

DISSERTATION

Einfluss von Mykorrhizapilzen und assoziativen Bakterien auf die Bioverfügbarkeit von Nähr- und Schadelementen bei Kulturpflanzen auf Schwermetall belasteten Böden

doctor rerum agriculturalarum (Dr. rer. agr.)

Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät

Dipl. Ing. agr. Celia König

Dekan: Prof. Dr. Kaufmann

Gutachter: 1. Prof. Dr. W. Pestemer
 2. Prof. Dr. R. K. Achazi
 3. Prof. Dr. C. Büttner

Datum der Promotion: 03. November 2006

Abstrakt

In Freiland- und Gefäßversuchen sollten Aufnahme der Schwermetalle (SM) und Wuchsverhalten an dikotylen und monokotylen Pflanzen im Hinblick auf die Wirkung von arbuskulären Mykorrhizapilzen (AM) *Glomus intraradices*, des Bakterienstammes *Pseudomonas fluorescens* (RA56) und als Dualinokulation dieser beiden Mikroorganismen auf Schwermetall belasteten Böden untersucht werden. Zusätzlich lag der Akzent auf der Beeinflussung der Nährstoffaufnahme durch die eingesetzten Rhizosphären - Mikroorganismen.

Als Versuchspflanzen wurden in Freilandversuchen Mais (*Zea mays* L.) und Weidelgras (*Lolium multiflorum* L.) und zusätzlich die Sonnenblume (*Helianthus annuus* L.) in Gefäßversuchen eingesetzt. Die Schwermetallkonzentrationen in den Böden lagen zwischen 0,5 und 56 mg Cd/kg TS, 17 und 650 mg Cu/kg TS und 110 und 1870 mg Zn/kg TS (Boden).

Der Sonnenblumenenertrag konnte im Gefäßversuch auf dem hoch belasteten Boden mit 36 mg Cd/kg TS, 556 mg Cu/kg TS und 1270 mg Zn/kg TS durch den AM-Pilz um 220 % und in der Dualinokulation um 348 % signifikant zur Kontrolle gesteigert werden. Gleichzeitig erhöhte die AM die Cd-Aufnahme um 29 % und die Dualinokulation um 66 %. Trotz der hohen Cd-Konzentrationen wiesen die Pflanzen mit Pilzbehandlungen keine Schäden auf. Vermutet wird eine Schutzwirkung des Pilzes einerseits durch die Aufnahme der SM in die Vakuolen, aber auch durch die Adsorption der SM außerhalb der Mykorrhizapilze an Zellwandkomponenten und Bindung der SM innerhalb der Pilzzellen aufgrund der hohen N- und S-Konzentrationen an Metallothionein ähnliche Peptide.

Der Maisertrag wurde durch AM und Bakterien im Feldversuch singulär und als Dualinokulation in den ersten beiden Versuchsjahren bis zu 47 % gefördert. Im dritten Versuchsjahr kam es zu einer Ausbreitung der Mykorrhiza auf der gesamten Fläche, so dass eine Wachsförderung auch auf den Kontrollparzellen statt fand. Durch die Variabilität der Cd -Gesamtgehalte auf der Versuchsfläche war der Vergleich der Aufnahmeraten zwischen den Varianten nur über den Cd-Transferfaktor möglich. In den oberirdischen Pflanzenteilen des Maises zeichneten deutlich eine Abnahme und in die Wurzeln eine Zunahme des Cd-Transfers in den Versuchsjahren ab. Gleichzeitig wurden die Mykorrhizainfektionen an den Maiswurzeln erhöht. Durch die Anwendung der Mykorrhiza in Kombination mit den Pseudomonaden können im Mais über mehrere Anbaujahre das Cd in das Erntegut reduziert werden mit gleichzeitiger Ertragserhöhung.

Key- Wörter: *Pseudomonas fluorescens*, *Glomus intraradices*, Schwermetallbelastung, Mais, Sonnenblume, Weidelgras

Abstract

Influence of Mycorrhiza fungi and associate bacteria on the availability of nutrients and heavy metal in culture plants on heavy metal soils

The heavy metal uptake and the influence on plant growing in mono- and dicotyle plants is analysed in this study. Field- and pot experiments were done. An emphasis of this study was focused on the effect of the arbuscular Mycorrhiza (AM) fungi *Glomus intraradices*, the bacteria *Pseudomonas fluorescens* (RA56) and the combination of the two microorganisms. In addition, the effect of nutrient uptake through the fungal isolates and the bacteria was evaluated.

Maize (*Zea mays* L.) and Italian rye (*Lolium multiflorum* L.) were used in the field experiments, in addition, sunflowers (*Helianthus annuus* L.) in the pot experiments. The concentrations of heavy metals in the soil were measured between 0.5 and 56 mg Cd/kg dry weight (d.w.), 17 and 650 mg Cu/kg d.w. and 110 and 1870 mg Zn/kg d.w.

The yield of sunflowers was increased significantly up to 220% with AM fungi in the pot experiments. Cd-absorption increased by 29% in the soil with 36 mg Cd/kg d.w., 556 mg Cu/kg d.w. and 1270 mg Zn/kg d.w. in those pot experiments.

With AM and *Pseudomonas* the yield was increased significantly up to 348% compared to the control group, the Cd-absorption increased by 66%.

In spite of high Cd-concentrations, the plants showed no damages. A protective effect of the AM is presumed due to occlusion of the heavy metal into vacuoles. Adsorption of the heavy metal in cell wall components outside the AM and ties to Metallothionein like peptides with high N- and S-fractions inside the AM are further assumptions.

The yield of maize was increased up to 47% due to AM fungi and *Pseudomonas* in singular and dual inoculation in the field experiments during the first and second year. In the third year, the AM fungi were spread over the whole area and no differences of yield were found.

Because of the heterogeneous concentrations of Cd in the field area the comparison of Cd assimilation was allowed only by analysis of the transfer factor in the variants. Within the experimental years, the AM infection rate and the Cd-transfer was increased in the maize roots. On the other hand, the Cd translocation rate was decreased in the shoots.

The reduction of Cd rate in monocotyledonous plants and an increase of yield is estimated for long term application of the AM fungi with *Pseudomonas*.

Keywords: *Pseudomonas fluorescens*, *Glomus intraradices*, heavy metal pollution, maize, sunflower, grass

INHALTSVERZEICHNIS

ABSTRAKT.....	2
ABSTRACT.....	3
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	6
1 EINLEITUNG	8
2 LITERATURÜBERSICHT.....	10
2.1 SCHWERMETALLE IM PFAD „BODEN-PFLANZE“	10
2.2 RIESELFELDER	11
2.3 MYKORRHIZA	12
2.4 CHARAKTERISTIKA VON RHIZOBAKTERIEN.....	13
3 MATERIAL UND METHODEN.....	16
3.1 DER ARBUSKULÄRE MYKORRHIZAPILZ GLOMUS INTRARADICES	16
3.1.1 Färben der Wurzeln.....	16
3.1.2 Mikroskopische Bestimmung des Mykorrhizierungsgrades.....	16
3.1.3 Der Bakterienstamm <i>Pseudomonas fluorescens</i> RA56.....	17
3.2 CHEMISCHE, BIOLOGISCHE UND PHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN	17
3.2.1 Bodenuntersuchungen.....	17
3.2.2 Pflanzenanalysen.....	19
3.2.3 Bodenlösung.....	20
3.3 GEFÄßVERSUCHE MIT MONO- UND DIKOTYLEN PFLANZEN.....	20
3.3.1 Mitscherlich-Gefäßversuche mit Weidelgras und Mais 2001/02.....	21
3.3.2 Gefäßversuche mit Sonnenblumen im Gewächshaus 2001/02	24
3.3.3 Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen in der Vegetationshalle 2003	27
3.4 FELDVERSUCHE AUF DEM GELÄNDE DER BBA BERLIN-DAHLEM	30
3.5 FELDVERSUCHE MIT MAIS UND WEIDELGRAS DER JAHRE 2000 BIS 2002	30
3.5.1 Bodenverhältnisse	30
3.5.2 Klima.....	31
3.5.3 Versuchsanlage.....	33
3.5.4 Feldvorbereitung, Aussaat, Düngung und Pflege.....	34
3.5.5 Beimpfung	34
3.5.6 Ernte und Aufarbeitung.....	35
3.5.7 Transferfaktor.....	35
3.6 STATISTISCHE AUSWERTUNG.....	35
4 ERGEBNISSE	37
4.1 WIRKUNG DER MYKORRHIZA UND ASSOZIATIVEN BAKTERIEN AUF DIE ENTWICKLUNG VON MAIS IM MITSCHERLICH-GEFÄßVERSUCH 2001/02	37
4.1.1 Wachstumsverlauf der Maispflanzen.....	37

4.1.2	<i>Frisch- und Trockenmasseerträge und Ertragsstruktur des Maises</i>	38
4.1.3	<i>Proteingehalt der Maiskörner</i>	40
4.1.4	<i>Mykorrhizierung der Maiswurzeln</i>	41
4.1.5	<i>Korrelationen zwischen Mykorrhizierungsgrad und Trockenmasseerträge</i>	42
4.1.6	<i>Nähr- und Schadelementgehalte im Mais der Böden Malchow und Großbeeren</i>	43
4.1.7	<i>Bodenlösung der Maisgefäße</i>	45
4.2	WIRKUNG DER MYKORRHIZA UND ASSOZIATIVEN BAKTERIEN AUF DIE ENTWICKLUNG DES WEIDELGRASES IM MITSCHERLICH-GEFÄßVERSUCH 2001/02	50
4.2.1	<i>Erträge und Ertragsstruktur des Weidelgrases</i>	50
4.2.2	<i>Mykorrhizierung der Weidelgraswurzeln</i>	52
4.2.3	<i>Nähr- und Schadelemente im Weidelgras der Böden Malchow und Großbeeren</i>	53
4.2.4	<i>Bodenlösung der Weidelgrasgefäße</i>	54
4.3	WIRKUNG DER MYKORRHIZA UND ASSOZIATIVEN BAKTERIEN AUF DIE ENTWICKLUNG DER SONNENBLUMEN IM GEFÄßVERSUCH 2001/02	59
4.3.1	<i>Wachstumsverlauf der Sonnenblumen</i>	59
4.3.2	<i>Trockenmasseerträge der Sonnenblumen</i>	60
4.3.3	<i>Mykorrhizierungsgrad der Sonnenblumenwurzeln</i>	61
4.3.4	<i>Korrelationen zwischen Mykorrhizierungsgrad und Trockenmasseerträge</i>	62
4.3.5	<i>Nähr- und Schadelemente der Sonnenblumen im Gefäßversuch</i>	62
4.4	BEDEUTUNG DER MYKORRHIZA UND ASSOZIATIVEN BAKTERIEN AUF DIE ENTWICKLUNG DER SONNENBLUMEN IM MITSCHERLICH-GEFÄßVERSUCH 2003	64
4.4.1	<i>Wachstumsverlauf der Sonnenblumen</i>	64
4.4.2	<i>Trockenmasseerträge der Sonnenblumen</i>	66
4.4.3	<i>Ertragsstruktur der Sonnenblumen</i>	68
4.4.4	<i>Mykorrhizierungsgrad der Sonnenblumenwurzeln</i>	70
4.4.5	<i>Korrelation zwischen Trockenmasseerträgen und Mykorrhizierungsgrad</i>	70
4.4.6	<i>Dehydrogenaseaktivität der Mikroorganismen im Boden</i>	71
4.4.7	<i>Bodenlösung der Sonnenblumengefäße</i>	73
4.4.8	<i>Korrelationen in der Bodenlösung</i>	78
4.4.9	<i>Nähr- und Schadelemente in der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch</i>	78
4.5	WIRKUNG DER MYKORRHIZA UND ASSOZIATIVEN BAKTERIEN AUF DIE ENTWICKLUNG VON MAIS IM FELDVERSUCH 2000 - 2002	84
4.5.1	<i>Gesamterträge und Ertragsstruktur des Maises im Feldversuch</i>	84
4.5.2	<i>Proteingehalt im Maiskorn im Feldversuch</i>	85
4.5.3	<i>Nähr- und Schadelemente im Mais im Feldversuch</i>	86
4.5.4	<i>Transferfaktor des Maises</i>	86
4.5.5	<i>Mykorrhizierungsgrad der Maiswurzeln im Feldversuch</i>	87
4.5.6	<i>Korrelation zwischen Mykorrhizierungsgrad und Transferfaktor am Mais</i>	88
4.6	WIRKUNG DER MYKORRHIZA UND ASSOZIATIVEN BAKTERIEN AUF DIE ENTWICKLUNG DES WEIDELGRASES IM FELDVERSUCH 2000 – 2002	90
4.6.1	<i>Gesamterträge und Ertragsstruktur des Weidelgrases im Feldversuch</i>	90
4.6.2	<i>Nähr- und Schadelemente im Weidelgras des Feldversuches</i>	92

4.6.3	Mykorrhizierungsgrad der Weidelgraswurzeln	93
4.6.4	Transferfaktor des Weidelgrases	94
5	DISKUSSION	96
5.1	ROLLE UND EINFLUSS AUF DIE WIRKSAMKEIT DER MYKORRHIZA	96
5.2	ROLLE UND EINFLUSS AUF DIE WIRKSAMKEIT DER ASSOZIATIVEN BAKTERIEN	99
5.3	KOMBINATIONSWIRKUNG DER MYKORRHIZA UND DER ASSOZIATIVEN BAKTERIEN	100
5.4	EINFLUSS DER MYKORRHIZA UND DEN BAKTERIEN AUF DEN PROTEINGEHALT IM MAIS.....	101
5.5	EINFLUSS AUF DIE ERTRAGSSTRUKTUR DURCH MYKORRHIZA UND BAKTERIEN DER GEFÄßVERSUCHE MIT MAIS, WEIDELGRAS UND SONNENBLUMEN	101
5.6	EINFLUSS AUF DIE SCHWERMETALLAUFNABME DURCH MYKORRHIZA UND BAKTERIEN DER GEFÄßVERSUCHE MIT MAIS, WEIDELGRAS UND SONNENBLUME	103
5.7	DEHYDROGENASEAKTIVITÄT DER MIKROORGANISMEN IM BODEN IM MITSCHERLICH-GEFÄßVERSUCH MIT SONNENBLUMEN 2003	108
5.8	EINFLUSS AUF DIE ERTRAGSSTRUKTUR DURCH MYKORRHIZA UND BAKTERIEN IM FELDVERSUCH MIT MAIS UND WEIDELGRAS	109
5.9	EINFLUSS DER SCHWERMETALLAUFNABME DURCH MYKORRHIZA UND BAKTERIEN IM FELDVERSUCH MIT MAIS UND WEIDELGRAS	110
5.10	KORRELATION ZWISCHEN TRANSFERFAKTOR UND MYKORRHIZIERUNG IM FELDVERSUCH.....	110
6	ZUSAMMENFASSUNG.....	111
	LITERATURVERZEICHNIS	114
	VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN	131
	VERZEICHNIS DER TABELLEN	133
	ANHANG.....	135
	ERKLÄRUNG.....	187

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Anh.	Anhang
AAS	Atom-Absorptions-Spektrophotometer
Abb.	Abbildung
AM	Arbuskuläre Mykorrhiza
AMB	Arbuskuläre Mykorrhiza und Bakterien
Bakt.	Bakterien

BBA	Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
CAT	CaCl ₂ + DTPA
DL	Doppellactat-Methode
DTPA	Diäthylentriaminpentaessigsäure
FM	Frischmasse
GB	Großbeeren
HE	Haupternte
INF	Iodonitrotetrazoliumformazan
INT	2-p-Iodophenyl-3-p-nitrophenyl- 5-phenyl-tetrazolium-chlorid
KAS	Kalkammonsalpeter
KW	Königswasser (-Extraktion)
KaW	Kalenderwoche
n.n.	nicht nachweisbar
Pressk.	Presskuchen
R ₂	Korrelationskoeffizient
RefB.	Referenzboden
Tab.	Tabelle
TM	Trockenmasse
TKG	Tausendkorngewicht
TS	Trockensubstanz
ZE	Zwischenernte

Chemische Elemente

Al	Aluminium	Fe	Eisen	N	Stickstoff
Ca	Calcium	Hg	Quecksilber	P	Phosphor
Cd	Cadmium	K	Kalium	Pb	Blei
Cu	Kupfer	Mg	Magnesium	Zn	Zink
Cr	Chrom	Mn	Mangan		

1 EINLEITUNG

Durch die Kontamination mit anorganischen Schadstoffen in unserer Umwelt wird die Gesundheit von Menschen, Tieren und Pflanzen beeinträchtigt. Vor allem durch die Akkumulation über die Nahrungskette erhöht sich das toxische Potential verschiedener Schadstoffe für den Menschen. Bodenbelastungen mit Schwermetallen stellen uns vor besondere Probleme, da diese für viele Jahre im Boden verbleiben und zu Schädigungen der dort lebenden Pflanzen und Tiere beitragen (MERIAN et al., 1984; BLIEFERT, 1994). Auch ehemalige Rieselfelder stellen Flächen mit einem komplexen Wirkungsgefüge zwischen Kontaminanten, Böden und den verschiedenen Lebewesen dar. Versuche zur Rekultivierung von Rieselfeldern in Berlin Buch mit Gehölzpflanzen von LÜDERSDORF, et al., 1996 waren mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden, da der Boden anorganisch als auch organisch belastet war.

Der Einsatz konventioneller Technologien wie Auswaschung des Bodens, Stabilisierung der Kontaminanten mittels chemischer Reaktionen oder das Abtragen und Deponieren kontaminierten Erdreichs, beschränkt sich aus Kostengründen oft auf kleine Gebiete. Deshalb ist es wichtig, nach Alternativen zu suchen, um solche kontaminierte Gebiete in die Nutzung mit einzubeziehen (SAXENA et al., 1999).

Zielsetzung der Arbeit ist es, mit dem Einsatz ausgewählter Rhizosphären-Mikroorganismen zur Rekultivierung von Schwermetallbelasteten Böden beizutragen, um Nutzpflanzen ohne toxische Wirkungen auf die Pflanze selbst und den Endverbraucher anbauen zu können. Es sollte in wissenschaftlichen Versuchsreihen die Bedeutung des Mykorrhizapilzes *Glomus intraradices* (N.C. Schenk & G.S. Sm) und des Bakterienstammes *Pseudomonas fluorescens* (MIGULA, 1895) RA56 und die Kombination der beiden Rhizosphären-Mikroorganismen auf Pflanzenwachstum und –entwicklung und das Aufnahmeverhalten von Nähr- und Schadelementen in Schwermetallbelasteten Böden untersucht werden. Der Mykorrhizapilz *Glomus intraradices* eignet sich hervorragend für die Versuche, da er an Schwermetalle adaptiert ist und in Untersuchungen von HILDEBRANDT et al. (1999) resistenzübertragende Wirkung auf die Versuchspflanzen gezeigt hat. Der assoziative Bakterienstamm *Pseudomonas fluorescens* RA56 der Firma Phytobacter GmbH fördert das Pflanzenwachstum auch auf Problemstandorten und ist in der Lage, organische Schadstoffe abzubauen.

Die Untersuchungen beziehen sich auf Gefäß- und Feldversuche, um einerseits unter standardisierten Bedingungen im Gewächshaus und in der Vegetationshalle und unter Freilandbedingungen die Wirkung der Rhizosphären-Mikroorganismen zu testen. Als Versuchspflanzen werden monokotyle Pflanzen wie Mais und Welsches Weidelgras und als dikotyle Pflanze die Sonnenblume eingesetzt. Die Pflanzenauswahl bezieht sich auf die gute Mykorrhizierung der Wurzeln und das Aufnahmeverhalten der Schwermetalle. Mais eignet sich gut als Exkluderpflanze, da er prozentual weniger Schwermetalle aufnimmt, als im Boden vorhanden sind. Die Sonnenblume als Akkumulator nimmt überproportional mehr Schwermetalle auf und als Indikatorpflanze eignet sich das Welsche Weidelgras.

Aus den genannten Aspekten leiten sich folgende Fragestellungen als Schwerpunkt der Untersuchungen ab:

- Beeinflussen die ausgewählten Rhizosphären-Mikroorganismen das Wachstum ihrer Wirtspflanze auf schwermetallbelasteten Böden?
- Wird die Aufnahme von Nährstoffen durch die ausgewählten Rhizosphären-Mikroorganismen beeinflusst?
- Welche Auswirkungen haben die ausgewählten Rhizosphären-Mikroorganismen auf die Schwermetallakkumulation und –translokation?
- Wird das mikrobielle Bodenleben durch die Mykorrhiza oder der Bakterien verändert?
- Gibt es Unterschiede zwischen Pflanzen mit differenziertem Schwermetall-Aufnahmeverhalten bezüglich einer AM- oder Bakterien- bedingten Schwermetalltoleranz?
- Wie wird die Infektionsintensität durch die AM-bildenden Pilzisolat von Schwermetallen beeinflusst?

2 LITERATURÜBERSICHT

2.1 Schwermetalle im Pfad „Boden-Pflanze“

Die Konzentration der Schwermetalle im Boden, die Pflanzenart, die Nährstoffe im Boden, Biomasse, Bodentextur und pH-Wert spielen eine wichtige Rolle bei der Aufnahme von Schwermetallen aus dem Boden (DEV et al., 1997). Schwermetalle wirken in Organismen meist als Enzymgifte oder durch Induktion von oxidativem Stress (SCHÜTZENDÜBEL & POLLE, 2002). Sie können in Metallproteinen den Platz des korrekten Metall-Ions einnehmen und so die Funktion blockieren oder durch eine Bindung an Sulfidgruppen die Struktur von Proteinen verändern. Auch durch die Bindung weiterer funktioneller Gruppen wie Phosphat- und Carboxyl-Gruppen sind deren Inaktivierung und damit verbundene Schädigungen möglich (SCHLEGEL, 1992). Dem Organismus stehen verschiedene Möglichkeiten zur Detoxifikation zur Verfügung (JIANG & ZHAO 2001). GRILL et al. (1987) und KELTJENS & BEUSICHEM (1998) haben nachgewiesen, dass Phytochelatine in der Wurzel als Frühwarnsystem vor Stress durch Schwermetalle fungieren. Auch Metall bindende Proteine wie Metallothioneine reduzieren die Toxizität der Schwermetalle in der Pflanze (RAUSER, 1981; LEBLOVA et al., 1986; CHONGPRADITNUN et al., 1991). Die Adsorption an organische Partikel (ERNST, 1985) führt zu einer Immobilisierung einiger Metalle. In Abb.1 sind die verschiedenen Schutzmaßnahmen der Pflanze nach TOMSETT & THURMAN (1988) schematisch dargestellt. Durch Binden der Schwermetalle an die Zellwand und ein reduzierter Transport über die Zellmembran findet eine verminderte Aufnahme der Schwermetalle in die Zelle statt. Ein aktiver Rücktransport der Metalle und eine Einlagerung in die Vakuolen verhindert eine Konzentrierung der Schwermetalle in der Zelle. Aber auch die Metallkomplexbildung mit beispielsweise Zitrat oder Sulfide schützen die Zelle vor schädigenden Einflüssen der Schwermetalle.

Bei einer Absenkung des pH-Wertes kommt es zu einer Remobilisierung gebundener Metalle und somit zu einer Erhöhung der Pflanzenverfügbarkeit und der Phytotoxizität. Bereits ab pH 6,5 nimmt die unspezifische Adsorption beim Cd zu, d.h. in dieser Bindungsform liegt der größte Teil des Cd in einer durch Erdalkaliionen austauschbaren pflanzenverfügbaren Form vor (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1992). Auch das Element Mn wird schon bei pH-Werten von 6,0-5,5 mobilisiert, gefolgt von Zn, Ni, Cu bei pH 5,5-5,0. Pb wird bis pH 4,5 nicht freigesetzt. Bei einer Bodenversauerung unter pH 4 werden 60 – 90 % des gesamten Cd im Boden mobilisiert (BLAKE & GOULDING, 2002). In Böden mit sehr hohen Schwermetallbelastungen besitzen die Pflanzen keine Mechanismen, um sich vor exzessiven Aufnahmen zu schützen. Hohe Schwermetallgehalte wirken toxisch auf die Pflanze und auf die späteren Konsumenten des Erntegutes. Die Pflanze allein ist also nicht in der Lage, die Schwermetallaufnahme zu regulieren, wenn eine hohe Belastung vorliegt, da in den meisten Fällen ein passiver Transport über den elektro-chemischen Gradienten erfolgt (CLAASSEN & PADEKEN, 1999).

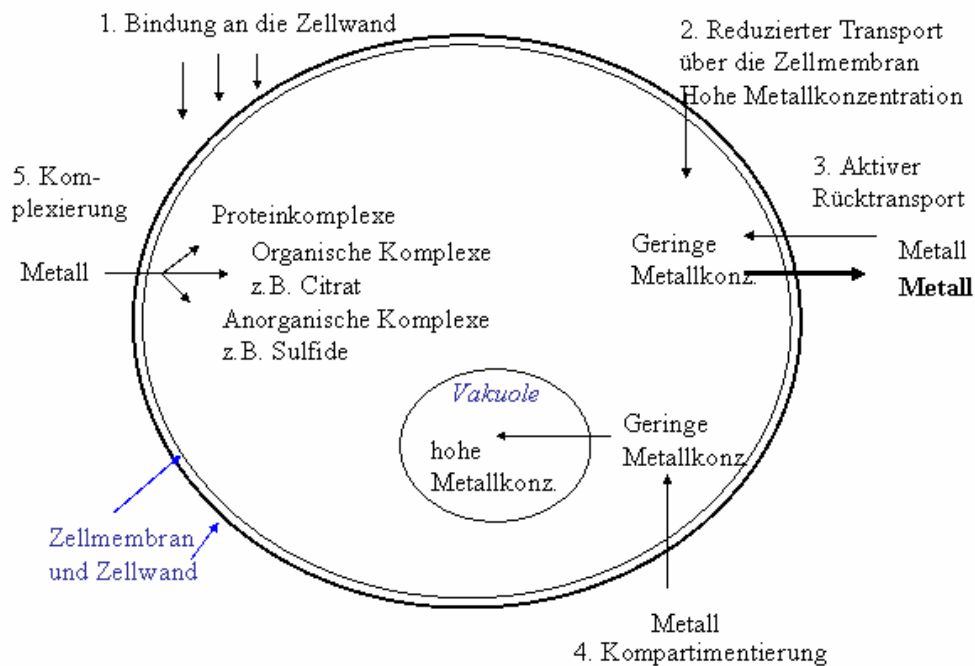


Abb. 1: Mögliche Mechanismen der Schwermetalltoleranz (TOMSETT & THURMAN, 1988)

Verschiedene Möglichkeiten der Immobilisierung von Schwermetallen im Boden sind bekannt. EL-KHERBAWY et al. (1989) bestätigen, dass die Toxizität der Schwermetalle im Boden entweder durch Erhöhung des pH-Wertes oder durch die Inokulation mit Mykorrhizapilzen reduziert werden kann. Auch die Anwendung von Komposten in Kombination mit einer Kalkung zur Anhebung des Boden-pH-Wertes auf 6,5 verminderte die Pflanzenverfügbarkeit von Cd um ca. 30 % (TRAULSEN et al., 1997). Die Zugabe von Bentonit von 10 bzw. 30 t/ha führten bei einigen Pflanzenarten wie Tomate, Buschbohne und Sellerie zu Belastungsminderungen von Zn bis zu 50 % (TRAULSEN et al. 1998).

2.2 Rieselfelder

Nach dem Brandenburger Landesabfallgesetz (LaAbfG § 29.4) stellen die ehemaligen Rieselfeldstandorte um Berlin großflächige Altlastenstandorte dar. Bis ca. 1850 kam es zu einer unkontrollierten Abwasserentsorgung in Vorfluter und Sickergruben. Es wurden Industrieabwässer und Abwässer aus Privathaushalten verrieselt. In den 1980er Jahren wurden noch 34 % des West-Berliner Abwasser über Rieselfelder entsorgt. Erhebliche Veränderungen der Bodeneigenschaften traten auf, wie die Zunahme an N, P, Humus, Schwermetallen und organischen Schadstoffen. Auch kam es zur Destrukturierung an Fe- und Mn-Oxiden durch die anaeroben Verhältnisse und das niedrige Redoxpotential. Dies führte zur Bildung von reduzierten, verlagerungsfähigen Oxiden. Die Belastung durch Schwermetalle hängt ganz entscheidend von der Menge der organischen Substanz ab. Mit zunehmendem Humusgehalt nehmen daher auch die Schwermetalle zu, wenn mit Schwermetall kontaminierten Klär-

schlammten verrieselt wurde. In sandigen Rieselfeldböden kommt als Sorptionsträger nur Humus in Frage (HOFFMANN, 2000). Es konnten enge Korrelationen zwischen dem Gehalt an organischer Substanz und einzelnen Schwermetallen sowie Phosphor ermittelt werden. Die höchsten Belastungen fanden sich im Bereich der ehemaligen Einleitungsbecken, insbesondere in der Umgebung der planierten Dämme. Dort erreichten die Cd-, Cr-, Cu- und Zn-Gehalte im Oberboden Werte, die deutlich über den damals geltenden Richtwerten der Berliner Liste lagen (SCHLENTHER et al., 1995). Heute unterliegen die Grenzwerte der BBodSchG und dem untergesetzlichen Regelwerk des BBodSchV.

2.3 Mykorrhiza

Die Mykorrhiza stellt eine spezifische Assoziation von Pflanzen und nicht pathogenen Pilzen in der Rhizosphäre, den wurzelnahen Bodenschichten, und der Rhizoplane, der direkten Wurzeloberfläche dar. Die Mykorrhiza unterstützt in dieser Lebensgemeinschaft die höhere Pflanze intensiv bei ihrer Wasser- und Nährstoffversorgung mit der Möglichkeit, durch das Myzel die winzigen Hohlräume des Bodens zu durchdringen. Durch die beschriebene Symbiose sind die Pflanzen in der Lage, größere Biomassen durch die verbesserte Nährstoffaufnahme zu produzieren, sind aber auch resistenter gegenüber Schadorganismen durch verdickte Zellwände, die das Eindringen von Erregern erschweren (STRACK et al., 2001). Diese „Pilzwurzel“-Symbiose wird von über 80 % der Landpflanzen ausgebildet. Die pflanzlichen Partner dieser Assoziation reichen von den Gefäßpflanzen bis hin zu den Leber- und Hornmoosen (SMITH & READ, 1997). Bedingt durch die Beteiligung unterschiedlicher Pilze und Wirtspflanzen an der Symbiose werden verschiedene Mykorrhizaformen unterschieden. Sie differieren an der Art der Kontaktstellen zwischen Wurzel und Pilzhypen, die Anordnung der Hyphen, aber auch durch die Art und Weise des Stoffaustausches. Die Ektendomykorrhiza (ekto = äußere, troph = ernährend) bildet einen Hyphenmantel und interzelluläre Hyphen zwischen den Epidermis- und Rindenzellen der Wurzel aus. Waldbäume werden von ihnen mykorrhiziert. Die Ektendomykorrhiza entwickelt zusätzlich intrazelluläre Hyphen und findet sich vor allem in den Gattungen von Fichte (*Picea*) und Kiefer (*Pinus*). Die Endomykorrhiza bildet nur inter- und intrazelluläre Hyphen, deren Wachstum auf die parenchymatischen Rindenzellen beschränkt bleibt. Zu der Endomykorrhiza zählt die arbuskuläre Mykorrhiza, die am meisten verbreitet ist und auch Kulturpflanzen besiedelt. Zu den Nichtwirtspflanzen zählen die Cyperaceen, Chenopodiaceen und die Brassicaceen (SCHWANTES, 1995).

Die arbuskuläre Mykorrhiza gehört in das Reich der Glomeromycota, einem eigenständigen Zweig der Fungi neben den Basidio-, Asco- und Zygomycota (SCHÜSSLER, 2002). Die Pilze besiedeln die Pflanzenwurzeln inter- und intrazellulär und bilden in den Pflanzenzellen bäumchenartige Verzweigungen der Hyphen aus. Diese charakteristischen symbiontischen Strukturen sind die Arbuskel. Sie sind wahrscheinlich die aktivsten Austauschplätze für Nährstoffe (GIANINAZZI-PEARSON, 1996). Die Pflanze gibt dabei Photoassimilate an den Pilzpartner ab und erhält dafür Mineralstoffe, hauptsächlich Phosphat (IQBAL & QURESHI, 1977; BUCHER, 2002). Die Ernährung ist jedoch nicht der einzige wichtige Aspekt dieser Symbiose. Der Mykorrhizapilz *Glomus intraradices* beeinflusst auch die Abwehrreaktion der Pflanze gegen andere pathogene Pilze (BLEE & ANDERSON, 2000; BODKER, KJOLLER et al., 1998). Beispielsweise verbesserte *Glomus mosseae* (T.H. NICOLSON & GERD) in einem Gewächshausversuch die Widerstandsfähigkeit von Erdnusspflanzen gegenüber *Fusarium solani* und *Rhizoctonia solani* (ABDALLAH & ABDEL-FATTHA, 2000). Gleichzeitig greift die Mykorrhiza durch die Produktion von Phytohormonen in die Physiologie und das Wachstum der Pflanze ein (BARKER & TAGU, 2000; LUDWIG-MÜLLER, 2000). Weiterhin können diverse Mykorrhizaspecies wie *Glomus* spp. die Pflanze vor schädlichen Umwelteinflüssen wie Trockenheit schützen. (AUGE, 2001). Die ge-

bildeten Stoffwechselprodukte des Mykorrhizapilzes wirken ebenfalls als Resistenzfaktoren der Pflanze gegenüber Krankheiten. Die arbuskuläre Mykorrhiza *Glomus mosseae* stellt mit den kortikalen Zellen der Pflanzenwurzel eine sorptive Oberfläche für die Schwermetalle bereit, so dass diese in geringeren Konzentrationen in die oberirdischen Pflanzenteile transportiert werden können (DEV et al., 1997).

Neben einer Verbesserung der Nährstoffaufnahme und Schutz vor schädlichen Umwelteinflüssen und Krankheiten werden die Pflanzen durch die Mykorrhizierung durch *Glomus* spp. toleranter gegenüber Schwermetallen wie Cd, Cu und Zn (HALL, 2002; RIVERA-BECERRIL et al., 2002). Von GILDON & TINKER (1983) ist die Verfügbarkeit von Schwermetallen wie Pb, Cd, Hg, Cu, Mn, Zn u. a. durch den Mykorrhizapilz *Gl. mosseae* nachgewiesen worden. In *Glomus*-Isolaten beobachtet man eine Akkumulation der Schwermetalle in den Hyphen, wo sie in gebundener Form vorliegen (KALDORF et al., 1999) oder wie bei Ekto- und Endomykorrhiza an die äußeren Wände u. a. an Chitin, Cellulose, Cellulose-Derivate und Melanin adsorbieren (GALLI et al., 1994). Auf diese Weise wird der pflanzliche Partner durch diese Filterwirkung der Mykorrhizapilze geschützt (KARAGIANNIDIS & NIKOLAOU, 2000). Der Effekt der Ca-, Zn- oder Cd-Sorption konnte von JONER et al. (2000) durch die Kationen-Austauschkapazität der Wurzeln und Hyphen gemessen werden. Die Adsorption ist am höchsten bei einem Metall toleranten *Glomus mosseae* (T. H. Nicolson & Gerd) -Isolat, welches aus einem schwermetallkontaminierten Boden isoliert wurde (GALLI et al., 1994; WEISSENHORN et al., 1995; JONER et al., 2000). MORSELT et al. (1986) identifizierten in Ektomykorrhizapilzen und LANFRANCO et al. (2002) in arbuskulären Mykorrhizapilzen ein Enzym, das Metallionen binden kann, das sog. Metallothionein.

Die Aufnahme in die Hyphen wird beeinflusst durch das Chitin in der Hyphenzellwand, welches eine hohe Metall bindende Kapazität hat (GALLI et al., 1994). Andere indirekte Effekte sind die Änderung des pH-Wertes (LI et al., 1991) und die Erhöhung der Wurzelausscheidungen (LAHEURTE et al., 1990). Diese Mechanismen haben Einfluss auf die Metall-Mobilität und Löslichkeit.

Die Schwermetalle werden außerhalb der Mykorrhizapilze an Zellwandkomponenten (z. B. Chitin, Cellulose, Melanin) adsorbiert, innerhalb der Pilzzellen können die Schwermetalle aufgrund der hohen N- und S-Konzentrationen durch Metallothionein-ähnliche Peptide gebunden werden (GALLI et al., 1994; RICKEN & HÖFNER, 1996). Zn wird dabei nach RICKEN & HÖFNER (1996) sowohl zwischen den Hyphen als auch in den Zellwänden der Hyphen akkumuliert. Eine positive Korrelation zwischen der Konzentration an Schwermetallen und der Biomasse des Pilzmyzels ist nach Ansicht von JONES & HUTCHINSON (1988) ein charakteristisches Merkmal für den Schutz der Wirtspflanzen gegen die Schwermetall-Toxizität.

Untersuchungen von HILDEBRANDT et al., (2001) belegen, dass arbuskuläre Mykorrhizapilze, davon 80 % *Glomus geosporum* (T.H. NICOLSON & GERD) C. WALKER die Fähigkeit besitzen, Salztoleranzen auf Pflanzen zu übertragen, insbesondere auf Pflanzen, die normalerweise nicht mykorrhiziert werden wie z.B. auf Gänsefußgewächse (*Chenopodiaceae*).

2.4 Charakteristika von Rhizobakterien

Als wachstumsfördernde Mikroorganismen bezeichnet man Rhizobakterien, die direkt oder indirekt das Pflanzenwachstum fördern. Zu diesen Bakterien gehören unter anderem Vertreter der Genera *Arthrobacter*, *Alcaligenes*, *Serratia*, *Rhizobium*, *Agrobacterium* und *Bacillus*. Obwohl einige Pseudomonaden, wie *P. syringe*, als Pflanzenpathogene bekannt sind, wurden andere Mitglieder der fluoreszierenden Pseudomonaden wie z. B. *P. fluorescens* und *P. putida* (TREVISAN, 1889), als Rhizobakterien identifiziert, die das Pflanzenwachstum

fördern (O'SULLIVAN & O'GARA, 1991). *P. fluorescens* und *P. putida* gehören zu den fluoreszierenden Pseudomonaden. Diese unterscheiden sich von den anderen Pseudomonaden durch die Fähigkeit, ein wasserlösliches gelb-grün-fluoreszierendes Pigment zu bilden. Sie sind gram-negative, chemoheterotrop bewegliche Stäbchen, die polare Geißeln besitzen (PALLERONI et al., 1973). Fluoreszierende Pseudomonaden haben einfache Nährstoffbedürfnisse und kommen in der Natur häufig vor. Sie haben Bedeutung bei der biologischen Pflanzenkontrolle und Pflanzenpathogenese.

Die erfolgreiche Kolonisierung von inokulierten Mikroorganismen erfordert nicht nur eine gute Adaption an die Rhizosphäre, sondern auch ein großes Durchsetzungsvermögen gegenüber vorhandenen Mikroorganismen im Wurzelraum. Charakteristisch für die Etablierung und das Überleben der inokulierten Mikroorganismen ist eine hohe Wachstumsrate in Relation zu den bodenbürtigen Mikroorganismen, Resistenzen gegenüber Umwelteinflüssen und eine Überdauerung bei Nahrungsmangel. Weiterhin stellen die Zellbeweglichkeit, die Produktion von Substanzen, die eine Anhaftung an die Pflanzenwurzeln ermöglicht und die Bildung von Antibiotika wichtige Grundlagen für die Etablierung im Wurzelraum dar (MAZZOLA et al., 1992). Für die Vermehrung ist die C-Quelle entscheidend, für das Überleben der Bakterienzellen die Osmotoleranz notwendig (TOYOTA & IKEDA, 1997). Darüber hinaus spielt das Inokulum und die Art der Inokulation eine wichtige Rolle. Organisches Substrat zeigt teilweise ähnlich anregende Effekte auf die Mikroorganismen wie Pflanzenwurzeln (BASHAN, 1986). Um das Wachstum und die physiologischen Aktivitäten der Bakterien sicherzustellen, dienen als Nahrungsquelle organische Komponenten wie Wurzelexudate, Mucigel und abgestorbene Wurzelzellen (NEWMAN, 1985). Untersuchungen in vitro von DEUBEL & GRANSEE (1995) haben ergeben, dass bestimmte Zucker in Wurzelexudaten die P-Mobilisation durch assoziierte Bakterien erhöhen, aber die Entwicklung der Bakterien nicht beeinflussen. Der Bakterienstamm *Pseudomonas fluorescens* PsIA12 kann durch Glucose signifikant mehr Tricalciumphosphat mobilisieren als durch andere Zucker. Durch diese C-Quelle produziert PsIA12 relativ große Säuremengen, beispielsweise Bernsteinsäure, Milchsäure, Äpfelsäure, Zitronensäure, Ketogluconsäure und Galacturonsäure, die bei der Phosphat-Mobilisation eine große Rolle spielen. Durch Untersuchungen von BENIZRI et al. (1998) konnte nachgewiesen werden, dass die von Maiswurzeln gebildete Indol-3-yllessigsäure die Zellzahlen von *Pseudomonas fluorescens* M.3.1. erhöht hatte. Indol-3-yllessigsäure werden auch als Auxinkonjugate bezeichnet. Sie spielen bei der Regulation des Auxinstoffwechsels eine wichtige Rolle.

Voraussetzung für die Förderung des Pflanzenwachstums durch Mikroorganismen ist der geschlossene Kontakt zwischen Pflanze und phytoeffektiven Organismen. Durch Freiland- und Gefäßversuche konnte gezeigt werden, dass Rhizobien- und *Pseudomonas*-Stämme, die sich in der Rhizosphäre etabliert haben, in der Lage sind, Pflanzenwachstum verschiedener Gattungen von Leguminosen, Gramineen, Kruziferen und Chenopodiaceen zu fördern. Während des Pflanzenwachstums wandern die Bakterien kaum von der Rhizosphäre in den wurzelfreien Raum (WIEHE & HÖFLICH, 1995).

Rhizosphären-Mikroorganismen leisten mit Hilfe wachstumsfördernder Wirkstoffe (Phytohormone, Vitamine u. a.) einen wesentlichen Beitrag zur Pflanzenentwicklung. Die Auxinbildung scheint eine wichtige Rolle zu spielen, da alle untersuchten Bakterienstämme dieses Phytohormon bildeten (JAHN et al., 1995; HÖFLICH et al., 1994). Durch Nährstoffaufschluss und -bereitstellung von N, P und K aus dem Boden kam es zur Förderung der Erträge. Darüber hinaus lieferten sie den Pflanzen Schutz vor bodenbürtigen Schaderregern, Abbau toxischer organischer Schadstoffe, sowie Bildung und Stabilisierung von Bodenstrukturen im Wurzelbereich (AWAD et al., 1994; ABDI BAGHI & MALEKZADEH, 1998). Einige fluoreszierende Pseudomonaden, zu denen auch verschiedene *P. fluorescens*- und *P. putida*-Stämme gehören, haben unter anderem die Fähigkeit, Siderophore zu

bilden. Siderophore sind Stoffe, die Eisen sehr effizient komplexieren. Die fluoreszierenden Pseudomonaden im Boden produzieren normalerweise gelb-grün-fluoreszierende, wasserlösliche Siderophore (JEFFREY et al., 1993; JURKEVITCH et al., 1993; KUMAR & DUBE, 1993; GAMALERO et al., 2003). Der Grund für die Produktion dieser Siderophore ist die begrenzte Verfügbarkeit von Eisen in der Rhizosphäre (MARSCHNER et al., 1997). Da jedoch fast alle lebenden Organismen Eisen für das Wachstum benötigen, können die Mikroorganismen der Rhizosphäre nur überleben, wenn sie in der Lage sind, Eisen in ausreichenden Mengen zu gewinnen. Unter Eisen-Mangel-Bedingungen sezernieren die Pseudomonaden die Siderophore in den Boden. Aufgrund der sehr hohen Affinität zu Fe^{3+} -Ionen bilden sich sehr starke Fe^{3+} -Siderophor-Komplexe. Diese Komplexe sind für andere Mikroorganismen nicht verfügbar (HÖFLICH, WIEHE et al., 1994). Dadurch erhalten die fluoreszierenden Pseudomonaden einen Wachstumsvorteil gegenüber anderen, auch schädlichen Bakterien und Pilzen (LOPER & BUYER, 1991). Die Metalle Al, Cr, Cu, Mn und Zn können über die Siderophore von *Pseudomonas* spp. gebunden werden (JEFFREY et al., 1993; HÖFLICH & METZ, 1997). Siderophore werden nicht nur von den speziellen Bakterien, sondern auch von Pflanzen aufgenommen (HÖFLICH & METZ, 1997). Organische Säuren sind Bestandteil der Ausscheidungen vieler Rhizosphären-Mikroorganismen. *Pseudomonas fluorescens*, die durch die Firma Phytobacter GmbH von einem Weizenboden isoliert wurden, produzieren Zitronen-, Milch-, Äpfel- und Bernsteinsäure (ABDI BAGHI, 1993). Diese organischen Säuren bilden mit Schwermetallen pflanzenverfügbare Komplexe. So können *Pseudomonas syringe* Cd, Ni und Cu mobilisieren und durch Chelatbildung binden (CABRAL, 1992; HÖFLICH & METZ, 1997). In der Rhizosphäre wird bei der Protonenausscheidung durch Mikroorganismen zudem der pH-Wert abgesenkt. Infolgedessen werden Elemente wie Cu^{2+} , Zn^{2+} und Cd^{2+} in eine von Pflanzenwurzeln aufnehmbare Form überführt (WELCH et al., 1993).

Die erhöhte Schwermetallaufnahme durch Rhizosphären-Mikroorganismen kann auf eine durch mikrobielle Phytohormone (Auxin, Gibberlin, Cytokinin) stimulierte Wurzelentwicklung zurückzuführen sein (HÖFLICH & METZ, 1997). Andere Versuche belegen, dass eine Kombination von Wachstumsstimulierung mit reduzierter Schwermetallaufnahme bei geringer Schwermetallbelastung mit *Azospirillum* spp., *Agrobacterium* spp., *Arthrobacter* spp. und *Flavobacterium* spp. möglich ist (HÖFLICH & METZ, 1997).

Über eine denkbare Anpassung phytoeffektiver Rhizosphärenmikroorganismen an hohe Konzentrationen von Schwermetallverbindungen und organischen Schadstoffen im Boden ist noch vergleichsweise wenig bekannt (LEYVAL & BERTHELIN, 1993). Es gibt jedoch deutliche Hinweise darauf, dass die Nitrogenaseaktivität von Mikroorganismen und speziell Rhizobien-Bakterien empfindlich gegenüber Bodenschadstoffen reagieren (GILLER et al., 1993; HÖFLICH & METZ, 1997).

3 MATERIAL UND METHODEN

Die Untersuchungen zur Bearbeitung der Fragenkomplexe wurden in einer Kombination aus Felderhebungen und Gefäßversuchen mit dikotylen und monokotylen Pflanzen durchgeführt. Dabei kamen Böden mit unterschiedlich hohen Konzentrationen an Schwermetallen zum Einsatz.

3.1 Der arbuskuläre Mykorrhizapilz *Glomus intraradices*

Für die Versuche kamen arbuskuläre Mykorrhizapilze der Gattung *Glomus intraradices* zum Einsatz, die uns freundlicherweise von Prof. Bothe, Universität Köln, Botanisches Institut, zur Verfügung gestellt wurden. Diese Mykorrhizapilze sind aus schwermetallbelasteten Böden isoliert worden. Die weitere Vermehrung der Pilzisolatete erfolgte ausschließlich an *Tagetes* spp. im Gewächshaus nach einem modifizierten Verfahren von HILDEBRANDT (2000) mit einer Vegetationsdauer von 8 – 10 Wochen. Die zeitaufwendige Vermehrung an lebenden Wirtspflanzen war wegen der obligaten Biotrophie der Pilzpartner notwendig, da bisher noch keine Methode zur in vitro- Vermehrung entwickelt wurde. Als Trägermaterial fungierte gebrochener Blähton der Korngröße 2 – 4 mm und die Düngung erfolgte einmal wöchentlich mit einer Hoagland-Lösung (HOAGLAND & ARNON, 1939), wobei Kaliumphosphat nur im vierwöchentlichen Abstand gegeben wurde.

3.1.1 Färben der Wurzeln

Für die mikroskopische Bestimmung des Mykorrhizierungsgrades der Wurzeln der Versuchspflanzen wurden repräsentative Wurzelstücke der Versuchspflanzen entnommen.

Nach dem Reinigen der Wurzeln wurden die Wurzelstücke in 5 ml Fixierlösung überführt und bis zur Färbung im Kühlraum dunkel gelagert.

Zusammensetzung der Fixierlösung:

100 ml	H ₂ O
100 ml	Ethanol 70 %
5 ml	Eisessig
13 ml	Formalin

Zur eindeutigen Identifizierung der Mykorrhizastrukturen im mikroskopischen Bild erfolgte die Färbung der fixierten Wurzelsegmente mit Tinte nach VIERHEILIG et al. (1998). Die fixierten Wurzelstücke wurden 10 - 20 min. in 10 %iger KOH gekocht, je nach Dicke der Wurzelabschnitte und danach mehrmals mit Leitungswasser gespült. Anschließend erfolgte die fünfminütige Färbung in einer kochenden Lösung, bestehend aus 5-%igem Eisessig und 5-%iger Tinte (Pelikan, Heidelberg). Für die Lagerung wurden die Wurzelstücke mit Leitungswasser gespült und in angesäuertem Leitungswasser bis zur Bonitierung gelagert.

3.1.2 Mikroskopische Bestimmung des Mykorrhizierungsgrades

Die Bonitur der gefärbten pilzlichen Strukturen erfolgte in Anlehnung an SCHMITZ et al. (1991). Hierzu wurden die Wurzelsegmente auf den Objektträger gelegt und mit dem Mikroskop (Zeiss PM6) in 125-facher Vergrößerung betrachtet. Jeder innerhalb eines Bildausschnittes sichtbare Wurzelabschnitt wurde auf Hyphen, Vesikel und Arbuskel überprüft. Dabei gilt ein Wurzelabschnitt als mykorrhiziert, wenn mindestens eine der genannten

Mykorrhizastrukturen auftritt. Um statistisch gesicherte Ergebnisse zu erzielen, mussten mindestens 300 Wurzel-ausschnitte pro Probe untersucht werden. Der Gesamtmykorrhizierungsgrad ergab sich aus dem prozentualen Verhältnis der als mykorrhiziert eingestuften Wurzelsegmente zur Gesamtmenge der betrachteten Wurzel-ausschnitte.

3.1.3 Der Bakterienstamm *Pseudomonas fluorescens* RA56

Bei dem von der Firma Phytobacter GmbH, Max-Dohrn-Str. 8-10, 10589 Berlin, zur Verfügung gestellten assoziative Bakterienstamm *Pseudomonas fluorescens* RA56 handelt es sich um streng aerob gram-negative Stäbchenbakterien, die im Wurzelraum der Nutzpflanze von den Ausscheidungen der Wurzel leben. Diese Bodenbakterien wurden aus den Rhizosphären von Sommerweizen isoliert. *Pseudomonas fluorescens* RA56 ist in der Lage, eine große Zahl verschiedener organischer Verbindungen zu oxidieren.

3.2 Chemische, biologische und physikalische Untersuchungen

Die chemischen und physikalischen Untersuchungen wurden in der BBA Berlin-Dahlem durchgeführt. Die Bestimmung der Dehydrogenaseaktivität des Bodens, des Proteingehaltes im Mais und des Mykorrhizierungsgrades erfolgte an der Freien Universität Berlin, am Institut für Ökotoxikologie und Biochemie.

3.2.1 Bodenuntersuchungen

Um die Böden miteinander vergleichen zu können, wurden spezielle Untersuchungen durchgeführt. Wichtig war die Bestimmung des pH-Wertes, der organische Kohlenstoff, die Korngrößenbestimmung für die Einordnung der Bodenart, sowie die Nähr- und Schadstoffanalytik. Im Mitscherlichgefäßversuch mit Sonnenblumen kam die Dehydrogenaseaktivitätsmessung noch hinzu.

pH-Wert

Elektrometrische Messung der H^+ -Ionen Konzentration wurden am pH-Meter, E 512 der Firma Metrohm in einer Suspension von 0,01 M $CaCl_2$ -Lösung vorgenommen. Das Boden-Lösungsverhältnis betrug 1:2,5.

