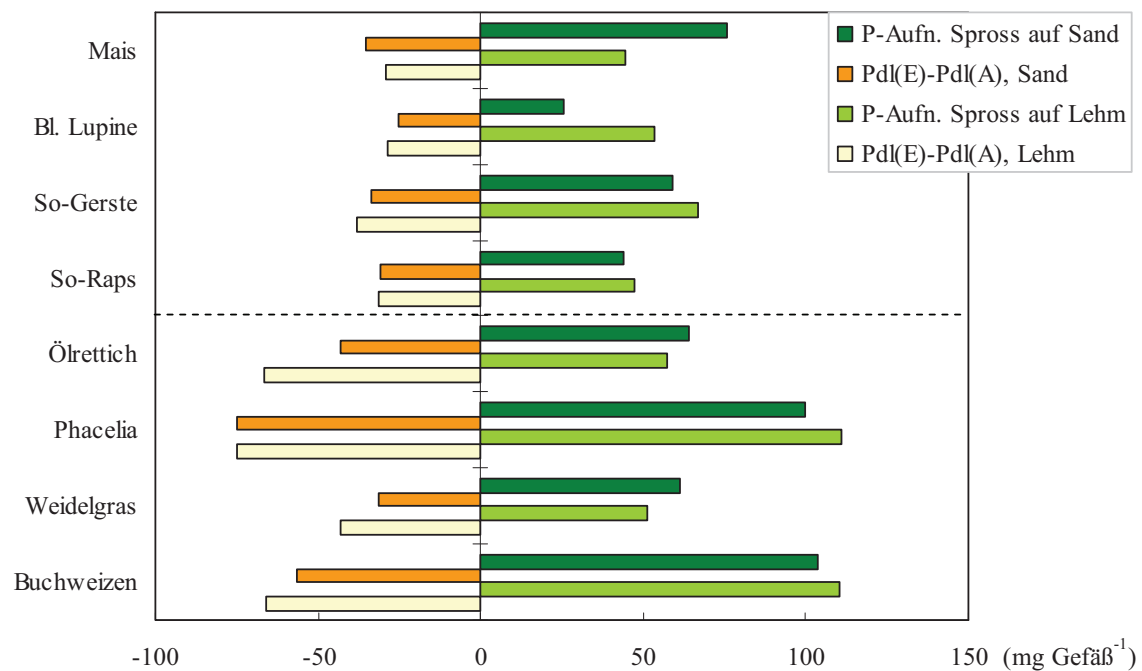


Abb. 15: Gegenüberstellung von P-Aufnahme in den Spross und ΔPdl im Boden nach mehrwöchigen Gefäßversuchen mit verschiedenen Fruchtarten auf Sand bzw. Lehm (Kontrollvariante ohne P-Zufuhr).

Pdl = doppellaktatlösliches P

Für die verschiedenen Fruchtarten wurden die **P-Aufnahmeeffizienzen** (prozentuales Verhältnis aus P-Aufnahme in den Spross zu P-Angebot aus Boden und Düngung) in Abhängigkeit von der Düngung berechnet (Abb. 16). Damit sollte geprüft werden, welche Düngung bei welcher Art zur höchsten P-Aufnahmeeffizienz führte. Mais war auf dem Sandboden nach Düngung mit TSP ebenso wie nach RESA und GA am effizientesten. Die höchste P-Effizienz der Blauen Lupine wurde auf dem Lehm Boden nach GA-Zufuhr festgestellt, während Lupine auf dem Sand keine Düngeeffekte zeigte. Von den Arten des Zwischenfruchtversuches hatte Phacelia auf beiden Böden die höchsten Aufnahmeeffizienzen unabhängig von der P-Zufuhr. Auch Buchweizen zeigte eine hohe Effizienz und keine düngungsabhängigen Unterschiede in der P-Aufnahmeeffizienz auf Sand. Dagegen bewirkte die Düngung bei Weidelgras und Ölrettich auf beiden Böden Abstufungen in der P-Aufnahmeeffizienz, indem in den P-Düngevarianten mit hoher P-Zufuhr (TSP, RESA und GA) am effizientesten P aufgenommen wurde. Generell führte die Düngung mit SA zu den durchschnittlich geringsten P-Aufnahmeeffizienzen im Vergleich der drei Aschevarianten.

5 Ergebnisse

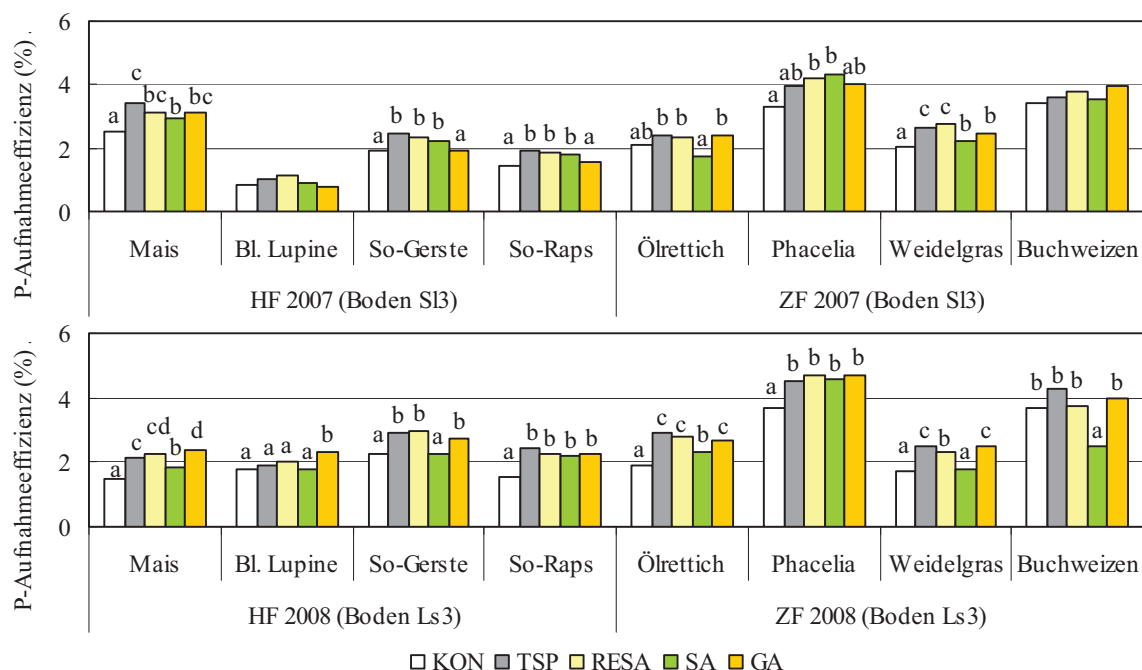


Abb. 16: P-Aufnahmeeffizienz (prozentuales Verhältnis aus P-Aufnahme in den Spross zu P-Angebot aus Boden und Düngung) in den Gefäßversuchen 2007 und 2008.

HF = Hauptfrüchte, ZF = Zwischenfrüchte, SI3 = mittel lehmiger Sand, Ls3 = mittel sandiger Lehm; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngervarianten einer Fruchtart ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA)

Da die Biomasseaschen je nach P-Konzentration in unterschiedlichen Mengen ausgebracht wurden (siehe Kap. 4.3, Tab. 14), bringt eine Berechnung der **tatsächlichen P-Ausnutzung** im Vergleich zu den P-Aufnahme-Werten (Kap. 5.3.1, Tab. 28) bzw. den P-Aufnahmeeffizienzen (Abb. 16) zusätzliche Informationen über die Düngeeffekte der P-Varianten. Nach der sogenannten *Differenzmethode* (Fink 1992, Schnug 2009) wird die Differenz aus der Nährstoffaufnahme von gedüngten und ungedüngten Pflanzen aus einem Düngerversuch ermittelt und mit der zugeführten Düngermenge in Beziehung gesetzt. Damit wird die **tatsächliche Nährstoff-Ausnutzung (TA)** nach Kratz und Schnug (2008) rechnerisch wie folgt bestimmt:

$$\text{TA (\%)} = \frac{(\text{Gesamtaufnahme} - \text{Aufnahme aus Bodenvorrat}) \times 100}{\text{Nährstoffmenge des Düngers}}$$

Als Gesamtaufnahme wird jeweils die P-Aufnahme einer P-Düngervariante eingesetzt, von der die P-Aufnahme der Kontrollvariante subtrahiert wird. Dass für Ölrettich auf Sand und Buchweizen auf Lehm keine Werte angegeben werden konnten, liegt daran, dass die Gesamtaufnahme etwas geringer war als die Aufnahme in der Kontrolle.

Hervorzuheben ist die hohe TA in den Aschevarianten bei Phacelia auf beiden Böden, vor allem in der SA-Variante mit 31 % (auf Lehm) bzw. 36 % (auf Sand). Geringe TA-Werte gab es hingegen bei Lupine und Ölrettich in allen Düngervarianten auf Sand und bei Lupine, So-Gerste, Weidelgras und Buchweizen in der SA-Variante auf Lehm. Nach Buchweizen-

5 Ergebnisse

anbau wurden generell geringe TA-Werte ermittelt, da diese Art trotz hoher P-Aufnahmen kaum auf die Düngung reagierte (Abb. 17).

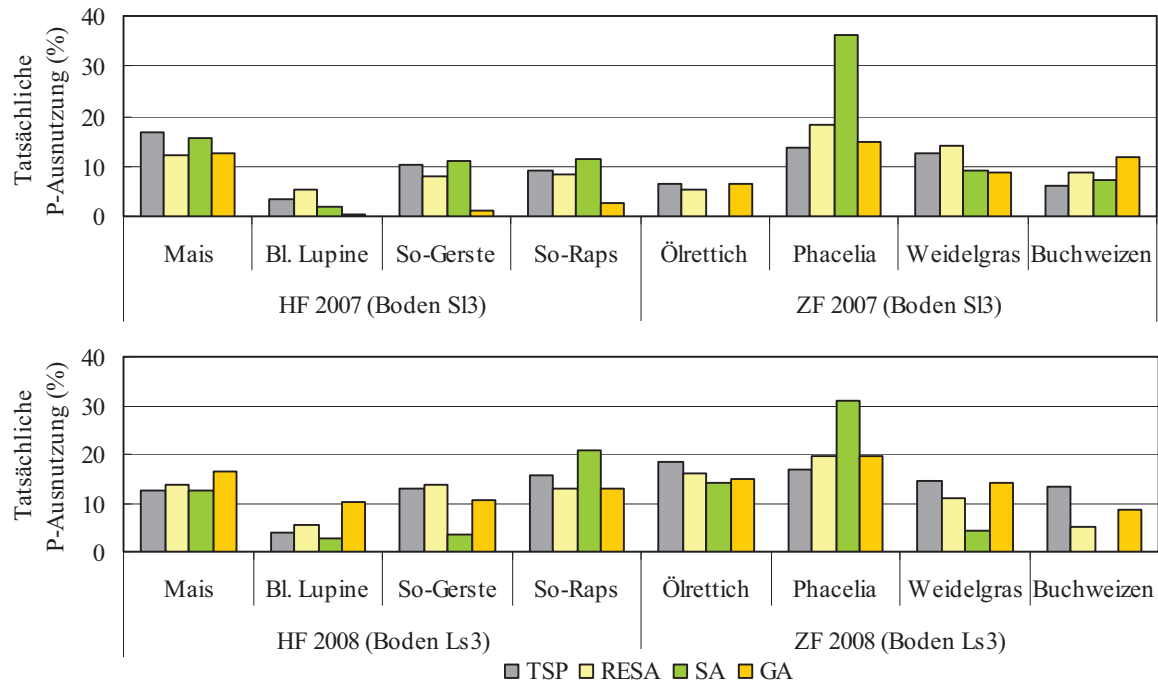


Abb. 17: Tatsächliche P-Ausnutzung (%) in den P-Düngevarianten, Gefäßversuche 2007 und 2008.

HF = Hauptfrüchte, ZF = Zwischenfrüchte, SL3 = mittel lehmiger Sand, Ls3 = mittel sandiger Lehm; TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche

6 Diskussion

Nährstoffrecycling und **Kreislaufwirtschaft** tragen seit Jahrhunderten in der Landwirtschaft zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit bei. Auch Justus von Liebig, der Vater der Agrikulturchemie, war sich trotz seiner Erkenntnisse über chemische Düngemittel auch der Bedeutung der Inhaltsstoffe von Asche und Knochen zwecks Nährstoffrückführung bewusst (siehe von Liebig 1859).

Für die pflanzliche Ontogenese spielt die **P-Versorgung der Pflanzen** eine wichtige Rolle – sie beeinflusst insbesondere die morphologischen Ausprägungen wie Wurzel-, Spross-, Blüten- und Samenentwicklung, aber auch Stoffwechsel- und Reifeprozesse, Qualitätskriterien und Krankheitsresistenz (Khan et al. 2009b). Neben N ist P das am ehesten limitierende Makroelement in Bezug auf das Pflanzenwachstum (Vessey 2003).

Aufgrund des derzeitigen P-Dünger-Verbrauchs und der weltweiten Verknappung hochwertiger Phosphatvorkommen ergibt sich v. a. für die entwickelten Länder das Ziel eines nachhaltigen P-Dünger-Einsatzes in den kommenden Jahrzehnten (Plassard et al. 2010). Da einige **Biomasseaschen** hohe P-Gehalte aufweisen, erscheinen sie als Sekundärrohstoffe besonders zur Verwertung als P-Düngemittel lukrativ (auch wenn Biomasseaschen prinzipiell Mehrnährstoffdünger sind).

Um Möglichkeiten für eine hohe Ausnutzung des in Biomasseaschen enthaltenen P im Pflanzenbau aufzeigen zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit sowohl Feld- als auch Gefäßversuche durchgeführt. Während die Feldversuche eher praxisrelevante Untersuchungen z. B. in Bezug auf den Ertrag ermöglichen, können mittels Gefäßversuch Versuchsfaktoren in größerer Anzahl von Stufen untersucht werden. Des Weiteren bietet ein Gefäßversuch mit begrenztem Bodenvolumen die Möglichkeit, Nährstoffkreisläufe und -bilanzierung einzubeziehen – besonders bei einem nichtflüchtigen Element wie P. Dabei ist jedoch andererseits zu beachten, dass sich das begrenzte Bodenvolumen und die in der Regel kürzere Wachstumszeit der Pflanzen auf die Untersuchungsergebnisse auswirken und diese daher nicht uneingeschränkt auf die landwirtschaftliche Praxis übertragen werden können.

6.1 *P-Verfügbarkeit/P-Fractionen in den Biomasseaschen*

Zu den wichtigsten Qualitätsmerkmalen von P-Düngern zählen nach Kratz und Schnug (2009) die Pflanzenverfügbarkeit des enthaltenen P und ein gewährleisteter hoher Nährstoffausnutzungsgrad. Um die Effizienz von P-Düngern aus Sekundärrohstoffen beurteilen zu können, lässt sich die **P-Wirksamkeit** mittels chemischer Extraktionsverfahren charakterisieren. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Aussagekraft chemischer Extraktionsverfahren in Bezug auf die tatsächliche Pflanzenverfügbarkeit eines Düngemittels begrenzt ist, da diese Methoden die im Boden stattfindenden Lösungsprozesse und ihre Dynamik nicht adäquat widerzuspiegeln vermögen. Dennoch wird davon ausgegangen, dass mit Hilfe dieser Verfahren die Abschätzung der potentiellen Löslichkeit verschiedener Düngemittel vergleichend möglich ist.

Zur Analyse der Biomasseaschen und des TSP-Düngers wurde die Methode der **P-Fraktionierung** nach Tiessen/Hedley (in leicht modifizierter Weise, siehe *Kap. 4.4.4*) genutzt. Diese dient primär zur Charakterisierung der Gehalte und Bindungsformen, in denen P im Boden vorliegt, und erlaubt Rückschlüsse auf die P-Verfügbarkeit für Pflanzen. Des Weiteren wurde die Methode häufig genutzt, um den Verbleib von Dünger-P im Boden nachzuvollziehen (He et al. 2004, Zhang et al. 2004, Verma et al. 2005). Zur Charakterisierung der P-Verfügbarkeit aus Aschen wurde die P-Fraktionierung bereits von Codling (2006) verwendet. Dabei stellte er für verschiedene Geflügelmistaschen einander ähnliche Anteile der P-Fractionen fest, wonach er eine **Rangfolge der Effektivität der Extraktionsmittel** ermittelte (HCl (statt H_2SO_4) $>$ NaHCO_3 $>$ $\text{NaOH}=\text{H}_2\text{O}$). Die Aschen RESA, SA und GA erwiesen sich diesbezüglich als sehr heterogen (*Kap. 5.1, Tab. 15*). Zwar nahm die H_2SO_4 -Fraktion bei allen drei Aschen den größten Anteil am Pt ein, eine einheitliche Rangfolge der anderen Fraktionen hinsichtlich des Gehalts von extrahiertem P ließ sich jedoch nicht vornehmen.

Nach Kratz und Schnug (2009) kann der wirksame Anteil des Dünger-P anhand der Löslichkeit in Ammoniumcitrat oder Wasser prognostiziert werden. In den eigenen Untersuchungen wurde für die Strohasche ein **H_2O -P**-Anteil von 9,5 % des Pt ermittelt, während Obernberger (1997) für Strohasche ca. 7 % wasserlösliches P angibt. Die Getreidekornasche besaß 19,5 % H_2O -P, und in der Rapsextraktionsschrotasche waren nur 0,5 % des Pt wasserlöslich. Ein geringer H_2O -P-Anteil (unter 1–2 %) wurde auch in anderen Biomasseaschen, wie z. B. Holzasche (Eichler-Löbermann et al. 2008a), Geflügelmistasche (Codling 2006, Eichler-Löbermann et al. 2008a) sowie in Klärschlammasche (Adam et al. 2009) nachgewiesen. Die Wasserlöslichkeit der Nährstoffe in den Aschen ist vom Ausgangssubstrat der Verbrennung und der Verbrennungstechnik abhängig (Liebhard et al. 2009). Im Gegensatz zu den

Biomasseaschen enthält TSP einen wesentlich höheren wasserlöslichen P-Anteil, der in der eigenen Analyse mit 83 % des Pt vergleichbar war mit Ergebnissen von Rajan (1985) und Mullins und Sikora (1995).

Besonders bedeutsam für die P-Versorgung der Pflanzen sind die beiden leicht löslichen P-Fraktionen im Boden: Die H₂O-P-Fraktion und die labile P-Fraktion (NaHCO₃-Extrakt) (Cross und Schlesinger 1995, Schlichting et al. 2002), die im Boden als leicht **pflanzenverfügbares P** gelten. Die Aschen GA und SA besaßen in der Summe dieser beiden Fraktionen am meisten P, dessen Anteil am Pt jedoch <30 % betrug. Selbst wenn zu diesen beiden Fraktionen noch die moderat labile NaOH-P-Fraktion dazu gerechnet werden würde, bliebe der Anteil <40 % des Pt und erscheint verhältnismäßig gering, wenn dieser Wert den zitronensäurelöslichen P-Gehalten (**Pcit**) als Standard für pflanzenverfügbares P gegenüber gestellt wird. Für SA wurden 81 % Pcit analysiert, und GA und RESA enthielten nach Eichler-Löbermann et al. (2008a) 88 % bzw. 91 % Pcit. Somit scheint der Pcit-Anteil bezüglich der P-Verfügbarkeit aus Aschen aussagekräftiger zu sein als die Summe aus H₂O-P + NaHCO₃-P, die in den Aschen geringer war als in TSP, obwohl die P-Versorgung der Pflanzen aus allen drei Biomasseaschen in adäquater Weise wie mit TSP erfolgt sein muss (siehe Erträge und P-Aufnahmen in *Kap. 5.3.1*). Diese Schlussfolgerung wird durch Untersuchungsergebnisse von Adam et al. (2009) bestätigt, wonach thermo-chemisch behandelte Klärschlammaschen ebenfalls sehr geringe wasserlösliche P-Anteile (<1 %) des Pt, aber bis zu 97 % Pcit aufwiesen. Wenn ein Großteil des P in Biomasseaschen mittels schwacher Säure (wie z.B. Zitronensäure) lösbar ist, verdeutlicht dies nach Kratz und Schnug (2008) den innerhalb einer Vegetationsperiode verfügbaren P-Anteil. Bei TSP wird standardmäßig von ca. 90 % Pcit (Rajan 1985) bis 100 % Pcit (Römer 2006) ausgegangen.

6.2 Standortabhängige Effekte der Biomasseaschen und des Zwischenfruchtanbaus auf Pflanzenertrag und P-Aufnahme sowie die Nährstoffverfügbarkeit im Boden

Nach Steen (1998) werden während des ersten Jahres nach Applikation nur 15–25 % des ausgebrachten P von Pflanzen aufgenommen, der größere Teil wird im Boden gebunden. Außerdem unterliegt P kaum Auswaschungsverlusten. Vor diesem Hintergrund wurden die Aschen nur einmalig zu Beginn der zweijährigen Feldversuche ausgebracht und ein Anbau von Zwischenfrüchten (Phacelia und Grünroggen) in den Versuch integriert.

Im **Feldversuch Rostock** konnte der Gersteertrag mittels Aschedüngung (RESA und SA) im Vergleich zur Kontrolle um bis zu 18 % gesteigert werden, obwohl die P-Aufnahme nur tendenziell erhöht war, während im zweiten Jahr bei Mais sowohl P-Aufnahme als auch Ertrag durch Aschezufuhr (SA und GA) erhöht waren. Die Ertragssteigerung betrug bei Mais max. 11 % im Vergleich zur Kontrolle. Da die SA am Standort Rostock trotz der geringeren P-Zufuhr eine vergleichbare Düngewirkung wie die anderen Aschen hatte, kann von einer hohen P-Verfügbarkeit dieser Asche ausgegangen werden. Dabei lag das P-Düngeniveau von RESA und GA mit ca. 50 kg P ha⁻¹ für 2 Jahre in der üblichen Größenordnung und die P-Zufuhr von <10 kg P ha⁻¹ mittels SA war sehr gering. Die P-Mengen, die vom Korn der So-Gerste (2007) und von der Maisganzpflanze (2008) entzogen wurden, überstiegen in der SA-Variante bei Weitem die ausgebrachte Pt-Menge. Das bedeutet, dass in dieser Variante relativ viel P aus dem Bodenvorrat zur pflanzlichen P-Aufnahme genutzt wurde. Dies lässt sich wahrscheinlich auf die pH-Wirkung der Asche zurückführen. Nach Hinsinger (2001) beeinflusst der pH-Wert wesentlich die P-Formen des Bodens und die P-Verfügbarkeit. Unter sauren Bedingungen werden schwer lösliche Eisen- und Aluminiumphosphate gebildet. Dem kann durch Kalkung entgegengewirkt werden, wenn der pH-Wert eines Bodens unter seinem Optimum liegt (wie am Standort Rostock). Kalkung führt dazu, dass die Protonierung der Sorbenten und damit die P-Sorptionskapazität (PSC) verringert wird und gleichzeitig potentielle Bindungsplätze für P durch konkurrierende OH-Anionen belegt werden, was eine Erhöhung der relativen P-Sättigung (DPS) und der P-Konzentration in der Bodenlösung bewirkt (Werner und Trimborn 2008). Aufkalkung saurer Böden bis zu einem pH-Wert von 6–6,5 kann eine verbesserte P-Versorgung der Pflanzen bewirken (Blume et al. 2010). In den mit Asche gedüngten Parzellen konnte zum Erntetermin 2007 zumindest eine tendenzielle Erhöhung der DPS-Werte und der Pw-Gehalte im Oberboden festgestellt werden (siehe *Kap. 5.2.2, Tab. 21*), obwohl die Aschen nicht zu einem nachweisbaren pH-Wert-Anstieg zu den Probenahmeterminen (mehrere Monate nach Ascheausbringung) führten. Generell ist nach Ausbringung von Biomasseaschen auf landwirtschaftlichen Flächen durch Reaktion mit dem CO₂ der Bodenluft mit einer schnellen Umwandlung der Hydroxide (von Ca, K, Mg, Na) in Karbonate zu rechnen, wodurch eine Bodenverbesserung durch Anhebung des pH-Wertes möglich ist (Obernberger 1997). Verschiedene Studien haben jedoch gezeigt, dass (Holz-)Ascheausbringung im Vergleich zu einer Kalkung zu einem schnelleren und stärkeren, aber weniger lang anhaltenden pH-Anstieg führt (Clapham und Zibilske 1992, Muse und Mitchell 1995). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Hydroxide und Karbonate von K und Na, welche zur Neutralisationskapazität beitragen, besser löslich

als Ca-Karbonat und im Boden nicht lange vorhanden sind (Ulery et al. 1993). Somit kann ein kurzfristiger Kalkungseffekt der Aschen gerade im Boden der pH-Klasse B, wie am Feldversuchsstandort Rostock, zu zeitweise verbesserter P-Verfügbarkeit im Boden geführt haben. Dass sich die P-Düngung auf die P-Gehalte im Oberboden nicht signifikant ausgewirkt hat, könnte nach Baumgärtel (1988) auch darauf zurückgeführt werden, dass P-Gehaltsunterschiede im Oberboden möglicherweise durch die P-Aufnahme aus dem Unterboden nivelliert wurden.

Feldversuche anderer Institutionen erbrachten ebenfalls positive Resultate mit SA-Düngung. Am Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB) wurden auf einer Energiepflanzenplantage bei einer Ascheausbringungsmenge von ca. 1660 kg ha⁻¹ (für 2 Jahre) gleich hohe P-Aufnahmen in Winterroggenpflanzen und um bis zu 15 % höhere Ganzpflanzenerträge erzielt als nach TSP-Düngung trotz einer geringeren P-Zufuhr (Schiemenz und Eichler-Löbermann 2010b). An der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Versuchsstation Dornburg) wurden 14-jährige Untersuchungen (1996–2009) mit SA durchgeführt. Da die Nährstoffzufuhr mit SA in nahezu allen Versuchsjahren in Dornburg zu gleich hohen oder höheren Erträgen als in der Kontrolle mit herkömmlichen Düngemitteln führte, kann diese Asche als eine Alternative zur konventionellen mineralischen Düngung angesehen werden (Biertümpfel et al. 2010).

Von positiven Effekten aus der SA-Nutzung zur Düngung im Pflanzenbau wird auch aus der Praxis berichtet. Auf dem Gut Dennin in Mecklenburg-Vorpommern wird seit 1995 eine Strohverbrennungsanlage betrieben (siehe auch *Kap. 2.4*). Die Strohasche wird dem anfallenden Dung untergemischt und als Dünger wieder ausgebracht, so dass Aschenährstoffe über die Ausbringung als Asche-Dung-Gemisch erfolgreich recycelt werden und Ertragswirkung zeigen (Schroll 2011).

Um die Wirkung von Biomasseaschen unter verschiedenen Versuchsbedingungen zu testen, wurden die eigenen Untersuchungen nicht nur auf der Versuchsstation der Universität Rostock, sondern auch an einem zweiten Standort mit etwas abweichenden klimatischen Bedingungen, aber vor allem anderen Bodenbedingungen durchgeführt. Dass sich die Düngung mit Biomasseaschen im **Feldversuch Trenthorst** in keiner Weise auf die Erträge, P-Aufnahmen und Bodennährstoffgehalte ausgewirkt hat, kann mit den Bodenverhältnissen – insbesondere dem pH-Wert (mit 6,4 fast 0,7 pH-Einheiten höher als in Rostock) – begründet werden. Nach den Richtwerten des VDLUFA (2000) lag der pH-Wert im Oberboden in Rostock in der pH-Klasse B und in Trenthorst in pH-Klasse D. Der hohe pH-Wert am Standort Trenthorst kann ein Grund für die dort ausgebliebene P-Verfügbarkeit aus den

Aschen (welche einen nicht unerheblichen Anteil an Ca-Phosphaten aufwiesen) gewesen sein. Außerdem waren die P-Gehalte des Bodens (**Pt-, Pw-, Pdl-Gehalte** siehe *Kap. 4.2.1, Tab. 8*) in Trenthorst höher als im Rostocker Feldversuch. Nach Untersuchungen von Godlinski et al. (2003) können Pt-Gehalte im Oberboden für sandig-lehmige Böden bei Ackernutzung zwischen 320 und 770 mg kg⁻¹ betragen. Im Mittelfeld dieses Wertebereiches lagen auch die ermittelten Pt-Gehalte im Oberboden am Standort Rostock 2007 (576 mg kg⁻¹), während der Standort Trenthorst mit einem Pt-Gehalt >700 mg kg⁻¹ zu den mit P besser versorgten Böden zählte. Laut regionalspezifischer Klassifizierung nach dem Pdl-Gehalt gehörten die Böden beider Feldversuche jedoch der P-Gehaltsklasse C an (LUFA Rostock 2004, LWK Schl.-H. 2009). Im Feldversuch von Adekayode und Olojugba (2010) hatte Düngung mit (Holz-)Asche auf Boden ohne P-Mangel keine Effekte auf die verfügbaren P-Gehalte im Boden. Daher könnte geschlussfolgert werden, dass die Düngung am Standort Trenthorst aufgrund der bereits angesprochenen hohen pH-Werte des Bodens in Kombination mit optimalen Pdl-Gehalten keine Effekte hinsichtlich Boden-Nährstoffgehalten, pflanzlicher P-Aufnahme sowie Ertrag zeigte. Obwohl in Rostock ebenfalls keine signifikanten Effekte der Asche-Düngung auf die P-Gehalte (Pw, Pdl) des Bodens zu den Probenahmeterminen beobachtet werden konnten, deuteten erhöhte P-Aufnahmen der Pflanzen und Ertragssteigerungen auf eine verbesserte P-Verfügbarkeit hin.

Der **Versuchsfaktor Zwischenfrucht** hatte sich im Gegensatz zur Düngung signifikant auf die P-Gehalte im Ober- und Unterboden ausgewirkt. Werden Zwischenfrüchte als Gründünger in den Boden eingearbeitet, wirken sie positiv auf bodenchemische, -biologische und -physikalische Prozesse (Lütke Entrup 2001). Die Einarbeitung von organischer Substanz in Form von Pflanzenresten in den Boden führt in der Regel zu verbesserter P-Verfügbarkeit (Li et al. 1990, Eichler-Löbermann et al. 2008b). In Böden mit hoher PSC lagern sich beim Abbau der organischen Substanz organische Anionen an potentielle P-Bindungsplätze an und bewirken damit eine Verringerung der für P verbleibenden Sorptionskapazität (Iyamuremye et al. 1996, Nziguheba et al. 1998). Infolge eines höheren P-Sättigungsgrades steigt der Gehalt an wasserlöslichem P (Werner und Trimborn 2008), was für die P-Versorgung der Hauptfrucht förderlich ist. Im Rostocker Feldversuch wurden infolge des Zwischenfruchtanbaus sowohl im Februar 2008 als auch nach der Ernte im September 2008 signifikant erhöhte Pw- und Pdl-Gehalte im Boden im Vergleich zur Kontrolle ohne Zwischenfrucht ermittelt (*Kap. 5.2.2, Tab. 22 und Tab. 23*). Es ergab sich die Frage, von welchem Ausmaß an freigesetztem P aus der Zwischenfruchtbiomasse ausgegangen werden kann. Untersuchungen haben ergeben, dass eine P-Freisetzung aus pflanzlichen Resten im

Boden erfolgt, sofern diese einen P-Gehalt von mindestens 0,1 bis 0,3 % aufweisen (Bumaya und Naylor 1988, Nziguheba et al. 1998, Kwabiah et al. 2003). Die P-Konzentrationen im Spross der Zwischenfrüchte am Standort Rostock betrugen zwischen 0,4 % (Grünroggen) und 0,5 % (Phacelia) (siehe *Tab. A-9* im Anhang). Da Phacelia im Vergleich zu Grünroggen fast das Dreifache an Biomasse ausgebildet hatte, könnte die demzufolge höhere P-Aufnahme von Phacelia (*Kap. 5.2.1, Tab. 18*) zu höheren Pw- und Pdl-Gehalte im Boden als nach Anbau von Grünroggen beigetragen haben. Generell sollte beim Vergleich von Zwischenfrüchten und ihrer positiven Wirkung auf die P-Verfügbarkeit im Boden beachtet werden, dass die Menge an zugeführtem Biomasse-C die Aktivität und den P-Bedarf der Mikroorganismen beeinflusst (Iqbal 2009). Außerdem bestehen zwischen den pflanzlichen Biomassen teilweise große Unterschiede in ihrer Zersetzbarkeit infolge unterschiedlicher C:N-Verhältnisse und Lignin-Gehalte. Wie viel Nährstoffe aus den pflanzlichen Resten zur Folgenutzung zur Verfügung stehen bzw. welche Mineralisationsraten zu erwarten sind, ist aufgrund der Komplexität des P-Kreislaufs und der Zersetzungs- und Nährstofffreisetzungsprozesse, die im Zusammenhang mit dem P-Gehalt des Bodens und dem N:P-Verhältnis der Biomasse stehen, schwer einzuschätzen (Dorado et al. 2003, Oberson und Joner 2005, Bhupinderpal-Singh und Rengel 2007). Jedoch kann eine vollständige Umsetzung der pflanzlichen Substanz von Grünroggen und Phacelia am Standort Rostock erst nach Einarbeitung der Zwischenfrüchte im Frühjahr erfolgt sein und sich deshalb erst in der Bodenprobenahme im September 2008 ausgewirkt haben. Somit sind die signifikant erhöhten Pw- und Pdl-Gehalte nach Phacelia- und Grünroggenanbau zum Bodenprobenahmetermin Ende Winter/zeitiges Frühjahr um so bemerkenswerter, da diese Werte für ein hohes Nährstoffmobilisierungsvermögen der beiden Zwischenfruchtarten und Rhizosphäreneffekte sprechen. Auch frühere Versuche von Eichler (2004) und Eichler-Löbermann et al. (2008b) bestätigen das hohe P-Mobilisationsvermögen von Phacelia innerhalb der Vegetationsperiode, da ebenfalls hohe P-Gehalte im Boden zu Vegetationsbeginn ermittelt wurden, als eine vollständige Umsetzung der organischen Substanz von Phacelia noch nicht stattgefunden haben kann. Ein zusätzlicher positiver Zwischenfruchteffekt neben der Nährstoffmobilisierung, -speicherung und -freisetzung besteht aufgrund geringerer Erosionsverluste infolge Bodenbedeckung (Lütke Entrup 2001).

Die Auswirkung des Zwischenfruchtanbaus auf den P-Haushalt des Bodens lässt sich anhand der P-Aufnahmen der Zwischenfrüchte zum Beprobungstermin im Herbst abschätzen. Aufgrund der wesentlich höheren Biomasseerträge und Nährstoffgehalte (*Tab. A-9* im Anhang) von Phacelia im Vergleich zum Grünroggen, war ihre P-Aufnahme mehr als dreifach so

hoch wie die des Grünroggens (siehe *Kap. 5.2.1, Tab. 18*), wodurch nach Umsetzung der pflanzlichen Substanz auch mehr P freigesetzt werden konnte. Teilweise ist die höhere Ertrags- und Aufnahmeleistung der Phacelia durch die etwas längere Wachstumszeit (25 Tage vor Grünroggen gedrillt, siehe *Kap. 4.2.2*) begründet. Generell gilt Phacelia jedoch als eine sehr P-effiziente Zwischenfruchtart (hohe P-Aufnahme), u.a. aufgrund spezifischer Wurzel- ausprägung. In Untersuchungen von Bodner et al. (2010) war Phacelia im Vergleich zu anderen Zwischenfrüchten (Wicke, Senf, Roggen) die Art mit der intensivsten Durchwurzelung in der Nähe der Bodenoberfläche. In den eigenen Gefäßversuchen (siehe *Kap. 5.3.1, Tab. 29 und Tab. 30*) lag Phacelia mit den Wurzelgewichten und Wurzellängen, bezogen auf das Gefäßvolumen, allerdings eher im Mittelfeld der untersuchten Zwischenfrüchte. Dass die hohe P-Aufnahme von Phacelia in diesem Fall (siehe *Kap. 5.3.1, Tab. 28*) eher mit dem physiologischen Aneignungsvermögen begründet werden kann, wird auch an der für diese Art fehlenden Korrelation zwischen P-Aufnahme und Wurzellänge deutlich (siehe *Tab. A-14* im Anhang). Positive Effekte von Phacelia auf die Nährstoffverfügbarkeit bzw. Verbesserung der P-Löslichkeitsverhältnisse im Boden lassen sich auf die Änderung der Bodenreaktion zurückführen (Eichler-Löbermann et al. 2009), wie auch im Gefäßversuch zu erkennen war. Fruchtartenabhängige pH-Wert-Veränderungen ließen sich jedoch besser in den Gefäßversuchen analysieren (siehe *Kap. 5.3.2*). In den Feldversuchen konnte kein Zwischenfruchteffekt auf den pH-Wert nachgewiesen werden, was darin begründet sein kann, dass pH-Effekte vor allem im unmittelbaren Rhizosphärenbereich durch Wurzel-exsudationen zu beobachten sind (Ottow 2011).