Corg. (Organischer Kohlenstoff)

Die Bestimmung des organischen Kohlenstoffs wurde nach einer Vorbehandlung mit H_2O_2 erfolgte nach Veraschung im Muffelofen bei $550^\circ C$.

Korngrößenfraktionierung

Die Korngrößenfraktionierung der Bodenteilchen Sand, Schluff und Ton wurde nach Dispergierung mit 0,4 N Natriumpyrophosphatlösung mittels Schlämmanalyse nach Köhn (Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung nach Vorbehandlung mit Natrium-pyrophosphat DIN 19683) durchgeführt.

Bestimmung der Nährstoffe und Schwermetalle

Die Gesamtgehalte verschiedener Schwermetalle und Nährelemente wurden mit Königswasser am Rückfluss aufgeschlossen.

Für den Königswasseraufschluss wurden 2 g lufttrockener Boden in 200 ml Quarzgefäße eingewogen und mit Aqua bidest. angefeuchtet. Nach Zugabe von 10 ml Königswasser (3:1 HCl: HNO₃) standen die Gefäße über Nacht unter dem Abzug. Anschließend erfolgte das Kochen am Rückflusskühler für 2 h bei 140° C. Danach konnte die Probe am Rückflusskühler mit Aqua bidest. heruntergespült und in 50 ml Kolben überführt werden. Die Proben wurden bis zur Messmarke aufgefüllt und über Weißbandfilter filtriert.

Die Bestimmung der Nähr- und Schadelemente, die potentiell pflanzenverfügbar sind, konnten mit der CAT-Methode (CaCl₂ + DTPA) aufgeschlossen werden.

Die Vorratslösung besteht aus:	14,70 g	CaCl ₂ -H ₂ O
	7,88 g	DTPA
	800 ml	ca. 80° C heißes Wasser

Diese Lösung wurde auf der Heizplatte in einem 1 l Becherglas mit dem Magnetrührer gelöst.

Aus dieser Vorratslösung konnte mit einer Verdünnung von 1:10 die Gebrauchslösung hergestellt werden. Für die Bodenextraktion wurden 25 g lufttrockener Boden in einer 500 ml Schüttelflasche eingewogen und mit 200 ml Gebrauchslösung überspült. Nach 1 h Schütteln mit einem Überkopf-Schüttler (Firma Gerhardt) folgte das Filtern mit einem Falten-Filter, wobei die ersten 10 - 20 ml verworfen wurden.

Anschließend erfolgte die Messung der einzelnen Elemente am ICP – OES (Iris Intrepid der Firma Thermo Elemental). Das Prinzip des ICP – OES beruht auf der Atomemissions-spektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ein in einem elektromagnetischen Hochfrequenzfeld ionisiertes Gas wie Argon). Die Verwendung eines Polychromators ermöglicht eine Simultanmessung der Elemente. Das Lichtspektrum wird hierbei an einem Spiegel spektral zerlegt und räumlich differenziert. Verschiedene photosensitive Detektoren (Photomultiplier) empfangen hierbei „simultan“ die elementspezifischen Wellenlängen.

Dehydrogenasebestimmung

Die Bestimmung der Dehydrogenaseaktivität erfolgte nach der INT-Methode nach TREVORS et al. (1982); TREVORS (1984). Für die Aktivitätsbestimmung wurde eine Mischprobe feuchten Bodens (1g) dem Mitscherlichgefäß entnommen und in ein steriles Reagenzglas überführt. Von jeder Mischprobe kamen drei Wiederholungen zum Einsatz mit jeweils einer Blindprobe. Zu den Proben wurden 0,2 ml INT (Sigma, I8377), hergestellt aus 0,12 mg INT in 30 ml steriles Aqua dest. und zu den Kontrollansätzen 0,25 ml steriles Aqua dest. zugegeben. Die Proben wurden mit sterilem Aqua dest. bis zur 100 %igen Wassersättigung aufgefüllt. Die Inkubation der verschlossenen Proben erfolgte im Dunkeln bei 20° C bis 24 h. Anschließend wurden 10 ml Methanol hinzu pipettiert, 1 min. im Vortexer geschüttelt und der Boden über Faltenfilter abfiltriert. Die Extinktion konnte bei 485 nm gegen Methanol im Spektrophotometer, Shimadzu UV 160 gemessen werden. Um die Aktivitäten berechnen zu können, ist die Erstellung einer Eichkurve notwendig. Es wurden 15 mg INF (Sigma, I7375) in 250 ml Methanol in einem Messkolben mit Schliff gelöst und eine Verdünnungsreihe von 0 - 10 ml INF in 1 ml-Schritten hergestellt. Einzelne Eichpunkte entsprechen folgenden Konzentrationen: 0-3-6-12-18-24-30-36-42-48-54-60 µg/ml

Die Eichkurve ist zwischen 0 und 60 µg/ml linear.

Berechnung der Ergebnisse:

Die Extinktion des Blindwertes wird von der Extinktion des Vollansatzes abgezogen. Aus der Eichkurve werden die µg INF/ml abgelesen.

$$\text{Dehydrogenaseaktivität (µg INF/g TS)} = \text{µg INF/ ml} \times 10 / \text{TS}$$

TS = Trockensubstanz von 1 g naturfeuchten Boden

3.2.2 Pflanzenanalysen

Proteinbestimmung

Die Bestimmung des Proteingehaltes in den Maiskörnern erfolgte nach BRADFORD (1976). 100 µl der Proteinlösung wurden in ein Reagenzglaschen überführt und 5 ml Bradford-Reagenz hinzu pipettiert. Das Gemisch wurde kurz in einem Vortex-Mixer geschüttelt und nach 5 min Reaktionszeit die Extinktion bei $\lambda = 595 \text{ nm}$ im Spektrophotometer, Shimadzu UV 160 gemessen. Der Probenleerwert enthielt 100 µl 10 mM Tris-HCL Puffer und 5 ml Bradford-Reagenz. Anhand einer Eichkurve mit Rinderserumalbumin (BSA, Sigma Nr. B-4287) wurde die Proteinkonzentration bestimmt.

Bradford-Reagenz:

0,1 g Coomassie Brilliant Blue G 250 (Merck Nr. 15444) wurden in 50 ml 96 %igem Ethanol gelöst, dann mit 100 ml 85 %iger H_2PO_4 versetzt und mit Aqua dest. auf 1 l aufgefüllt.

Bestimmung der Nährstoffe und Schwermetalle

Die Nähr- und Schadelemente wurden mit dem ICP – OES und dem AAS bestimmt.

ICP – OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer)

Die getrocknete, fein vermahlene pflanzliche Substanz (Einwaage: 0,3 g) wurde mit 5 ml konzentrierter Salpetersäure versetzt. Der Druckaufschluss erfolgte im Aufschlussautoklaven für Mineralstoffanalytik (Fa. Loftfields, 6 AM) für 10 h bei 180 °C. Mit einem Endvolumen von 25 ml, nach Auffüllen mit H_2O bidest. wurden die Elemente am ICP – OES (Iris Intrepid der Firma Thermo Elemental) gemessen.

AAS (Atom-Absorptions-Spektralphotometer)

Aufgrund niedriger Nachweisgrenzen des Cd im Sonnenblumenöl wurde dieses Element am Graphitrohr - AAS SIMAA 6000 der Firma Perkin Elmer gemessen. Das Prinzip der Atom-Adsorptions-Spektralphotometrie beruht auf der Atomisierung der Inhaltstoffe durch eine Flamme. Die Probelösung wird mittels einer Düse fein zerstäubt und mit Pressluft und Acetylen zu einem brennbaren Gemisch verwirbelt. Die verdampfte Probe wird von einer Hohlkathodenlampe durchstrahlt, die das zu bestimmende Element enthält und damit ein für das Element charakteristisches Linienspektrum erzeugt. Die verdampften Atome absorbieren die Strahlung und schwächen sie dadurch ab. Die Strahlenschwächung ist ein Maß für die Konzentration des Elements. Durch Kalibrierung des Gerätes mit Lösungen bekannter Metallkonzentrationen kann die Konzentration des Elementes in den Proben

ermittelt werden (KRETSCHMAR, 1991). Es wurden jeweils drei Messungen mit der gleichen Probe durchgeführt und den Mittelwert daraus bestimmt.

3.2.3 Bodenlösung

Die Bodenlösung aus den Mitscherlich-Gefäßen wurde filtriert, mit Salpetersäure angesäuert und sofort am ICP – OES (OPTIMA 3300 DV plus System, Fa. PERKIN ELMER) gemessen. Die Bestimmung des pH-Wertes erfolgte sofort nach dem Filtrieren mit einer pH-Elektrode, E 512 der Firma Metrohm.

3.3 Gefäßversuche mit mono- und dikotylen Pflanzen

Gefäßversuche ermöglichen gegenüber Feldversuchen eine bessere Standardisierung der von der Versuchsanstellung nicht variierbaren Einflussfaktoren auf das pflanzliche Wachstum. Zur Bearbeitung der Versuchsfragen wurden in den Jahren 2001 bis 2003 umfangreiche Gefäßversuche mit mono- und dikotylen Kulturpflanzen (Tab. 1) auf unterschiedlich stark belasteten Böden (Tab. 2) im Gewächshaus und in der Vegetationshalle der Biologischen Bundesanstalt Berlin-Dahlem, Institut für Ökotoxikologie und Ökochemie im Pflanzenschutz, angelegt. Verwendet wurden Mitscherlich-Gefäße mit 6 l Inhalt (20 cm Durchmesser, 20 cm Höhe) und kleine Gefäße mit einem Fassungsvermögen von 1 l Inhalt. Geprüft werden sollten die Varianten mit Zugabe des arbuskulären Mykorrhizapilzes *Glomus intraradices* (AM), des Bakterienstammes *Pseudomonas fluorescens* RA56 (Bakterien) und die Kombination der beiden Mikroorganismen (AMB), verglichen mit den unbehandelten Kontrollvarianten.

Tab. 1: Gefäßversuche mit mono- und dikotylen Pflanzen im Gefäßversuch 2001-2003

Jahr	Mitscherlich-Gefäßversuch mit monokotylen Pflanzen	Gefäßversuch mit dikotylen Pflanzen	Mitscherlich-Gefäßversuch mit dikotylen Pflanzen
2001	Mais Weidelgras	Sonnenblume	--
2002	Mais Weidelgras	Sonnenblume	--
2003	--	--	Sonnenblume

Tab. 2: Bezeichnung der verwendeten Böden im Gefäßversuch

Pflanze	Verwendete Böden (eigene Einteilung)		
	Gesamtgehalt (KW) in mg/kg TS		
	Referenzboden = nahezu unbelasteter Boden: Cd: 0,5 - 1 Cu: 17 - 31	mäßig belasteter Boden: Cd: 1,8 - 4,1 Cu: 107 - 187	hoch belasteter Boden: Cd: 17 - 56 Cu: 556 - 650
Mais und Weidelgras 2001/02 (Kap. 3.2.2)	--	mäßig belasteter Boden Malchow	hoch belasteter Boden Großbeeren
Sonnenblume 2001/02 (Kap. 3.3.2)	Referenzboden BBA	--	hoch belasteter Boden BBA
Sonnenblume 2003 (Kap. 3.4.2)	Referenzboden BBA	mäßig belasteter Boden BBA	hoch belasteter Boden Großbeeren

3.3.1 Mitscherlich-Gefäßversuche mit Weidelgras und Mais 2001/02

3.3.1.1 Versuchsansatz und Versuchspflanzen

Die Mitscherlich-Gefäßversuche in den Jahren 2001 und 2002 wurden jeweils vier Gefäße mit den genannten Varianten in der Vegetationshalle und im Drahthaus durchgeführt. Die Gefäße standen auf Wagen, die bei trockener Witterung in das Drahthaus geschoben werden konnten. Die Pflanzen waren so den natürlichen Witterungseinflüssen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit ausgesetzt (Kap. 3.5.1.2).

Als Versuchspflanzen sind zwei monokytale Pflanzen eingesetzt worden, die gut mykorrhizieren. Als Exkluderpflanze diente der Mais (*Zea mays* L.), Sorte Prinval. Das Welsche Weidelgras *Lolium multiflorum italicum* L, Sorte Liberta kam als Indikatorpflanze zum Einsatz. Das Weidelgras bewährte sich auch als schnellwüchsige Pflanze mit mehreren Schnittmöglichkeiten und erlaubte deshalb die Analyse des Verteilungsmusters der Nähr- und Schadelemente in kurzen Zeiträumen.

Für die Untersuchungen mit dem Welschen Weidelgras wurden pro Gefäß 1 g Grassamen ausgesät. Für die Mitscherlichgefäße der Maispflanzen wurden drei Maiskörner ausgesät und nach Auflauf auf eine Pflanze vereinzelt.

Die Beimpfung mit 5 Gew.-% Mykorrhizapilz (an Blähton gebunden) erfolgte vor der Einsaat. Bei 5 kg Versuchsboden wurden 250 g mit Mykorrhiza infizierter Blähton eingewogen. Die Kontroll- und Bakterienvariante erhielten die gleiche Menge Blähton ohne Mykorrhizapilz. Die Töpfe wurden zu $\frac{3}{4}$ mit dem Versuchsboden befüllt, das Pilzsubstrat dazugegeben und mit dem restlichen Versuchsboden (Kap. 3.4.1.3) bedeckt, so dass die keimenden Pflanzen sofort Wurzelkontakt mit dem Pilz bekamen (Abb. 2). Die Applikation der Bakteriensuspension erfolgte als Saatgutbehandlung. Die Konzentration der Suspension bei Mais und Weidelgras lag bei 5×10^8 Zellen in 250 ml Wasser. Nach sechs Wochen erfolgte eine Nachimpfung derselben Zellkonzentration. Bei

der Dualbeimpfung (Mykorrhiza und Bakterien) wurden die beiden Mikroorganismen in den gleichen Mengenverhältnissen dazugegeben.

3.3.1.2 Bodenlösung

Vor der Einsaat wurde in jedes Gefäß eine Saugkerze eingesetzt und die vier Wiederholungen durch Schläuche mit einer Flasche verbunden. Zum Einsatz kamen SKA 100 FF Röhrentiegel (Aluminiumoxid-Saugkerzen) der Firma Morgan Advanced Ceramics Sales B.V. (vormals Haldenwanger). Die Probenahme der Bodenlösungen erfolgte in Anlehnung an entsprechende Regelungen zur Gewinnung von Bodenwasserproben mit Hilfe der Saugkerzenmethode des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. Um die pflanzenverfügbare Lösung (ca. 250 ml) zu erfassen, wurde eine Saugspannung bis 0,95 bar angelegt. Die Unterdruckanlage wurde zentral mit einer Vakuumpumpe mit 100 l/min Saugvermögen betrieben. Die Untersuchung der Bodenlösungen bezog sich auf den pH-Wert, die Nährstoff- und Schwermetallanalytik.

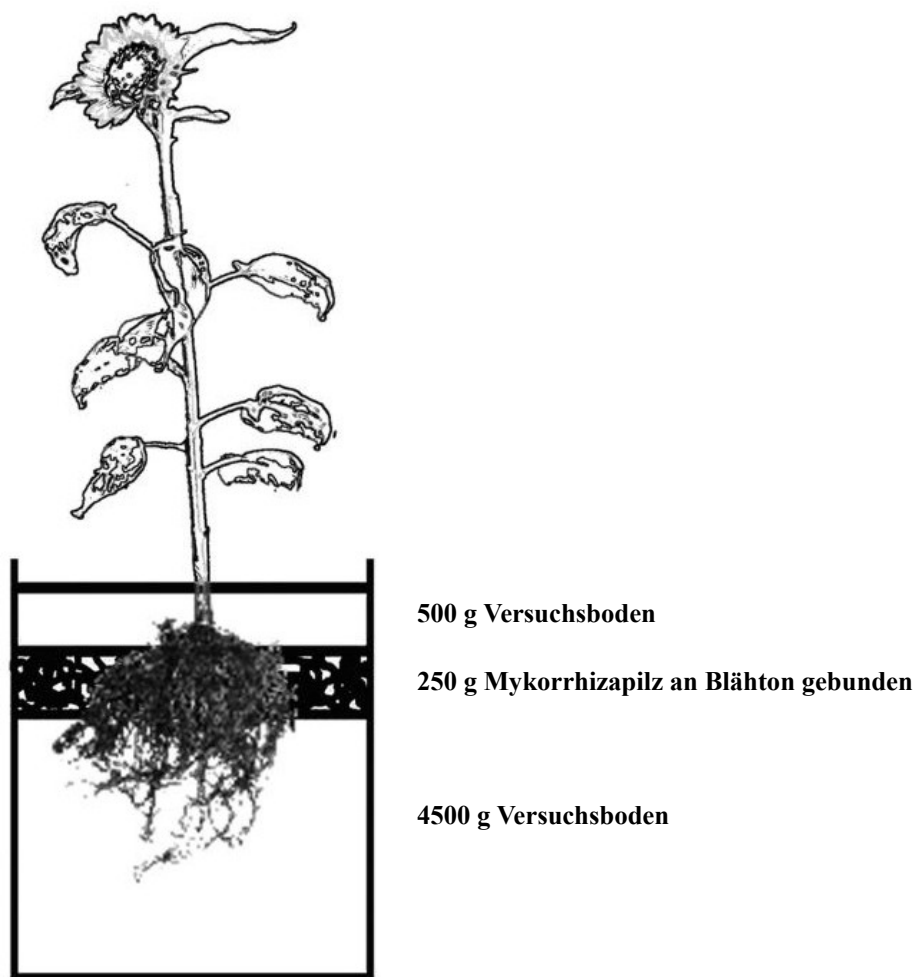


Abb. 2: Skizze eines Mitscherlich-Gefäßes mit Versuchsboden und Mykorrhizapilz

3.3.1.3 Versuchsböden

Für die Gefäßversuche wurden Böden der Rieselfelder aus Großbeeren und Malchow ausgesucht, da sie schon in vorangegangenen Versuchen eingehend untersucht wurden und erhebliche Belastungen mit Cd und Zn aufwiesen (LÜDERSDORF et. al, 1995; DORN & METZ, 1996}. Großbeeren liegt südlich von Berlin in Brandenburg und Malchow gehört zum Bezirk Weißensee, im nordöstlichen Teil Berlins. Beide Böden überstiegen die Vorsorge-

werte für Böden nach § 8 Abs. 2 Nr. 1 der BBodSchV (Tab. 3). Die Schwermetallgehalte wurden im Boden Großbeeren um ein vielfaches überschritten. Die pH-Werte der Böden Malchow und Großbeeren lagen im sauren Bereich bei pH 5,3 bzw. pH 5,5. Auffallend war der hohe organische Anteil im Boden Großbeeren mit 10 % im Vergleich zum Boden Malchow mit 3,9 %. Nach der Textur handelt es sich um lehmige Sandböden (Tab. 4). In Tab. 5 sind die Elementgehalte der Böden Malchow und Großbeeren als Gesamtgehalt nach Königswasseraufschluss (KW) und den pflanzenverfügbaren Gehalten der Nähr- und Schadstoffe (CAT) aufgeführt. Die Elementgehalte stellen Mittelwerte aus je fünf Einzelstichproben dar.

Tab. 3: Vorsorgewerte für Sandböden nach § 8 Abs. 2 Nr. 1 des Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)

Elementgehalte nach Königswasser-Aufschluss (KW) in mg/ kg Boden (TS)					
Schwermetall	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn
Vorsorgewert	0,4	30	20	15	60

Tab. 4: Angaben zur ermittelten Bodentextur der Böden Malchow und Großbeeren bis 30 cm Tiefe

Textur	Boden Malchow	Boden Großbeeren
% Sand	73,2	80,0
% Schluff	16,9	17,5
% Ton	9,9	2,5

Tab. 5: Untersuchte Elementgehalte der Böden Malchow und Großbeeren bis 30 cm Tiefe

Bodenbezeichnung	Boden Malchow		Boden Großbeeren	
mg/kg TS	KW	CAT	KW	CAT
Cd	1,8	0,8	56	15
Cu	107	45	650	180
Cr	84	0,3	390	0,5
Ni	12	3	67	19
Zn	261	90	1870	445
K	1415	121	1200	321
P	1906	149	6700	156
Ca	2719	--	8000	--
Mg	1433	119	1200	198

KW = Königswasser Extraktion, CAT = Cacl₂ + DTPA Extraktion

3.3.1.4 Düngung und Bewässerung

Die Düngung im Jahr 2001 erfolgte zweimal mit jeweils 5 g Kalkammonsalpeter (KAS) (27 % N) als Grunddüngung. Für die Düngermenge je Gefäß wurde die in der gärtnerischen Praxis übliche Bevorratung von Kultursubstraten und Industrieerden für salzempfindliche Kulturen und Jungpflanzen zugrunde gelegt. Die Bewässerung wurde nach Bedarf zwischen der Feldkapazität und dem permanenten Welkepunkt durchgeführt.

3.3.1.5 Anbaudaten, Bonitur und Ernte

Die Aussaat erfolgte im Jahr 2001 im April und im Jahr 2002 im Mai (Tab. 6). Das Weidelgras konnte während der Vegetationszeit dreimal geschnitten werden, die Frisch- und Trockenmasse bestimmt und zur letzten Ernte die Wurzeln zur Analytik entnommen werden.

Das Längenwachstum des Maises wurde einmal wöchentlich gemessen und Zeitpunkte der einzelnen Wachstumsstadien erfasst. Zur Vollreife wurde der Mais in Stängel, Blätter, Kolben und Wurzeln getrennt und zur weiteren Analyse bei 120 °C getrocknet. Die Wurzelstichproben für die Mykorrhizabestimmung konnten in einem Gemisch aus Wasser, 70-%igen Ethanol, Formalin und Eisessig konserviert werden (Kap.3.1.1).

Tab. 6: Anbaudaten und Ernte der Gefäßversuche mit Mais und Weidelgras 2001/02

	Vegetationsjahr			Vegetationsjahr	
	2001	2001		2001	2002
	Mais	Mais		Weidelgras	Weidelgras
Aussaat	25.04.	13.05.	Aussaat	25.04.	13.05.
			1. Schnitt	28.06.	20.06.
			2. Schnitt	21.08.	15.07.
Haupternte	21.08.	03.09.	3. Schnitt	02.10.	04.09.

3.3.2 Gefäßversuche mit Sonnenblumen im Gewächshaus 2001/02

Parallel zum Mitscherlich-Gefäßversuch kam sowohl 2001, als auch 2002 ein Gefäßversuch zum Einsatz, um die Wirkung der arbuskulären Mykorrhiza *Glomus intraradices*, der assoziativen Bakterien *P. fluorescens* und der Kombination der beiden Mikroorganismen auf Wachstum, Nährstoff- und Schwermetallaufnahme der Sonnenblume unter standardisierten Gewächshausbedingungen zu untersuchen. Die Temperatur im Gewächshaus wurde auf 18° C Nachttemperatur und auf 25° C Tagestemperatur t bei einer Luftfeuchte zwischen 60 – 80 % eingestellt. Die Helligkeit regulierten spezielle Natriumdampf-Hochdrucklampen (Fa. Philips SONT 400 W Agro) für den Gartenbau auf einen 16-stündigen Tag-Rhythmus.

3.3.2.1 Versuchsansatz und Versuchspflanzen

Als Gefäße dienten Töpfe mit den Ausmaßen von 12 x 12 x 12 cm. Diese wurden mit 1 kg trockenem Versuchsboden befüllt und 5 Gew.% Blähton (50 g) jeweils mit und ohne Mykorrhizastrukturen beigemischt. Die Bakterienvarianten erhielten eine Saatgutbehandlung von 5×10^8 Zellen in 100 ml Wasser gelöst und nochmals vor der Knospenbildung der Sonnenblume in der gleichen Konzentration. Bei der Dualbeimpfung wurden die Pilze und Bakterien entsprechend zugegeben. Die Anzahl der Gefäße pro Variante betrug $n = 10$.

Als Versuchspflanze wurde die Sonnenblume (*Helianthus annuus* L.), Sorte Schnittgold eingesetzt. Diese fungierte als Vertreterin dikotylar Pflanzen, da sie als Akkumulatorpflanze von Schwermetallen gilt und sehr gut mykorrhiziert. Pro Topf wurden drei Sonnenblumensamen ausgesät und nach dem Aufgang auf eine Pflanze vereinzelt.

3.3.2.2 Versuchsböden

Die Böden, die für diesen Gefäßversuch eingesetzt wurden, stammten vom Gelände der BBA Berlin-Dahlem. Die beiden Versuchsböden waren von der Textur mit einem hohen Sandanteil zwischen 76 und 82 % sehr ähnlich und können auch als lehmige Sandböden bezeichnet werden (Tab. 7). Der recht hohe Anteil der organischen Substanz zwischen 2,7 (Referenzboden) und 3 % (hoch belasteter Boden) ist untypisch für diese Böden. Die pH-Werte der Böden unterschieden sich kaum voneinander und lagen im neutralen Bereich. Im Referenzboden wurde ein pH von 6,4 und im hoch belasteten Boden pH 6,5. gemessen.

Der Referenzboden enthielt 1 mg Cd/kg TS und der belastete Boden gilt mit 17,1 mg Cd /kg TS als hoch belastet. Die Cu- und Zn-Gehalte lagen hingegen mit 29 bzw. 64 mg/kg TS nur leicht über den Vorsorgewerten der BBodSchV (Tab. 8).

Tab. 7: Ermittelte Bodentextur der Böden im Gefäßversuch der Sonnenblumen 2001/02 bis zu 30 cm Tiefe

Bodentextur	Referenzboden BBA	hoch belasteter Boden BBA
% Sand	82,0	76,3
% Schluff	12,1	19,1
% Ton	5,9	4,6

Tab. 8: Untersuchte Elementgehalte der Böden im Gefäßversuch der Sonnenblumen 2001/02 bis zu 30 cm Tiefe

Bodenbezeichnung	Referenzboden BBA		hoch belasteter Boden BBA	
mg/kg TS	KW	CAT	KW	CAT
Cd	1,0	1,0	17,1	16,3
Cu	17	4	29	7
Cr	11	--	10	--
Ni	5	0,4	5	0,5
Zn	83	31	64	19
K	1537	145	1324	59
P	712	167	462	87
Ca	2528		2576	
Mg	1092	66	1385	127

3.3.2.3 Düngung und Bewässerung

Pro Gefäß wurde 1 g KAS als Grunddüngung zugegeben, gemäß der gärtnerischen Praxis. Die Bewässerung erfolgte über die Ermittlung der Feldkapazität.

3.3.2.4 Aussaat, Bonitur und Ernte

Die Aussaat der Sonnenblumen erfolgte in beiden Versuchsjahren im Mai und Juni. Nach dem Aufgang wurden wöchentlich Längenwachstumsmessungen vorgenommen und der Zeitpunkt der Knospenbildung ermittelt. Jeweils im Herbst wurden die Töpfe beerntet und die Frisch- und Trockenmasse bestimmt (Tab. 9). Im Jahr 2001 erfolgte die Trennung der Pflanzenorgane in die oberirdische Grünmasse und Wurzeln und im Folgejahr wurde zusätzlich der Blütenkorb von der restlichen Grünmasse separiert. Repräsentative Wurzelstücke erhielten eine Konservierung (Kap. 3.1.1) bis zur Mykorrhiza-Bestimmung.

Tab. 9: Aussaat- und Erntezeitpunkte der Sonnenblume der Jahre 2001 und 2002

Vegetationsjahr	2001	2002
Aussaat	01.06.	14.05.
Ernte	02.10.	17.09.

3.3.3 Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen in der Vegetationshalle 2003

Bei diesem Mitscherlich-Gefäßversuch sollten im Jahr 2003 die Ergebnisse des vorangegangenen Versuchs mit Sonnenblumen (*Helianthus annuus* L.), Sorte Schnittgold verifiziert werden, da die Wirkung der Mykorrhiza und der assoziativen Bakterien nicht eindeutig einzuordnen waren. Zusätzlich wurden Bodenlösungen entnommen und die Mikroorganismenaktivität im Boden mittels Dehydrogenaseaktivität bestimmt.

3.3.3.1 Versuchsansatz und Versuchspflanzen

Dieser Mitscherlich-Gefäßversuch wurde im Gewächshaus bei einer Tagestemperatur von 20° C und 16° C Nachttemperatur gestartet. Die Luftfeuchtigkeit betrug zwischen 40 und 60 %. Da die Versuche im Februar begonnen wurden, musste ein Zusatzlicht durch Natriumdampf-Hochdrucklampen (Fa. Philips SONT 400 W Agro) mit einem 16-stündigen Tag-Rhythmus eingesetzt werden. Nach der Zwischenernte im Knospenstadium (31.03.2003) standen die Mitscherlich-Gefäße in der Vegetationshalle auf beweglichen Wagen, mit einer Tagestemperatur von 20° C bis 25 °C und 10° C bis 16° C Nachttemperatur. Die Luftfeuchtigkeit lag zwischen 60 und 80 %. Es wurden vier Varianten (Kap. 3.4.2) mit n=8 eingesetzt.

Als Gefäße dienten Mitscherlich-Gefäße mit 5 kg Inhalt. Es wurden pro Gefäß 4 Sonnenblumenjungpflanzen eingesetzt. Die Beimpfung mit Gew.5 % Mykorrhizapilz (Abb. 2) erfolgte kurz vor der Auspflanzung und die Beimpfung der Bakterien am Tag der Auspflanzung mit einer Konzentration von 1×10^9 Zellen in 250 ml Wasser gelöst. Nach sechs Wochen erfolgte eine Nachimpfung derselben Zellkonzentration. Um das Bodenwasser zu gewinnen, wurden Saugkerzen wie beim Mitscherlich-Gefäßversuch mit Mais und Weidelgras eingesetzt und ebenfalls von vier Gefäßen vereinigt. Nach der Zwischenernte kamen die Mitscherlich-Gefäße auf bewegliche Wagen, um sie, je nach Witterung, in das Drahthaus zu fahren. Die dadurch differierenden Standorte schlossen einseitige Witterungseffekte aus.

3.3.3.2 Versuchsböden

In dem Versuch sollten native Böden eingesetzt werden, wobei die Schwermetalle in unterschiedlich hohen Konzentrationen aufgetreten sind. Der Referenzboden stammt vom Gelände der BBA Berlin-Dahlem mit einem relativen hohen Sandanteil von 91,5 % und geringem Tongehalt von 0,4 %. Der als mäßig belastet bezeichnete Boden stammt gleichfalls vom Gelände der BBA mit einem geringeren Sandanteil von 73 %, aber mit einem Tongehalt von 8 %. Der hoch belastete Boden wurde vom Gelände des ehemaligen Rieselfeldes aus Großbeeren entnommen mit Ton- und Sandanteilen, die zwischen den beiden anderen Böden lagen (Tab. 10). Die organische Substanz des Referenzbodens und des mäßig belasteten Bodens unterschieden sich kaum voneinander und lagen bei 4 %. Der organische Anteil von 10,7 % des Bodens Großbeeren ist als sehr hoch anzusehen, ist aber typisch für Rieselfeldböden. Dieser Corg. ging einher mit einem niedrigen pH-Wert des Bodens von 5,5. Die beiden anderen Böden lagen im neutralen Bereich um pH 6,6.

Die verwendeten Böden wiesen Cd-Gehalte auf, die sich um je eine 10er Potenz von 0,5 mg bis 36 mg Cd/kg Boden (TS) im KW unterschieden (Tab.11). Cu-Gehalte von 556 mg Cu /kg Boden (TS), 53 mg Ni /kg Boden (TS), 273 mg Cr/kg Boden (TS) und 1275 Zn/kg Boden (TS) im Boden Großbeeren überstiegen bei weitem die Vorsorgewerte der BBodSchV.

Tab. 10: Ermittelte Bodentextur der Böden im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen 2003 bis 30 cm Tiefe

Textur	Referenzboden BBA	mäßig belastet BBA	hoch belastet GB
Sand gesamt (%)	91,5	73	80
Schluff gesamt(%)	8,1	19	17,5
Ton (%)	0,4	8	2,5

Tab. 11: Ermittelte Elementgehalte des Bodens im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen 2003 bis 30 cm Tiefe

Boden	Referenzboden BBA		mäßig belastet BBA		hoch belastet GB	
mg/kg TS	KW	CAT	KW	CAT	KW	CAT
Cd	0,5	0,3	4,1	2,1	36	11
Cu	31	11	187	82	556	151
Cr	8	0,08	13	0,09	273	0,21
Ni	5	0,4	7	0,8	53	14,9
Zn	112	49	100	39	1274	365
K	704	66	1837	59	540	12
P	1220	325	1500	342	5425	74
Ca	5512		5559		6491	
Mg	1009	156	1438	136	1013	69

3.3.3.3 Düngung und Bewässerung

5 kg Boden wurden mit 7,5 g KAS als Grunddüngung gemischt (1,5 g /kg Erde), um auch hier der gärtnerischen Praxis gerecht zu werden. Darüber hinaus wurde darauf geachtet, dass die Pflanzen nicht mit P übersorgt wurden, da P die Mykorrhizierung hemmt (Kap.2.3). Da sich zum Zeitpunkt der Knospenbildung K-Mangelerscheinungen bemerkbar machten (Blattrandnekrosen bei allen Varianten), kam es zu einer Nachdüngung von 5 g des NPK-Düngers Rotkorn mit 21 % wasserlöslichem K₂O pro Gefäß nach der Zwischenernte. Sonnenblumen haben ein hohes Wasserpotential. Deshalb wurde die Wasserkapazität auf 60 % eingestellt.

3.3.3.4 Bodenlösung

Die wöchentliche Entnahme der Bodenlösung entsprach dem Mitscherlich-Gefäßversuch mit Mais und Weidelgras. Der Zeitraum belief sich zwischen dem 18.02.03 (erste Entnahme) und dem 13.05.03 (letzte Entnahme). Die Bodenlösung wurde auf Nähr- und Schadelemente und dem pH-Wert hin untersucht.

3.3.3.5 Auspflanzung, Ernte und Probenahme

Es ist bekannt, dass Sonnenblumen mit Wachstumsdepressionen bei erhöhten Gehalten von Ni, V und Cd reagieren. KALIESS (2000) stellte schon bei der Aussaat der Sonnenblumen auf Cd-belasteten Böden Keimprobleme und Kümmerwuchs fest. Deshalb wurden die Gefäße mit 10 Tage alten, gut entwickelten Jungpflanzen bestückt. Die Ernte der Sonnenblumen (jeweils zwei Pflanzen) erfolgte zu zwei Terminen, vor dem Knospenstadium und zur Vollreife. In Tab. 12 sind die Daten der Auspflanzung und der Ernten dargestellt.

Für die Ermittlung des Längenwachstums wurden Wachstumsmessungen der Sonnenblumen über die Vegetationszeit einmal wöchentlich durchgeführt und gleichzeitig die Blätter der Sonnenblumen gezählt.

Um die Verteilung der Nähr- und Schadstoffe in der Pflanze besser beurteilen zu können, wurden die Pflanzenteile wie folgt fraktioniert: Die Beerntung der Blätter erfolgte paarweise von unten beginnend. Unterhalb der Knospe/Blüte konnten mehrere Blätter zu einer Blattetage zusammengefasst werden. Anschließend erfolgte die Ernte des Stängels und der Wurzeln. Aus den Wurzelproben wurden repräsentative Stichproben für die Mykorrhizabestimmung zu beiden Erntezeitpunkten entnommen (Kap. 3.1.2). Während der Haupternte kam es zur Trennung des Blütenkorbes und der Sonnenblumensamen. Von den einzelnen Pflanzenteilen wurde die Frisch- und Trockenmasse bestimmt. Die Sonnenblumensamen wurden in einer Ölmühle gepresst, um so das Öl und den Presskuchen separat analysieren zu können.

Tab. 12: Anzucht und Ernte der Sonnenblumen im Mitscherlich-Gefäßversuch 2003

Anzucht	Termine	Ernte	Termine
Aussaat	24.01.2003	Zwischenernte	31.03.2003
Auspflanzung	03.02.2003	Haupternte	12.05.2003

Die Dehydrogenase stellt ein Maß für die Enzymaktivität sämtlicher Mikroorganismen im Boden dar. Es ist bekannt, dass die Dehydrogenaseaktivität der Bodenmikroorganismen durch die Schwermetalle im Boden gehemmt wird (Kap.3.8.1). Für diese Arbeit war es von Interesse, ob die zugeführten Rhizosphären - Mikroorganismen die Dehydrogenaseaktivität in belasteten Böden verändern. Um den Verlauf der Dehydrogenaseaktivität verfolgen zu können, wurden zu vier Zeitpunkten Bodenproben entnommen und die Aktivitäten bestimmt (Tab.13).

Tab. 13: Bodenentnahme der Mitscherlich-Gefäße mit Sonnenblumen 2003 für die Dehydrogenasebestimmung

Entnahme	Termine	Entnahme	Termine
Ausgangsboden	28.01.2003	Blütenstadium	28.04.2003
Knospenstadium	01.04.2003	Haupternte	12.05.2003

3.4 Feldversuche auf dem Gelände der BBA Berlin-Dahlem

Die Feldversuche ermöglichen eine praktisch orientierte Erfassung der Auswirkungen von der Schwermetall-Belastung und können in Bezug auf den Ertrag und die Nährstoffaufnahme in die Kulturpflanze durch die Zugabe der o. g. Mikroorganismen untersucht werden. Die Versuche wurden mit Mais und Weidelgras in den Jahren 2000 bis 2002 durchgeführt.

3.5 Feldversuche mit Mais und Weidelgras der Jahre 2000 bis 2002

3.5.1 Bodenverhältnisse

Die Versuchsfläche der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft liegt in Berlin-Dahlem im Bezirk Zehlendorf. Der Boden hat sich auf einer Grundmoränenhochfläche aus Geschiebemergel weichseleiszeitlicher Ablagerungen gebildet, mit einer Überlagerung aus Geschiebedeck- und Flugsanden. Die bestimmenden Bodenformen sind Parabraunerden und Sandkeilbraunerden mit teilweisen Übergängen zur Fahlerde (FAO-Klassifikation: Albic Luvisol). Mit 74 % Sand und 19 % Schluff ist diese Bodenart als lehmiger Sand zu bezeichnen. (Tab. 14). Die Bodengüte kann bei 40 Bodenpunkten angesiedelt werden.

Tab. 14: Untersuchte physikalische Bodeneigenschaften im Ap-Horizont

Parameter	Mittelwerte	Parameter	Mittelwerte
Sand gesamt (%)	74,4	Schluff gesamt (%)	18,7
Grobsand (%)	4,1	Grobschluff (%)	15,6
Mittelsand (%)	37,8	Mittelschluff (%)	3,1
Feinsand (%)	32,5	Feinschluff (%)	0
		Ton (%)	4,5

Für den Feldversuch wurde eine Fläche ausgewählt, die im 2. Weltkrieg mit Koksasche beaufschlagt wurde. Dadurch kam es zu einer erhöhten Anreicherung von Schwermetallen, insbesondere Cd. Die Cd-Gehalte lagen

zwischen 8 und 25 mg /kg TS (KW), weit über dem Vorsorgewert der BBodschV von 0,4 mg/kg TS auf sandigen Böden. Die Elemente Cu, Cr, Ni, und Zn überstiegen nicht die Vorsorgewerte (Tab. 15).

Bei vergleichsweise hohen Gehalten der organischen Substanz von 2,5 % wurden niedrigere P- und mittlere K-Gehalte nachgewiesen. Der pH-Wert von 6,6 ist für die Bodenart typisch.

Tab. 15: Untersuchte Elementgehalte und chemische Bodeneigenschaften im Ap-Horizont

Elemente mg/kg TS	KW	CAT	Parameter	Mittelwert
Cd	8-25	7-19	pH-Wert	6,6
Cu	11,4	3	Corg. (%)	2,5
Cr	13,5	0,05	PDL-Gehalt (mg/100g TS)	8,16
Ni	6,4	0,45	KDL-Gehalt (mg/100g TS)	13,99
Zn	46	9,3		
Ca	2265			
Mg	1395	123		

KW = Königswasser Extraktion CAT = CaCl₂ + DTPA

DL = Doppellactat

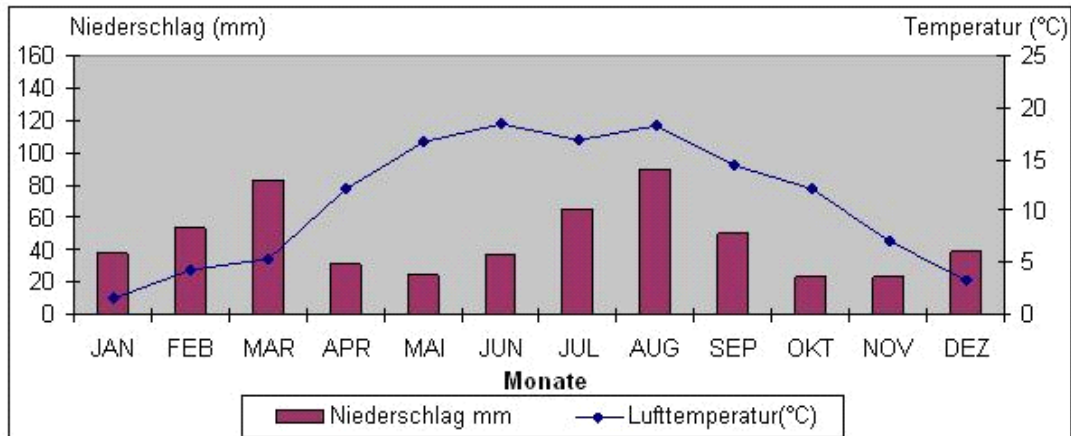
3.5.2 Klima

Die Wetterdaten sind von der Wetterstation, Institut für Pflanzenbau der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät, Berlin-Dahlem aufgenommen. Der Versuchsstandort Berlin-Dahlem liegt im Grenzbereich zwischen ozeanisch und kontinental geprägtem Klima mit mittleren Temperaturamplituden zwischen Sommer und Winter bzw. Tag und Nacht. Die jährliche Niederschlagsmenge schwankt zwischen 363 und 731 mm der Jahre 1961-90. Im langjährigen Mittel beträgt die Niederschlagshöhe 545 mm, die Jahresdurchschnittstemperatur 9,3 °C und die relative Luftfeuchte 75 % (Tab. 16). In den Jahren 2000 - 2002 war der Witterungsverlauf deutlich verschieden (Abb. 3). Die Winter der Jahre 2000 und 2002 waren um 3 Kelvin (K) wärmer als das langjährige Mittel und im Jahr 2000 lag die mittlere Lufttemperatur mit 10,9 °C durchschnittlich um 1,6 K höher. Die Jahresmitteltemperatur von 2001 entsprach ungefähr dem langjährigen Mittel mit 9,7° C. Zur Maisablage und -aufgang (Tab. 6) kam es in den Jahren 2000/01 zu einem Niederschlagsdefizit von 30 bzw. 20 mm. In den besagten Jahren wurden im Mai und Juni jeweils 20 mm zusätzlich beregnet. Im Jahr 2002 wurden im August Rekordniederschläge von 256,7 mm gemessen. Dies entsprach ¼ der gesamten Niederschlagsmenge von 821 mm und lag mit 276,4 mm über dem langjährigen Mittel.

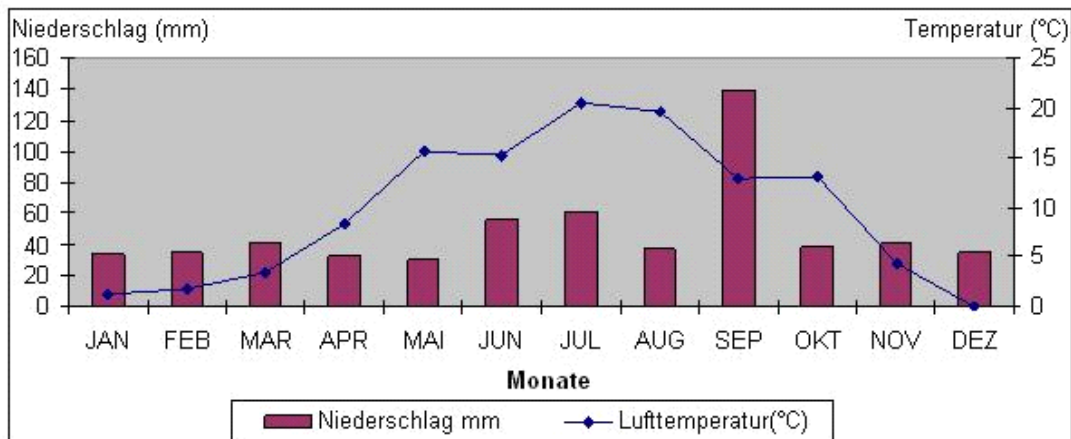
Tab. 16: Klimawerte der Versuchsjahre 2000 bis 2002 und langjährige Mittel (1961-90) am Standort Berlin-Dahlem

Monat	Niederschlag (mm)				Temperatur (°C)			
	2000	2001	2002	langjähriges Mittel	2000	2001	2002	langjähriges Mittel
Januar	38,3	33,1	32,2	36,6	1,6	1,3	2,3	-0,1
Februar	53,5	34,9	74,6	29,6	4,3	1,9	5,7	0,9
März	83,5	40,2	41,9	32,1	5,5	3,4	5,6	4,3
April	31,5	32,6	44,8	38,1	12,2	8,4	9,2	8,7
Mai	24,5	30,6	63,5	52,6	16,7	15,5	16	13,8
Juni	36,7	55,9	38,6	70	18,4	15,2	18,1	17,1
Juli	65,3	61	71,4	52,7	16,8	20,5	19,5	18,5
August	89,8	37,3	256,7	63,5	18,3	19,6	21,3	18
September	49,7	138,6	38,5	43,1	14,4	12,9	15	14,3
Oktober	23,5	37,9	98,2	32,7	12,2	13,1	8,2	9,9
November	23,1	40,4	48,4	45,5	7,1	4,4	4,6	4,9
Dezember	38,5	35,2	12,2	48,2	3,3	0	-1,7	1,4
Jahresmittel	558	577,7	821	544,6	10,9	9,7	10,3	9,3

Witterungsverlauf 2000



Witterungsverlauf 2001



Witterungsverlauf 2002

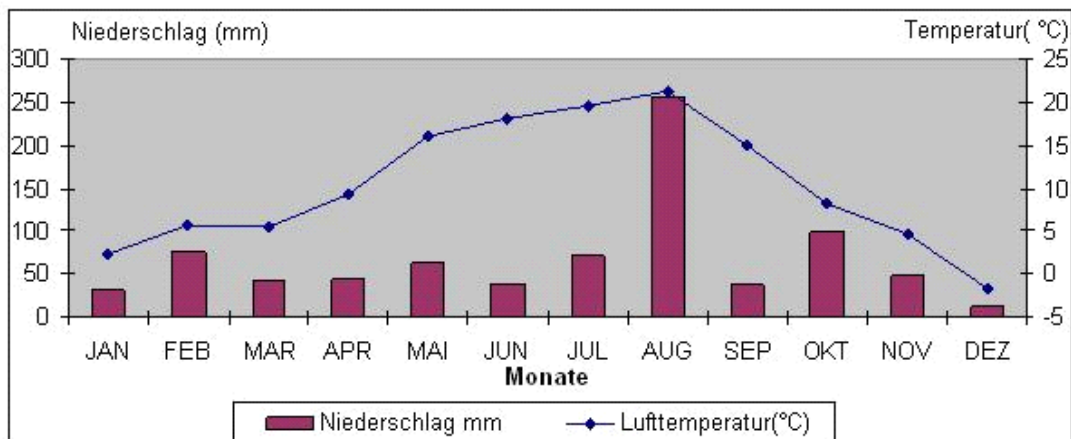


Abb. 3: Klimadiagramme der drei Versuchsjahre 2000, 2001 und 2002 am Standort Berlin-Dahlem

3.5.3 Versuchsanlage

Vor Beginn des Versuches lag die Versuchsfläche brach. Die anschließende Fruchtfolge bestand aus Mais und Weidelgras als Block über 3 Jahre. Der Versuch wurde als randomisierte Anlage mit 4 Wiederholungen angelegt

mit insgesamt 32 Parzellen. Jede Fruchtart wurde mit AM-Pilzen und Bakterien behandelt (Tab. 17). Die Größe der einzelnen Parzellen betrug beim Weidelgras 12 m² und 16 m² beim Mais.

Tab. 17: Prüfglieder am Standort BBA Berlin-Dahlem

Beimpfung	Mais (Sorte Prinval)	Welsches Weidelgras (Sorte Liberta)
Ohne	Kontrolle	Kontrolle
Bakterien	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	<i>Pseudomonas fluorescens</i>
Mykorrhizapilz (AM)	<i>Glomus intraradices</i>	<i>Glomus intraradices</i>
Dualinokulation (AMB)	P. fluorescens+ Gl. intrardices	P. fluorescens+ Gl. intrardices

3.5.4 Feldvorbereitung, Aussaat, Düngung und Pflege

Als Feldvorbereitung wurde im Herbst 1999 das Versuchsfeld gepflügt und im Frühjahr 2000 gegrubbert. Für die Ermittlung des Düngerbedarfes (N_{min}, K und P), wurden repräsentative Bodenproben entnommen. Anschließendes Eggen mit einer Kreiselegge sorgte für ein krümeliges Saatbett. In den nachfolgenden zwei Versuchsjahren kamen nur der Handgrubber und die Kreiselegge zum Einsatz, da die gleichen Feldparzellen mit den jeweiligen Varianten wieder eingenommen werden sollten.

Die Aussaat des Maises (gebeiztes Saatgut) und des Weidelgrases erfolgte Mitte Mai. Im Jahr 2000 wurde das Weidelgras als überjähriges Weidelgras stehen gelassen und im Jahr 2001 nicht neu nachgesät (Tab. 18). Der Reihenabstand des Maises betrug 50 cm in einer Einzelkornablage von 20 cm mit einer Tiefe von 2 cm. Das Weidelgras wurde ebenfalls in Reihen ausgebracht, in einem Abstand von 40 cm. Jede Parzelle wies somit sechs Reihen auf, wobei die beiden Außenreihen nicht für die Ertragsermittlung oder Probenahme beerntet wurden, um so Randeffekte zu vermeiden. Als N-Dünger kam KAS auf allen Flächen zum Einsatz, wobei die Maisparzellen 60 kg N/ha und das Weidelgras 40 kg N/ha nach der Einsaat erhielten. Der Mais wurde mit 60 kg N/ha im kniehohen Bestand nachgedüngt und das Weidelgras erhielt noch eine Gabe von 40 kg N/ha. Chemische Pflanzenschutzmittel wurden nicht ausgebracht. Die Unkrautentfernung erfolgte mechanisch.

3.5.5 Beimpfung

Die gefriergetrockneten Bakterien des Stammes *Pseudomonas fluorescens* RA56 (Kap. 3.2) wurden in Wasser gelöst und ca. eine 1/2 Stunde quellen gelassen. Das Ausbringen der Suspension erfolgte anschließend direkt auf das Saatgut. Die Bakterienkonzentration belief sich bei beiden Fruchtarten auf 2 x 10⁹ Zellen in 2 l Wasser. Dies entspricht einer Konzentration, die pro Reihe (4 m beim Mais und 3,5 m beim Weidelgras) ausgebracht wurde. Es erfolgte sechs Wochen nach der Einsaat eine Nachimpfung in der gleichen Konzentration. Pro Reihe wurden 1,3 l bei der AM- und der AMB-Variante Mykorrhiza inokulierten Blähton ausgebracht. Diese Mengenangaben entsprechen 320 kg/ha.

3.5.6 Ernte und Aufarbeitung

Der Mais erfuhr eine Zwischenernte für die Nähr- und Schadstoffanalytik und der Ermittlung des Mykorrhizierungsgrades. Das Welsche Weidelgras wurde während der Vegetationszeit bis zu dreimal geschnitten (Tab. 18). Die Ernte des Mais erfolgte getrennt nach Wurzel und Spross; zur Haupternte (Vollreife) wurde der Spross nach Stängel, Blätter und Kolben fraktioniert. Die Trennung des Weidelgrases erfolgte nach oberirdischem Pflanzenmaterial und Wurzel für die Analytik. Repräsentative Wurzelsegmente für 300 Bildausschnitte am Mikroskop wurden zur späteren Bestimmung des Mykorrhizierungsgrades von den beiden Versuchspflanzen entnommen (Kap. 3.1.2). Die Restwurzelmasse und oberirdisches Pflanzenmaterial trockneten 12 h bei 120° C und wurden auf 1 bis 2 mm mit einer Schlagkreuzmühle "SK1" mit Bodensieb, Fa. Retsch GmbH & Co. KG und kleine Probenmengen mit einer Mikroschlagmühle Typ DCFH 48 mit Bodensieb, Fa. Culatti AG gemahlen und in Plastikprobebehälter bis zur Analyse aufbewahrt.

Tab. 18: Aussaat und Ernte des Feldversuches in den Vegetationen 2000, 2001 u. 2002

	Mais				Weidelgras		
	2000	2001	2002		2000	2001	2002
Aussaat	09.05.	11.05.	15.05.	Aussaat	09.05.		17.05.
Zwischenernte	30.07.	27.08.	07.08.	1. Schnitt	13.06.	25.06.	30.07.
	-----	-----	-----	2. Schnitt	28.07.	02.08.	-----
Haupternte	11.10.	28.09.	18.09.	3. Schnitt	18.10.	18.10.	04.09.

3.5.7 Transferfaktor

Der Transferfaktor beschreibt die Beziehung zwischen der Pflanze und der im Boden befindlichen Metallkonzentration. Er gibt Auskunft über die im Boden befindlichen Schwermetalle mit Berücksichtigung der Bodenparameter (SAUERBECK & STYPEREK, 1988). Der Transferfaktor berechnet sich wie folgt:

$$\text{Transferfaktor } F = \frac{\text{Metallkonzentration Pflanzensubstanz (mg/kg TS)}}{\text{Metallkonzentration Boden (mg/kg TS)}}$$

Metallkonzentration Boden (mg/kg TS)

Die Schwermetallverteilung in den einzelnen Organen einer Pflanze nimmt in der Reihenfolge: Wurzel >>Blätter >Sprossorgane >unterirdische Sprossorgane >Früchte ab HOFFMANN (1982).

3.6 Statistische Auswertung

Die varianzanalytische Verrechnung der Daten erfolgte mit Hilfe des Statistikprogramms SPSS Vers.11.0 und SAS 8.2. Vor Durchführung der Varianzanalyse wurden die Daten auf Normalverteilung und Varianzhomogenität geprüft. Für die multiplen Mittelwertvergleiche wurde der tukey-Test mit einem Signifikanzniveau von 5 %

gewählt. Statistisch gesicherte Unterschiede erhielten die Buchstaben a bis d. Zur besseren Darstellung wurden die signifikanten Unterschiede durch Fettdruck markiert. Der tukey-Test ist als a posteriori Test konservativer als der Grenzdifferenztest, erlaubt aber multiple Mittelwertvergleiche. Zusätzlich kamen folgende statistische Prozeduren zur Anwendung:

- Kovarianzanalyse
- Bodenlösung als Quasi lineare Polynomanpassung
- Nichtlineare Regressionsfunktion mit einer Konfidenzintervallschätzung $\alpha = 5 \%$ Wachstumskurven als Tangenshyperbolicus, Programm CADEMO – Wachstum
- Korrelation nach Pearson

4 ERGEBNISSE

4.1 Wirkung der Mykorrhiza und assoziativen Bakterien auf die Entwicklung von Mais im Mitscherlich-Gefäßversuch 2001/02

4.1.1 Wachstumsverlauf der Maispflanzen

Die Dokumentation des Wachstumsverlaufes der Maispflanzen erfolgte wöchentlich über die Vegetationszeit von Mai bis September. Die entstandenen Wachstumskurven wurden in Form einer Tangenshyperbolicus dargestellt. Aus den Konfidenzintervallen ergaben sich die Parameterschätzungen, die als Vergleichswerte für die Varianten herangezogen wurden.

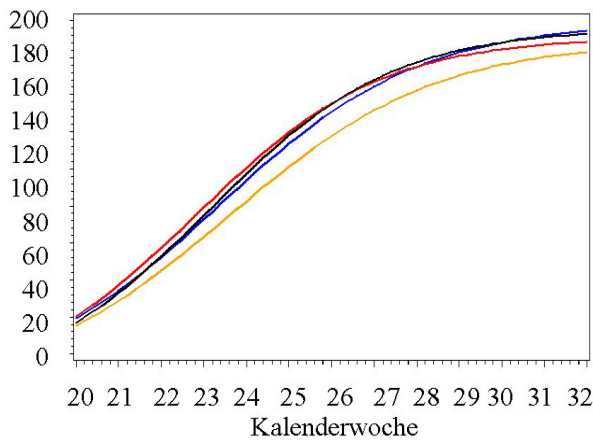
Der Wachstumsverlauf und die Wuchshöhe des Maises unterschieden sich auf den beiden Versuchsböden kaum voneinander (Abb. 4). Die Wuchshöhe des Maises lag zur Vollreife zwischen 180 cm und 200 cm bei einer Wachstumsdauer von 12 Wochen (20. – 32. Kalenderwoche KaW). Im Jahr 2001 nahmen die Wachstumsraten der Maispflanzen auf dem Boden Malchow bis zur 27. KaW bei einer durchschnittlichen Länge von 160 cm zu. Bis zur Vollreife wurden im Mittel 30 cm Zuwachs gemessen. Die Wachstumskurve der Dualbeimpfung mit Mykorrhizapilz und Bakterien (AMB) lag unter den anderen Vergleichsvarianten.

Im Folgejahr wuchsen die Kontroll- und die AM-Pflanzen bis zu 200 cm mit einem linearen Wachstum bis zur 26. KaW. In der Bakterienvariante trat eine Wuchshemmung im Vergleich zur Kontrolle bis zu 20 cm auf, ohne statistisch gesicherten Unterschied.

Im Boden Großbeeren konnte im Jahr 2001 insgesamt ein langsames Wachstum beobachtet werden, dargestellt durch flachere Wachstumskurve. Der Wuchs der Varianten verlief parallel. Im Jahr 2002 kam es zu einem steilen Anstieg der Wachstumskurven bis zur 26. KaW. Visuell konnte eine Wuchsverbesserung der Bakterienvariante ab der 23. KaW mit insgesamt 11 cm Wachstumsvorteil beobachtet werden.

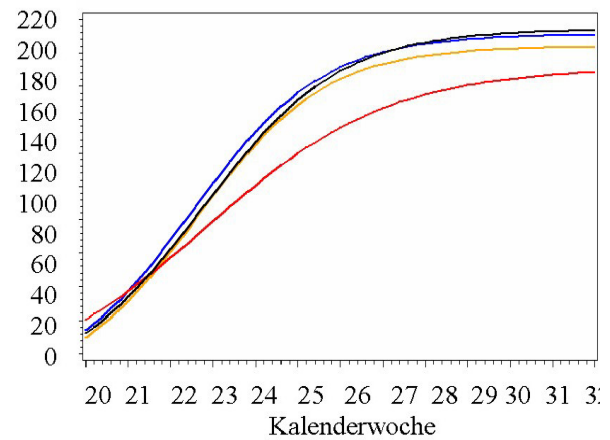


Wuchshöhe in cm



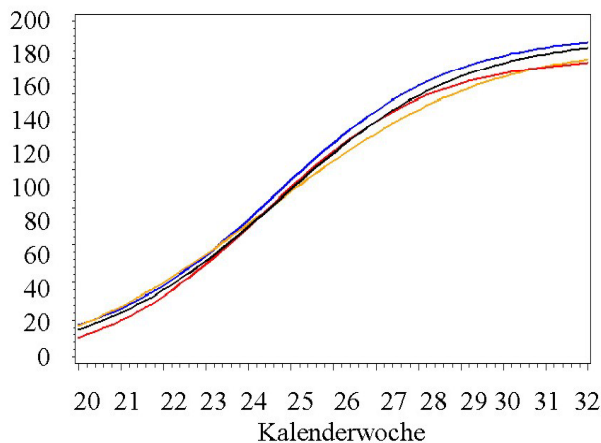
A. Boden Malchow 2001

Wuchshöhe in cm



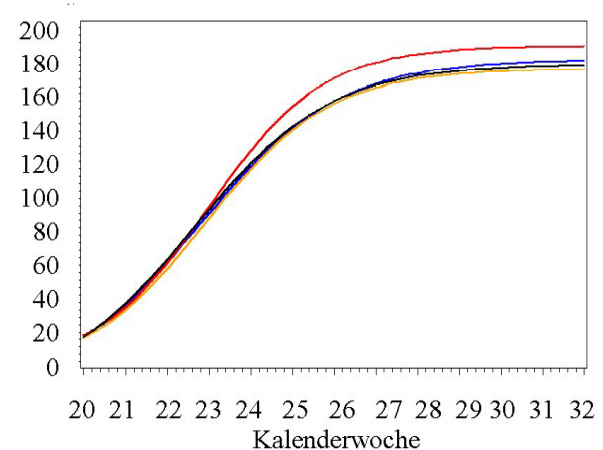
B. Boden Malchow 2002

Wuchshöhe in cm



C. Boden GB 2001

Wuchshöhe in cm



D. Boden GB 2002

Abb. 4: Wachstumskurven der Maispflanzen im Mitscherlich-Gefäßversuch (n=4): A. Boden Malchow, 2001; B. Boden Malchow, 2002; C. Boden Großbeeren, 2001; D. Boden Großbeeren, 2002

4.1.2 Frisch- und Trockenmasseerträge und Ertragsstruktur des Mais

Die Maiserträge des Bodens sind als Frischmasse (FM) und Trockenmasse (TM) in g/Gefäß dargestellt. Die Frischmasse spiegelt den aktuellen Reifestatus wider. Es sollte untersucht werden, ob die Beimpfung mit den Mikroorganismen die Vollreife beeinflusst. Zu den Gesamterträgen setzt sich die Ertragsstruktur aus Kolben, Stängeln, Blättern und Wurzeln zusammen.

Im Jahr 2001 war der Gesamtmaisertrag (TM) auf dem Boden Malchow (Tab. 19) um 100 % höher im Vergleich zum Boden Großbeeren (Tab. 21). Im Folgejahr 2002 kam es zu einem Ertragsrückgang von 50 % auf dem Boden Malchow (Tab. 20).

Tendenziell sind die Erträge der Frisch- wie auch der Trockenmasse durch die Dualbeimpfung mit dem Mykorrhizapilz und den Bakterien auf dem Boden Malchow in beiden Versuchsjahren erhöht worden. Die Frischmasse der Blätter wurde um 20 % und die Wurzeln um 98 % im ersten Jahr gesteigert. Im Jahr 2002 erfuhren die Kolben eine signifikante Gewichtszunahme um 11 % in der FM und um 9 % in der TM (Tab. 20).

Auf dem Boden Großbeeren (2001) kam es durch die Bakterieninokulation zu einer signifikanten Zunahme des Gesamtertrages (FM), der hauptsächlich durch die Stängel begründet war und sich mit 19 % Ertragszuwachs von der Kontrolle unterschied (Tab. 21). Die anderen Ertragskomponenten blieben durch die Rhizosphären-Mikroorganismen nahezu unverändert. Im Jahr 2002 unterschieden sich die Erträge der Varianten kaum voneinander. Das erhöhte Längenwachstum durch die Bakterienvariante spiegelte sich durch die größere Stängelmasse wider wie schon im Versuchsjahr 2001 (Tab. 22).

Tab. 19: Erträge des Maises in g/Gefäß im mäßig belasteten Boden Malchow, 2001

Variante	Gesamtertrag		Ertrag Kolben		Ertrag Stängel		Ertrag Blätter		Ertrag Wurzeln	
	FM	TM	FM	TM	FM	TM	FM	TM	FM	TM
Kontrolle	314,2	204,6	127,2	87,5	122,8	58,9	64,3b	58,3	10,5ab	7,1b
Bakterien	341,5	216,9	121,6	84,3	150,7	69	69,2ab	63,6	14,2ab	9,8a
AM	315,8	211,8	125	86,2	120,4	61,9	70,4ab	63,7	10,1b	6,7b
AMB	344,5	218,2	136,3	87,4	130,9	66,7	77,3a	64,2	20,8a	10,9a

AM = Arbuskuläre Mykorrhiza; AMB = Arbuskuläre Mykorrhiza + Bakterien

Tab. 20: Erträge des Maises in g/Gefäß im mäßig belasteten Boden Malchow, 2002

Variante	Gesamtertrag		Ertrag Kolben		Ertrag Stängel		Ertrag Blätter		Ertrag Wurzeln	
	FM	TM	FM	TM	FM	TM	FM	TM	FM	TM
Kontrolle	301,8	133,3	117,2b	80,6	140,4	30,9	31,3	21,8	16,6	11,3
Bakterien	318,1	141,4	119,9ab	86,9	149,1	32,6	33,2	22,0	14,7	9,9
AM	328,1	135,2	129,1ab	80,5	145,1	31,8	36,6	22,8	14,5	9,5
AMB	331,3	144,8	130,6a	88,6	148,0	33,2	35,0	23,0	24,3	12,9

Tab. 21: Erträge des Maises in g/Gefäß im hoch belasteten Boden Großbeeren, 2001

Variante	Gesamtertrag		Ertrag Kolben		Ertrag Stängel		Ertrag Blätter		Ertrag Wurzeln	
	FM	TM	FM	TM	FM	TM	FM	TM	FM	TM
Kontrolle	315,6ab	125,8	154,7	90,1	118,8b	18,7	42,1	17,0	25,7	17,0
Bakterien	332,4a	118,6	143,2	68,8	146,6a	32,8	42,6	17,0	35,2	18,7
AM	276,4ab	107,2	137,8	78,3	91,7c	16,3	46,9	12,6	25,1	15,8
AMB	273,3b	112,7	143,2	82,5	87,5c	15,7	42,6	14,5	33,5	14,7

AM = Arbuskuläre Mykorrhiza; AMB = Arbuskuläre Mykorrhiza + Bakterien

Tab. 22: Erträge des Maises in g/Gefäß im hoch belasteten Boden Großbeeren, 2002

Variante	Gesamtertrag		Ertrag Kolben		Ertrag Stängel		Ertrag Blätter		Ertrag Wurzeln	
	FM	TM	FM	TM	FM	TM	FM	TM	FM	TM
Kontrolle	345,6	143,5	144,0	95,6	128,3	24,6	51,9	23,3	17,8	11,9
Bakterien	364,9	141,0	141,9	88,4	151,5	27,4	52,8	25,2	23,1	12,0
AM	309,2	137,8	133,2	95,1	106,7	21,8	53,0	20,9	15,2	9,3
AMB	338,8	142,3	143,0	94,9	120,5	24,5	58,0	23,0	29,0	12,6

4.1.3 Proteingehalt der Maiskörner

Im Jahr 2001 wurde der Proteingehalt in den Maiskörnern der beiden Versuchsböden untersucht. Im Boden Malchow konnten Gehalte zwischen 12,3 % Protein der Variante AMB und 13,6 % der AM-Variante bestimmt werden, wobei die Varianten sich nicht signifikant unterschieden. Die Bakterienvariante erhöhte den Proteingehalt im Vergleich zur AM-Variante auf dem mäßig belasteten Boden Malchow um 0,7 % und auf dem hoch belasteten Boden Großbeeren um 21 % auf 14,4 %, statistisch gesichert. Auffällig war die Reduktion des Proteins in beiden Böden durch die Dualbeimpfung mit Mykorrhizapilz und Bakterien. Die Kombination der Mikroorganismen scheint die Proteinbildung im Maiskorn negativ zu beeinflussen wie auch die Belastungshöhe im Boden. Im mäßig belasteten Boden Malchow wurden Proteingehalte von 13,3 % in den Kontrollpflanzen gemessen und im hoch belasteten Boden Großbeeren nur 12,2 % Protein (Abb. 5).

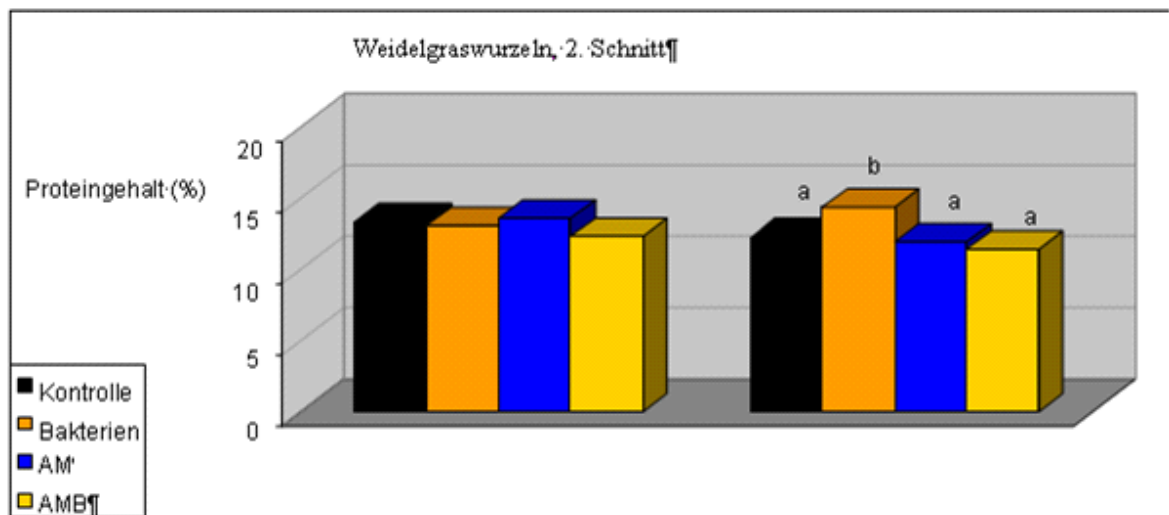


Abb. 5: Proteingehalte im Maiskorn auf dem mäßig belasteten Boden Malchow und dem hoch belasteten Boden Großbeeren im Jahr 2001

4.1.4 Mykorrhizierung der Maiswurzeln

Die Mykorrhizastrukturen stellten sich als unsegmentierte Hyphen mit Vesikel (ovale Ausstülpungen) dar (Abb. 6).

Der Mykorrhizierungsgrad der Mykorrhizavariante AM betrug im Jahr 2001 auf dem mäßig belasteten Boden Malchow im Mittel 37 % und unterschied sich signifikant von den Kontrollpflanzen (Abb. 7). Bei den Proben der Dualbeimpfung mit Pilz und Bakterien konnte keine Steigerung der Mykorrhizainfektion erzielt werden. Mit 12 % Mykorrhizainfektion hat sich ein Anteil autochthoner Mykorrhiza an die Wurzeln der Bakterienvarianten angesiedelt. Im Folgejahr lagen die Infektionsraten bei den Bakterien- und Pilzinokulierten Pflanzen bei ca. 40 % und unterschieden sich signifikant von den Kontrollpflanzen.

Im hoch belasteten Boden Großbeeren etablierte sich die Mykorrhiza im Jahr 2001 nicht so erfolgreich wie im mäßig belasteten Boden Malchow. In den Kontrollpflanzen waren fast keine Mykorrhizastrukturen erkennbar (0,8%) und die autochthone AM an den Wurzeln mit Bakterieninokulation zeigte nur einen Befall von 6,5 %. Die AM-Varianten zeigten mit bis zu 20 % signifikante Unterschiede zur Kontrolle. Im Jahr 2002 konnten Mykorrhizierungsraten durch die singuläre Beimpfung mit AM von 35,5 % und durch die Dualbeimpfung sogar bis 45 % erzielt werden, die sich signifikant von der Kontrolle und der Bakterienvariante unterschieden.

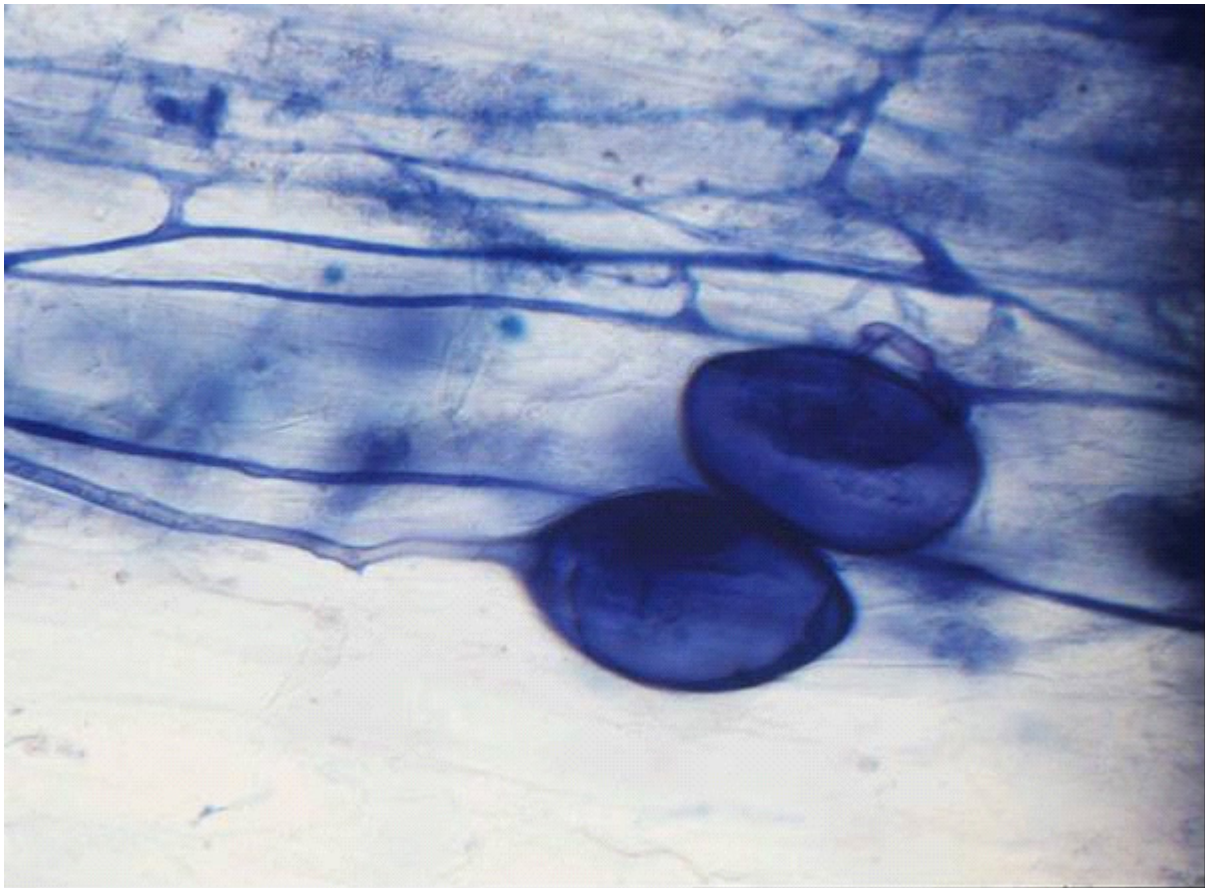


Abb. 6: Mykorrhizastrukturen mit Hyphen und Vesikel in der Maiswurzel (Vergrößerung x 500)

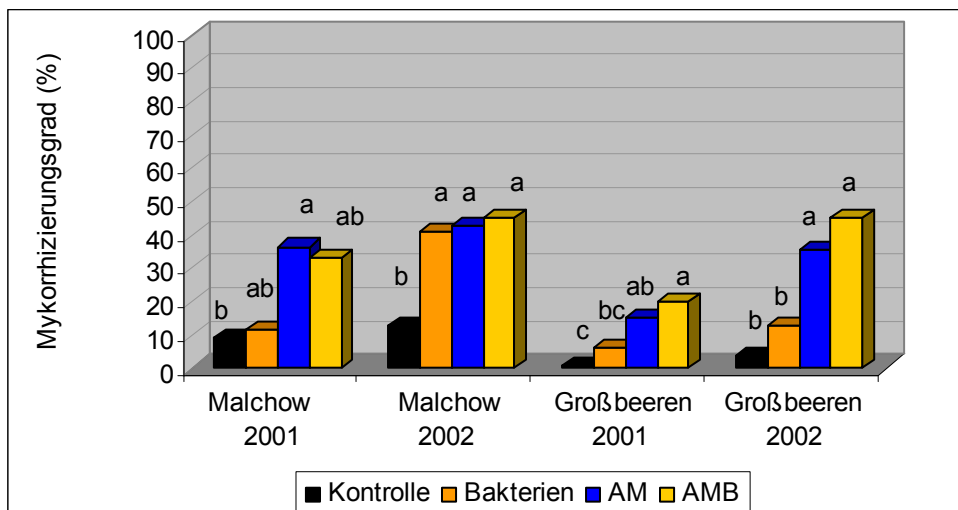


Abb. 7: Mykorrhizierung der Maiswurzeln im Gefäßversuch im mäßig belasteten Boden Malchow und im hoch belasteten Boden Großbeeren der Jahre 2001/02

4.1.5 Korrelationen zwischen Mykorrhizierungsgrad und Trockenmasseerträge

Im mäßig belasteten Boden Malchow wurden keine Korrelationen bezüglich des Mykorrhizierungsgrades und Trockenmasseerträge in beiden Versuchsjahren gefunden (Tab. 23). Lediglich im hoch belasteten Boden Groß-

beeren konnte im Jahr 2001 ein signifikanter negativer Zusammenhang zwischen Infektion und Ertrag ermittelt werden. Da die Infektionsrate aber unter 20 % lag (Kap. 5.1), ist der Zusammenhang bedeutungslos.

Tab. 23: Korrelationen zwischen Mykorrhizierungsgrad und TM-Erträge beim Mais

Boden	Korrelation 2001	Korrelation 2002
Malchow	0,340	0,325
Großbeeren	-0,608*	0,175

* die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (zweiseitig) signifikant

4.1.6 Nähr- und Schadelementgehalte im Mais der Böden Malchow und Großbeeren

Die Nährelemente Ca, K, Mg und P sind im Mais der Pflanzenteile Blätter, Stängel, Kolben und Wurzel untersucht worden. Zu den untersuchten Schwermetallen zählen Cd, Cu, Ni und Zn.

Calcium (Ca)

Die Ca-Aufnahme in die Blätter und Stängel wurde im Boden Malchow durch die Bakterien- und Pilzinfektion im Jahr 2001 signifikant reduziert, wobei die Ca-Konzentration mit über 10 g Ca/kg TS auf einem sehr hohen Niveau lag (Tab. im Anh. 1). Im Jahr 2002 wurden nur ca. 50 % des Ca in Blätter und Stängel gefunden mit einer signifikanten Steigerung des Ca durch die Mykorrhizapilze. Die Ca-Aufnahme in die Kolben und Wurzeln blieben durch die behandelten Varianten unbeeinflusst (Tab. im Anh. 2).

Die Ca-Konzentrationen in den fragmentierten Pflanzenteilen waren im Boden Großbeeren insgesamt um 1/3 höher als im mäßig belasteten Boden Malchow, ausgenommen die Konzentration in den Maiskörnern. Es zeichnete sich eine reduzierte Ca-Aufnahme durch die singuläre Bakterienbeimpfung in beiden Versuchsjahren ab. Die Mykorrhizapilze trugen zu einer besseren Aufnahme des Ca bei, im ersten Versuchsjahr auch signifikant (Tab. im Anh. 3 u. 4).

Kalium (K)

Bemerkenswert war die erhöhte K-Aufnahme durch die Bakterieninokulation in alle Pflanzenteile, inklusive Wurzel in beiden Versuchsjahren und Böden, die vorwiegend signifikant gegenüber der Kontrolle waren. Die Mykorrhizavarianten förderten partiell die K-Aufnahme nur im Boden Malchow (Tab. im Anh. 1 u. 2).

Magnesium (Mg)

Wie beim Ca waren die Mg-Gehalte in den Pflanzenteilen des Bodens Malchow im Jahr 2002 (Anh. 2) insgesamt niedriger als im ersten Versuchsjahr (Anh. 1). Lediglich die AM-Pilze förderten die Aufnahme in den Kolben im Jahr 2002. Die Bakterieninfektionen reduzierten die Mg-Aufnahme in alle Pflanzenorgane in beiden Versuchsjahren und -böden. Im Gegensatz dazu förderten die singulären Mykorrhizapilze und die Dualbeimpfung mit AM und Bakterien die Mg-Aufnahme in die Blätter und Stängel, im Jahr 2001 signifikant.

Phosphor (P)

Die P-Aufnahme im Mais blieb in beiden Versuchsjahren und –böden durch die verschiedenen Behandlungen relativ unbeeinflusst (Anh. 1- 4). Der AM-Pilz erhöhte temporär den P-Gehalt im Stängel und Kolben signifikant auf dem Boden Malchow. Die Bakterien erhöhten im Jahr 2001 wiederum das P im Kolben signifikant und in alle Pflanzenorgane im zweiten Versuchsjahr tendenziell.

Cadmium (Cd)

Die Cd-Konzentrationen lagen in den oberirdischen Pflanzenorganen des Bodens Malchow unter dem Grenzwert der Futtermittelverordnung (nach §§ 23, 24 und 26 mit 21) von 1 mg Cd/kg TS (Tab. im Anh. 5 u. 6). Ohne gezielte Behandlung reichert sich Cd in der Wurzel und im unteren Pflanzenbereich stark an, wandert mit dem Transpirationsstrom in die oberirdischen Pflanzenteile und akkumuliert in den oberen Blattetagen. Es kommt zu einer gleichmäßigen Verteilung in die Blätter. Durch die Mykorrhizapilze kam es tendenziell zu reduzierten Aufnahmen in die oberirdischen Pflanzenteile. Im Jahr 2001 waren im Stängel durch AM und AMB die reduzierten Werte bis 45 % signifikant verschieden zur Kontrolle (Anh. 5). Die Cd-Anreicherung in den Wurzeln konnte durch die Bakterien und AM im Jahr 2002 bis 41 % signifikant verringert werden (Anh. 6).

Die Cd-Konzentrationen des Bodens Großbeeren lagen in den Stängeln und Blättern weit über dem Grenzwert der Futtermittelverordnung zwischen 7 und 33 mg/kg TM; die Aufnahme in die Maiskörner war bis 0,3 mg/kg TS sehr gering. Durch die behandelten Varianten wurden uneinheitliche Wirkungen auf das Aufnahmeverhalten des Cd beobachtet. Im Jahr 2001 (Anh. 7) konnten die Cd-Konzentrationen in den Blättern und Maiskörner durch AM im Vergleich zu den Bakterien signifikant bis 34 % reduziert werden, erhöhten sich aber im Folgejahr bis 19 % ohne statistische Absicherung (Anh. 8). Tendenzuell kam es zu einer Erhöhung des Cd in die Wurzel durch die Bakterienbeimpfung in beiden Versuchsjahren.

Kupfer (Cu)

Cu wird gut durch die Pflanzenwurzeln aufgenommen und gleichmäßig in den Blattetagen und in den Blättern verteilt. Die AMB -Maispflanzen zeigten im Boden Malchow des Jahres 2001 signifikant erhöhte Cu-Gehalte im Maisstängel von 4,1 mg Cu/kg TS (Anh. 5). Die Bakterien-Varianten wiederum bewirkten eine signifikante Cu-Abnahme in den Wurzeln des Jahres 2002, verglichen mit allen anderen Varianten (Anh. 6).

Auf dem Boden Großbeeren reduzierte sich der Cu-Gehalt durch AM in den oberirdischen Pflanzenteilen im ersten Jahr tendenziell, in den Blättern signifikant um 23 % (Anh. 7). Bei allen Varianten wurde aber der Grenzwert der Futtermittelverordnung nach §§ 23, 24 und 26 mit 21 bis 42 mg Cu/kg TS in der Kontrolle deutlich überschritten. In Stängel und Kolben lagen die Werte weit unter dem Grenzwert, konnten aber durch die Dualbeimpfung signifikant gesteigert werden, verglichen mit den Bakterienvarianten. Die Cu-Aufnahme im Boden Großbeeren gestaltete sich im Folgejahr ebenso heterogen wie beim Cd (Anh. 8).

Nickel (Ni)

Ni reichert sich im Wurzel- und unterem Pflanzenbereich an. Dieses verbleibt in den unteren Blattetagen, verteilt sich aber gleichmäßig in den Blättern. Durch die Bakterien wurde Ni im Boden Malchow in die Blätter und durch die Dualbeimpfung in den Stängel verstärkt transportiert (Anh. 5 u. 6).

Die Aufnahme des Ni im Boden Großbeeren konnte durch die Mykorrhizierung im Jahr 2001 in die gesamte Pflanze gefördert werden (Anh. 7), im zweiten Versuchsjahr nur in Blätter und Stängel (Anh. 8). Die Ni-Aufnahme blieb durch die Bakterieninokulation unbeeinflusst.

Zink (Zn)

Zn wird stark durch die Pflanzenwurzeln aufgenommen und reichert sich in den oberen Blattetagen und in den Blatträndern an. Während die Zn-Aufnahme in die oberirdischen Pflanzenteile durch die Bakterieninokulation auf beiden Böden, in die Stängel im Jahr 2001 auch signifikant, reduziert wurde, kam es durch die AM- und AMB-Infektion zu einer Steigerung des Zn in die Blätter. Die Wurzelgehalte blieben relativ unbeeinflusst von den Behandlungen (Anh. 5-8).

4.1.7 Bodenlösung der Maisgefäße

Der Verlauf der pH-Werte und die Nähr- und Schadelemente in den Bodenlösungen wurde als Polynom der Vegetationsperiode dargestellt.

pH-Wert

Die pH-Werte im Boden Malchow, 2001 verliefen zwischen 5,5 und 7,5. Die entnommenen Bodenlösungen der Kontrollpflanzen lagen überwiegend im sauren Bereich und unterschieden sich im Kurvenverlauf zwischen der Pilzvariante von der 20. bis 25. KaW und die Dualbeimpfung von der 21. bis 24. KaW. Im Folgejahr lagen die pH-Werte insgesamt im neutralen bis basischen Bereich, wobei sich die Werte der Kurven nicht unterschieden.

Der Boden Großbeeren war bei den ersten Messungen saurer als der Boden Malchow. Der Verlauf der pH-Werte im Jahr 2001 erfuhr bei allen Varianten im Mais eine Zunahme vom sauren (pH 5) bis in den neutralen Bereich (pH 7,5). Im Folgejahr sahen die Werte ähnlich aus bei einem Anfangs-pH um 6. Die Varianten unterschieden sich nicht voneinander (Abb. 8).

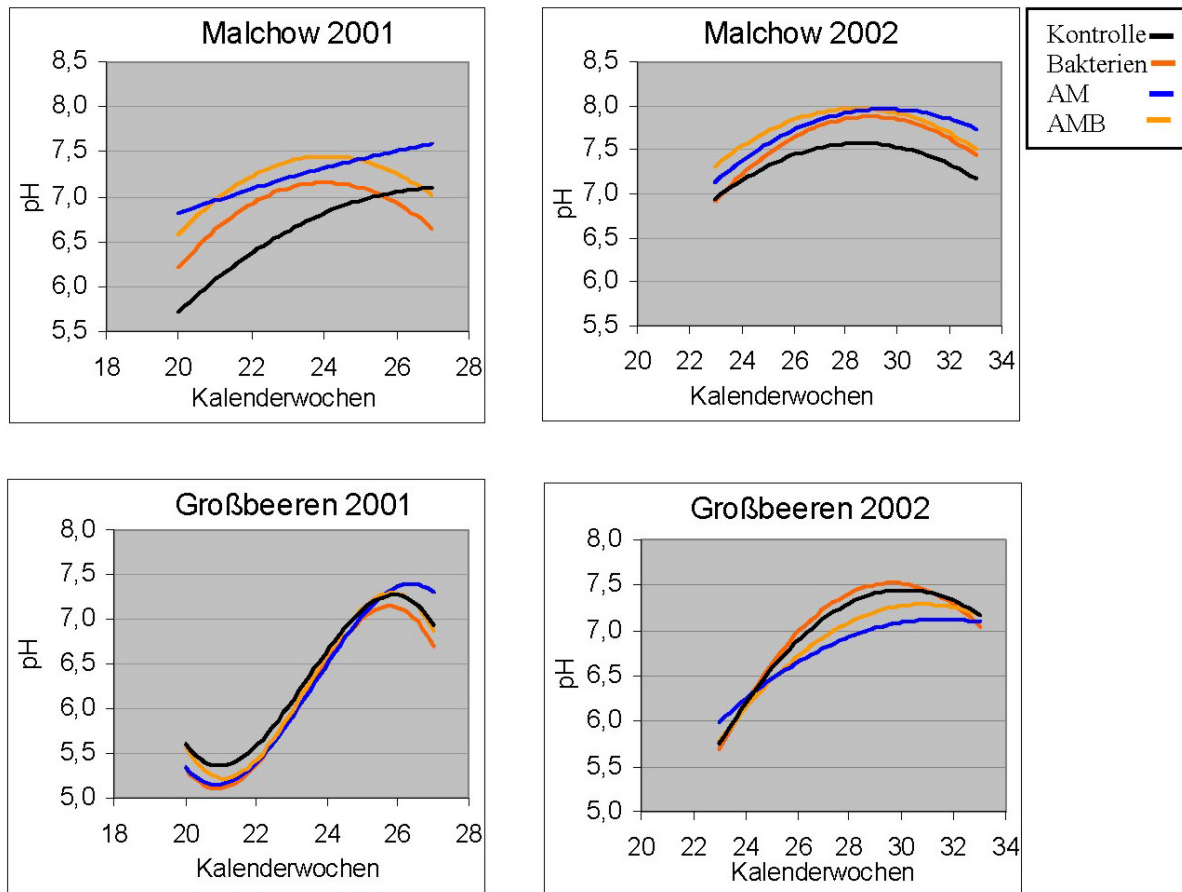


Abb. 8: pH Werte in der Bodenlösung im Mais im mäßig belasteten Boden Malchow und im hoch belasteten Boden Großbeeren 2001/02

Cadmium

Die Kurvenverläufe des Cd der Kontrolllösungen im Boden Malchow (2001) unterschieden sich von den Pilzvarianten zwischen der 24. und der 27. KaW (Abb. 9). Durch die Mykorrhiza wurde deutlich weniger Cd im Bodenwasser gelöst. Durch den höheren pH-Wert ist Cd weniger pflanzenverfügbar. Im Jahr 2002 wurde insgesamt bis zur Hälfte weniger Cd in den Bodenlösungen gefunden, da die pH-Werte in dem Jahr im neutralen Bereich lagen. Die Verläufe unterschieden sich nicht voneinander.

Das Cd in der Bodenlösung des Bodens Großbeeren im Jahr 2001 nahm während der Vegetationsperiode von 0,7 mg Cd/l bis unter 0,2 mg Cd/l ab. Die Konzentration des Cd in den Mykorrhizaprobe war geringer und unterschied sich im Abnahmeverlauf von den übrigen Varianten. Im Folgejahr war nur die halbe Cd-Konzentration in den Bodenlösungen messbar und keine Unterschiede zwischen den Varianten zu ermitteln.

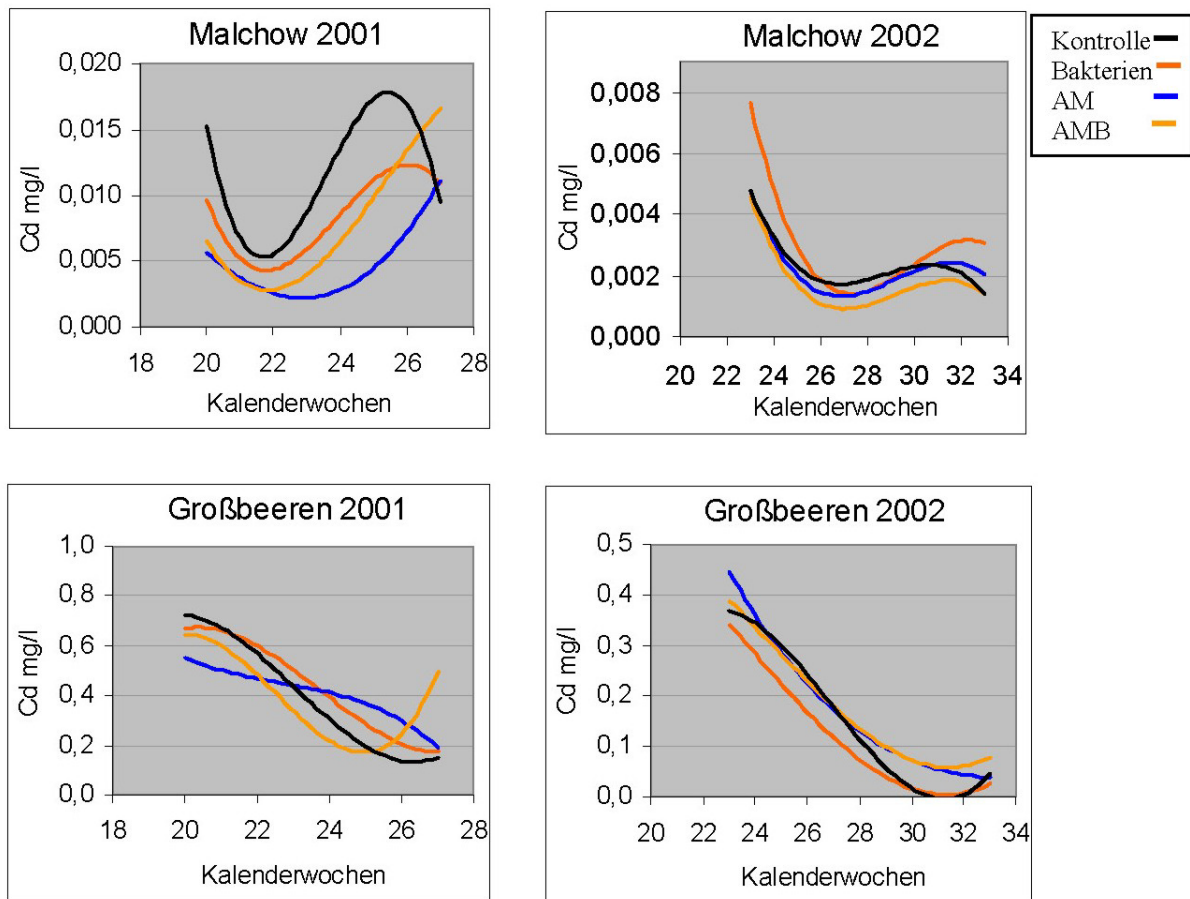


Abb. 9: Cd n der Bodenlösung im Mais im mäßig belasteten Boden Malchow und im hoch belasteten Boden Großbeeren 2001/02

Kupfer

Das Cu in der Bodenlösung erfuhr im Jahr 2001 eine Abnahme von 0,4 bis 0,2 mg Cu/l über die Vegetationsperiode in allen Varianten; durch AM war diese Abnahme am stärksten ausgeprägt. Im Jahr 2002 hingegen kam es zu einer Zunahme des Cu in der Bodenlösung. Die Zunahme erfolgte durch die Bakterienvarianten über 0,5 mg Cu/l und unterschied sich in den Werten von der Kontrolle in der 27. bis 29. KaW.

Durch AM wurde die Löslichkeit des Cu im Boden Großbeeren herabgesetzt. Die Kurve der Pilzvariante unterschied sich mit der Kurve der Kontrolle zwischen der 20. und 24. KaW. Insgesamt nahm die Löslichkeit bei allen Varianten ab und stieg zum Ende der Vegetations-Periode wieder an. Im Jahr 2002 zeichnete sich ein anderer Löslichkeitsverlauf ab. Nach einer leichten Abnahme erfolgte ab der 25. KaW eine Zunahme bei allen Varianten. Die Bakterienvariante unterschied sich zwischen der 26. und 28. KaW von allen anderen Varianten und erfuhr eine Cu-Zunahme in der Bodenlösung bis zu 1,3 mg Cu/l (Abb. 10).

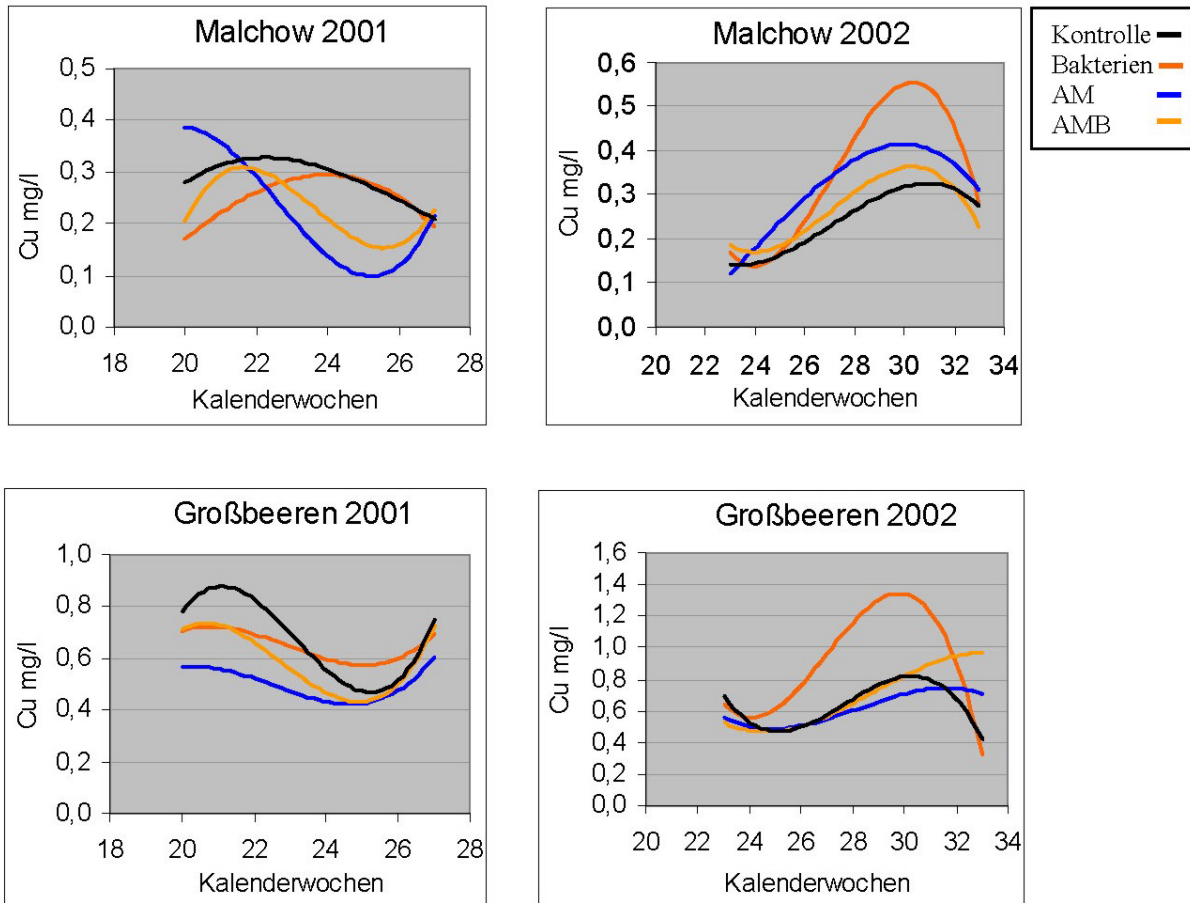


Abb. 10: Cu n der Bodenlösung im Mais im mäßig belasteten Boden Malchow und im hoch belasteten Boden Großbeeren 2001/02

Kalium

Die K-Gehalte in den Bodenlösungen nahmen in beiden Versuchsjahren sehr schnell ab und waren insgesamt sehr niedrig. K wird verstärkt während der Wachstumsphase aufgenommen. Zur Fruchtreife benötigt die Pflanze kaum K.

Die Bakterienvarianten wiesen Gehalte bis 160 mg K/l (2001) und 20 mg K/l (2002) auf, die sich in den Werten der ersten 4 Wochen von den anderen Varianten unterschieden.

Wie beim Boden Malchow waren die Gehalte des K im Boden Großbeeren des Jahres 2001 in der Bakterienvariante bis 250 mg K/l signifikant erhöht gegenüber den Vergleichsvarianten von Beginn der Vegetationsperiode bis zur 24. KaW. Die Freisetzung des K im Folgejahr zeigte ein ganz anderes Bild. Das K in der Kontrolle, Bakterienvariante und Dualbeimpfung nahmen ebenfalls ab über die Messzeit, aber auf einem niedrigeren Niveau. Nur das K in der Pilzvariante nahm bis zur Hälfte der Vegetationsperiode bis 70 mg K/l zu, um dann erst abzunehmen. Zwischen der 26. und 30. KaW unterschieden sich die Werte der Pilzvariante und den Vergleichsproben (Abb. 11).

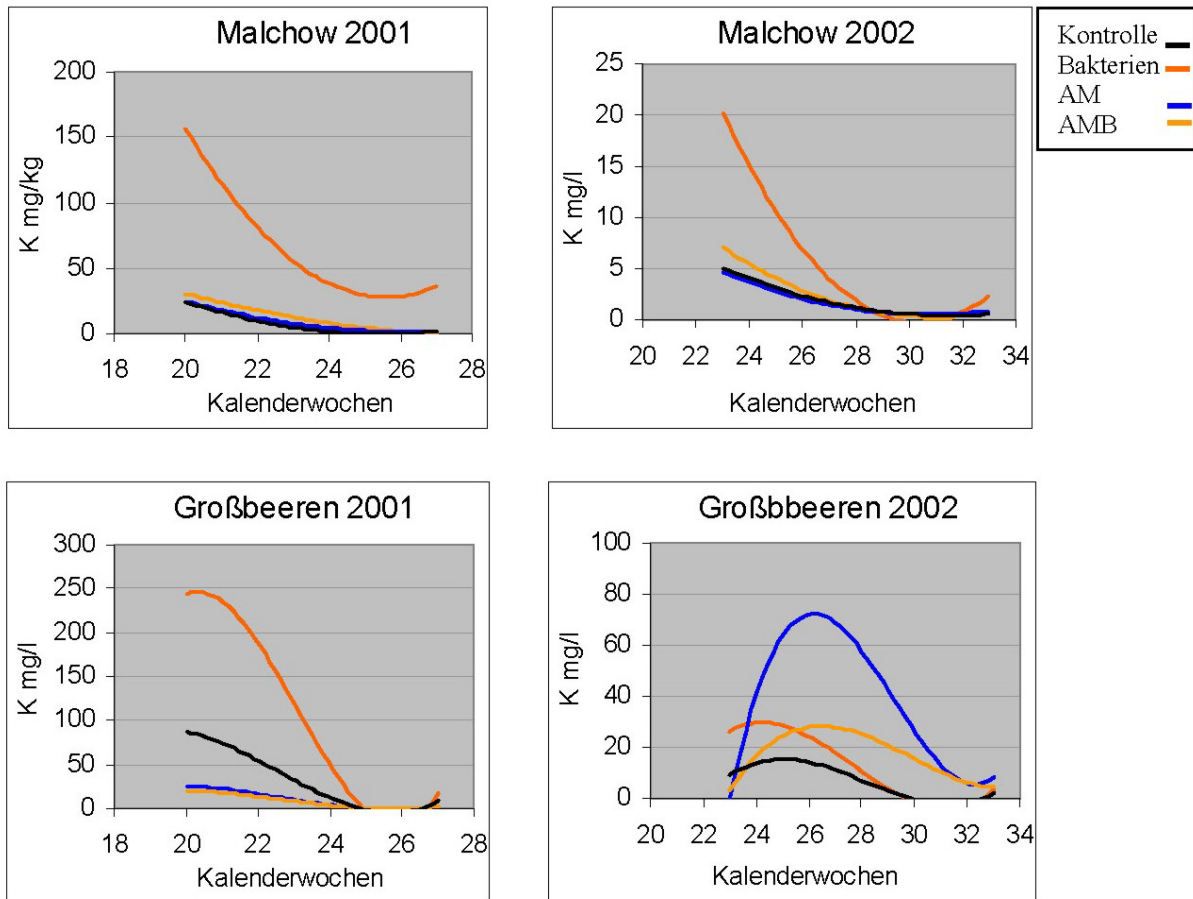


Abb. 11: K in der Bodenlösung im Mais im mäßig belasteten Boden Malchow und im hoch belasteten Boden Großbeeren 2001/02

Phosphor

Die P-Gehalte waren in den Bodenlösungen insgesamt sehr niedrig (Abb. 12). Im Boden Malchow 2001 wurden durch die Dualbeimpfung mit Pilz und Bakterien Werte bis zu 10 mg P/l ermittelt. Diese unterschieden sich auch in den Werten von den übrigen Varianten in den ersten drei KaW. Im Folgejahr verliefen die P-Gehalte der Varianten während der Vegetationsperiode relativ parallel mit einem Höchstgehalt von 1,5 mg P/l.