Der Zwischenfruchtanbau hatte in Rostock nicht nur Effekte auf die P-Gehalte des Bodens, sondern auch auf die P-Aufnahme und den Ertrag der Hauptfrucht. Die signifikant erhöhten P-Aufnahmen von Mais zur Zwischenernte zeigen einerseits einen hohen P-Bedarf von Mais in der Jugendentwicklung, sprechen andererseits aber auch für eine gute P-Verfügbarkeit nach dem Zwischenfruchtanbau. Je nach Zwischenfruchtart und deren Wachstumsbedingungen fallen die Effekte auf die Hauptfrucht sehr unterschiedlich aus. In Untersuchungen von Steffens et al. (2003) hatte sich der Raps als Zwischenfrucht nicht auf die P-Konzentration oder den Ertrag von Silomais ausgewirkt, und auch Jensen et al. (2005) konnten keine Zwischenfruchtwirkung (u.a. von Weidelgras, Lupine und Ampfer) auf Ertrag oder/und P-Gehalt von Sommergerste feststellen. Der Anbau von Weidelgras führte im Feldversuch von Eichler-Löbermann et al. (2008b) zu verringerten Erträgen der Hauptfrucht, während nach Phacelia als Zwischenfrucht Ertragssteigerungen verzeichnet wurden.

6.3 Effekt der Biomasseaschen auf die Schwermetallgehalte im Boden

Für die pflanzliche Ernährung sind nicht nur Makronährstoffe wie z.B. N, P, K und Mg von Bedeutung, sondern als Mikronährstoffe auch einige **Schwermetalle** wie Cu, Fe, Mn, Mo, Zn und Ni (Kratz und Schnug 2005). Zu hohe Konzentrationen der Elemente Cu, Ni und Zn im Boden können jedoch toxische Effekte auf Organismen haben (Auld 2001, Broadley et al. 2007, Yruela 2009). Schwermetalle können über verschiedene Wege, wie z.B. atmosphärische Deposition und Düngemittel, in die Nahrungskette eingetragen werden. Verbunden mit dem Ziel der Produktion gesunder Nahrungsmittel ist deshalb aus Vorsorgegründen sicherzustellen, dass die Zusammensetzung der Düngemittel/Aschen den Anforderungen der DüMV entspricht und es nicht es nicht zu einer Anreicherung von Schadstoffen im Boden kommt. Das bedeutet auch, dass die in Biomasseaschen enthaltenen Schwermetalle nicht zum Überschreiten der Vorsorgewerte (nach BBodSchV, siehe *Kap. 5.2.3, Tab. 26*) im Boden führen dürfen. Daher wurden die Schwermetallgehalte in den Aschen (siehe *Tab. A-1* im Anhang) und im Boden der beiden Feldversuche untersucht (siehe *Kap. 5.2.3, Tab. 26*). Die Pflanzenverfügbarkeit bzw. Mobilität von Schwermetallen im Boden ist elementspezifisch, aber auch abhängig von den Bodeneigenschaften, wie dem pH-Wert, der Verfügbarkeit an Sorbenten im Boden und der Sorptionskonkurrenz durch andere Kationen (Reddy et al. 1995, Hintermaier-Erhard und Zech 1997, Kabata-Pendias 2001). In den beiden Feldversuchen mit unterschiedlichen Bodenbedingungen waren auch nach einer Vegetationszeit nach Ascheausbringung keine erhöhten Schwermetallkonzentrationen im Vergleich zu den ermittelten Werten vor der Ausbringung nachweisbar.

Um die potentielle Gefährdung des Bodens durch langfristige Ascheausbringung im Hinblick auf eine evtl. Schwermetallanreicherung und die Überschreitung der Vorsorgewerte nach BBodSchV einschätzen zu können, wurde ein „worst case“-Szenario aufgestellt (siehe *Tab. A-27* im Anhang). Zunächst wurde für die beiden Versuchsstandorte berechnet, welche Menge an Schwermetallen (Pb, Cd, Cu, Ni, Zn) theoretisch ausgebracht werden könnte (abzüglich der im Boden der Feldversuche derzeit vorhandenen Gehalte), bis ein Überschreiten der Vorsorgewerte zu erwarten wäre (siehe *Kap. 4.4.3*). Anschließend wurden anhand der Schwermetallgehalte der drei getesteten Aschen die Aschemengen ermittelt, die zu solch riskant hohen Schwermetallausbringungsmengen führen würden, die zuvor berechnet wurden. Mittels dieser Aschemengen zwischen 50 t ha⁻¹ und 60.000 t ha⁻¹ (je nach Element und Asche) ließ sich unter Berücksichtigung der tatsächlichen Ascheausbringungsmengen (entsprechend der Versuche in Rostock und Trenthorst) und bei Vernachlässigung eines pflanzlichen Entzuges der bis zum Erreichen der Vorsorgewerte notwendige Zeitraum

ermitteln. Die kürzeste Zeitspanne betrifft das Element Zn am Standort Trenthorst mit ca. 200 Jahren bei durchschnittlich jährlicher Applikation von 0,25 t GA pro ha. Dem stehen zeitliche Dimensionen von bis zu 140.000 Jahren gegenüber, bis bei jährlicher Ausbringung von SA oder GA die Pb-Vorsorgewerte evtl. überschritten wären. Diese Berechnung soll verdeutlichen, dass das Schwermetallrisiko bei Aschen aus unbehandelter Biomasse äußerst gering ist. Dennoch ist entsprechend der Düngegesetzgebung die Überprüfung der Schwermetallgehalte der auszubringenden Aschen unumgänglich. Somit kann verhindert werden, dass schädliche Bodenveränderungen auftreten, die eine Akkumulation von Schwermetallen in der Nahrungskette verursachen könnten.

6.4 Fruchtarten- und bodenabhängige Düngeeffekte der Biomasseaschen im Vergleich zu Triplesuper-P im Gefäßversuch

In den Gefäßversuchen ließen sich – u. a. aufgrund geringerer P-Ausgangsgelalte der Böden sowie des begrenzten Bodenvolumens – generell deutlichere Düngeeffekte als in den Feldversuchen ermitteln. Ein Düngeeinfluss der Biomasseaschen konnte sowohl auf die P-Aufnahmen, wurzelmorphologische Veränderungen und Erträge der Fruchtarten als auch im Hinblick auf die P-Verfügbarkeit im Boden festgestellt werden. Zudem wurden diese Unterschiede in Abhängigkeit der Bodenart verzeichnet. Auch Wechselwirkungen zwischen den Versuchsfaktoren traten auf.

Die Biomasseaschen zeigten in allen vier Gefäßversuchen stärkere Effekte auf die **P-Aufnahme** der Pflanzen (Spross) als auf die **Erträge**, weil der Ertrag in größerem Maße auch durch andere Komponenten beeinflusst wird. Die gleiche Beobachtung machten auch Lopez et al. (2009) in einem Gefäßversuch, in dem signifikant höhere P-Aufnahmen und tendenziell gesteigerte Erträge von Weidelgras und Ölrettich nach Düngung mit RESA im Vergleich zur Kontrolle und zur TSP-Variante ermittelt wurden. Eichler-Löbermann et al. (2008a), die den Einfluss von Geflügelmistasche auf die P-Aufnahme und den Ertrag von Phacelia, Buchweizen, Weidelgras und Ölrettich auf lehmigem Sand untersuchten, fanden ebenfalls positive Effekte der Asche bezüglich Ertrag, aber eine noch stärkere Beeinflussung der P-Aufnahme. Aufgrund der Aschezusammensetzung kann die Aschewirkung auf die P-Aufnahme auch auf Kalkungs- und/oder andere Effekte zurückgeführt werden. Aschen verfügen allgemein über eine alkalische Wirkung, die – wie verschiedene Versuche zeigten (Muse und Mitchel 1995, Clapham und Zibilske 1992) – jedoch zeitlichen Schwankungen unterliegen kann. D.h., die genannten Autoren gehen von einem kurzfristig pH-steigernden

Effekt der Aschen aus, welcher aber längerfristig nicht stabil ist (und daher auch im Feldversuch nicht nachweisbar war). Dass in den Gefäßversuchen vor allem die SA eine Erhöhung des pH-Wertes unabhängig von der Frucht- oder Bodenart bewirkte (*Kap. 5.3.2*), liegt wahrscheinlich vor allem an der wesentlich höheren Ausbringungsmenge dieser Asche im Vergleich zu RESA und GA.

Vordergründig lassen sich die hohen P-Aufnahmen (besonders in den Varianten RESA und GA) sicherlich mit der Pt-Ausbringungsmenge und einem hohen pflanzenverfügbarem P-Anteil in den Aschen erklären. Zwar waren nur max. 19,5 % des Pt (der GA) wasserlöslich (siehe *Kap. 5.1, Tab. 15*), in Analysen von Eichler-Löbermann et al. (2008a) und einer eigenen Vergleichsuntersuchung betrug der zitronensäurelösliche Anteil am Pt-Gehalt der Aschen jedoch über 80 % (siehe *Kap. 5.1*). Da die Erträge der Asche-Varianten in den oben erwähnten Versuchen denen einer leicht-löslichen P-Düngevariante (KH_2PO_4 bzw. TSP) entsprachen oder diese sogar übertrafen, ist davon auszugehen, dass das fruchtartsspezifische Ertragspotential ausgeschöpft wurde. Ertragssteigerungen infolge Aschezufuhr um bis zu 49 % (Mais in der GA-Variante auf Lehm) sprechen für eine gute Asche-P-Verwertung. In Versuchen von Erich und Ohno (1992) konnte Mais seinen Ertrag (um bis zu 100 %) nach Düngung mit (Holz-)Asche im Vergleich zur Kontrolle (ohne P) steigern. Adu-Dapaah et al. (1994) berichten von erhöhten Maiserträgen nach Düngung mit Kakaoschoten-Asche. Gesteigerte Weidelgraserträge wurden von Nkana et al. (1998) nach Düngung mit Holzasche und von Yusiharni (2001) nach Zufuhr von Geflügelmistasche ermittelt. In den eigenen Versuchen reagierte Weidelgras auf eine Düngung mit Asche nur auf dem Sandboden mit Ertragszuwächsen in der RESA-Variante (26 % mehr Ertrag als in der Kontrolle). Buchweizen zeigte keine positiven Ertragseffekte nach P-Düngung (Asche oder TSP) und hatte – wahrscheinlich aufgrund hoher P-Effizienz (siehe *Kap. 6.5*) – dennoch vergleichsweise hohe Erträge auch ohne P-Zufuhr. Amann und Amberger (1989), die die Buchweizen-Morphologie (Spross und Wurzel) unter verschiedenen P-Versorgungsstufen untersuchten, fanden ebenfalls kein verstärktes Sprosswachstum unter vermehrter P-Zufuhr. Ihre Beobachtung, dass die P-Aufnahme von Buchweizen bei guter P-Versorgung anstieg, konnte auch in den eigenen Versuchen bestätigt werden. Buchweizen hatte in den P-Düngevarianten TSP, GA und RESA mehr P aufgenommen als in der SA-, KCl- und Kontrollvariante (siehe *Kap. 5.3.1, Tab. 28*), was mit erhöhten P-Konzentrationen im Spross in den mit P gut versorgten Düngevarianten zusammen hing (*Tab. A-28* im Anhang). Generell muss diese Art besonders gut in der Lage sein, P aus dem Boden zu mobilisieren. Dass Buchweizen speziell an P-

Mangelstandorte angepasst ist, wurde bereits von Amann und Amberger (1989) und Suzuki et al. (2009) berichtet.

Sowohl der Ertrag als auch die P-Aufnahme der Fruchtarten wurden von der **Bodenart** beeinflusst. Insgesamt war bei fünf von acht Fruchtarten (Blaue Lupine, So-Gerste, So-Raps, Ölrettich und Phacelia) die P-Aufnahme auf dem Lehm Boden höher als auf dem Sandboden. Dies ist zurückzuführen auf die vergleichsweise höheren Erträge auf dem Lehm. Bei der Blauen Lupine lassen sich die höheren Erträge eventuell mit dem sortenspezifischen Ertragspotential erklären. Nach Guddat (2009) bildet die Sorte Boregine (im eigenen Versuch 2008 auf Lehm angebaut) höhere Erträge als die Sorte Borlu (2007 auf Sand kultiviert). Generell können das höhere Ertragspotential und die durchschnittlich höheren P-Aufnahmen sowie stärkeren Düngeeffekte auf dem Lehm Boden jedoch vielmehr mit der Nährstoffversorgung (v. a. K-Gehalt) und dem Gehalt an organischer Substanz begründet werden. Zu Versuchsbeginn besaß der Lehm eine oTS von 3,6 %, während der Sand nur 2,4 % aufwies. Der durchschnittliche Gehalt an organischer Substanz im Oberboden beträgt 3,5 % (Von Deuel et al. 1960). Aufgrund des höheren oTS-Gehaltes im Lehm Boden ist mit einem engeren C/N-Verhältnis zu rechnen (Guppy et al. 2005), das für eine hohe biologische Aktivität und Mineralisierungsprozesse spricht. Mit der Mineralisierung der organischen Substanz werden die enthaltenen Pflanzennährstoffe, wie z.B. Mg, Fe, N, S freigesetzt (Blume et al. 2010). Größeren Anteil an den Boden-abhängigen Effekten dürfte der K-Versorgungsgrad gehabt haben. Während der Sandboden der K-Gehaltsklasse C angehörte, war der Lehm Boden mit K unterversorgt (Gehaltsklasse B). Da Biomasseaschen Mehrnährstoffdünger sind und zwischen den K- und P-Aufnahmen der Pflanzen positive Korrelationen bestehen, lassen sich die stärkeren Düngeeffekte auf Lehm mit der K-Zufuhr über die Düngung (Aschen und KCl) erklären. Somit war nicht nur die K-Aufnahme (z.B. bei So-Raps und Ölrettich mit hohem K-Bedarf) auf dem Lehm Boden (v. a. in der SA- und KCl-Variante im Vergleich zur Kontrolle) stärker erhöht als auf Sand. Es wurden in den Aschevarianten auf Lehm auch vergleichsweise höhere Steigerungen der P-Aufnahme einiger Arten verzeichnet als auf Sand (z.B. bei Mais, So-Raps und Ölrettich, siehe *Kap. 5.3.1, Abb. 9*).

Da Pflanzen aufgrund unterschiedlicher P-Mobilisierungsstrategien (siehe *Abb. 18*) ein **fruchtartenspezifisches P-Aneignungsvermögen** besitzen, wurde die Fruchtart als zweiter Versuchsfaktor geprüft, indem in den Gefäßversuchen acht verschiedene Kulturen angebaut wurden.

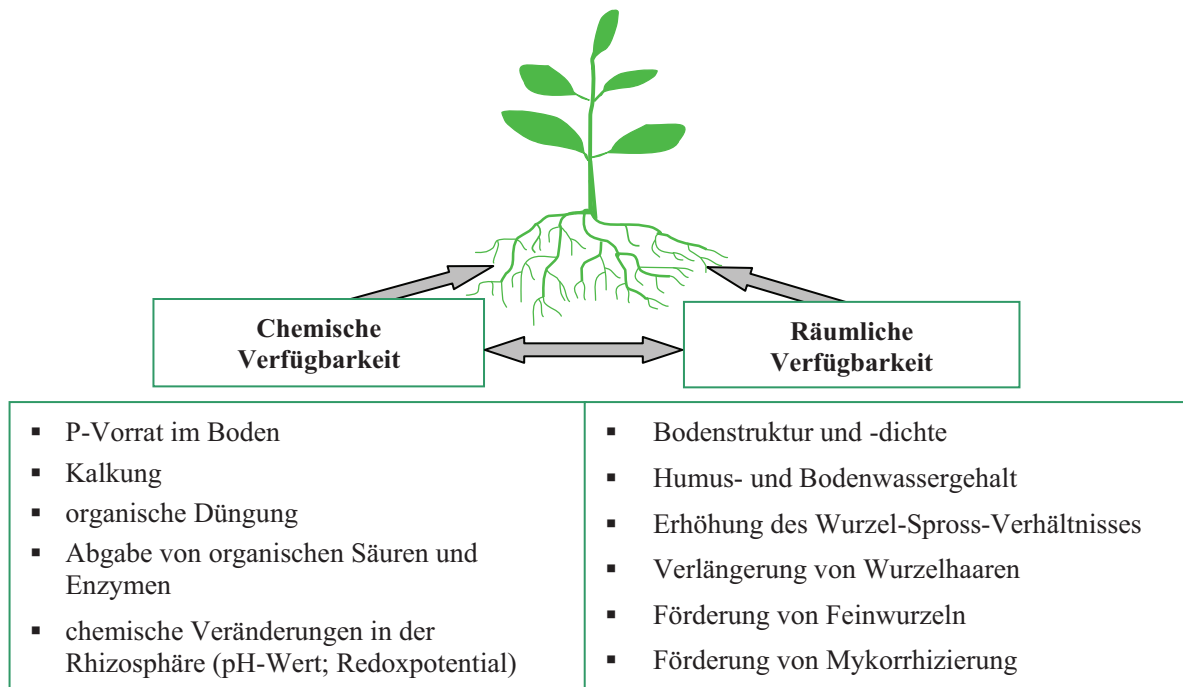


Abb. 18: Chemische und räumliche P-Verfügbarkeit im Boden und deren Einflussfaktoren.

(Quellen: Staunton und Leprince 1996, Dakora und Phillips 2002, Nurruzzaman et al. 2006, Neumann und Römheld 2002, Albert 2011)

Bezüglich P-Aufnahme waren besonders die Fruchtarten der beiden Zwischenfruchtversuche von Interesse. Innerhalb einer Fruchtfolge können Zwischenfrüchte die P-Ernährung der Folgefrucht verbessern, indem sie während des Wachstums P im Boden mobilisieren oder/und nach ihrem Absterben und der Zersetzung der Biomasse P zur Verfügung steht (Eichler-Löbermann et al. 2008b). Die P-Aufnahme von Phacelia war auf beiden Gefäßversuchsböden unabhängig von der Art der P-Düngung erhöht, sobald P zugeführt wurde. Außerdem wies Phacelia im Vergleich zu den anderen Fruchtarten allgemein die höchste P-Aufnahme auf.

Das Vermögen von Fruchtarten, Bodeneigenschaften wie den **pH-Wert** zu beeinflussen (Grinsted et al. 1982), ist als P-Mobilisierungsstrategie bedeutsam. Durch die Ausscheidung von Wurzelexsudaten (Protonen, organische Säuren, wie z. B. Citrat oder Malat) haben Arten, wie z.B. Raps, Buchweizen und Lupine Strategien entwickelt, um die P-Aufnahme zu steigern (Amann und Amberger 1989, Petersen und Böttger 1991, Hoffland 1992, Gerke et al. 2000, Veneklaas et al. 2003, Balík et al. 2007). Die Ansäuerung der Rhizosphäre kann u.a. zu einer verstärkten Löslichkeit von Ca-Phosphat führen (Blume et al. 2010). Von einem hohen P-Aufnahmevermögen aus Ca-Phosphaten berichteten Zhu et al. (2002) für Buchweizen. Dies kann jedoch mit dem Kationen-Aufnahmeverhalten in Zusammenhang stehen, in dem sich nach Van Ray und Van Diest (1979) Pflanzenarten unterscheiden. Eine

exzessive Akkumulation von Kationen in der Pflanze kann in der Abgabe von H^+ und damit in einer Verringerung des pH-Wertes im Boden resultieren, wie z. B. in Versuchen von Anuradha und Narayanan (1991) mit Pferdebohne oder nach Phacelia-Anbau von Eichler-Löbermann und Schnug (2006) ermittelt wurde. Bekele et al. (1983) stellten hohe Ca-Aufnahmen des Buchweizens fest, die ebenfalls einhergingen mit einer H^+ -Freisetzung zur Nutzung schwer löslicher P-Quellen. In den Rostocker Gefäßversuchen wurde eine Verringerung des pH-Wertes im Boden im Vergleich zu den pH-Werten zu Versuchsbeginn besonders nach Anbau von Phacelia und Buchweizen, aber auch Ölrettich festgestellt. Von den Hauptfrüchten senkte die Blaue Lupine den pH-Wert im Lehm Boden im Laufe des Versuches in noch größerem Maße als Raps ab, vermutlich ebenfalls hervorgerufen durch die Exsudation von H^+ oder organischen Säuren über die Wurzeln. Untersuchungen von Egle et al. (2003) bestätigen, dass die Blaue Lupine in hohem Maße Carboxylate absondert, sogar vergleichsweise mehr als die Weiße oder Gelbe Lupine. Die Exsudation niedermolekularer organischer Säuren in den Boden, die das Substrat ansäuern, chelatisieren Metallionen in der Rhizosphäre, wodurch P und einige Mikronährelemente mobilisiert werden (Marschner 1995).

Neben solchen chemischen Modifikationen in der Rhizosphäre, dienen auch **morphologische Wurzelanpassungen** dazu, die P-Versorgung der Pflanzen zu verbessern. Als Beispiel seien die Clusterwurzeln der Weißen Lupine genannt, die vielfach untersucht wurden (Gilbert et al. 1999, Shen et al. 2003, Kania 2005, Shane und Lambers 2005) und Nährstoffe nicht nur morphologisch erschließen, sondern auch zur Absonderung organischer Säuren fähig sind (Dinkelaker et al. 1989, Gerke et al. 1994, Yan et al. 2002).

Die Wurzelmorphologie und auch ihre Beziehung zur P-Aufnahme und zum Sprossertrag wurden in den Gefäßversuchen untersucht. Es gibt viele Hinweise darauf, dass die Wurzelarchitektur ein bedeutender Aspekt der pflanzlichen Produktivität ist, besonders auf Standorten mit geringer Nährstoffverfügbarkeit (Lynch 1995). Veränderungen der Wurzelarchitektur in Bezug auf Oberfläche, Dichte und Länge der Wurzel zur verbesserten Wurzelraumerschließung sind typische Anpassungen an geringe anorganische P-Gehalte infolge geringer P-Mobilität im Boden (Williamson et al. 2001, López-Bucio et al. 2003). Für Untersuchungen zur Nährstoff- und Wasseraufnahme der Pflanzen hängt die Auswahl des geeigneten Kriteriums (Wurzellänge, Wurzelvolumen, Wurzeloberfläche) von dem zu untersuchenden Nährstoff ab. Liegt der Nährstoff in einer niedrigen Konzentration in der Bodenlösung vor und besitzt außerdem eine geringe Mobilität, wie es bei P der Fall ist, so ist die Untersuchung von Wurzellänge oder -oberfläche am zweckmäßigsten (Sattelmacher et al. 1983).

Unter P-Mangel können Pflanzen ihr Wurzelwachstum (z.B. auch über verlängerte Wurzelhaare) verstärken und die P-Aufnahmerate der Wurzeln erhöhen (Zhu et al. 2010). Nach Lynch und Brown (2008) vergrößert sich bei Nährstoffmangel bzw. schlechter Nährstoffverfügbarkeit das Verhältnis aus Wurzelsystem und Spross. Wird das Sprosswachstum bei eingeschränkter Nährstoffversorgung verringert, sind die Blätter mit Kohlenhydraten überversorgt, so dass eine Umverteilung stattfindet. Somit kommt es zu einer Kohlenhydratverlagerung in die Wurzel, wodurch das Wurzelwachstum angeregt werden kann (Nielsen et al. 2001, Hammond und White 2008).

Die eigenen Spross- und wurzelmorphologischen Untersuchungsergebnisse verdeutlichen, dass sich reduziertes P-Angebot durchaus in einer vergleichsweise geringen Sprossmasse auswirkt (*Kap. 5.3.1, Tab. 27*), jedoch die Mehrzahl der untersuchten Fruchtarten in den P-Mangelvarianten kein vergrößertes **Wurzel-Spross-Verhältnis** ausbildete (*Kap. 5.3.1, Tab. 29 und Tab. 30*). Eventuell steht dies im Zusammenhang mit dem Zeitpunkt der Wurzelprobenahme und -untersuchung. In verschiedenen Untersuchungen mit P-Mangelbedingungen wurde ein stimuliertes Wurzelwachstum verzeichnet, jedoch meist nach kurzen Untersuchungszeiträumen von weniger als 20 Tagen (Anuradha und Narayanan 1991, Rychter und Randall 1994). In Versuchen von Mollier und Pellerin (1999) war das Wurzelwachstum von Mais nur in den ersten Tagen nach einsetzendem P-Mangel (wahrscheinlich infolge der Kohlenhydrat-Allokation) verstärkt, dagegen zu späterem Zeitpunkt (wegen des allgemein beeinträchtigten Pflanzenwachstums) stark reduziert.

Zumindest nach Anbau der P-effizienten Art Buchweizen auf Lehm konnte in den Varianten ohne P-Zufuhr (Kontrolle und KCl) und in der SA-Variante ein erhöhtes Wurzel-Spross-Verhältnis ermittelt werden. Auch bei der Fruchtart Phacelia ließ sich ein Einfluss der Düngung auf das Wurzel-Spross-Verhältnis feststellen. Dies scheint jedoch eher mit dem Nährstoff Kalium in Zusammenhang zu stehen, da sich nach Damm (2010) erhöhte Bodenkalkiumgehalte positiv auf den Bodenwasserhaushalt und das Wurzelwachstum auswirken können. Die gute K-Versorgung führte in den Varianten SA und KCl auf Sandboden bei Phacelia (die leichte, durchlässige und feuchte Standorte bevorzugt) neben besonders hohen K-Aufnahmen auch zu verbessertem Wurzelwachstum. D.h., Wurzelgewicht und -länge sowie Wurzel-Spross-Verhältnis waren in den genannten Düngevarianten höher als in der Kontrolle ohne K- und P-Zufuhr (siehe *Kap. 5.3.1, Tab. 29*).

Die P-Düngung hatte Auswirkungen auf die **Wurzellänge** und P-Aufnahme. Bei einigen Arten (Mais, So-Raps, Weidelgras und Buchweizen) wurden signifikant positive Korrelationen zwischen Wurzellänge und P-Aufnahme ermittelt (*Tab. A-14 im Anhang*). Otani und Ae (1996) fanden ebenfalls eine positive Korrelation zwischen pflanzlicher P-Aufnahme und

Wurzellänge, jedoch nur sofern der Boden durch eine hohe P-Verfügbarkeit gekennzeichnet war und nicht bei geringer P-Verfügbarkeit oder limitiertem Bodenvolumen. Sánchez-Calderón et al. (2005) berichten von drastischen Veränderungen der Wurzelarchitektur von *Arabidopsis thaliana* bei P-Mangelbedingungen. Diese äußerten sich vor allem in reduziertem Längenwachstum der Hauptwurzel. In Untersuchungen von Amann und Amberger (1989) waren die Wurzellänge und -masse von Buchweizen bei geringer P-Zufuhr größer als bei hoher P-Stufe, was sich in den beiden Gefäßversuchen (siehe *Kap. 5.3.1*) nicht bestätigen ließ. Nach Eichler (2004) kann sich bei Nährstoffmangel die absolute Wurzellänge trotz einer Vergrößerung des Wurzelsystems im Vergleich zum Spross jedoch auch verringern.

P-Mangel wirkte sich auf die **Wurzelbiomasse** der Fruchtarten unterschiedlich aus. Mais bildete in der Kontrollvariante auf Lehm eine geringere Wurzel-TM aus als nach P-Zufuhr mit z.B. RESA oder SA, während Khamis et al. (1990) infolge reduzierten P-Angebots keine Effekte auf die Wurzelbiomasse von Mais feststellten. Gerste reagierte in den Rostocker Gefäßversuchen ebenso wie in den Untersuchungen von Sicher und Kremer (1988) nicht mit veränderter Wurzelmasse auf unterschiedliches P-Angebot.

Wie erwartet wurden artbedingt große Unterschiede in der Wurzelmorphologie, vor allem auch in den Versuchen mit Zwischenfrüchten beobachtet. Im Vergleich der vier Arten hatte Buchweizen trotz geringster Wurzellänge die signifikant höchste Wurzel-TM (*Kap. 5.3.1*), da von Buchweizen bekannt ist, dass er eine Pfahlwurzel ausbildet (Campbell 1997). Weidelgras hatte unabhängig von der Art der Düngung das größte Wurzel-Spross-Verhältnis, wie auch Eichler (1997) in ihren Untersuchungen verschiedener Zwischenfrüchte und deren Anpassung an unterschiedliche P-Versorgung feststellte. In den Versuchen mit Hauptfrüchten wurde die geringste Wurzellänge bei der Blauen Lupine ermittelt. Leguminosen bilden häufig Wurzeln mit geringer Länge aus und reagieren auf P-Mangel mit physiologischen Veränderungen (Eichler 2004).

Um den Einfluss der Düngung mit Aschen auf die P-Fractionen des Bodens untersuchen zu können, wurden zunächst die **Pt-Gehalte** im Boden bestimmt. Diese lagen nach Versuchsende zwischen 474 mg kg⁻¹ (Kontrolle, Lupine, Lehm) und 580 mg kg⁻¹ (RESA, Lupine, Lehm) und somit im oberen Mittelfeld des von Cross und Schlesinger (1995) angegebenen Pt-Wertebereiches von 200 bis 684 mg kg⁻¹ (Durchschnitt verschiedener ungedüngter bzw. nicht kultivierter Böden). Die Biomasseaschen, besonders GA und RESA mit hohen P-Gehalten, hatten wie TSP zu einer Steigerung der Pt-Gehalte im Boden im Vergleich zur ungedüngten Kontrolle geführt (siehe *Kap. 5.3.2, Abb. 11*).

Der **DPS**-Wert, der den Anteil der mit Pox besetzten P-Sorptionsplätze angibt (Breeuwsma et al. 1995), wurde durch die Versuchsfaktoren Düngung und Fruchtarten beeinflusst. Eine Düngung mit TSP oder Aschen führte zur Erhöhung der DPS-Werte im Vergleich zur Kontrolle, so dass dieses sorbierte P durch Desorptionsprozesse zur P-Ernährung der Pflanzen beitragen kann.

Der Nährstoff P liegt in der Bodenlösung nur in sehr geringen Konzentrationen vor, die für die Ernährung von Feldfrüchten nicht ausreichen würden (Blume et al. 2010). Daher muss in der Hauptwachstumsphase das der Bodenlösung entzogene Phosphat ca. 20 mal pro Tag aus weniger löslichen Fraktionen nachgeliefert werden, so dass neben den Gesamtgehalten im Boden für die Pflanzenverfügbarkeit von P auch das Nachlieferungsvermögen des Bodens bedeutsam ist (Müller und Römheld 2005). Trotz des relativ geringen wasserlöslichen P-Anteils in den Aschen (*Kap. 5.1*) waren die **Pw-Gehalte** sowie die **Pdl- Gehalte** im Boden der Aschevarianten gegenüber der Kontrollvariante zum Ende der Gefäßversuche erhöht, so dass es infolge der P-Mobilisierung der Fruchtarten und bodenchemischer Prozesse zu einer guten P-Verfügbarkeit aus den Aschen gekommen sein muss.

Zwischen der P-Aufnahme fast aller untersuchten Fruchtarten und den jeweiligen Pw- bzw. Pdl-Gehalten im Boden wurden zu Versuchsende signifikant positive Korrelationen ermittelt (siehe *Tab. A-14* im Anhang), d.h. dass mehr P zugeführt als genutzt wurde und demzufolge trotz hoher P-Aufnahmen die gut verfügbaren P-Gehalte im Boden der P-Düngevarianten höher waren als in den Varianten ohne P. Es ist hervorzuheben, dass in den Gefäßversuchen kaum Unterschiede in den Pw-Gehalten des Bodens zwischen den P-Düngevarianten (TSP und Aschen) gefunden wurden (*Kap. 5.3.2, Tab. 32*), obwohl TSP 80 % bis 93 % wasserlösliches P enthält (Rajan 1985, Mullins und Sikora 1995) und die Wasserlöslichkeit von P in Biomasseaschen gewöhnlich unter 1 % liegt (Eichler-Löbermann et al. 2008a). In den eigenen Ascheuntersuchungen wurden wasserlösliche P-Konzentrationen von <1 % (RESA) bis ca. 20 % (GA) festgestellt.

Die ermittelten Pw- und Pdl-Gehalte unterschieden sich in Abhängigkeit der angebauten Fruchtart. Die hohen Pdl-Gehalte im Boden nach Anbau von Blauer Lupine sind wahrscheinlich nicht nur auf die geringere P-Aufnahme dieser Art, sondern auf zusätzliche Mobilisierungseffekte zurückzuführen. Ein starkes P-Mobilisationsvermögen für Lupine wurde in vielen Untersuchungen – wenn auch meist für Weiße Lupine (*L. albus*), die über Clusterwurzeln verfügt – nachgewiesen (Gilbert et al. 1999, Shen et al. 2003, Kania 2005). Ergebnissen von Egle et al. (2003), Pearse et al. (2007) und Römer (2009) zufolge, bildet die Blaue Lupine (*L. angustifolius*) zwar keine Cluster-Wurzeln, kann jedoch mittels hoher

Kationen-Aufnahme und Abgabe von Carboxylaten Nährstoffe gut verfügbar machen. In den eigenen Versuchen wurde für die Blaue Lupine auf Lehm, trotz des geringsten Wurzel-Spross-Verhältnisses (*Kap. 5.3.1, Tab. 30*), eine ebenso hohe P-Aufnahmeeffizienz ermittelt wie bei Mais (*Kap. 5.3.3, Abb. 16*), der auf diesem Boden das höchste Wurzel-Spross-Verhältnis hatte. Die P-Aufnahmeeffizienz der Lupine kann (entsprechend der ermittelten pH-Werte im Boden, siehe *Kap. 5.3.2, Tab. 31*) auf pH-absenkende Rhizosphärenprozesse zurückgeführt werden.

Die **P-Fraktionierung** wurde mit dem Ziel durchgeführt, die Wirkung von Biomasseaschen auf die unterschiedlich bioverfügbaren P-Formen des Bodens zu untersuchen. Die von Hedley entwickelte sequentielle P-Fraktionierung (Hedley et al. 1982) umfasst folgende Fraktionen: Harz-P, 0,5 M NaHCO₃-P, 0,1 M NaOH-P, 1 M HCl-P oder 1 M H₂SO₄-P sowie Residual-P und ist eine der gebräuchlichsten Methoden zur Charakterisierung der P-Pools in Bodenproben (Negassa und Leinweber 2009). Das Prinzip der sequentiellen Extraktion beruht auf der unterschiedlichen Löslichkeit der Phosphate in Abhängigkeit des Boden-pH-Wertes. Nach Blume et al. (2010) fördern sinkende bzw. niedrige pH-Werte die Löslichkeit von Ca-Phosphaten, während bei Al- und Fe(III)-Phosphaten die Löslichkeit mit steigendem pH-Wert zunimmt. Daher wird die NaOH-P-Fraktion den Fe- und Al-gebundenen P-Formen zugerechnet (Hedley et al. 1982, Cross und Schlesinger 1995) und die H₂SO₄-P-Fraktion als stabil Ca-gebundenes P betrachtet (Schlichting und Leinweber 2002, Blume et al. 2010).