Die P-Löslichkeit im hoch belasteten Boden Großbeeren unterschied sich von dem mäßig belasteten Boden Malchow deutlich durch die verschiedenen Behandlungen. Die niedrigsten P-Gehalte von 5 mg P/l als erster Wert wurden in den Proben der Dualbeimpfung gemessen. Die Werte unterschieden sich zwischen der 20. und 24. KaW von der Bakterienvariante mit 8 mg P/l. Die Kontrolle und die Pilzvariante lagen zwischen den beiden Extremwerten. Bis zum Ende der Vegetationsperiode fielen alle P-Gehalte bis auf die Bakterienvariante zwischen 1 und 0 ab. Im Jahr 2002 wurden insgesamt nur noch halb so hohe Konzentrationen bei allen Varianten gemessen mit den höchsten Werten in der Bakterienvariante und den niedrigsten bei der Dualbeimpfung. Der Abfall der P-Konzentration war nicht so steil wie im Jahr 2001.

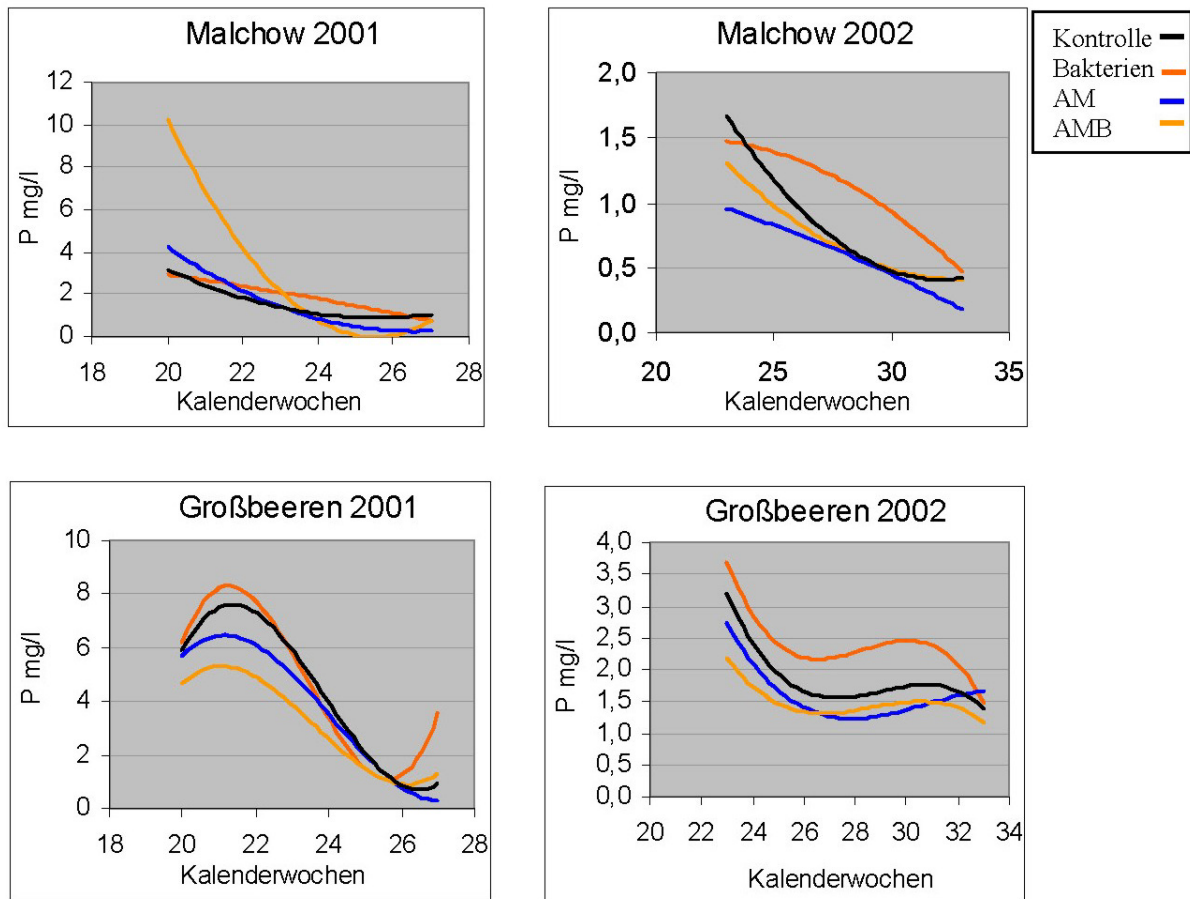


Abb. 12: P n der Bodenlösung im Mais im mäßig belasteten Boden Malchow und im hoch belasteten Boden Großbeeren 2001/02

4.2 Wirkung der Mykorrhiza und assoziativen Bakterien auf die Entwicklung des Weidelgrases im Mitscherlich-Gefäßversuch 2001/02

4.2.1 Erträge und Ertragsstruktur des Weidelgrases

Im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Weidelgras wurden während der Vegetationsperiode drei Schnitte vorgenommen und die FM und TM bestimmt. Durch die Bakterieninokulation konnte die FM auf beiden Böden tendenziell eine Ertragssteigerung erzielt werden. Auch die AM-Infektion verhalf zu höheren Erträgen im Boden Malchow, jeweils zum ersten Schnitt. Die Dualbeimpfung erzielte ähnliche Erträge wie die Bakterieninokulation. Durch AMB konnte im Boden Malchow im ersten Versuchsjahr die FM des Weidelgrases gesteigert werden, zum ersten Schnitt auch signifikant (Tab. 24). Diese Ergebnisse bestätigten sich nicht im Folgejahr. Bei den TM-Erträgen waren durch AM und AMB signifikante Steigerungen nur im zweiten Versuchsjahr im ersten Schnitt ermittelt worden (Tab. 25). Auf dem Boden Großbeeren wurde die FM durch die Bakterieninokulation zum Teil signifikant gegenüber der Mykorrhizavariante gesteigert (Tab. 26). Dies bedeutet eine bessere Wasseraufnahme durch die Bakterien, da aber die TM-Erträge nicht zwangsläufig auch erhöht waren, wurden durch AM die Einlagerung von festen Bestandteilen wie beispielsweise Cellulose gefördert (Tab. 27). Der Einsatz der Dualbeimpfung brachte keine eindeutige Verbesserung. Im Jahr 2002 wurden zum zweiten und dritten Schnitt sogar signifikante Mindererträge ermittelt.

Tab. 24: Weidelgraserträge als FM in g/Gefäß im mäßig belasteten Boden Malchow, 2001/02

Variante	Versuchsjahr 2001			Versuchsjahr 2002		
	1. Schnitt	2. Schnitt	3. Schnitt	1. Schnitt	2. Schnitt	3. Schnitt
Kontrolle	129,1b	107,2	35,8	101,4	73,2	32,8
Bakterien	145,5ab	115,4	38,3	98,9	73,9	37,7
AM	153,2a	109,0	32,7	104,1	71,8	32,5
AMB	157,0a	117,0	36,7	102,6	57,7	33,0

Tab. 25: Weidelgraserträge als TM in g/Gefäß im mäßig belasteten Boden Malchow, 2001/02

Variante	Versuchsjahr 2001			Versuchsjahr 2002		
	1. Schnitt	2. Schnitt	3. Schnitt	1. Schnitt	2. Schnitt	3. Schnitt
Kontrolle	15,2	14,5	4,2	9,4ab	7,0	6,2
Bakterien	14,9	14,5	4,4	8,2b	7,2	5,7
AM	15,1	14,1	5,1	10,5a	6,6	3,5
AMB	17,4	14,8	4,3	10,7a	6,6	4,1

Tab. 26: Weidelgraserträge als FM in g/Gefäß im hoch belasteten Boden Großbeeren, 2001/02

Variante	Versuchsjahr 2001			Versuchsjahr 2002		
	1. Schnitt	2. Schnitt	3. Schnitt	1. Schnitt	2. Schnitt	3. Schnitt
Kontrolle	172,4ab	104,9	57,7ab	84,5	135,5a	88,2a
Bakterien	182,2a	137,7	72,3a	86,2	132,6a	98,0a
AM	137,8b	98,3	41,6b	91,7	118,2a	63,1b
AMB	202,2a	108,9	54,9ab	86,3	61,0b	55,5b

Tab. 27: Weidelgraserträge als TM in g/Gefäß im hoch belasteten Boden Großbeeren, 2001/02

Variante	Versuchsjahr 2001			Versuchsjahr 2002		
	1. Schnitt	2. Schnitt	3. Schnitt	1. Schnitt	2. Schnitt	3. Schnitt
Kontrolle	18,3	16,5	6,7ab	7,3	12,1a	17,6ab
Bakterien	15,6	17,6	8,5a	7,5	12,4a	19,5a
AM	16,2	13,2	4,1b	9,6	12,0a	13,1b
AMB	19,3	14,6	4,9ab	8,4	6,6b	8,3c

4.2.2 Mykorrhizierung der Weidelgraswurzeln

Die Mykorrhizierung der Wurzeln wurde erst nach Beendigung des Versuchs bestimmt, um das Pflanzenwachstum nicht zu beeinträchtigen. Der prozentuale Anteil der Mykorrhizastrukturen in den Graswurzeln war bei den Pflanzen des Bodens Malchow insgesamt höher als die im Boden Großbeeren (Abb. 13). Im ersten Versuchsjahr wurden bei den nicht infizierten Proben der Bakterienvariante bis zu 27 % Mykorrhizastrukturen gefunden und 11 % in den Kontrollwurzeln. Die infizierten Varianten wiesen eine Mykorrhizierung von 48 % auf, die sich signifikant von der Kontrolle und den Bakterien unterschieden. Im Folgejahr lagen die infizierten Varianten auf dem gleichen Niveau, es konnte aber eine Steigerung der Bakterienvariante um 14 % auf 41 % ermittelt werden. Dies deutet auf eine Förderung der autochthonen Mykorrhiza durch die Bakterien hin. Auch auf dem Boden Großbeeren unterschieden sich in beiden Jahren die infizierten Varianten signifikant von der Kontrolle und den Bakterien, wobei im 2. Versuchsjahr wiederum eine Förderung der autochthonen AM durch die Bakterieninfektion um 13 % zu verzeichnen war.

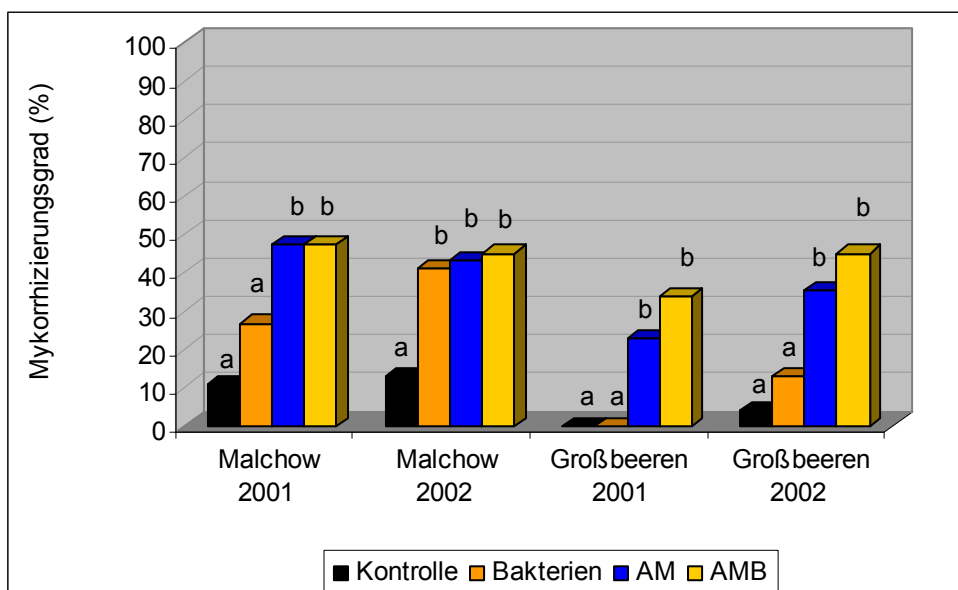


Abb. 13: Mykorrhizierung des Weidelgrases im Mitscherlich-Gefäßversuch im Boden Malchow und Großbeeren der Jahre 2001/02

4.2.3 Nähr- und Schadelemente im Weidelgras der Böden Malchow und Großbeeren

Die Gehalte der Nährelemente Ca, K, Mg und P und die Schwermetalle Cd, Cu, Ni und Zn wurden in allen drei Schnitten und in den Wurzeln zum letzten Schnitttermin bestimmt.

Calcium

Die Ca-Gehalte wurden in allen Schnitten des Weidelgrases auf dem Boden Malchow im ersten Versuchsjahr durch die Pilzinfektion erhöht, teilweise auch signifikant (Anh. 9). Die Ergebnisse bestätigten sich nicht im Jahr 2002 (Anh. 10). Im Gegensatz dazu wurden im Boden Großbeeren die Ca-Gehalte durch die Pilze und Bakterien in beiden Versuchsjahren reduziert (Anh. 11-12). Die Wurzelaufnahmen blieben in beiden Böden und Jahren relativ unbeeinflusst von den zugeführten Mikroorganismen.

Kalium

K wiederum erhielt eine Förderung durch die Bakterien im ersten Versuchsjahr auf beiden Böden (Anh. 9 u. 11). Im zweiten Versuchsjahr wurde die K-Aufnahme durch die Dual-beimpfung in allen drei Schnitten auf dem Boden Großbeeren bis zu 85 % gesteigert (Anh.12).

Magnesium

Die Mg-Aufnahme wurde auf dem Boden Malchow durch die Rhizosphären - Mikroorganismen nicht gefördert (Anh. 9 u. 10). Im Boden Großbeeren hingegen zeichnete sich eine verbesserte Mg-Aufnahme durch die Dualbeimpfung in die oberirdische Biomasse ab. Die Bakterien dagegen erhöhten die Mg-Gehalte in der Wurzel auf dem Boden Großbeeren (Anh. 11 u. 12).

Phosphor

Die P-Aufnahme wurde partiell durch die Bakterien in beiden Böden und Versuchsjahren gefördert mit statistischer Absicherung (Anh. 9-12). Dagegen war die Wirkung durch die Mykorrhizapilze gering, lediglich auf dem Boden Malchow 2002 (Anh. 9) förderten die Pilze die P-Aufnahme bis 13 %, signifikant zur Kontrolle.

Cadmium

Der Einfluss der Rhizosphären - Mikroorganismen auf die Cd-Aufnahme des Bodens Malchow ließ keine klare Linie erkennen (Anh. 13 u. 14).

Auffällig war die Förderung der Cd-Aufnahme auf dem Boden Großbeeren durch die singulären und dualen Pilzbeimpfungen mit Bakterien in die Grünmasse, auch in die Wurzeln (Anh. 13 u. 14). Dies deckt sich nicht mit den Ergebnissen der Maispflanzen, da die Mikroorganismen zu einer Reduktion der Cd-Gehalte in den Blättern und Stängel tendierten.

Kupfer

Die Cu-Aufnahme gestaltete sich durch den eingesetzten Mikroorganismen auf beiden Böden sehr heterogen. Durch die Dualbehandlung ließ sich partiell eine Reduktion der Cu-Aufnahme in die Grünmasse auf dem Boden

Malchow vermuten Die Gehalte in den Wurzeln differierten nicht. Auffällig war die allgemeine Reduktion der Cu-Aufnahme im Jahr 2002, verglichen mit dem ersten Versuchsjahr.

Im Boden Großbeeren wurden in beiden Jahren der vorgegebene Grenzwert der Futtermittel-verordnung von 15 mg Cu/kg (bezogen auf 88 v. H. TS) überschritten (Anh. 15 u. 16). Zum dritten Erntetermin des Jahres 2001 konnte eine signifikante Reduktion mit der Anwendung der Bakterien, der AM und als Dualbeimpfung unter den Grenzwert erreicht werden.

Nickel

Die Ni-Aufnahme war bei allen Varianten im Weidelgras sehr gering. Auf dem Boden Malchow (Anh. 13 u. 14) lag sie zwischen 1,4 und 4,8 mg/kg TS und auf dem Boden Großbeeren zwischen 13,5 und 29 mg Ni/kg TS in der Grünmasse (Anh. 15 u. 16). Wie beim Cu reduzierte sich die Ni-Aufnahme durch die Dualbeimpfung und partiell auch durch die singuläre Beimpfung der AM. Die Bakterienvarianten trugen im Boden Großbeeren im ersten Versuchsjahr zu einer Erhöhung der Ni-Aufnahme bei, und im zweiten Jahr zu einer signifikanten Reduktion des Zn in die oberirdische Pflanzenmasse.

Zink

Die Zn-Aufnahme gestaltete sich sehr heterogen. Tendenziell reduzierten die Mikro-organismen der Dualbeimpfung die Aufnahmeraten des Zn in das Weidelgras auf beiden Versuchsböden, wobei die Werte auf dem Boden Großbeeren signifikant waren (Anh. 13-16).

4.2.4 Bodenlösung der Weidelgrasgefäße

pH-Wert in der Bodenlösung

Die pH-Werte in der Bodenlösung des Bodens Malchow stiegen über die Vegetationsperiode im Jahr 2001 bei allen Varianten zwischen 6 und 7,5 an. Im Folgejahr lagen die Werte um 0,5 pH in den basischen Bereich verschoben. Der Kurvenverlauf der Kontrolle lag um 0,3 pH höher als die der Bakterien-Variante zwischen der 25. und 27. KaW (Abb. 14). Zu Vegetationsbeginn lagen die pH-Werte der Bodenlösungen im Boden Großbeeren im sauren Bereich um pH 5 und stiegen steil im Vegetationsverlauf bis über pH 7,5 bei allen Varianten. Im Jahr 2002 waren die Anfangswerte um 1 pH-Wert höher, stiegen bis pH 7,5 um dann wieder unter pH 7 zu gehen. Die beiden Pilzvarianten AM und AMB wiesen die höchsten pH-Werte in der Vegetationsperiode auf. Zwischen der 26. und der 29. KaW unterschieden sich die Werte der Kontrollkurve mit der AMB-Kurve.



Abb. 14: pH-Werte der Bodenlösung im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Weidelgras im mäßig belasteten Boden Malchow und im hoch belasteten Boden Großbeeren

Cadmium

Die Cd-Gehalte in der Bodenlösung des Bodens Malchow lagen zwischen 0,01 mg Cd/l und 0,03 mg Cd/l in beiden Versuchsjahren. Die Varianten boten keine bemerkenswerten Abweichungen voneinander. Lediglich in der AM-Variante unterschieden sich in den ersten 14 Tagen des 2. Versuchsjahres die Werte um 0,02 mg Cd/l von den anderen Varianten.

Im Boden Großbeeren erreichten die Gehalte die 100fache Konzentration Cd von der Bodenlösung des Bodens Malchow. In der Kontrolllösung im Jahr 2001 wurde die höchste Konzentration von 1,4 mg Cd/l gemessen mit einem deutlichen Unterschied zu den behandelten Varianten in den ersten 14 Tagen. Zum Ende der Vegetationszeit fielen die Konzentrationen der Kontrolle auf 0,07 mg Cd/l ab. Die Cd-Konzentrationen waren im Folgejahr um 2/3 deutlich niedriger, wieder mit den höchsten Konzentrationen in der Kontrolle mit großen Unterschieden zu der Bakterienvariante und der Dualbeimpfung zu Beginn der Vegetationszeit (Abb. 15).

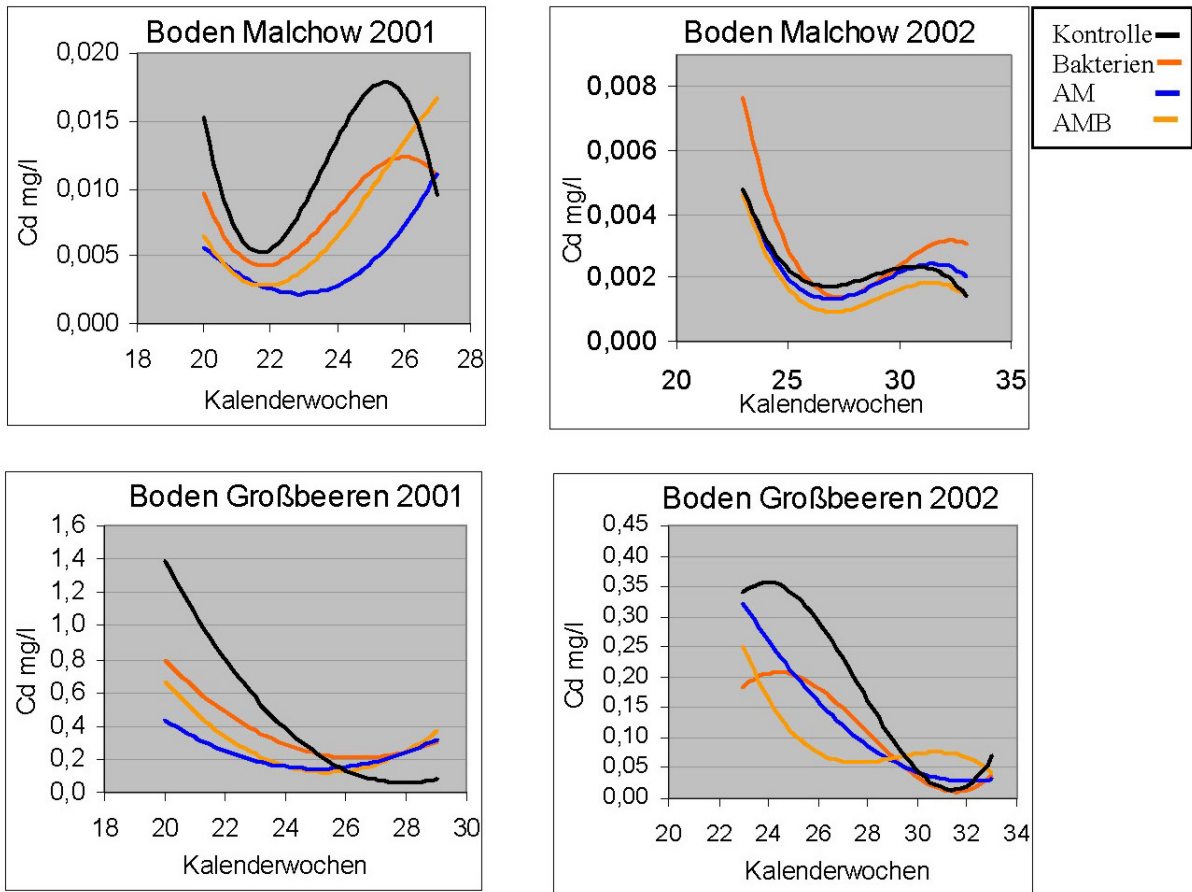


Abb. 15: Cd in der Bodenlösung im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Weidelgras im mäßig belasteten Boden Malchow und im hoch belasteten Boden Großbeeren

Kupfer

Die Cu-Konzentrationen in der Bodenlösung entwickelten sich in beiden Versuchsböden- und Jahren recht unterschiedlich. Im Jahr 2001 konnten auf dem Boden Malchow bei allen Varianten Zunahmen ermittelt werden, wobei die Pilzvarianten ein um 0,05 mg Cu/l niedrigeres Anfangsgehalt besaßen und sich von den Kurven der Kontrolle und Bakterien zwischen der 23. und der 28. KaW unterschieden. Im Folgejahr wurden die höchsten Gehalte in der Kontrolllösung gemessen. Nach einer Cu-Abnahme folgte eine Zunahme während der Wachstumsphase und zu Vegetationsende wiederum eine Abnahme. Im Boden Großbeeren wurden die niedrigsten Konzentrationen in der Dual- und der Bakterienvariante gemessen, die sich in der 22. bis 24. KaW von der Kontrolle unterschieden und im Gegensatz zur Kontrolle und AM langsam anstiegen. Die Konzentration der AM nahm stärker als die Kontrolle ab, um dann zu Vegetationsende wieder anzusteigen. Im Jahr 2002 verliefen die Kurven der Varianten parallel mit einem steilen Anstieg, um dann wieder schnell abzufallen. In der Bakterienvariante wurden die niedrigsten Konzentrationen gemessen (Abb. 16).

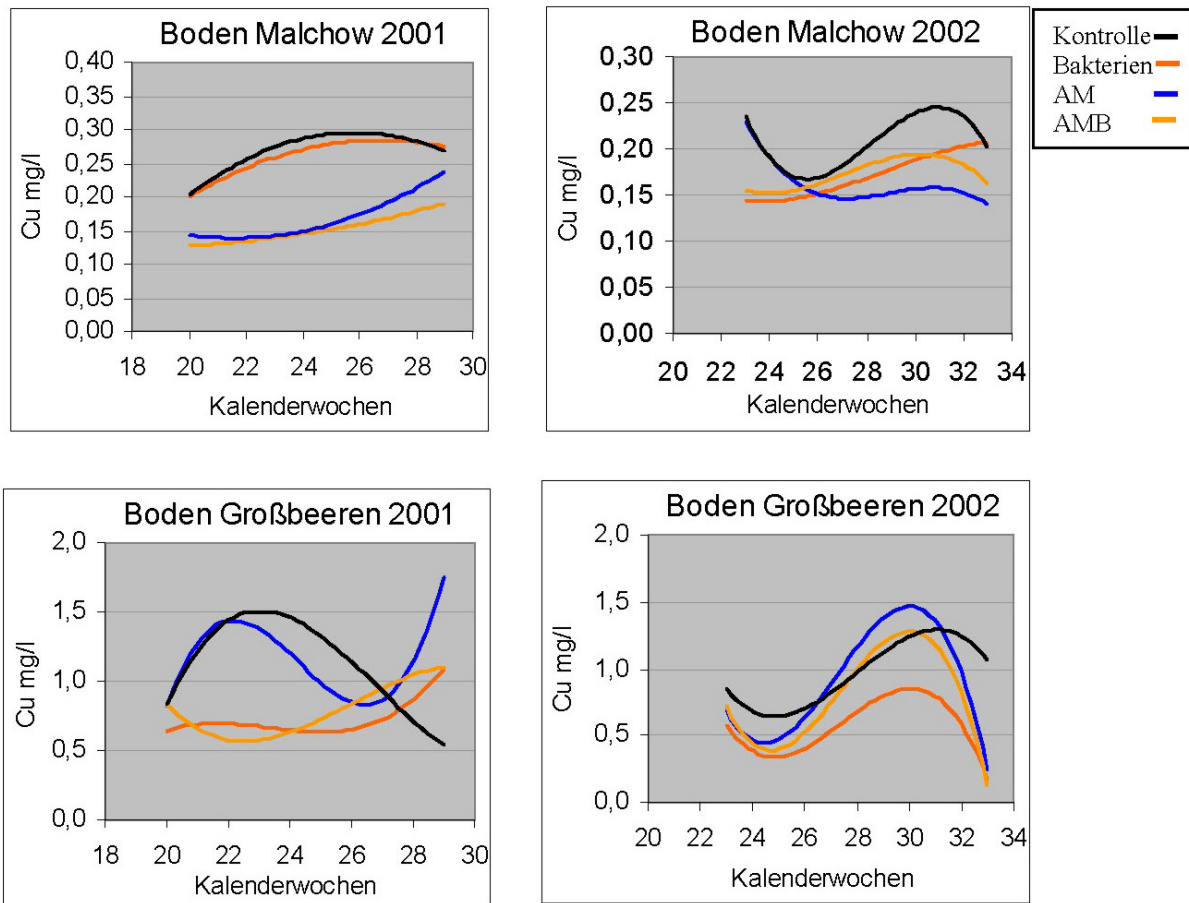


Abb. 16: Cu in der Bodenlösung im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Weidelgras im mäßig belasteten Boden Malchow und im hoch belasteten Boden Großbeeren

Kalium

K als mobiles Element wurde von den Pflanzen sehr schnell aufgenommen; die Abnahmen des K in den Bodenlösungen belegen dies (Abb. 17). Durch die Nachdüngung mit Rotkorn kam es bei allen Versuchen zu einer Zunahme des K zu Vegetationsmitte. In den ersten 3 Wochen des Versuches auf dem Boden Malchow im Jahr 2001 waren die K-Werte der AM-Variante am niedrigsten und unterschieden sich von der Kontrolle, Bakterien und AMB. Im Folgejahr wurden insgesamt höhere K-Gehalte gemessen. Im Boden Großbeeren mit 10 % organischer Substanz konnten die Schad- und Nährelemente an Huminstoffe gebunden werden. Dadurch erklären sich die hohen K-Gehalte. In der Bodenlösung der Kontrollpflanzen wurden die höchsten Konzentrationen von 164 mg K/l gemessen und unterschieden sich mit denen der Bakterien in der 20. – 23. KaW und mit den Pilzvarianten bis zur 24. KaW. Im Jahr 2002 kam es durch die Mykorrhizapilze zu höheren K-Werten, die sich mit den anderen Varianten einschließlich Kontrolle in den ersten 3 Messwochen signifikant unterschieden.

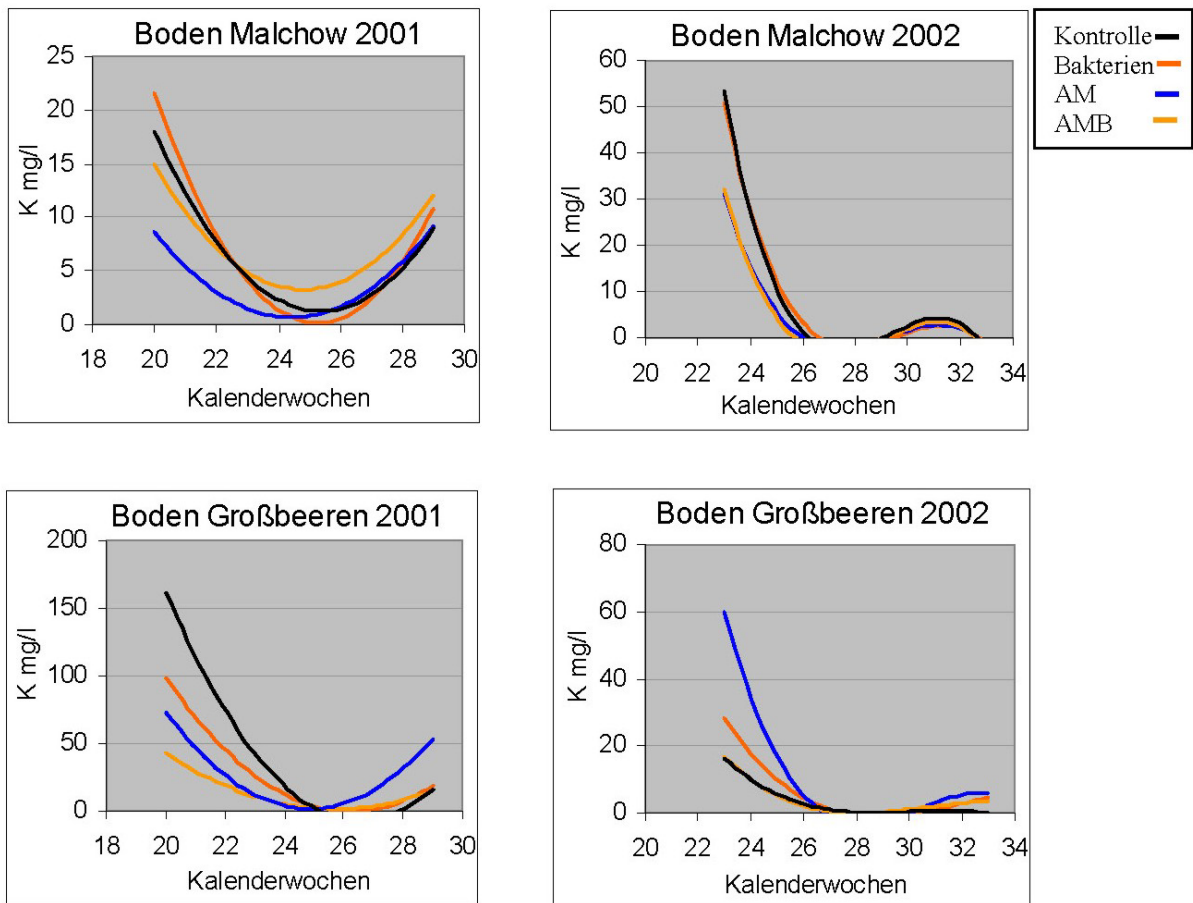


Abb. 17: K in der Bodenlösung im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Weidelgras im mäßig belasteten Boden Malchow und im hoch belasteten Boden Großbeeren

Phosphor

Die höchsten P-Konzentrationen im Boden Malchow 2001 nahmen stetig ab mit den höchsten Konzentrationen in der Bakterienvariante, die sich von AM zwischen der 20. und 25. KaW und AMB zwischen der 21. und 24. KaW unterschieden. Im Folgejahr verringerten sich die P-Gehalte sehr schnell um dann ab der 26. KaW wieder anzusteigen. In den ersten beiden Wochen der Messzeit konnten in den Kontrolllösungen höhere Gehalte im Vergleich zu Bakterien und AMB gemessen werden. Der steilste Anstieg erfolgte bei AMB und unterschied sich in den Werten von AM und Bakterien zwischen der 31. und 33. KaW. Der P-Gehalt in der Bodenlösung des Bodens Großbeeren nahm über die Vegetationszeit in beiden Versuchsjahren kontinuierlich ab, ohne dass sich die Varianten voneinander unterschieden. Die Gehalte im Jahr 2002 waren um 2/3 niedriger als im Vorjahr (Abb. 18).

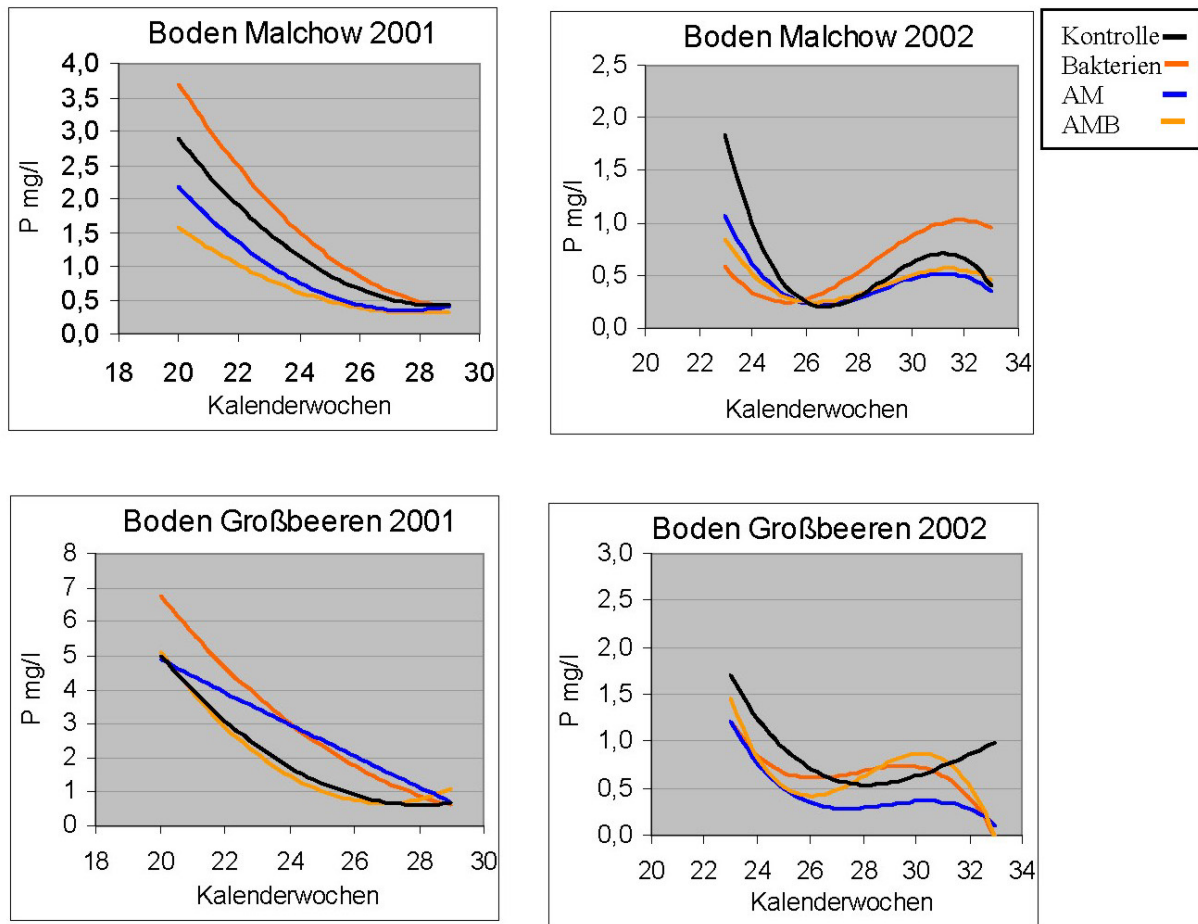


Abb. 18: P in der Bodenlösung im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Weidelgras im mäßig belasteten Boden Malchow und im hoch belasteten Boden Großbeeren

4.3 Wirkung der Mykorrhiza und assoziativen Bakterien auf die Entwicklung der Sonnenblumen im Gefäßversuch 2001/02

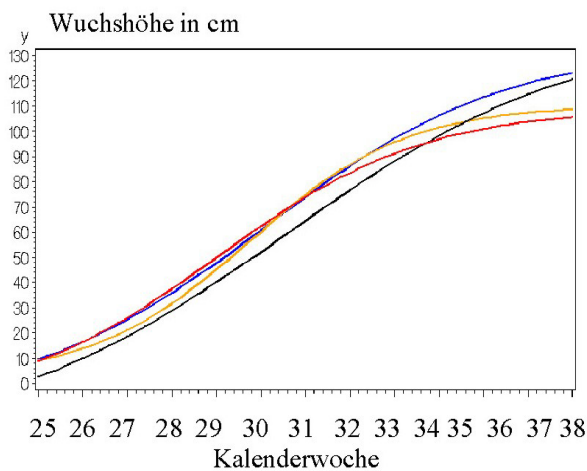
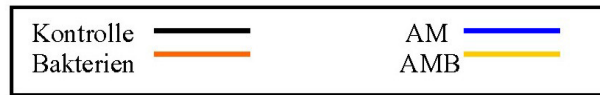
In den Versuchsjahren 2001 und 2002 wurden der Einfluss zwei verschieden stark belasteter Böden mit Cd, die Beimpfung des Bakterienstammes *Pseudomonas fluorescens* RA56 und der Mykorrhizapilz *Glomus intraradices* auf den Ertrag und die Schwermetallaufnahme der Sonnenblume überprüft. Die Gefäßversuche wurden unter standardisierten Gewächshausbedingungen durchgeführt.

4.3.1 Wachstumsverlauf der Sonnenblumen

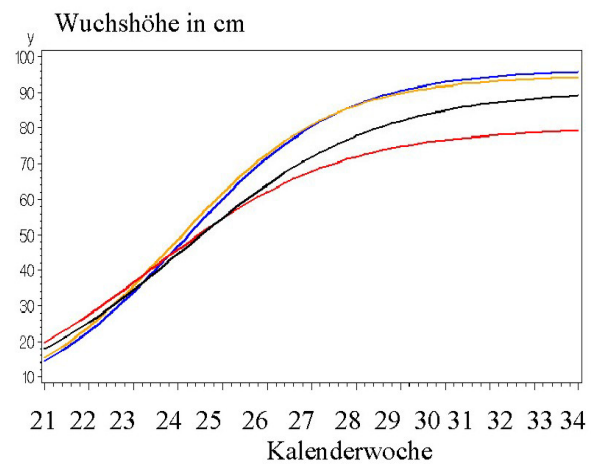
Nach dem Aufgang wurden wöchentlich Wachstumsmessungen vorgenommen, die als Wachstumskurven in Form von Tangenshyperbolicus dargestellt sind (Abb. 19). Die Konfidenzschätzung ($\alpha = 0.05$) wurde als nicht lineare Regression durchgeführt.

Der Pflanzenwuchs war auf dem Referenzboden im Jahr 2001 um 20 % höher als im Folgejahr. Zum Ende der Vegetationsperiode kam es zu einem verlangsamten Wuchs der Varianten AMB und Bakterien. Die Wuchshöhe wurde um 15 % reduziert. Im Jahr 2002 litt die Bakterienvariante an einer Wuchsdepression schon in der Hauptwachstumszeit, aber auch die Kontrolle zeichnete sich durch verminderten Wuchs im Vergleich zu den Mykorrhizavarianten AM und AMB aus.

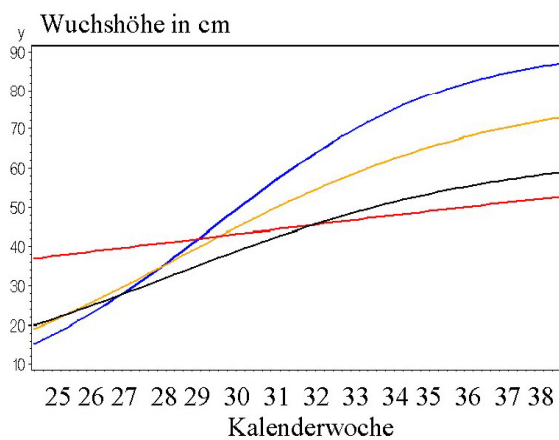
Trotz der sichtbaren Unterschiede des Wuchsverhaltens auf dem hoch belasteten Boden im Jahr 2001 überlappen sich die Konfidenzintervalle der Parameterschätzungen, d.h. hinsichtlich der Parameterschätzung konnten keine Unterschiede ermittelt werden. Visuell war eine Wuchsdepression bei der Bakterienvariante und der Kontrolle zu erkennen. Diese Ergebnisse bestätigten sich im Folgejahr nicht. Die Wachstumskurven der einzelnen Varianten verliefen alle parallel ohne visuelle Unterschiede..



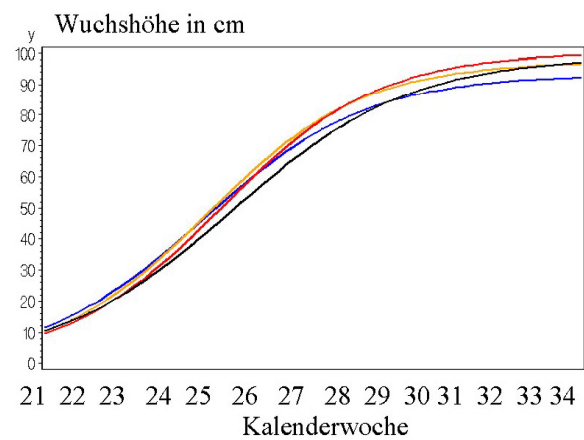
A. Referenzboden BBA, 2001



B. Referenzboden BBA, 2002



C. hoch belasteter Boden BBA, 2001



D. hoch belasteter Boden BBA, 2002

Abb. 19: Wachstumskurven der Sonnenblumen: A. Referenzboden, 2001; B. Referenzboden, 2002; C. Hoch belasteten Boden, 2001; Hoch belasteten Boden, 2002

4.3.2 Trockenmasseerträge der Sonnenblumen

Die Trockenmasseerträge der Sonnenblumen in den Versuchsjahren 2001 und 2002 wurden durch die Zugabe von *Pseudomonas fluorescens* RA56 und *Glomus intraradices* auf dem Referenzboden BBA und dem hoch belasteten Boden BBA wenig beeinflusst. Es kam sogar zu einem Ertragsrückgang auf dem Referenzboden durch die Bakterieninokulation im Jahr 2001 um 37 %. Lediglich die Dualbeimpfung brachte signifikante Mehrerträge im hoch belasteten Boden im selben Jahr um 73 %. Die Ertragszunahme durch AM betrug in beiden Jahren auf dem hoch belasteten Boden, verglichen mit der Kontrolle, bis 31 %, statistisch nicht gesichert (Tab. 28).

Tab. 28: Sonnenblumenerträge als TM in g/Gefäß auf dem Referenzboden und dem hoch belasteten Boden, 2001/02

	Versuchsjahr 2001		Versuchsjahr 2002	
	Referenzboden BBA	hoch belasteter Boden BBA	Referenzboden BBA	hoch belasteter Boden BBA
Kontrolle	8,16a	4,89b	7,49	9,63
Bakterien	5,10b	5,63b	7,21	8,95
AM	8,03a	6,43b	9,15	10,56
AMB	5,89ab	8,45a	6,79	9,00

4.3.3 Mykorrhizierungsgrad der Sonnenblumenwurzeln

Die Ergebnisse der Wurzelbonitierung auf Mykorrhizabildungen wurden als prozentualer Anteil von Wurzelabschnitten ausgewiesen (Abb. 20). Während die Pflanzen der Kontrollen auf dem Referenzboden bis 1,8 % AM-Bildungen aufwiesen, waren die Bakterien-Varianten bis 8,3 % infiziert, die von autochthonen Mykorrhizapilzen stammen müssen. Die AM-Varianten erreichten Infektionsraten zwischen 16 und 39 %, die sich signifikant von den nicht inokulierten Varianten unterschieden. Durch die Dualbeimpfung konnte sogar noch eine signifikante Förderung um 100 % der Infektion erzielt werden.

Die Mykorrhizainfektion wurde auf dem hoch belasteten Boden nicht beeinflusst, da sich die beiden Versuchsböden in der Infektionsrate kaum unterschieden. Es konnte wiederum eine Förderung durch die Bakterien gemessen werden. Die höchsten Infektionsraten wurden im Jahr 2002 bei der Dualbeimpfung mit 50 % gefunden.

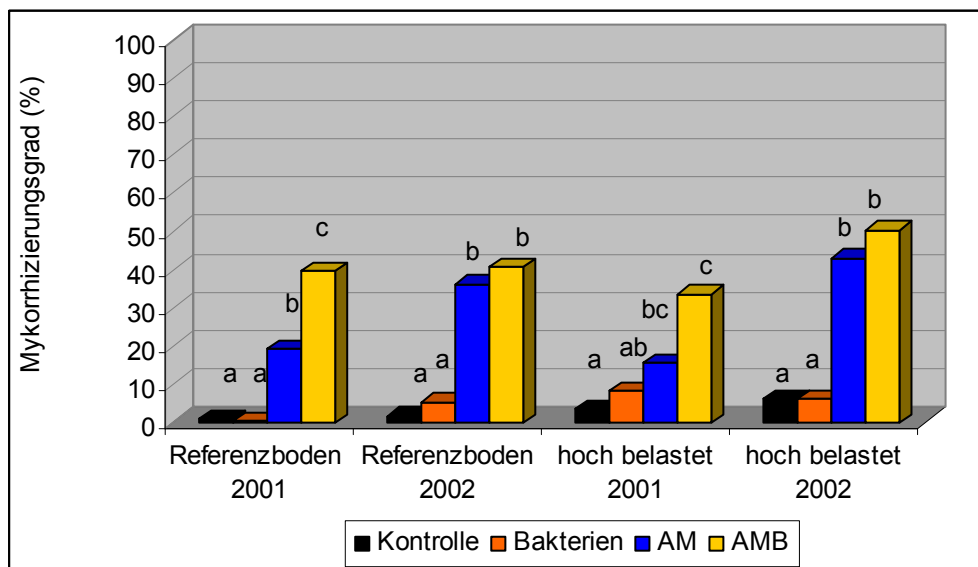


Abb. 20: Mykorrhizierung der Sonnenblumenwurzeln auf dem Referenzboden BBA und dem hoch belasteten Boden BBA der Jahre 2001/02

4.3.4 Korrelationen zwischen Mykorrhizierungsgrad und Trockenmasseerträge

Auf dem Referenzboden konnte in beiden Versuchsjahren kein Zusammenhang zwischen Infektionsrate der Wurzel und der Trockenmasseerträge ermittelt werden. Dagegen waren die Korrelationen auf dem hoch belasteten Boden in beiden Versuchsjahren signifikant (Tab. 29).

Tab. 29: Korrelationen zwischen TM-Erträge und Mykorrhizierungsgrad

Boden	Korrelation 2001	Korrelation 2002
Referenzboden BBA	-0,072	0,292
hoch belasteter Boden BBA	0,505**	0,614**

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

4.3.5 Nähr- und Schadelemente der Sonnenblumen im Gefäßversuch

Im Referenzboden (2001) wurden durch die Bakterieninokulation die Gehalte an Ca, K und P signifikant zur Kontrolle und den Pilzbehandlungen im oberirdischen Spross erhöht (Anh. 17). Die Mg-Gehalte unterschieden sich nicht signifikant von der Kontrolle. Durch diese verbesserte Ernährungssituation können auch die Mehrerträge durch die Bakterieninokulation erklärt werden. Die Mykorrhizainfektion zeigte keinen Einfluss auf die Nährstoffaufnahme. Durch die Dualbeimpfung kam es aber zu verbesserten Nährstoffaufnahmen von Ca, K und P im Vergleich zur Kontrolle und der Mykorrhizainfektion. Die Speicherung der Nährstoffe in die Wurzel zeigte keine Erhöhung durch die Behandlungen. Erstaunlicherweise wurden in den Kontrollpflanzen signifikant höhere Werte an K gemessen.

Die Nährstoffe Ca, K und P erfuhren auf dem Referenzboden im Jahr 2002 durch die Bakterieninokulation und die Dualbehandlung. Eine Erhöhung im Blütenkorb. Der Mg-Gehalt konnte sogar signifikant gesteigert werden (Anh. 18).

Die Bakterieninokulation hatte im Jahr 2001 keinen Einfluss auf die Nährstoffaufnahme im hoch belasteten Boden im Vergleich zur Kontrolle, wie auch die Beimpfung mit AM. Es konnte eine signifikante Abnahme von Mg im oberirdischen Spross durch AM beobachtet werden. In die Wurzel wurde signifikant mehr Mg durch die Dualbeimpfung im Vergleich zur Kontrolle aufgenommen (Anh. 19).

Im Versuchsjahr 2002 zeigte die Beimpfung mit Bakterien, AM und AMB keinerlei Einfluss auf die Nährstoffaufnahme in den oberirdischen Spross, in den Blütenkorb und auch nicht in die Wurzel (Anh.20). Durch Probleme mit Blattläusen kam es zu Ausfällen und Verlusten, welche möglicherweise der Grund für die Wirkungslosigkeit der Behandlungen war.

Cadmium

Im Jahr 2001 lagen die Cd-Gehalte in den oberirdischen Pflanzenteilen der Sonnenblume auf dem Referenzboden im Grenzbereich der Futtermittelverordnung von 1 mg Cd/kg TS. Durch die Bakterieninokulation kam es zu einer signifikanten Zunahme von 34 % und durch die Dualbeimpfung von 0,98 mg Cd/kg TS auf 1,27 mg Cd/kg

TS. Dem gegenüber wurde das Cd signifikant in den Wurzeln durch AM und Bakterien von 36 und 47 % im Vergleich zu den Kontrollpflanzen reduziert (Anh. 21).

Diese Ergebnisse wurden im Folgejahr nicht bestätigt. Insgesamt konnten niedrigere Cd-Gehalte gemessen werden und lagen im oberirdischen Pflanzenmaterial um 0,6 mg/kg TS bei allen Varianten. Auch die Wurzelgehalte waren bis 37 % reduziert im Vergleich zum Vorjahr ohne Unterschiede in den Varianten (Anh. 22).