Im Mittel der angebauten Fruchtarten wurden die leicht verfügbaren bzw. labilen P-Fraktionen (Harz-P, NaHCO₃-P), von denen man annimmt, dass sie an Oberflächen kristalliner P-Verbindungen, Sesquioxide und Karbonate adsorbiert sind (Tiessen et al. 1984), durch die P-Zufuhr am meisten gesteigert. Die Fraktionen Harz-P, NaHCO₃-P und NaOH-P repräsentieren überwiegend austauschbares P. Zugeführtes P wird zuerst in die Harz-P-Fraktion, dann in die NaHCO₃-P-Fraktion und anschließend in die NaOH-P-Fraktion transformiert (Schmidt et al. 1996, Bühler et al. 2002). Allerdings lassen sich umgekehrt auch Teile der NaHCO₃-P-Fraktion und der weniger labilen NaOH-P-Fraktion in der Harz-P-Fraktion wiederfinden, sofern der Harz-P-Pool zuvor erschöpft wurde (Hartono 2008) und die Fruchtart gut zur P-Mobilisierung fähig ist. In einem Gefäßversuch von Bachmann (2007) mit Geflügelmistasche wurden diesbezüglich Unterschiede zwischen Fruchtarten ermittelt. Buchweizen hatte den Harz-P-Pool einer ungedüngten Kontrollvariante wesentlich stärker entleert als die Vergleichsarten und hinterließ dafür höhere H₂SO₄-P-Gehalte im Boden.

Die P-Aufnahme der verschiedenen Fruchtarten war mit den ersten beiden P-Fraktionen (Harz-P und NaHCO₃-P) häufig signifikant positiv korreliert (*Tab. A-14* im Anhang), d. h.

die P-Zufuhr (mit TSP oder Aschen) führte trotz P-Aufnahme durch die Pflanzen zu einer Erhöhung der leicht verfügbaren P-Fractionen im Boden. Somit wurde durch die P-Düngung ein starkes Absinken dieser P-Fractionen im Vergleich zur Kontrollvariante verhindert, oder zumindest die von den Pflanzen entzogene P-Menge wieder aufgefüllt. Die Aschen hatten den pflanzenverfügbaren P-Pool in gleichem Maße oder teilweise sogar stärker als der leicht-lösliche P-Dünger TSP erhöht. In Untersuchungen von Negassa (2009) führte die Applikation von landwirtschaftlich-industriellen Nebenprodukten ebenfalls zur Erhöhung der labilen P-Pools. Nach Schmidt et al. (1997) trägt die Möglichkeit, den pflanzenverfügbaren P-Anteil des Bodens abschätzen zu können, dazu bei, nachhaltige Landnutzung betreiben zu können.

Mit dem Dünger zugeführtes P wird in sauren Böden – sofern die Gleichgewichtskonzentration im Boden überschritten ist – an Oberflächen von Tonmineralen und Oxiden sorbiert und fällt zu Al/Fe-Phosphaten aus. Somit wird NaOH-extrahierbares P gebildet (Blume et al. 2010). Dass nach Asche-Düngung keine oder nur eine geringfügige Erhöhung der NaOH-P-Fraktion ermittelt wurde bzw. in der SA-Variante die NaOH-Gehalte sogar abgesunken waren, lässt sich möglicherweise auf pH-Effekte zurückführen. Kalkung verringert die Protonierung der Sorbenten und damit die P-Sorptionskapazität (Werner und Trimborn (2008). Verma et al. (2005) wiesen bei kontinuierlicher P-Düngung und zusätzlicher Kalkung eine niedrigere (anorg.) NaOH-P-Konzentration als in der ungekalkten P-Düngervariante nach. Von McKenzie et al. (1992) wurden in gekalkten Parzellen ebenfalls geringere NaOH-P-Gehalte als in den Parzellen ohne Kalkung ermittelt. Mit einer zumindest zeitweisen pH-Erhöhung durch Aschezufuhr kann auch die mikrobielle Aktivität gesteigert worden sein, die zu einem Abbau der organischen Bodensubstanz und infolge dessen zu einer Verringerung der (org.) NaOH-P-Gehalte geführt haben kann. Dieser Kalkungseffekt der SA wurde vor allem bei Buchweizen, der im Gefäßversuch auf Lehm Boden angebaut wurde, deutlich. Bei dieser Kombination aus Fruchtart, Bodenart und Asche-Düngung (SA) konnte die TA (tatsächliche Ausnutzung des Düngers) nicht ermittelt werden (*Kap. 5.3.3, Abb. 17*), da die P-Aufnahme wesentlich niedriger war als in der Kontrolle (*Kap. 5.3.1, Abb. 9*), wie auch an der geringen P-Aufnahmeeffizienz (*Kap. 5.3.3, Abb. 16*) ersichtlich wurde. Schließlich gilt Buchweizen nach Körber-Grohne (1988) als kalkmeidend. Außerdem wurde bei Buchweizen ein Zusammenhang zwischen P-Aufnahme und H_2SO_4 -P im Lehm Boden offenbar. Die P-Aufnahme war mit dem H_2SO_4 -P signifikant negativ korreliert (*Tab. A-14* im Anhang). In der SA-Variante war die H_2SO_4 -P-Fraktion stärker angereichert worden als in den anderen P-Varianten und gleichzeitig konnte Buchweizen P aus dieser Variante nicht

nutzen. Im Gegensatz dazu war Buchweizen auf Sandboden in allen Düngevarianten in hohem Maße P-aufnahmeeffizient – vergleichbar mit Phacelia.

Somit war neben dem Einfluss der Düngung und des Bodens auch ein fruchtartenspezifischer Effekt auf die P-Fractionen feststellbar (*Tab. A-23, Tab. A-24, Tab. A-25, Tab. A-26* im Anhang). Beispielsweise konnte beobachtet werden, dass Buchweizen (v. a. auf Sandboden) in der Kontrolle die NaOH-P-Fraktion gegenüber dem Ausgangswert stärker entleerte als die anderen Zwischenfrüchte. Auch in Gefäßversuchen von Amann und Amberger (1989) führte Buchweizenanbau zu signifikant verringerten (org.) NaOH-P-Gehalten. Gleichzeitig wurde sowohl von Amann und Amberger (1989) als auch Eichler et al. (2004) eine erhöhte saure Phosphataseaktivität im P-Mangel-Boden nach Buchweizenanbau nachgewiesen. Daher lässt sich die oben angeführte Reduktion des NaOH-P-Gehaltes möglicherweise mit einer effizienten Ausnutzung organischer NaOH-P-Verbindungen begründen.

Bei einer Kombination von Ascheapplikation und Gründüngung (z.B. mit Buchweizen oder Phacelia) sind zwei Aspekte von Bedeutung: Die P-Zufuhr und die Zufuhr organischer Substanz. Da aber Pflanzen P nur in anorganischer Form (als H_2PO_4^- oder HPO_4^{2-}) nutzen können (Marschner 1995, Kaltschmitt et al. 2009), der Gesamt-P-Gehalt im Boden jedoch zu 30–80 % aus organischem P besteht (Tarafdar und Claassen 2005, Ottow 2011), spielen **Phosphatasen** zur Mineralisierung des organischen P eine wichtige Rolle (Richardson et al. 2000, Chen et al. 2002). Sie können erheblich zur P-Verfügbarkeit und verbesserter pflanzlicher P-Aufnahme beitragen (Schneider et al. 2001). Im Gefäßversuch in Rostock war die Aktivität der sauren Phosphatase aufgrund des pH-Wertes im Boden um das 3- bis 4-fache höher als die der alkalischen Phosphatase. Eichler et al. (2004) stellten in einem Gefäßversuch mit lehmigem Sand ebenfalls eine wesentlich höhere Aktivität der sauren Phosphatase fest. In einem Versuch von Khade et al. (2010) wurden bei sauren Bodenbedingungen gleichfalls verstärkt saure Phosphatasen (Abscheidungen von Papayawurzeln) im Boden gefunden. Diese Ergebnisse bestätigen, dass die saure Phosphatase in sauren Böden dominiert, während in alkalischen Böden die alkalische Phosphatase vorherrschend ist (Juma und Tabatabai 1978).

Im Gefäßversuch 2007 wurden im Hinblick auf die saure Phosphatase keine Unterschiede zwischen der Kontrolle ohne P-Zufuhr und den P-gedüngten Varianten des Sandbodens ermittelt (*Kap. 5.3.2, Tab. 37*). Im Gegensatz dazu war die Aktivität der sauren Phosphatase in verschiedenen Untersuchungen unter P-Mangel-Bedingungen erhöht (Caradus und Snaydon 1987, Tadano et al. 1993, Ozawa et al. 1995, Li et al. 2004). Die Düngung wirkte sich auch auf die alkalische Phosphatase im Sandboden des Gefäßversuches nicht signifikant

aus. Wenngleich in anderen Untersuchungen (z. B. Acosta-Martínez und Tabatabai 2000) signifikant positive Korrelationen zwischen dem pH-Wert und der Aktivität der alkalischen Phosphatase gefunden wurden und die SA-Düngevariante nach Kultivierung von Mais auf Sand zu signifikant erhöhten pH-Werten geführt hatte (*Kap. 5.3.2, Tab. 31*), blieb die Phosphataseaktivität vom pH-Effekt der Asche unbeeinflusst. Diese Aussage beruht auf den untersuchten Bodenproben, die mittels Bohrstock zwar möglichst nah an der Hauptwurzel, aber nicht ausschließlich aus der Rhizosphäre entnommen wurden. In der Literatur lassen sich jedoch Hinweise finden, dass die Phosphataseaktivität direkt an der Wurzeloberfläche bzw. in der unmittelbaren Rhizosphäre wesentlich größer ist als im wenige Millimeter entfernten Boden (Tarafdar und Jungk 1987, Häussling und Marschner 1989, Izaguirre-Mayoral et al. 2002). Das könnte fehlende Effekte erklären.

Zwischen verschiedenen Pflanzenarten sowie Varietäten bestehen genetisch bedingt Unterschiede in der Intensität der Exsudation der Phosphatase (Fukuda et al. 2001, Izaguirre-Mayoral et al. 2002). Im Rostocker Gefäßversuch war sowohl die saure als auch die alkalische Phosphataseaktivität im Boden nach Maisanbau geringer als bei den anderen Hauptfrüchten, obwohl Mais in der ungedüngten Kontrollvariante eindeutig P-Mangel aufwies, wie phänologisch in Form von rötlicher Blattverfärbung durch Anthocyananreicherung zu erkennen war. Akkumulation des Flavonoids Anthocyan ist ein charakteristisches P-Mangelsymptom infolge einer verstärkten Genexpression bezüglich des Anthocyanmetabolismus (Jiang et al. 2007). Amann und Amberger (1989) und George et al. (2002) stellten in der Rhizosphäre von Mais ebenfalls weniger Phosphataseaktivität als in der Wurzelzone anderer Arten fest. Andererseits wurden nach Eichler (2004) bei Mais im Vergleich zu So-Raps und Gelber Lupine signifikant erhöhte Ausscheidungsraten von saurer Phosphatase ermittelt. Yadav und Tarafdar (2001) berichten wiederum von höheren Phosphataseaktivitäten bei Leguminosen als bei Ölfrüchten und Getreide.

6.5 P-Effizienz im Gefäßversuch mit verschiedenen Fruchtarten zur Beurteilung der Biomasseasche-Düngewirkung

Nachhaltige Landwirtschaft basiert – aus Gründen der Ressourcenschonung und Vermeidung von Umweltbelastungen durch Nährstoffverluste – auf einer effizienten Nutzung von Nährstoffen im Pflanzenbau. Um Pflanzennährstoffe sparsam zu nutzen, bestehen nach Steffens (1999) zwei grundsätzliche Strategien: Kreislaufwirtschaft und Nährstoffeffizienz. Biomasseaschen sind aufgrund ihres Herstellungsprozesses und potentiellen Nährstoffnutzens geeignet, zur Kreislaufwirtschaft beizutragen.

Die **Nährstoffeffizienz** wird beeinflusst durch die Dünger- und Bodeneigenschaften, das Aneignungsvermögen und den Bedarf der Kulturpflanzen, die Bewirtschaftungsmaßnahmen und die Witterung. Eine Verbesserung der P-Nährstoffeffizienz kann erreicht werden, indem Pflanzen die P-Aneignung, oder die P-Nutzung, oder beides steigern (Wang et al. 2010). Zwischen Nährstoffaufnahme und Wurzelmorphologie bestehen Wechselwirkungen. Das Nährstoffaufnahmevermögen von Pflanzen wird von der Wurzelmorphologie und Wurzelbiochemie beeinflusst (Hammond et al. 2009). Die **Aufnahmeeffizienz** beschreibt das Vermögen einer Pflanze, sich einen bestimmten Nährstoff aus dem Boden anzueignen (= Aneignungseffizienz), während die **Verwertungseffizienz** als Effizienz definiert ist, mit der ein aufgenommener Nährstoff für die Ausbildung des Ertrages genutzt wird (Sattelmacher et al. 1994). Die Verwertungseffizienz wird nach Eichler (1997) vor allem durch Umweltbedingungen und pflanzenphysiologische Prozesse beeinflusst und ist relativ unabhängig von der P-Versorgung. Daher erschien die Untersuchung der Aufnahmeeffizienz zur Beurteilung der Biomasseaschewirkung geeigneter, auch wenn die Ertragswirkung nicht unbedeutend ist. Die P-Aufnahmeeffizienz kann in Abhängigkeit von den Bodenbedingungen variieren, wie von Zhu et al. (2002) bei Buchweizen nachgewiesen wurde. In den eigenen Gefäßversuchen wurden für Buchweizen (mit Ausnahme der Düngevariante SA, siehe *Kap. 6.4*) kaum Unterschiede in den P-Aufnahmeeffizienzen auf Sand im Vergleich zu Lehm festgestellt (*Kap. 5.3.3, Abb. 16*). Ursächlich dafür waren die höheren Erträge (*Kap. 5.3.1, Tab. 27*) und geringeren P-Gehalte im Spross der Pflanzen (*Tab. A-28 und Tab. A-29 im Anhang*) auf Sand im Vergleich zum Lehm. Buchweizen hatte in der Kontrollvariante auf Sand höhere Biomasserträge erzielt als auf Lehm, da diese Art gut an sandige, karge Böden angepasst ist. Viele wilde Fagopyrum-Arten wachsen auf extrem armen Standorten (Ohnishi 1998). Größere bodenabhängige Unterschiede in der Aufnahmeeffizienz wurden bei Mais und Blauer Lupine festgestellt. Während Mais auf dem Sandboden höhere P-Aufnahmeeffizienzen und Erträge als auf Lehm zeigte, wurden bei Lupine die höheren Werte auf Lehmboden verzeichnet.

Um die effektivsten Kombinationen aus Fruchtart, Biomasseasche und Boden hinsichtlich Düngewirkung zu finden, lassen sich die Erträge, P-Aufnahmen bzw. P-Aufnahmeeffizienzen heranziehen. Mais erwies sich in den Aschevarianten durchschnittlich genauso effizient in der P-Aufnahme (*Kap. 5.3.3, Abb. 16*) und ebenso ertragsstark wie nach TSP-Düngung (*Kap. 5.3.1, Tab. 27*). Die Blaue Lupine, mit doppelt so hohen Erträgen auf Lehm wie auf Sand, reagierte am besten auf eine P-Düngung mit GA und RESA. In der GA-Variante war die P-Aufnahmeeffizienz signifikant höher als in der Kontrolle und den anderen P-Varianten. Außerdem wurden in der GA-Variante um 30 % höhere Lupinerträge im Vergleich zur

Kontrolle und um ca. 20 % höhere Erträge als in der TSP-Variante ermittelt. Die P-Aufnahmeeffizienzen und Erträge von So-Gerste waren auf Lehm infolge P-Düngung mit RESA oder GA genauso hoch wie nach TSP. So-Raps hatte in den drei Aschevarianten auf beiden Böden gleich hohe P-Aufnahmeeffizienzen wie nach TSP-Düngung, konnte aber auf dem Lehmboden die Aschenährstoffe etwas besser in Ertrag umsetzen als auf dem Sand. Einen zusammenfassenden Überblick über die empfehlenswertesten Kombinationen aus Fruchtart, Biomasseasche und Boden in den Gefäßversuchen mit Hauptfrüchten hinsichtlich P-Aufnahmeeffizienz und Ertrag bietet nachfolgende Tabelle.

Tab. 38: Empfehlenswerteste Kombination aus Hauptfrucht, Boden und Biomasseasche bezüglich Steigerung des Spross-Ertrages und der P-Aufnahmeeffizienz.

Fruchtart	Bodenart		Biomasseaschen		
	Sl3	Ls3	RESA	SA	GA
Mais	x		x		x
Blaue Lupine		x	x		x
So-Gerste		x	x		x
So-Raps	x	x	x	x	x

x = Kennzeichnung der Aschevarianten, die – in Kombination mit der Bodenart mit den größeren Düngeeffekten – zu gleichwertigen oder höheren Erträgen und P-Aufnahmeeffizienzen der Fruchtarten führten als TSP

Sl3 = mittel lehmiger Sand, Ls3 = mittel sandiger Lehm; RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche

Nach Gerath (1993) haben Pflanzen, die ertraglich nur wenig auf eine mangelhafte P-Ernährung reagieren, eine hohe P-Effizienz. Dies traf in den eigenen Untersuchungen auf Phacelia und Buchweizen zu, bei denen sich die Erträge in der Kontrolle ohne P nicht von den Erträgen nach P-Düngung unterschieden (siehe *Kap. 5.3.1, Tab. 27*). Beide Arten waren somit sehr P-effizient. Andererseits reagierte Phacelia auf die Düngung mit Aschen oder TSP mit erhöhter P-Aufnahmeeffizienz (*Kap. 5.3.3, Abb. 16*). In einem Gefäßversuch von Eichler-Löbermann et al. (2008a) wiesen Phacelia und Buchweizen erhöhte P-Aufnahmen nach P-Zufuhr (mit Geflügelmistasche oder KH_2PO_4) auf, während der Ertrag in diesen Düngevarianten nicht gegenüber der Kontrollvariante gesteigert werden konnte. Die P-Aufnahmeeffizienz der beiden anderen Arten des Zwischenfruchtversuches war etwas geringer als bei Phacelia oder Buchweizen, und es waren positive Ascheeffekte zu bemerken. Die P-Aufnahme von Weidelgras war auf beiden Böden in der RESA-Variante genauso hoch wie nach Düngung mit TSP (*Kap. 5.3.1, Tab. 28*). Ölrettich hatte die P-Aufnahme nach RESA- und GA- ebenso wie nach TSP-Düngung im Vergleich zur Kontrolle erhöht, vor allem auf Lehm. Auch in Untersuchungen von Lopez et al. (2009) war die P-Aufnahme von Weidel-

gras und Ölrettich in der TSP- und RESA-Variante gegenüber der Kontrolle erhöht, während Holzasche keinen Effekt gezeigt hatte.

Generell lässt sich im Hinblick auf die Zwischenfrüchte feststellen, dass diese zu höheren P-Aufnahmen in der Lage waren als die Hauptfrüchte (*Kap. 5.3.1, Abb. 8*). Somit sind Zwischenfrüchte besonders geeignet, um zunächst P aus Biomasseaschen in großem Umfang aufzunehmen und der Folgekultur über die organische Substanz zur Verfügung zu stellen. Entsprechend der Ergebnisse aus den Gefäßversuchen könnten diesbezüglich vor allem Buchweizen und Phacelia mit ihren hohen P-Aufnahmen nach einer Aschedüngung gut geeignet sein. Analog zur Bewertung der Aschedüngewirkung bei Hauptfrüchten (*Tab. 38*) soll nachfolgend ein Überblick über die empfehlenswertesten Kombinationen aus Fruchtart, Biomasseasche und Bodenart der Gefäßversuche mit Zwischenfrüchten gegeben werden (*Tab. 39*). Dabei wird als Kriterium ausschließlich die P-Aufnahmeeffizienz herangezogen.

Tab. 39: Empfehlenswerteste Kombination aus Zwischenfrucht, Boden und Biomasseasche bezüglich P-Aufnahmeeffizienz.

Fruchtart	Bodenart		Biomasseaschen		
	SI3	Ls3	RESA	SA	GA
Ölrettich		x	x		x
Phacelia	x	x	x	x	x
Weidelgras	x	x	x		x
Buchweizen	x		x	x	x

x = Kennzeichnung der Aschevarianten, die – in Kombination mit der Bodenart mit den größeren Düngeeffekten – zu gleichwertigen oder höheren P-Aufnahmeeffizienzen der Fruchtarten führten als TSP

SI3 = mittel lehmiger Sand, Ls3 = mittel sandiger Lehm; RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche

Nach Schachtmann et al. (1998) beträgt die P-Konzentration in der pflanzlichen TM ca. 0,2 %, und Bergmann (1993) gibt einen durchschnittlichen Wertebereich zwischen 0,1–0,5 % P an. In den eigenen Gefäßversuchen wurden P-Konzentrationen von 0,3–0,7 % in den Zwischenfrüchten ermittelt; bei den Hauptfrüchten waren die Werte mit 0,1–0,4 % (je nach Düngung und Fruchtart) etwas geringer (*Tab. A-30* im Anhang). Zur Beurteilung des Düngeeinflusses der Biomasseaschen scheint dieses Kriterium aufgrund der Dimension zwar kaum geeignet, jedoch bestärkten die Werte die Feststellung, dass die als Zwischenfrüchte ausgewählten Fruchtarten hohe P-Aufnahmeeffizienzen aufweisen.

6.6 Prüfung der Hypothesen

Im Folgenden sollen die in *Kap. 3* aufgestellten Hypothesen bestätigt oder widerlegt werden. Zur Prüfung der Hypothese 1 wurden die Ergebnisse der Ascheanalysen herangezogen, die die Grundlage für weitere Hypothesen und Untersuchungen darstellten. Nachdem die Ergebnisse der Feld- und Gefäßversuche zuvor jeweils separat dargelegt und erörtert wurden, werden sie nun zur Prüfung der Hypothesen 2 bis 4 versuchsübergreifend diskutiert.

Hypothese 1: Biomasseaschen verschiedener Ausgangssubstrate unterscheiden sich in ihren P-Gehalten und P-Löslichkeiten.

Die Pt-Gehalte der untersuchten Biomasseaschen unterschieden sich mit 1,0 % (SA) bis 10,5 % (GA) deutlich, wobei zwei der Aschen wesentlich höhere Pt-Gehalte als viele andere Biomasseaschen (siehe *Kap. 2.6*) aufwiesen. Außerdem variierten die Gehalte in den gemessenen leicht-löslichen P-Fractionen (siehe *Kap. 5.1*). Somit kann die **erste Hypothese bestätigt** werden. Zudem können die P-Gehalte und Löslichkeit außer vom Ausgangsmaterial der Verbrennung auch von der Verbrennungstechnik mit beeinflusst werden. Diese technischen Aspekte waren jedoch nicht Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit.

Hypothese 2: Aufgrund der geringeren Anteile an leicht-löslichem P in den Biomasseaschen ist deren P-Düngewirkung geringer als jene von TSP.

Trotz geringerer Anteile an leicht verfügbarem P ($\text{H}_2\text{O-P}$ bzw. $\text{H}_2\text{O-P} + \text{NaHCO}_3\text{-P}$) in den Aschen im Vergleich zu TSP führten die Aschen (RESA und GA) mit vergleichbarer Pt-Ausbringungsmenge in den Gefäßversuchen zu gleichwertigen Erträgen, P-Gehalten und P-Aufnahmen wie TSP. Die **zweite Hypothese** wurde somit **widerlegt**. Obwohl der innerhalb einer Vegetationsperiode in Lösung gehende P-Anteil eines Düngers nach Schnug et al. (2003) am besten im Wasserextrakt bestimmt wird, steht der gute Düngeeffekt der Aschen in engerer Beziehung zu den zitronensäurelöslichen P-Gehalten (die zwischen 81 % und 91 % des Pt betrugen) als zu den Pw-Gehalten. Römer (2006), der 26 verschiedene P-Formen hinsichtlich ihrer Löslichkeiten analysierte, ermittelte für einige P-Verbindungen ebenfalls hohe Zitronensäurelöslichkeit trotz geringer Wasserlöslichkeit. Dazu zählte beispielsweise Struvit (Magnesium-Ammonium-Phosphat $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) als Sekundärrohstoffdünger aus der Klärschlammaufbereitung mit ca. 2 % wasserlöslichem P und 100 % zitronensäurelöslichem P. Eine hohe Zitronenlöslichkeit des P in diesen Produkten ist nach Römer (2006) ein direkter Hinweis darauf, dass in der Wurzelnahe P auch aus nicht wasserlöslichen P-Verbindungen in Lösung gehen und von Pflanzen aufgenommen werden kann. Weiterhin leitete er aus seinen Ergebnissen ab, dass eine vergleichsweise gute P-Verfügbarkeit Mg-

haltiger Produkte auf eine höhere P-Verfügbarkeit der Mg-Phosphate im Vergleich zu Ca-Phosphaten zurückzuführen sei. Dies trifft möglicherweise auch auf die untersuchten Biomasseaschen zu, da es sich bei ihnen um Mehrnährstoffdünger handelt. Obwohl die H_2SO_4 -P-Fraktion, die als stabil Ca-gebundenes P betrachtet wird (Schlichting und Leinweber 2002, Blume et al. 2010), in den Aschen einen großen Anteil am Pt von $> 60 \%$ einnahm, betrug die berechnete tatsächliche P-Ausnutzung (TA) bei jeder untersuchten Fruchtart zumindest in einer Asche-Variante auf einem der beiden Böden $>10 \%$. Während Holzner und Obernberger (2011) von einer durchschnittlichen P-Wirkung von Pflanzenaschen von $<10 \%$ des Pt im Anwendungsjahr ausgehen und die P-Wirkung daher als „gering“ einstufen, belegen die eigenen Versuchsergebnisse eine mit TSP vergleichbare Düngewirkung der Aschen infolge hoher P-Ausnutzungsgrade. Da die auf P bezogene TA (im Jahr der Düngerapplikation) selten mehr als 15% beträgt (Schnug 2009), lagen die für die Gefäßversuche berechneten Werte mit durchschnittlich $10\text{--}20 \%$ in dieser Größenordnung.

Hypothese 3: Die Ausnutzung des in Biomasseaschen enthaltenen P wird durch die angebaute Fruchtart und die Bodeneigenschaften beeinflusst.

Die Düngung mit Biomasseaschen wirkte sich in den Feldversuchen standortbedingt sehr unterschiedlich aus. Positive Düngeeffekte traten nur im Versuch in Rostock auf. Es wird davon ausgegangen, dass in Trenthorst deshalb keine Aschedüngungseffekte verzeichnet werden konnten, da der P-Gehalt des Bodens in der Gehaltsklasse C und der pH-Wert in der Klasse D lag. Im Gegensatz dazu wurden im Feldversuch Rostock infolge Aschezufuhr signifikant gesteigerte Erträge in beiden Jahren verzeichnet. Dabei nutzte die So-Gerste alle drei Aschen gleichermaßen zur Ertragsbildung, während im Folgejahr bei Mais in der SA- und GA-Variante die signifikant höchsten Biomasseerträge ermittelt wurden.

Die Abhängigkeit der P-Ausnutzung (aus den Aschen) von der angebauten Fruchtart und den Bodeneigenschaften wurde auch in den Gefäßversuchen nachgewiesen. Im Durchschnitt der Fruchtarten konnten in den Aschevarianten auf Lehm Boden stärkere Ertragssteigerungen gegenüber der Kontrolle ermittelt werden als auf dem Sand. Bei der Mehrzahl der Fruchtarten war auch die durch Asche-Düngung hervorgerufene Steigerung der P-Aufnahme auf dem Lehm Boden höher als auf dem Sand. Diese Ergebnisse lassen sich wie folgt erklären: Der Lehm Boden befand sich zu Versuchsbeginn in der K-Gehaltsklasse B und wies somit K-Mangel auf. Nachdem mit den Aschen, die Mehrnährstoffdünger sind, nicht nur P, sondern auch K zugeführt wurde, waren die Pflanzen auch auf dem schwereren Boden ausreichend mit den essentiellen Nährstoffen versorgt und konnten diese aufnehmen und in Ertrag umsetzen. Daher fielen die Asche-Düngeeffekte auf dem Lehm Boden (in Relation zu einer

K-unterversorgten Kontrollvariante) deutlicher aus als im Versuch mit Sand (in dessen Kontrolle nur P, aber nicht K im Mangel gewesen war). Außerdem ist es möglich, dass durch die Düngung mit Asche die Bodenstruktur (Porenvolumen, Aggregate) des Lehmbodens verbessert wurde, so dass die biologische Aktivität des Bodens angeregt und Nährstoffe mobilisiert wurden, die dann den Pflanzen zusätzlich zur Verfügung standen. Um Düngeeffekte zu erzielen, sind demnach neben der P-Versorgung des Bodens und dem pH-Wert auch die Gehalte anderer Bodennährstoffe, wie z.B. K zu beachten.

Neben dem Einfluss des Bodens war eine fruchtartabhängige P-Ausnutzung aus den Aschen festzustellen. Die acht untersuchten Fruchtarten der Gefäßversuche reagierten mit gesteigerten Erträgen und P-Aufnahmeeffizienzen besonders gut auf die Düngung mit den Aschen RESA und GA, während Phacelia auch in der SA-Variante zu guten Ergebnisse führte und sehr hohe P-Ausnutzungsgrade aufwies. Phacelia hatte als Zwischenfrucht im Feldversuch Rostock ebenfalls positive Effekte auf die P-Gehalte im Boden und die P-Aufnahme der Folgefrucht gezeigt. Somit kann die **dritte Hypothese bestätigt** werden.

Hypothese 4: Der Anbau von Zwischenfrüchten kann zu verbesserter P-Ausnutzung innerhalb der Fruchtfolge führen und als pflanzenbauliche Maßnahme in Kombination mit Aschedüngung empfohlen werden.

Zwischenfrüchte können auf verschiedene Weise zu einem verstärkten Wachstum der Folgefrucht beitragen. Die Zufuhr organischer Substanz, Wurzelausscheidungen (Rhizodepositionen) und Nährstoffmobilisierung sind diesbezüglich wichtige Prozesse, die in engem Zusammenhang stehen (Müller 2004). Zudem führt Zwischenfruchtanbau zu geringerer Bodenerosion durch Bodenbedeckung und folglich auch zu reduzierten oberflächlichen P-Verlusten (Wallace und Scott 2008). Der Zwischenfruchtanbau im Feldversuch in Rostock zeigte positive Effekte auf die Nährstoffverfügbarkeit im Boden: Die leicht verfügbaren P-Gehalte (P_w und P_{dl}) im Boden waren im Vergleich zu einer unbestellten Kontrollvariante erhöht. Diese erhöhten P-Gehalte im Boden nach Phacelia-Gründüngung und eine positive Nachwirkung dieser Zwischenfrucht auf die P-Aufnahme der Folgefrucht bestätigten Ergebnisse von Eichler-Löbermann et al. (2008b). Wechselwirkungen zwischen den Versuchsfaktoren Düngung und Zwischenfrucht konnten im Feldversuch nicht ermittelt werden. Aus diesem Grund lässt sich die **vierte Hypothese** hinsichtlich des Zwischenfruchteffektes **bestätigen** und eine Kombinationswirkung aus Zwischenfruchteffekt und Aschedüngungswirkung als mögliche Option betrachten, deren Auftreten noch zu eruieren ist. Allerdings kann (aufgrund positiver Ascheeffekte im Gefäßversuch mit geeigneten Zwischenfrucht-Arten) durchaus empfohlen werden, eine Düngung mit Biomasseaschen mit dem Zwischenfruchtanbau zu kombinieren.

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Phosphor ist eines der wichtigsten essentiellen Nährelemente der Pflanzen und wird in der Landwirtschaft zur Sicherung und Steigerung der Kulturpflanzenenerträge in Abhängigkeit des P-Versorgungszustandes des Bodens eingesetzt. Da die weltweiten P-Vorkommen knapper und der Aufwand für den Abbau qualitativ hochwertiger Rohphosphate steigen werden, nimmt das Interesse an Sekundärrohstoffdüngern wie z.B. Biomasseaschen zu. Während die Düngewirkung von Holzasche (infolge Brandrodung) schon vor Jahrtausenden genutzt wurde, könnten Biomasseaschen auch zukünftig als Mehrnährstoff- und vor allem P-Dünger wieder an Bedeutung gewinnen, da sie vermehrt als Abfallprodukte der energetischen Biomasseverwertung entstehen. Bei weiterem Wachstum des Bioenergiesektors ließe sich mit zunehmender Nutzung von Biomasseaschen ein Beitrag zur Einsparung von Düngemitteln, zur Kreislaufwirtschaft und somit zum ökonomisch und ökologisch nachhaltigen Pflanzenbau leisten.

Innerhalb dieser Arbeit wurden drei verschiedene Biomasseaschen (Rapsextraktionsschrotasche (RESA), Strohasche (SA) und Getreidekornasche (GA)) in vier Gefäßversuchen und zweijährigen Feldversuchen an zwei Standorten Deutschlands (Rostock (Mecklenburg-Vorpommern) und Trenthorst (Schleswig-Holstein)) hinsichtlich ihrer Eignung als P-Düngemittel getestet. Die Auswahl der Aschen erfolgte vor allem aufgrund der sich stark unterscheidenden P-Gehalte, deren Düngewirkung untersucht werden sollte. Die Aschemengen wurden entsprechend der jeweiligen P-Gehalte der Aschen und in Erwartung eines pH-Effektes kalkuliert.

In den Feldversuchen wurden im Frühjahr 2007 mit RESA (650 kg ha^{-1}) und GA (500 kg ha^{-1}) aufgrund ähnlich hoher Pt-Gehalte (8,0 % bzw. 10,5 %) jeweils 52 kg P ha^{-1} (bezogen auf einen zweijährigen Düngebedarf) ausgebracht. Mit SA (850 kg ha^{-1}) erfolgte wegen des Pt-Gehaltes von nur 1,0 % eine vergleichsweise geringe P-Zufuhr von $8,5 \text{ kg ha}^{-1}$. Höhere Gaben hätten vermutlich zu einem Anstieg des pH-Wertes geführt. Neben dem Versuchsfaktor Düngung (Biomasseaschen im Vergleich zur Kontrolle ohne P/K) wurde in den Feldversuchen als zweiter Versuchsfaktor der Zwischenfruchtanbau integriert, um mögliche Effekte der Zwischenfrüchte (Grünroggen, Phacelia und Senf) auf die P-Versorgung der Hauptfrucht in Kombination mit der Düngewirkung von Biomasseaschen zu testen.

Die Gefäßversuche wurden zweifaktoriell (Versuchsfaktoren Düngung und Fruchtart) mit zwei verschiedenen Böden (lehmiger Sand (2007) und sandiger Lehm (2008)) durchgeführt. Es wurden die gleichen Biomasseaschen wie in den Feldversuchen getestet und die

Ascheausbringungsmengen (9,8 g SA oder 2,5 g RESA bzw. 1,9 g GA je Gefäß mit 6 kg Boden) an die P-Gehalte der Aschen angepasst. Somit erfolgte eine P-Zufuhr von 0,1 g (mit SA) bis 0,2 g P (mit RESA bzw. GA) je Gefäß. Um zwischen P- und K-Effekt der Aschen differenzieren zu können, wurden in den Gefäßversuchen zwei weitere Düngevarianten mit gut löslichem TSP bzw. KCl angelegt. Außerdem diente eine Kontrollvariante (ohne P/K) zum Vergleich. Es wurden verschiedene Fruchtarten je nach Saattermin als Hauptfrüchte (Mais, Blaue Lupine, So-Gerste, So-Raps) oder Zwischenfrüchte (Ölrettich, Phacelia, Welsches Weidelgras, Buchweizen) angebaut.