Mit steigenden Schwermetallgehalten im hoch belasteten Boden 2001 stiegen auch die Cd-Gehalte in der Pflanze um eine 10er-Potenz an (Anh. 23). Im Gegensatz zum Referenzboden wurde die Cd-Konzentration durch die Behandlungen mit den Mikroorganismen in den oberirdischen Pflanzenteilen bis 25 % reduziert und in den Wurzeln durch AMB um nahe 300 % signifikant erhöht. In Analogie zu den Ergebnissen des Vorjahres bewirkten alle drei Behandlungen eine Senkung der Cd-Gehalte in der Grünmasse, aber keinen bemerkenswerten Unterschied im Blütenkorb und in der Wurzel (Anh. 24).

Kupfer

Die Cu-Aufnahme wurde in das oberirdische Pflanzenmaterial im Jahr 2001 wie das Cd auf dem Referenzboden durch die Bakterien und AMB signifikant um 43 bzw. 40 % erhöht und in die Wurzel signifikant um 32 und 37 % durch AM und Bakterien reduziert (Anh. 21). Diese Ergebnisse bestätigten sich im Folgejahr nur in den Wurzeln. In der oberirdischen Grünmasse kam es sogar zu einer Reduzierung des Cu durch die Behandlungen (Anh.22).

Im hoch belasteten Boden blieb die Cu-Aufnahme in die Sonnenblume in beiden Versuchsjahren von den verschiedenen Behandlungen unbeeinflusst. Lediglich die Cu-Konzentration in den Wurzeln wurde im Jahr 2001 durch die Dualbeimpfung um 90 % erhöht in Analogie zur Cd-Aufnahme (Anh. 23 u. 24).

Nickel

Die Ni-Konzentrationen in den oberirdischen Pflanzenteilen des Referenzbodens im Jahr 2001 unterschieden sich die Varianten nicht voneinander und lagen im Bereich von 0,52 und 0,6 mg Ni/kg TS. Lediglich die Gehalte in der Wurzel konnten durch die Bakterien signifikant von 7,36 mg Ni/kg TS der Kontrolle auf 3,6 mg Ni/kg TS reduziert werden. Die Ergebnisse bestätigten sich im Jahr 2002, obgleich die Ni-Reduzierung in die Wurzeln durch die Bakterien mit 39 % biometrisch nicht gesichert war (Anh. 21 u. 22).

Nickel spielte im hoch belasteten Boden keine große Rolle und unterschied sich kaum in den Konzentrationen des Referenzbodens. Es konnte aber im Jahr 2001 eine signifikante Erhöhung des Ni in die Wurzel durch AMB von über 200 % gemessen werden (Anh. 23).

Zink

Im Referenzboden wurde der Zn-Gehalt im Jahr 2001 in der oberirdischen Pflanzenmasse durch die Dualbeimpfung um 69 % im Vergleich zur Kontrolle wie auch in der Wurzel im Vergleich zu den anderen beiden Behandlungen signifikant um 52 % erhöht (Anh. 21). Im Jahr 2002 blieb die Zn-Aufnahme durch die Behandlungen unbeeinflusst (Anh. 22).

Die Zn-Gehalte der Pflanzen auf dem hoch belasteten Boden waren analog zu denen des Referenzbodens. Es wurden im Jahr 2001 durch die alleinige Pilzbehandlung die Zn-Konzentrationen in der oberirdischen Pflanzenmasse

im Vergleich zu allen Varianten signifikant erhöht. Durch die Dualbehandlung konnte der Zn-Gehalt signifikant um 106 % in den Wurzeln im Vergleich zur Kontrolle erhöht werden.

4.4 Bedeutung der Mykorrhiza und assoziativen Bakterien auf die Entwicklung der Sonnenblumen im Mitscherlich-Gefäßversuch 2003

Im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen sollte überprüft werden, inwieweit sich die Aufnahmeraten und Verteilung in einzelne Pflanzenorgane und Blattetagen der Nähr- und Schadstoffe durch die eingesetzten Mikroorganismen in Bezug auf verschiedene Belastungshöhen hin unterscheiden.

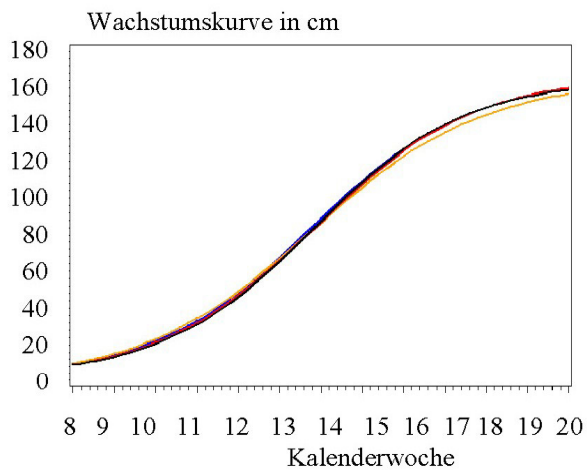
4.4.1 Wachstumsverlauf der Sonnenblumen

Durch regelmäßige Messungen der Wuchshöhe konnte der Wachstumsverlauf der Sonnenblumen auf allen drei Versuchsböden aufgenommen werden. Die Wachstumskurven sind als Tangenshyperbolicus in Abb. 21 dargestellt

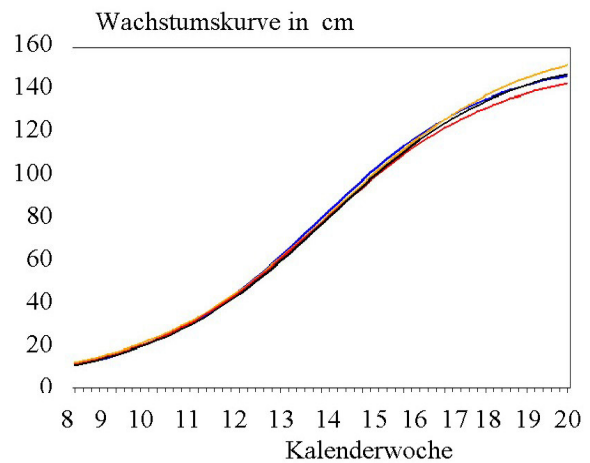
Die Varianten auf dem Referenzboden zeigten eine übereinstimmende Wachstumskurve mit einem langsamen Wachstumsbeginn und einem steileren Anstieg während der Hauptwachstumsphase bis hin zu einem Plateau zur Vollreife. Die statistischen Auswertungen zeigten keine Unterschiede (Anh. 65).

Auf dem mäßig belasteten Boden zeichnete sich ein ähnliches Bild ab, mit einer Wuchsdepression der Bakterienvariante zum Ende der Vegetationsperiode. Durch die Dualbeimpfung mit Pilz und Bakterien wurden die höchsten Wuchsraten bis 150 cm ermittelt. Diese unterschieden sich von der Bakterienvariante im Parameter A, da es keine Überlappungen der Konfidenzintervalle gab (Anh. 66).

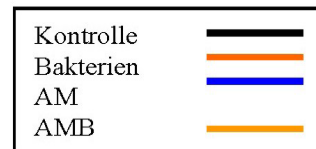
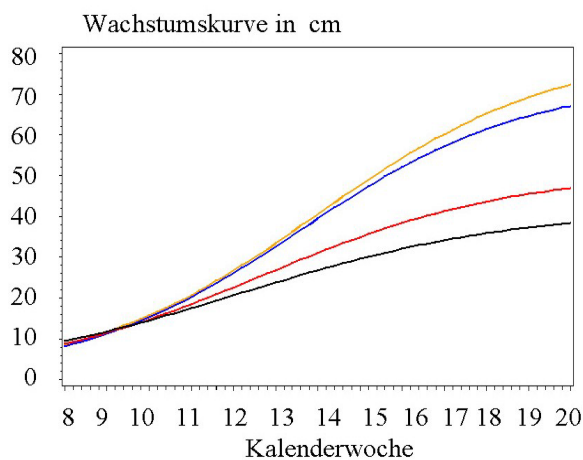
Auf dem hoch belasteten Boden Großbeeren wurden alle Varianten in ihrem Wuchs gehemmt. Die längsten Sonnenblumen wurden durch die Dualbeimpfung mit Pilz und Bakterien bis 70 cm ermittelt. In den ersten 4 Wochen nach der Pflanzung war das Längenwachstum aller Varianten noch parallel. Nach und nach traten die Schädigungen der Schwermetalle auf und es kam einem gehemmten Wuchs der Varianten Kontrolle und Bakterien bis zur Hälfte des Längenwachstums von den Varianten mit AM. Die Kontrollpflanzen und die Bakterienvarianten unterschieden sich in den Parametern A und B von AM und AMB, es konnte keine Überlappung der Konfidenzintervalle ermittelt werden (Anh. 67).



A. Referenzboden BBA, 2003



B. mäßig belasteter Boden BBA, 2003



C. hoch belasteter Boden Großbeeren, 2003

Abb. 21: Wachstumskurven der Sonnenblumen: A. Referenzboden BBA, 2003; B. mäßig belasteter Boden BBA, 2003 u. C. hoch belasteter Boden Großbeeren, 2003

Visuell waren die Wachstumsunterschiede zwischen den Kontrollpflanzen und der beimpften Sonnenblumen mit AM-Pilzen und Bakterien schon 14 Tage nach der Einpflanzung auf dem hoch belasteten Boden Großbeeren ersichtlich (20.02.2003). Die Kontrollpflanzen wiesen kleinere Blattspreiten auf (Abb. 22). Vier Wochen später am 18.03.2003 bedeckten die behandelten Sonnenblumen mit ihren Blättern schon die Erde der Gefäße. Die Blattspreiten waren voll entwickelt und besaßen ein gesundes Blattgrün. Die Kontrollpflanzen hingegen zeichneten sich durch einen kümmerlichen Wuchs und chlorotische Blätter aus, die von einem induzierten Mg-Mangel durch verstärkte Cd-Aufnahme herrühren. Nochmals zwei Wochen später (03.04.2003) traten bei den Kontrollpflanzen starke Schädigungen, vermutlich durch die Schwermetalle, auf. Die Pflanzen wurden in ihrem Wuchs gehemmt, die Chlorophyllbildung wurde massiv gestört und erste abgestorbene Zellen, erkennbar durch nekrotische Bereiche, wurden sichtbar. Die Kontrollpflanzen waren nicht mehr fähig, gesunde Blüten auszubilden. Hingegen sahen die behandelten Pflanzen gesund und kräftig aus.

Kontrolle

AM + Bakterien

20.02.2003, zwei Wochen nach der Pflanzung



18.03.2003, sechs Wochen nach der Pflanzung



03.04.2003, acht Wochen nach der Pflanzung



Abb. 22: Blattentwicklung der Sonnenblumen im Vergleich Kontrolle und Beimpfung mit Mykorrhizapilzen und Bakterien

4.4.2 Trockenmasseerträge der Sonnenblumen

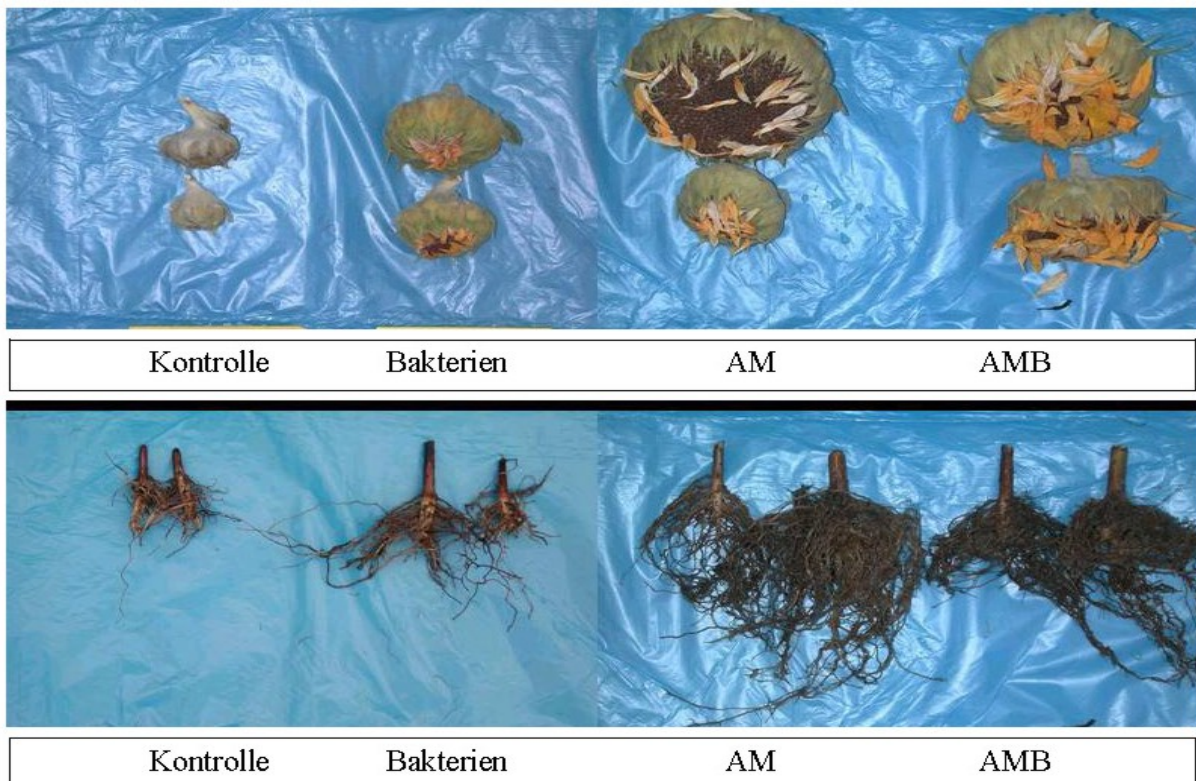
Die Zugabe von *Glomus intraradices* erhöhte den Biomasseertrag der Sonnenblumen zur Haupternte im mäßig belasteten Boden signifikant um 29 % und im hoch belasteten Boden zu beiden Erntezeitpunkten bis zu 220 % zur Kontrolle (Tab. 30). Durch die Dualbeimpfung konnten die Erträge signifikant noch auf 348 % zur Kontrolle gesteigert werden. Die Bakterieninokulation hatte gleichfalls positiven Einfluss auf den Ertrag. Zur Zwischen-ernte konnten im Referenzboden BBA und im hoch belasteten Boden Großbeeren die Trockenmasseerträge bis zu 59 % zur Kontrolle signifikant gesteigert werden.

Tab. 30: TM-Erträge in g/Gefäß der Sonnenblume im Gefäßversuch 2003

	Zwischenernte 31.03.2003			Haupternte 12.05.2003		
	RefB.	mäßig bel.	hoch bel.	RefB.	mäßig bel.	hoch bel.
	BBA	Boden BBA	Boden GB	BBA	Boden BBA	Boden GB
Kontrolle	23,4b	17,5	1,7c	105,9	64,6b	6,1c
Bakterien	29,8a	17,8	2,7b	105,9	66,4b	8,4c
AM	25,5b	16,5	5,5a	102,6	83,3a	19,9b
AMB	24,8b	18,8	5,2a	102,9	85,8a	27,5a

RefB. = Referenzboden; BBA = Biologische Bundesanstalt Berlin-Dahlem; GB = Großbeeren

Im hoch belasteten Boden Großbeeren waren die Unterschiede der Varianten nach der Ernte sehr deutlich erkennbar (Abb. 23). Die Blütenkörbe der Kontrollpflanzen und der Bakterienvariante waren unzureichend entwickelt. In den Blütenkörben der Kontrolle waren keine Samen ausgebildet und der Blütenkorb zeigte kein Blattgrün mehr. Die Wurzeln der genannten Varianten sahen verkümmert aus und wiesen abgestorbene Bereiche auf. Hingegen sahen die Köpfe mit den Mykorrhizainfektionen normal gewachsen aus mit gut entwickelten Samen. Die Wurzeln waren buschig gewachsen mit vielen Haupt- und Nebenwurzeln.



AM = Arbuskuläre Mykorrhiza; AMB = Arbuskuläre Mykorrhiza + Bakterien

Abb. 23: Geerntete Sonnenblumenkörbe zur Vollreife und -wurzeln aller Varianten im hoch belasteten Boden Großbeeren

4.4.3 Ertragsstruktur der Sonnenblumen

In Abb. 24 ist die Ertragsstruktur der Sonnenblume anhand der Komponenten Wurzel, Stängel, Blätter und Blütenkorb in einem Säulendiagramm dargestellt. Wie bei den Erträgen der Gesamttrockenmasse ersichtlich, sind bei den einzelnen Pflanzenteilen zwischen den Behandlungsstufen keine signifikanten Unterschiede auf dem Referenzboden BBA ermittelt worden. Lediglich im Stadium der Knospenbildung (31.03.2003) konnte durch die Bakterieninokulation ein signifikanter Unterschied bei den Stängeln zur Kontrolle ermittelt werden.

Die signifikanten Ertragsunterschiede durch AM und AMB auf dem mäßig belasteten Boden BBA kamen insgesamt durch Stängel, Blätter und Blütenkorb zustande. Auf dem hoch belasteten Boden Großbeeren sind die Ertragserhöhungen durch die Behandlungen hauptsächlich auf den Blütenkorb zurückzuführen. Aber auch die Grünmasse wurde schon während der Knospenbildung durch die Dualbeimpfung signifikant bis zu 283 % erhöht, wie auch die Wurzelmasse zu beiden Erntezeitpunkten.

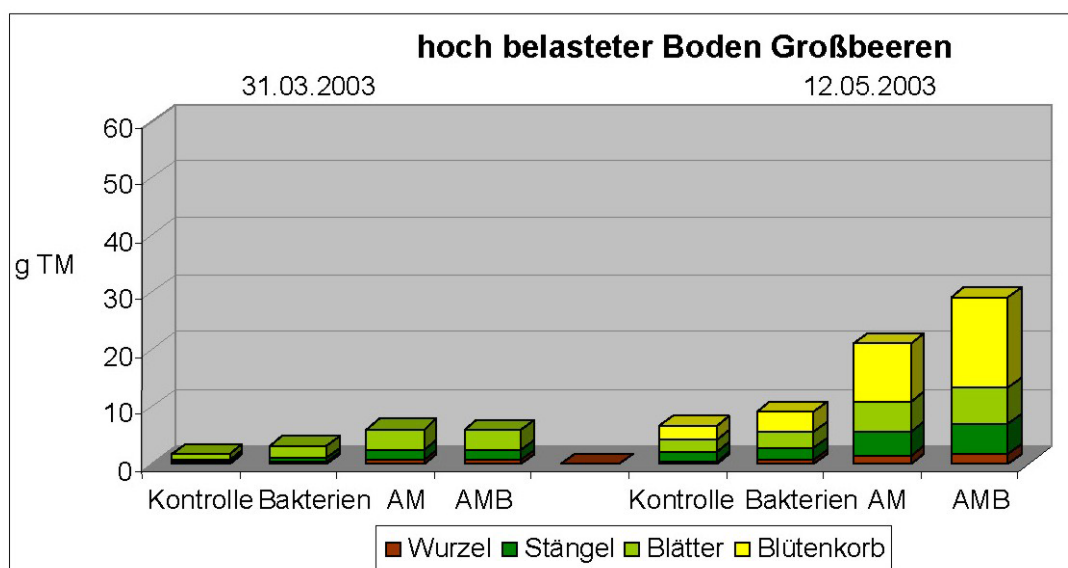
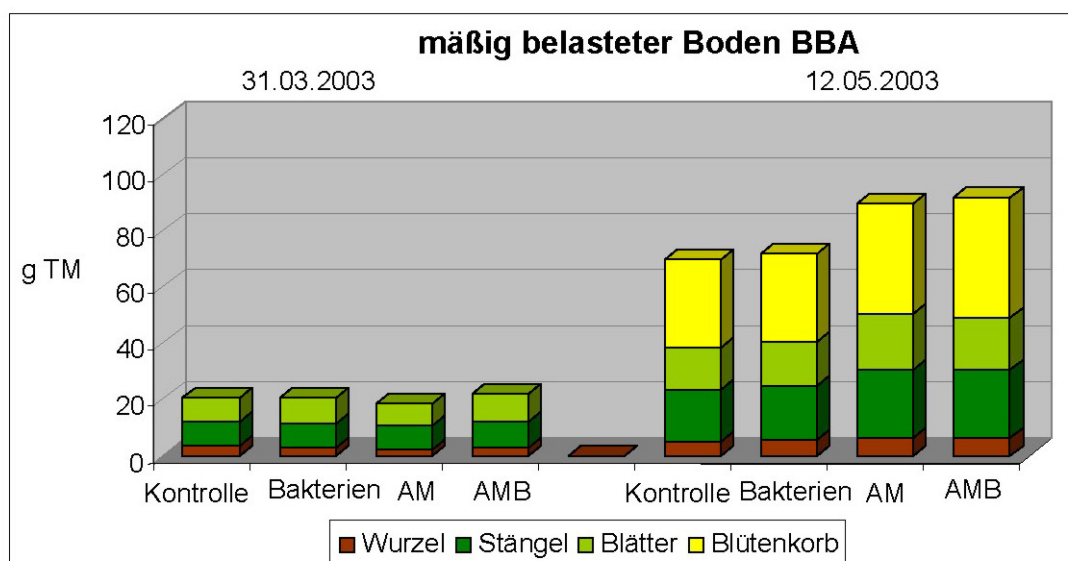
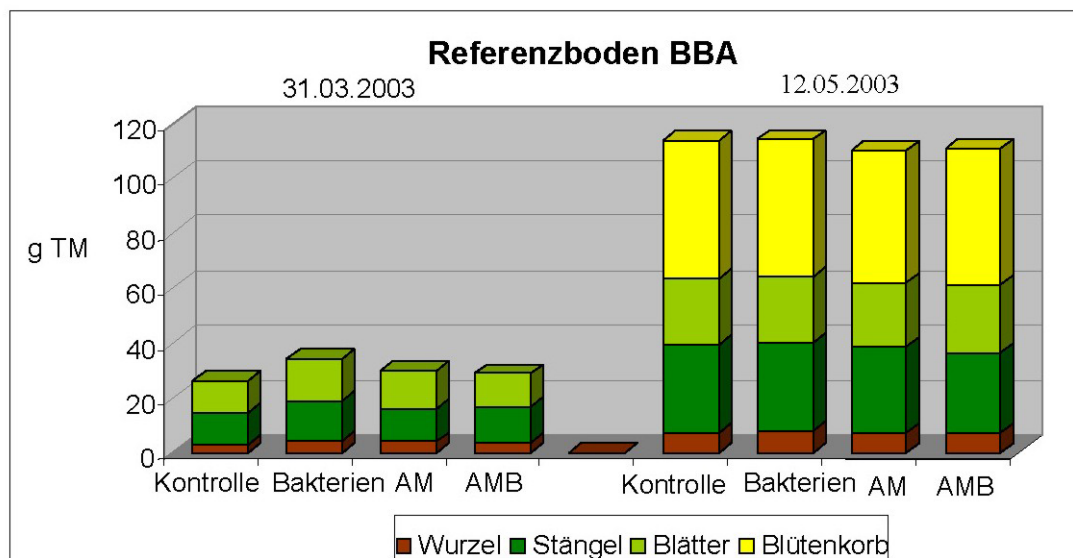
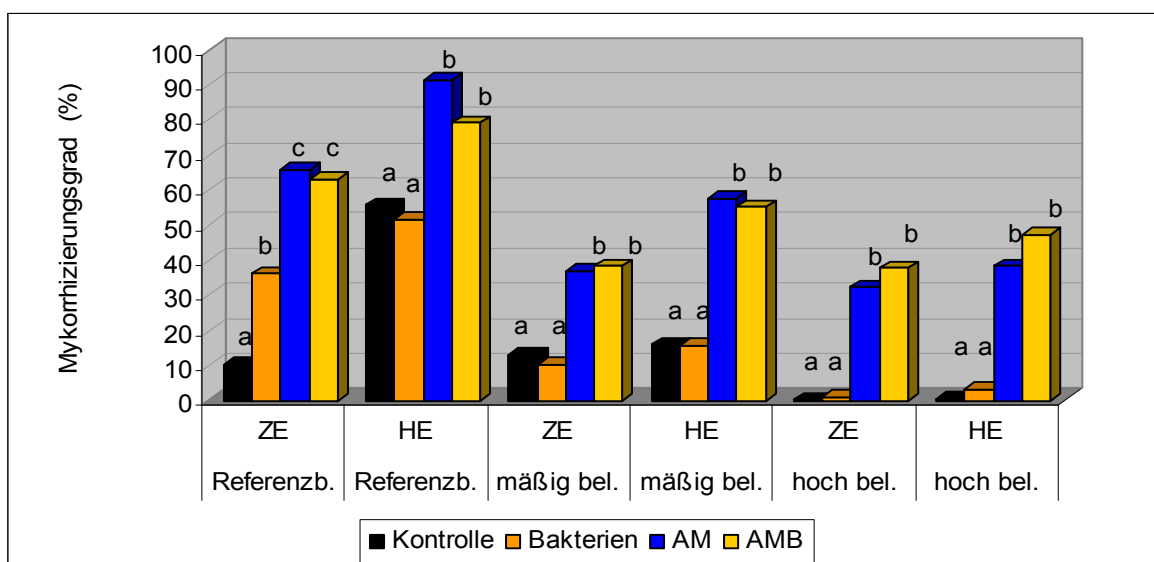


Abb. 24: Ertragsstruktur der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch 2003 nach Stängel, Blätter, Wurzel und Blütenkorb getrennt

4.4.4 Mykorrhizierungsgrad der Sonnenblumenwurzeln

Die Böden wurden vor den Versuchen generell nicht sterilisiert, um das normale Boden-gefüge in ihrer Ursprünglichkeit zu belassen. Eine Ausbreitung der autochthonen Mykorrhiza konnte deshalb nicht ausgeschlossen werden. Die autochthone Mykorrhiza lässt sich mikroskopisch nicht von den eingesetzten Mykorrhizapilzen unterscheiden. In den Kontrollpflanzen wurden bis zu 55 % der Wurzeln mit AM infiziert. Mit zunehmender Schadstoffbelastung nahm die autochthone AM ab (Abb.25).

Der Mykorrhizierungsgrad an den Wurzeln der Varianten AM und AMB wurde durchschnittlich von der Zwischenenernte bis zur Haupternte noch um 25 % gesteigert. Im Referenzboden waren die Wurzeln der inokulierten Pflanzen mit *Glomus intraradices* zur Vollreife nahezu vollständig mykorrhiziert, im Mittel bei 91 %. Die Zugabe der Bakterien brachte keine Steigerung der Symbiose zwischen Pilz und Pflanzenwurzel. Im mäßig belasteten Boden zeichnete sich ein ähnliches Bild ab, allerdings auf einem niedrigeren Niveau. Ohne Zugabe des Pilzes wurden 16 % der Pflanzenwurzeln mykorrhiziert und durch die Beimpfung im Mittel 57 %. Im hoch belasteten Boden Großbeeren wurden in den Wurzeln der Kontrollpflanzen und der Bakterienvariante fast keine AM-Strukturen gefunden. Bei der AM-Variante waren im Mittel 38 % und der AMB-Variante bis zu 47 % mit dem Pilz infiziert. Bei einer Cd-Belastung > 1 mg Cd/kg TS Boden nimmt die Infektionsfreudigkeit der AM ab.



ZE = Zwischenenernte 31.03.2003; HE = Haupternte 12.05.2003; Referenzb. = Referenzboden; bel. = belastet

Abb. 25: Mykorrhizierung der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch im Referenzboden BBA, mäßig belasteter Boden BBA und hoch belasteter Boden Großbeeren

4.4.5 Korrelation zwischen Trockenmasseerträgen und Mykorrhizierungsgrad

Um zu prüfen, ob ein Zusammenhang zwischen den Trockenmasseerträgen und der Infektionsrate der Wurzel besteht, wurde eine Korrelation nach Pearson durchgeführt. Verständlicherweise konnten keine Korrelationen im Referenzboden zu beiden Ernteterminen ermittelt werden, da im unbelasteten Boden die Erträge nahezu gleich waren und hohe Infektionsraten über 40 % in allen Wurzeln gefunden wurden.

Im mäßig belasteten Boden entstand zur Endernte ein signifikanter Zusammenhang zwischen den beiden Faktoren, da nur bei Infektionsraten über 50 % signifikant höhere Erträge erzielt wurden.

Im hoch belasteten Boden Großbeeren konnten dagegen zu beiden Erntezeitpunkten signifikante Korrelationen zwischen den besiedelten Wurzeln und den TM-Erträgen ermittelt werden. Ein Grund wäre das schlechte Pflanzenwachstum ohne Mykorrhiza und die erkennbaren Infektionsraten durch das Inokulum zwischen 38 und 47 % bei den Varianten AM und AMB (Tab. 31).

Tab. 31: Korrelation zwischen TM-Erträge und Mykorrhizierungsgrad

Boden	Korrelation	Korrelation
	Zwischenernte 31.03.2003	Haupternte 12.05.2003
Referenzboden BBA	0,118	-0,253
mäßig belastet BBA	0,087	0,805**
hoch belastet Großbeeren	0,828**	0,868**

** die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (zweiseitig) signifikant

4.4.6 Dehydrogenaseaktivität der Mikroorganismen im Boden

Da die Dehydrogenaseaktivität als wichtiger Parameter der Mikroorganismen-tätigkeit angesehen wird, sind Untersuchungen des belasteten Bodens auf Dehydrogenase durchgeführt worden. Die Dehydrogenaseaktivität dient als Maß der Enzymaktivität der Mikroorganismen im Boden. Die mikrobielle Aktivität ist dem Vegetationszyklus angepasst. Durch diese Messmethode lassen sich die verschiedenen Mikroorganismen nicht unterscheiden. Vielmehr wird ein Gesamtbild der Aktivität erstellt.

Die Dehydrogenaseaktivität war im Referenzboden vor der Bepflanzung mit 54,4 µg INF/g TS sehr hoch und wurde während des Knospenstadiums durch die Bakterien- und Pilzinokulation signifikant auf 89,6 bzw. 86,8 µg INF/g TS noch gesteigert. Zur Blüte nahm die Aktivität langsam ab, war aber im Boden mit der Dualbeimpfung mit 68,9 µg INF/g TS signifikant höher gegenüber den anderen Varianten. Zum Ende der Entwicklungszeit der Sonnenblume gingen die Aktivitäten durchschnittlich auf 35 µg INF/g TS zurück. Die mikrobielle Aktivität ist dem Vegetationszyklus angepasst. Die Mittelwerte der Aktivitäten sind in Tab. 32 dargestellt.

Tab. 32: Dehydrogenaseaktivität der Mikroorganismen zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Sonnenblume im Referenzboden BBA, 2003

Dehydrogenaseaktivität in $\mu\text{g INF/g TS}$				
Varianten	Ausgangsboden	Knospenstadium	Blüte	Haupternte
Kontrolle	54,5	56,0b	43,6b	33,1
Bakterien	54,5	89,6a	53,0ab	32,7
AM	54,5	86,8a	47,9ab	33,4
AMB	54,5	69,7b	68,9a	38,2

AM = Arbuskuläre Mykorrhiza; AMB = Arbuskuläre Mykorrhiza + Bakterien

Im mäßig belasteten Boden BBA (4 mg Cd/kg TS Boden) traten Schädigungen der Mikroorganismenpopulationen auf. Es wurden sehr viel niedrigere Dehydrogenaseaktivitäten im Ausgangsboden von 16,4 $\mu\text{g INF/g TS}$ im Vergleich zum Referenzboden BBA gemessen. Dies zeugt von einer Schädigung der Mikroorganismenpopulationen. Im Knospenstadium unterschieden sich die Aktivitäten nicht signifikant voneinander. Lediglich durch die Bakterieninokulation konnten erhöhte Aktivitäten von 42 % gemessen werden. Während der Blüte lagen die Aktivitäten durch die Pilzinokulation mit 53,2 $\mu\text{g INF/g TS}$ um 188 % höher als die der Kontrolle. Auch zum Ende der Vegetationsperiode unterschieden sich die Aktivitäten der Pilzinokulation hochsignifikant mit 14 zu 5,1 $\mu\text{g INF/g TS}$ zur Kontrolle. Durch die Dualbeimpfung zeigten sich ebenfalls mit 8,1 $\mu\text{g INF/g TS}$ signifikante Unterschiede zur Kontrolle (Tab. 33).

Tab. 33: Dehydrogenaseaktivität der Mikroorganismen zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Sonnenblume im mäßig belasteten Boden BBA, 2003

Dehydrogenaseaktivität in $\mu\text{g INF/g TS Boden}$				
	Ausgangsboden	Knospe	Blüte	Haupternte
Kontrolle	16,4	37,5	18,5c	5,1c
Bakterien	16,4	54,7	32,9bc	6,1bc
AM	16,4	38,5	53,2a	14,0a
AMB	16,4	43,7	35,3b	8,1b

Die Aktivitäten im hoch belasteten Boden Großbeeren wurden im Ausgangsboden im Vergleich zum mäßig belasteten Boden nochmals um 50 % reduziert. Zu den anderen Entnahmezeiten konnten gleichfalls geringe Aktivitäten gemessen werden. Lediglich durch die Dualbeimpfung kam es zu signifikanten Aktivitätssteigerungen während der Blüte und zu Vegetationsende (Tab. 34).

Tab. 34: Dehydrogenaseaktivität der Mikroorganismen zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Sonnenblume im hoch belasteten Boden Großbeeren, 2003

Dehydrogenaseaktivität in $\mu\text{g INF/g TS Boden}$				
	Ausgangsboden	Knospe	Blüte	Haupternte
Kontrolle	8,6	13,4c	10,4	0,6b
Bakterien	8,6	14,0c	11,1	1,0b
AM	8,6	19,8b	11,2	1,8b
AMB	8,6	29,0a	11,9	5,8a

Um Zusammenhänge zwischen den TM-Erträgen und der Dehydrogenaseaktivität zu ermitteln, wurde eine Korrelation zwischen den beiden Parametern durchgeführt (Tab. 35). Im Referenzboden ergab sich im Knospenstadium ein positiver Zusammenhang zwischen den beiden Parametern, der sich zur Vollreife aber nicht mehr bestätigte. Im mäßig belasteten Boden konnte nur zur Vollreife eine signifikante Korrelation zwischen der Ertragsstruktur und der Dehydrogenaseaktivität ermittelt werden. Im Boden Großbeeren hingegen wurden zu beiden Entnahmezeitpunkten hochsignifikante Korrelationen gefunden.

Tab. 35: Korrelation zwischen TM-Erträge und Dehydrogenaseaktivität der Sonnenblume

Boden	Zwischenernte zum Knospenstadium	Haupternt zur Vollreife
Referenzboden BBA	0,517**	-0,113
mäßig belastet BBA	0,004	0,460**
hoch belastet GB	0,730**	0,750**

** die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (zweiseitig) signifikant

4.4.7 Bodenlösung der Sonnenblumengefäße

pH-Wert

Einmal wöchentlich wurden mittels Saugkerzen Proben der Bodenlösung entnommen und neben den Nähr- und Schadelementen auch der pH-Wert bestimmt. Im Referenzboden BBA (Abb. 26) lagen die ersten Messwerte noch im sauren bis neutralen Bereich. Zur Blüte hin wurden Werte bis pH 8 gemessen. Zur Ausreife der Körner fielen die Werte wieder bis pH 7 ab. Die Varianten unterschieden sich kaum voneinander. Allerdings verliefen die Werte der Kontrolllösungen stets im unteren Bereich, verglichen mit den inokulierten Proben. Der pH-Verlauf in den Bodenlösungen des Bodens mit mäßiger Belastung zeichnete sich ähnlich wie im Referenzboden zwischen pH 5 bis nahe pH 8 ab. Die Werte der Kontrolllösung und der Bakterienvariante befanden sich im unteren Bereich der Kurven. Im hoch belasteten Boden GB verliefen die pH-Werte von 5,1 bis 6,5, im sauren Bereich. Die Erwartungswerte der Kurve der AM-Variante unterschieden sich in den Werten der AMB-Variante zwischen der 11. und 15. KaW.

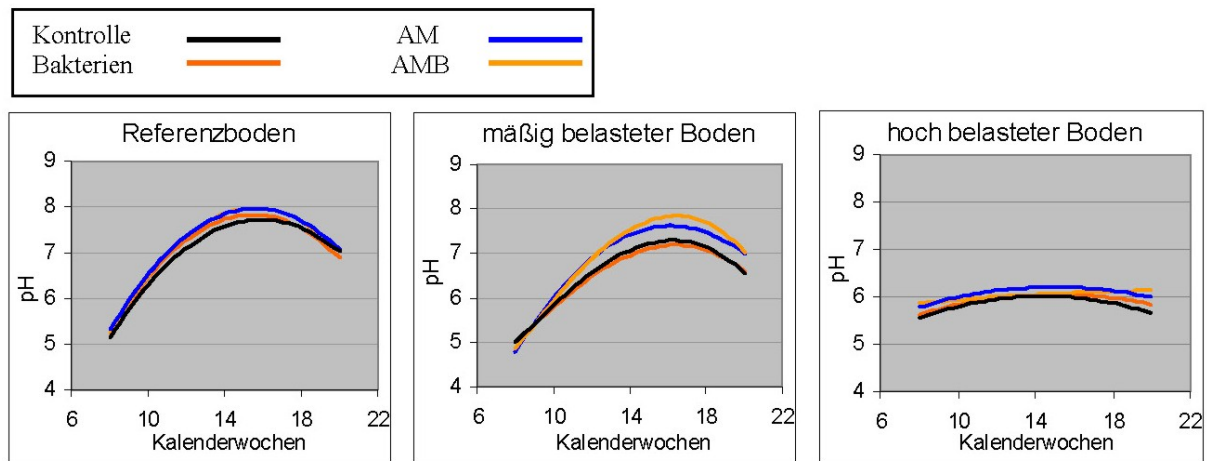


Abb. 26: pH-Werte der Bodenlösungen im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen im Jahr 2003

Calcium

Die Ca-Konzentrationen aller Varianten waren bei dem Referenzboden und im mäßig belasteten Boden anfangs sehr hoch um 2 g/l und nahmen stetig bis zur Vollreife der Sonnenblumen nahe 0,5 g/l ab. Nur der Verlauf der AMB-Variante im mäßig belasteten Boden war steiler, verglichen mit den anderen Varianten und einer höheren Ausgangskonzentration von 2,2 g Ca/l. Alle Varianten der Bodenlösungen im Boden Großbeeren zeigten einen anderen Verlauf mit derselben Ausgangskonzentration von 1,2 g/l im Mittel. Die Werte der Kurve AMB nahmen sogar über die Vegetationszeit leicht zu und unterschieden sich von denen der Kontrolle von der 15. KaW an bis zur Vollreife. Die Konzentrationen der Bakterienvariante und der AM nahmen leicht ab und unterschieden sich nicht von den übrigen Varianten (Abb. 27).

Kalium

Der K-Verbrauch über die Vegetationsperiode war bei dem Referenzboden und im mäßig belasteten Boden bei allen Varianten ähnlich mit einem Anfangsgehalt von 80 bzw. 70 mg K/l. Ab der 14. KaW kam es noch zu einem Anstieg der K-Konzentration, da in diesem Zeitraum eine K-Düngung vorgenommen wurde. Zur Vollreife war der K-Vorrat aufgebraucht. Der Verlauf der Bodenlösung im Boden Großbeeren erfuhr einen Anstieg, nachdem er bis zur 11. KaW abgefallen war. Es wurde eine Anfangskonzentration von unter 10 mg K/l gemessen und stieg dann bis über 30 mg K/l in der Kontrolle an. Die Werte der Kontrolle lagen über denen der Behandlungen und unterschieden sich mit der AMB-Variante zum Ende der Vegetationsperiode signifikant (Abb. 28).

Magnesium

Die Mg-Konzentrationen in den Bodenlösungen des Referenzbodens und dem mäßig belasteten Boden unterschieden sich kaum voneinander. Der Verlauf im Referenzboden ging von 340 mg Mg/l bis nahe 0; im mäßig belasteten Boden lagen die Gehalte zwischen 280 mg Mg/l bis 50 mg Mg/l über die Vegetationsperiode. Die Varianten zeigten keine Unterschiede im Konzentrationsverlauf. Dagegen waren die Mg-Gehalte in der Bodenlösung des Bodens Großbeeren mit 100 mg Mg/l sehr viel niedriger angesiedelt und zeigten erst nach einer leichten Zunahme eine Abnahme zur Vollreife. Der gesamte Verlauf der Kontrolllösungen lag unter den der behandelten Varianten. Die Werte der Kurve der Kontrolllösungen unterschieden sich von den Kurven der AM und AMB zwischen der 10. und 13. Woche und zu Vegetationsende voneinander (Abb. 29).

Phosphor

Die P-Gehalte in der Bodenlösung des Referenzbodens nahmen bei allen Varianten von 60 mg P/l bis unter 10 mg P/l über die Vegetationsperiode ab, mit einer leichten Zunahme zu Vegetationsende. Die Kurvenverläufe der Varianten unterschieden sich nicht voneinander. Ein ähnlicher Verlauf zeigte sich im mäßig belasteten Boden, nur auf einem höheren Niveau. Im Boden Großbeeren war die P-Konzentration wesentlich niedriger, nahm aber ebenso ab. Die höchsten Konzentrationen wurden bei den Kontrolllösungen mit 5 mg P/l gemessen. Die Werte der Kontrolle unterschieden sich von denen der Bakterienbehandlung zwischen der 10. und 14. KaW und den beiden AM-Varianten von der 10. KaW bis zum Ende der Vegetationsperiode (Abb. 30).

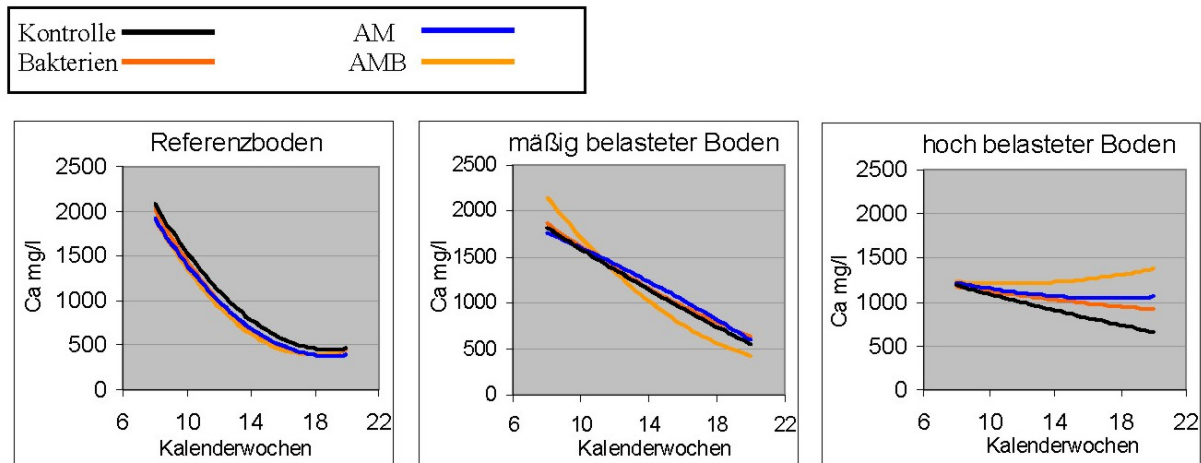


Abb. 27: Ca-Gehalte der Bodenlösungen im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen im Jahr 2003

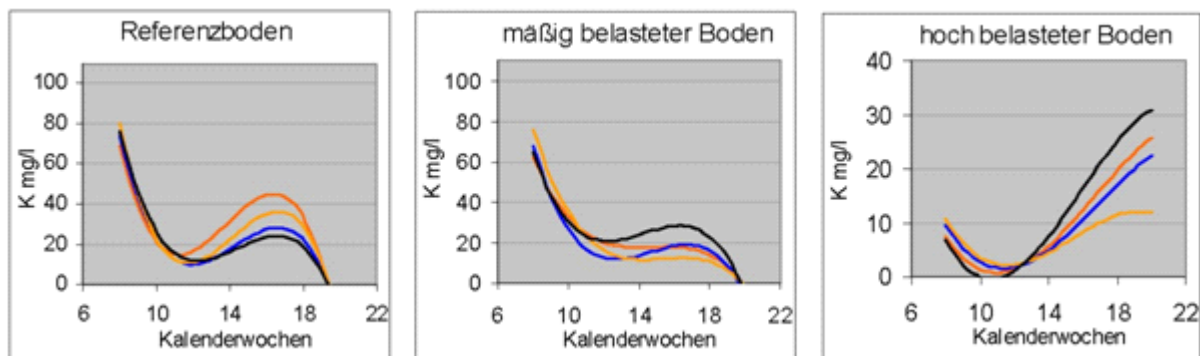


Abb. 28: K-Gehalte der Bodenlösungen im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen im Jahr 2003

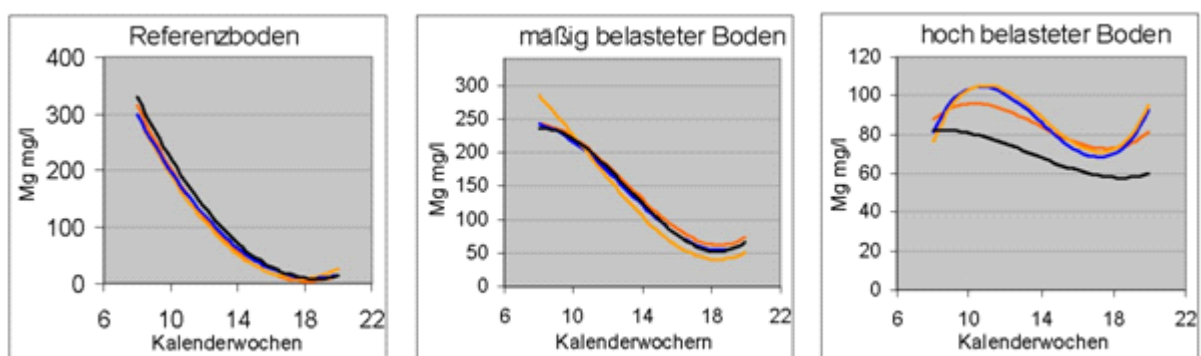


Abb. 29: Mg-Gehalte der Bodenlösungen im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen im Jahr 2003

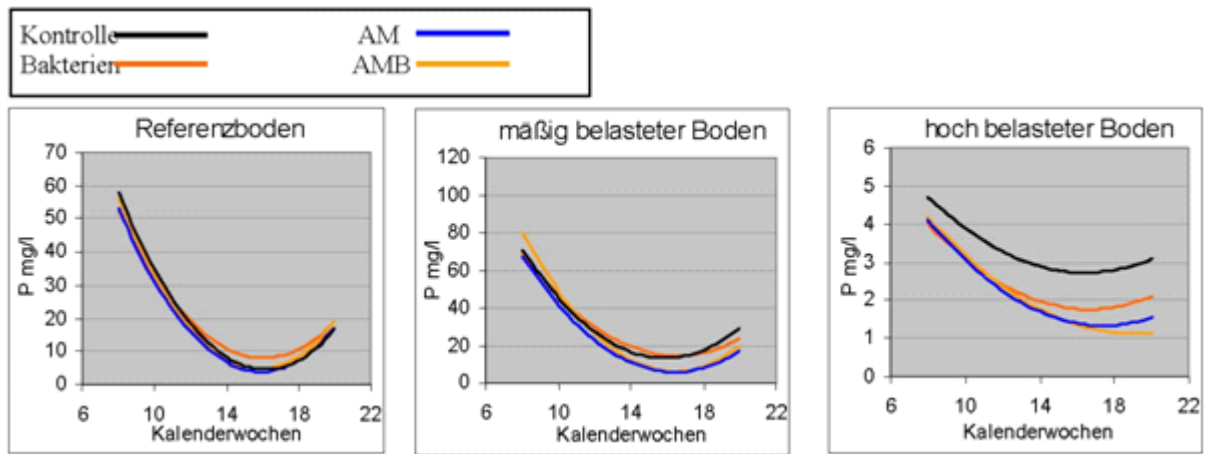


Abb. 30: P-Gehalte der Bodenlösungen im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen im Jahr 2003

Cadmium

Im Referenzboden konnten in den ersten 14 Tagen der Probeentnahme Cd-Gehalte zwischen 0,02 und 0,01 mg Cd/l gemessen werden. Im restlichen Entwicklungsverlauf wurden noch Spuren von Cd in der Bodenlösung gefunden. Die Gehalte der Varianten unterschieden sich nicht voneinander. Nur die Werte der Bodenlösung der Dualbeimpfung waren meist niedriger als die übrigen Varianten. Der Verlauf des Cd korrelierte negativ mit dem Verlauf des pH-Wertes. Bei pH-Werten im sauren Bereich bis pH 6 war Cd in der Bodenlösung zu finden. Im neutralen Bereich nahm die Löslichkeit des Cd rapide ab.

In der Bodenlösung des mäßig belasteten Bodens wurden in den ersten Wochen der Entnahme in den Proben der Dualbeimpfung über 0,25 mg Cd/l als höchste Konzentration gemessen. Im Vergleich zu den anderen Varianten fielen die Werte wesentlich schneller ab und ab der 13. KaW wurden die geringsten Werte ermittelt. Insgesamt waren ähnliche Gehalte in allen Proben gemessen worden. Die Mykorrhizavarianten wiesen aber dennoch die geringsten Konzentrationen im Verlauf auf.

Im hoch belasteten Boden Großbeeren nahm während der Vegetationsperiode die Löslichkeit des Cd von 0,5 mg Cd/l bis über 1 mg/l zu, am deutlichsten durch die Dualbeimpfung mit Pilz und Bakterien. Diese Werte der AMB unterschieden sich von denen der Kontrolle in der 18. bis 20. KaW voneinander (Abb. 31). Der Anstieg des Cd in der Bodenlösung ging einher mit dem Abfall des pH-Wertes

Kupfer

Im Referenzboden BBA lagen die Konzentrationen des Cu zwischen 0,2 und 0,05 mg Cu/l mit einer leichten Zunahme zu Vegetationsende bis 0,07 mg Cu/l. Die Varianten unterschieden sich weder im Verlauf noch in der Konzentration voneinander.

Im mäßig belasteten Boden BBA zeichnete sich ein ähnlicher Verlauf ab, nur auf einem höheren Konzentrationsniveau von 0,5 mg Cu/l bis 0,2 mg Cu/l mit einem letzten Anstieg auf 0,3 mg Cu/l im Mittel.

Die Cu-Konzentrationen im hoch belasteten Boden Großbeeren nahmen nach einer anfänglichen Zunahme bis zu Vegetationsende hin ab und waren in den Kontrolllösungen von 0,6 bis 0,4 mg Cu/l über die gesamte Vegetationsperiode höher im Vergleich zu den Behandlungen. Die Werte der Kurve der Kontrolle unterschieden sich mit denen der Bakterienvariante zwischen der 9. bis 14. und mit AM in der 10. KaW voneinander (Abb. 32).

Zink

Der Verlauf des Zn in der Bodenlösung ähnelte dem des Cd im Referenzboden Zn geht ebenfalls unter pH 7 in Lösung. In Bodenlösung der Kontrollpflanzen wurde auch das Zn in höheren Konzentrationen bis 1,4 mg Zn/l im Vergleich zu den behandelten Proben gefunden. Die Werte der Kurve der Kontrollpflanzen unterschieden sich im Verlauf zu den Werten der Kurve der Pflanzen mit Mykorrhizapilzen in der 8. bis 10. KaW (Abb. 33).

In der Bodenlösung des mäßig belasteten Bodens wurden Zn-Gehalte bis 4,5 mg Zn/l bei den Proben der Dualbeimpfung gemessen. Auch das Zn nahm im Laufe der Vegetationsperiode in den Bodenlösungen stetig ab mit insgesamt etwas geringeren Gehalten bei den Pilzvarianten.

Die Zn-Konzentrationen in der Bodenlösung Großbeeren waren um eine 10er-Potenz höher als im mäßig belasteten Boden. Auch war die Abnahme über die Vegetationsperiode sehr mäßig und lag zu Vegetationsende um die 30 mg Zn/l. In der Lösung der Kontrollpflanzen wurden die höchsten Konzentrationen gemessen, die sich in der 15. KaW von den Werten der AM-Variante unterschieden.

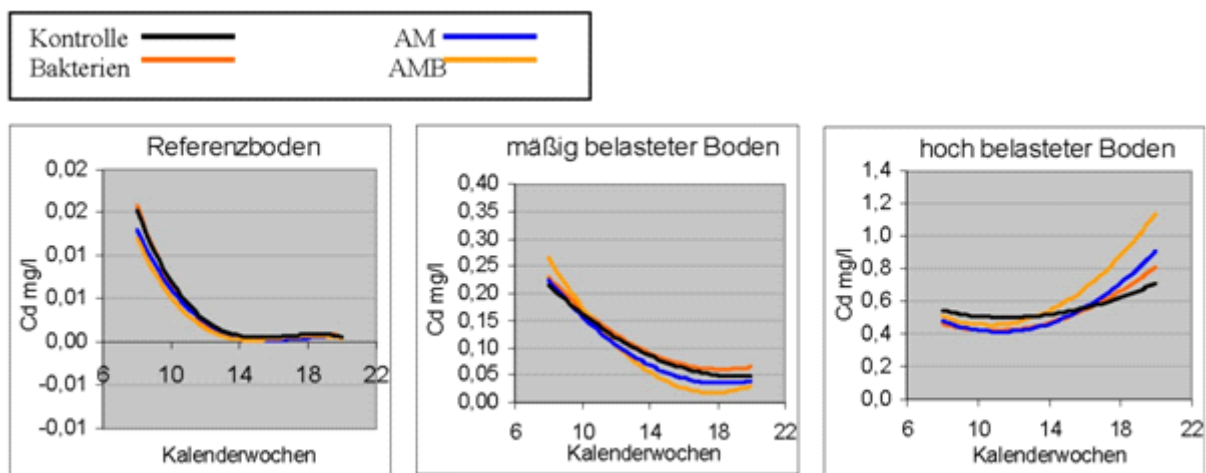


Abb. 31: Cd-Gehalte der Bodenlösungen im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen im Jahr 2003

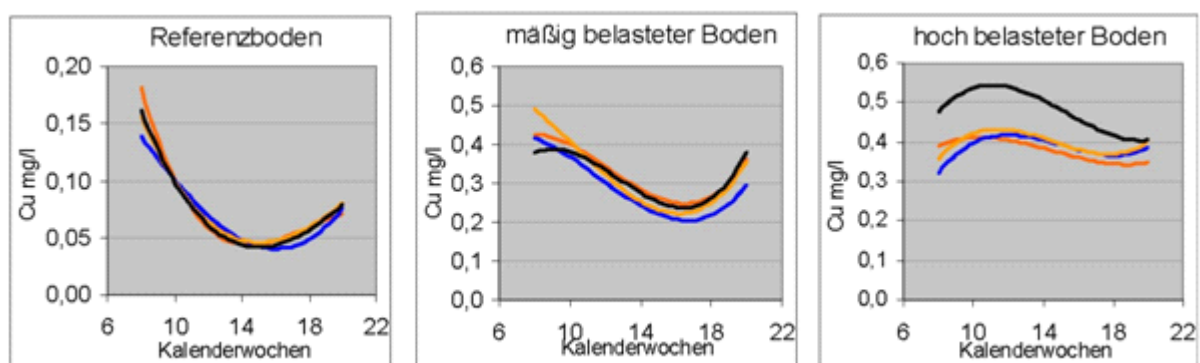


Abb. 32: Cu-Gehalte der Bodenlösungen im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen Großbeeren im Jahr 2003

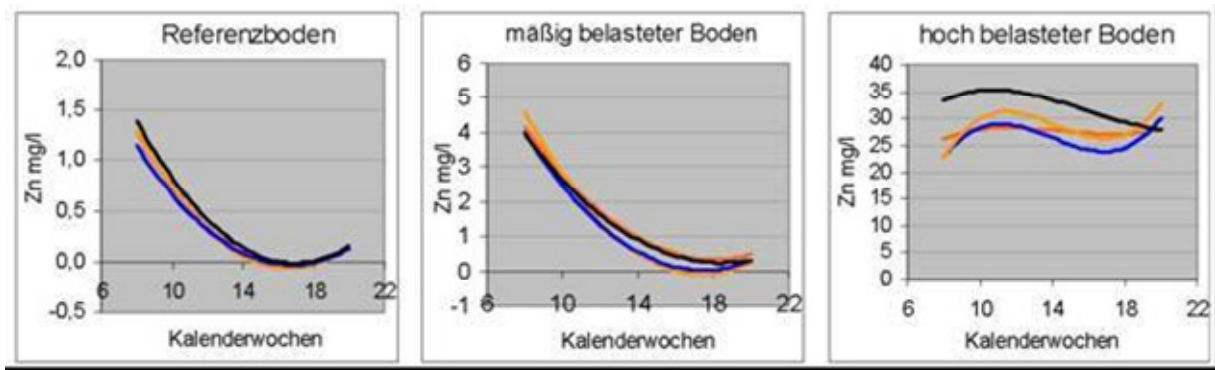


Abb. 33: Zn-Gehalte der Bodenlösungen im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen im Jahr 2003

4.4.8 Korrelationen in der Bodenlösung

Da die Löslichkeit von Schad- und Nährelementen pH abhängig ist, wurden Korrelationen zwischen den pH-Werten der Bodenlösungen und einigen Elementen durchgeführt. Im Referenzboden konnten negative Korrelationen zwischen den pH-Werten und den Elementen Cd, Cu, Zn, Ca, Mg und P ermittelt werden, wobei sich die Varianten nicht unterschieden (Anh. 40). Das K in der Bakterienvariante zeigte keinen signifikanten Zusammenhang zum Säuregehalt in der Bodenlösung im Gegensatz zur Kontrolle und den AM-Varianten.

Im mäßig belasteten Boden zeigten sich ähnliche Korrelationen. Allerdings waren die Zusammenhänge zwischen dem pH-Wert und den genannten Elementen durch die Bakterien und den Mykorrhizapilzen höher. Das K schien in der Kontrolle pH unabhängig zu sein (Anh. 41).

Im Boden Großbeeren konnte kein Zusammenhang zwischen dem pH und den gemessenen Elementen ermittelt werden (Anh. 42). Dies lag wahrscheinlich an den durchgängig niedrigen pH-Werten während der Vegetationsperiode und den relativ hohen Mengen an Schad- und auch Nährelementen in der Bodenlösung. Auffallend waren die negativen Korrelationen zum P bei den behandelten Varianten, die statistisch gesichert waren. Dies bedeutet eine gute Versorgung mit P im sauren Boden durch die Pilze und Bakterien.

4.4.9 Nähr- und Schadelemente in der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch

Die Nährelemente Ca, K, Mg und P wie auch die Schwermetalle Cd, Cu und Zn wurden zur Zwischen- und Haupternte im Erntegut der Sonnenblume bestimmt. Zur Zwischenernte konnten in den Stängeln und den Wurzeln die Elemente gemessen werden. Die Ernte der Blätter erfolgte etagenweise (fünf Blättetagen), meist zu zwei oder drei Blättern zusammengefasst. Die Samen, die zur Haupternte ausgereift waren, wurden gepresst und das Öl und der entstandene Presskuchen bestimmt. Durch mangelndes Pflanzenmaterial der Varianten Kontrolle und Bakterien fehlen die Werte des Öls und des Presskuchens. Bis zu sieben Blättetagen konnten analysiert werden.

Aufgrund der praktischen Bedeutung der Gehalte im Öl, Presskuchen und Blätter zur Vollernte wurde auf diese speziell eingegangen.

Calcium

Ca wurde zum Zeitpunkt der Knospenbildung signifikant verstärkt in die Stängel der Kontrollpflanzen im Referenzboden und im Boden Großbeeren eingelagert (Anh. 25 u. 27) Zur Vollreife konnten im Referenzboden nur

noch die Hälfte bis 6700 mg Ca/kg TS in der AM-Variante gemessen werden. Vermutet wird ein Verdünnungseffekt über die Zunahme der Biomasse (Anh. 28). Die Ca-Gehalte in den Stängeln der Sonnenblume auf dem Boden Großbeeren hingegen waren zur Zwischenernte genau so hoch wie zur Haupternte (Anh. 30). Da die Pflanzen an Biomasse nur die Hälfte des Gewichtes aufwiesen, sind diese Werte verständlich. Der höchste Ca-Gehalt wurde in den Kontrollpflanzen gemessen mit der geringsten Biomasse.

Zur Vollreife waren die signifikant höheren Ca-Werte in der Wurzel von 23 % der AM-Pflanzen und der Dualbeimpfung im Vergleich zur Kontrolle im Referenzboden interessant (Anh. 28). Durch die erhöhten Ca-Konzentrationen in der Wurzel können Schwermetalle als schwerlösliche Komplexe gebunden und so nicht in die oberirdische Pflanze transportiert werden. Diese Messungen bestätigten sich aber nur tendenziell im mäßig und hoch belasteten Boden durch AM (Anh. 29 u. 30).

Kalium

K wurde verstärkt in den Stängeln der Kontrollpflanzen des Referenzboden BBA im Knospenstadium gemessen. Auch waren die Gehalte im mäßig belasteten Boden BBA erhöht. Im hoch belasteten Boden Großbeeren konnten die höchsten K-Gehalte in der Bakterienvariante gemessen werden (Anh. 25-27). Auch zur Vollreife wurde die K-Aufnahme in die Stängel auf allen drei Versuchsböden durch die Behandlungen nicht verbessert; es konnte gleichfalls eine signifikante Verminderung durch AMB im Vergleich zur Kontrolle auf dem Boden Großbeeren gemessen werden. Auch dies deutet auf einen Verdünnungseffekt hin. Im Presskuchen der Sonnenblumen des mäßig belasteten Bodens hingegen fand ein Anstieg des K bis 9 % durch die Bakterien- und Dualbeimpfung im Vergleich zu AM statt (Anh. 28-30).

Die K-Konzentrationen im Öl waren sehr gering und unterschieden sich nicht wesentlich voneinander. Auffällig waren die hohen K-Gehalte in den Wurzeln der Kontrollpflanzen und Bakterienvarianten auf dem Boden Großbeeren, die sich signifikant von AM und AMB unterschieden.

Magnesium

Mg zeigte im Referenzboden BBA keine variantenabhängigen Gehaltsdifferenzen in den einzelnen Pflanzenorganen zu beiden Ernteterminen. (Anh. 25-30).

Zur Vollreife wurden im mäßig belasteten Boden in den Wurzeln der beiden Pilzvarianten signifikant höhere Gehalte im Vergleich zur Kontrolle gemessen, aber geringere Konzentrationen im Presskuchen der AMB-Variante. Die Mg-Gehalte in der Wurzel im Boden Großbeeren verhielten sich konträr zum mäßig belasteten Boden, aber wie beim Presskuchen kam es zu Konzentrationssteigerungen im Stängel durch die Pilzinfektionen.

Phosphor

Die höchsten P-Gehalte im Stängel während der Knospenausbildung wurden im Referenzboden bis 3000 mg in den Kontrollpflanzen (Anh. 25) und die niedrigsten bei den AMB-Pflanzen im hoch belasteten Boden mit 1100 mg P/kg TS gemessen (Anh. 27). Gleichzeitig wurden die höchsten P-Gehalte im Boden Großbeeren mit 5425 P mg/kg TS Boden und die niedrigsten im Referenzboden im KW ermittelt. Dies deutet auf eine geringe Verfügbarkeit des P im Boden Großbeeren hin, bedingt durch den niedrigen pH-Wert von 5,5. In der Bodenlösung des Bodens Großbeeren war nur 1/10 der P-Menge gemessen worden, verglichen mit dem Referenzboden

Zur Vollreife hin waren die P-Gehalte im Referenzboden bei allen Varianten identisch und lagen bei 1 g P/kg TS im Stängel (Anh. 25). Im mäßig belasteten Boden hingegen waren signifikant niedrigere P-Werte im Presskuchen durch AMB gemessen worden (Anh. 26). In den Stängeln der Sonnenblume auf dem hoch belasteten Boden wurden in den Stängeln bei der Kontrolle und den Bakterien-Pflanzen die gleichen P-Gehalte ermittelt wie zur Zwischenernte. Die P-Gehalte in den AM-Pflanzen haben sich halbiert (Anh. 27). Auch dies deutet auf einen Verdünnungseffekt hin.

Calcium in den Blättern

Ca als zweiwertiges Element ist immobil im Transport und lagert sich deshalb verstärkt in den unteren Blättern ab. Die höchsten Gehalte von 7 g Ca /kg TS wurden zur Zwischenernte im Referenzboden in der untersten Blattetage gemessen. Die geringsten Aufnahmeraten konnten in der Variante AM analysiert werden, gefolgt von der Bakterienvariante. Im mäßig belasteten Boden zeichnete sich ein ähnliches Bild ab, wobei die AM-Variante die Ca-Gehalte deutlich reduzierte. Im hoch belasteten Boden wurde insgesamt 1 – 2 g Ca weniger in den Blättern gemessen. Durch die Bakterien kam es meist zu einer höheren Einlagerung des Ca. In den untersten Blättern wurden durch die AM sogar 500 mg Ca/kg TS mehr eingelagert (Anh. 43).

Meist waren die Ca-Gehalte in den Blättern auf dem Referenzboden zur Haupternte durch die behandelten Varianten mit AM und AMB geringer; in der ersten und vierten Blattetage signifikant. Dies deckt sich mit den Analysen in den Stängeln.

Auch auf dem mäßig belasteten Boden zeigte sich ein ähnliches Bild der Ca-Verteilung wie beim Referenzboden. Insgesamt war die Ca-Aufnahme etwas höher. Es bestanden nur geringfügige variantenabhängige Unterschiede.

Die Ca-Aufnahme in die Blätter auf dem Boden Großbeeren verhielt sich umgekehrt zu den beiden anderen Böden. Nach der zweiten Blattetage erfolgte eine Ca-Zunahme in die oberen Blättetagen über 50 g Ca/kg TS bei allen behandelten Varianten. Tendenziell wurde durch AM und AMB mehr Ca in den Blättern gemessen. Durch die singuläre Bakterienbehandlung kam es zur Ca-Minderaufnahme, in der zweiten Blattetage signifikant (Anh. 44).

Kalium in den Blättern

K ist als einwertiges Element sehr mobil und wandert mit dem Transpirationsstrom in der Pflanze von den unteren in die oberen Blätter. Zur Zwischenernte konnten über 1,5 g K/kg TS im Referenzboden (AMB) und im mäßig belasteten Boden (Bakt.) gemessen werden. Die K-Gehalte in den Blättern der Sonnenblume auf dem hoch belasteten Boden hatten sich halbiert. Eine deutliche Mehraufnahme in die Kontrollpflanzen war zu verzeichnen. Die Ergebnisse der Stängel wurden bestätigt. Auch hier trat der Verdünnungseffekt auf (Anh. 45).

Die Gehalte in den unteren Blättern des Referenzboden zur Vollreife lagen bei allen Varianten bei 2600 mg K/kg TS und stiegen in den oberen Blättetagen bis fast 20000 mg K/kg TS an, wobei die Gehalte in den Mykorrhizavarianten und der Dualbeimpfung meist höher waren als die Bakterien- und Kontrollvarianten.

Die K-Aufnahme in die Blätter auf dem mäßig belasteten Boden wurde durch AM und AMB reduziert; in der 6. Blattetage sogar signifikant. Die Bakterienvariante unterschied sich nicht von der Kontrolle. Insgesamt waren die Aufnahmeraten höher als auf dem Referenzboden. Die K-Konzentration in den Blättern auf dem hoch belasteten Boden Großbeeren unterschied sich nicht von den beiden anderen Böden. Auch auf diesem Boden wurde das K

verstärkt in die Kontrollpflanzen und die Pflanzen mit Bakterien aufgenommen. Lediglich in den unteren Blättern kam es durch die Mykorrhizapilze und die Dualbeimpfung zur verstärkten Aufnahme (Anh. 46).

Magnesium in den Blättern

Mg als zweiwertiges Element zeigt eine ähnliche Verteilung wie das Ca in den Blättern. Auch Mg wurde verstärkt in die unteren Blätter eingelagert. Im Knospenstadium hatten die Varianten in Bezug auf den Mg-Gehalt im Referenzboden und im mäßig belasteten Boden kaum Unterschiede gezeigt. Im hoch belasteten Boden hingegen kam es zu geringeren Mg- Gehalten bis zu 2 g Mg /kg TS. ab der 3. Blattetage in den Kontrollblättern (Anh. 47).

Zur Vollreife waren im Referenzboden keine Unterschiede bezüglich der Aufnahme und Verteilung durch die verschiedenen Behandlungen messbar gewesen. Die Aufnahme des Mg unterschied sich auf dem mäßig belasteten Boden vom Referenzboden in der Höhe und der Verteilung durch die verschiedenen Varianten. Insgesamt wurde weniger Mg aufgenommen, aber durch AM und AMB konnte die Aufnahme signifikant bis zu 27 % erhöht werden.

Durch die singuläre Beimpfung mit dem AM-Pilz und der Dualbeimpfung noch verstärkt, wurde die Mg-Aufnahme in die Blätter auf dem Boden Großbeeren im Vergleich zu den Kontrollpflanzen und der Bakterieninokulation erhöht, statistisch nicht gesichert (Anh. 48).

Phosphor in den Blättern

P war relativ gleichmäßig in den einzelnen Blättern des Referenzboden zu beiden Ernteterminen verteilt (Anh. 49 u. 50). Wie bei den P-Gehalten im Stängel wurden auch in den Blättern im Knospenstadium durchschnittlich doppelt so hohe P-Gehalte im Vergleich zur Vollreife gemessen. Meist war das P in den Kontrollpflanzen signifikant erhöht im Vergleich zu den Behandlungen.

Durch durchschnittlichen P-Gehalte der Blätter auf dem mäßig belasteten Boden lagen bei der Hälfte des Referenzboden zu beiden Erntezeitpunkten. Zur Knospenbildung waren die P-Gehalte relativ gleichmäßig in den Etagen verteilt ohne nennenswerte Variantenunterschiede. Zur Vollreife gab es eine erhöhte Aufnahme von 1500 mg P/kg TS in die obersten Blätter.

Die P-Verteilung in den Blättern des Bodens Großbeeren war zu beiden Ernteterminen ähnlich, aber nur die Hälfte des P-Gehaltes vom mäßig belasteten Boden. Die höchsten Gehalte lagen bei 200 mg P/kg TS. In den Kontrollpflanzen und der Bakterienbehandlung wurde meist mehr P eingelagert, teilweise auch signifikant. Insgesamt lagen die P-Gehalte aber noch im Normbereich. Die Pflanzen wiesen keine Mangelsymptome (Antocyanfärbung der Blätter) auf.

Schadelemente in der Sonnenblume

Im Referenzboden BBA waren keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf das Aufnahmeverhalten der Elemente Cd, Cu, Ni und Zn durch die Rhizosphären- Mikroorganismen in Stängel, Presskuchen, Samen, Öl und Wurzeln messbar. Tendenziell konnten Reduktionen von Cd, Cu, Ni und Zn in die Stängel und den Presskuchen und Anreicherungen in die Wurzel beobachtet werden. Im Öl waren die niedrigsten Werte zu finden (Anh. 31 u. 34).

Obwohl im mäßig belasteten Boden BBA der Cd-Gehalt um eine 10er Potenz höher war im Vergleich zum Referenzboden, wurden im Stängel im Knospenstadium die 10-fache und zur Vollreife die 20-fache Cd-Konzentration gemessen. Durch die singuläre AM-Beimpfung und die Dualbeimpfung mit Bakterien wurde der Cd-Gehalt in den Stängeln signifikant reduziert. Im Presskuchen, Öl und Wurzel unterschieden sich die Cd-Gehalte nicht voneinander. Cu wiederum wurde durch die Mikroorganismen verstärkt in die Stängel und Wurzeln eingelagert. Cu überschritt den vorgegebenen Grenzwert der Futtermittelverordnung von 15 mg Cu/kg (bezogen auf 88 v. H. TS) im Presskuchen. Durch die Dualbeimpfung wurde der Gehalt aber genau auf 15 mg Cu/kg TS signifikant reduziert. Der Zn-Gehalt konnte nur durch die Dualbehandlung im Presskuchen von 72 auf 63 mg Zn/kg TS reduziert werden (A 32 u. 35).

Auf dem hoch belasteten Boden Großbeeren zeichnete sich eine signifikante Anreicherung der Elemente Cd, Cu, Ni und Zn in den Kontrollpflanzen und den Bakterienvarianten in den Stängeln im Knospenstadium ab. Die Wurzeln zeigten bei allen Varianten ähnliche Gehalte der Schadelemente. Cd wurde signifikant durch die Bakterien erhöht. Zur Vollreife konnten durch AM und AMB wiederum höhere Werte Cd, Cu und Zn in die Stängel und Wurzel, statistisch gesichert, gemessen werden. Die Proben der Kontrolle und der Bakterienvariante waren im Presskuchen und Öl nicht messbar, da das Pflanzenmaterial nicht ausreichte. Erstaunlicherweise waren die Cd-, Cu- und Zn-Gehalte in den Proben der Varianten AM und AMB kaum höher als im mäßig belasteten Boden der gleichen Varianten (Anh. 33 u. 36).

Cadmium in den Blättern

Das Cd wurde in den unteren Blättern verstärkt aufgenommen und nahm zu den oberen Blättetagen hin ab. Diese Verteilung war zu beiden Ernteterminen und in allen drei Versuchsböden anzutreffen. Die Gehalte lagen bei allen Blättetagen und Behandlungen des Referenzbodens unterhalb der Grenze von 1 mg Cd/kg TS der Futtermittelverordnung. Bemerkenswert war die signifikante Abnahme in fast allen Blättetagen durch die Bakterien-, Mykorrhiza- und Dualbehandlung im Vergleich zu den unbehandelten Varianten. Das Cd wurde durch die Inokulationen vermindert aufgenommen (Anh. 51 u. 52).

Der mäßig belastete Boden hatte einen Gesamtgehalt von 4 mg Cd/kg Boden (TS). Die Sonnenblume gehört zu den Akkumulator-Pflanzen; sie nehmen überproportional das Cd in die Blätter auf. Auch in diesem Boden wurde die Cd-Aufnahme im Vergleich zur Kontrolle durch die Inokulationen mit Mykorrhizapilzen und der Dualbeimpfung zu beiden Ernteterminen signifikant reduziert. Die Unterschiede der Bakterien zur Kontrolle waren nicht so deutlich. Durch die Dualbeimpfung wurde am wenigsten Cd aufgenommen. In den Kontrollpflanzen konnten Gehalte bis über 9 mg Cd/kg TS in den unteren Blättetagen gemessen werden.

Der hoch belastete Boden Großbeeren wies einen Gesamtgehalt von 35 mg Cd/kg Boden (TS). In der untersten Blättetage wurde überproportional bis zu 52 mg Cd/kg TS durch AM zur Zwischenernte und 44 mg Cd/kg TS durch die Dualbeimpfung aufgenommen. Bemerkenswert aber war die signifikante Mehraufnahme des Cd von 66 % durch die Dualbeimpfung in der obersten Blättetage im Vergleich zur Kontrolle und 29 % zur singulären Mykorrhizabehandlung. Die Bakterien hingegen nahmen keinen Einfluss auf die Cd-Aufnahme. Trotz der hohen Cd-Konzentrationen wiesen die Pflanzen der singulären und dualen Pilzbehandlungen keine Schädigungen auf.

Kupfer

Die Cu-Aufnahme in die Blätter im Referenzboden BBA war durch die Behandlungen zur Zwischenernte meist höher und nahm im Vergleich zur Kontrolle, in der 4. Blatttage durch die Dualbeimpfung signifikant, zur Haupternte hin ab. Hier spielt der Verdünnungseffekt wieder eine Rolle (Anh. 53 u. 54).

Bei allen Varianten nahm die Cu-Aufnahme auf dem mäßig belasteten Boden BBA von unten nach oben zu. Im Knospenstadium war noch eine Abnahme des Cu in den Blättern durch die Behandlungen, durch AM auch signifikant, zu verzeichnen. Zur Vollreife dann waren die Konzentrationen durch die Bakterien bis zur 4. Blatttage im Vergleich zur Kontrolle gesteigert worden und nahmen in den oberen Blatttagen aber im Vergleich zur Kontrolle hin ab. Diese Werte waren statistisch nicht gesichert, aber es ist eine Tendenz erkennbar. Die Blätter der mit Mykorrhiza behandelten Pflanzen zeigten kein so deutliches Muster auf. Sie unterschieden sich nur unwesentlich von den Kontrollpflanzen.

Die Cu-Gehalte in den Blättern im hoch belasteten Boden Großbeeren wiesen bis zur 3-fachen Konzentration an Cu im Vergleich zu den beiden anderen Böden auf. Da Cu war gleichmäßig in den Blatttagen verteilt. Zur Zwischenernte wurde durch die AM überproportional mehr Cu bis zur 3. Blatttage aufgenommen und zur Haupternte bis zur 2. Blatttage zur Kontrolle und der Bakterienbehandlung signifikant erhöht. Die phytotoxische Richtkonzentration in Pflanzen wird mit 20 mg Cu/kg TS angegeben VON ARX (1998). Diese Richtkonzentration wurde meist in den unteren Blatttagen überschritten mit sichtbaren Schäden wie Chlorosen und Nekrosen bei den Kontrollpflanzen und der Bakterienvariante. Obwohl die Gehalte bei den Mykorrhizavarianten weitaus höher bis zu 31 mg Cu/kg TS lagen, konnten keine äußerlichen Schäden an den Pflanzen festgestellt werden.

Zink

Die Zn-Aufnahme in die Blätter verhielt sich ähnlich der Cd-Aufnahme im Referenzboden BBA. Hier zeigte sich wiederum eine signifikant geringere Aufnahmerate von Zn durch die Behandlungen zu beiden Ernteterminen, wobei der Unterschied in den unteren Blatttagen durch die Mykorrhizabeimpfung zur Kontrolle am deutlichsten war (Anh. 55 u. 56).

Der von SAUERBECK (1983) angegebene Richtwert der Toxizitätsgrenze von 200 mg Zn/kg TS wurde nur in den Kontrollpflanzen in der unteren Blatttage um 11 % auf dem mäßig belasteten Boden überschritten. Die behandelten Varianten reduzierten die Zn-Aufnahme zu beiden Ernteterminen, wobei zur Zwischenernte die Bakterienvariante niedrigere Werte aufwies und zur Vollreife die Zn-Aufnahme durch die AM stärker reduziert wurde. Zur Vollreife konnten die singuläre Beimpfung mit dem Mykorrhizapilz und die Dualbeimpfung in der obersten Blatttage zu einer signifikant geringeren Zn-Aufnahme verhelfen.

Auf dem hoch belasteten Boden Großbeeren überschritten die Zn-Gehalte in allen Blatttagen die Toxizitätsgrenze von 200 mg Zn/kg TS über ein zehnfaches. Durch die Mykorrhizabeimpfung konnten sogar Gehalte zur Zwischenernte von 3000 und zur Haupternte über 2500 mg Zn/kg TS in den unteren Blatttagen gemessen werden. Alle Varianten wiesen eine Abnahme des Zn in die oberen Blatttagen auf. Die Zn-Aufnahme wurde gleichfalls durch die Mykorrhizabeimpfung und Dualbeimpfung im Vergleich zur Kontrolle erhöht und in den untersten Blatttagen auch signifikant.

4.5 Wirkung der Mykorrhiza und assoziativen Bakterien auf die Entwicklung von Mais im Feldversuch 2000 - 2002

Durch das Aufbringen von Koksasche auf dem Gelände der BBA Berlin-Dahlem nach dem 2. Weltkrieg mit anschließender agrotechnischer Verlagerung der Punktkontamination kam es zur heterogenen Verteilung des Cd. Durch diese Heterogenität können einige Schwankungen in den Erträgen und im Aufnahmeverhalten von Schad- und Nährstoffen erklärt werden (Abb.34). Die Konzentrationen des Cd gehen von 8mg/kg in den grün dargestellten Bereichen bis zu Höchstkonzentrationen von 25 mg/kg der rot dargestellten Gebiete. Die relativ großen Schwankungen der Einzelwerte erklären die geringe Reflexion statistischer Sicherheit.

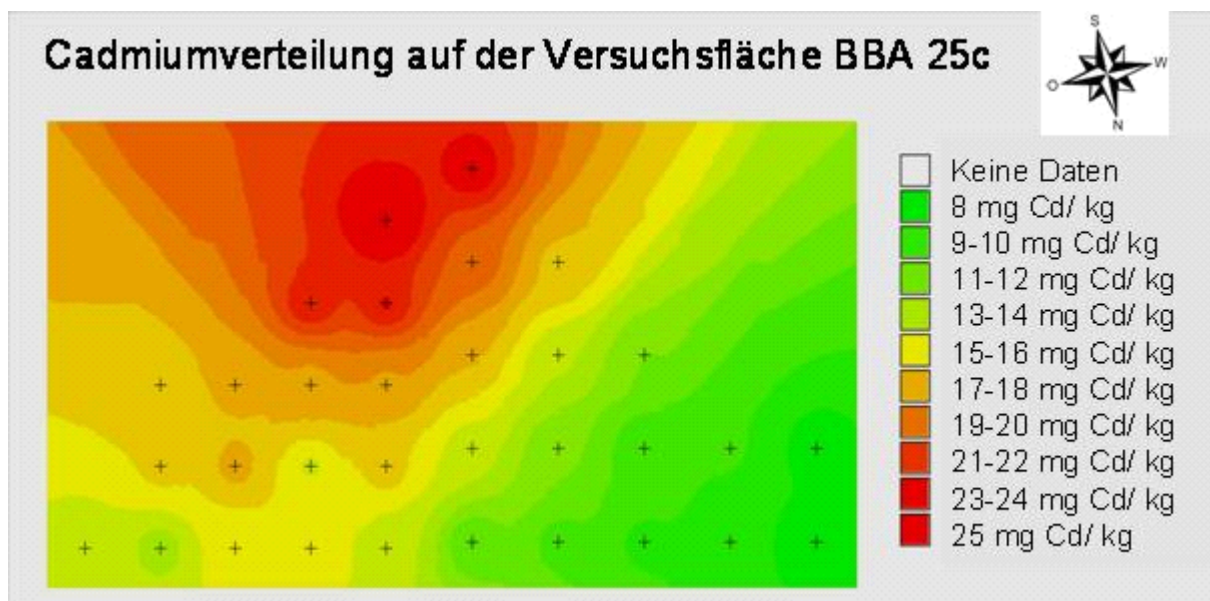


Abb. 34: Heterogenität des Cd auf der Versuchsfäche BBA Berlin-Dahlem

4.5.1 Gesamterträge und Ertragsstruktur des Maises im Feldversuch

Am Standort BBA Berlin-Dahlem, konnte im Versuchsjahr 2000 durch die Dualbeimpfung der Mykorrhiza mit Bakterien (AMB) der Aufgang der Pflanzen um 48 % signifikant gesteigert werden (Tab. 36). Auch die Frisch- und Trockenmasseerträge der Kolben und der Gesamtpflanzen wiesen einen Zuwachs durch AMB von 38 bis 49 % auf, allerdings durch die große Streuung nicht signifikant. Die singuläre Beimpfung mit Pilzisolat und Bakterien brachten Mehrerträge des Gesamt- und Kolbenenertrages zwischen 33 und 37 % im Vergleich zur Kontrolle. Die Anzahl der Kolben wurde durch die Bakterienbeimpfung signifikant um 51 % erhöht. Rückläufig war dagegen das TKG, das sich durch die Zugabe von AM und AMB um 10 % verringerte, bedingt durch die Zunahme des Kolbengewichts, da die Einzelkörner im Zuge der Kolbengewichtszunahme die Körner kleiner werden. Im zweiten Versuchsjahr waren die Ertragserhöhungen durch die Behandlungen der Mikroorganismen nicht mehr so deutlich (Tab. 37). Lediglich durch AM wurde eine nicht signifikante Steigerung des Gesamtfrischgewichts um 34 % und des Kolben um 27 % sichtbar. Das TKG blieb unbeeinflusst. Die Erträge der Gesamtpflanze, der Kolben und das TKG im Versuchsjahr 2002 blieben durch die Inokulationen mit Bakterien, AM und AMB im Vergleich zur Kontrolle unverändert (Tab. 38). Über die drei Versuchsjahre konnte aber eine Steigerung des Ertrages von 29 % bei den Kontrollparzellen beobachtet werden. Möglicherweise spielt die Etablierung der Mykorrhiza auf der gesamten Versuchsfäche eine Rolle (Kap. 5.8.).

Tab. 36: Ertragsstruktur von Mais im Feldversuch BBA, 2000

Variante	FM (kg)	TM (kg)	Anzahl Pflanzen (n)	Kolben FM (kg)	Kolben TM (kg)	Anzahl Kolben (n)	TKG (g)
Kontrolle	27,8b	20,8	48b	10,4	8,8	43b	292,6a
Bakterien	38,3ab	28,7	67ab	13,1	11,9	65a	275,8ab
AM	37,6ab	28,0	63ab	12,4	11,7	60ab	266,1b
AMB	41,3a	31,0	71a	14,4	13,0	63ab	263,1b

Tab. 37: Ertragsstruktur von Mais im Feldversuch BBA, 2001

Variante	FM (kg)	TM (kg)	Anzahl Pflanzen (n)	Kolben FM (kg)	Kolben TM (kg)	Anzahl Kolben (n)	TKG (g)
Kontrolle	29,4	12,6	52	13,2	9,3	51	244,7
Bakterien	32,6	13,6	69	13,2	10,1	70	257,0
AM	39,4	16,4	66	16,7	12,3	68	272,0
AMB	30,6	12,9	54	13,3	9,6	60	251,4

Tab. 38: Ertragsstruktur Mais im Feldversuch BBA, 2002

Variante	FM (kg)	TM (kg)	Anzahl Pflanzen (n)	Kolben FM (kg)	Kolben TM (kg)	Anzahl Kolben (n)	TKG (g)
Kontrolle	35,8	17,0a	84	14,5	13,4	81	259,6b
Bakterien	33,4	16,4	79	13,9	12,6	78	262,7b
AM	34,9	16,8	75	14,7a	13,1	75	275,1a
AMB	31,2	15,1	72	13,5	11,8	71	278,3a

TKG = Tausendkorngewicht

4.5.2 Proteingehalt im Maiskorn im Feldversuch

Im Jahr 2001 wurde der Proteingehalt der Maiskörner untersucht und in Prozent ausgewiesen. Durch die singuläre Beimpfung von AM und Bakterien konnte der Proteingehalt um 1,2 % auf 10,7 % gesteigert werden ohne statistische Absicherung. Die Dualbeimpfung brachte dagegen keine Veränderung.

4.5.3 Nähr- und Schadelemente im Mais im Feldversuch

Als Nährelemente wurden Ca, K, Mg und P untersucht. Hauptsächliches Augenmerk bei den Schadelementen lag auf dem Cd.

Der Einfluss von Mykorrhiza auf die Ca-Gehalte in den verschiedenen Pflanzenorganen war weder zur Zwischenernte noch zur Vollreife im Jahr 2000 ersichtlich. Die Bakterieninokulation steigerte die Ca-Aufnahme in die Blätter zur Zwischenernte und in die Wurzeln zur Vollreife signifikant zu den Pilzvarianten. Auf die Elemente K, Mg und P hatten die Behandlungen keinen Einfluss. Es konnte sogar eine P-Abnahme zur Vollreife durch die drei verschiedenen Behandlungen ermittelt werden (Anh. 68 u. 74). In den Folgejahren war kein nennenswerter Einfluss auf das Aufnahmeverhalten der Nährelemente durch die Bakterien oder Mykorrhizapilze zu beiden Erntezeitpunkten spürbar. Der Boden bot eine ausreichende Grundversorgung für die Maispflanzen, so dass keine fördernden Effekte durch die Mikroorganismen auftraten (Anh. 69, 70, 75 u. 76).

Die Cd-Gehalte in den einzelnen Pflanzenteilen zur Zwischen- und Haupternte unterschieden sich nur geringfügig. Die höheren Cd-Gehalte in den Maiskolben zur Zwischenernte erklären sich durch die Probennahme, da zum Zeitpunkt der Milchreife die Körner nicht ablösbar waren und die Spindel mit analysiert wurde. Die Cd-Gehalte zur Zwischenernte waren bis 0,91 mg Cd/kg TS (Anh. 71 – 73) und zur Haupternte bis 0,21 mg Cd/kg TS (Anh. 77 – 79). Diese Konzentrationen liegen aber unter dem Grenzwert der Futtermittelverordnung von 1 mg Cd/kg TS. Durch die Heterogenität des Cd auf der Versuchsfläche wurden keine Unterschiede zwischen den Varianten gefunden und deshalb die Cd-Aufnahme mit dem Transferfaktor verglichen (Kap. 4.5.4).

Im Mittel wurden 10 mg Cd/kg TS in den Blättern und 4 mg Cd/kg TS in den Stängeln im ersten Versuchsjahr 2000 ermittelt (Anh. 71 u. 77). Auffällig war die stetige Abnahme des Cd in Blättern und Stängeln. Die Cd-Konzentrationen sind im dritten Versuchsjahr nahezu halbiert worden. Gleichzeitig fand eine Anreicherung von Cd in die Wurzeln statt. Die höchsten Cd-Gehalte von 22 mg Cd/kg TS wurden in den Wurzeln zur Zwischenernte im Jahr 2002 gemessen (Anh. 73).

Beim Cu und Zn wurden die höchsten Konzentrationen in den Blättern gemessen. Es konnten keine Unterschiede im Aufnahmeverhalten zwischen den Varianten ermittelt werden.

4.5.4 Transferfaktor des Maises

Durch die heterogene Verteilung des Cd im Versuchsfeld werden die Cd-Aufnahmeraten über den Transferfaktor dargestellt, um eine bessere Vergleichbarkeit aufzuzeigen (Abb. 36). Der Transferfaktor in oberirdischen Pflanzenteilen reichte von 0,33 bis 0,14 mit einer stetigen Abnahme über die drei Versuchsjahre hinweg. Die Faktoren der AM-Variante lagen bei beiden Ernten in allen drei Jahren unter den Transferfaktoren der Kontrolle. Auch die Aufnahmeraten durch die Bakterien und der AMB waren tendenziell niedriger als die der Kontrolle. Signifikante Unterschiede konnten aber durch die große Streuung nicht ermittelt werden. Die Aufnahmeraten in die Wurzeln unterschieden sich von den oberirdischen Pflanzenteilen in der Höhe des Transferfaktors (0,72 bis 2) und der stetigen Aufnahme über die Versuchsjahre hinweg. Durch die Behandlungen mit den Rhizosphären-Mikroorganismen ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zur Kontrolle. In eigenen Versuchen mit ABDI BAGHI, HEISE et al.; (2003) wurden bei Feldversuchen im Berliner Umland die Cd-Transferfaktoren in den oberirdischen Pflanzenteilen und in der Wurzel des Maises durch AM signifikant gesenkt. Über zwei Versuchsjahre wurde gleichfalls eine Abnahme der Transferfaktoren bei allen Varianten ermittelt.

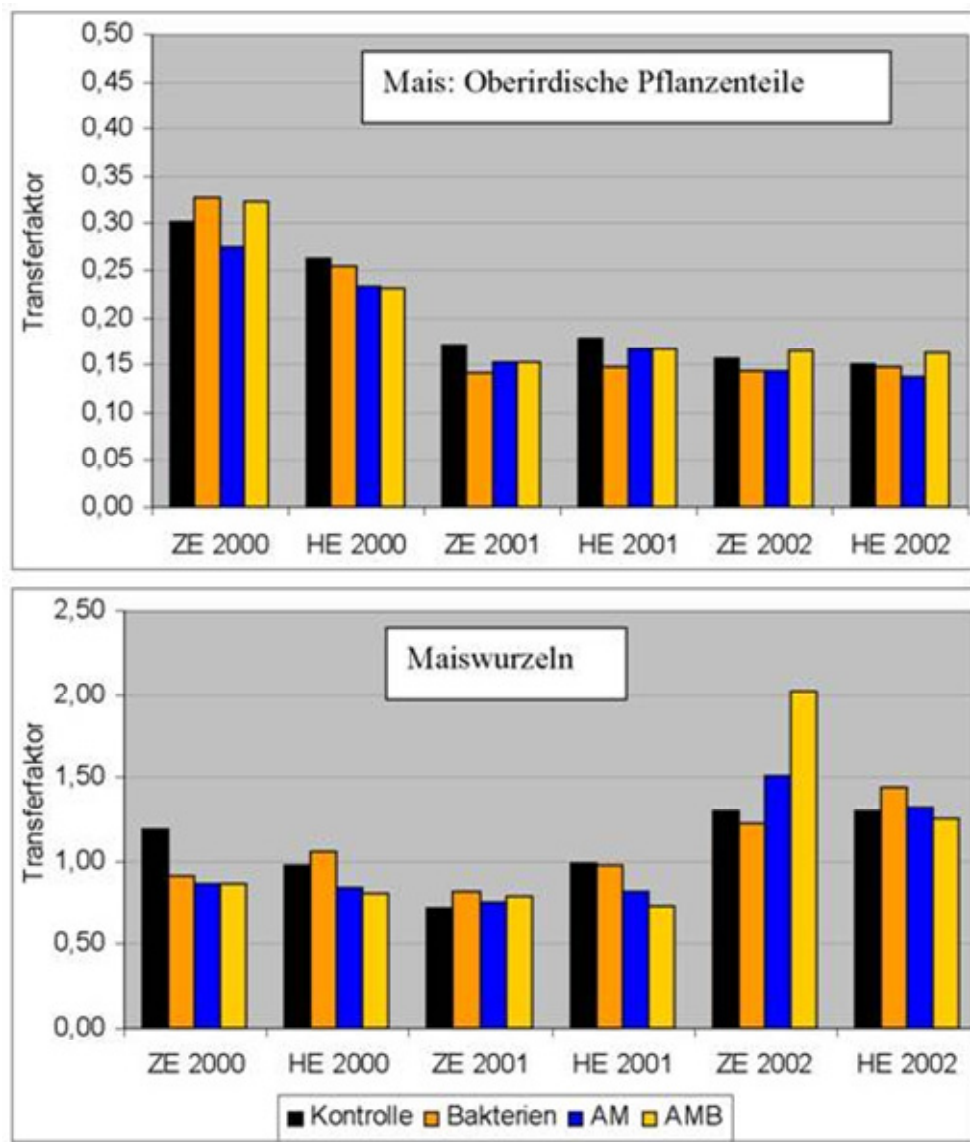


Abb. 35: Entwicklung der Transferfaktoren im Mais (oberirdische Pflanzenteile und Wurzeln) 2000, 2001 u. 2002 mit je zwei Ernteterminen (ZE = Zwischenernte, Stadium der Milchreife; HE = Haupternte, Vollreife)

4.5.5 Mykorrhizierungsgrad der Maiswurzeln im Feldversuch

Die Ergebnisse der Wurzelbonitierung auf Mykorrhizainfektion wurden als prozentualer Anteil der Wurzelabschnitte ausgewiesen (Abb. 36). Im Stadium der Milchreife (Zwischenernte) des Versuchsjahres 2000 waren die Wurzeln des Maises der Bakterienbeimpfung und der Kontrolle mit 9,6 und 11 % der autochthonen Mykorrhiza besiedelt. Die Mykorrhizavariante erreichte die höchsten Infektionsraten mit 31,5 % durch die singuläre Beimpfung. Durch die Dualbeimpfung AMB wurden nur 9,7 % Infektionsrate ermittelt. Zur Vollreife konnte eine Steigerung der Infektionsrate bei der Bakterienvariante und der Dualbeimpfung von 14,3 % und 24,3 % erzielt werden. Im Folgejahr wiesen alle Varianten zur Zwischenernte eine Steigerung der Infektionsrate von 29,5 % bis 43 % auf. Die Anteile der mykorrhizierten Wurzeln wurden zur Haupternte nicht maßgeblich verändert. Lediglich die Bakterienvariante unterschied sich signifikant mit 47 % von der Kontrolle. Im Jahr 2002 unterschieden sich die Infektionsraten zu beiden Erntezeitpunkten nicht voneinander. Insgesamt konnte eine Erhöhung der Infektionsraten bis 49,3 % ermittelt werden.

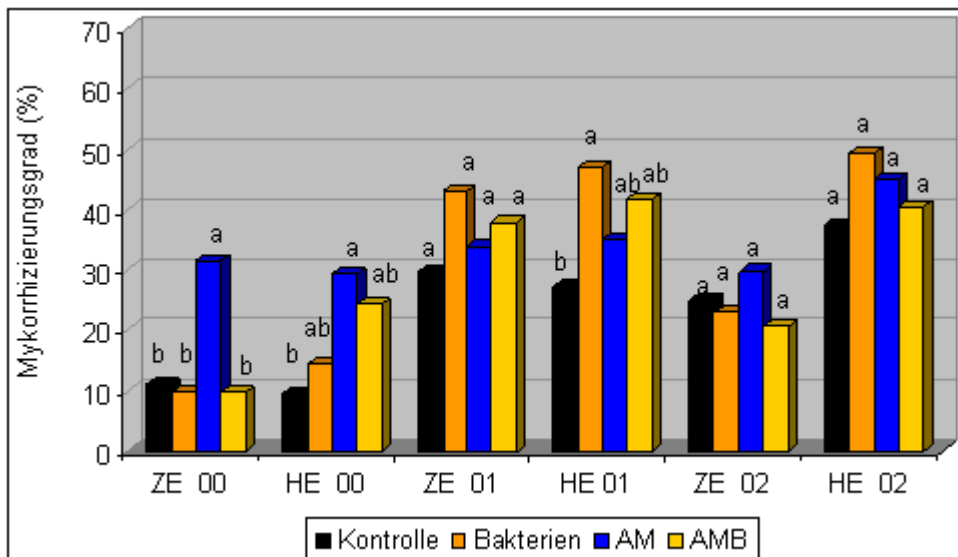


Abb. 36: Mykorrhizierungsgrad der Maiswurzeln im Feldversuch BBA zu beiden Ernteterminen in den Jahren 2000, 2001 und 2002 (ZE = Zwischenernte, Stadium der Milchreife; HE = Haupternte, Vollreife)

4.5.6 Korrelation zwischen Mykorrhizierungsgrad und Transferfaktor am Mais

Da während der drei Versuchsjahre eine Zunahme der mykorrhizierten Maiswurzeln und eine Abnahme des Cd-Transfers der oberirdischen Pflanzenteile ermittelt wurden, liegt die Vermutung nahe, einen Zusammenhang zwischen den Faktoren zu knüpfen. In Abb. 37 sind die Korrelationen zwischen Mykorrhizierungsgrad und Transferfaktor der drei Versuchsjahre mit je zwei Ernten dargestellt. Die R²-Werte zeigen das Zusammenhangsmaß an.

Alle AM-Infektionsraten korrelieren negativ mit den Transferfaktoren und sind signifikant auf einem Niveau von 0,01. Die Korrelationen waren meist deutlicher zur Vollreife des Maises (Haupternte) und nahmen über die Versuchsjahre zu. Die beste Korrelation wurde mit -0,775 zur Haupternte im Jahr 2002 gefunden (Tab. 39). Es bestand aber kein Zusammenhang zwischen der Infektionsrate und der Cd-Belastung im Boden.

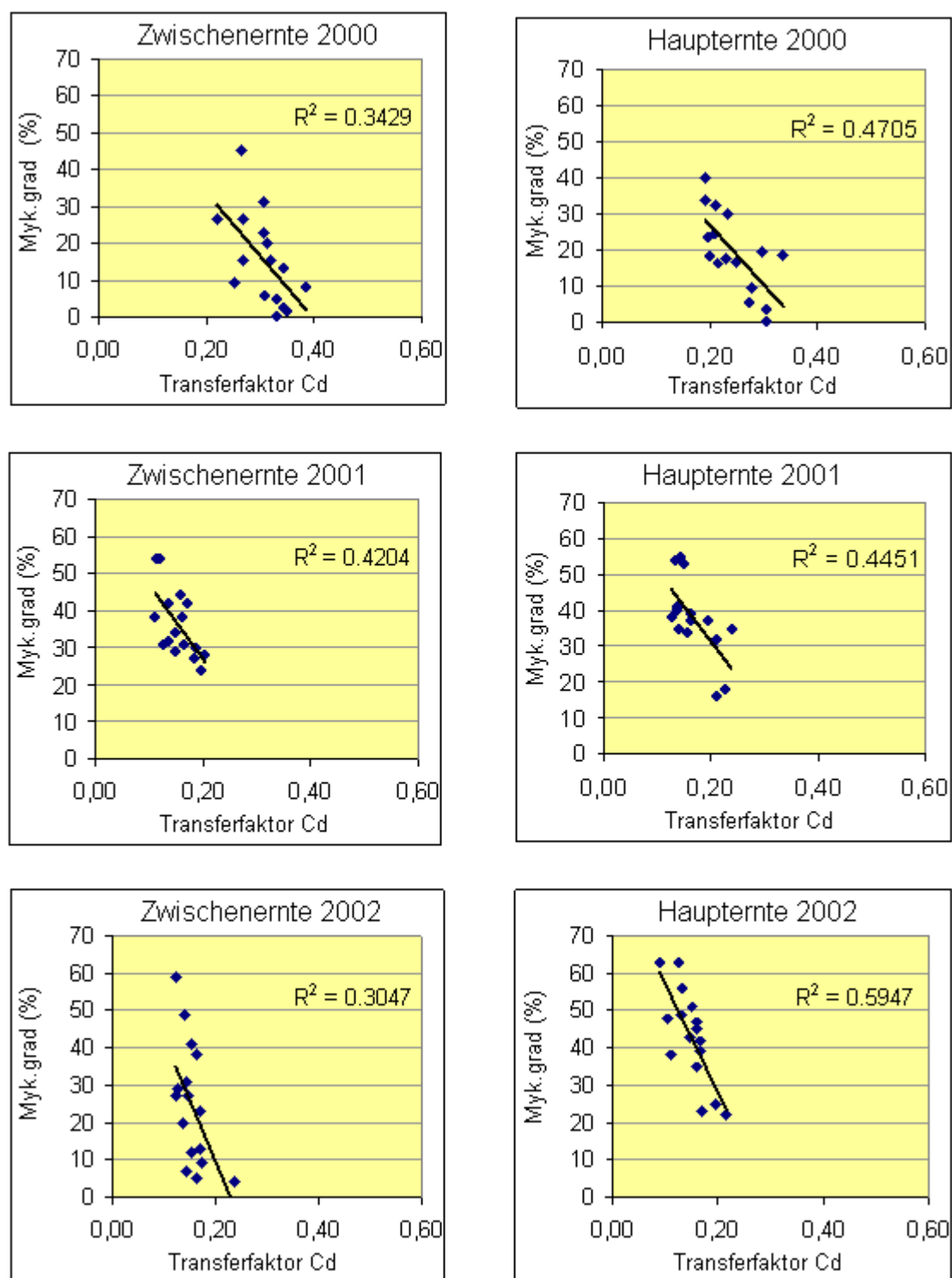


Abb. 37: Korrelationen zwischen dem Cd-Transfer und dem Mykorrhizierungsgrad im Feldversuch beim Mais zu beiden Ernteterminen 2000-2002

Tab. 39: Korrelation zwischen Transferfaktor und Mykorrhizierungsgrad

Jahr	Zwischenernte: Milchreife	Haupternte: Vollreife
2000	-0,572*	-0,684**
2001	-0,669**	-0,654**
2002	-0,547*	-0,775**

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

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

4.6 Wirkung der Mykorrhiza und assoziativen Bakterien auf die Entwicklung des Weidelgrases im Feldversuch 2000 – 2002

4.6.1 Gesamterträge und Ertragsstruktur des Weidelgrases im Feldversuch

Das Weidelgras wurde zweimal pro Jahr in allen drei Jahren geschnitten, die FM und die TM bestimmt und die TM in Prozent ermittelt. Im ersten Versuchsjahr kam es zu signifikanten Mehrerträgen durch die Bakterienbehandlung zu beiden Schnitten in der FM zwischen 20 und 48 % im Vergleich zur Kontrolle. Die Beimpfung mit dem Mykorrhizapilz verschaffte signifikante Mehrerträge der FM während der ersten Ernte und in der TM zum zweiten Schnitt. Auch die Dualbeimpfung verhalf zu signifikanten Ertragssteigerungen von 40 % zum zweiten Schnitt in der TM. Die prozentualen Trockengehalte des Weidelgrases blieben durch die Behandlungen unbeeinflusst (Tab. 40). Die Bakterieninokulation verschaffte im zweiten Versuchsjahr gleichfalls Mehrerträge in den FM und TM zu beiden Schnitten, ohne statistische Absicherung. Die Pilzvarianten veränderten die Erträge nicht (Tab. 41). Im Jahr 2002 war kein Einfluss durch die Behandlungen in Bezug auf die Erträge erkennbar (Tab. 42).