Die verschiedenen Versuchstypen, Standortbedingungen und Fruchtarten erlaubten es, mehrere pflanzenbauliche Aspekte im Zusammenhang mit Biomasseaschedüngung in relativ kurzer Zeit zu untersuchen, wobei folgende **Ergebnisse** ermittelt wurden:

1. Die P-Fraktionierung der Düngemittel ergab wesentlich geringere leicht verfügbare P-Anteile ($\text{H}_2\text{O-P} + \text{NaHCO}_3\text{-P}$) in den Aschen (12 % bis 27 %) als bei TSP (83 %). Jedoch waren die zitronensäurelöslichen P-Gehalte (Pcit) der Aschen (80 % bis 90 % des Pt) denen des TSP (90 % bis 100 % des Pt) ähnlich, so dass insgesamt von einer guten P-Verfügbarkeit der Aschen ausgegangen werden konnte, die sich auch in den Boden- und Pflanzenuntersuchungen widerspiegelte.
2. In den Feldversuchen konnten nur an einem der beiden Standorte Düngeeffekte der Biomasseaschen festgestellt werden. Im Versuch in Trenthorst war auf stark lehmigem Sand keine nachweisbare Wirkung auf die Kornerträge (von So-Weizen und Blauer Lupine) oder P-Gehalte in Pflanze und Boden zu verzeichnen. Dass die Biomasseaschen dort keine positiven Effekte zeigten, wird auf die Bodenverhältnisse (relativ hoher pH-Wert von 6,4 und Pdl-Gehalt von 82 mg kg^{-1}) zurückgeführt.

Im Rostocker Feldversuch (mit schwach lehmigem Sand) bewirkte jede der drei Aschen – zumindest in je einem der beiden Versuchsjahre – eine signifikante Ertragssteigerung (max. 18 %) oder/und gesteigerte P-Aufnahme von So-Gerste bzw. Mais (max. 22 %) im Vergleich zur Kontrolle. Generell konnte keine Wirkung der Düngung mit Biomasseasche auf die ermittelten pH-Werte und Bodennährstoffgehalte im Feldversuch nachgewiesen werden.

Der Versuchsfaktor Zwischenfrucht führte am Standort Rostock (mit Phacelia und Grünroggen) zu einer signifikanten Erhöhung der P-Gehalte (Pw, Pdl, Pox) im Ober- und Unterboden. Nach Anbau von Phacelia, die ein hohes P-Mobilisationspotential aufweist, war die P-Aufnahme von Mais im Jugendstadium signifikant erhöht.

Aufgrund der geringen Schwermetallgehalte in den Aschen, hatte die Düngung keine Erhöhung der Schwermetallgehalte im Boden zur Folge.

3. In den Gefäßversuchen waren Effekte der Versuchsfaktoren (Düngung und Fruchtart) sowohl auf lehmigem Sand als auch auf sandigem Lehm zu verzeichnen. Im Vergleich zur Kontrolle führten neben TSP vor allem RESA und teilweise auch GA zu erhöhter P-Aufnahme im Spross der Pflanzen (bis zu 74 %). Dabei wurden bodenbedingte Unterschiede beobachtet. Die Düngeeffekte waren auf dem sandigen Lehm deutlicher als auf lehmigem Sand, was vermutlich damit zusammen hängt, dass die Sprosserträge bei fast allen Fruchtarten durch die P-Zufuhr mit Asche oder TSP erhöht waren. Es wurden Ertragssteigerungen im Vergleich zur Kontrolle um bis zu 49 % (Mais nach GA-Düngung, auf sandigem Lehm) verzeichnet, wobei auch der K-Düngeeffekt eine Rolle spielte.

Beide Versuchsfaktoren wirkten sich signifikant auf die pH-Werte und P-Pools im Boden zum Versuchsende aus. Generell konnte im Boden der Asche-Varianten in gleichem Maße wie in der TSP-Variante eine Erhöhung der leicht-verfügbaren P-Pools (P_w, P_{dl}, Harz-P und NaHCO₃-P) im Vergleich zur Kontrolle ermittelt werden, was auf Umwandlungs-/Mobilisierungsprozesse nach Aschedüngung hindeutet. In der SA-Variante kam es bei der Mehrzahl der Fruchtarten zu einem Anstieg des pH-Wertes im Boden. Der Fruchtarten-Einfluss wurde in den Bodenuntersuchungen besonders in der Phacelia-Variante deutlich. Infolge einer pH-Wert-Verringerung (wahrscheinlich durch Wurzelexsudation hervorgerufen) kann es im Versuchsverlauf zu verbesserter P-Verfügbarkeit gekommen sein. Obwohl die P-Aufnahme von Phacelia in allen P-Düngervarianten gleichermaßen erhöht war, erwies sich ihre tatsächliche P-Ausnutzung (Netto-P-Aufnahme in Bezug auf die Menge an zugeführtem P) in der SA-Variante als außerordentlich hoch. Phacelia muss in dieser Variante besonders gut in der Lage gewesen sein, P sowohl aus der Düngung zu nutzen als auch aus dem P-Pool des Bodens zu mobilisieren. Das bestätigen auch die signifikant gesteigerten P_{dl}- und Harz-P-Gehalte im Boden der SA-Variante zu Versuchsende.

Folgende **Schlussfolgerungen** können aus den Ergebnissen der durchgeführten Feld- und Gefäßversuche gezogen werden:

1. Aufgrund vergleichbarer P-Düngewirkung von Aschen und TSP können die untersuchten Biomasseaschen als gleichwertige P-Düngemittel zu diesem herkömmlich eingesetzten P-Dünger TSP betrachtet werden können.

2. Ein Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Ascheanalysen und den Düngeeffekten lässt sich nicht zweifelsfrei aufzeigen, da P vielschichtigen Prozessen im Boden unterliegt. Die Düngeeffekte (hinsichtlich P-Aufnahme, Ertrag und pflanzenverfügbarer P-Pools im Boden) stehen vermutlich eher mit den zitronensäurelöslichen P-Gehalten (P_{cit}) der Aschen im Zusammenhang als mit den geringen Anteilen an leicht löslichen bzw. labilen P-Fractionen (H₂O-P + NaHCO₃-P). Dies spricht für eine gute P-Verfügbarkeit der Aschen in Kombination mit pflanzlichen P-Mobilisierungsprozessen innerhalb einer Vegetationsperiode und gibt einen Hinweis darauf, dass die P-Verfügbarkeit aus Aschen besser im Zitronensäureaufschluss als im Wassereextrakt zu bestimmen ist.
3. Die Ausnutzung des in Biomasseaschen enthaltenen P wurde durch die angebauten Fruchtarten sowie die Bodeneigenschaften beeinflusst. Die Mehrzahl der untersuchten Fruchtarten reagierte in den Gefäßversuchen auf die Zufuhr mit RESA und GA mit erhöhten P-Aufnahmen und Erträgen, während Phacelia auch die SA als P-Dünger hervorragend nutzen konnte. Die Ausbringung der SA führte im Feldversuch Rostock in beiden Versuchsjahren zu den höchsten Erträgen von So-Gerste bzw. Mais.

Im Gegensatz zu den Zwischenfrüchten, die im Gefäßversuch infolge Aschedüngung hohe P-Aufnahmeeffizienzen hatten, setzten die Hauptfrüchte die P-Aufnahme stärker in Sprossertrag um. Von daher sind Zwischenfrüchte zur P-Mobilisierung/-Aufnahme und Zwischenspeicherung über Winter sowie Bereitstellung für die nachfolgende Hauptfrucht von großer Bedeutung.

Generell wirkten sich die Aschen auf Böden mit leichtem P-Mangel bis optimaler P-Versorgung positiv auf die P-Aufnahme und den Ertrag der untersuchten Fruchtarten aus. Auf dem schwach lehmigen Sandboden des Rostocker Feldversuches traten signifikante Aschedüngungseffekte auf, während im Feldversuch in Trenthorst infolge des hohen pH-Wertes und der hohen P-Gehalte im Boden keine Düngewirkung der Aschen ermittelt werden konnte. In den Gefäßversuchen wurden auf sandigem Lehm mehrheitlich höhere Steigerungen der Erträge und P-Aufnahmen (zumindest mit GA und RESA) erzielt als auf lehmigem Sand. Somit können Biomasseaschen als P-Dünger für Böden mit P-Düngebedarf und niedrigen bis optimalen pH-Werten empfohlen werden. Als P-mobilisierende Zwischenfrucht erscheinen Phacelia unabhängig von der Bodenart aufgrund gesteigerter P-Aufnahmeeffizienzen im Vergleich zur Kontrolle und Buchweizen für lehmigen Sandboden wegen seiner hohen P-Aufnahmefähigkeit besonders vielversprechend.

4. Da die untersuchten Asche- und Bodenproben keine erhöhten Schwermetallgehalte aufwiesen, kann die Nutzung von Biomasseaschen zur P-Düngung empfohlen werden.

Aus dem Versuchsaufbau der Feld- und Gefäßversuche sowie den ermittelten Ergebnissen und Schlussfolgerungen lassen sich **weitere Fragestellungen** ableiten, denen in zukünftigen Untersuchungen nachgegangen werden sollte:

1. Der Zwischenfruchtanbau mit Phacelia hatte im Feldversuch in Rostock zwar zu signifikant positiven Effekten auf die Jugendentwicklung und P-Aufnahme der Folgefrucht (Mais) geführt, allerdings konnten keine Wechselwirkungseffekte mit dem Versuchsfaktor Düngung festgestellt werden. Da Phacelia auch in den Gefäßversuchen eine hohe P-Ausnutzung zeigte, dort jedoch Wechselwirkungen mit den Düngern/Aschen festgestellt wurden, sollte unter Freilandbedingungen erneut geprüft werden, ob sich der P-Düngewert der Aschen in Kombination mit dem nährstoffmobilisierenden Effekt der Zwischenfrüchte (wie z.B. Phacelia) erhöhen lässt. Dies wäre auch vorteilhaft bezüglich der organischen Bodensubstanz, da durch Zwischenfrüchte zusätzlich organische Substanz zugeführt wird.
2. Nachdem eine positive Aschewirkung im Rostocker Feldversuch nicht nur im Anwendungsjahr, sondern auch als Nachwirkung im zweiten Versuchsjahr bestätigt wurde, wäre es interessant in einem mehrjährigen Feldversuch zu prüfen, über welchen Zeitraum Düngeeffekte von Biomasseaschen nachweisbar sind, ohne eine Unterversorgung in späteren Jahren zu riskieren.
3. Die SA-Variante führte (trotz geringerer P-Zufuhr) in den Gefäßversuchen auf lehmigem Sand zu ebenbürtigen Sprosserträgen und zu höherer tatsächlicher P-Ausnutzung als die anderen P-Düngevarianten. Da sie zudem als einzige Asche-Variante im Feldversuch Rostock in beiden Jahren gesteigerte Erträge erbrachte, sollte mittels variierteter SA-Ausbringungsmenge (unter Beachtung des pH-Effektes) die optimale Aschemenge ermittelt werden.
4. Weiterer Forschungsbedarf liegt in der Ascheaufbereitung, da die Aschen je nach Verbrennungsverfahren verschiedene Körnungen aufweisen, wie z.B. SA und GA (Rostfeuerung) mit gröberer Struktur als RESA (Wirbelschichtverbrennung), wodurch die Dünge Wirkung beeinflusst sein kann. Es sollte geprüft werden, ob sich durch eine Veränderung der Aschekörnung durch Granulierung die Abdriftgefahr bei der Ascheausbringung evtl. reduzieren und die Nährstoffverfügbarkeit weiter verbessern lässt.

8 Literaturverzeichnis

- Acosta-Martínez V, Tabatabai MA (2000) Enzyme activities in a limed agricultural soil. *Biol Fertil Soils* 31:85–91
- Adam C, Vogel C, Wellendorf S, Schick J, Kratz S, Schnug E (2009) Phosphorus recovery by thermochemical treatment of sewage sludge ash – Results of the European FP6-project SUSAN. In: Ashley et al. (Eds) *International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams*, IWA Publishing London. pp. 417–430
- Adekayode FO, Olojugba MR (2010) The utilization of wood ash as manure to reduce the use of mineral fertilizer for improved performance of maize (*Zea mays* L.) as measured in the chlorophyll content and grain yield. *J Soil Sci Environm Manage* 1:40–45
- Adeniyi AS (2010) Effects of slash and burning on soil microbial diversity and abundance in the tropical rainforest ecosystem, Ondo State, Nigeria. *Afr J Plant Sci* 4:322–329
- Adu-Dapaah HK, Cobbina J, Asare EO (1994) Effect of cocoa pod ash on the growth of maize. *J Agric Sci* 122:31–33
- AGEB (2010) Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2009. AGEB AG Energiebilanzen e.V., bearbeitet von: Hans-Joachim Ziesing, URL <http://ag-energiebilanzen.de/> (07.10.2010)
- Albert E (2011) Möglichkeiten einer nachhaltigen Sicherung der Bodenfruchtbarkeit durch mineralische und organische Düngung. SKW-Fachtagungen „Düngung 2011“, SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH, Landwirtschaftliche Anwendungsforschung. URL: http://www.skwp.de/deutsch/main-nav/forschung/anwendungsforschung/vorträge_fachtagungen_düngung_2011.htm (07.09.2011)
- Amann C, Amberger A (1989) Phosphorus Efficiency of Buckwheat (*Fagopyrum esculentum*). *Z Pflanzenernähr Bodenk* 152:181–189
- Amberger A (1984) Phosphatwirkung in Abhängigkeit von Standort und Bewirtschaftung. *Die Bodenkultur* 35:295–304
- Amberger A, Amann C (1984) Wirkungen organischer Substanzen auf Boden- und Düngungsphosphat. Teil 2: Einfluß verschiedener organischer Stoffe auf die Mobilität von Dünger-P. *Z Pflanzenernähr Bodenk* 147:60–70
- Anuradha M, Narayanan A (1991) Promotion of root elongation by phosphorus deficiency. *Plant Soil* 136:273–275
- Arvelakis S, Jensen PA, Dam-Johansen K (2004) Simultaneous Thermal Analysis (STA) on Ash from High-Alkali Biomass. *Energy Fuels* 18:1066–1076
- Arvelakis S, Gehrman H, Beckmann M, Koukios EG (2003) Studying the ash behaviour of agricultural residues using thermal analysis. *J Therm Anal Calorim* 72:1019–1030
- Asmar F, Gahoonia TS, Nielsen NE (1995) Barley genotypes differ in activity of soluble extracellular phosphatase and depletion of organic phosphorus in the rhizosphere soil. *Plant Soil* 172:117–122
- Auld DS (2001) Zinc coordination sphere in biochemical zinc sites. *Biometals* 14:271–313
- Awodun MA (2007) Effect of sawdust ash on nutrient status, growth and yield of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp). *Asian J Agric Res* 1:92–96
- Ayeni LS (2010a) Integrated Application of Cocoa Pod Ash and NPK Fertilizer: Effect on soil and Plant Nutrient Status and Maize Performance. *J Americ Sci* 6:96–102

8 Literaturverzeichnis

- Ayeni LS (2010b) Effect of Cocoa Pod Ash, NPK Fertilizer and their Combinations on Soil Chemical Properties and Yield of Tomato (*lycopersicon lycopersicum*) on Two Soil Types. New York Sci J 3:1–11
- Ayeni LS (2010c) Effect of Combined Cocoa Pod Ash and NPK Fertilizer on Soil Properties, Nutrient Uptake and Yield of Maize (*Zea mays*). J Americ Sci 6:79–84
- Bachmann S (2007) Auswirkungen von Biomasseaschen auf die Phosphor-Fraktionen des Bodens. Masterthesis, Universität Rostock
- Bagayoko M, Buerkert A, Lung G, Bationo A, Römheld V (2000) Cereal/legume rotation effects on cereal growth in Sudano-Sahelian West Africa: soil mineral nitrogen, mycorrhizae and nematodes. Plant Soil 218:103–116
- Bah AR, Zaharah AR, Hussin A (2006) Phosphorus uptake from green manures and phosphate fertilizers applied in an acid tropical soil. Commun Soil Sci Plant Anal 37:2077–2093
- Balík J, Pavlíková D, Vaněk V, Kulháněk M, Kotková B (2007) The influence of long-term sewage sludge application on the activity of phosphatases in the rhizosphere of plants. Plant Soil Environ 53:375–381
- Bates TR, Lynch JP (2001) Root hairs confer a competitive advantage under low phosphorus availability. Plant Soil 236:243–250
- Baumgärtel G (1988) Beurteilung der Phosphatversorgung von Lössböden in Südniedersachsen durch Düngeversuche, Boden- und Pflanzenanalysen. Dissertation, Universität Hannover
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg) (2009) Merkblatt: Verwertung und Beseitigung von Holzaschen
- Behrendt F, Belusa T, Schaefer M, Wellmann J, Drenkelfort G (2008) Kurzbericht zum Thema Biomassepotential und Technologiecharakterisierung der Umwandlungsverfahren. TU Berlin. URL: http://www.energie.tu-berlin.de/uploads/media/studie_nov2008.pdf (08.10.2010)
- Bekele T, Cino BJ, Ehlert PAI, Van der Maas AA, Van Diest A (1983) An evaluation of plant-borne factors promoting the solubilization of alkaline rock phosphates. Plant Soil 75:361–378
- Bergmann W (1993) Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen – Entstehung, visuelle und analytische Diagnose. 3., erw. Auflage, Gustav Fischer Verlag, Jena, Stuttgart
- BGR (2007) Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe für Metall- und Nichtmetallrohstoffe. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover
- Bhadoria PS, El Dessougi H, Liebersbach H, Claassen N (2004) Phosphorus uptake kinetics, size of root system and growth of maize and groundnut in solution culture. Plant Soil 262:327–336
- Bhadoria PS, 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
- Bhupinderpal-Singh, Rengel Z (2007) The Role of Crop Residues in Improving Soil Fertility. In: Marschner P, Rengel Z (Eds) Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystems (Soil Biology series, Vol. 10), Springer Verlag, Berlin, pp 183–214
- Biedermann F, Obernberger I (2005) Ash-related Problems during Biomass Combustion and Possibilities for a Sustainable Ash Utilization. In: Proceedings of the International Conference “World Renewable Energy Congress” (WREC), May, Aberdeen, Scotland, Elsevier Ltd., Oxford, UK
- Bielecki RL (1973) Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability. Ann Rev Plant Physiol 24:225–252

- Biertümpfel A, Heydrich R, Graf T, Vetter A (2010) Düngung mit Presskuchen und Strohasche. Auswertung 14jähriger Versuchsergebnisse. Agrarinformationssystem der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Ref. 430, URL: <http://www.tll.de/ainfo/pdf/asch0210.pdf> (17.03.2010)
- Blanck N, Bahrs E (2009) Steuer- und Mitbestimmungsoptimierung in der landwirtschaftlichen Bioenergieproduktion am Beispiel der energetischen Strohnutzung. In: Jahrbuch der Österreichischen Gesellschaft für Agrarökonomie, Band 18:31–44
- Blume H-P, Brümmer GW, Horn R, Kandeler E, Kögel-Knabner I, Kretschmar R, Stahr K, Wilke BM (2010) Scheffer/Schachtschabel, Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage, Spektrum-Springer, Heidelberg
- Blume HP, Deller B, Leschber R, Paetz A, Schmidt S, Wilke BM (2000) Handbuch der Bodenuntersuchung. Terminologie, Verfahrensvorschriften und Datenblätter. Physikalische, chemische und biologische Untersuchungsverfahren. Gesetzliche Regelwerke. Wiley-VCH, Weinheim
- BMU (2004) Fritsche U (Ökoinstitut) und 25 weitere Autoren: Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse. Endbericht. Koordiniert durch Ökoinstitut, in Zusammenarbeit mit FhG Umsicht, IE, IFEU, IZES, TU Braunschweig, WZW. Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, 2004. URL: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/biomasse_vorhaben_endbericht.pdf (08.10.2010)
- BMU (2010) Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und internationale Entwicklung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg)
- Bodner G, Himmelbauer M, Loiskandl W, Kaul H-P (2010) Improved evaluation of cover crop species by growth and root factors. *Agron Sustain Dev* 30:455–464
- Böhm H (2009) Körnerleguminosen – Stand des Wissens sowie zukünftiger Forschungsbedarf aus Sicht des Ökologischen Landbaus. *J Kulturpfl* 61:324–331
- Börling K, Otabbong E, Barberis E (2001) Phosphorus sorption in relation to soil properties in some cultivated Swedish soils. *Nutr Cycl Agroecosyst* 59:39–46
- Bongaarts J (2009) Human population growth and the demographic transition. *Phil Trans R Soc B* 364:2985–2990
- Bouma J, Nielsen KL, Koutstaal B (2000) Sample preparation and scanning protocol for computerised analysis of root length and diameter. *Plant Soil* 218:185–196
- Breeuwsma A, Reijerink JGA, Schoumans OF (1995) Impact of manure on accumulation and leaching of phosphate in areas of intensive livestock farming. In: Steele K (Ed) *Animal waste and the land water interface*. Lewis Publ.–CRC, New York, pp 239–251
- Broadley MR, White PJ, Hammond JP, Zelko I, Lux A (2007) Tansley review – Zinc in plants. *New Phytol* 173:677–702
- Bühler S, Oberson A, Rao IM, Friesen DK, Frossard E (2002) Sequential phosphorus extraction of a ³³P-labeled Oxisol under contrasting agricultural systems. *Soil Sci Soc Am J* 66:868–877
- Bünemann EK, Smithson PC, Jama B, Frossard E, Oberson A (2004) Maize productivity and nutrient dynamics in maize-fallow rotations in western Kenya. *Plant Soil* 264:195–208
- Bumaya AH, Naylor DV (1988) Phosphorus sorption and extractability in Andic soil incubated with plant residues of variable P content. *Plant Soil* 112:77–81

- Campbell CG (1997) Buckwheat. *Fagopyrum esculentum* Moench. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. 19. Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben/International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy.
- Caradus JR, Snaydon RW (1987) Aspects of the phosphorus nutrition of white clover populations II. Root exocellular acid phosphatase activity. *J Plant Nutr* 10:287–301
- CEEP (2011) SCOPE Newsletter, Number 77. February, Centre Européen d'Etudes sur les Polyphosphates (CEEP: a Sector Group of „The European Chemical Industry Council“)
- Chen CR, Condon LM, Davis MR, Sherlock RR (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
- Clapham WM, Zibilske LM (1992) Wood ash as a liming amendment. *Commun Soil Sci Plant Anal* 23:1209–1227
- Codling EE (2006) Laboratory characterization of extractable phosphorus in poultry litter and poultry litter ash. *Soil Sci* 171:858–864
- Codling EE, Chaney RL, Scherwell J (2002) Poultry litter ash as a potential phosphorus source for agricultural crops. *J Environ Qual* 31:954–961
- Cordell D, Drangert J-O, White S (2009) The Story of Phosphorus: Global food security and food for thought. *Glob Environ Change* 19:292–305
- Cross AF, Schlesinger WH (1995) A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma* 64:197–214
- Dakora FD, Phillips AD (2002) Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant Soil* 245:35–47
- Damm S (2010) Einfluss der Kaliumdüngung auf Bodeneigenschaften, Wurzelwachstum und Ertrag. Vortrag zur Ackerbautagung der Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau am 24. und 25. November 2010 in Bernburg und Iden
- Demeyer A, Nkana JCV, Verloo MG (2001) Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. *Bioresour Technol* 77:287–295
- Deubel A, Gransee A, Merbach W (2002) Einfluss langjährig unterschiedlicher P-Düngung auf die P-Dynamik in einem Dauerdüngungsversuch in Halle (Saale). *Arch Acker- Pfl Boden* 48:543–551
- Dinkelaker B, Marschner H (1992) *In vivo* demonstration of acid phosphatase activity in the rhizosphere of soil grown plants. *Plant Soil* 144:199–205
- Dinkelaker B, Römheld V, Marschner H (1989) Citric acid excretion and precipitation of calcium citrate in the rhizosphere of white lupin (*Lupinus albus* L.). *Plant Cell Environ* 12:285–292
- Dockhorn T (2008) Über die Relevanz der Nährstoffe Stickstoff und Phosphat im Abwasser – eine Bilanz für Deutschland. *Müll und Abfall* 9:444–449
- Dorado J, Zancada M, Almendros G, López-Fando C (2003) Changes in soil properties and humic substances after long-term amendments with manure and crop residues in dryland farming systems. *J Plant Nutr Soil Sci* 166:31–38
- DRL (2005) Die Auswirkungen erneuerbarer Energien auf Natur und Landschaft. Symposium am 19./20.10.2005 in Berlin

- Egle K, Römer W, Keller H (2003) Exudation of low molecular weight organic acids by *Lupinus albus* L., *Lupinus angustifolius* L. and *Lupinus luteus* L. as affected by phosphorus supply. *Agronomie* 23:511–518
- Eichler B (1997) Phosphataufnahme von Zwischenfrüchten und deren Beitrag zur Nutzung akkumulierter Phosphate im Boden unter Low-Input-Bedingungen. Dissertation, Universität Rostock
- Eichler Eichler B (2004) Möglichkeiten zur Einflussnahme auf Phosphorkreisläufe für die Gestaltung nachhaltiger Bodennutzungssysteme. Habilitationsschrift, Universität Rostock
- Eichler B, Caus M, Schnug E, Köppen D (2004) Soil acid and alkaline phosphatase activities in regulation of crop species and fungal treatment. *Landbauforsch* 54:1–5
- Eichler-Löbermann B, Gaj R, Schnug E (2009) Improvement of Soil Phosphorus Availability by Green Fertilization with Catch Crops. *Commun Soil Sci Plant Anal* 40:70–81
- Eichler-Löbermann B, Schiemenz K, Makadi M, Vago I, Köppen D (2008a) Nutrient cycling by using residues of bioenergy production – II Effects of biomass ashes on plant and soil parameters. *Cereal Res Commun* 36:1259–1262
- Eichler-Löbermann B, Schnug E (2006) Crop plants and the availability of phosphorus in soil. In: Lal R (Ed) *Encyclopedia of soil science*. Marcel Dekker, New York, 348–350
- Eichler-Löbermann B, Köhne S, Kowalski B, Schnug E (2008b) Effect of catch cropping on phosphorus bioavailability in comparison to organic and inorganic fertilization. *J Plant Nutr* 31: 659–676
- Eivazi F, Tabatabai MA (1977) Phosphatases in soils. *Soil Biol Biochem* 9:167–172
- Elsner H (2008) Stand der Phosphat-Reserven weltweit. Braunschweiger Nährstofftage 2008 "Ressourcen schonender Einsatz von Phosphor in der Landwirtschaft", Julius Kühn-Institut, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Braunschweig.
- Erich MS, Ohno T (1992) Phosphorus availability to corn from wood ash amended soils. *Water Air Soil Poll* 64:475–485
- Etiégni L, Campbell AG (1991) Physical and chemical characteristics of wood ash. *Bioresour Technol* 37:173–178
- Ezawa T, Smith SE, Smith FA (2002) P metabolism and transport in AM fungi. *Plant Soil* 244: 221–230
- FAO (2008) *Current World Fertilizer Trends and Outlook to 2012*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome
- Finck A (2007) *Pflanzenernährung und Düngung in Stichworten*, 6. Auflage, Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Berlin, Stuttgart
- Franz M (2008) Phosphate fertilizer from sewage sludge ash (SSA). *Waste Manag* 28:1809–1818
- Frossard E, Julien P, Neyroud J-A, Sinaj S (2004) *Phosphor in Böden – Standortbestimmung Schweiz, Schriftenreihe Umwelt Nr. 368*, Bern
- Fukuda T, Osaki M, Shinano T, Wasaki J (2001) Cloning and characterization of two secreted acid phosphatases from rice calli. In: Horst WJ, Schenk MK, Bürkert A, Claassen N, Flessa H, Frommer WB, Goldbach H, Olf HW, Römhild V, Sattelmacher B, Schmidhalter U, Schubert S, Wirén NV, Wittenmayer L (Eds) *Plant Nutrition: Food security and sustainability of agroecosystems through basic and applied research*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 34–35

8 Literaturverzeichnis

- Gahoonia TS, Claassen N, Jungk A (1992) Mobilization of phosphate in different soils by ryegrass supplied with ammonium or nitrate. *Plant Soil* 140:241–248
- Gahoonia TS, Care D, Nielsen NE (1997) Roots hairs and phosphorus acquisition of wheat and barley cultivars. *Plant Soil* 191:181–188
- Geelhoed JS, van Riemsdijk WH, Findenegg GR (1999) Simulation of the effect of citrate exudation from roots on the plant availability of phosphate adsorbed on goethite. *Eur J Soil Sci* 50: 379–390
- Gerath H (1993) Entwicklung von stickstoffeffizientem Winterraps. Forschungsreport Ernährung, Landwirtschaft, Forsten 8:9–10
- Gerath H, Balko C (1998) Möglichkeiten zur komplexen Steigerung der abiotischen Stresstoleranz bei Winterraps. *Arch Acker- Pfl Boden* 43:109–121
- George TS, Gregory PJ, Wood M, Read D, Buresh RJ (2002) Phosphatase activity and organic acids in the rhizosphere of potential agroforestry species and maize. *Soil Biol Biochem* 34: 1487–1494
- Gerke J, Römer W, Jungk A (1994) The excretion of citric and malic acid by proteoid roots of *Lupinus albus* L; effects on soil solution concentration of phosphate, iron and aluminium in the proteoid rhizosphere in samples of an oxisol and a luvisol. *Z Pflanzenernähr Bodenk* 157: 289–294
- 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
- Gilbert N (2009) The disappearing nutrient. *Nature* 461:716–718
- Gilbert GA, Knight JD, Vance CP, Allan DL (1999) Acid phosphatase activity in phosphorus-deficient white lupin roots. *Plant Cell Environ* 22:801–810
- Gisi U, Schenker R, Schulin R, Stadelmann FX, Sticher H (1997) *Bodenökologie*. 2. Auflage, Thieme, Stuttgart, New York
- Gleisberg D (1988) Phosphate und Umwelt. *Chem Unserer Zeit* 6:201–207
- Godlinski F, Leinweber P, Meissner R, Lennarz B (2003) Abschätzung der Phosphorausträge anhand von Lysimeterversuchen. 10. Gumpensteiner Lysimetertagung, 29. und 30. April 2003, Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irdning, Österreich. URL: <http://www.raumberg-gumpenstein.at/c/> (19.11.2009)
- Grinsted MJ, Hedley MJ, White RE, Nye PH (1982) Plant-induced changes in the rhizosphere of rape (*Brassica napus* var. Emerald) seedlings. I. pH change and the increase in P concentration in the soil solution. *New Phytol.* 91:19–29
- Gross M (2010) Fears over phosphorus supplies. *Current Biology* 20:R386–R387
- Guddat C (2009) Landessortenversuche zu Körnerleguminosen in den ostdeutschen Bundesländern – Ergebnisse aus der Arbeit der Länderdienststellen Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen. *J Kulturpfl* 61:318–323
- Guppy CN, Menzies NW, Moody PW, Blamey FPC (2005) Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: A review. *Aust J Soil Res* 43:189–202
- Gyaneshwar P, Kumar GN, Parekh LJ, Poole PS (2002) Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. *Plant Soil* 245:83–93
- Haarr A (2005) The reuse of phosphorus. *Eureau Position Paper EU2-04-SL09*, 2005

8 Literaturverzeichnis

- Häussling M, Marschner H (1989) Organic and inorganic soil phosphates and acid phosphatase activity in the rhizosphere of 80-year-old Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] trees. *Biol Fertil Soils* 8:128–133
- Hammond JP, Broadley MR, White PJ, King GJ, Bowen HC, Hayden R, Meacham MC, Mead A, Overs T, Spracklen WP, Greenwood DJ (2009) Shoot yield drives phosphorus use efficiency in *Brassica oleracea* and correlates with root architecture traits. *J Exp Bot* 60:1953–1968
- Hammond JP, White PJ (2008) Sucrose transport in the phloem: integrating root responses to phosphorus starvation. *J Exp Bot* 59:93–109
- Hartmann H (2001) Die energetische Nutzung von Stroh und strohähnlichen Brennstoffen in Kleinanlagen. In: Gülzower Fachgespräche Band 17, Energetische Nutzung von Stroh, Ganzpflanzengetreide und weiterer halmgutartiger Biomasse. FNR (Hrsg)
- Hartono A (2008) Releasing Pattern of Applied Phosphorus and Distribution Change of Phosphorus Fractions in the Acid Upland Soils with Successive Resin Extraction. *J Tanah Trop* 13:87–94
- He Z, Griffin TS, Honeycutt CW (2004) Evaluation of Soil Phosphorus Transformations By Sequential Fractionation and Phosphatase Hydrolysis. *Soil Sci* 169:515–527
- Hedley MJ, Stewart JWB, Chauhan BS (1982) Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions by cultivation practices and laboratory incubation. *Soil Sci Soc Am J* 46:970–976
- Heiden E (1887) Lehrbuch der Düngerlehre, Bd. 1 und 2, 2. Auflage, Hannover
- Heintz A, Reinhardt G (1996) Chemie und Umwelt. 4. Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden
- Henneberg M (2009) Mitteilung von Dr. Henneberg (Universität Rostock) – Witterungsdaten für den Feldversuchsstandort Rostock
- Hering T (2011) Emissionen bei der Verbrennung von Halmgut (Grünlandaufwüchsen, Stroh) in Praxisanlagen. Konferenzreader: Energetische Nutzung von landschaftspflegematerial, 01./02. März 2011 in Berlin, BMU-Förderprogramm Energetische Biomassennutzung
- Hiltunen M, Barisic V, Zabetta EC (2008) Combustion of different types of biomass in CFB boilers. 16th European Biomass Conference & Exhibition, 2–6 June 2008, Valencia, Spain
- 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
- Hinsinger P, Plassard C, Tang C, Jaillard B (2003) Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: A review. *Plant Soil* 248:43–59
- Hintermaier-Erhard G, Zech W (1997) Wörterbuch der Bodenkunde. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- Hoffland E (1992) Quantitative evaluation of the role of organic acid exudation in the mobilization of rock phosphate by rape. *Plant Soil* 140:279–289
- Hoffmann G (1991) Die Untersuchung von Böden. VDLUFA-Methodenbuch Bd. I, 4. Auflage, VDLUFA-Verlag, Darmstadt
- Holzner H (1999) Die Verwendung von Holzaschen aus Biomassefeuerungen zur Düngung von Acker- und Grünland. Dissertation, Universität für Bodenkultur Wien
- Holzner H, Obernberger I (2011) Richtlinie für den sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen und Verwertung auf land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg), Wien

- Horst WJ, Kamh M, Jibrin JM, Chude VO (2001) Agronomic measures for increasing P availability to crops. *Plant Soil* 237:211–223
- Hytönen J (2003) Effects of wood, peat and coal ash fertilization on Scots Pine foliar nutrient concentrations and growth on afforested former agricultural peat soils. *Silva Fennica* 37: 219–234
- Iqbal SM (2009) Effect of Crop Residue Qualities on Decomposition Rates, Soil Phosphorus Dynamics and Plant Phosphorus Uptake. PhD thesis, The University of Adelaide, South Australia
- Iyamuremye F, Dick RP, Baham J (1996) Organic amendments and phosphorus dynamics: I. Phosphorus chemistry and sorption. *Soil Sci* 161:426–435
- Izaguirre-Mayoral ML, Flores S, Carballo O (2002). Determination of acid phosphatase and dehydrogenase activities in the rhizosphere of nodulated legume species native to two contrasting savannas in Venezuela. *Biol Fertil Soils* 35:470–472
- Jakobsen P, Willett IR (1986) Comparisons of the fertilizing and liming properties of lime-treated sewage sludge with its incinerated ash. *Fert Res* 9:187–197
- Jamil M, Qasim M, Umar M, Subhan A (2004) Impact of organic wastes (bagasse ash) on the yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) in a calcareous soil. *Int J Agr Biol* 6:468–470
- Jensen LS, Pedersen A, Magid J, Nielsen NE (2005) Catch crops have little effect on P and K availability of depleted soils. *DARCOF e-news* 2, 1–7. URL: <http://www.darcof.dk/enews/jun05/fosfor.html> (13.05.2009)
- Jiang C, Gao X, Liao L, Harberd NP, Fu X (2007) Phosphate Starvation Root Architecture and Anthocyanin Accumulation Responses Are Modulated by the Gibberellin-DELLA Signaling Pathway in Arabidopsis. *Plant Physiol* 145:1460–1470
- Juma NG, Tabatabai MA (1978) Distribution of phosphomonoesterases in soils. *Soil Sci* 126: 101–108
- Jungk A (2001) Root hairs and the acquisition of plant nutrients from soil. *J Plant Nutr Soil Sci* 164: 121–129
- KA5 (2005) Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Auflage, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg), Schweizerbart, Stuttgart
- Kabata-Pendias A (2001) Trace Elements in Soils and Plants. Boca Raton, Florida. CRC Press
- Kahle P, Kretschmer H (1994) Einfluß unterschiedlicher Gehalte an organischer Bodensubstanz auf das Konsistenzverhalten verschiedener Mineralbodensubstrate. *Z Pflanzenernähr Bodenk* 157: 393–396
- Kaikake K, Sekito T, Dote Y (2009) Phosphate recovery from phosphorus-rich solution obtained from chicken manure incineration ash. *Waste Manage* 29:1084–1088
- Kaltschmitt M, Hartmann H (Hrsg) (2001) Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. 1. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- Kaltschmitt M, Hartmann H, Hofbauer H (Hrsg) (2009) Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- Kaltschmitt M, Merten D, Fröhlich N, Nill M (2003) Energiegewinnung aus Biomasse. Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten 2003 "Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit" Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York