Tab. 40: Ertragsstruktur des Weidelgrases im Feldversuch BBA 2000

Variante	FM	TM	TM	FM	TM	TM
	(kg)	(kg)	(%)	(kg)	(kg)	(%)
	1. Schnitt	1. Schnitt	1. Schnitt	2. Schnitt	2. Schnitt	2. Schnitt
Kontrolle	4,85b	0,82	16,8	2,71b	0,35b	13,2
Bakterien	5,84a	1,02	17,4	4,00a	0,50a	12,5
AM	5,90a	0,90	15,4	3,44ab	0,48a	14,1
AMB	5,38ab	0,86	16,0	3,85ab	0,49a	12,5

FM = Feuchtmasse; TM = Trockenmasse

Tab. 41: Ertragsstruktur des Weidelgrases im Feldversuch BBA, 2001

Variante	FM (kg)	TM (kg)	TM (%)	FM (kg)	TM (kg)	TM (%)
	1. Schnitt	1. Schnitt	1. Schnitt	2. Schnitt	2. Schnitt	2. Schnitt
Kontrolle	3,37	0,78	23,9	1,91	0,50	26,5
Bakterien	4,12	0,91	22,0	2,21	0,53	23,6
AM	3,81	0,84	22,4	1,98	0,50	25,3
AMB	3,88	0,88	22,7	2,06	0,53	25,9

Tab. 42: Ertragsstruktur des Weidelgrases im Feldversuch BBA, 2002

Variante	FM (kg)	TM (kg)	TM (%)	FM (kg)	TM (kg)	TM (%)
	1. Schnitt	1. Schnitt	1. Schnitt	2. Schnitt	2. Schnitt	2. Schnitt
Kontrolle	4,45	1,10	24,8	1,93	0,29	14,7
Bakterien	4,45	1,09	25,0	1,60	0,25	15,2
AM	4,69	1,21	26,1	1,84	0,27	14,2
AMB	3,74	1,05	28,3	1,97	0,30	14,9

In Abb. 38 sind die Grasparzellen des Feldversuches BBA Berlin-Dahlem im Jahr 2000 dargestellt. Verglichen wurde die Kontrolle mit der Dualbeimpfung. Die behandelte Variante zeigte einen deutlich besseren Wuchs zum ersten Schnitt nach 5 Wochen nach der Saat. Das Weidelgras der Kontrollparzelle fiel durch Gelb-Verfärbungen der äußeren Halme auf.



Abb. 38: Weidelgrasparzellen des Feldversuches BBA im Vergleich Kontrolle und Mykorrhiza mit Bakterien

4.6.2 Nähr- und Schadelemente im Weidelgras des Feldversuches

Im Weidelgras wurden die Nährelemente Ca, K, Mg und P bestimmt. Die Ca-Aufnahme wurde durch die Pilz- und Bakterieninokulation über die drei Versuchsjahre hinweg in die Grünmasse und Wurzeln im Vergleich zu den Kontrollpflanzen nicht beeinflusst. Es kam lediglich im dritten Jahr zu einem signifikanten Anstieg des Ca im Weidelgras durch die Bakterienbeimpfung zur ersten Ernte.

Die Mykorrhizainfektion schien die K-Aufnahme zu fördern. Im ersten Jahr wurden bis zu 31 % mehr K im Weidelgras gemessen, verglichen mit der Kontrolle. Auch die Bakterien- und die Dualbeimpfung steigerten die K-Aufnahme signifikant zwischen 20 und 35 %. Durch die AM wurden auch in den folgenden zwei Jahren die K-Gehalte tendenziell zwischen 4 und 9 % erhöht im Vergleich zur Kontrolle. Die Konzentrationen in den Wurzeln blieben unbeeinflusst. Die Behandlungen mit Bakterien und Pilzen führten zu keiner Veränderung der Mg- oder P-Aufnahme (Anh. 80-82).

Cadmium

Zur ersten Ernte lagen die Cd-Gehalte im ersten und dritten Versuchsjahr im Weidelgras mit 3,2 mg Cd/kg TS bzw. 5,3 mg Cd/kg TS über den Grenzwerten der Futtermittelverordnung und wären für Fütterungszwecke nicht geeignet. Zur zweiten Ernte wurden zwar die Konzentrationen auf ca. 50 % reduziert, lagen aber immer noch über 1 mg Cd/kg TS (Anh. 83). Lediglich im Jahr 2001 konnte die Cd-Konzentration im überjährigen Weidelgras bei allen Varianten unter den Grenzwert von 1 mg Cd/kg TS reduziert werden (Anh. 84).

Die Cd-Aufnahme wurde durch die Dualbeimpfung im ersten Jahr zu beiden Ernten zwischen 4 % und 16 % (Anh.83), im zweiten Jahr um 17 % (Anh. 84) und im 3. Jahr um 24 % (Anh. 85) jeweils zur ersten Ernte gesteigert. Die Einzelbehandlungen mit Pilz oder Bakterien schienen keinen Einfluss auf das Aufnahmeverhalten des Cd zu haben.

Kupfer

Die Cu-Konzentrationen lagen bei allen Varianten zwischen 4,6 mg Cu/kg TS und 8,1 mg Cu/kg TS und unterschieden sich kaum zwischen den beiden Ernteterminen. Die Cu-Konzentrationen wurden durch die Pilz- und Dualbehandlung zur zweiten Ernte im Jahr 2000 signifikant um 23 % bzw. 38 % erhöht (Anh. 83). Im Folgejahr konnte durch die Pilzinfektion noch eine Steigerung des Cu um 11 % ermittelt werden, aber nicht signifikant (Anh. 84). Im dritten Versuchsjahr wurden diese Konzentrationserhöhungen durch den Mykorrhizapilz nicht mehr bestätigt (Anh. 85). Der vorgegebene Grenzwert der Futtermittelverordnung wurde im Weidelgras in keinem Fall überschritten. Meist wurden in den Wurzeln der Kontrollpflanzen die höchsten Cu-Gehalte gemessen; im Jahr 2001 auch signifikant zu den Behandlungen.

Zink

Die Zn-Gehalte in den oberirdischen Pflanzenteilen lagen bei allen Versuchsjahren und Ernten zwischen 24,5 und 43,5 mg Zn/kg TS ohne nennenswerte Unterschiede. Die Konzentrationen in den Wurzeln nahmen über die Versuchsjahre von 141 mg Zn/kg TS bis 57 mg Zn/kg TS ab, ohne Einfluss der Pilze oder Bakterien (A 83-85).

4.6.3 Mykorrhizierungsgrad der Weidelgraswurzeln

Graswurzeln mykorrhizieren besser an den Wurzelenden. Da diese aber bei der Entnahme durch die Wurzeltiefe teilweise gekappt wurden, muss das Auftreten von Mykorrhizastrukturen nicht dem realen Mykorrhizierungsgrad entsprechen. Die Mykorrhiza-infektion wurde zum zweiten Schnitt bestimmt und ist in Abb. 39 dargestellt. In allen drei Versuchsjahren war die Infektion des Mykorrhizapilzes bei allen Varianten unter 20 % und unterschied sich kaum voneinander. Die autochthone Mykorrhiza im zweiten Jahr lag sogar signifikant höher als die inokulierten Flächen mit AM. Durch den zugeführten Mykorrhizapilz konnte keine höhere Infektionsrate an den Graswurzeln erreicht werden.

Eindeutige Korrelationen zwischen den Infektionsraten mit den Transferfaktoren des Cd wie beim Mais konnten zu keinem Zeitpunkt errechnet werden.

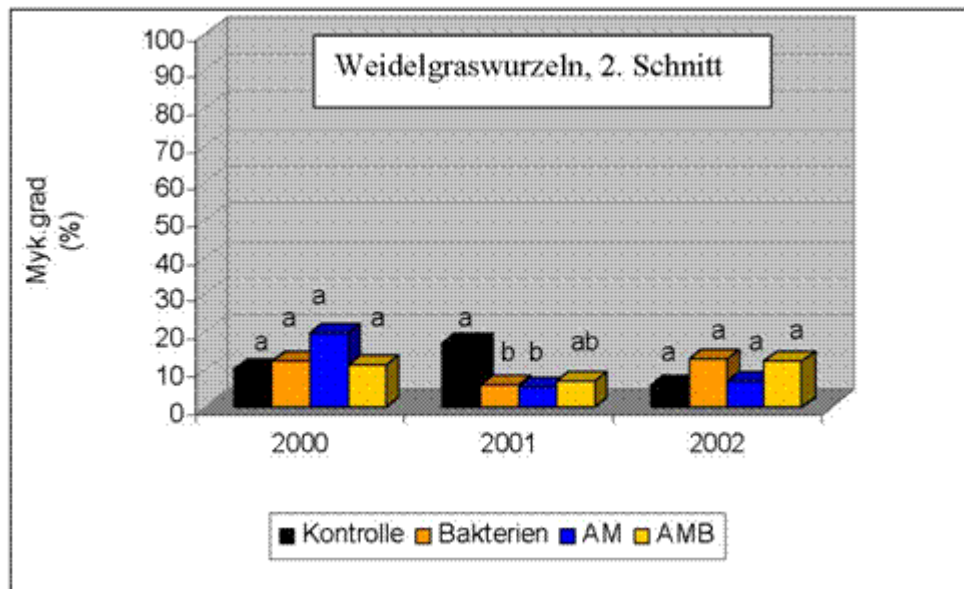


Abb. 39: Mykorrhizierungsgrad der Weidelgraswurzeln im Feldversuch BBA zum zweiten Schnitt, 2000, 2001 und 2002.

4.6.4 Transferfaktor des Weidelgrases

Die Transferfaktoren von Cd bei Weidelgras im oberirdischen Pflanzenmaterial lagen unter den Werten des Mais zwischen 0,3 bis 0,04 im zweiten Versuchsjahr. Durch die Pilzinfektion konnten die Cd-Transferfaktoren über die drei Versuchsjahre gesenkt werden; zur ersten Ernte im Jahr 2000 sogar signifikant zur Kontrolle. Die Bakterieninokulation erbrachte nur tendenziell geringere Cd-Aufnahmeraten. Die Dualbeimpfung hatte keinen Einfluss auf den Cd-Transfer in die Grünmasse des Weidelgrases. Während der ersten zwei Versuchsjahre wurden die Aufnahmeraten des Cd in die Grünmasse reduziert. Im Jahr 2001 wurden die Pflanzen als überjähriges Weidelgras stehen gelassen und die im Boden etablierte Mykorrhiza nicht gestört. Im letzten Versuchsjahr 2002 musste aufgrund der geringen Ertragsfähigkeit das Weidelgras neu ausgesät und damit auch eine neue Mykorrhiza beimpfung. Durchgeführt werden Durch die Etablierung kam es zu einem erneuten Anstieg der Cd-Aufnahme (Abb. 40).

Die Varianten unterschieden sich im Transferfaktor der Wurzeln nicht voneinander. Es konnte aber eine Zunahme der Aufnahmeraten im Laufe der Versuchsjahre beobachtet werden.

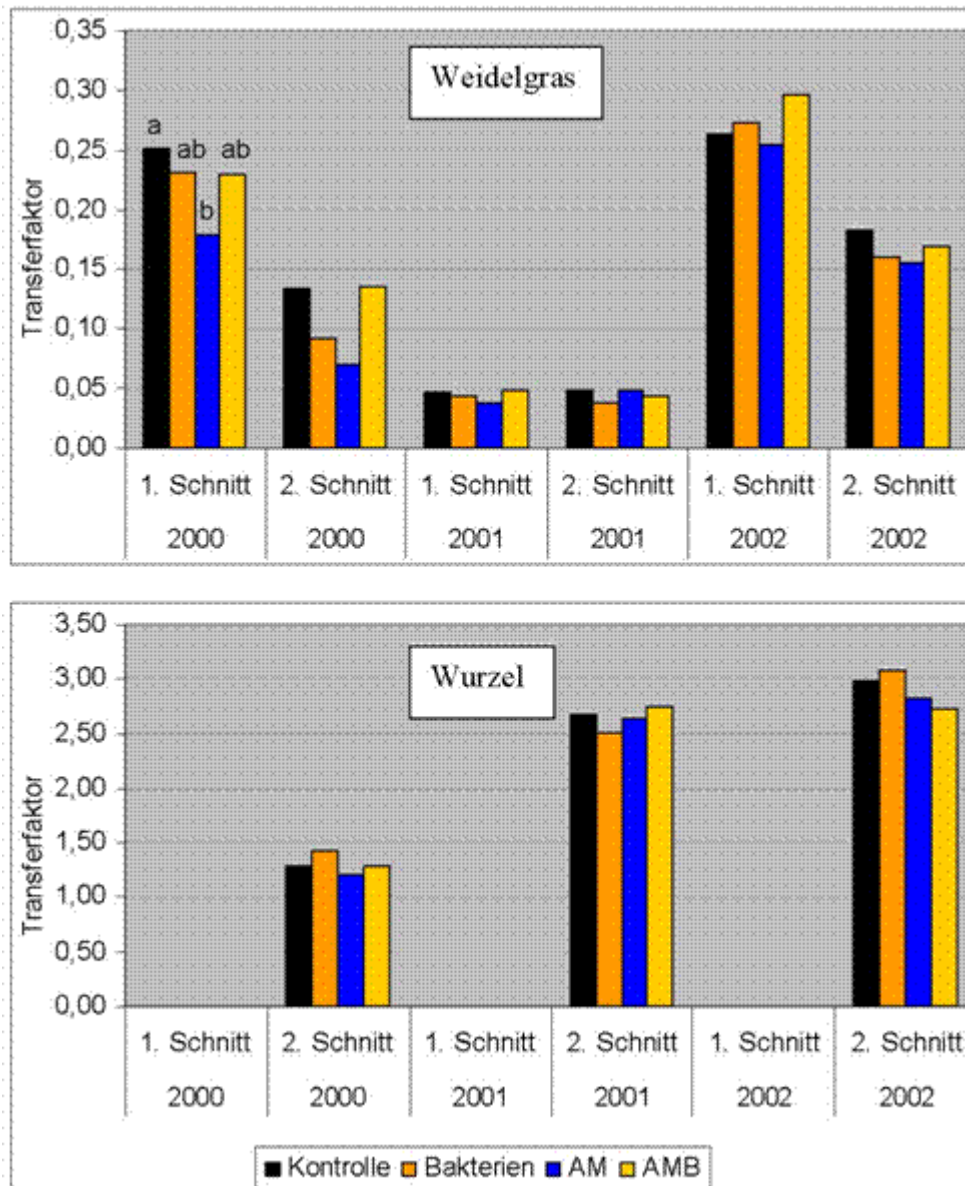


Abb. 40: Entwicklung der Transferfaktoren im Weidelgras (Weidelgras und Wurzeln) 2000, 2001 u. 2002 mit je zwei Schnittterminen

5 DISKUSSION

Ziel der vorliegenden Arbeit war eine Beurteilung der Bedeutung der arbuskulären Mykorrhiza, der assoziativen Bakterien und der Kombination der beiden Mikroorganismen für die Schwermetallaufnahme und -toleranz der Versuchspflanzen Mais, Weidelgras und Sonnenblume auf Schwermetallbelasteten Böden im Gefäß- und Feldversuch. Als Maß für die Effizienz der behandelten Varianten sollten diese untereinander und mit unbehandelten Kontrollpflanzen verglichen werden.

Im Vordergrund der Untersuchungen standen die Erfassung des Pflanzenwachstums, die Ertragsermittlung, sowie die Aufnahme und Verlagerung der Schwermetalle und Nährstoffe in der Pflanze. Von Bedeutung war auch die Entwicklung des Infektionsgrades der Mykorrhiza auf variierenden Schwermetallbelastungen des Bodens. Weiterhin sollten in Mitscherlich-Gefäßversuchen kontinuierliche Veränderungen der Nähr- und Schadelemente mittels gewonnener Bodenlösung untersucht werden.

Der weiterführende Mitscherlich-Gefäßversuch mit der Sonnenblume stellte durch genaue Analytik der einzelnen Blatttagen die Verteilung und Verlagerung der Schad- und Nährelemente dar. Darüber hinaus sollte durch die Dehydrogenasebestimmung der Bodenmikroorganismen während der Vegetationsperiode die mikrobielle Aktivität des Bodens bestimmt werden.

5.1 Rolle und Einfluss auf die Wirksamkeit der Mykorrhiza

Als Mykorrhizaeffizienz wird das Verhältnis beimpfter und unbeimpfter Pflanzen in Prozent definiert und ist daher abhängig von einer Bezugsgröße wie z.B. Wachstum und Nährstoffaufnahme der nicht infizierten Pflanzen (MANSKE, 1989). Da für die Gefäß- und Feldversuche keine Sterilisation des Bodens vorgenommen wurde, zeigte die autochthone Mykorrhiza auch Wirkung auf die Pflanzenentwicklung und erschwerte so eine eindeutige Aussage über die Mykorrhizaeffizienz der zugeführten Mykorrhiza. Jedoch wiesen alle beimpften Pflanzen in den Gefäßversuchen im Vergleich zu nicht beimpften höhere Infektionsraten auf (Kap.4.1.4, 4.2.2, 4.3.3 und 4.4.4).

Die Wurzeln der meisten Kulturpflanzen sind empfänglich für symbiotische Pilze, die zur Bildung der arbuskulären Mykorrhiza führen. Die in den Versuchen eingesetzten Pflanzen Mais, Weidelgras und Sonnenblume waren mykotroph, so dass durch die Beimpfung mit dem Mykorrhizapilz *Glomus intraradices* eine erfolgreiche Etablierung der Endophyten gelang.

Der Verlauf der Infektion konnte am Mais im Feldversuch in den Vegetationsperioden 2000 bis 2002 an jeweils zwei Terminen nachgewiesen werden. Die zum Zeitpunkt der Milchreife beim Mais bonitierten hohen Infektionsraten von 10–43 % belegen die fortschreitende Entwicklung von AM im pflanzlichen Gewebe. Zur Vollreife waren bis 50 % der Wurzeln mit Mykorrhizastrukturen besetzt. Die Infektionsraten zur Zwischenernte unterschieden sich nicht signifikant von den Infektionsraten zur Vollreife. Auch WHITFIELD et al. (2004) fanden in der Thymuswurzel keine signifikanten Abweichungen des Mykorrhizierungsgrades zu verschiedenen Erntezeitpunkten in der Vegetationsperiode.

Die Wurzeln der Sonnenblume zeigten dagegen auf dem Referenzboden BBA und im mäßig belasteten Boden BBA zum Stadium der Knospenbildung signifikant weniger Mykorrhiza-strukturen als zur Vollreife. Auf dem hoch belasteten Boden Großbeeren war wiederum kein nennenswerter Unterschied der Infektionsraten zu beiden Erntezeitpunkten zu vermerken (Kap. 4.4.4). Es zeichnete sich in den Versuchen ab, dass der Grad der My-

korhizierung pflanzenspezifisch und bodenabhängig war. QUINTERO-RAMOS et al. (1993) fanden Korrelationen zwischen den Bodenparametern und der Intensität der Mykorrhizierung bei Mais und Sonnenblume.

Nach FELDMANN et al. (1996) stellt der Wurzelbesiedlungsgrad kein zuverlässiges Maß für die Wirksamkeit der Mykorrhizapilze dar, da die Stärke der Symbiosewirkung bedeutend von der jeweiligen Wirtspflanze-Pilz-Kombination abhängt. Dies bestätigt die Ansicht von DAFT (1991), dass die Stärke der Infektion keine Aussage über die Effizienz der Symbiose erlaubt. Versuche von LOTH (1994) haben einen straffen Zusammenhang zwischen dem Grad der Mykorrhizierung und der Höhe der Wachstumssteigerung nur ansatzweise nachweisen können. Nach HASENBUSCH (1999) ist davon auszugehen, dass bei einer Besiedlungsrate unter 25 % mit keiner großen Wirkung der arbuskulären Mykorrhiza zu rechnen ist.

Einfluss auf den Infektionsgrad

Verschiedene Eigenschaften des Bodens beeinflussten den Infektionsgrad der Mykorrhiza:

- Bakterienbeimpfung

Die zur Milchreife, 11 Wochen nach der Saat, durchgeführten Bonitierungen der Maiswurzeln auf dem Versuchsfeld der BBA Berlin-Dahlem wiesen bei der Dualbeimpfung im Jahr 2000 signifikante Abnahmen der Mykorrhizierungsrate durch die Bakterien auf. Die Mykorrhiza hatte sich zu diesem Zeitpunkt schon voll etabliert, da sich bei der singulären Beimpfung keine Unterschiede zwischen den beiden Ernteterminen im Mykorrhizierungsgrad gezeigt hatten. Die signifikante Abnahme der Mykorrhizierungsrate durch die Bakterien legt die Vermutung nahe, dass eine Konkurrenz um die Wurzelexudate zwischen den beiden Mikroorganismen in den früheren Entwicklungsstadien besteht (PAULITZ & LINDERMAN, 1989). Zur Vollreife wurde dieses Defizit wieder ausgeglichen und in den Folgejahren konnte eine Förderung auf die Infektionsrate durch die Bakterien zwischen 4 % und 20 % ermittelt werden, wie auch Versuche von PAULITZ & LINDERMAN (1989) bestätigen, dass in älteren Pflanzen durch die höhere Photosyntheserate eine Unterstützung durch die Bakterien erfolgen kann. In dem Feldversuch kam es zu einer Steigerung autochthoner Mykorrhiza durch *P. fluorescens* RA56, die im Jahr 2001 zur Vollreife signifikant war. Die Ergebnisse von VIVAS, VÖRÖS et al., (2003) zeigten, dass die autochthone AM durch assoziative Bakterien gefördert werden konnte, erkennbar durch besseres Pflanzen- und Wurzelwachstum. DUPONNOIS & PLENCHETTE (2003); GAMALERO et al. (2004); POKOJSKA-BURDZIEJ et al. (2004) konnten belegen, dass *Pseudomonas* spp. den Infektionsgrad von Mykorrhizapilzen signifikant zu steigern vermochte. Die Mechanismen der Bakterien, die die AM-Kolonisation unterstützen, sind weitgehend unerforscht. Bei der Förderung der Infektion sollen von den Bakterien produzierte Metabolite beteiligt sein, um die Permeabilität der Wurzelzellen zu erhöhen und Hormone zu synthetisieren (BAREA et al., 1998).

Im Gefäßversuch kam es beim Mais auf dem mäßig belasteten Boden Malchow ebenfalls zu einer Steigerung des Infektionsgrades der autochthonen Mykorrhiza durch die Bakterien im zweiten Versuchsjahr. Die eingesetzte AM wurde nur auf dem Boden Großbeeren durch die Bakterien gefördert.

In den Weidelgraswurzeln des Feldversuches wurden die niedrigsten Mykorrhizierungsraten unter 20 % gefunden, die sich auch durch die Bakterien nicht steigern ließen. Vermutlich sind bei der Entnahme einige Wurzeln entfernt worden, so dass die korrekte Infektionsrate nicht gefunden wurde. Im Gefäßversuch wiesen die Wurzeln bei den AM-Varianten Infektionsraten bis 48 % auf. Die Zugabe von *P. fluorescens* RA56 bewirkte auf dem mäßig belasteten Boden Malchow eine Zunahme der autochthonen Mykorrhiza-Infektionsraten bis zu 28 %, während bei der Dualbeimpfung keine Steigerung zu verzeichnen war. Im hoch belasteten Boden Großbeeren

konnte sich die autochthone Mykorrhiza nicht etablieren und trat auch durch die Bakterienzugabe kaum in Erscheinung. Bei der Dualbeimpfung wiederum fand eine Förderung durch *P. fluorescens* bis 11 % der Mykorrhizierungsrate statt. Auch BHOWMIK & SINGH (2004) bestätigen in Gefäßversuchen eine Förderung der Mykorrhizainfektion von *Glomus mosseae* durch verschiedene Rhizobakterien wie *Azospirillum* sp. *Azotobacter chroococcum*, *Pseudomonas fluorescens*, und *P. striata* in Rhodes Graswurzeln (*Chloris goyana*).

Die Beimpfung des Stammes *Pseudomonas fluorescens* RA56 zeigte einen Einfluss auf die Infektionsrate der Mykorrhiza in den Sonnenblumenwurzeln. Die Mykorrhizierung wurde auf dem Referenzboden BBA und dem hoch belasteten Boden BBA in beiden Versuchsjahren durch die Bakterien auch signifikant bis zu 100 % gefördert. Auf dem Referenzboden und im mäßig belasteten Boden konnte kein Einfluss auf die Wurzeln der Sonnenblumen ermittelt werden. Ein Grund für die Nicht-Förderung wäre der sehr hohe Mykorrhizierungsgrad von 92 % bzw. 58 % der Wurzeln, die keine Steigerung mehr zulässt. Auf dem Boden Großbeeren lag die Infektionsrate bis zu 200 % niedriger, verglichen mit den Referenzboden und dem mäßig belasteten Boden, wobei die Bakterien die Infektionsrate der Mykorrhiza von 38 % auf 47 % steigern konnten. Versuche von GAMALERO et al. (2004) belegen, dass die Infektionsrate des Mykorrhizapilzes *Glomus mosseae* BEG12 bei Tomaten durch *Pseudomonas fluorescens* 92rk von 34,7 auf 42,3 % erhöht werden konnte.

- Schwermetallkonzentration im Boden

Im Feldversuch konnten beim Mais und Weidelgras keine Korrelationen zwischen dem Mykorrhizierungsgrad und der im Boden gefundenen Cd-Konzentration zwischen 8 und 25 mg Cd/kg ermittelt werden (Kap. 4.5.6). Vermutlich waren die Unterschiede der Cd-Belastung nicht groß genug, um die Infektionsrate zu beeinflussen. Im Gefäßversuch hingegen wurde der Mykorrhizierungsgrad der Mais- und Weidelgraswurzeln, verglichen mit 1,8 mg Cd/kg Boden (TS) im Boden Malchow und 56 mg Cd/kg Boden (TS) im Boden Großbeeren, bis zu 25 % reduziert (Abb. 7 u. 13).

Die Schwermetallbelastung im Boden veränderte den Mykorrhizierungsgrad in den Wurzeln der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch 2003 maßgeblich. Die Infektionsrate bei der singulären Beimpfung im hoch belasteten Boden Großbeeren mit 36 mg Cd/kg Boden (TS), 556 mg Cu/kg Boden (TS) und 1274 mg Zn/kg Boden (TS) wurde um 53 % gesenkt, verglichen mit dem Referenzboden BBA (Abb. 25). Die wesentlich niedrigeren Schwermetallkonzentrationen bei einer Klärschlammgabe von 1,5 mg Cd/kg Boden (TS), 185 mg Cu/kg Boden (TS) und 1060 mg Zn/kg Boden (TS) im Gefäßversuch von LOTH & HÖFNER (1995) reduzierte sich die Besiedlungsrate von *Glomus*-Isolaten beim Mais von 29,5 % auf 21,5 %. Auch CHAO & WANG (1988); DIXON (1988); HÖFLICH & METZ (1997); MALCOVA & GRYNDLER (2003) konnten belegen, dass hohe Schwermetallgehalte im Boden die Mykorrhizainfektion reduzierten. Hohe Aluminiumgehalte in Kombination mit niedrigen pH-Werten im Boden hatten ebenfalls einen negativen Effekt auf die Infektionsrate von Ektomykorrhizen wie *Pisolithus tinctorius*, *Xerocomus chrysenteron* and *Lactarius insulsus* (XIE et al., 2002). Böden in Gefäßversuchen die mit Abwasser behandelt wurden, wiesen signifikant niedrigere Infektionsraten an Tomatenwurzeln mit arbuskulärer Mykorrhiza (*Lycopersicon esculentum*) auf als im Vergleich zu Böden, die organischen Dünger beinhaltenen (AZZA et al., 2003). In Böden mit sehr hohen Cu-Gehalten von 300 mg Cu/kg TS Boden wurden ausschließlich keine oder sehr geringe Mykorrhiza-Bildungen in Wirten beobachtet (GRIFFIOEN & ERNST, 1990). Es wurde hier eine fungizide Wirkung von Cu, die auch für die Gattungen der Endogonaceaeen gelten kann, vermutet.

Demgegenüber scheint der absolute Gehalt an Schwermetallen für die Reduktion von Infektionsraten nicht allein verantwortlich zu sein. Auch der pH-Wert des Bodens und die Düngung spielen eine wichtige Rolle für die Mykorrhizierung. Hohe N-Düngung und niedrige pH-Werte reduzierten die Infektionsrate der AM in den Pflanzenwurzeln (WEBER & CLAUS, 2000) wie auch die Kombination von hohen Schwermetallgehalten und niedrigen pH-Werten im Boden (LEYVAL et al., 1995). Im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen 2003 waren nicht nur die Schwermetallgehalte im Boden sehr hoch, sondern erhöhten deren Toxizität durch pH-Werte zwischen 5,1 und 6,5 und reduzierten so die Infektionsrate signifikant (Kap.4.4.7).

- Bodenfaktoren

Die Metalltoleranz der Mykorrhizapilze unterscheidet zwischen der Pilzspezies und den Ökotypen (VAL et al., 1999; LIAO et al., 2003). Auswirkungen auf das Mykorrhizawachstum und Kolonisation haben nicht nur der pH-Wert des Bodens, sondern auch der Anteil an organischem Material und der Grad der Düngung (LOTH, 1996; LEYVAL et al., 1997; ALLOUSH & CLARK, 2001; HARTMANN, 2002).

- Isolationsort

Inwieweit der Mykorrhizapilz die Pflanze vor den toxischen Effekten der Schwermetalle schützt, ist nicht nur von der Pilzgattung bzw. -art abhängig, sondern auch vom Isolationsort. Der für die Versuche eingesetzte Mykorrhizapilz *Glomus intraradices* wurde von schwermetallbelasteten Böden isoliert (Kap. 3.1) und in den Jahren 2000 bis 2002 im Gewächshaus ohne Anreicherung von Schwermetallen über drei Generationen vermehrt. Nach Versuchen von HILDEBRANDT (2000) verliert die von schwermetallbelasteten Böden isolierte Mykorrhiza nicht die Schutzwirkung über wenige Generationen auf die Pflanzen, wenn sie ohne Schwermetalle weiter vermehrt wird. Die Tatsache, dass Mykorrhizapilze, die von belasteten Böden isoliert wurden, der Pflanze einen besseren Schutz vor Schwermetallen bieten, wird in der Literatur mehrmals beschrieben (WEISSENHORN et al., 1993; GALLI et al., 1994; WEISSENHORN et al., 1994; DÍAZ et al., 1996). *Glomus intraradices* von Pb-belasteten Boden isoliert, konnte der Pflanze eine größere Toleranz gegenüber Pb als die AM von einem unbelasteten Boden geben (MALCOVA et al., 2003). Auch haben Metall tolerante AM wie *Glomus mosseae* eine dreimal so hohe Bindungskapazität im Vergleich zu nicht toleranten Pilzen (JONER et al., 2000). Im Gegensatz zu diesen Ergebnissen wurden in anderen Versuchen keine Unterschiede zwischen sensitiven und resistenten Stämmen von *G. mosseae* aus hoch belasteten Böden gefunden (GILDON & TINKER, 1983; WEISSENHORN et al., 1995).

Die Wirkung der AM zeigte sich nicht immer eindeutig. Auch eine gute P-Versorgung des Bodens schränkt die Mykorrhizierungsrate ein. Versuche von ORTAS (2003) mit den Mykorrhizapilzen *Glomus caledonium*, *G. etunicatum* und *G. mosseae* bestätigen, dass bei einer Zugabe von 125 mg P/kg TS die Mykorrhizabesiedlung eingeschränkt wird.

5.2 Rolle und Einfluss auf die Wirksamkeit der assoziativen Bakterien

Bakterien, die mit Pflanzenwurzeln assoziiert sind, spielen eine fundamentale Rolle bei der Pflanzenernährung, dem Wachstum und im Pflanzenschutz (MARSCHNER et al., 2001). Der in den Versuchen eingesetzte fluoreszierende *Pseudomonas*-Stamm RA56 kann sich in einem pH-Bereich von 3,5–8 mit einem Optimum im Neutralbereich entwickeln. Dieser Wert liegt im Toleranzbereich des fluoreszierenden *Pseudomonas*-Stamms. Die aufgeführten physiologischen Leistungen können bei Temperaturen von 10° C bis 40° C erbracht werden, wobei das

Optimum unter Laborbedingungen zwischen 30° C und 35° C liegt (ABDI BAGHI, 1995). Feldversuche von XU & GROSS (1986) bestätigen, dass höhere Bodentemperaturen das Wachstum der Bakterien beschleunigen. LOPER et al. (1984) fanden heraus, dass die Wachstumsraten der Rhizosphärenbakterien zwischen 12° C und 18° C generell höher sind als bei 24° C. Eigene Untersuchungen an der Kartoffel im Feldversuch bestätigen höhere Wachstumsraten der Kartoffel durch *P. fluorescens* RA56 durch höhere Bodentemperaturen (KRIEGER, 2001). Im Jahr 2000 waren die Temperaturen im Jahresmittel um 1,2° C im Vergleich zu 2001 und 0,6° C zu 2002 höher. Diese Temperaturänderung lässt auf eine höhere Aktivität der Bakterien schließen, welches auch eine Erklärung auf das geförderte Wachstum des Maises und Weidelgrases im Versuchsfeld im ersten Versuchsjahr ist.

HÖFLICH & METZ (1997) stellten fest, dass die mikrobielle Biomasse und die Kolonisierung von assoziativen Bakterien stärker von der Pflanzenart beeinflusst wurden als von der Schwermetallbelastung des Bodens. Die Mikroorganismen *Pseudomonas* sp., *Agrobacterium* sp., *Rhizobium* sp., *Stenotrophomonas* sp. waren in der Lage, das Wachstum von Mais auf schwach belasteten Böden zu stimulieren und gleichzeitig die Aufnahme der Schwermetalle Cd, Cu, Pb, Ni, Cr, Zn zu erhöhen. Dieser Effekt war auf hoch belasteten Böden nicht so ausgeprägt. Hingegen blieben das Wachstum von Lupinen und Bohnen unbeeinflusst. Bei einer Kombination mit organischen Düngemitteln war es möglich, die Effekte auf hoch belasteten Böden zu erhöhen.

In vorliegenden Untersuchungen konnte der Ertrag der Sonnenblumen im Mitscherlich-Gefäßversuch 2003 zur Zwischenernte durch den Bakterienstamm *P. fluorescens* RA56 auf dem Referenzboden BBA und dem hoch belasteten Boden Großbeeren signifikant gesteigert werden. Dieser Wachstumsvorteil blieb aber zur Vollreife aus (Kap. 4.4.2). Vermutlich wurden die Bakterien durch die Cd-Gehalte von 56 mg/kg TS (Boden) geschädigt und konnten die Pflanzen nicht über die gesamte Vegetationsperiode schützen. Versuche von ABBONDANZI et al. (2003) konnten belegen, dass die Bakterien *Pseudomonas fluorescens* empfindlich auf hohe Schwermetallbelastungen reagierten. CHEN & CUTRIGHT (2002) machten hingegen die Erfahrung, dass die Zugabe von Rhizobakterien die Schwermetallaufnahme von Cd, Cr und Nickel in Sonnenblumen nicht verändert, aber die Biomasse um das 1,6-fache erhöht. Mn, Mo und Fe stimulierten das Wachstum von *Pseudomonaden*. Hingegen wurde ihr Wachstum durch Cu- und Zn-Sulfat gehemmt. An Chlorid gebunden zeigten Cu- und Zn dagegen keine Wirkung (BIRO et al., 1995). Die Ergebnisse von MULLEN et al. (1989) zeigten, dass Bakterienzellen große Mengen verschiedener Metalle binden können, wenn die Toxizitätsgrenze nicht überschritten wird.

5.3 Kombinationswirkung der Mykorrhiza und der assoziativen Bakterien

Eine Kombination von Mikroorganismen wie Rhizobien, arbuskuläre Mykorrhizapilze und assoziativen Bakterien mit verschiedenen metabolischen Effekten (N₂-Fixierung, P-Mobilisierung, Produktion von Phytohormonen und Antibiotikas) übertrafen teilweise die Effekte von Single-Inokulationen. Sie konnten aber auch positive Effekte erzielen, wo Single-Inokulationen keine Wirkung zeigten (HÖFLICH et al., 1994). Durch die Dualbeimpfung mit *G. intraradices* und *Pseudomonas aeruginosa* oder *Pseudomonas putida* konnte unlösliches P in die Nährlösung mittels pH-Änderung freigegeben werden (VILLEGAS & FORTIN, 2002).

Versuche von DEV, GOUR et al., (1997) bestätigten, dass Dualinokulationen mit Rhizobien und Glomus spp. die Aufnahme von Zn (13,7-16,5%) und Cu (24,0-30,2%) signifikant im Vergleich zu unbehandelten Kontrollen reduzierten.

Die Kombinationswirkung von AM und Bakterien wird in den nachfolgenden Kapiteln der einzelnen Versuche diskutiert.

5.4 Einfluss der Mykorrhiza und den Bakterien auf den Proteingehalt im Mais

Ernährungsphysiologisch ist die Proteinkomponente im Mais ungünstig, da der Proteingehalt relativ niedrig bei 11 % liegt. Züchterische Bemühungen führten zwar zu einer Erhöhung des Proteingehaltes, aber die Ertragsleistungen derartiger Züchtungen sind nicht voll befriedigend (GEISLER, 1988).

Im Mitscherlich-Gefäßversuch 2001 und im Feldversuch 2001 konnte nachgewiesen werden, dass der Proteingehalt im Mais durch Inokulationen der AM und Bakterien auf belasteten Böden im Maiskorn erhöht werden konnte. Im Mitscherlich-Gefäßversuch (Kap. 4.1.3) wurde der Proteingehalt auf dem Boden Großbeeren durch die Bakterieninokulation signifikant auf 14,4 % gesteigert und im Feldversuch (4.5.2) kam es zu Erhöhungen um 1,2 % durch die singuläre Beimpfung von Bakterien und AM. Zu ähnlichen Ergebnissen war ATTIA (1999) gekommen. In Feldversuchen konnte der Proteingehalt im Maiskorn durch Glomus spp. gesteigert werden. Die Dualbeimpfung mit *P. fluorescens* führte zu keinen Veränderungen des Proteingehalts im Maiskorn.

5.5 Einfluss auf die Ertragsstruktur durch Mykorrhiza und Bakterien der Gefäßversuche mit Mais, Weidelgras und Sonnenblumen

Es ist schon lange bekannt, dass Mykorrhizapilze das Pflanzenwachstum und die Nährstoffversorgung fördern. SMITH & READ (1997) dokumentierten diese Effekte. In vielen Untersuchungen wird die wachstumsfördernde Wirkung auf die erhöhte P-Aufnahme der Wirtspflanzen zurückgeführt (LI et al., 1991; SREENIVASA & KRISHNARAJ, 1992; GAMALERO et al., 2004). Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Absorption und der Transport von P und anderen Nährstoffen in die wurzelnahen Zonen durch das externe Myzel des Pilzes (BODKER et al., 1998). In den durchgeführten Versuchen sollte aber nicht nur die Förderung des Pflanzenwachstums und der Nährstoffversorgung durch die Rhizosphären - Mikroorganismen geprüft werden, sondern das Verhalten der Pflanzen unter Schwermetalleinfluss. Schwermetalle wie Cu und Cd verursachen oxidativen Stress in der Pflanze (GALLEGO et al., 1996). Die Chlorophyllbildung wird ebenfalls eingeschränkt und durch hohe Konzentrationen von Co, Cu und Zn konnte bei Sonnenblumen eine Reduktion der Photosynthesrate gemessen werden (ELENANY & HAMADA, 1995). Diese Effekte können durch die Etablierung von Mykorrhizapilzen, Rhizosphärenbakterien und der Dualbeimpfung mit Bakterien bis zu einem gewissen Grad revidiert werden.

Einfluss der Mykorrhiza

Die Wirkung der Mykorrhiza in Bezug auf den Ertrag war bei den Gefäßversuchen nicht immer eindeutig. Tendenziell zeigten die Ergebnisse AM-bedingte Ertragssteigerungen auf, die auf den höher belasteten Böden deutlicher wurden. Die Weidelgraserträge profitierten während der ersten Schnitte von der Mykorrhizainfektion. Die

höchste Ertragssteigerung wurde zwar mit einer signifikant verbesserten P-Aufnahme erreicht, aber eine Forcierung der P-Aufnahme in genere konnte jedoch nicht bestätigt werden.

Der Mais hingegen erfuhr keine Zunahme der Spross- und Kornträge durch die singuläre Beimpfung mit AM. Auch konnten nur partiell erhöhte P-Gehalte in den einzelnen Pflanzenorganen ermittelt werden. Als Ursache für die fehlende positive Wirkung der Mykorrhiza kann die gute Grundversorgung von 150 mg P/kg TS pflanzenverfügbaren P der beiden Böden angesehen werden, so dass der zusätzliche Effekt der AM keine Ertragssteigerung mehr erlaubte. Voraussetzung für die Infektion, Etablierung und Wirksamkeit der Mykorrhiza ist ein geringer P-Gehalt im Substrat (GRAHAM et al., 1982). Mehr als 0,022mg P/l im Substrat konnten die AM- Symbiose und das Pflanzenwachstum nicht fördern (BAGYARAJ & MACHADO, 1996). Die Nährstoffaufnahme von Ca, Mg und K blieben durch die Mykorrhiza im Weidelgras und Mais relativ unbeeinflusst, auch wenn es punktuell zu Steigerungen der Aufnahme kam. Nur bei einer niedrigen P-Versorgung konnten die Nährstoffgehalte K, Ca und Mg im Mais durch AM und nicht symbiotische Mikroorganismen erhöht werden (LEYVAL & BERTHELIN, 1982).

Die Erträge der Sonnenblumen im Gefäßversuch auf dem Referenzboden BBA mit 1 mg Cd/kg TS Boden und dem hoch belasteten Boden BBA mit 17 mg Cd/kg TS Boden wurden durch die AM nur im zweiten Versuchsjahr positiv beeinflusst, eine bessere P-Aufnahme konnte aber nicht bestätigt werden, ebenso unbeeinflusst blieben die anderen Nährstoffe. SIMON et al. (1999) fanden heraus, dass es bis zu einer Konzentration von 10 mg Cd/kg TS im Boden zu keiner veränderten Aufnahme der Elemente N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn and Zn in die einzelnen Pflanzenteile der Sonnenblume kam. Lediglich die Aufnahme von Ca, Fe and Mn wurde im Blütenkorb signifikant reduziert.

Auch die Sonnenblumen im Mitscherlich-Gefäßversuch auf dem Referenzboden BBA und im mäßig belasteten Boden BBA erfuhren keine nennenswerten wachstumsfördernden Effekte durch G. intraradices. Ein Grund wäre der hohe Anteil an autochthoner Mykorrhiza, die die Unterschiede zu den zugeführten Mykorrhizapilzen überdeckten. Im Gegensatz zu den schwach belasteten Böden konnte das Längenwachstum und der Ertrag auf dem hoch belasteten Boden Großbeeren durch die singuläre Mykorrhizabeimpfung signifikant um 226 % gefördert werden. Trotz der Mehrerträge blieben die Nährstoffgehalte in Stängel, Presskuchen und Öl unbeeinflusst, aber in den Blättern erfolgte eine Reduktion der Nährstoffe P und K, was auf einen Verdünnungseffekt schließen lässt. FOROUGHİ et al. (1979) bestätigen die Ergebnisse, dass hohe Schwermetallbelastungen im Boden die P- und K-Aufnahme in die Pflanze negativ beeinflussen. Auch SABER et al. (1999) analysierten reduzierte Aufnahmeraten der Nährstoffe N, P, und K bei hohen Konzentrationen der Schwermetalle Al, Cd und Zn aber mit einer Abnahme der Frisch- und Trockenmasse.

Einfluss der Bakterien

Auf den mäßig belasteten Boden Malchow (Weidelgras und Mais), dem Referenzboden und dem hoch belasteten Boden BBA (Sonnenblumen 2001/02) konnten keine ertragsfördernden Effekte durch die assoziativen Bakterien ermittelt werden. Auf dem Boden Großbeeren hingegen wurde die Frischmasse des Mais und partiell die Frisch- und Trockenmasse des Weidelgrases durch die Pseudomonaden signifikant erhöht. Auch die Sonnenblumen auf dem hoch belasteten Boden Großbeeren erhielten einen Wachstumsvorteil, der im Stadium der Knospenbildung sehr deutlich war. Diese Resultate deuten auf eine Schutzwirkung der Bakterien auf gestresste Pflanzen hin.

Im Gegensatz dazu konnte die Arbeitsgruppe HÖFLICH et al. (1995) einen Wachstumsvorteil durch die Beimpfung mit Pseudomonaden und Rhizobien von Weizen, Mais, Raps, Ölrettich, Erbse, Alfalfa und Zuckerrübe in Gefäßversuchen auf unbelasteten Böden erzielen. Unklar war aber die Beziehung zwischen der Konzentration des Bakterieninokulats und dem wachstumsstimulierenden Effekt.

Nicht nur das Pflanzenwachstum, sondern auch die Nährstoffaufnahme wurde durch den Stamm *Pseudomonas fluorescens* RA56 positiv beeinflusst. Generell konnte auf den Versuchsböden Malchow und Großbeeren eine steigernde Wirkung der K-Gehalte durch die Zugabe der Bakterien im Mais und im Weidelgras gemessen werden. Somit findet die Aussage von BERTHELIN & LEYVAL (1982) ihre Bestätigung, dass die Aufnahme von K in Maispflanzen mit nicht symbiotischen Mikroorganismen gesteigert werden kann. Auf dem Boden Großbeeren kam es partiell zu einer Erhöhung des P im Mais und Weidelgras. Dies deckt sich mit der Ertragssteigerung der beiden Versuchspflanzen auf dem hoch belasteten Boden. Auch der K- und P-Gehalt in den oberirdischen Pflanzenteilen der Sonnenblumen im Gefäßversuch 2001/02 im Referenzboden BBA und im hoch belasteten Boden BBA wurde partiell erhöht. Konträr waren die Ergebnisse dagegen bei den Sonnenblumen im Versuchsjahr 2003. Die Verteilung der K- und P-Gehalte in den Blättern der Sonnenblumen erfuhren zu beiden Erntezeitpunkten keine Veränderung durch die Bakterieninokulation. Auch die anderen Pflanzenteile blieben relativ unbeeinflusst von der Beimpfung.

Einfluss der Dualbeimpfung

Durch die Dualbeimpfung mit Pilz und Bakterien kam es nur auf dem mäßig belasteten Boden Malchow zu Ertragssteigerungen im Mais und Weidelgras. Die Nährstoffaufnahme der Elemente P und K in den Mais wurde nicht verändert. Lediglich die K-Aufnahme und partiell die Mg-Aufnahme erfuhr im Weidelgras eine Zunahme auf dem hoch belasteten Boden Großbeeren im ersten Versuchsjahr ohne ertragssteigernden Effekt und höhere Erträge im zweiten Versuchsjahr ohne Zunahme der Nährstoffe. Die Erträge der Sonnenblumen wurden durch die Dualbeimpfung nur auf dem hoch belasteten Boden BBA erhöht, ohne eine Veränderung der Nährstoffaufnahme P und K. Nach GAMALERO et al. (2004) hingegen erhöhte die Dualbeimpfung mit *P. fluorescens* 92rk und *G. mosseae* die P-Aufnahme in die Blätter und förderte das Pflanzenwachstum von Tomaten. Auch auf dem mäßig belasteten Boden BBA konnte eine Wachsförderung der Sonnenblumen durch die Dualbeimpfung ermittelt werden. Die besten Ertragszunahmen mit 348 % kamen auf dem hoch belasteten Boden Großbeeren zustande mit einer Reduktion der K- und P-Gehalte, ähnlich der singulären Beimpfung mit Mykorrhiza, was auf einen Verdünnungseffekt schließen lässt.

5.6 Einfluss auf die Schwermetallaufnahme durch Mykorrhiza und Bakterien der Gefäßversuche mit Mais, Weidelgras und Sonnenblume

Einfluss der Mykorrhiza

Schwermetalle wie Cu und Zn sind essentielle Mikronährstoffe, hingegen hat Cd keine Funktion als Metabolit in der Pflanze und ist als toxisch einzustufen (CLAASSEN & PADEKEN, 1999). Das Aufnahmeverhalten von Schwermetallen durch die Mykorrhiza ist abhängig von den Wachstumsbedingungen der Pflanzen, vom Pilzpartner und vom jeweiligen Schwermetall (LOTH & HÖFNER, 1995). Die Wertigkeit und die Komplexbildung der Schwermetalle beeinflussen aber genauso die Effektivität der Mykorrhiza. DAVIES et al. (2002) konnten

nachweisen, dass die Konzentration von Cr (VI) in den Mykorrhiza freien Pflanzen höher war, aber insgesamt mehr Cr(VI) durch die Mykorrhiza in die Pflanzen aufgenommen wurde, da eine Förderung des Pflanzenwachstums stattfand. Die Konzentration von Cr (III) dagegen, mit einer geringeren Toxizität, unterschied sich nicht von den mykorrhizierten zu mykorrhizafreien Pflanzen.

WEISSENHORN et al. (1995) erkannten durch die Mykorrhizierung auf unbelasteten Böden eine Zunahme der Biomasse des Mais und eine Abnahme der Metalle Cd, Cu, Zn und Mn im Vergleich zu mykorrhizafreien Pflanzen. Auf einem belasteten Boden hingegen unterschied sich die Biomasse der *G. mosseae* behandelten Pflanzen nicht von der Kontrolle. Die Ergebnisse von TAKACS et al. (2001) wiesen auf eine Reduktion der Elemente Cd, Ni und Zn in Welschem Weidelgras durch die Infektion mit Mykorrhiza isoliert aus belasteten Böden, hin. Aber auch nachfolgende Versuche von TAKACS & VOROS (2003) fanden reduzierte Aufnahmen von Cd, Ni und Zn im Weidelgras (*Lolium perenne*) durch Mykorrhizastämme, die nicht aus Schwermetallbelasteten Böden isoliert wurden. Dies zeugt von einem hohen Wirkungsspektrum der Mykorrhiza, das aber von der Belastungshöhe des Bodens abhängig ist. Auch Versuche von DUECK et al. (1986) konnten belegen, dass AM-infizierte Wurzeln der Gräser Rotschwingel (*Festuca rubra*) und Sand-Reitgras (*Calamagrostis epigejos*) die negativen Effekte von Zn in der Pflanze abschwächen konnten.

Die Unterschiede der Schwermetallaufnahme in die Pflanze waren auch von der Entwicklungsphase abhängig. In den Stängeln und Blättern der Sonnenblumen konnten im Knospenstadium höhere Konzentrationen der Schwermetalle Cd, Cu, Ni und Zn auf allen drei Versuchsböden gemessen werden als zur Vollreife. Genauso reduzierten sich im Weidelgras nach jedem Schnitt die Schwermetallgehalte. JONER & LEYVAL (2001) kamen zu den gleichen Ergebnissen, dass mit zunehmendem Pflanzenalter die Elemente Zn, Cd und Cu reduziert und im Gegensatz Ni erhöht wurde.