- Kaltschmitt M, Thrän D (2001) Stroh als biogener Festbrennstoff in Europa. In: Gülzower Fachgespräche 17 (Energetische Nutzung von Stroh, Ganzpflanzengetreide und weiterer halmgutartiger Biomasse), FNR (Hrsg)
- Kamh M, Abdou M, Chude V, Wiesler F, Horst W (2002) Mobilization of phosphorus contributes to positive rotational effects of leguminous cover crops on maize grown on soils from northern Nigeria. *J Plant Nutr Soil Sci* 165:566–572
- Kania A (2005) Regulation of phosphate deficiency-induced carboxylate exudation in cluster roots of white lupin (*Lupinus albus* L.). Dissertation, University of Hohenheim
- Khade SW, Rodrigues BF, Sharma PK (2010) Arbuscular mycorrhizal status and root phosphatase activities in vegetative *Carica papaya* L. varieties. *Acta Physiol Plant* 32:565–574
- Khamis S, Chaillou S, Lamaze T (1990) CO₂ Assimilation and Partitioning of Carbon in Maize Plants Deprived of Orthophosphate. *J Exp Bot* 41:1619–1625
- Khan MS, Zaidi A, Wani PA (2009a) Role of Phosphate Solubilizing Microorganisms in Sustainable Agriculture – A Review, Part 5 in Sustainable Agriculture, Lichtfouse et al. (Eds), Springer-Verlag, Dordrecht, Heidelberg, London, New York
- Khan AA, Jilani G, Akhtar MS, Naqvi SMS, Rasheed M (2009b) Phosphorus Solubilizing Bacteria: Occurrence, Mechanisms and their Role in Crop Production. *J Agric Biol Sci* 1:48–58
- Kirk GJD (1999) A model of phosphate solubilization by organic anion excretion from plant roots. *Eur J Soil Sci* 50:369–378
- Kirk GJD (2002) Modelling root-induced solubilization of nutrients. *Plant Soil* 255:49–57
- Kochler M (2001) Analyse und Modellierung der Anpassungsreaktionen von Blumenkohl (*Brassica oleracea* L. *botrytis*) an eine limitierte Wasserversorgung. Dissertation, Universität Hannover
- Körber-Grohne U (1988) Nutzpflanzen in Deutschland. Kulturgeschichte und Biologie. Theiss, Stuttgart
- Köster W, Schachtschabel P (1983) Kurzmitteilung: Beziehung zwischen dem durch Phosphatdüngung erzielbaren Mehrertrag und dem Phosphatgehalt im Boden. *Z Pflanzenernähr Bodenk* 146:539–542
- Koide RT (1991) Nutrient supply, nutrient demand and plant response to mycorrhizal infection. *New Phytol* 117:365–386
- Kratz S, Schnug E (2005) Schwermetalle in P-Düngern. *Landbauforsch*, Special Issue 286:37–46
- Kratz S, Schnug E (2006) Rock phosphates and P fertilizers as sources of U contamination in agricultural soils. Merkel BJ, Hasche-Berger A (Eds), Berlin, Heidelberg, New York (Uranium in the environment: mining impact and consequences), 57–67
- 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)
- Kratz S, Schnug E (2009) Zur Frage der Löslichkeit und Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor in Düngemitteln. On the solubility and plant availability of phosphorus from mineral fertilizers – a review. *J Kulturpfl* 61:2–8
- Krejsl JA, Scanlon TM (1996) Evaluation of beneficial use of wood-fired boiler ash on oat and bean growth. *J Environ Qual* 25:950–954

8 Literaturverzeichnis

- Kristoffersen AØ, Riley H, Sogn TA (2005) Effects of P fertilizer placement and temperature on root hair formation, shoot growth and P content of barley grown on soils with varying P status. *Nutr Cycl Agroecosyst* 73:147–159
- Kwabiah AB, Stoskopf NC, Palm CA, Voroney RP (2003) Soil P availability as affected by the chemical composition of plant materials: implications for P-limiting agriculture in tropical Africa. *Agric Ecosyst Environ* 100:53–61
- Larcher W (2001) *Ökophysiologie der Pflanzen*. UTB Verlag, Stuttgart
- Launhardt T, Hartmann H, Link H, Schmid V (2000) Verbrennungsversuche mit naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinf Feuerungsanlage – Emissionen und Aschequalität. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg), München, Reihe „Materialien“ Nr. 156
- Leible L, Arlt A, Fürniß B, Kälber S, Kappler G, Lange S, Nieke E, Rösch C, Wintzer D (2003) Energie aus biogenen Rest- und Abfallstoffen. Bereitstellung und energetische Nutzung organischer Rest- und Abfallstoffe sowie Nebenprodukte als Einkommensalternative für die Land- und Forstwirtschaft - Möglichkeiten, Chancen und Ziele. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe 2003 (Wissenschaftliche Berichte, FZKA 6882).
- Leinweber P (1996) Phosphorus fractions in soils from area with high density of livestock population. *Z Pflanzenernähr Bodenk* 159:252–256
- Leppin T (2007) Mobilisierungspotential unterschiedlicher Pflanzen für stabile Phosphatformen im Boden. Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen
- Li SM, Li L, Zhang FS, Tang C (2004) Acid Phosphatase Role in Chickpea/Maize Intercropping. *Annals of Botany* 94:297–303
- Li GC, Mahler RL, Everson DO (1990) Effects of plant residues and environmental factors on phosphorus availability in soils. *Commun Soil Sci Plant Anal* 21:471–491
- Liebhart P, Refenner K, Wagentristsl H, Zeitlhofer C (2009) Asche- und Kompostdüngung zur Schließung von Nährstoffkreisläufen bei der Produktion Nachwachsender Rohstoffe in Österreich – *Miscanthus Giganteus*. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 21, 83–84; ISSN 0934-5116
- Lookman R, Vandeweert N, Merckx R, Vlassak K (1995) Geostatistical assessment of the regional distribution of phosphate sorption capacity parameters (Fe_{ox} and Al_{ox}) in northern Belgium. *Geoderma* 66:285–296
- Lopez R, Padilla E, Bachmann S, Eichler-Loebermann B (2009) Effects of Biomass Ashes on Plant Nutrition in Tropical and Temperate Regions. *J Agr Rural Dev Trop* 110:51–60
- López-Bucio J, Cruz-Ramírez A, Herrera-Estrella L (2003) The role of nutrient availability in regulating root architecture. *Curr Opin Plant Biol* 6:280–287
- Ludwig H (2009) Rückgewinnung von Phosphor aus der Abwassereinigung. Eine Bestandsaufnahme. Umwelt-Wissen Nr. 0929. Bundesamt für Umwelt, Bern
- Lütke Entrup N (2001) Zwischenfrüchte im umweltgerechten Pflanzenbau. Auswertungs- und Informationsdienst für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (aid) e.V. (Hrsg), Verlag Th. Mann, Gelsenkirchen
- LUFA Rostock (2004) Düngung – Hinweise und Richtwerte für die landwirtschaftliche Praxis. Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei M-V (Hrsg)
- LWK Schl.-H. (2009) Richtwerte für die Düngung. 20. Auflage, Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein, Rendsburg

- Lynch J (1995) Root Architecture and Plant Productivity. *Plant Physiol* 109:7–13
- Lynch JP, Brown KM (2008) Root strategies for phosphorus acquisition. In: White PJ, Hammond JP (Hrsg) *The Ecophysiology of Plant-Phosphorus Interactions*. Springer
- Machado CT de T, Furlani AMC (2004a) Kinetics of phosphorus uptake and root morphology of local and improved varieties of maize. *Sci Agric* 61:69–76
- Machado CT de T, Furlani AMC (2004b) Root phosphatase activity, plant growth and phosphorus accumulation of maize genotypes. *Sci Agric* 61:216–223
- Mandre M (2006) Influence of wood ash on soil chemical composition and biochemical parameters of young Scots pine. *Proc Estonian Acad Sci Biol Ecol* 55:91–107
- Marschner H (1995) *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press, San Diego, CA, USA
- Marschner H, Römheld V, Horst WJ, Martin P (1986) Root-induced changes in the rhizosphere: Importance for the mineral nutrition of plants. *Z Pflanzenernähr Bodenk* 149:441–456
- Mbah CN, Nwite JN, Njoku C, Nweke IA (2010) Response of maize (*Zea mays* L.) to different rates of wood-ash application in acid ultisol in Southeast Nigeria. *Afric J Agric Res* 5:580–583
- McKenzie RH, Stewart JWB, Dormaar JF, Schaalje G B (1992) Long-term crop rotation and fertilizer effects on phosphorus transformations. II. In a Luvisolic soil. *Can J Soil Sci* 72: 581–589
- McLenaghan RD, Randhawa PS, Condrón LM, Di HJ (2004) Increasing phosphate rock availability using a lupin green manure crop. *SuperSoil 2004:Proceedings of the 3rd Australian New Zealand Soils Conference*, University of Sydney, Australia
- Mengel K, Kirkby EA (2001) *Principles of Plant Nutrition*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands
- Misra MK, Ragland KW, Baker AJ (1993) Wood ash composition as a function of furnace temperature. *Biomass Bioenerg* 4:103–116
- Mollier A, Pellerin S (1999) Maize root system growth and development as influenced by phosphorus deficiency. *J Exp Bot* 50:487–497
- Morel C, Hinsinger P (1999) Root-induced modifications of the exchange of phosphate ion between soil solution and soil solid phase. *Plant Soil* 211:103–110
- Mozaffari M, Russelle MP, Rosen CJ, Nater EA (2002) Nutrient supply and neutralizing value of alfalfa stem gasification ash. *Soil Sci Soc Am J* 66:171–178
- Müller T (2004) *Umsatz pflanzlicher Residuen im Boden – Vorschläge zur Modifizierung des Boden-Pflanze-Atmosphäre-Modells DAISY*. Habilitationsschrift, Universität Kassel
- Müller T, Römheld V (2005) Stickstoff- und Phosphorversorgung in ökologisch wirtschaftenden Betrieben – ein Problem? *Landinfo* 4:12–16
- Müller-Langer F, Witt J, Thrän D, Schneider S, Baur F, Koch M, Fritsche UR, Wiegmann K (2007) *Monitoring zur Wirkung der Biomasseverordnung. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Auftrag des BMU und UBA, vorgelegt vom Institut für Umwelt und Energetik GmbH, Leipzig in Zusammenarbeit mit dem Institut für ZukunftsEnergieSysteme gGmbH, Saarbrücken und dem Öko-Institut e.V., Darmstadt*, URL: <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-1/3657.pdf> (08.10.2010)
- Münch J (2008) *Nachhaltig nutzbares Getreidestroh in Deutschland*. Positionspapier, IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, URL: http://www.ifeu.org/landwirtschaft/pdf/IFEU_Positionspapier_Stroh.pdf (08.10.2010)

- Mullins GL, Sikora FJ (1995) Effect of soil pH on the requirement for water-soluble phosphorus in triple superphosphate fertilizers. *Fert Res* 40:207–214
- Muse JK, Mitchell CC (1995) Paper Mill Boiler Ash and Lime By-Products as Soil Liming Materials. *Agron J* 87:432–438
- Negassa W (2009) Organic Matter Effects on Phosphorus Dynamics in Tropical Soils: Sorption, Fractionation, Speciation and Biochemical Activities. Dissertation, Universität Rostock.
- Negassa W, Kruse J, Michalik D, Appathurai N, Zuin L, Leinweber P (2010) Phosphorus Speciation in Agro-Industrial Byproducts: Sequential Fractionation, Solution ^{31}P NMR, and P K- and $L_{2,3}$ -Edge XANES Spectroscopy. *Environ Sci Technol* 44:2092–2097
- Negassa W, Leinweber P (2009) How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: A review. *J Plant Nutr Soil Sci* 172: 305–325
- Nelson GC, Bennett E, Berhe AA, Cassman KG, DeFries R, Dietz T, Dobson A, Dobermann A, Janetos A, Levy M, Marco D, Nakićenović N, O'Neill B, Norgaard R, Petschel-Held G, Ojima D, Pingali P, Watson R, Zurek M (2005) Chapter 7 – Drivers of Change in Ecosystem Condition and Services. In Carpenter et al. (Eds) *Ecosystems and Human Well-being: Scenarios, Volume 2. Findings of the Scenarios Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment*. Island Press, 173–222
- Neumann G (2007) Root Exudates and Nutrient Cycling. In: Marschner P, Rengel Z (Eds) *Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystems*. Springer, Berlin, Heidelberg
- Neumann G, Römheld V (2002) Root-induced changes in the availability of nutrients in the rhizosphere. In: *Plant Roots The Hidden Half*, 3rd ed., Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U (Eds) Marcel Dekker, New York, 617–649
- Neurauter R, Mölgg M, Reinalter M (2004) *Aschen aus Biomassefeuerungsanlagen – Leitfaden*, 2. Auflage. Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Umweltschutz/Referat Abfallwirtschaft
- Nielsen KL, Eshel A, Lynch JP (2001) The effect of phosphorus availability on the carbon economy of contrasting common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. *J Exp Bot* 52:329–339
- Nielsen NE, Schjorring JK (1983) Efficiency and kinetics of phosphorus uptake from soil by various barley genotypes. *Plant Soil* 72:225–230
- Nkana JCV, Demeyer A, Verloo MG (1998) Availability of nutrients in wood ash amended tropical acid soils. *Environ Technol* 19:1213–1221
- Nkana JCV, Demeyer A, Verloo MG (2002) Effect of wood ash application on soil solution chemistry of tropical acid soils incubation study. *Bioresour Technol* 85:323–325
- Nuruzzaman M, Lamers H, Bolland MDA (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
- Nye PH, Greenland DJ (1960) The soil under shifting cultivation. Technical Communication No. 51, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, Bucks, England
- Nziguheba G, Palm CA, Buresh RJ, Smithson PC (1998) Soil phosphorus fractions and adsorption as affected by organic and inorganic sources. *Plant Soil* 198:159–168
- Obernberger I (1997) *Aschen aus Biomassefeuerungen – Zusammensetzung und Verwertung*. In: VDI Bericht 1319 *Thermische Biomassenutzung – Technik und Realisierung*. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 199–222

8 Literaturverzeichnis

- Obernberger I (2000) Thermische Nutzung fester biogener Brennstoffe. In: VDI-Schriftenreihe „Regenerative Energien in Ungarn und in Deutschland“, ISBN 3-931384-32-2, VDI Verlag GmbH (Hrsg), Düsseldorf, Deutschland, 59–101
- Obernberger I (2005a) Ash related problems in biomass combustion plants. Inaugural lecture, 20.05.2005, Technische Universität Eindhoven, URL: <http://alexandria.tue.nl/extra2/rees/obernberger2005.pdf> (29.01.2010)
- Obernberger I (2005b) Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente. Schriftenreihe “Thermische Biomassenutzung”, Bd. 1, 4. Auflage, Medienfabrik Graz, Steiermärkische Landesdruckerei GmbH, Graz, Österreich
- Obernberger I, Brunner T, Bärnthaler G (2006) Chemical properties of solid biofuels – significance and impact. *Biomass Bioenerg* 30:973–982
- Obernberger I, Holzner H, Ruckebauer P (1997) Zusammensetzung, Verwendungsmöglichkeiten und Umweltverträglichkeit von Aschen aus Biomassefeuerungen. In: Energieverwertungsagentur (Hrsg): Highlights aus der Biomasseforschung 1996/1997, Tagungsband, Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr und Österreichischer Biomasse-Verband. 15 Seiten
- Obernberger I, Supancic K (2009) Possibilities of ash utilization from biomass combustion plants. Proceedings of the 17th European Biomass Conference & Exhibition. June/July 2009, Hamburg, ETA-Renewable Energies (Ed), Italy
- Oberson A, Fardeau JC, Besson J-M, Sticher H (1993) Soil phosphorus dynamics in cropping systems managed according to conventional and biological agricultural methods. *Biol Fertil Soils* 16:111–117
- Oberson A, Joner EJ (2005) Microbial turnover of phosphorus in soil. In: Turner BL, Frossard E, Baldwin D (Eds) *Organic phosphorus in the environment*. CABI Wallingford, 133–164
- Odlare M (2005) Organic residues – a resource for arable soils. Dissertation, Dept. of Microbiology, SLU. *Acta Universitatis agriculturae Sueciae* vol 2005, 71
- Oechsner H, Maurer K (2004) Verbrennung von Heu und Getreide – für jeden technisch machbar? Tagungsbandartikel „Nachwachsende Rohstoffe für Baden-Württemberg – Forschungsprojekte für den Ländlichen Raum“ zur Tagung am 14. Oktober 2004, Universität Hohenheim
- O'Halloran IP, Stewart JW, De Jong E (1978) Changes in P forms and availability as influenced by management practices. *Plant Soil* 100:113–126
- Ohnishi O (1998) Search for the wild ancestor of buckwheat. III. The wild ancestor of cultivated common buckwheat and of tatar buckwheat. *Econ Bot* 52:123–133
- Ohno T, Erich MS (1990) Effect of wood ash application on soil pH and soil test nutrient levels. *Agric Ecosyst Environ* 32:223–239
- Onwuka MI, Osodeke VE, Okolo NA (2007) Amelioration of soil acidity using cocoa husk ash for maize production in Umudike area of south east Nigeria. *Trop subtrop agro-ecosyst* 7:41–45
- Ostermann D (2010) EU-Kommission präsentiert Nachhaltigkeitskriterien für Biomasse. Lebensministerium Öffentlichkeitsarbeit, URL: <http://www.nachhaltigkeit.at/article/articleview/81553/1/29186/> (25.02.2010)
- Otani T, Ae N (1996) Sensitivity of phosphorus uptake to changes in root length and soil volume. *Agron J* 88:371–375
- Ottow JCG (2011) Physiko-Chemie und Mikrobiologie der Rhizosphäre. In: Ottow JCG (Hrsg) *Mikrobiologie von Böden*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 431–454

- Ozawa K, Osaki M, Matsui H, Houma M, Tadano T (1995) Purification and properties of acid phosphatase secreted from lupin roots under phosphorus-deficiency conditions. *Soil Sci Plant Nutr* 41:461–469
- Page AL, Miller RH, Keeney DR (1982) *Methods of soil analysis*. Agron No 9, Part 2: Chemical and microbiological properties, 2nd ed, Am Soc Agron, Madison, WI, USA.
- Pagel H, Benkenstein H, Krüger W, Baumecker M (1996) P- und K-Status des Bodens in den P- und K-Mangelvarianten des Thyrower Statischen Nährstoffmangelversuches nach 55-jähriger Versuchsdauer. *Mitt Deutsch Bodenk Gesellsch* 79:271–274
- Pagliari PH, Rosen CJ, Strock JS (2009) Turkey Manure Ash Effects on Alfalfa Yield, Tissue Elemental Composition, and Chemical Soil Properties. *Commun Soil Sci Plant Anal* 40:2874–2897
- Patterson SJ, Acharya SN, Bertschi AB, Thomas JE (2004a) Application of wood ash to acidic boralf soils and its effect on oilseed quality of canola. *Agron J* 96:1344–1348
- Patterson SJ, Acharya SN, Thomas JE, Bertschi AB, Rothwell RL (2004b) Barley biomass and grain yield and canola seed yield response to land application of wood ash. *Agron J* 96: 971–977
- Paul EA (Ed) (2007) *Soil microbiology, ecology, and biochemistry*. 3rd edition, Elsevier Academic Press, Burlington MA USA, Oxford UK
- Pearse SJ, Veneklaas EJ, Cawthray G, Bolland MD, Lambers H (2007) Carboxylate composition of root exudates does not relate consistently to a crop species' ability to use phosphorus from aluminium, iron or calcium phosphate sources. *New Phytol* 173:181–190
- Peisker D (2007) Stand der Technik der Strohverbrennung – Brennstoffparameter, rechtliche Rahmenbedingungen, Technik und Wirtschaftlichkeit. Agrarinformationssystem der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Ref. 430, URL: <http://www.tll.de/ainfo/pdf/strv0207.pdf> (24.02.2011)
- Pels JR, De Nie DS, Kiel JHA (2005) Utilization of ashes from biomass combustion and gasification. 14th European Biomass Conference & Exhibition, Paris, France, 17–21 October 2005, ECN-RX-05-182
- Perucci P, Monaci E, Casucci C, Vischetti C (2006) Effect of recycling wood ash on microbiological and biochemical properties of soil. *Agron Sustain Dev* 26:157–165
- Petersen W, Böttger M (1991) Contribution of organic acids to the acidification of the rhizosphere of maize seedlings. *Plant Soil* 132:159–163
- Piotrowska P, Zevenhoven M, Hupa M, Davidsson K, Amand LE, Zabetta EC, Barisic V (2010) Fate of Phosphorus During Co-Combustion of Rapeseed Cake with Wood. In: Yue G, Zhang H, Zhao C, Luo Z (Eds) *Proceedings of the 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion*, Xi'an, China, May 18–20, 2009, 979–986
- Plassard C, Betencourt E, Devau N, Duputel M, Gérard F, Jaillard B, Le Cadre E, Hinsinger P (2010) Phosphorus bioavailability – nothing but a rhizosphere story. 6th International Phosphorus Workshop (IPW6) Towards a sustainable control of diffuse P loss: risk, monitoring, modelling, and mitigation options. 27.09.–01.10.2010, Sevilla, Spanien URL: <http://www.ipw6.us.es/pdf/abstracts-ipw6.pdf> (10.05.2011)
- Pradt D (2007) Mineraldüngerproduktion im regionalen Vergleich – Deutschland, Europa, Welt. Tagungsband Rohstoffverfügbarkeit für Mineraldünger – Perspektiven unter hohen Energiekosten und begrenzten Ressourcen. Bundesarbeitskreis Düngung (BAD), Frankfurt/Main, 99–112

8 Literaturverzeichnis

- Radkau J (2002) Natur und Macht. Eine Weltgeschichte der Umwelt. C.H.Beck, München
- Rajan SSS (1985) Partial acidulation of an unground phosphate rock 1. Preparation and characteristics. Fert Res 8:147–155
- Rasch B, Friese M, Hofmann W, Naumann E (2010) Quantitative Methoden. Band 1, 3. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg
- Reddy DD, Rao AS, Singh M (2001) Crop residue effects on myriad forms and sorption of phosphorus in a Vertisol. Bioresour Technol 80:93–99
- Reddy KJ, Wang L, Gloss SE (1995) Solubility and mobility of copper, zinc and lead in acidic environments. Plant Soil 171:53–58
- Reichenberger HP, Gleis M, Quicker P, Mockler M, Faulstich M (2008a) Feste Rückstände aus Verbrennungsanlagen, Teil 2. Müll und Abfall 9:468–473
- Reichenberger HP, Quicker P, Gleis M, Mockler M, Faulstich M (2008b) Feste Rückstände aus Verbrennungsanlagen, Teil 1. Müll und Abfall 8:386–393
- Reichenberger HP, Mockler M, Quicker P, Faulstich M (2007) Rückstände aus verschiedenen Verbrennungsanlagen. In: Bilitewski B, Urban AI, Faulstich M (Hrsg): Thermische Abfallbehandlung 2007, Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik Band 12. Universität Kassel, kassel university press GmbH (ISBN 978-389958-274-1), Kassel, 231–251
- Richards IR, Dawson CJ (2008) Phosphorus Imports, Exports, Fluxes and Sinks in Europe. Proceedings 638, International Fertilizer Society, York, UK, URL: <http://www.fertiliser-society.org/proceedings/uk/Prc638.HTM> (03.03.2011)
- Richardson AE, Hadobas PA, Hayes JE (2000) Acid phosphomonoesterase and phytase activities of wheat (*Triticum aestivum* L.) roots and utilization of organic phosphorus substrates by seedlings grown in sterile culture. Plant Cell Environ 23:397–405
- Römer W (2006) Vergleichende Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit von Phosphat aus verschiedenen P-Recycling-Produkten im Keimpflanzenversuch. J Plant Nutr Soil Sci 169:826–832
- Römer W (2009) Ansätze für eine effiziente Nutzung des Phosphors auf der Basis experimenteller Befunde. 5–30 In: Ber Ldw 87 Hrg. BMELV
- Rogasik J, Funder U, Schnug E (2004) Kommen wir im Jahr 2025 zu geschlossenen Nährstoffkreisläufen? Landbauforsch, Sonderheft 274, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig
- Ros M, Hernández MT, García C (2003) Soil microbial activity after restoration of a semiarid soil by organic amendments. Soil Biol Biochem 35:463–469
- Rosemarin A, de Bruijne G, Caldwell I (2009) Peak phosphorus: The next inconvenient truth. The Broker 15:6–9, URL: <http://www.thebrokeronline.eu/en/Magazine/articles/Peak-phosphorus> (03.01.2011)
- Rosen CJ, Bierman PM, Olsen D (1994) Swiss chard and alfalfa responses to soil amended with municipal solid waste incinerator ash: Growth and elemental composition. J Agric Food Chem 42:1361–1368
- Rotheneder E (2005) Land- und forstwirtschaftliche Nutzung von Biomasseaschen. Pro Cinis II – Endbericht. Austrian Bio Energy Centre
- Rychter AM, Randall DD (1994) The effect of phosphate deficiency on carbohydrate metabolism in bean roots. Physiol Plant 91:383–388

- Saarsalmi A, Mälkönen E, Piirainen S (2001) Effects of wood ash fertilization on forest soil chemical properties. *Silva Fennica* 35:355–368
- Sanchez PA (2002) Soil fertility and hunger in Africa. *Science* 295:2019–2020
- Sánchez-Calderón L, López-Bucio J, Chacón-López A, Cruz-Ramírez A, Nieto-Jacobo F, Dubrovsky JG, Herrera-Estrella L (2005) Phosphate starvation induces a determinate developmental program in the roots of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell Physiol* 46:174–184
- Sander M-L, Andrén O (1997) Ash from cereal and rape straw used for heat production: Liming effect and contents of plant nutrients and heavy metals. *Water Air Soil Poll* 93:93–108
- Šarapatka B (2003) Phosphatase activities (ACP, ALP) in agroecosystem soils. Dissertation, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala
- Sattelmacher B, Horst WJ, Becker HC (1994) Factors that contribute to genetic variation for nutrient efficiency of crop plants. *Z Pflanzenernähr Bodenk* 157:215–224
- Sattelmacher B, Klotz F, Marschner H (1983) Bestimmung der Wurzellänge mit Schnellmethoden. In: *Wurzelökologie und ihre Nutzanwendung / Root Ecology and its practical Application*. Int. Symp. Gumpenstein, 1982, Bundesanstalt Gumpenstein, Irnding, Österreich, 95–98
- Schachtman DP, Reid RJ, Ayling SM (1998) Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell. *Plant Physiol* 116:447–453
- Schick J (2010) Untersuchungen zu P-Düngewirkung und Schwermetallgehalten thermochemisch behandelter Klärschlammaschen. Dissertation, Technische Universität Braunschweig
- Schicker C (2003) Ablagerung von Asche aus der Biomasseverbrennung. Dipl.-Arbeit, FH Augsburg
- Schiemenz K, Eichler-Löbermann B (2010a) Biomass ashes and their phosphorus fertilizing effect on different crops. *Nutr Cycl Agroecosyst* 87:471–482
- Schiemenz K, Eichler-Löbermann B (2010b) Nutzung von Biomasseaschen für die Phosphorversorgung im Pflanzenbau. Schlussbericht zum gleichnamigen Projekt, gefördert vom BMELV, Projektträger FNR, Förderkennzeichen: 22016206
- Schilling G (2000) *Pflanzenernährung und Düngung*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- Schilling G, Gransee A, Deubel A, Lezovic G, Ruppel S (1998) Phosphorus availability, root exudates, and microbial activity in the rhizosphere. *Z Pflanzenernähr Bodenk* 161:465–478
- Schlichting A, Leinweber P (2002) Effects of pretreatment on sequentially-extracted phosphorus fractions from peat soils. *Commun Soil Sci Plant Anal* 33:1617–1627
- Schlichting A, Leinweber P, Meissner R, Altermann M (2002) Sequentially extracted phosphorus fractions in peat-derived soils. *J Plant Nutr Soil Sci* 165:290–298
- Schmidt JP, Buol SW, Kamprath EJ (1996) Soil phosphorus dynamics during 17 years of continuous cultivation: Fractionation analyses. *Soil Sci Soc Am J* 61:1168–1172
- Schmidt JP, Buol SW, Kamprath EJ (1997) Soil phosphorus dynamics during 17 years of continuous cultivation: A method to estimate long-term P availability. *Geoderma* 78:59–70
- Schmitt TG, Welker A, Steinbrück C, Dierschke M (2007) Perspektiven für eine zukunftsfähige Klärschlamm Entsorgung in Rheinland-Pfalz. Schlussbericht, TU Kaiserslautern
- Schneider K, Turrion MB, Grierson PF, Gallardo JF (2001) Phosphatase activity, microbial phosphorus, and fine root growth in forest soils in the Sierra de Gata, western central Spain. *Biol Fertil Soils* 34:151–155
- Schnug E (2009) P-recycling and sustainable agriculture. Vortrag zum Symposium: “P-recycling in Agriculture“, Helsinki, 08.–09.06.2009

8 Literaturverzeichnis

- Schnug E, Rogasik J, Haneklaus S (2003) Quantitative und qualitative Anforderungen der deutschen Landwirtschaft an Phosphor für die Düngung. In: Tagungsband zum Symposium „Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall“, 06.–07.02.2003, Berlin
- Schoumans OF (2000) Determination of the degree of phosphate saturation in non-calcareous soils. In: Pierzynski GM (Ed) Methods for Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residuals, and Water. Southern Cooperative Series Bulletin 396, North Carolina, 31–34
- Schroll H (2011) mündliche Mitteilung
- Schütte A (2008) Förderung energetischer Halmgutnutzung. 1. Internationale Fachtagung – Strohenergie 2008, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) und Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), April 2008, Jena, URL: http://www.tll.de/ainfo/pdf/stroh/str02_08.pdf (08.10.2010)
- Schweiger P (2006) Eigenschaften von pflanzlicher Biomasse zur thermischen Nutzung (Verbrennen). Landesanstalt für Pflanzenbau Forchheim, URL: https://www.landwirtschaft-bw.info/servlet/PB/show/1199256_11/lap_Eigenschaften_von_pflanzlicher_Biomasse_zur_thermischen_Nutzung.pdf (07.10.2010)
- Schweitzer K, Pagel H (1998) Einfluss langfristig unterschiedlicher Düngung auf P-Fractionen und P-Sorption einer Tieflehm-Fahlerde und Sandlehm-Braunschwarzerde. Arch Acker- Pfl Boden 43:361–372
- Schwertmann U (1964) Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalatlösung. Z Pflanzenernähr Bodenk 105:194–202
- Scurlock JMO (1999). Miscanthus: A review of European experience with a novel energy crop. Environmental Sciences Division Publication No. 4845, (ORNL/TM-13732), Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge (Tennessee, USA)
- Shane MW, Lambers H (2005) Cluster roots: A curiosity in context. Plant Soil 274:101–125
- Shen J, Rengel Z, Tang C, Zhang F (2003) Role of phosphorus nutrition in development of cluster roots and release of carboxylates in soil-grown *Lupinus albus*. Plant Soil 248:199–206
- Sibbesen E, Runge-Metzger A (1995) Phosphorus balance in European agriculture – status and policy options. In: Tiessen H (Ed), SCOPE 54 Phosphorus in the Global Environment. John Wiley & Sons Ltd., NewYork
- Sicher RC, Kremer DF (1988) Effects of phosphate deficiency on assimilate partitioning in barley seedlings. Plant Sci 57:9–17
- Simon S, Wiegmann K (2009) Modelling sustainable bioenergy potentials from agriculture for Germany and Eastern European countries. Biomass Bioenerg 33:603–609
- Smit AL, Bindraban PS, Schröder JJ, Conijn JG, van der Meer HG (2009) Phosphorus in agriculture: global resources, trends and developments. Report 282, Plant Research International B.V., Wageningen
- Stahl E (2006) Qualität und Verwertungsmöglichkeiten von Holzaschen in NRW. Dipl.-Arbeit, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- Stahl E, Doetsch P (2008) Qualität und Verwertungsmöglichkeiten von Holzaschen aus naturbelassenen Hölzern. Umweltwiss Schadst Forsch 20:290–298
- Statistisches Bundesamt (2009) Produzierendes Gewerbe – Düngemittelversorgung. Fachserie 4, Reihe 8.2, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden

8 Literaturverzeichnis

- Staunton S, Leprince F (1996) Effect of pH and some organic anions on the solubility of soil phosphate: implications for P bioavailability. *Eur J Soil Sci* 47:231–239
- Steen I (1998) Phosphorus availability in the 21st century: management of a non-renewable resource. *Phosphorus and Potassium* 217:25–31
- Steffens D (1987) Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen Phosphatdüngerformen auf die Phosphatverfügbarkeit in der Rhizosphäre von Raps. *Z Pflanzenernähr Bodenk* 150:75–80
- Steffens D (1999) Nährstoffeffizienzen bei endlichen Ressourcen aus der Sicht der Pflanzenernährung. Workshop „Nachhaltige Landwirtschaft“ 31.05.–02.06.1999. *Landbauforsch, Sonderheft* 212 (2000), Ellendroff F, Stützel H (Hrsg), 153–170
- Steffens D, Stamm R, Leithold G, Schubert S (2003) Phosphat-Mobilisierung durch Haupt- und Zwischenfrüchte nach Düngung von weicherdigem Rohphosphat im ökologischen Landbau. Projektabschlussbericht, Gefördert vom BMELV im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau (BÖL), BÖL-Bericht-ID 17240, URL: http://orgprints.org/17240/1/17240-02OE424-uni_giessen-steffens-2003-phosphatmobilisierung.pdf (08.10.2010)
- Štrimaityte V (2005) Einfluss von Komplexbildnern auf die Mobilisierbarkeit von Schwermetallen aus Aschen – Entwicklung eines Schnelleluationsverfahrens. Dissertation an der TU Clausthal
- Stumpe H, Garz J, Scharf H (1994) Wirkung der Phosphatdüngung in einem 40jährigen Dauer-versuch auf einer Sandlöß-Braunschwarzerde in Halle. *Pflanzenernähr Bodenk* 157:105–110
- Suzuki A, Kashima H, Shinmachi F (2009) Analysis of dissolving functions of insoluble phosphate by phosphorus deficiency sensitive plants. The proceedings of the international plant nutrition colloquium XVI, Paper 1178, University of California, Davis
- Swiaczny F, Schulz R (2009) Wachstum der Weltbevölkerung und nachhaltige Tragfähigkeit. *J Verbr Lebensm* 4:136–144
- Tabatabai M A, Bremner JM (1969) Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biol Biochem* 1:301–307
- Tadano T, Ozawa K, Sakai H, Osaki M, Matsui H (1993) Secretion of acid phosphatase by the roots of crop plants under phosphorus-deficient conditions and some properties of the enzyme secreted by lupin roots. *Plant Soil* 155–156:95–98
- Taiz L, Zeiger E (2000) *Physiologie der Pflanzen*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- Tarafdar JC, Claassen N (1988) Organic phosphorous compounds as a phosphorus source for higher plants through the activity of phosphatase produced by plant roots and microorganisms. *Biol Fertil Soils* 5:308–312
- Tarafdar JC, Claassen N (2005) Preferential utilization of organic and inorganic sources of phosphorus by wheat plant. *Plant Soil* 275:285–293
- Tarafdar JC, Jungk A (1987) Phosphatase activity in the rhizosphere and its relation to the depletion of soil organic phosphorus. *Biol Fertil Soils* 3:199–204
- Tarafdar JC, 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 JC, Yadav RS, Meena SC (2001) Comparative efficiency of acid phosphatase originated from plant and fungal sources. *J Plant Nutr Soil Sci* 164:279–282
- TFZ (2008) Heizwerttabellen für verschiedene Halmgutbrennstoffe. Technologie- und Förderzentrum (TFZ), Straubing, URL: http://www.tfz.bayern.de/sonstiges/16028/mb_b_rs_heizwerttabelle_halmgutbrennstoffe.pdf (07.10.2010)

8 Literaturverzeichnis

- Thrän D, Junold M (2008) Energetische Nutzung von Stroh in Europa – Rahmenbedingungen, Potential und Entwicklungen. In: Beiträge zur 1.Internationalen Fachtagung Strohenergie der Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR) und der Thüringer Landeanstalt für Landwirtschaft (TLL), 03./04.04.2008, Jena, URL: http://www.tll.de/ainfo/pdf/stroh/str04_08.pdf (08.10.2010)
- Thy P, Jenkins BM, Grundvig S, Shiraki R, Leshner CE (2006) High temperature elemental losses and mineralogical changes in common biomass ashes. *Fuel* 85:783–795
- Tiessen H, Steward JWB, Cole CV (1984) Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Sci Soc Am J* 48:853–858
- Tiessen H, Stewart JWB, Moir J (1983) Changes in organic and inorganic phosphorus composition of two grassland soils and their particle-size fractions during 60–90 years of cultivation. *J Soil Sci* 34:815–823
- Tritthart J (2000) Voraussetzungen für die Verwendung von Aschen in der Bauindustrie. Tagungsband „Verwertung von Aschen aus Biomasseheizungen.“ LandesEnergieVerein Steiermark, 13.10.2000
- Tunney H, Csathó P, Ehlert P (2003) Approaches to calculating P balance at the field-scale in Europe. *J Plant Nutr Soil Sci* 166:438–446
- UBA (2005) Abfallvermeidung und -verwertung: Aschen, Schlacken und Stäube in Österreich. (Detailstudie zur Entwicklung einer Abfallvermeidungs- und -verwertungsstrategie für den Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2006) unter der Leitung von Reisinger H, Umweltbundesamt, Wien
- UBA (2007) Stoffstrommanagement von Biomasseabfällen mit dem Ziel der Optimierung der Verwertung organischer Abfälle. Forschungsbericht von Knappe F/Dehoust G und weiteren Autoren im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau, URL: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ifeu_stoffstrommanagement_biomasseabfaelle.pdf (08.10.2010)
- UBA (2011) Daten zur Umwelt 2011 – Umwelt und Landwirtschaft. Umweltbundesamt Dessau-Roßlau
- Uckert GB (2004) Versuche zur landbaulichen Verwertung von Holzaschen unter besonderer Berücksichtigung der Knickholzpotenziale Schleswig-Holsteins. Dissertation, Universität Kiel
- Ulery AL, Graham RC, Amrhein C (1993) Wood-ash composition and soil pH following intense burning. *Soil Sci* 156:358–364
- Umamaheswaran K, Batra VS (2008) Physico-chemical characterisation of Indian biomass ashes. *Fuel* 87:628–638
- USGS (2010) Phosphate Rock. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2010, URL: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/mcs-2010-phosp.pdf (06.07.2010)
- Vamvuka D, Kakaras E (2011) Ash properties and environmental impact of various biomass and coal fuels and their blends. *Fuel Process Tech* 92:570–581
- Vamvuka D, Zografos D (2004) Predicting the behaviour of ash from agricultural wastes during combustion. *Fuel* 83:2051–2057
- Van der Paauf F (1971) An effective water extraction method for the determination of plant-available soil phosphorus. *Plant Soil* 34:467–481

8 Literaturverzeichnis

- Van Loo S, Koppejan J (Eds) (2008) The handbook of biomass combustion & co-firing. Earthscan, London
- Van Ray, Van Diest (1979) Utilization of phosphate from different sources by six plant species. *Plant Soil* 51:577–589
- Van Reuler H, Janssen BH (1996) Comparison of the fertilizing effect of ash from burnt secondary vegetation and of mineral fertilizers on upland rice in south-west Côte d'Ivoire. *Fert Res* 45: 1–11
- Vance CP (2010) Quantitative Trait Loci, Epigenetics, Sugars, and MicroRNAs: Quaternaries in Phosphate Acquisition and Use. *Plant Physiol* 154:582–588
- Vance ED, Mitchell CC (2000) Beneficial use of wood ash as an agricultural soil amendment: case studies from the United States forest products industry. In: Power JF, Dick WA (Eds) *Land application of agricultural, Industrial and Municipal By-Products*, Soil Sci Soc Am Book Ser. No. 6. Madison, WI, 567–582
- Vance CP, Uhde-Stone C, Allan DL (2003) Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a non-renewable resource. *New Phytol* 157:423–447
- Vassilev SV, Baxter D, Andersen LK, Vassileva CG (2010) An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel* 89:913–933
- VDLUFA (2000) Standpunkt: Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden. Incl. Anlage: Richtwerte für das Rahmenschema zur Kalkbedarfsermittlung in Deutschland. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA), Darmstadt
- Veneklaas EJ, Stevens J, Cawthray GR, Turner S, Grigg AM, Lambers H (2003) Chickpea and white lupin rhizosphere carboxylates vary with soil properties and enhance phosphorus uptake. *Plant Soil* 248:187–197
- Verma S, Subehia SK, Sharma SP (2005) Phosphorus fractions in an acid soil continuously fertilized with mineral and organic fertilizers. *Biol Fertil Soils* 41:295–300
- Vessey JK (2003) Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant Soil* 255:571–586
- Vetter A (2001) Qualitätsanforderungen an halmgutartige Bioenergieträger hinsichtlich der energetischen Verwertung. In: Gülzower Fachgespräche Bd. 17, Energetische Nutzung von Stroh, Ganzpflanzengetreide und weiterer halmgutartiger Biomasse – Stand der Technik und Perspektiven für den ländlichen Raum. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg), Gülzow
- Vetter A (2008) Nährstoffkreislauf und Erdgassubstitute aus Biomasse – landwirtschaftliche Aspekte. In: Gülzower Fachgespräche Bd. 29, Erdgassubstitute aus Biomasse – eine Bestandsaufnahme, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg), Gülzow
- Vincent JB, Crowder MW, Averill BA (1992) Hydrolysis of phosphate monoesters: a biological problem with multiple chemical solutions. *Trends Biochem Sci* 17:105–110
- Von Deuel H, Dubach P, Mehta NC, Bach R (1960) Zur Chemie der organischen Substanz des Bodens. *Aquatic Sciences – Research Across Boundaries* 22:111–121
- Von Horn J, Sartorius C, Tettenborn F (2010) Technologievorausschau für Phosphorrecycling-technologien, (Arbeitspaket 6) Im Rahmen des Projektes „Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzeptes für Deutschland“ (PhoBe) im Auftrag des BMBF (Fkz 02WA0807), Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe

8 Literaturverzeichnis

- Von Liebig J (1859) Chemische Briefe. Fünzigster Brief. Zweiter Band, vierte Auflage. Winther'sche Verlagshandlung, Leipzig und Heidelberg.
- Von Plessen H, Schimmel G (1987) Verminderung des Cadmium-Gehaltes von Rohphosphaten und Mineräldüngern. Chem Ing Tech 59:772–778
- Wallace J, Scott J (2008) Under cover – a guide to using cover crops in the maritimes. 2nd Edition. Atlantic Canadian Organic Regional Network, URL: <http://www.acornorganic.org/> (25.04.2011)
- Wang X, Shen J, Liao H (2010) Acquisition or utilization, which is more critical for enhancing phosphorus efficiency in modern crops? Plant Sci 179:302–306
- Weikard H-P, Seyhan D (2009) Distribution of phosphorus resources between rich and poor countries: The effect of recycling. Ecol Econ 68:1749–1755
- Weißhaidinger R (2009) Schwebstoff- und Phosphordynamik in agrarisch genutzten Landschafts-ökosystemen – Oberflächen- und oberflächennahe Transportprozesse in Kleinzugsgebieten des Basler Tafeljura (Schweiz). Inauguraldissertation, Universität Basel, Schweiz
- Werner W, Trimborn M (2008) Potentiale zur Effizienzsteigerung der P-Düngung. Paper zum Symposium Ressourcen schonender Einsatz von Phosphor in der Landwirtschaft, Braunschweiger Nährstofftage, 10.–11.11.2008
- Whitmore TM, Turner II BL (2001) Whitmore Cultivated Landscapes of Middle America on the Eve of Conquest. Oxford geographical and environmental studies, Oxford University Press, New York
- Williamson LC, Ribrioux SPCP, Fitter AH, Leyser HMO (2001) Phosphate availability regulates root system architecture in Arabidopsis. Plant Physiol 126:875–890
- Xiao R, Chen X, Wang F, Yu G (2011) The physicochemical properties of different biomass ashes at different ashing temperature. Renew Energ 36:244–249
- Yadav R, Tarafdar J (2001) Influence of organic and inorganic phosphorus supply on the maximum secretion of acid phosphatase by plants. Biol Fertil Soils 34:140–143
- Yan F, Zhu Y, Müller C, Zörb C, Schubert S (2002) Adaptation of H⁺-pumping and plasma membrane H⁺ ATPase activity in proteoid roots of white lupin under phosphate deficiency. Plant Physiol 129:50–63
- Yruela I (2009) Copper in plants: acquisition, transport and interactions. Funct Plant Biol 36: 409–430
- Yun SJ, Kaeppler SM (2001) Induction of maize acid phosphatase activities under phosphorus starvation. Plant Soil 237:109–115
- Yusiharni BE (2001) An evaluation of chicken litter ash, wood ash and slag for use as lime and phosphate soil amendments. Master Thesis. University of Mataram, Indonesia
- Zhang TQ, MacKenzie AF, Liang BC, Drury CF (2004) Soil Test Phosphorus and Phosphorus Fractions with Long-Term Phosphorus Addition and Depletion. Soil Sci Soc Am J 68: 519–528
- Zhang F-S, Yamasaki S, Nanzio M (2002) Waste ashes for use in agricultural production: I. Liming effect, contents of plant nutrients and chemical characteristics of some metals. Sci Total Environ 284:215–225
- Zhu Y-G, He Y-Q, Smith SE, Smith FA (2002) Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) has high capacity to take up phosphorus (P) from a calcium (Ca)-bound Source. Plant Soil 239:1–8

- Zhu J, Zhang C, Lynch J (2010) The utility of phenotypic plasticity for root hair length for phosphorus acquisition. *Funct Plant Biol* 37:313–322
- Zimmermann S, Frey B (2002) Soil respiration and microbial properties in an acid forest soil: effects of wood ash. *Soil Biol Biochem* 34:1727–1737

Gesetze und Verordnungen:

- AVV (2006) Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung vom 10. Dezember 2001 (BGBl. I S. 3379), die zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 15. Juli 2006 (BGBl. I S. 1619) geändert worden ist)
- BBodSchG (2004) Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 9. Dezember 2004 (BGBl. I S. 3214) geändert worden ist)
- BBodSchV (2009) Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), die zuletzt durch Artikel 16 des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585) geändert worden ist)
- BioAbfV (2010) Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung vom 21. September 1998 (BGBl. I S. 2955), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 9. November 2010 (BGBl. I S. 1504) geändert worden ist)
- BNatSchG (2011) Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542), das durch Artikel 3 des Gesetzes vom 28. Juli 2011 (BGBl. I S. 1690) geändert worden ist)
- DepV (2006) Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung vom 24. Juli 2002 (BGBl. I S. 2807), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 13. Dezember 2006 (BGBl. I S. 2860) geändert worden ist)
- DüMV (2009) Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung vom 16. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2524), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 14. Dezember 2009 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist)
- DüngG (2010) Düngegesetz (Düngegesetz vom 9. Januar 2009 (BGBl. I S. 54, 136), das zuletzt durch Artikel 10 des Gesetzes vom 9. Dezember 2010 (BGBl. I S. 1934) geändert worden ist)
- DüV (2009) Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 27. Februar 2007 (BGBl. I S. 221), die zuletzt durch Artikel 18 des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585) geändert worden ist)
- KrW-/AbfG (2010) Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz vom 27. September 1994 (BGBl. I S. 2705), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 11. August 2010 (BGBl. I S. 1163) geändert worden ist)
- WHG (2010) Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das durch Artikel 12 des Gesetzes vom 11. August 2010 (BGBl. I S. 1163) geändert worden ist)

Normen (DIN und ÖNORM):

DIN EN 13346: 2001-04 Charakterisierung von Schlämmen – Bestimmung von Spurenelementen und Phosphor – Extraktionsverfahren mit Königswasser; Deutsche Fassung EN 13346: 2000

DIN EN 1483: 08.97 Wasseranalytik – Bestimmung von Quecksilber; Deutsche Fassung EN 1483: 1997 (E 12)

DIN EN ISO 11885: 04.98 Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von 33 Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma- Atom-Emissionsspektrometrie (ISO 11885: 1996); Deutsche Fassung EN ISO 11885: 1997

E DIN ISO 11277: 06.94 Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden - Verfahren durch Sieben und Sedimentation nach Entfernen der löslichen Salze, der organischen Substanz und der Carbonate (ISO/DIS 11277: 1994)

ÖNORM L 1075: 2004 07 01 Grundlagen für die Bewertung der Gehalte ausgewählter Elemente in Böden. Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg) 1. Juli 2004

Thesen zur Dissertationsschrift

Thema:

„Nutzung von Biomasseaschen für die P-Versorgung im Pflanzenbau“

Phosphor (P) ist ein essentielles Nährelement und wird daher im Pflanzenbau in Form von P-Düngemitteln ausgebracht. Sowohl ökonomische als auch ökologische Gründe erfordern eine effiziente P-Ausnutzung, die ein wesentliches Ziel einer nachhaltigen Landwirtschaft ist. Die weltweiten P-Lagerstätten sind stark begrenzt, d.h. die kostengünstig abbaubaren Rohphosphatvorkommen gehen zur Neige, weshalb der Preis für P-Düngemittel bei zunehmendem globalen P-Bedarf in Zukunft weiter steigen wird.

Die Nutzung von Rückständen aus der Bioenergieerzeugung, wie z.B. Biomasseaschen, kann dazu beitragen, P-Düngemittel einzusparen und Nährstoffkreisläufe zu realisieren. Während Holzaschen bereits vielfach untersucht wurden, fehlen vergleichende Untersuchungen anderer Biomasseaschen hinsichtlich deren Nährstoffverfügbarkeit und P-Versorgung verschiedener Kulturarten in Abhängigkeit von der Bodenart.

Innerhalb dieser Arbeit wurden drei Biomasseaschen (Rapsextraktionsschrotasche (RESA), Strohasche (SA) und Getreidekornasche (GA)) als Düngemittel in Gefäßversuchen mit zwei verschiedenen Böden (Sl3, Ls3) und in zweijährigen Feldversuchen an zwei Standorten Deutschlands (Rostock (Mecklenburg-Vorpommern) und Trenthorst (Schleswig-Holstein)) getestet.

Im Feldversuch ließen sich die Düngewirkung im Ausbringungsjahr und die Nachwirkung im Folgejahr – bei zusätzlichem Einfluss des Zwischenfruchtanbaus (Phacelia, Grünroggen und Senf) – anhand von Pflanzen- und Bodenanalysen bewerten.

Die Gefäßversuche dienten dazu, die Düngewirkung der Aschen – im Vergleich zum P-Dünger Triplesuperphosphat (TSP) – im Anbau möglichst vieler, verschiedener Fruchtarten (Mais, Blaue Lupine, Sommer-Gerste, Sommer-Raps, Ölrettich, Phacelia, Welsches Weidelgras und Buchweizen) innerhalb kurzer Zeit auf zwei Böden zu untersuchen.

Mit dem Ziel, die P-Verfügbarkeit und P-Düngewirkung der Aschen zu erfassen und diesbezügliche Fruchtartenunterschiede aufzuzeigen, wurden Ertragserhebungen sowie Nährstoffanalysen durchgeführt.

Biomasseaschen sind Mehrnährstoffdünger, der Fokus der Untersuchungen lag jedoch aufgrund der absehbaren P-Verknappung und des zudem ungeminderten weltweiten P-Bedarfs auf dem Nährstoff Phosphor.

Aus den durchgeführten Untersuchungen lassen sich unter Berücksichtigung wissenschaftlicher Literatur folgende Aussagen ableiten:

- Biomasseaschen sind als P-Dünger im Pflanzenbau geeignet, wie anhand von Feld- und Gefäßversuchen bestätigt werden konnte.
- Die Düngewirkung der Aschen ist von den angebauten Fruchtarten und den Bodeneigenschaften abhängig. Positive Düngeeffekte hinsichtlich Ertrag und P-Aufnahme der angebauten Fruchtarten waren nur auf Böden mit niedriger bis optimaler P-Versorgung und niedrigen bis optimalen pH-Werten nachweisbar. In den Gefäßversuchen führte die Düngung mit Biomasseaschen (vor allem RESA und GA) auf beiden verwendeten Böden bei der Mehrzahl der kultivierten Fruchtarten zu gesteigerten P-Aufnahmen und Erträgen im Vergleich zur Kontrolle und/oder zu gleich hohen P-Aufnahmen wie in der TSP-Variante. Im Feldversuch zeigte die SA trotz geringerer P-Ausbringungsmenge über beide Versuchsjahre konstante und teilweise stärkere Düngeeffekte als RESA und GA.
- Aufgrund ihrer Zusammensetzung können Biomasseaschen (neben ihrem Wert als P-Düngemittel) auch zur Zufuhr weiterer Nährstoffe (z.B. K) beitragen sowie zur Kalkung genutzt werden. Obwohl die Düngung mit Biomasseasche keine pH-Wert-Erhöhung im Boden der Feldversuche zur Folge hatte, können in Abhängigkeit der Ausbringungsmenge pH-Effekte nach Ascheapplikation auftreten, wie in der SA-Variante der Gefäßversuche nachweisbar war.
- Die P-Zufuhr mit Biomasseaschen kann ebenso wie eine TSP-Düngung zu einer Erhöhung der leicht verfügbaren P-Pools (P_w , P_{dl} , Harz-P, $\text{NaHCO}_3\text{-P}$) im Boden führen.
- Fruchtartenspezifische P-Aneignungsstrategien, die u.a. auch bodenchemische Prozesse und den pH-Wert beeinflussen, können bei der Düngung mit Biomasseaschen gezielt genutzt werden. Phacelia ist als Zwischenfrucht besonders zu empfehlen, da sie von den untersuchten Fruchtarten der Gefäßversuche die höchste P-Aufnahme hatte und generell für ein hohes P-Mobilisationsvermögen bekannt ist. Wie sich im Feldversuch feststellen ließ, können sich Zwischenfrüchte durch Nährstoffmobilisierung und -aufnahme sowie Zufuhr organischer Substanz positiv auf die Folgefrucht auswirken, was auch im Zusammenhang mit einer zeitlich verlängerten Bodenbedeckung stehen kann.

- Die Methode der sequentiellen P-Fraktionierung war für die verwendeten Ascheproben nicht geeignet, um die P-Düngewirkung der Aschen zu beurteilen. Die Aschen wiesen wesentlich geringere Anteile an wasserlöslichem P als TSP auf. Die dennoch nachweisbar gute P-Düngewirkung der Aschen (vergleichbar mit TSP) lässt sich auf die hohen zitronensäurelöslichen P_{cit}-Gehalte (80 % bis 90 % des Gesamt-P (P_t)) zurückführen. Die Pflanzen können P_{cit} infolge von Umwandlungs- und Mobilisationsprozessen im Boden im Laufe einer Vegetationsperiode als leicht verfügbares P nutzen, wofür auch die Ergebnisse der P-Fraktionierung mit Bodenproben der Gefäßversuche sprechen.
- Bei der Verwendung von Biomasseaschen aus unbehandeltem Ausgangssubstrat ist in der Regel nicht mit einer Erhöhung der Schwermetallgehalte im Boden zu rechnen. In beiden Feldversuchen wurden nach einer Vegetationsperiode keine erhöhten Schwermetallgehalte im Oberboden infolge Biomasseasche-Ausbringung vorgefunden. Eine Bilanzierung unter Einbeziehung der verwendeten Böden und Aschen ergab kein Gefährdungspotential hinsichtlich einer Schwermetallanreicherung. Dennoch müssen Biomasseaschen vor Rückführung auf landwirtschaftlich genutzte Böden hinsichtlich der Schwermetall- sowie Nährstoffgehalte entsprechend Düngemittelverordnung aus Vorsorgegründen untersucht werden.

Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass Biomasseaschen bei bestimmten Bodenbedingungen als gleichwertige P-Düngemittel zu TSP betrachtet werden können und eine Verwertung als Düngemittel angesichts ihrer guten P-Verfügbarkeit, des globalen P-Düngemittelbedarfs und der endlichen P-Ressourcen anzustreben ist. Die Aufwandsmengen der Aschen sind wie bei anderen Düngemitteln an den Nährstoffbedarf der Kulturart sowie die Nährstoffgehalte im Boden anzupassen.

Aufgrund der vorliegenden Resultate der Gefäßversuche und des Rostocker Feldversuches sind sowohl sandige Lehme als auch lehmige Sande zur Düngung mit Asche geeignet, sofern es sich um Böden mit P-Düngebedarf und niedrigen bis optimalen pH-Werten handelt. In Kombination von Aschedüngung und Zwischenfruchtanbau können Phacelia (aufgrund hoher P-Aufnahme) unabhängig von der Bodenart und Buchweizen (wegen seiner hohen P-Aufnahmeeffizienz) vor allem auf sandigen Böden empfohlen werden.

Der Frage, ob sich die unterschiedliche Körnung und Konsistenz der Aschen infolge verschiedener Verbrennungsverfahren auf die P-Verfügbarkeit und P-Düngewirkung der Aschen auswirken und inwiefern eine Ascheaufbereitung zweckmäßig ist, sollte in nachfolgenden Untersuchungen nachgegangen werden.

ANHANG

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<i>Abb. A-1: Schematische Darstellung zur P-Fraktionierung in Anlehnung an Tiessen et al. (1983).</i>	141
---	-----

TABELLENVERZEICHNIS

<i>Tab. A-1: Schwermetallgehalte (mg kg^{-1} TM) der untersuchten Biomasseaschen in Relation zu Vorsorge- und Grenzwerten relevanter Verordnungen und Normen.</i>	142
<i>Tab. A-2: Verwertungsmöglichkeiten für Aschen nach DüMV.</i>	143
<i>Tab. A-3: Ascheanteile in Abhängigkeit vom Brennstoff, Angaben in Gewichts-%.</i>	144
<i>Tab. A-4: Durchschnittliche Nährstoff- und Schwermetallgehalte von Holz-, Rinden-, Stroh- und Ganzpflanzenaschen.</i>	145
<i>Tab. A-5: Sinter-, Erweichungs- und Schmelztemperatur ausgewählter Biomassebrennstoffe.</i>	145
<i>Tab. A-6: Korngrößenfraktionen und Bodenarten der Feldversuchsböden Rostock und Trenthorst (2007).</i>	146
<i>Tab. A-7: Korngrößenfraktionen und Bodenarten der beiden Böden der Gefäßversuche in Rostock.</i>	146
<i>Tab. A-8: Fruchtarten, Sorten und weitere pflanzenbauliche Angaben zu den Gefäßversuchen 2007 und 2008.</i>	147
<i>Tab. A-9: Nährstoffgehalte (g kg^{-1}) im Spross der Zwischenfrüchte in Abhängigkeit von der Zwischenfruchtart und Düngung, Feldversuch Rostock 2007.</i>	148
<i>Tab. A-10: TM-Erträge (dt ha^{-1}) der Zwischenfrüchte und Nährstoffgehalte (g kg^{-1}) im Spross in Abhängigkeit von der Zwischenfruchtart und Düngung, Feldversuch Trenthorst 2007.</i>	148
<i>Tab. A-11: Einfluss von Düngung, Fruchtart und deren Wechselwirkungen auf Ertrag, Wurzelkriterien und Nährstoffaufnahmen in den Gefäßversuchen 2007–2008.</i>	149
<i>Tab. A-12: K-, Mg- und Ca-Aufnahmen in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche auf lehmigem Sand, 2007.</i>	150
<i>Tab. A-13: K-, Mg- und Ca-Aufnahmen in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche auf sandigem Lehm, 2008.</i>	151
<i>Tab. A-14: Korrelationen zwischen P-Aufnahme und anderen Pflanzen- bzw. Bodenkriterien in den Gefäßversuchen.</i>	152
<i>Tab. A-15: Korrelationen zwischen Sprossertrag und anderen Pflanzen- bzw. Bodenkriterien in den Gefäßversuchen.</i>	153
<i>Tab. A-16: Einfluss von Düngung, Fruchtart und deren Wechselwirkungen auf Bodenkriterien der Gefäßversuche 2007–2008.</i>	154
<i>Tab. A-17: Einfluss von Düngung, Fruchtart und deren Wechselwirkungen auf die P-Fractionen im Boden der Gefäßversuche 2007–2008.</i>	155
<i>Tab. A-18: Partielles Eta-Quadrat der Einflussfaktoren auf die Harz-P-Fraktion im Boden der Gefäßversuche 2007–2008.</i>	155
<i>Tab. A-19: Korrelationen zwischen den Pw-, Pdl-, Harz-P- und DPS-Werten im Boden der Gefäßversuche.</i>	156
<i>Tab. A-20: Kdl- und MgdI-Gehalte im Boden in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche 2007 und 2008.</i>	157

Anhang

<i>Tab. A-21: Pox-Gehalte, PSC und DPS im Boden in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche auf lehmigem Sand, 2007.</i>	158
<i>Tab. A-22: Pox-Gehalte, PSC und DPS im Boden in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche auf sandigem Lehm, 2008.</i>	159
<i>Tab. A-23: Harz-P, NaHCO₃-P, NaOH-P und H₂SO₄-P im Boden in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche I und II (lehmiger Sand) 2007.</i>	160
<i>Tab. A-24: Pt-Gehalt und Residual-P im Boden in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche I und II (lehmiger Sand) 2007.</i>	161
<i>Tab. A-25: Harz-P, NaHCO₃-P, NaOH-P und H₂SO₄-P im Boden in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche III und IV (sandiger Lehm) 2008.</i>	162
<i>Tab. A-26: Pt-Gehalt und Residual-P im Boden in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche III und IV (sandiger Lehm) 2008.</i>	163
<i>Tab. A-27: Schwermetallgehalte der untersuchten Böden und Aschen sowie Berechnung des Gefährdungspotentials zur Überschreitung der Vorsorgewerte nach BBodSchV.</i>	164
<i>Tab. A-28: P-, K-, Mg- und Ca-Gehalte im Spross in Abhängigkeit von der Düngung und Fruchtart, Gefäßversuche 2007.</i>	165
<i>Tab. A-29: P-, K-, Mg- und Ca-Gehalte im Spross in Abhängigkeit von der Düngung und Fruchtart, Gefäßversuche 2008.</i>	166
<i>Tab. A-30: P-Konzentration in der Gesamtpflanze (%) als weiteres Beurteilungskriterium zum P-Aufnahmevermögen der Fruchtarten, Gefäßversuche 2007 und 2008.</i>	167

Anhang

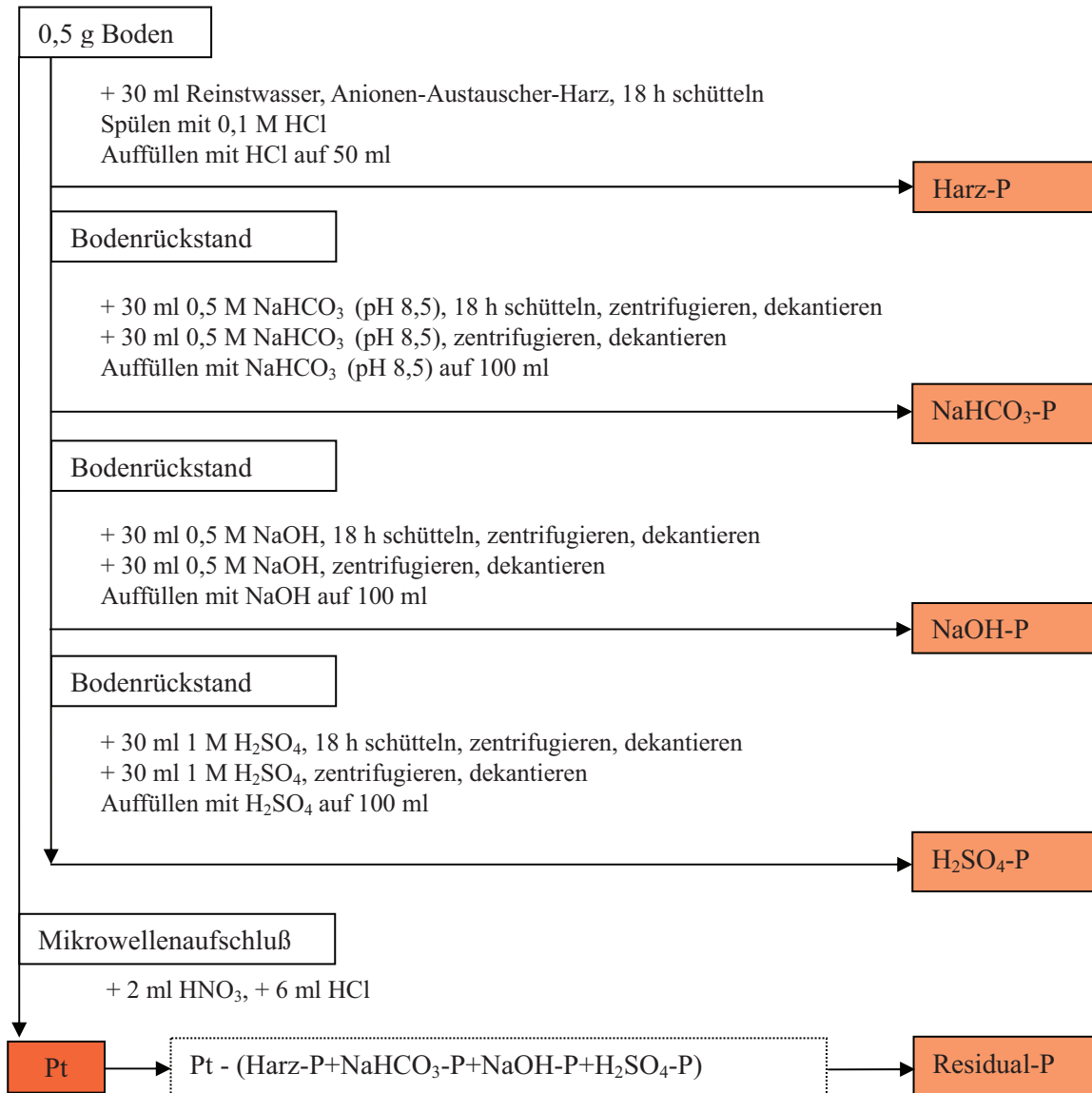


Abb. A-1: Schematische Darstellung zur P-Fraktionierung in Anlehnung an Tiessen et al. (1983).

Anhang

Tab. A-1: Schwermetallgehalte (mg kg⁻¹ TM) der untersuchten Biomasseaschen in Relation zu Vorsorge- und Grenzwerten relevanter Verordnungen und Normen.

Schwermetalle	Gehalte in den Aschen *			Vorsorge bzw. Grenzwert nach					
	RESA	SA	GA	BBodSchV § 9 (1); Anhang 2, Tab. 4.1		DüMV § 3, § 4 (1), (2); Anlage 2, Tab. 1.4, Spalte 4	BioAbfV § 4 (3)	VersatzV § 4; Anlage 2, Tab. 1	ÖNORM L 1075
				(Sand)	(Lehm)				
						(Dünge- mittel)	(mineral. Zuschlag- stoffe)	(Abfälle, Feststoffe)	(Pflanzen- aschen)
Blei (Pb)	11,9	<1,50	2,57	40	70	150	150	1.000	100
Cadmium (Cd)	0,45	0,08	1,27	0,4	1	1,5 ⁽¹⁾	1,5	10	8
Chrom (Cr)	228	4,67	13,7	30	60	-	100	600	250
Kupfer (Cu)	77,1	24,5	171	20	40	-	100	600	250
Nickel (Ni)	274	3,66	13,1	15	50	80	50	600	100
Quecksilber (Hg)	0,02	0,02	0,04	0,1	0,5	1,0	1,0	10	-
Zink (Zn)	349	80,9	751	60	150	-	400	1.500	1.500

* Die Schwermetalluntersuchungen in den drei Aschen (RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche) erfolgten durch die LUFA Rostock

⁽¹⁾ 50 mg Cd für Düngemittel ab 5% P₂O₅

ÖNORM L 1075: Grundlagen für die Bewertung der Gehalte ausgewählter Elemente in Böden. Herausgegeben am 1.7.2004 vom Österreichischen Normungsinstitut

Anhang

Tab. A-2: Verwertungsmöglichkeiten für Aschen nach DüMV.

Typenbezeichnung	Mindest- gehalte	Wesentliche Zusammensetzung, Art der Herstellung, besondere Bestimmungen	Fundstelle DüMV
Kaliumdünger aus Aschen aus der Verbrennung pflanzl. Stoffe	10 % K ₂ O	wasserlösliches Kaliumoxid; Brennraumaschen von naturbelassenen pflanzlichen Ausgangsstoffen	Anlage 1, Abschnitt 1.3.4 i.V.m. Anlage 2 Tab. 6.3, Z. 6.3.3
Kalkdünger			
Kohlensaurer Kalk	70 % CaCO ₃	Calciumcarbonat, daneben auch Magnesiumcarbonat. Max. 30 % Brennraumasche von unbehandelten Pflanzenteilen. Das Düngemittel muss mit dem Hinweis „Enthält basisch wirksame Pflanzenasche“ gekennzeichnet sein	Anlage 1, Abschnitt 1.4.1 i.V.m. Anlage 2, Tab. 7.3, Z. 7.3.16
Kalkdünger aus Asche aus der Ver- brennung pflanzl. Stoffe	15 % CaO in der TM	Oxide, Hydroxide, Silicate oder Carbonate von Ca und Mg; Brennraumaschen von naturbelassenen pflanzlichen Ausgangsstoffen	Anlage 1, Abschnitt 1.4.6 i.V.m. Anlage 2 Tab. 6.4, Z. 6.4.11
Mineralische Mehrnährstoffdünger			
PK-Dünger aus Aschen aus der Verbrennung pflanzl. Stoffe	2 % P ₂ O ₅ 3 % K ₂ O	Auf chemischem Wege, durch Mischen [...] gewonnenes Erzeugnis; auch unter ausschließlicher Verwendung von Aschen. Bei trockenem Material Granulierung	Anlage 1, Abschnitt 2.3 i.V.m. Anlage 2 Tab. 7.3, Z. 7.3.16
NPK-Dünger unter Verwendung von Aschen aus der Ver- brennung pflanzl. Stoffe	fest: 3 % N 2 % P ₂ O ₅ 3 % K ₂ O	Auf chemischem Wege oder durch Mischen [...] gewonnenes Erzeugnis. Auch unter Verwendung von Asche aus der Verbrennung pflanzlicher Stoffe. Bei trockenem Material Granulierung	Anlage 1, Abschnitt 2.4 i.V.m. Anlage 2 Tab. 7.3, Z. 7.3.16
Organisch-mineralische Düngemittel			
Organ.-mineral. P- bzw. K-Dünger	3 % P ₂ O ₅ oder 3 % K ₂ O	Auch Zugabe von Asche aus der Verbrennung pflanz- licher Stoffe	Anlage 1, Abschnitt 3.2 i.V.m. Anlage 2 Tab. 7.3, Z. 7.3.16
Organ.-mineral. PK- Dünger	0,5 % P ₂ O ₅ 1,0 % K ₂ O		
Organ.-mineral. NPK-Dünger	1,5 % N 0,5 % P ₂ O ₅ 1,0 % K ₂ O		
Düngemittel mit Spurennährstoffen			
Typenbezeichnung für Düngemittel, ergänzt durch die Angabe „mit Spurennährstoffen“ oder durch die Angabe „mit“ [Namen der Spuren- nährstoffe]	0,02 % B 0,004 % Co 0,02 % Cu 0,04 % Fe 0,02 % Mn 0,002 % Mo 0,02 % Zn Landwirtsch.: 0,1 % Fe 0,2 % Mn	Spurennährstoffe bewertet als Gesamtgehalt und wasserlöslicher Gehalt Höchstgehalte für Cu 0,07 % und Zn 0,5 % Höchstgehalt für Cu 0,2 % bezogen auf TM für Holzbrennraumaschen bei Rückführung auf forstliche Flächen.	Anlage 1, Abschnitt 4.1.1

Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2009): Merkblatt: Verwertung und Beseitigung von Holzaschen (verändert)

Anhang

Tab. A-3: Ascheanteile in Abhängigkeit vom Brennstoff, Angaben in Gewichts-%.

Brennstoff/Biomasseart	Aschegehalt in %
Buchenholz (mit Rinde)	0,5
Fichtenholz (mit Rinde)	0,6
Pappelholz (Kurzumtrieb)	1,8
Weidenholz (Kurzumtrieb)	2,0
Rinde (Nadelholz)	3,8
Gerstenstroh	4,8
Roggenstroh	4,8
Weizenstroh	5,7
Triticalestroh	5,9
Rapsstroh	6,2
Maisstroh	6,7
Sonnenblumenstroh	12,2
Roggenganzpflanzen	4,2
Weizenganzpflanzen	4,1
Triticaleganzpflanzen	4,4
Roggenkörner	2,0
Weizenkörner	2,7
Triticalekörner	2,1
Miscanthus	3,9
Weidelgras	8,8

Quelle: Kaltschmitt et al. (2009)

Anhang

Tab. A-4: Durchschnittliche Nährstoff- und Schwermetallgehalte von Holz-, Rinden-, Stroh- und Ganzpflanzenaschen.

	Grobasche			Zyklonflugasche			Feinstflugasche		
	Rinden, Hackgut, Späne	Stroh	Ganz- pflanze	Rinden, Hackgut, Späne	Stroh	Ganz- pflanze	Rinden, Hackgut, Späne	Stroh	Ganz- pflanze
Nährstoff (Gew.% der TS)									
CaO	41,7	7,8	7,0	35,2	5,9	6,0	32,2	1,2	1,0
MgO	6,0	4,3	4,2	4,4	3,4	3,2	3,6	0,7	0,4
K ₂ O	6,4	14,3	14,0	6,8	11,6	12,7	14,3	48,0	47,0
P ₂ O ₅	2,6	2,2	9,6	2,5	1,9	7,4	2,8	1,1	10,3
Schwermetall (mg kg ⁻¹ TS)									
Kupfer (Cu)	164,6	17,0	47,0	143,1	26,0	60,0	389,2	44,0	68,0
Zink (Zn)	432,5	75,0	150,0	1.870,4	172,0	450,0	12.980,7	520,0	1.950,0
Cobalt (Co)	21,0	2,0	3,1	19,0	1,0	1,6	17,5	<1,0	<1,0
Molybdän (Mo)	2,8	<10,0	<10,0	4,2	<10,0	10,0	13,2	10,0	18,0
Arsen (As)	4,1	<5,0	<5,0	6,7	<5,0	5,0	37,4	22,0	16,2
Nickel (Ni)	66,0	4,0	10,5	59,6	<2,5	7,5	63,4	<2,5	<2,5
Crom (Cr)	325,5	13,5	20,5	158,4	17,5	16,5	231,3	6,8	5,8
Blei (Pb)	13,6	5,1	4,5	57,6	21,5	15,0	1.053,3	80,0	67,5
Cadmium (Cd)	1,2	0,2	0,2	21,6	1,8	1,4	80,7	5,2	5,1
Quecksilber (Hg)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,2	1,5	0,7	0,1

Quelle: Obernberger (1997)

Tab. A-5: Sinter-, Erweichungs- und Schmelztemperatur ausgewählter Biomassebrennstoffe.

Brennstoff	Sinter- temperatur (°C)	Erweichungs- temperatur (°C)	Schmelz- temperatur (°C)
Holz			
▪ Buche	1140	1260	1340
▪ Fichte	1110–1340	1410–1640	>1700
Stroh (Winterweizen)	800–860	860–900	1080–1120
Getreide (Winterweizen)	970–1010	1020	1180–1220

Quelle: Van Loo und Koppejan (2008)

Anhang

Tab. A-6: Korngrößenfraktionen und Bodenarten der Feldversuchsböden Rostock und Trenthorst (2007).

Standort	Probe nahmetiefe (cm)	T (%)	fU (%)	mU (%)	gU (%)	U (%)	fS (%)	mS (%)	gS (%)	S (%)	Bodenart (nach Bodenkundl. Kar- tieranleitung KA5)
Rostock 2007	0–30	5,5	5,3	2,9	14,9	23,1	50,5	18,4	2,4	71,3	schwach lehmiger Sand (SI2)
	30–60	8,3	2,5	6,8	13,5	22,8	43,7	21,7	3,5	68,9	mittel lehmiger Sand (SI3)
Trenthorst 2007	0–30	13,0	2,9	9,9	15,2	28,0	23,3	27,2	8,4	58,9	stark lehmiger Sand (SI4)
	30–60	17,5	5,9	6,7	11,6	24,2	23,6	26,5	8,1	58,2	stark sandiger Lehm (LS4)

T = Ton, U = Schluff, S = Sand, f = fein, m = mittel, g = grob

Tab. A-7: Korngrößenfraktionen und Bodenarten der beiden Böden der Gefäßversuche in Rostock.

Herkunft des Bodens	Versuchs jahr	T (%)	fU (%)	mU (%)	gU (%)	U (%)	fS (%)	mS (%)	gS (%)	S (%)	Bodenart (nach Bodenkundl. Kar- tieranleitung KA5)
Rostock	2007 (Gef.vers. I + II)	8,2	5,9	6,1	12,2	24,2	42,7	21,3	3,5	67,5	mittel lehmiger Sand (SI3)
Trenthorst	2008 (Gef.vers. III + IV)	20,0	8,1	9,3	13,3	30,7	29,7	15,2	4,3	49,2	mittel sandiger Lehm (LS3)

T = Ton, U = Schluff, S = Sand, f = fein, m = mittel, g = grob

Tab. A-8: Fruchtarten, Sorten und weitere pflanzenbauliche Angaben zu den Gefäßversuchen 2007 und 2008.

Gefäßversuche	Hauptfrüchte (Gef.vers. I und III)					Zwischenfrüchte (Gef.vers. II und IV)			
	Mais (<i>Zea mays</i> L.)	Blaue Lupine (<i>Lupinus angustifolius</i> L.)	So-Gerste (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	So-Raps (<i>Brassica napus</i> L.)	Ölrettich (<i>Raphanus sativus</i> L.)	Phacelia (<i>Phacelia tanacetifolia</i> Benth.)	Welsches Weidelgras (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.)	Buchweizen (<i>Fagopyrum esculentum</i> Moench)	
2007 (Boden: SI3)	Sorte	Abakus	Borlu	Barke	Landmark	Rutina	Boratus	Gordo	Lifago
	Saatstärke (Anz. Samen je Gef.)	10	10	20	17	30	1,2 g Gef. ⁻¹	2,0 g Gef. ⁻¹	25
	Vegetations- zeit (d)	66	55	62	54	46	66	Schnitt 1–3: 31, 57, 88	60
	Anz. Pfl. (Ernte)	8	8	15	10	10	n.b.	n.b.	6
2008 (Boden: Ls3)	Sorte	Ronaldinio	Boregine	Barke	Landmark	Rufus	Boratus	Mustela	Lifago
	Saatstärke (Anz. Samen je Gef.)	10	10	20	17	30	1,2 g Gef. ⁻¹	2,0 g Gef. ⁻¹	25
	Vegetations- zeit (d)	71	67	63	58	48	64	Schnitt 1–2: 21, 53	59
	Anz. Pfl. (Ernte)	8	8	15	10	10	25	n.b.	5

Anhang

Tab. A-9: Nährstoffgehalte (g kg^{-1}) im Spross der Zwischenfrüchte in Abhängigkeit von der Zwischenfruchtart und Düngung, Feldversuch Rostock 2007.

ZF	Düng.	P-Gehalt	K-Gehalt	Mg-Gehalt	Ca-Gehalt
	<i>p</i> für ZF (MW Düng.)	0,005**	0,068 ns	<0,001***	<0,001***
Roggen	MW	4,19 A	21,7	1,70 A	2,23 A
Phacelia	MW	5,16 B	23,2	3,68 B	37,24 B
Roggen	<i>p</i>	0,561 ns	0,426 ns	0,602 ns	0,845 ns
	KON	4,37	23,1	1,71	2,26
	SA	3,75	19,4	1,70	2,15
	RESA	4,23	22,0	1,72	2,27
	GA	4,40	22,4	1,68	2,26
Phacelia	<i>p</i>	0,811 ns	0,411 ns	0,312 ns	0,956 ns
	KON	5,58	23,3	3,80	37,83
	SA	5,52	22,1	3,57	37,10
	RESA	5,68	23,9	3,78	37,75
	GA	5,67	23,7	3,56	36,29

ZF = Zwischenfrucht; KON = Kontrolle, SA = Strohasche, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, GA = Getreideasche; MW = Mittelwert; unterschiedliche Großbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den ZF-Arten im Mittel der Düngewarianten ($p \leq 0,05$, Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

Tab. A-10: TM-Erträge (dt ha^{-1}) der Zwischenfrüchte und Nährstoffgehalte (g kg^{-1}) im Spross in Abhängigkeit von der Zwischenfruchtart und Düngung, Feldversuch Trenthorst 2007.

ZF	Düng.	TM-Ertrag	P-Gehalt	K-Gehalt	Mg-Gehalt	Ca-Gehalt
	<i>p</i> für ZF (MW Düng.)	0,369 ns	0,000***	0,015*	0,000***	0,000***
Senf	MW	7,98	6,05 A	32,2 A	3,22 A	23,3 A
Phacelia	MW	8,58	6,93 B	36,8 B	3,73 B	45,3 B
Senf	<i>p</i>	0,496 ns	0,451 ns	0,503 ns	0,469 ns	0,366 ns
	KON	7,85	6,17	31,7	3,14	23,5
	SA	9,15	6,05	34,1	3,14	23,3
	RESA	6,74	5,78	29,2	3,34	22,4
	GA	8,17	6,19	34,0	3,25	24,2
Phacelia	<i>p</i>	0,980 ns	0,206 ns	0,931 ns	0,426 ns	0,574 ns
	KON	8,30	6,76	37,9	3,61	45,9
	SA	8,74	6,96	36,5	3,68	44,6
	RESA	8,41	7,12	36,4	3,77	44,5
	GA	8,86	6,87	36,4	3,87	46,3

ZF = Zwischenfrucht; KON = Kontrolle, SA = Strohasche, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, GA = Getreideasche; MW = Mittelwert; unterschiedliche Großbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den ZF-Arten im Mittel der Düngewarianten ($p \leq 0,05$, Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

Anhang

*Tab. A-11: Einfluss von Düngung, Fruchtart und deren Wechselwirkungen auf Ertrag, Wurzelkriterien und Nährstoffaufnahmen in den Gefäßversuchen 2007–2008.
(zweifaktorielle ANOVA, F-Test)*

Merkmal	Effekt	Gefäßversuch I		Gefäßversuch II		Gefäßversuch III		Gefäßversuch IV	
		<i>p</i>		<i>p</i>		<i>p</i>		<i>p</i>	
Sprossertrag	Düng.	<0,001	***	0,795	ns	<0,001	***	0,005	**
	FA	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***
	Düng. x FA	0,024	*	0,113	ns	<0,001	***	0,071	ns
W-TM	Düng.	0,002	**	0,927	ns	<0,001	***	0,317	ns
	FA	<0,001	***	0,048	*	<0,001	***	0,003	**
	Düng. x FA	0,003	**	0,163	ns	0,099	ns	0,098	ns
W-Länge	Düng.	0,003	**	0,491	ns	0,409	ns	0,150	ns
	FA	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***
	Düng. x FA	0,089	ns	<0,001	***	<0,001	***	0,003	**
W-S-V	Düng.	0,026	*	0,340	ns	0,007	**	0,326	ns
	FA	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***
	Düng. x FA	0,056	ns	0,056	ns	0,002	**	0,011	*
P-Gehalt	Düng.	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***
	FA	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***
	Düng. x FA	<0,001	***	0,002	**	<0,001	***	<0,001	***
K-Gehalt	Düng.	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***
	FA	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***
	Düng. x FA	<0,001	***	0,110	ns	<0,001	***	0,046	*
Mg-Gehalt	Düng.	<0,001	***	0,256	ns	<0,001	***	0,433	ns
	FA	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***
	Düng. x FA	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***	0,077	ns
Ca-Gehalt	Düng.	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***	0,198	ns
	FA	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***
	Düng. x FA	<0,001	***	0,121	ns	<0,001	***	0,006	**
P-Aufnahme	Düng.	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***
	FA	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***
	Düng. x FA	<0,001	***	0,172	ns	<0,001	***	<0,001	***
K-Aufnahme	Düng.	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***
	FA	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***
	Düng. x FA	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***	0,001	***
Mg-Aufnahme	Düng.	<0,001	***	0,273	ns	<0,001	***	<0,001	***
	FA	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***
	Düng. x FA	0,001	***	0,110	ns	<0,001	***	<0,001	***
Ca-Aufnahme	Düng.	0,009	**	0,133	ns	<0,001	***	0,037	*
	FA	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***	<0,001	***
	Düng. x FA	0,001	***	0,114	ns	<0,001	***	0,227	ns

TM = Trockenmasse, W = Wurzel, W-S-V = Wurzel-Spross-Verhältnis, Düng. = Düngung, FA = Fruchtart, Düng.xFA = Wechselwirkung, * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

Anhang

Tab. A-12: K-, Mg- und Ca-Aufnahmen in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche auf lehmigem Sand, 2007.

Düng.	Mais	Bl. Lupine	So-Gerste	So-Raps	Ölrettich	Phacelia	Weidelgras	Buchweizen
K-Aufnahme (mg Gefäß⁻¹)								
<i>p</i>	<0,001***	0,069 ns	<0,001***	0,010**	0,043*	0,001***	0,039*	0,001***
KON	947 a	183	652 a	350 b	610 ab	955 a	586 a	757 ab
TSP	946 a	204	693 a	336 ab	565 a	945 a	659 ab	717 a
RESA	1079 b	240	723 a	352 b	622 ab	1141 ab	743 b	765 ab
SA	1399 d	221	799 b	383 b	507 a	1478 c	714 b	921 b
GA	1108 b	185	867 bc	291 a	618 ab	1093 ab	667 ab	805 ab
KCl	1242 c	219	874 c	382 b	713 b	1301 bc	654 ab	1095 c
MW	1120 D	209 A	768 C	349 B	606 A	1152 D	670 B	843 C
Mg-Aufnahme (mg Gefäß⁻¹)								
<i>p</i>	0,006**	0,017*	0,004**	0,033*	0,029*	0,240 ns	0,136 ns	0,299 ns
KON	96,2 b	24,4 ab	44,8 ab	35,4 b	50,3 b	77,8	27,1	116,1
TSP	98,5 b	28,0 bc	47,6 b	35,1 b	46,3 b	76,3	30,1	106,8
RESA	93,2 b	29,6 c	46,5 b	35,8 b	46,2 b	90,2	33,5	122,3
SA	76,5 a	24,4 ab	41,8 a	32,6 ab	35,4 a	95,6	27,1	133,2
GA	89,1 b	22,0 a	41,7 a	29,5 a	45,1 b	79,6	28,5	138,2
KCl	86,9 ab	25,4 abc	47,5 b	33,9 b	52,2 b	86,2	26,2	129,2
MW	90,1 D	25,6 A	45,0 C	33,7 B	45,9 B	84,3 C	28,7 A	124,3 D
Ca-Aufnahme (mg Gefäß⁻¹)								
<i>p</i>	0,156 ns	0,064 ns	0,015*	0,024*	0,027*	0,284 ns	0,357 ns	0,183 ns
KON	141	214	91 a	224 a	383 b	712	68	361
TSP	131	250	105 b	224 a	344 ab	723	77	312
RESA	125	252	84 a	216 a	320 ab	744	75	288
SA	120	209	89 a	214 a	278 a	858	67	305
GA	128	206	89 a	225 a	323 ab	683	69	350
KCl	118	225	96 ab	253 b	386 b	842	75	373
MW	127 B	226 C	93 A	226 C	339 B	760 C	72 A	331 B

KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngevarianten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); unterschiedliche Großbuchstaben innerhalb einer Zeile und eines Versuches kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Fruchtarten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

Anhang

Tab. A-13: K-, Mg- und Ca-Aufnahmen in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche auf sandigem Lehm, 2008.

Düng.	Mais	Bl. Lupine	So-Gerste	So-Raps	Ölrettich	Phacelia	Weidelgras	Buchweizen
K-Aufnahme (mg Gefäß⁻¹)								
<i>p</i>	<0,001***	0,008**	<0,001***	0,005**	0,012*	<0,001***	<0,001***	0,622 ns
KON	599 a	298 a	719 a	246 a	488 a	859 a	579 a	589
TSP	650 b	333 ab	718 a	290 ab	514 a	905 a	574 a	598
RESA	758 c	355 abc	764 ab	340 bc	540 ab	1002 b	628 a	660
SA	853 e	361 bc	767 ab	373 c	601 bc	1180 c	700 b	599
GA	849 e	411 c	775 b	337 bc	557 abc	1016 b	708 b	661
KCl	808 d	313 ab	835 c	368 c	631 c	1166 c	702 b	654
MW	753 C	345 B	763 C	326 A	555 A	1021 C	648 B	627 B
Mg-Aufnahme (mg Gefäß⁻¹)								
<i>p</i>	<0,001***	0,007**	0,001***	0,521 ns	0,020*	0,050*	<0,001***	0,008**
KON	71,8 a	87,8 ab	51,4 b	46,1	83,0 ab	125,5 ab	48,6 bc	187,4 b
TSP	89,2 c	94,9 abc	52,4 b	51,0	87,3 abc	122,8 ab	52,4 c	173,5 b
RESA	83,8 c	103,2 bc	51,8 b	48,2	92,1 c	132,9 b	49,8 bc	167,8 b
SA	66,6 a	81,0 a	42,7 a	48,1	79,5 a	120,4 a	40,5 a	119,0 a
GA	78,0 b	110,6 c	48,0 b	47,4	88,4 bc	128,4 ab	47,5 b	170,4 b
KCl	70,4 a	85,7 a	47,9 b	51,5	81,7 ab	118,8 a	40,0 a	161,2 b
MW	76,6	93,9	49,0	48,7	85,3 B	124,8 C	46,5 A	163,2 D
Ca-Aufnahme (mg Gefäß⁻¹)								
<i>p</i>	<0,001***	0,003**	0,060 ns	0,002**	0,060 ns	0,346 ns	<0,001***	0,165 ns
KON	117 a	517 ab	125	391 c	497	1201	120 c	433
TSP	145 c	561 bc	125	394 c	552	1123	123 c	429
RESA	142 c	577 bc	118	343 ab	532	1105	105 b	433
SA	112 a	450 a	107	335 a	503	1103	93 a	302
GA	130 b	630 c	117	325 a	554	1097	109 b	393
KCl	113 a	504 ab	109	373 bc	518	1058	108 b	401
MW	127 A	540 C	117 A	360 B	526 C	1114 D	110 A	398 B

KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngevarianten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); unterschiedliche Großbuchstaben innerhalb einer Zeile und eines Versuches kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Fruchtarten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

Anhang

Tab. A-14: Korrelationen zwischen P-Aufnahme und anderen Pflanzen- bzw. Bodenkriterien in den Gefäßversuchen.

Korrelation	Gefäßversuche mit HF			Gefäßversuche mit ZF		
	Fruchtart	Gef.vers. I (Sand)	Gef.vers. III (Lehm)	Fruchtart	Gef.vers. II (Sand)	Gef.vers. IV (Lehm)
P-Aufnahme / Wurzel-TM	Mais	0,274	0,350	Ölrettich		-0,297
	Bl. Lupine	0,014	0,261	Phacelia	-0,122	-0,201
	So-Gerste	0,058	0,092	Weidelgras	0,534**	0,457*
	So-Raps	0,181	0,426*	Buchweizen	0,269	0,162
P-Aufnahme / Wurzellänge	Mais	0,473*	0,539**	Ölrettich		-0,104
	Bl. Lupine	0,205	0,102	Phacelia	-0,123	-0,100
	So-Gerste	0,347	-0,226	Weidelgras	0,352	0,474*
	So-Raps	0,505*	0,363	Buchweizen	0,536**	0,503*
P-Aufnahme / W-S-V	Mais	-0,263	-0,349	Ölrettich		-0,350
	Bl. Lupine	-0,203	-0,687**	Phacelia	-0,402	-0,152
	So-Gerste	-0,064	-0,540**	Weidelgras	-0,238	0,205
	So-Raps	-0,103	0,100	Buchweizen	-0,002	-0,314
P-Aufnahme / Pw	Mais	0,796**	0,914**	Ölrettich	-0,084	0,750**
	Bl. Lupine	0,423*	0,678**	Phacelia	0,362	0,722**
	So-Gerste	0,720**	0,734**	Weidelgras	0,483*	0,702**
	So-Raps	0,833**	0,688**	Buchweizen	0,219	0,394
P-Aufnahme / Pdl	Mais	0,729**	0,853**	Ölrettich	-0,104	0,782**
	Bl. Lupine	0,307	0,754**	Phacelia	0,449*	0,822**
	So-Gerste	0,697**	0,798**	Weidelgras	0,688**	0,639**
	So-Raps	0,704**	0,690**	Buchweizen	0,115	0,144
P-Aufnahme / Pt	Mais	0,431*	0,756**	Ölrettich	0,327	0,707**
	Bl. Lupine	0,546**	0,642**	Phacelia	-0,040	0,635**
	So-Gerste	0,638**	0,617**	Weidelgras	0,187	0,488**
	So-Raps	0,720**	0,601**	Buchweizen	0,075	0,226
P-Aufnahme / Harz-P	Mais	0,637**	0,564**	Ölrettich	-0,050	0,431*
	Bl. Lupine	0,668**	0,431*	Phacelia	0,088	0,348
	So-Gerste	0,132	0,296	Weidelgras	0,038	0,168
	So-Raps	0,471*	0,613**	Buchweizen	0,092	0,355
P-Aufnahme / NaHCO ₃ -P	Mais	0,666**	0,469*	Ölrettich	0,120	0,418*
	Bl. Lupine	0,316	0,124	Phacelia	0,363	0,479*
	So-Gerste	0,354	0,152	Weidelgras	0,455*	-0,024
	So-Raps	0,504*	0,099	Buchweizen	0,012	-0,245
P-Aufnahme / NaOH-P	Mais	0,169	0,255	Ölrettich	0,220	0,504*
	Bl. Lupine	0,219	0,569**	Phacelia	0,053	0,394
	So-Gerste	0,353	0,106	Weidelgras	-0,196	0,293
	So-Raps	-0,276	-0,090	Buchweizen	0,352	0,124
P-Aufnahme / H ₂ SO ₄ -P	Mais	0,277	0,377	Ölrettich	0,150	0,391
	Bl. Lupine	-0,089	0,066	Phacelia	-0,107	-0,025
	So-Gerste	0,188	-0,115	Weidelgras	0,077	-0,129
	So-Raps	0,429*	0,378	Buchweizen	-0,014	-0,415*
P-Aufnahme / Residual-P	Mais	-0,313	0,317	Ölrettich	0,048	-0,048
	Bl. Lupine	0,253	0,511*	Phacelia	-0,150	0,057
	So-Gerste	0,245	0,623**	Weidelgras	0,138	0,475*
	So-Raps	0,540**	0,321	Buchweizen	-0,088	0,426*

Pw = wasserlösliches P, Pdl = doppellaktatlösliches P, Pt = P total;

** Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) sign., * Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) sign..

Anhang

Tab. A-15: Korrelationen zwischen Sprossertrag und anderen Pflanzen- bzw. Bodenkriterien in den Gefäßversuchen.

Korrelation	Gefäßversuche mit HF			Gefäßversuche mit ZF		
	Fruchtart	Gef.vers. I (Sand)	Gef.vers. III (Lehm)	Fruchtart	Gef.vers. II (Sand)	Gef.vers. IV (Lehm)
Sprossertrag / P-Aufnahme	Mais	0,744**	0,970**	Ölrettich	0,764**	0,788**
	Bl. Lupine	0,786**	0,824**	Phacelia	0,749**	0,190
	So-Gerste	0,517**	0,870**	Weidelgras	0,831**	0,787**
	So-Raps	0,801**	0,854**	Buchweizen	0,700**	0,854**
Sprossertrag / K-Aufnahme	Mais	-0,068	0,263	Ölrettich	0,780**	0,216
	Bl. Lupine	0,597**	0,664**	Phacelia	0,820**	-0,249
	So-Gerste	0,609**	0,132	Weidelgras	0,844**	-0,019
	So-Raps	0,508*	0,752**	Buchweizen	0,530**	0,643**
Sprossertrag / Ca-Aufnahme	Mais	0,549**	0,790**	Ölrettich	0,719**	0,235
	Bl. Lupine	0,780**	0,880**	Phacelia	0,794**	0,290
	So-Gerste	0,410*	0,385	Weidelgras	0,558**	0,494*
	So-Raps	-0,008	-0,315	Buchweizen	0,850**	0,916**
Sprossertrag / Mg-Aufnahme	Mais	0,419*	0,739**	Ölrettich	0,845**	0,501*
	Bl. Lupine	0,808**	0,964**	Phacelia	0,906**	0,281
	So-Gerste	0,360	0,530**	Weidelgras	0,835**	0,845**
	So-Raps	0,617**	0,535**	Buchweizen	0,665**	0,786**
Sprossertrag / Wurzel-TM	Mais	0,035	0,399	Ölrettich	-	-0,301
	Bl. Lupine	0,396	0,490*	Phacelia	-0,056	0,469**
	So-Gerste	0,195	0,190	Weidelgras	0,534**	0,599**
	So-Raps	0,208	0,545**	Buchweizen	0,313	0,255
Sprossertrag / Wurzellänge	Mais	0,011	0,531**	Ölrettich	-	-0,117
	Bl. Lupine	0,614**	0,398	Phacelia	-0,006	0,290
	So-Gerste	0,588*	-0,070	Weidelgras	0,352	0,626**
	So-Raps	0,550*	0,643**	Buchweizen	0,621**	0,747**
Sprossertrag / Wurzel-Spross- Verhältnis	Mais	-0,333	-0,378	Ölrettich	-	-0,418*
	Bl. Lupine	0,384	-0,605**	Phacelia	-0,390	0,035
	So-Gerste	0,333	-0,452*	Weidelgras	-0,459*	0,286
	So-Raps	0,172	0,377	Buchweizen	-0,164	-0,175
Sprossertrag / Pw	Mais	0,639**	0,854**	Ölrettich	-0,378	0,575**
	Bl. Lupine	0,637**	0,471*	Phacelia	0,004	0,216
	So-Gerste	0,017	0,607**	Weidelgras	0,205	0,413*
	So-Raps	0,682**	0,516**	Buchweizen	-0,395	0,051
Sprossertrag / Pdl	Mais	0,684**	0,812**	Ölrettich	-0,457*	0,513*
	Bl. Lupine	0,412*	0,521**	Phacelia	0,185	0,134
	So-Gerste	0,026	0,622**	Weidelgras	0,582**	0,315
	So-Raps	0,445*	0,481*	Buchweizen	-0,448*	-0,185
Sprossertrag / Pt	Mais	0,442*	0,728**	Ölrettich	-0,060	0,389
	Bl. Lupine	0,480*	0,440*	Phacelia	-0,095	0,161
	So-Gerste	0,082	0,518**	Weidelgras	0,036	0,218
	So-Raps	0,591**	0,488*	Buchweizen	-0,271	-0,110

Pw = wasserlösliches P, Pdl = doppellaktatlösliches P, Pt = P total;

** Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) sign., * Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) sign..

Anhang

Tab. A-16: Einfluss von Düngung, Fruchtart und deren Wechselwirkungen auf Bodenkriterien der Gefäßversuche 2007–2008.
(zweifaktorielle ANOVA, F-Test)

Merkmal	Effekt	Gefäßversuch I	Gefäßversuch II	Gefäßversuch III	Gefäßversuch IV
		(HF, SI3)	(ZF, SI3)	(HF, Ls3)	(ZF, Ls3)
		<i>p</i>	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>p</i>
pH-Wert	Düng.	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***
	FA	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***
	Düng. x FA	0,288 ns	0,097 ns	0,243 ns	0,002 **
Pw	Düng.	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***
	FA	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***	0,002 **
	Düng. x FA	0,048 *	<0,001 ***	0,228 ns	0,062 ns
Pdl	Düng.	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***
	FA	<0,001 ***	<0,001 ***	0,122 ns	<0,001 ***
	Düng. x FA	0,003 **	0,004 **	0,072 ns	0,064 ns
Kdl	Düng.	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***
	FA	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***	0,001 ***
	Düng. x FA	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***	0,008 **
Mgdl	Düng.	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***
	FA	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***	0,073 ns
	Düng. x FA	0,029 *	<0,001 ***	0,548 ns	0,611 ns
Pox	Düng.	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***
	FA	0,006 **	<0,001 ***	0,011 *	<0,001 ***
	Düng. x FA	0,463 ns	0,006 **	0,020 *	0,054 ns
DPS	Düng.	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***
	FA	0,002 **	0,004 **	<0,001 ***	0,001 ***
	Düng. x FA	0,355 ns	0,013 *	0,007 **	0,019 *
PSC	Düng.	0,004 **	0,942 ns	0,340 ns	0,595 ns
	FA	0,023 *	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***
	Düng. x FA	<0,001 ***	0,062 ns	<0,001 ***	0,445 ns

HF = Hauptfrüchte, ZF = Zwischenfrüchte, SI3 = mittel lehmiger Sand, Ls3 = mittel sandiger Lehm ; Pw = wasserlösliches P, Pdl/Kdl/Mgdl = doppelaktatlösliches P/K/Mg, Pox = oxalatlösliches P, DPS = Grad der P-Sättigung, PSC = P-Sorptionskapazität; Düng. = Düngung, FA = Fruchtart, Düng.xFA = Wechselwirkung, * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

Anhang

Tab. A-17: Einfluss von Düngung, Fruchtart und deren Wechselwirkungen auf die P-Fractionen im Boden der Gefäßversuche 2007–2008.
(zweifaktorielle ANOVA, F-Test)

Merkmal	Effekt	Gefäßversuch I	Gefäßversuch II	Gefäßversuch III	Gefäßversuch IV
		(HF, Sl3)	(ZF, Sl3)	(HF, Ls3)	(ZF, Ls3)
		<i>p</i>	<i>p</i>	<i>p</i>	<i>p</i>
Harz-P	Düng.	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***	0,007 **
	FA	<0,001 ***	0,013 *	<0,001 ***	0,616 ns
	Düng. x FA	<0,001 ***	<0,001 ***	0,030 *	0,429 ns
NaHCO ₃ -P	Düng.	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***	0,006 **
	FA	<0,001 ***	<0,001 ***	0,019 *	<0,001 ***
	Düng. x FA	0,101 ns	0,003 **	0,062 ns	<0,001 ***
NaOH-P	Düng.	0,062 ns	0,390 ns	<0,001 ***	<0,001 ***
	FA	<0,001 ***	<0,001 ***	0,006 **	<0,001 ***
	Düng. x FA	0,651 ns	0,161 ns	0,037 *	0,015 *
H ₂ SO ₄ -P	Düng.	<0,001 ***	<0,001 ***	0,051 ns	0,049 *
	FA	<0,001 ***	<0,001 ***	0,265 ns	<0,001 ***
	Düng. x FA	<0,001 ***	<0,001 ***	0,004 **	0,024 *
Pt	Düng.	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***
	FA	<0,001 ***	<0,001 ***	<0,001 ***	0,044 *
	Düng. x FA	0,064 ns	0,072 ns	<0,001 ***	0,044 *
Residual-P	Düng.	0,047 *	0,608 ns	<0,001 ***	0,003 **
	FA	0,003 **	<0,001 ***	<0,001 ***	0,042 *
	Düng. x FA	0,417 ns	0,104 ns	<0,001 ***	0,005 **

HF = Hauptfrüchte, ZF = Zwischenfrüchte, Sl3 = mittel lehmiger Sand, Ls3 = mittel sandiger Lehm; Pt = P total; Düng. = Düngung, FA = Fruchtart, Düng.xFA = Wechselwirkung, * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

Tab. A-18: Partielles Eta-Quadrat der Einflussfaktoren auf die Harz-P-Fraktion im Boden der Gefäßversuche 2007–2008.
(zweifaktorielle ANOVA, F-Test)

Merkmal	Effekt	Gefäßversuch I	Gefäßversuch II	Gefäßversuch III	Gefäßversuch IV
		(HF, Sl3)	(ZF, Sl3)	(HF, Ls3)	(ZF, Ls3)
		Partielles Eta-Quadrat	Partielles Eta-Quadrat	Partielles Eta-Quadrat	Partielles Eta-Quadrat
Harz-P	Düng.	0,344	0,506	0,510	0,201
	FA	0,476	0,145	0,319	0,026
	Düng. x FA	0,419	0,405	0,301	0,184

Anhang

Tab. A-19: Korrelationen zwischen den Pw-, Pdl-, Harz-P- und DPS-Werten im Boden der Gefäßversuche.

Korrelation	Gefäßversuche mit HF			Gefäßversuche mit ZF		
	Fruchtart	Gef.vers. I (Sand)	Gef.vers. III (Lehm)	Fruchtart	Gef.vers. II (Sand)	Gef.vers. IV (Lehm)
Pw / Pdl	Mais	0,868**	0,857**	Ölrettich	0,952**	0,906**
	Bl. Lupine	0,706**	0,929**	Phacelia	0,810**	0,922**
	So-Gerste	0,894**	0,865**	Weidelgras	0,699**	0,948**
	So-Raps	0,907**	0,902**	Buchweizen	0,909**	0,894**
Pw / Harz-P	Mais	0,799**	0,608**	Ölrettich	0,608**	0,271
	Bl. Lupine	0,616**	0,640**	Phacelia	0,253	0,735**
	So-Gerste	0,348	0,300	Weidelgras	0,385	0,227
	So-Raps	0,610**	0,682**	Buchweizen	0,680**	0,407*
Pw / DPS	Mais	0,498*	0,501*	Ölrettich	0,534**	0,648**
	Bl. Lupine	0,493*	0,468*	Phacelia	0,678**	0,628**
	So-Gerste	0,593**	0,235	Weidelgras	0,212	0,563**
	So-Raps	0,628**	0,593**	Buchweizen	0,582**	0,696**
Pdl / Harz-P	Mais	0,838**	0,683**	Ölrettich	0,616**	0,397
	Bl. Lupine	0,564**	0,666**	Phacelia	0,477*	0,608**
	So-Gerste	0,290	0,421*	Weidelgras	0,456*	0,335
	So-Raps	0,695**	0,735**	Buchweizen	0,636**	0,097
Pdl / DPS	Mais	0,535**	0,395	Ölrettich	0,577**	0,717**
	Bl. Lupine	0,385	0,576**	Phacelia	0,796**	0,578**
	So-Gerste	0,587**	0,275	Weidelgras	0,224	0,507*
	So-Raps	0,624**	0,702**	Buchweizen	0,540**	0,717**

Pw = wasserlösliches P, Pdl = doppellaktatlösliches P, PSC = P-Sorptionskapazität, DPS = Grad der P-Sättigung;

** Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) sign., * Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) sign.

Anhang

Tab. A-20: Kdl- und MgdI-Gehalte im Boden in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche 2007 und 2008.

Düng.	Mais	Bl. Lupine	So-Gerste	So-Raps	Ölrettich	Phacelia	Weidelgras	Buchweizen
Kdl-Gehalt (mg kg⁻¹), (zu Versuchsbeginn: 114,3), Sand (Sl3), 2007								
<i>p</i>	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***
KON	27,6 ab	88,6 a	49,3 a	60,7 a	47,7 a	32,1 a	46,2 a	40,2 a
TSP	26,1 a	89,3 a	51,6 a	59,7 a	48,5 a	31,7 a	51,4 a	40,5 a
RESA	28,3 ab	103,3 b	56,1 ab	78,3 a	52,7 a	32,6 a	48,4 a	51,5 b
SA	44,2 c	159,0 d	87,9 c	118,0 b	144,4 c	49,8 b	85,0 b	109,3 d
GA	28,8 ab	110,0 b	66,2 b	78,6 a	58,5 ab	36,0 a	57,9 a	54,1 b
KCl	35,4 b	143,2 c	62,8 ab	103,6 b	88,6 b	47,2 b	85,3 b	67,7 c
MW	31,7 A	115,6 D	62,3 B	83,1 C	73,4 C	38,2 A	62,4 B	60,5 B
Kdl-Gehalt (mg kg⁻¹), (zu Versuchsbeginn: 84,5), Lehm (Ls3), 2008								
<i>p</i>	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***
KON	44,0 a	63,5 a	47,4 a	60,6 a	48,0 ab	47,4 a	49,1 a	39,2 a
TSP	43,8 a	63,8 a	48,3 a	58,8 a	42,5 a	45,7 a	48,3 a	39,9 a
RESA	48,3 b	76,5 b	52,5 ab	70,1 b	51,8 bc	47,0 a	51,1 a	44,7 a
SA	65,8 d	107,3 d	71,8 d	105,9 e	79,5 e	60,7 b	72,5 c	76,8 c
GA	49,4 b	85,0 c	56,1 b	79,9 c	55,8 c	57,2 b	57,5 b	52,4 ab
KCl	58,6 c	104,5 d	63,5 c	89,8 d	64,6 d	57,8 b	68,2 c	63,1 b
MW	51,7 A	83,4 D	56,6 B	77,5 C	57,0 B	52,6 A	57,8 B	52,7 A
MgdI-Gehalt (mg kg⁻¹), (zu Versuchsbeginn: 120), Sand (Sl3), 2007								
<i>p</i>	0,103 ns	0,009**	0,049*	<0,001***	0,019*	<0,001***	0,017*	<0,001***
KON	133	143 a	153 ab	153 b	126 a	126 a	146 bc	129 a
TSP	132	148 ab	144 a	139 a	132 ab	128 ab	134 a	128 a
RESA	142	164 c	164 b	159 b	141 c	140 c	146 bc	149 c
SA	143	154 bc	156 ab	140 a	137 bc	136 bc	139 ab	146 c
GA	141	155 bc	152 ab	141 a	136 bc	153 d	149 c	139 b
KCl	136	153 abc	150 a	136 a	136 bc	142 c	145 bc	126 a
MW	138 A	153 C	153 C	147 B	134 A	138 A	143 B	136 A
MgdI-Gehalt (mg kg⁻¹), (zu Versuchsbeginn: 220), Lehm (Ls3), 2008								
<i>p</i>	<0,001***	0,011*	0,005**	<0,001***	0,336 ns	0,516 ns	0,112 ns	0,018*
KON	230 a	226 a	233 a	222 a	189	200	195	186 a
TSP	225 a	231 a	236 a	228 ab	198	216	209	198 ab
RESA	243 b	248 b	252 b	248 d	205	216	216	225 b
SA	244 b	237 a	244 ab	235 bc	214	220	226	216 b
GA	240 b	234 a	249 b	240 cd	224	218	212	204 ab
KCl	227 a	231 a	234 a	226 ab	206	212	209	181 a
MW	235 A	234 A	242 B	233 A	206 A	214 A	211 A	201 A

Kdl/MgdI = doppellaktatlösliches K/Mg; KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngewarianten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); unterschiedliche Großbuchstaben innerhalb einer Zeile und eines Versuches kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Fruchtarten (Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

Anhang

Tab. A-21: Pox-Gehalte, PSC und DPS im Boden in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche auf lehmigem Sand, 2007.

Düng.	Mais	Bl. Lupine	So-Gerste	So-Raps	Ölrettich	Phacelia	Weidelgras	Buchweizen
Pox-Gehalt (mmol kg ⁻¹), (zu Versuchsbeginn: 11,9)								
<i>p</i>	0,005**	0,033*	0,404 ns	0,016*	0,001***	0,022*	0,463 ns	<0,001***
KON	12,5 ab	12,4 a	11,8	12,4 ab	11,8 a	12,0 a	11,7	12,2 a
TSP	13,3 c	14,5 b	12,7	13,3 c	12,3 ab	12,8 b	12,2	13,0 bc
RESA	13,5 c	13,1 a	12,8	13,2 bc	13,0 bc	12,6 b	12,1	13,4 c
SA	12,8 abc	12,3 a	12,0	12,3 a	12,4 ab	12,4 a	12,5	12,5 ab
GA	13,0 bc	12,8 a	12,2	12,2 a	13,9 c	13,0 b	12,2	13,0 bc
KCl	12,2 a	12,5 a	12,3	12,1 a	12,2 ab	12,6 b	12,1	11,9 a
MW	12,9 B	12,9 B	12,3 A	12,6 AB	12,6 B	12,6 B	12,1 A	12,7 B
PSC (mmol kg ⁻¹), (zu Versuchsbeginn: 30,5)								
<i>p</i>	0,031*	0,033*	0,032*	0,018*	0,213 ns	0,056 ns	0,179 ns	0,752 ns
KON	30,8 bc	30,2 b	30,2 ab	29,1 b	29,8	31,6	28,1	29,9
TSP	29,7 abc	30,4 b	29,8 ab	29,9 b	28,7	31,2	29,8	30,6
RESA	29,5 ab	28,2 a	29,5 a	28,8 ab	30,6	31,0	28,8	30,2
SA	29,1 a	29,7 b	28,8 a	29,2 b	29,3	29,9	29,2	31,0
GA	31,1 c	29,2 ab	29,2 a	27,6 a	30,0	30,7	28,1	31,0
KCl	29,1 a	29,0 ab	31,1 b	30,1b	29,4	31,2	29,0	30,6
MW	29,9 B	29,5 AB	29,8 B	29,1 A	29,6 B	30,9 C	28,8 A	30,6 C
DPS (%), (zu Versuchsbeginn: 39,1)								
<i>p</i>	0,002**	0,032*	0,139 ns	0,002**	0,005**	0,002**	0,464 ns	0,018*
KON	40,6 a	41,0 a	39,2	42,5 ab	39,7 a	38,0 a	41,7	41,0 ab
TSP	44,7 c	47,7 b	42,6	44,4 bc	42,7 a	41,1 b	41,0	42,4 bc
RESA	45,7 c	46,4 b	43,4	45,7 c	42,6 a	40,9 b	42,2	44,3 c
SA	44,2 bc	41,5 a	41,8	42,0 ab	42,1 a	41,6 b	42,7	40,5 ab
GA	41,8 ab	43,7 ab	41,7	44,1 bc	46,2 b	42,3 b	43,3	42,0 bc
KCl	41,9 ab	43,2 ab	39,7	40,1 a	41,6 a	40,3 b	41,7	38,8 a
MW	43,1 B	43,9 B	41,4 A	43,1 B	42,5 B	40,7 A	42,1 B	41,5 AB

Pox = oxalatlösliches P, PSC = P-Sorptionskapazität, DPS = Grad der P-Sättigung; KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngewarianten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); unterschiedliche Großbuchstaben innerhalb einer Zeile und eines Versuches kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Fruchtarten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

Anhang

Tab. A-22: Pox-Gehalte, PSC und DPS im Boden in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche auf sandigem Lehm, 2008.

Düng.	Mais	Bl. Lupine	So-Gerste	So-Raps	Ölrettich	Phacelia	Weidelgras	Buchweizen
Pox-Gehalt (mmol kg⁻¹), (zu Versuchsbeginn: 9,9)								
<i>p</i>	<0,001***	0,005**	0,048*	<0,001***	0,002**	<0,001***	0,011*	0,008**
KON	9,7 abc	9,3 a	9,5 a	9,5 a	8,5 a	8,6 a	10,2 ab	9,4 a
TSP	10,3 cd	10,8 bc	11,2 c	9,8 a	9,9 b	10,0 bc	11,1 c	10,4 b
RESA	10,8 d	10,5 bc	10,8 bc	10,4 b	10,1 bc	9,9 bc	11,2 c	10,2 b
SA	9,4 a	10,4 bc	10,3 abc	9,6 a	9,0 ab	9,4 ab	10,8 bc	9,5 a
GA	10,1 bc	11,0 c	9,9 ab	10,5 b	11,1 c	10,6 c	10,8 bc	10,2 b
KCl	9,6 ab	10,0 ab	10,0 ab	9,6 a	9,2 ab	9,6 b	9,8 a	9,5 a
MW	10,0 AB	10,3 C	10,3 BC	9,9 A	9,6 A	9,7 A	10,6 B	9,9 A
PSC (mmol kg⁻¹), (zu Versuchsbeginn: 37,4)								
<i>p</i>	0,052 ns	0,074 ns	0,083 ns	0,017*	0,328 ns	0,731 ns	0,464 ns	0,514 ns
KON	36,0	39,2	38,3	38,2 c	34,7	34,3	36,6	37,8
TSP	35,6	40,4	40,9	33,0 a	33,2	35,5	37,1	36,8
RESA	38,3	40,0	40,0	35,5 abc	31,8	35,9	38,5	36,3
SA	37,3	41,5	39,5	35,2 ab	32,0	35,2	38,6	35,6
GA	38,2	38,0	38,2	34,6 ab	32,8	35,1	38,1	36,2
KCl	40,2	38,7	37,4	36,5 bc	34,2	36,3	38,4	36,9
MW	37,6 B	39,6 C	39,0 C	35,5 A	33,1 A	35,4 B	37,9 D	36,6 C
DPS (%), (zu Versuchsbeginn: 26,6)								
<i>p</i>	0,004**	0,008**	0,573 ns	<0,001***	0,001***	0,007**	0,027*	<0,001***
KON	27,1 bc	23,7 a	24,8	24,9 a	24,6 a	25,2 a	27,9 ab	24,8 a
TSP	28,9 c	26,9 bc	27,4	29,7 d	29,8 bc	28,2 bc	30,0 b	28,4 c
RESA	28,4 c	26,4 ab	27,0	29,4 cd	31,8 cd	27,7 abc	29,2 b	28,2 c
SA	25,4 ab	25,1ab	26,0	27,4 bc	28,0 abc	26,7 ab	28,1 ab	26,8 bc
GA	26,6 bc	29,1 c	25,9	30,4 d	34,1 d	30,3 c	28,3 b	28,3 c
KCl	23,9 a	25,7 ab	26,7	26,3 ab	26,8 ab	26,6 ab	25,5 a	25,8 ab
MW	26,7 A	26,1 A	26,3 A	28,0 B	29,2 B	27,5 A	28,2 AB	27,0 A

Pox = oxalatlösliches P, PSC = P-Sorptionskapazität, DPS = Grad der P-Sättigung; KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngewarianten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); unterschiedliche Großbuchstaben innerhalb einer Zeile und eines Versuches kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Fruchtarten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

Anhang

Tab. A-23: Harz-P, NaHCO₃-P, NaOH-P und H₂SO₄-P im Boden in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche I und II (lehmiger Sand) 2007.

Düng.	Mais	Bl. Lupine	So-Gerste	So-Raps	Ölrettich	Phacelia	Weidelgras	Buchweizen
Harz-P (mg kg ⁻¹), (zu Versuchsbeginn: 19,8)								
<i>p</i>	0,001***	0,046 ns	0,240 ns	0,001***	0,002**	<0,001***	0,059 ns	0,008**
KON	18,7 a	28,3	24,5	20,5 ab	24,4 ab	23,2 a	24,8	24,6 ab
TSP	34,6 b	33,7	23,5	26,8 bc	25,3 b	17,3 a	26,9	31,6 b
RESA	34,2 b	35,0	20,0	20,4 ab	26,3 b	18,5 a	27,0	25,0 ab
SA	35,0 b	31,0	25,2	28,8 c	32,5 c	33,4 b	33,0	30,1 b
GA	39,8 b	28,1	16,5	27,3 c	30,3 bc	31,5 b	30,7	27,1 b
KCl	24,6 a	25,8	21,5	15,3 a	19,4 a	23,7 a	28,7	18,5 a
MW	31,1 B	30,3 B	21,9 A	23,2 A	26,4 AB	24,6 A	28,5 B	26,1 AB
NaHCO ₃ -P (mg kg ⁻¹), (zu Versuchsbeginn: 64,9)								
<i>p</i>	0,005**	0,008**	0,019*	0,015*	0,005**	0,192 ns	0,007**	0,012*
KON	75,6 ab	73,0 ab	60,6 a	67,2 ab	64,1 ab	55,1	62,2 a	62,5 bc
TSP	92,0 c	77,9 bc	65,6 ab	73,6 bc	71,4 bc	67,6	68,4 ab	64,7 c
RESA	79,8 b	85,4 c	71,0 b	73,5 bc	62,1 a	71,7	77,6 c	51,8 ab
SA	81,6 bc	74,9 abc	59,6 a	71,0 abc	67,4 ab	66,1	70,4 bc	48,5 a
GA	85,4 bc	81,7 bc	62,5 a	77,9 c	76,7 c	70,8	68,7 ab	67,9 c
KCl	68,0 a	65,0 a	57,4 a	63,8 a	59,9 a	63,8	64,8 ab	58,1 abc
MW	80,4 D	76,3 C	62,8 A	71,2 B	66,9 B	65,9 B	68,7 B	58,9 A
NaOH-P (mg kg ⁻¹), (zu Versuchsbeginn: 220)								
<i>p</i>	0,632 ns	0,061 ns	0,439 ns	<0,001***	0,117 ns	0,381 ns	0,510 ns	0,002**
KON	195	193	195	210 a	251	231	215	210 a
TSP	218	211	205	222 ab	243	229	212	224 b
RESA	184	204	210	219 ab	229	235	179	237 c
SA	175	204	202	207 a	223	224	207	227 bc
GA	212	213	209	230 b	217	230	204	231 bc
KCl	190	207	205	247 c	227	214	190	224 b
MW	196 A	205 A	204 A	223 B	232 B	227 B	201 A	226 B
H ₂ SO ₄ -P (mg kg ⁻¹), (zu Versuchsbeginn: 93)								
<i>p</i>	0,345 ns	<0,001***	0,165 ns	0,004**	0,291 ns	<0,001***	0,063 ns	0,667 ns
KON	95	85 a	124	130 b	118	121 b	89	91
TSP	98	85 a	135	129 b	115	119 b	92	94
RESA	97	88 a	132	138 b	123	125 b	103	93
SA	110	93 a	137	133 b	119	89 a	95	91
GA	102	85 a	121	130 b	119	91 a	95	93
KCl	96	131 b	136	117 a	112	91 a	101	88
MW	100 B	95 A	131 C	129 C	118 D	106 C	96 B	92 A

KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngewarianten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); unterschiedliche Großbuchstaben innerhalb einer Zeile und eines Versuches kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Fruchtarten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA), * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

Anhang

Tab. A-24: Pt-Gehalt und Residual-P im Boden in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche I und II (lehmiger Sand) 2007.

Düng.	Mais	Bl. Lupine	So-Gerste	So-Raps	Ölrettich	Phacelia	Weidelgras	Buchweizen
Pt (mg kg ⁻¹)								
<i>p</i>	0,037*	0,150 ns	0,002**	0,027*	<0,001***	0,844 ns	0,619 ns	0,090 ns
KON	521 b	487	493 ab	514 a	529 b	511	523	502
TSP	519 b	526	523 c	541 ab	555 c	523	536	520
RESA	526 b	518	525 c	560 b	548 bc	521	526	543
SA	512 ab	509	513 bc	529 a	545 bc	522	531	509
GA	534 b	507	483 a	541 ab	553 c	517	532	519
KCl	492 a	505	497 ab	517 a	504 a	522	524	489
MW	517 B	509 AB	506 A	534 C	539 C	520 AB	529 B	514 A
Residual-P (mg kg ⁻¹), (zu Versuchsbeginn: 106)								
<i>p</i>	0,389 ns	0,019*	0,378 ns	0,190 ns	0,061 ns	0,001***	0,992 ns	0,366 ns
KON	137	107 b	89	86	72	81 a	132	114
TSP	77	119 b	94	90	100	91 ab	137	106
RESA	130	106 b	92	109	107	72 a	139	136
SA	111	107 b	89	89	103	109 bc	126	112
GA	94	99 b	73	76	111	93 ab	134	101
KCl	113	77 a	77	73	86	129 c	140	101
MW	110 B	102 B	86 A	87 A	96 A	96 A	135 C	112 B

KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngewarianten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); unterschiedliche Großbuchstaben innerhalb einer Zeile und eines Versuches kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Fruchtarten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

Anhang

Tab. A-25: Harz-P, NaHCO₃-P, NaOH-P und H₂SO₄-P im Boden in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche III und IV (sandiger Lehm) 2008.

Düng.	Mais	Bl. Lupine	So-Gerste	So-Raps	Ölrettich	Phacelia	Weidelgras	Buchweizen
Harz-P (mg kg⁻¹), (zu Versuchsbeginn: 23,0)								
<i>p</i>	<0,001***	0,001***	0,053 ns	0,015*	0,298 ns	0,017*	0,303 ns	0,288 ns
KON	17,5 a	16,2 b	17,2	16,2 ab	18,0	20,5 ab	19,9	20,5
TSP	26,7 bc	23,1 b	26,1	22,0 bc	20,0	25,5 b	20,4	25,1
RESA	31,4 c	20,6 b	16,7	24,4 c	22,6	23,4 b	25,5	25,7
SA	26,0 b	18,5 b	18,2	24,2 c	21,4	20,0 ab	23,7	18,8
GA	22,5 ab	19,7 b	18,8	22,7 bc	25,3	23,5 b	24,0	20,2
KCl	19,6 a	7,4 a	14,9	15,1 a	18,2	16,3 a	22,1	20,2
MW	23,9 C	17,6 A	18,6 AB	20,8 B	20,9	21,5	22,6	21,7
NaHCO₃-P (mg kg⁻¹), (zu Versuchsbeginn: 51,5)								
<i>p</i>	0,137 ns	0,013*	0,082 ns	0,170 ns	0,016*	<0,001***	0,025*	0,196 ns
KON	54,1	59,6 abc	50,5	56,6	47,6 a	49,3 a	55,6 a	49,4
TSP	62,4	63,5 bc	61,1	54,3	69,5 bc	62,0 b	57,5 a	48,0
RESA	58,5	53,7 ab	57,9	54,0	77,6 c	61,7 b	67,1 ab	33,0
SA	52,1	50,5 a	55,9	54,8	62,4 abc	62,4 b	76,9 b	48,7
GA	62,3	67,8 c	62,1	57,0	50,0 ab	81,3 c	67,5 ab	51,4
KCl	54,6	60,8 bc	61,9	47,5	47,0 a	64,7 a	60,1 a	49,2
MW	57,3 AB	59,3 B	58,2 B	54,0 A	59,0 B	63,6 B	64,1 B	46,6 A
NaOH-P (mg kg⁻¹), (zu Versuchsbeginn: 134)								
<i>p</i>	0,032*	0,002**	0,104 ns	0,089 ns	0,011*	0,011*	0,189 ns	0,004**
KON	128 a	130 a	133	139	134 a	139 a	132	128 a
TSP	128 a	142 bc	139	140	147 bc	169 b	130	134 ab
RESA	130 a	141 bc	128	129	142 ab	153 ab	136	139 b
SA	126 a	130 a	134	124	143 ab	143 a	127	139 b
GA	139 b	147 c	144	135	158 c	150 ab	145	149 c
KCl	133 ab	135 ab	136	140	144 ab	135 a	132	135 ab
MW	131 A	138 B	136 B	134 B	145 B	148 B	134 A	137 A
H₂SO₄-P (mg kg⁻¹), (zu Versuchsbeginn: 159)								
<i>p</i>	0,034*	0,219 ns	0,035*	0,162 ns	0,156 ns	0,091 ns	0,145 ns	0,033*
KON	157 abc	150	148 a	158	151	142	163	155 a
TSP	156 ab	156	159 ab	160	163	133	146	151 a
RESA	166 bc	161	157 a	167	167	147	167	159 a
SA	168 c	156	151 a	162	155	145	158	174 b
GA	163 abc	155	159 ab	159	159	154	161	159 a
KCl	153 a	158	175 b	151	143	160	156	159 a
MW	160	156	158	160	156 B	147 A	158 B	159 B

KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngevarianten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); unterschiedliche Großbuchstaben innerhalb einer Zeile und eines Versuches kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Fruchtarten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA), * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

Anhang

Tab. A-26: Pt-Gehalt und Residual-P im Boden in Abhängigkeit von der Düngung und der Fruchtart, Gefäßversuche III und IV (sandiger Lehm) 2008.

Düng.	Mais	Bl. Lupine	So-Gerste	So-Raps	Ölrettich	Phacelia	Weidelgras	Buchweizen
Pt (mg kg ⁻¹)								
<i>p</i>	<0,001***	<0,001***	0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	0,001***	<0,001***
KON	496 b	474 a	508 a	512 a	475 a	500 a	503 ab	477 a
TSP	521 cd	539 bc	552 cd	541 b	523 c	539 b	523 bc	524 bc
RESA	534 d	580 d	539 bc	549 b	519 c	534 b	534 c	512 b
SA	506 bc	535 b	524 ab	544 b	514 c	508 a	537 c	516 b
GA	517 cd	566 cd	564 d	557 b	551 d	541 b	548 c	544 c
KCl	475 a	514 b	523 ab	515 a	494 b	496 a	487 a	501 b
MW	508 A	534 B	535 B	536 B	513 A	520 AB	522 B	512 A
Residual-P (mg kg ⁻¹), (zu Versuchsbeginn: 134)								
<i>p</i>	0,029*	<0,001***	0,005**	0,016*	0,036*	0,217 ns	0,015*	0,025*
KON	140 b	118 a	159 b	142 a	124 a	149	133 ab	124 a
TSP	148 b	155 b	167 b	164 ab	125 a	149	169 c	166 b
RESA	147 b	203 c	179 b	174 b	109 a	149	139 ab	156 b
SA	134 ab	179 bc	166 b	179 b	133 ab	138	151 bc	135 ab
GA	130 ab	177 bc	180 b	182 b	159 b	131	150 bc	165 b
KCl	115 a	152 b	135 a	162 ab	141 ab	120	118 a	138 ab
MW	136 A	164 B	164 B	167 B	132 A	139 AB	143 B	147 B

KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngevarianten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); unterschiedliche Großbuchstaben innerhalb einer Zeile und eines Versuches kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Fruchtarten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA); * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

Tab. A-27: Schwermetallgehalte der untersuchten Böden und Aschen sowie Berechnung des Gefährdungspotentials zur Überschreitung der Vorsorgewerte nach BBodSchV.

Asche	Standort Rostock				Standort Trenthorst					
	Pb	Cd	Cu	Ni	Zn	Pb	Cd	Cu	Ni	Zn
	SM-Gehalte im Boden (mg kg ⁻¹) vor Düngung 2007:									
19	0,1		9	4	20	16	0,3	6	9	51
	SM-Gehalte im Boden (mg kg ⁻¹) nach Ernte 2007:									
19	0,1		9	4	18	17	0,3	7	10	52
	Vorsorgewerte nach Anhang 2 der BBodSchV (in mg kg ⁻¹ Trockenmasse, Feinboden, Königswasseraufschluss):									
40	0,4	20	15	60	40	0,4	20	15	60	60
Theoretisch ausbringbare Menge an SM (mg kg ⁻¹ Boden) bis zum Erreichen der Vorsorgewerte (= Vorsorgewert abzüglich SM-Gehalt im Boden nach Ernte):										
~20	0,3	~10	~10	~40	~20	0,1	~10	5	8	8
Theoretisch ausbringbare Menge an SM (kg ha ⁻¹)* bis zum Erreichen der Vorsorgewerte:										
90	1,35	45	45	180	90	0,45	45	23	36	36
	SM-Gehalte in den Aschen (mg kg ⁻¹):									
RESA	11,9	0,45	77,1	274	349	11,9	0,45	77,1	274	349
SA	1,50	0,08	24,5	3,66	80,9	1,50	0,08	24,5	3,66	80,9
GA	2,57	1,27	171	13,1	751	2,57	1,27	171	13,1	751
	Theoretisch ausbringbare Aschemengen (kg ha ⁻¹) bis zum Erreichen der Vorsorgewerte:									
RESA	7.563.025	3.000.000	583.658	164.234	515.759	7.563.025	1.000.000	583.658	82.117	103.152
SA	60.000.000	16.875.000	1836.735	12.295.082	2.224.969	60.000.000	5.625.000	1.836.735	6.147.541	444.994
GA	35.019.455	1.062.992	263.158	3.435.115	239.680	35.019.455	354.331	263.158	1.717.557	47.936
	Aschemengen (kg ha ⁻¹), die in den Feldversuchen Rostock und Trenthorst (auf 1 Jahr bezogen) ausgebracht wurden:									
RESA	325									
SA	425									
GA	250									
	Theoretische Anzahl Jahre (bei oben angeführter jährlicher Ascheausbringungsmenge) bis zum Erreichen der Vorsorgewerte:									
RESA	23.271	9.231	1.796	505	1.587	23.271	3.077	1.796	253	317
SA	141.176	39.706	4.322	28.930	5.235	141.176	13.235	4.322	14.465	1.047
GA	140.078	4.252	1.053	13.740	959	140.078	1.417	1.053	6.870	192
SM = Schwermetall, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche										

* Krumengewicht je ha: 4,5 x 10⁶ kg (bei 30 cm Bodentiefe und Trockenrohdichte von 1,5 g pro cm³)

Anhang

Tab. A-28: P-, K-, Mg- und Ca-Gehalte im Spross in Abhängigkeit von der Düngung und Fruchtart, Gefäßversuche 2007.

Düng.	Mais	Bl. Lupine	So-Gerste	So-Raps	Ölrettich	Phacelia	Weidelgras	Buchweizen
P-Gehalt (mg 100g⁻¹)								
<i>p</i>	<0,001***	0,150 ns	<0,001***	<0,001***	<0,001***	0,006**	<0,001***	<0,001***
KON	164 a	219	223 a	286 a	384 a	390 a	643 b	290 a
TSP	220 c	245	282 c	374 d	479 d	499 c	744 c	382 cd
RESA	205 c	266	270 c	352 c	466 cd	466 bc	707 c	410 d
SA	189 b	226	253 b	332 bc	414 ab	419 ab	631 b	345 b
GA	206 c	231	221 a	325 b	437 bc	465 bc	724 c	369 bc
KCl	168 a	268	230 a	282 a	380 a	416 ab	533 a	308 a
MW	192 A	242 B	247 B	325 C	427 B	442 B	664 C	350 A
K-Gehalt (mg 100g⁻¹)								
<i>p</i>	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	0,005**	<0,001***	<0,001***	0,051 ns
KON	2.060 ab	1.588 ab	2.467 a	2.291 b	3.652 a	3.724 a	5.072 a	2.104
TSP	1.911 a	1.538 a	2.467 a	2.015 a	3.483 a	3.707 a	4.990 a	2.469
RESA	2.224 b	1.783 bc	2.605 a	2.035 a	3.872 a	3.914 a	5.110 a	2.629
SA	2.901 c	1.841 c	2.879 b	2.299 b	3.827 a	4.545 b	5.364 b	2.854
GA	2.263 b	1.656 abc	3.099 c	1.915 a	3.510 a	3.932 a	5.430 b	2.316
KCl	2.945 c	2.154 d	3.050 bc	2.477 b	4.333 b	4.656 b	6.271 c	2.996
MW	2.384 C	1.760 A	2.761 D	2.172 B	3.780 B	4.080 C	5.373 D	2.561 A
Mg-Gehalt (mg 100g⁻¹)								
<i>p</i>	<0,001***	<0,001***	0,004**	0,003**	<0,001***	0,566 ns	0,380 ns	0,052 ns
KON	208 c	210 ab	169 b	231 c	301 cd	300	289	323
TSP	199 bc	212 ab	170 b	210 ab	286 bc	299	282	358
RESA	192 bc	220 b	168 b	207 ab	287 bc	309	285	414
SA	158 a	203 ab	151 a	196 a	265 ab	293	261	413
GA	182 b	198 a	149 a	195 a	256 a	285	284	397
KCl	206 c	250 c	166 b	220 bc	315 d	310	286	353
MW	191 B	216 C	162 A	210 C	285 AB	299 B	281 A	376 C
Ca-Gehalt (mg 100g⁻¹)								
<i>p</i>	0,007**	<0,001***	0,007**	<0,001***	0,021*	0,034*	<0,001***	0,877ns
KON	304 c	1.849 a	345 bc	1.464 b	2.291 bc	2.748 abc	661 b	1.008
TSP	265 ab	1.883 a	375 c	1.342 ab	2.132 abc	2.836 bc	661 b	1.026
RESA	257 ab	1.881 a	303 a	1.254 a	1.986 ab	2.563 ab	579 a	976
SA	248 a	1.739 a	322 ab	1.289 a	2.087 abc	2.608 ab	577 a	947
GA	262 ab	1.861 a	318 ab	1.490 b	1.844 a	2.457 a	626 ab	1.012
KCl	278 bc	2.217 b	336 ab	1.643 c	2.348 c	3.013 c	804 c	1.020
MW	269 A	1.905 D	333 B	1.414 C	2.115 C	2.704 D	651 A	998 B

KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngevarianten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); unterschiedliche Großbuchstaben innerhalb einer Zeile und eines Versuches kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Fruchtarten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA), * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

Anhang

Tab. A-29: P-, K-, Mg- und Ca-Gehalte im Spross in Abhängigkeit von der Düngung und Fruchtart, Gefäßversuche 2008.

Düng.	Mais	Bl. Lupine	So-Gerste	So-Raps	Ölrettich	Phacelia	Weidelgras	Buchweizen
P-Gehalt (mg 100g⁻¹)								
<i>p</i>	<0,001***	0,099 ns	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	0,044*
KON	147 a	200	170 b	253 a	305 a	322 a	330 a	372 a
TSP	164 bc	212	211 c	357 d	436 c	406 c	515 d	474 b
RESA	168 bc	209	207 c	318 c	420 c	438 d	504 cd	402 ab
SA	159 ab	224	175 b	297 b	347 b	429 cd	389 b	422 ab
GA	172 c	212	202 c	324 c	431 c	435 d	496 c	467 b
KCl	150 a	180	154 a	252 a	335 b	358 b	377 b	399 ab
MW	160 A	206 C	186 B	300 D	379 A	398 B	435 C	423 C
K-Gehalt (mg 100g⁻¹)								
<i>p</i>	<0,001***	0,034*	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	0,012*
KON	1.987 c	1.112 a	1.823 cd	1.319 a	2.602 abc	2.493 a	4.430 b	1.988 a
TSP	1.544 a	1.143 a	1.634 a	1.315 a	2.377 a	2.542 a	3.959 a	2.084 a
RESA	1.775 b	1.149 a	1.671 ab	1.473 ab	2.539 ab	2.924 b	4.782 c	2.200 ab
SA	2.387 d	1.443 b	1.907 d	1.628 bc	2.920 c	3.564 c	5.512 e	3.491 c
GA	1.901 bc	1.178 a	1.767 bc	1.498 b	2.768 bc	2.948 b	5.167 d	2.421 ab
KCl	2.676 e	1.205 a	2.058 e	1.788 c	3.274 d	3.382 c	5.417 e	3.056 bc
MW	2.045 D	1.205 A	1.810 C	1.504 B	2.747 B	2.975 C	4.878 D	2.540 A
Mg-Gehalt (mg 100g⁻¹)								
<i>p</i>	<0,001***	0,668 ns	<0,001***	<0,001***	0,032*	0,019*	<0,001***	0,358 ns
KON	238 d	325	130 d	248 b	443 b	365 ab	340 b	631
TSP	212 c	325	119 c	233 b	405 ab	345 a	350 c	609
RESA	196 b	332	113 abc	210 a	434 b	388 b	337 b	560
SA	186 b	320	106 a	211 a	386 a	364 ab	300 a	677
GA	175 a	317	109 ab	211 a	441 b	372 ab	308 a	626
KCl	232 d	331	118 bc	251 b	424 ab	345 a	356 c	738
MW	207 B	325 D	116 A	227 C	422 B	363 A	332 A	640 C
Ca-Gehalt (mg 100g⁻¹)								
<i>p</i>	<0,001***	0,546 ns	0,009**	<0,001***	0,308 ns	0,186 ns	<0,001***	0,001***
KON	388 d	1.914	316 b	2.113 c	2.658	3.492	824 b	1.455 a
TSP	345 c	1.927	285 a	1.809 b	2.568	3.155	792 b	1.482 a
RESA	334 bc	1.861	257 a	1.500 a	2.509	3.218	700 a	1.444 a
SA	314 ab	1.781	266 a	1.471 a	2.443	3.333	691 a	1.569 a
GA	291 a	1.805	267 a	1.444 a	2.764	3.176	713 a	1.432 a
KCl	373 d	1.966	267 a	1.827 b	2.691	3.069	715 a	1.826 b
MW	341 B	1.876 D	277 A	1.694 C	2.605 C	3.240 D	739 A	1.535 B

KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; MW = Mittelwert; unterschiedliche Kleinbuchstaben innerhalb einer Spalte kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Düngewarianten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach einfaktorieller ANOVA); unterschiedliche Großbuchstaben innerhalb einer Zeile und eines Versuches kennzeichnen sign. Unterschiede zwischen den Fruchtarten ($p \leq 0,05$ Duncan-Test nach zweifaktorieller ANOVA), * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns = nicht sign.

Anhang

Tab. A-30: P-Konzentration in der Gesamtpflanze (%) als weiteres Beurteilungskriterium zum P-Aufnahmevermögen der Fruchtarten, Gefäßversuche 2007 und 2008.

P-Konzentration in der Gesamtpflanze (%; Verhältnis P-Aufnahme zu Ertrag je Gefäß)									
	Düng.	Mais	Bl. Lupine	So-Gerste	So-Raps	Ölrettich	Phacelia	Weidelgras	Buchweizen
Gef.vers. 2007 (Ls3)	KON	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,6	0,3
	TSP	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,7	0,4
	RESA	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,7	0,4
	SA	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,3
	GA	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,4
	KCl	0,2	0,3	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,3
	MW	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,6	0,3
Gef.vers. 2008 (Ls3)	KON	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4
	TSP	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5
	RESA	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,4
	SA	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4
	GA	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5
	KCl	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4
	MW	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4

KON = Kontrolle, TSP = Triplesuperphosphat, RESA = Rapsextraktionsschrotasche, SA = Strohasche, GA = Getreideasche, KCl = Kaliumchlorid; MW = Mittelwert