In den oberirdischen Pflanzenteilen und in der Wurzel des Mais wurden die Cd-Aufnahmen durch den Mykorrhizapilz auf dem mäßig belasteten Boden Malchow reduziert. Im hoch belasteten Boden Großbeeren konnten keine Zusammenhänge zwischen dem Aufnahmeverhalten von Cd und der Mykorrhizainfektion gefunden werden. Auch WEISSENHORN et al. (1995) fanden in ihren Untersuchungen nicht immer eindeutige Reaktionen der Mykorrhiza auf das Aufnahmeverhalten von Cd.

Beim Weidelgras zeichnete sich eine umgekehrte Tendenz der Cd-Aufnahme ab. Im Boden Malchow blieben die Aufnahmeraten durch den Mykorrhizapilz meist unverändert oder wurden geringfügig reduziert. Im Boden Großbeeren hingegen kam es zu einer teilweise signifikanten Zunahme des Cd durch die singuläre Beimpfung mit dem Pilz. Nach den Ergebnissen ist das Aufnahmeverhalten des Cd durch die Mykorrhiza pflanzenspezifisch und belastungsabhängig. GALLI et al. (1994) machten deutlich, dass die Effizienz des Schutzes stark von den verwendeten Pilzisolaten, den untersuchten Schwermetallen, den Bodeneigenschaften und den Kulturbedingungen abhängig war.

Die Cd-Gehalte in den Sonnenblumen im Referenzboden und im hoch belasteten Boden BBA wurden durch die Mykorrhizapilze in der oberirdischen Pflanze und meist auch in der Wurzel gesenkt. Die Ergebnisse wurden bei dem nachfolgenden Versuch mit Sonnenblumen auf den Referenzboden und dem mäßig belasteten Böden bestätigt. Auch hier konnte in den einzelnen Blattetagen und Stängeln zu beiden Erntezeitpunkten eine Reduktion des Cd durch AM verzeichnet werden. Konträr zu diesen Ergebnissen wurden während des Stadiums der Knospenbildung und der Vollreife im Referenzboden signifikant höhere Ca-Gehalte in der Wurzel im Vergleich zu Nicht-AM-Pflanzen gefunden. Dies deutet auf einen Schutzmechanismus der AM-Pflanzen hin, da die Ca-

Akkumulation die Bildung schwerlöslicher Verbindungen bewirkt und somit die mögliche Toxizität durch die Schwermetalle vermindert. Im Referenzboden und im mäßig belasteten Boden wurden bei den AM-Pflanzen der reduzierte Transport von Cd, Cu und Zn in die Blätter deutlich. Auch RICKEN & HÖFNER (1996) diagnostizierten in Pilzgeweben eine starke Akkumulation von Ca in den Wurzeln bei hohen Schwermetallgehalten im Boden.

Das Aufnahmeverhalten des Cd in die Sonnenblumen auf dem Boden Großbeeren (36 mg Cd/ kg TS) gestaltete sich durch den Mykorrhizapilz genau entgegengesetzt. Es kam zu signifikant höheren Aufnahmeraten des Cd durch die AM in die Blätter, Stängel und Wurzeln, ohne dass die Pflanzen äußerliche Schäden aufwiesen. Die Vermutung liegt nahe, dass durch den AM-Einfluss das Cd in den Vakuolen gesammelt wurde und so die Pflanze vor den schädlichen Einflüssen des Cd Schutz bot. Die Versuche von JONER & LEYVAL (1997) stehen konträr zu diesen Ergebnissen. Bei einer Zugabe von 1 mg Cd /kg Erde wurden keine Unterschiede im Aufnahmeverhalten zwischen AM- und Nicht-AM-Pflanzen gefunden. Bei höheren Konzentrationen von 10 und 100 mg hingegen wurde die Aufnahmerate der AM-Pflanzen deutlich reduziert, einhergehend mit einer signifikanten Ertragszunahme. Möglicherweise deutet dies auf einen Verdünnungseffekt hin. In den Wurzeln kam es bei den AM-Pflanzen durch eine Steigerung des Cd-Gehaltes zu einer verstärkten Aufnahme, aber signifikant weniger als in den Nicht-AM-Pflanzen.

Ein Erklärungshinweis für die hohen Aufnahmeraten des Cd in den AM-Pflanzen auf dem Boden Großbeeren, einhergehend mit signifikant höheren Erträgen ohne Schadsymptome, bietet der Umstand, dass in den AM-Pflanzen signifikant höhere Mg-Gehalte in den Blättern gefunden wurden. Durch die Mykorrhizainfektion bilden die Sonnenblumen Resistenzfaktoren aus, um sich vor den Schwermetallen zu schützen. In den Untersuchungen der Sonnenblumen auf dem Boden Großbeeren zeigten die Pflanzen der Kontrolle und der Bakterienbehandlung neben einer Wuchsdepression chlorotische Verfärbungen und Nekrosen an den Blättern. Die Knospen wurden größtenteils gar nicht ausgebildet. Auch die Ergebnisse von ALY TAHA ALY (2002) zeigten Chlorosen bei der Mittelmeerzypresse (*Cupressus sempervirens*) durch starke Cd-Zugaben. Diese Symptome deuten auf eine gehemmte Mg-Aufnahme hin, da das Cd die Bindungsstellen des Mg im Chlorophyll besetzt (induzierter Mg-Mangel) und zu einem Rückgang des Chlorophyllgehaltes führt (KLOBUS & BUCZEK, 1985). Ähnliche Symptome erhielten auch ARDUINI et al. (1998) an Kiefer (*Pinus* sp.) und Schmalblättrige Esche (*Fraxinus angustifolia*).

Bei allen Gefäßversuchen konnten auf den hoch belasteten Böden niedrige Cd-Werte in den Sonnenblumensamen von 0,03 mg/kg TS und in den Maiskörnern bis 0,3 mg/kg TS ermittelt werden. Da die zulässigen Grenzwerte der Futtermittelverordnung bei 1 mg Cd/kg (TS) liegen, dürften die Maiskörner und das Öl zum Verzehr genutzt werden. Im Sonnenblumenöl der Varianten AM und AMB konnten die Elemente Cd, Cu und Zn der drei Versuchsböden nachgewiesen werden. Die Werte waren aber so gering und lagen bei allen Varianten unter den Grenzwerten der Futtermittelverordnung, so dass die Öle für den Verzehr verwendet werden könnten. In der Literatur (Anonymus, 1997) wurde ebenfalls beschrieben, dass in kalt gepressten Ölen weder Cd noch Hg gefunden wurde. Die Proben der Varianten Kontrolle und Bakterien ließen keine Ölgewinnung zu, da fast keine Sonnenblumensamen geerntet werden konnten.

Cu und Zn sind als relativ immobile Elemente im Boden aufgrund ihrer starken Absorption an Bodenkolloide bekannt. LOTH (1994) konnte erhöhte Aufnahmeraten in die Pflanzen von Cu und Zn durch mykorrhizierte Wurzeln erzielen. Die Vergrößerung der Wurzeloberfläche verkürzte die Diffusionszone und erreichte somit eine erhöhte Schwermetall-Akquisition. Die Belastungshöhe des Bodens spielt dabei aber eine wichtige Rolle für das

Aufnahmeverhalten von Cu und Zn mykorrhizierter Wurzeln. Die Böden Malchow und Großbeeren übertrafen die Grenzwerte der BBodSchV von Cu und Zn um ein Vielfaches. Deshalb konnten im Mais und Weidelgras der mykorrhizierten Varianten keine Unterschiede oder partiell Cu- und Zn- Zunahmen in die oberirdischen Pflanzenteile gemessen werden. WEISSEHORN et al. (1995) stellten auf einem Boden mit 45 mg Cu/kg TS gleichfalls eine Cu-Zunahme durch *Gl. mosseae* in die oberirdische Pflanzenmasse fest und eine Cu-Reduzierung in die Wurzeln.

Mais nimmt bevorzugt Zn auf, wenn er auf belastetem Boden mit anderen Schwermetallen wächst. (CHAKRABARTI & PURKAYASTHA, 1999). Bei normaler Zn-Versorgung des Bodens konnte durch *AM Glomus caledonium* die Translokation von Wurzeln in den Spross beim Mais erhöht werden. Umgekehrt aber wurde bei einer Zugabe von 600 mg Zn/kg TS weniger in den Spross als in die Wurzel aufgenommen (CHEN et al. (2004). CHRISTIE et al. (2004) beschrieben den Schutz vor der Zn-Toxizität als direkte und indirekte Effekte durch den Mykorrhizapilz. Das Binden der Schwermetalle und die Immobilisierung des Metalls in der Mykorrhizosphäre zählen zu den direkten Effekten. Als indirekter Effekt wird die gute Nährstoffversorgung, hauptsächlich durch das P beschrieben, da das Pflanzenwachstum gefördert wird und die Pflanzen Toleranzen gegenüber Schwermetall-Belastungen aufbauen.

Einfluss der Bakterien

Der Schutz vor Schwermetallbelastungen durch die Bakterien wurde in den Versuchen nicht so deutlich wie durch den Mykorrhizapilz. Dennoch kam es tendenziell zu einer Reduktion der Elemente Cu, Cd und Zn im Mais und im Weidelgras; das Cu wurde signifikant in den Maisblättern um 23 % auf dem Boden Großbeeren reduziert. Meist bewirkten die Bakterienvarianten auch eine Abnahme der Schwermetalle in der Wurzel der beiden Versuchspflanzen. Durch elektronenmikroskopische Aufnahmen stellten MULLEN et al. (1989) die verschiedenen Bindungsmöglichkeiten verschiedener Schwermetalle an Rhizosphären-Bakterien dar. Für Cd und Cu konnten keine Sorptionsorte identifiziert werden, da die Elektronenstreuung zu groß war. Dennoch zeigten die Ergebnisse, dass die Bakterien in der Lage waren, verschiedene Schwermetalle quantitativ zu binden. Diese Bindungskapazität der Schwermetalle kam nach den Ergebnissen erst zum Tragen, wenn das Pflanzen-Bakterien-Verhältnis in Einklang stand. Die Sonnenblumen erhielten einen weitaus geringeren Schutz vor der Schwermetallbelastung als das Weidelgras und der Mais. Die Sonnenblumen wiesen im Referenzboden im ersten Versuchsjahr signifikant mehr Cd und Cu in der oberirdischen Pflanzenmasse auf. Die Aufnahme der Elemente Cd, Cu, Ni und Zn wurden dagegen in allen drei Versuchsböden und Pflanzenteilen im Mitscherlich-Gefäßversuch 2003 nicht beeinflusst. Lediglich konnte im Referenzboden eine Cd-Reduktion durch die Bakterien in die Blätter verzeichnet werden.

Einfluss der Dualbeimpfung

Die Kombination der Mykorrhizapilze und der Bakterien bewirkten in den Gefäßversuchen häufig eine Verstärkung der Mykorrhizaeffekte. Meist wurden durch die Dualbeimpfung die Mykorrhizierungsraten erhöht, was für die Effektivität der Dualbeimpfung spricht. Hervorzuheben ist die Cd-Reduktion durch die Dualbeimpfung in die oberirdischen Pflanzenteile des Maises auf dem Boden Malchow und die Erhöhung des Cu in die Maisstängel um 28 % im ersten Versuchsjahr. Auf dem hoch belasteten Boden Großbeeren konnte hingegen eine partielle signifikante Zunahme des Cd in das Weidelgras und eine Erhöhung des Cd und des Mg in die Blätter des Maises beobachtet werden.

Auch im Gefäßversuch mit den Sonnenblumen bestätigte sich der Einfluss der Dualbeimpfung auf das Aufnahmeverhalten des Cd. Auf den Kontroll- wie auch den mäßig belasteten Böden konnte meist eine Reduktion des Cd in den oberirdischen Teilen der Sonnenblume durch die Dualbeimpfung ermittelt werden. Durch die Dualbehandlung erfuhren die Sonnenblumen auf dem Boden Großbeeren teilweise eine signifikante Cd-, Cu-, und Zn-Zunahme, einhergehend mit einem verbesserten Pflanzenwuchs und einem Wachstumsvorteil von 38 % gegenüber der singulären Mykorrhizabehandlung.

Einfluss auf die Pflanzenart

Als Versuchspflanzen wurden Pflanzenarten gewählt, die ein differierendes Anreicherungsvermögen aufweisen. Mais und Weidelgras reagierten ähnlich auf die Mykorrhiza- und Bakterienbeimpfung in Bezug auf die Schwermetallaufnahme. Die Sonnenblume als dikotyle Pflanze lagerte durch die Mykorrhiza auf dem hoch belasteten Boden Großbeeren überproportional Schwermetalle, insbesondere Cd, in die Blätter ein. Die Mykorrhiza verstärkte den Effekt des Akkumulierens bei dikotylen Pflanzen, ohne aber die Pflanze im Wuchs zu beeinträchtigen.

Einfluss auf die Bodenlösung

Die Bestandteile der Bodenlösung zeigen die Ergebnisse der Stoffwandlungsprozesse im Boden an. Darüber hinaus steht die Bodenlösung in einem ständigen Fließgleichgewicht mit der festen Substanz des Bodens. Ihre Funktion ist Lösungsmittel und Transportmittel. Ihre Zusammensetzung ist sehr variabel und schwierig zu bestimmen. Ökologisch interessant sind vor allem die gelösten Komplexbildner und der damit verbundene (Schad)stofftransport und die Bioverfügbarkeit (LERCH, 1991).

In der Bodenlösung der Maisgefäße im Boden Malchow (2001) unterschieden sich die Kontrollvarianten von den Pilzvarianten (Kap. 4.1.7). Der pH-Wert in der Bodenlösung ist ein Maß für die Funktionsfähigkeit der Wurzelhyphen durch Ausscheidung niedermolekularer organischer Säuren. Durch die Infektion der Mykorrhiza wurde deutlich weniger Cd in die Bodenlösung freigesetzt. Mögliche Ursache kann eine Verringerung der Säureausscheidung aus den Wurzelspitzen durch die Mykorrhiza sein, da der pH-Wert im neutralen bis basischen Bereich lag.

Die pH-Werte der Bödenlösungen im Referenzboden BBA, im mäßig belasteten Boden Malchow und im mäßig belasteten Boden BBA bewegten sich während der Vegetationsperioden im leicht sauren bis neutralen Bereich, hingegen lagen die pH-Werte des hoch belasteten Bodens Großbeeren bei allen drei Versuchspflanzen im sauren Bereich. Dadurch gingen die Schwermetalle wie Cd und Zn leichter in Lösung und trugen so zu Wuchsdepressionen der Sonnenblumen im Mitscherlich-Gefäßversuch 2003 bei. Bei den Kontroll- und den Bakterien behandelten Pflanzen kam es zu chlorotischen Verfärbungen und Nekrosen der Blätter. Die Cd-Konzentration der Bodenlösungen betrug bei den Kontrollpflanzen bis zu 0,7 mg Cd/l und 0,9 mg Cd/l Bodenlösung bei der Variante mit Bakterien. SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1991) fanden toxische Wirkungen bei Cd-empfindlichen Pflanzen (Bohnen, Erbsen, Rüben Spinat). Bei 0,1 mg Cd/l in der Bodenlösung kam es zu Ertragsminderungen. 1 mg Cd/l verringerte das Wachstum bei den meisten Kulturpflanzen. Dabei treten unspezifische Chlorosen und Nekrosen an den Pflanzen auf, die z. T. durch verringerte Aufnahme und Mangel an essentiellen Schwermetallen bedingt ist. Versuche von LÜDERDORF et al. (1995) bestätigen, dass hohe Cu-Konzentrationen in der Bodenlösung mit Wachstumsretardierungen bei der Eberesche korrelieren. Auch haben erhöhte Cd-Konzentrationen zu Chlorosen in der Kiefer geführt.

Die Toxizitätsgrenze von Cu liegt unter 1 bis 4 mg Cu/l Bodenlösung. Die Mobilisierung des Cu beginnt bei einem pH-Wert von 4,5 (SAUERBECK & STYPEREK 1988). Da die niedrigsten pH-Werte von 5,5 (Sonnenblume) in der Bodenlösung des Bodens Großbeeren mit Cu-Konzentrationen von 0,55 mg Cu/l gefunden wurden, werden die beschriebenen Schäden ursächlich vom Cd stammen. Trotz des hohen pH-Wertes von 6 in der Bodenlösung im Weidelgras (Bodens Großbeeren), sind Gehalte zwischen 0,3 und 1,7 mg Cu/l gemessen worden. Da die Erträge des Weidelgrases auf dem Boden Großbeeren aber höher lagen als auf dem Boden Malchow mit Cu-Konzentrationen zwischen 0,1 und 0,3 mg Cu/l in der Bodenlösung, kann nicht von einer Cu-Schädigung ausgegangen werden. Der Grund wäre der hohe P-Gehalt im Boden, da nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1991) hohe P-Gaben die Cu-Aufnahme in der Pflanze und in den Wurzeln erniedrigen. In der Bodenlösung Großbeeren wurde P-Gehalte bis 8 mg P/l und im Boden Malchow bei fast allen Varianten bis 4 mg P/l gemessen.

Durch die Bakterieninokulation wurden höhere P- und K-Gehalte in den Bodenlösungen des Maises und partiell auch im Weidelgras ermittelt, vorrangig im hoch belasteten Boden Großbeeren. Pseudomonaden sind ebenfalls in der Lage, verschiedene Säuren abzuscheiden, um Nährstoffe in Lösung zu bringen (Kap. 2.4). Versuche von VILLEGAS & FORTIN (2001) konnten beweisen, dass das externe Myzel von *Glomus intraradices* über Stoffwechselprodukte die Bodenlösung ansäuert, wenn die N-Quelle aus NH_4^+ besteht. Durch diese niedrigeren pH-Werte wurde P freigesetzt und konnte durch den Pilz zur Pflanzenwurzel transportiert werden.

5.7 Dehydrogenaseaktivität der Mikroorganismen im Boden im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen 2003

Ein mikrobieller Parameter ist die Dehydrogenaseaktivität, die sich in fast allen Mikroorganismen findet. Diese Endoenzyme sind an vielen Redoxprozessen beteiligt und haben eine zentrale Stellung im Energiehaushalt der Zellen. Sie sind deshalb ein geeigneter Indikator der mikrobiellen Aktivität eines Bodens. Der Dehydrogenase-Enzym-Aktivitätstest (DHA) wurde von IRHA et al. (2002) als Methode verwendet, um die toxischen Effekte der Schwermetalle und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe auf die Mikroorganismen im Boden zu testen. Additive Effekte der Schwermetalle in Bezug auf die Dehydrogenaseaktivität sind möglich, aber nicht die Regel. Es können aber auch antagonistische Wirkungen wie bei Cd-Zn-Kombinationen auftreten (ANISSIMOVA et al., 2002).

Die höchsten Dehydrogenaseaktivitäten wurden bei allen drei Versuchsböden im Knospenstadium gemessen. In dieser Phase der Entwicklung sind die Mikroorganismen am aktivsten. Die Belastung des Bodens mit Schwermetallen wirkte sich negativ auf die Dehydrogenaseaktivität aus. Die Abnahmen der Aktivitäten zwischen dem Referenzboden und dem hoch belasteten Boden Großbeeren beliefen sich auf 84 %. Andere Untersuchungen von JARAK et al. (1997); WELP (1999); MIKANOVA et al. (2001) und AJUNGLA et al. (2003) bestätigen die Ergebnisse, dass höhere Belastungspotentiale mit Schwermetallen die Enzymaktivität drastisch reduzieren. Eine hohe Zn-Belastung hatte bei KELLY et al. (1999) bis zu einer 95 % Reduktion der Dehydrogenaseaktivität geführt.

Auch Enzyme in der Wurzel und im Pilz wie Glucose-6-Phosphat Dehydrogenase, Mannitol Dehydrogenase, Trehalase, α -Mannosidase und saure Phosphatase wurden durch die Schwermetalle reduziert, abhängig von der Art und der Konzentration des Schwermetalls (KONG et al., 1996).

Böden, die mit Abwasser gedüngt wurden, wiesen signifikant niedrigere Populationsdichten des Bakterienstammes *Pseudomonas* spp. auf. Auch kam es zur Reduktion der Dehydrogenaseaktivität im Vergleich zu organisch gedüngten Böden (AZZA et al., 2003).

Durch die Zugabe der Bakterien, AM und als Dualbeimpfung konnten die Aktivitäten im Knospenstadium, zur Blüte und zur Vollreife teils signifikant gesteigert werden. In Versuchen von AJUNGLA et al. (2003) wurde durch die Anwesenheit von Ektomykorrhizen auf belasteten Böden ebenfalls eine Erhöhung der Dehydrogenaseaktivität beobachtet. ZAGHLOUL et al. (1996) ermittelten eine höhere Dehydrogenaseaktivität im Boden mit AM-Behandlung im Vergleich zu P-lösenden Bakterien.

Es bestand eine positive Korrelation zwischen den Trockenmasseerträgen und der Dehydrogenaseaktivität im hoch belasteten Boden Großbeeren zu beiden Ernteterminen. Dies bestätigt die Annahme, dass bei höheren Erträgen auch die Dehydrogenaseaktivitäten im Boden steigen. KUMAR et al. (2002) konnten zeigen, dass bei einer Zunahme der Pflanzendichte eine maximale Population von Bakterien, Pilzen, Actinomyceten, N-Fixierer, P-Mobilisierer und Zellulase-Abbauer wie auch die höchsten Aktivitäten der Dehydrogenase, Urease und Phosphatase gefunden wurden.

5.8 Einfluss auf die Ertragsstruktur durch Mykorrhiza und Bakterien im Feldversuch mit Mais und Weidelgras

In den ersten beiden Versuchsjahren wurde eine AM- und Bakterien- bedingte Zunahme der Sprosserträge des Mais gemessen. Das Kolbentrockengewicht konnte infolge der Dualbeimpfung im Jahr 2000 um 47 % und die Pflanzenzahl signifikant um 48 % gesteigert werden. Als Ertragskomponente spielt die Anzahl der Pflanze pro Fläche als kontrollierender Faktor in der Produktionstechnik eine wichtige Rolle, da die Ertragskomponenten - Anzahl Körner/Kolben, Einzelkorngewicht, Anzahl Kornreihen pro Kolben, Anzahl Körner pro Kornreihe – nur sehr schwach mit dem Gesamtertrag korrelieren (GEISLER, 1988).

Im Folgejahr kam es nur durch die singuläre Beimpfung mit Mykorrhiza zu einer Ertragssteigerung des Gesamttrockengewichts um 30 %. Die Bakterieninokulation erbrachte keine Verbesserung im Ertrag, aber eine Erhöhung der Kolbenstückzahl in den ersten beiden Jahren. Die Effekte waren im letzten Versuchsjahr nicht mehr spürbar. Gründe wären eine Ausbreitung der Mykorrhiza über die gesamte Versuchsfläche und eine Wachstumsförderung der autochthonen AM durch die Bakterieninokulation, da eine Zunahme der mykorrhizierten Wurzeln, verglichen mit dem ersten und dem letzten Versuchsjahr, insgesamt um 120 % gemessen wurde und deutlicher auf den Flächen der Bakterienvarianten zu messen war. Die Bakterieninokulation wirkt sich entsprechend positiv auf die autochthone AM aus.

Auch Weidelgraserträge konnten im Feldversuch nur im ersten Versuchsjahr signifikant durch die eingesetzten Rhizosphären - Mikroorganismen gesteigert werden. Diese Ertragserhöhung ging mit einer verbesserten K-Aufnahme einher. Die Mykorrhizierungsrate blieb aber während der drei Versuchsjahre unverändert. Ein Grund wäre das überjährige Weidelgras von 2001, da keine AM-Beimpfung vorgenommen wurde und entsprechend keine Verschleppung auftrat.

Insgesamt wurde die Nährstoffaufnahme der Elemente Ca, K, Mg und P in beide Versuchspflanzen, weder in die Wurzel, noch in die oberirdische Pflanzenmasse durch die Rhizosphären-Mikroorganismen der drei Versuchsjahre nennenswert beeinflusst. Das Ergebnis steht konträr zu den Resultaten von KALDORF et al. (1999). Seine

Arbeitsgruppe zeigte zwar auch höhere Trockenmassezunahmen des Maises durch die Mykorrhiza, aber gleichzeitig erhöhte Gehalte an K, P und Mg in den mykorrhizierten Maiswurzeln auf kontaminierten Böden.

5.9 Einfluss der Schwermetallaufnahme durch Mykorrhiza und Bakterien im Feldversuch mit Mais und Weidelgras

Nach der BBodSchV stellen 0,4 mg Cd /kg Sandboden (TS) Grenzwerte der Schwermetall-belastung dar. Dieser Grenzwert wurde auf der gesamten Versuchsfläche überschritten (Abb.34). Da die große Streuung von 8 - 25 mg Cd/kg Boden (TS) keine eindeutige Aussage über die Wirkung der Rhizosphären-Mikroorganismen zuließ, wurden die Aufnahmeraten als Transferfaktoren dargestellt. Die Abnahme der Transferfaktoren während der drei Versuchsjahre wurde bei allen Varianten festgestellt; im Jahr 2000 verstärkt durch die Rhizosphären-Mikroorganismen, wobei kein signifikanter Unterschied ermittelt werden konnte. Die Aufnahmeraten von Cd, Cu und Zn wurden bei allen Varianten im Verlauf der drei Versuchsjahre reduziert. Die Zunahme der Cd- Transferfaktoren in den Wurzeln während der Versuchsjahre zeigte deutlich, dass die Schwermetalle über längere Zeit an die Wurzeln gebunden werden konnten und so die Aufnahme in die oberirdischen Pflanzenteile reduzierten. In eigenen Untersuchungen auf Freilandflächen im Berliner Umland konnten diese Ergebnisse bestätigt werden (ABDI BAGHI et al., 2001). In den Freilandversuchen von DEV et al. (1997) reduzierten auf Schwermetallbelasteten Böden die Mykorrhiza und Rhizobien signifikant die Aufnahme von Cu und Zn.

Die Cu-Gehalte im Weidelgras lagen im Bereich von 4,3 bis 8,1 mg Cu/kg TS. Dies deckt sich mit denen von VON ARX (1998). Wiesen und Kulturpflanzen auf unbelasteten Böden nahmen zwischen von 5 bis 8 mg Cu/kg TS auf.

5.10 Korrelation zwischen Transferfaktor und Mykorrhizierung im Feldversuch

Die Mykorrhizainfektion an den Maiswurzeln korrelierte in allen drei Versuchsjahren negativ mit dem Cd-Transferfaktor des Bodens. Bei steigender Cd-Belastung nahm die Infektionsrate des Mykorrhizapilzes an den Wurzeln ab. Die Versuche von CHRISTIE & KILPATRICK (1992) bestätigten eine negative Korrelation zwischen der Mykorrhizainfektion in Graswurzeln und den Schwermetallen Cu und Zn im Boden. Auch KARAGIANNIDIS & NIKOLAOU (1999) fanden signifikante Zusammenhänge zwischen der Infektionsrate an den Wurzeln der Weinrebe und der Zn-Belastung im Boden. Der Mykorrhizierungsgrad korrelierte mit dem Schwermetallgehalt des Bodens, erkennbar anhand der Pflanzengesellschaften auf belasteten Böden (HILDEBRANDT et al., 1999). Konträr zu diesen Ergebnissen und Literaturhinweisen konnte beim Weidelgras keine Korrelation zwischen der Infektionsrate und des Cd-Transfers ermittelt werden. Auch die Arbeitsgruppe DEV et al. (1997) fand keinen direkten Zusammenhang zwischen der Wurzelbesiedlung durch die AM *Glomus mosseae* von Sojabohnen und der Schwermetallaufnahme von Cu und Zn.

Bei einem Vergleich der drei Versuchsjahre führte eine Zunahme der Mykorrhizierung an den Maiswurzeln gleichzeitig zu einer Reduktion des Cd-Transfers in die oberirdischen Pflanzenteile (Kap. 4.5.6). Durch die Anwendung der AM *Glomus intraradices* und *Pseudomonas fluorescens* RA56 im Freiland besteht somit die Möglichkeit, langfristig die Mykorrhiza im Boden zu etablieren und dadurch die Aufnahme von Cd in Maispflanzen zu reduzieren.

6 ZUSAMMENFASSUNG

In Freiland- und Gefäßversuchen wurden Schwermetallaufnahme und Wuchsverhalten an dikotylen und monokotylen Pflanzen im Hinblick auf die Wirkung von arbuskulären Mykorrhizapilzen *Glomus intraradices*, des Bakterienstammes *Pseudomonas fluorescens* RA56 und der Kombination dieser beiden Mikroorganismen untersucht. Zusätzlich lag der Akzent auf der Beeinflussung der Nährstoffaufnahme durch die eingesetzten Rhizosphären - Mikroorganismen. Als Versuchspflanzen im Feld kamen Weidelgras (*Lolium multiflorum italicum* L.) und Mais (*Zea mays* L.) zur Anwendung; im Gefäßversuch wurde zusätzlich die Sonnenblume (*Helianthus annuus* L.) eingesetzt.

Folgende Ergebnisse wurden zur Klärung der definierten Fragestellungen herangezogen:

Die Infektionsrate der Mykorrhizapilze gestaltete sich sehr different zwischen den Versuchspflanzen, aber auch zwischen den unterschiedlich starken Belastungen des Bodens mit Schwermetallen. Die höchsten Mykorrhizierungsraten (bis 92 %) wurden an den Wurzeln der Sonnenblumen (Mitscherlich-Gefäßversuch 2003) im Referenzboden in Dualinokulation mit Bakterien gefunden und die geringsten am Weidelgras im Feldversuch unter 20 %.

Eine deutliche Hemmung durch Schwermetallbelastungen mit 36 mg Cd/kg TS, 556 mg Cu/kg TS und 1274 mg Zn/kg TS im Boden erfuhren die Wurzeln der Sonnenblume mit AM-Infektionsraten um 53 %. Gefördert wurde wiederum die Mykorrhizainfektion durch die Zugabe der Bakterien *Pseudomonas fluorescens* RA56 bis zu 100 % bei den Sonnenblumen im Gefäßversuch auf dem Referenzboden und dem hochbelasteten Boden BBA. Aber auch die autochthone Mykorrhiza zeigte Infektionsfreudigkeit durch die Bakterieninokulation.

Die Erträge der Versuchspflanzen in den Gefäßen zeigten tendenziell AM-bedingte Ertragssteigerungen auf, die auf den stärker belasteten Böden deutlicher wurden. Der höchste Ertragszuwachs wurde bei den Sonnenblumen mit 226 % auf dem hoch belasteten Boden Großbeeren erreicht. Der Mais hingegen erfuhr keine Ertragszunahme durch die singuläre AM-Beimpfung, erklärbar durch die gute P-Grundversorgung des Bodens. Das Weidelgras und die Sonnenblume auf dem hoch belasteten Boden Großbeeren erhielten einen Wachstumsvorteil durch die Zugabe von *P. fluorescens* RA56. Die Dualbeimpfung bewirkte nur auf dem mäßig belasteten Boden Malchow Ertragszuwächse beim Mais und Weidelgras. Die TM-Erträge der Sonnenblumen konnten auf dem mäßig belasteten Boden BBA und hoch belasteten Boden Großbeeren deutlich mit Zunahmen bis zu 348 % gesteigert werden (Kap. 4.4.2).

Die singuläre Beimpfung mit Mykorrhiza beeinflusste die Nährstoffaufnahme von Ca, Mg und K im Weidelgras und Mais relativ gering, auch wenn es punktuell zu Steigerungen der genannten Elemente kam. Im Weidelgras konnte der P-Gehalt durch AM erhöht werden, und auch im Mais kam es partiell zur P-Anreicherung in die Stängel und Kolben. Auffällig war die Reduktion der Elemente K und P in den Blättern der Sonnenblume auf dem Boden Großbeeren mit gleichzeitiger Anreicherung von Mg. Einerseits trat ein Verdünnungseffekt auf; gleichzeitig konnten aber die höheren Mg-Konzentrationen die Pflanze vor Schwermetallen wie Cd und Cu zu schützen.

Durch die Bakterienbehandlung zeichnete sich eine P- und K-Anreicherung im Mais und Weidelgras und in den Sonnenblumen im Gefäßversuch auf dem Referenzboden und dem hoch belasteten Boden BBA ab. Die Dualbeimpfung bewirkte nur im Weidelgras im hoch belasteten Boden Großbeeren eine K- und Mg-Zunahme und in der Sonnenblume im Boden Großbeeren eine P- und K-Reduktion in den Blättern wie bei der singulären Beimpfung.

Die dikotylen und monokotylen Versuchspflanzen unterschieden sich bezüglich der Schwermetall-Aufnahme. Aber auch die unterschiedlich hohen Schwermetall-Belastungen des Bodens spielten beim Aufnahmeverhalten eine entscheidende Rolle. Im Mais wurde im mäßig belasteten Boden Malchow das Cd durch AM reduziert und im Weidelgras auf dem hoch belasteten Boden Großbeeren erhöht. In der oberirdischen Pflanzenmasse und Wurzel der Sonnenblume kam es in den leicht bis mäßig belasteten Böden zu einer Reduktion des Cd. Auch ein reduzierter Transport von Cu und Zn in die Blätter wurde deutlich. Vermutet wird eine Schutzwirkung des Pilzes durch die Adsorption der Schwermetalle außerhalb der Mykorrhizapilze an Zellwandkomponenten und Bindung der Schwermetalle innerhalb der Pilzzellen aufgrund der hohen N- und S-Konzentrationen an Metallothionein-ähnliche Peptide. Im hoch belasteten Boden Großbeeren wiederum konnten signifikant höhere Aufnahmeraten des Cd durch die AM in die Blätter, Stängel und Wurzeln der Sonnenblumen verzeichnet werden, ohne dass die Pflanzen äußerliche Schäden aufwiesen. Dies deutet auf eine Konzentrierung der Schwermetalle in den Vakuolen der Pflanzenzellen hin, ohne die pflanzenphysiologischen Abläufe zu beeinflussen. Die Kontrollpflanzen, aber auch die Bakterien beimpften Sonnenblumen wiesen Wuchsdepressionen und chlorotische Verfärbungen der Blätter auf.

Durch die Bakterieninokulation kam es partiell zu einer Reduktion der Elemente Cu, Cd und Zn in den oberirdischen Pflanzenteilen von Mais und Weidelgras im Boden Großbeeren; die Schwermetallkonzentrationen in den Wurzeln wurde gleichfalls reduziert. Die Sonnenblumen reagierten nicht so deutlich auf die Bakterien. Lediglich konnte eine Cd-Reduktion im Referenzboden durch die Bakterien in die Blätter verzeichnet werden. Die Reduktion der Schwermetalle kann mit der Produktion von organischen Säuren durch die Bakterien erklärt werden, die die Schwermetalle mobilisieren und durch Chelatbildung binden.

Das Aufnahmeverhalten der Schwermetalle wurde durch die duale Beimpfung mit Pilz und Bakterien im Vergleich zur singulären AM-Behandlung verstärkt. Diese Beobachtung beruht auf einer besseren Mykorrhizierung durch die Bakterien. Durch die Dualbehandlung kam es zu einer Cd-Anreicherung in den Blättern der Sonnenblume auf dem Boden Großbeeren mit einer deutlichen Frohwüchsigkeit im Vergleich zu den Nicht-AM-Pflanzen.

Die partielle Heterogenität der Ergebnisse gilt als Indikator für eine unterschiedliche Effizienz der Mykorrhizapilze und Pseudomonaden in der jeweiligen Kombination mit differenten Böden und Pflanzenarten.

Im Feldversuch förderten das AM-Pilzisolat und die Bakterien singulär und als Dualbeimpfung in den ersten beiden Versuchsjahren den Gesamtertrag des Maises bis zu 47 %. Im dritten Versuchsjahr wurde eine Förderung der AM durch die Ausbreitung der Mykorrhiza auf der gesamten Versuchsfläche über die Versuchsjahre überdeckt. Die Ertragserhöhungen im Weidelgras durch die Mikroorganismen gestalteten sich ähnlich wie die des Maises. Auch hier wurden im ersten Versuchsjahr die höchsten Ertragssteigerungen erzielt, einhergehend mit

einer Steigerung der K-Aufnahme. Die anderen untersuchten Nährstoffe wie P, Mg und Ca differierten wenig durch die inokulierten Mikroorganismen in beiden Versuchspflanzen.

Durch die Variabilität der Cd -Gesamtgehalte auf der Versuchsfläche war der Vergleich der Aufnahmeraten zwischen den Varianten nur über den Cd-Transferfaktoren möglich. In den oberirdischen Pflanzenteilen des Mais zeichnen sich deutlich eine Abnahme des Cd-Transfers in die oberirdischen Pflanzenteile und eine Zunahme in die Wurzeln während der Versuchsjahre ab. Gleichzeitig wurden die Mykorrhizainfektionen an den Maiswurzeln erhöht. Im Weidelgras nahmen gleichfalls die Cd-Transferfaktoren in den Grashalmen ab und in den Wurzeln zu. Eine Mykorrhizaaanreicherung wurde versuchsbedingt nicht gemessen. Bei einer längerfristigen Anwendung der AM, unterstützt durch die Pseudomonaden, können Erfolge in Bezug auf die Reduktion von Cd in das Erntegut erzielt werden mit gleichzeitig höheren Erträgen.

Literaturverzeichnis

Anonym (1997). Metals in cold pressed oils. Food Surveillance Information Sheet.

ABBONDANZI, F., A. CACHADA, T. CAMPISI, R. GUERRA, M. RACCAGNI & A. IACONDINI (2003). Optimisation of a microbial bioassay for contaminated soil monitoring: bacterial inoculum standardisation and comparison with Microtox(R) assay. Chemosphere 53(8): 889-897.

ABDI BAGHI, R. (1993). Isolierung und Charakterisierung phytoeffektiven *Pseudomonas fluorescens* RA56, D78 und SA85. Für die Firma Phytobacter.

ABDI BAGHI, R. (1995). Wechselwirkungen zwischen phytoeffektiven *Pseudomonas fluorescens* RA56, D78 und SA 85 und dem Wachstum von Kulturpflanzen. Gutachten.

ABDI BAGHI, R., C. KÖNIG & S. HEISE (2001). Revitalising contaminated soils using biological methods. 9th China National Congress on Soil Microbiology. Tsing Tao 24.-27.08.2001

ABDI BAGHI, R., S. HEISE & C. KÖNIG (2003). The use of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation. EU-Projekt Mycorem, QLK3-1999-00097.

ABDI BAGHI, R. & Y. MALEKZADEH (1998). Auswirkungen von Pflanzenschutzmitteln auf Wachstum und biologische Eigenschaften von Bodenbakterien *Pseudomonas fluorescens* RA56, D78 und SA 85. "Wachstumsstimulierung nichtleguminöser Pflanzen durch phytohormonelle Wirkung assoziativer stickstofffixierender Bakterien". Abschlussbericht BMBF.

AJUNGLA, T., G. D. SHARMA & M. S. DKHAR (2003). Heavy metal toxicity on dehydrogenase activity on rhizospheric soil of ectomycorrhizal pine seedlings in field condition. Journal of Environmental Biology 24(4): 461-463.

ALLOUSH, G. A. & R. B. CLARK (2001). Maize response to phosphate rock and arbuscular mycorrhizal fungi in acidic soil. Communications in Soil Science and Plant Analysis 32(1/2): 231-254.

ALY TAHA ALY, R. (2002). Einfluss der Schwermetalle Zink, Cadmium und Blei auf Wachstum und Nährstoffaufnahme von *Acacia saligna*, *Casuarina equisetifolia* und *Cupressus sempervirens*. Dissertation, Universität Göttingen.

- ANISSIMOVA, M., R. HUBENTHAL, G. WELP & G. W. BRUMMER (2002). The effects of a simultaneous application of (i) Zn and Cd, and (ii) Ni and Cd on the dehydrogenase activity of a loess soil. *Pochvoznanie, Agrokhimiya i Ekologiya* 37(1/3): 123-125.
- ARDUINI, J., D. L. GODBOLD, A. ONNIS & A. STEFFANI (1998). Heavy metals influence mineral nutrition of (tree) seedlings. *Chemosphere* 36: 739-744.
- ATTIA, M. (1999). The efficiency improvements of mineral fertilizers used and maize yield by arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting rhizobacteria. *Annals of Agricultural Science (Cairo)* 44(1): 41-53.
- AUGE, R. M. (2001). Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza* 11(1): 3-42.
- AWAD, F., V. ROMHELD & H. MARSCHNER (1994). Effect of root exudates on mobilization in the rhizosphere and uptake of iron by wheat plants. *Plant and Soil* 165(2): 213-218.
- AZZA, T. S., M. ATTIA & N. M. AWAD (2003). The use of phytotoxicity bio-indicators in sewage soils. *Arab Universities Journal of Agricultural Sciences* 11(2): 515-528.
- BAGYARAJ, D. J. & C. MACHADO (1996). Phosphorus concentration in soil solution optimum for VA mycorrhizal symbiosis in *Leucaena leucocephala*. *Annals of Forestry* 4(2): 123-128.
- BAREA, J. M., G. ANDRADE, V. BIANCIOTTO, D. DOWLING, S. LOHRKE, P. BONFANTE, F. O'GARA & C. AZCON-AGUILAR (1998). Impact on arbuscular mycorrhiza formation of *Pseudomonas* strains used as inoculants for biocontrol of soil-borne fungal plant pathogens. *Applied and Environmental Microbiology* 64(6): 2304-2307.
- BARKER, S. J. & D. TAGU (2000). The roles of auxins and cytokinins in mycorrhizal symbioses. *Journal of Plant Growth Regulation* 19(2): 144-154.
- BASHAN, Y. (1986). Enhancement of wheat root colonization and plant development by *Azospirillum brasilense* Cd. Following temporary depression of rhizosphere microflora. *Applied and Environmental Microbiology* 51: 1067-1071.
- BENIZRI, A., A. COURTADE, C. PICARD & A. GUCKERT (1998). Role of maize root exudates in the production of auxins by *Pseudomonas fluorescens* M.3.1. *Soil Biolog. Biochem.* 30(10/11): 1481-1488.

- BERTHELIN, J. & C. LEYVAL (1982). Ability of symbiotic and non-symbiotic rhizospheric microflora of maize (*Zea mays*) to weather micas and to promote plant growth and plant nutrition. *Plant and Soil* 68(3): 369-377.
- BHOWMIK, S. N. & C. S. SINGH (2004). Mass multiplication of AM inoculum: effect of plant growth-promoting rhizobacteria and yeast in rapid culturing of *Glomus mosseae*. *Current Science* 86(5): 705-709.
- BIRO, B., H. E. A. F. BAYOUMI, S. BALAZSY & M. KECSKES (1995). Metal sensitivity of some symbiotic N₂-fixing bacteria and *Pseudomonas* strains. *Acta Biologica Hungarica* 46(1): 9-16.
- BLAKE, L. & K. W. T. GOULDING (2002). Effects of atmospheric deposition, soil pH and acidification on heavy metal contents in soils and vegetation of semi-natural ecosystems at Rothamsted Experimental Station, UK. *Plant and Soil* 240(2): 235-251.
- BLEE, K. A. & A. J. ANDERSON (2000). Defense responses in plants to arbuscular mycorrhizal fungi. In *Current Advances in Mycorrhiza Research*. Edited by G.K. Podila & D.D. Douds. St Paul, Minnesota: APS Press.
- BLIEFERT, C. (1994). *Umweltchemie*. VCH Weinheim; New York; Cambridge: 336-355.
- BODKER, L., R. KJOLLER & S. ROSENDAHL (1998). Effect of phosphate and the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* on disease severity of root rot of peas (*Pisum sativum*) caused by *Aphanomyces euteiches*. *Mycorrhiza* 8(3): 169-174.
- BRADFORD (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye-binding. *Anal. Biochem.* 72: 248-254.
- BUCHER, M. (2002). Kooperation der Pflanzen mit Mykorrhizapilzen lohnt sich. *BioWorld* 1: 16-18.
- CABRAL, J. P. S. (1992). Selective binding of metal ions to *Pseudomonas syringae* cells. *Microbios*(No. 286): 47-53.
- CHAKRABARTI, R. & R. P. PURKAYASTHA (1999). Heavy metal uptake and disease susceptibility of maize. *Indian Phytopathology* 52(4): 381-384.

- CHAO, C. C. & Y. P. WANG (1988). The relationship of heavy metals, mycorrhizal fungi and crops. I. Effects of addition of heavy metals on mycorrhizal growth and biomass of vesicular-arbuscular crops in sand culture. *Journal of the Chinese Agricultural Chemical Society* 26(4): 495-502.
- CHEN, B., H. SHEN, X. LI, G. FENG & P. CHRISTIE (2004). Effects of EDTA application and arbuscular mycorrhizal colonization on growth and zinc uptake by maize (*Zea mays* L.) in soil experimentally contaminated with zinc. *Plant and Soil* 261(1/2): 219-229.
- CHEN, H. & T. J. CUTRIGHT (2002). The interactive effects of chelator, fertilizer, and rhizobacteria for enhancing phytoremediation of heavy metal contaminated soil. *Journal of Soils and Sediments* 2(4): 203-210.
- CHONGPRADITNUN, P., K. SUZUKI, U. KAWAHARADA, K. NAKAJIMA & M. CHINO (1991). Immunohistochemical localization of metallothionein in plant tissues. *Water, Air, and Soil Pollution* 57-58: 545-553.
- CHRISTIE, P. & D. J. KILPATRICK (1992). Vesicular-arbuscular mycorrhiza infection in cut grassland following long-term slurry application. *Soil Biology & Biochemistry* 24(4): 325-330.
- CHRISTIE, P., X. LI & B. CHEN (2004). Arbuscular mycorrhiza can depress translocation of zinc to shoots of host plants in soils moderately polluted with zinc. *Plant and Soil* 261(1/2): 209-217.
- CLAASSEN, N. & K. PADEKEN (1999). Heavy metal uptake by and distribution in plants with special reference to cadmium. *Pflanzenbelastung auf kontaminierten Standorten: plant impact at contaminated sites. Internationaler Workshop am 1. und 2. Dezember 1997 am Fraunhofer-Institut für Umweltchemie und Ökotoxikologie, Schmallenberg.*
- DAFT, M. J. (1991). Influences of genotypes, rock phosphates and plant densities on mycorrhizal development and the growth responses of five different crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 35: 151-169.
- DAVIES, F. T., JR., J. D. PURYEAR, R. J. NEWTON, J. N. EGILLA & J. A. S. GROSSI (2002). Mycorrhizal fungi increase chromium uptake by sunflower plants: influence on tissue mineral concentration, growth, and gas exchange. *Journal of Plant Nutrition* 25(11): 2389-2407.
- DEUBEL, A. & A. GRANSEE (1995). Mechanismen der Phosphatmobilisierung aus Calciumphosphaten durch zwei Bakterienstämme. *Ökophysiologie des Wurzelraumes* 6: 119-126.

- DEV, A., R. K. GOUR, R. K. JAIN, P. S. BISEN & L. K. SENGUPTA (1997). Effect of vesicular arbuscular mycorrhiza-Rhizobium inoculation interaction on heavy metal (Cu, Zn and Fe) uptake in soybean (*Glycine max*, var. JS-335) under variable P doses. *International Journal of Tropical Agriculture* 15(1/4): 75-79.
- DÍAZ, G., C. AZCÓN-AGUILAR & M. HONRUBIA (1996). Influence of arbuscular mycorrhizae on heavy metal (Zn und Pb) uptake and growth of *Lygeum spartum* and *Anthyllis cytisoides*. *Plant and Soil* 180(2): 241-249.
- DIXON, R. K. (1988). Response of ectomycorrhizal *Quercus rubra* to soil cadmium, nickel and lead. *Soil Biology & Biochemistry* 20(4): 555-559.
- DUECK, T. A., W. H. O. VISSIER, S. ERNST & H. SCHAT (1986). Vesicular-arbuscular mycorrhizae decrease zinc-toxicity to grasses growing in zinc-polluted soil. *Soil Biology & Biochemistry* 18(3): 331-333.
- DORN, J. & R. METZ (1996). Effects of organic pollutants ((PAH; PCB) and heavy metals in sewage fields in biomass production and heavy metal transfer of rye. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 159 (1): 87-91.
- DUPONNOIS, R. & C. PLENCHETTE (2003). A mycorrhiza helper bacterium enhances ectomycorrhizal and endomycorrhizal symbiosis of Australian *Acacia* species. *Mycorrhiza* 13(2): 85-91.
- EL-KHERBAWY, M., J. S. ANGLE, A. HEGGO & R. L. CHANEY (1989). Soil pH, rhizobia, and vesicular-arbuscular mycorrhizae inoculation effects on growth and heavy metal uptake of alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Biology and Fertility of Soils* 8: 61-65.
- ELENANY, A. E. & M. A. HAMADA (1995). Physiological studies of some heavy metals on *Helianthus annuus*, *Vigna sinensis* and *Triticum vulgare* I. Growth criteria, pigmentation, photosynthesis and respiration. *Acta Agronomica Hungarica* 43(3/4): 235-241.
- ERNST, W. H. O. (1985). Heavy metal pollution - ecophysiological and population genetic aspects. *Düsseldorfer Geobotanische Kolloquien* 2: 43-57.
- FELDMANN, F., J. WERTZ, C. BOYLE & G. F. BACKHAUS (1996). Symbiontische Mykorrhizapilze im Pflanzenbau. *Deutscher Gartenbau* 1: 10-13.

- FOROUGH, M., K. TEICHER & F. VENTER (1979). Die Wirkung steigender Gaben von Blei, Cadmium, Nickel oder Zink auf Spinat in Nährlösung. Landwirtschaftliche Forschung, Sonderheft 35, Kongressband Augsburg: 599-606.
- GALLEGO, S. M., M. P. BENAVIDES & M. L. TOMARO (1996). Effect of heavy metal ion excess on sunflower leaves: evidence for involvement of oxidative stress. *Plant Science (Limerick)* 121(2): 151-159.
- GALLI, U., H. SCHUEPP & C. BRUNOLD (1994). Heavy metal binding by mycorrhizal fungi. *Physiologia Plantarum* 92(2): 364-368.
- GAMALERO, E., L. FRACCHIA, M. CAVALETTO, J. GARBAYE, P. FREY-KLETT, G. C. VARESE & M. G. MARTINOTTI (2003). Characterization of functional traits of two fluorescent pseudomonads isolated from basidiomes of ectomycorrhizal fungi. *Soil Biology & Biochemistry* 35(1): 55-65.
- GAMALERO, E., A. TROTTA, N. MASSA, A. COPETTA, M. G. MARTINOTTI & G. BERTA (2004). Impact of two fluorescent pseudomonads and an arbuscular mycorrhizal fungus on tomato plant growth, root architecture and P acquisition. *Mycorrhiza* 14(3): 185-192.
- GEISLER, G. (1988). Pflanzenbau. Lehrbuch - Biologische Grundlagen und Technik der Pflanzenproduktion, Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg 2. Auflage: 318-329.
- GIANINAZZI-PEARSON, V. (1996). Plant cell responses to arbuscular mycorrhizal fungi: getting to the roots of the symbiosis. *Plant Cell* 8(10): 1871-1883.
- GILDON, A. & P. B. TINKER (1983). Interactions of vesicular-arbuscular mycorrhizal infections and heavy metals in plants. II. The effects of infection on uptake of copper. *New Phytologist* 95(2): 263-268.
- GILLER, K. E., R. NUSSBAUM, A. M. CHAUDRI & S. P. MCGRATH (1993). *Rhizobium meliloti* is less sensitive to heavy-metal contamination in soil than *R. leguminosarum* bv. *trifolii* or *R. loti*. *Soil Biology & Biochemistry* 25(2): 273-278.
- GRAHAM, J. H., R. T. LEONARD & J. A. MENGE (1982). Interaction of light intensity and soil temperature with phosphorus inhibition of vesicular-arbuscular mycorrhiza formation. *New Phytologist* 91: 683-690.
- GRIFFIOEN, W. A. J. & W. H. O. ERNST (1990). The role of VA mycorrhiza in the heavy metal tolerance of *Agrostis capillaris* L. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 29(1-4): 173-177.

- GRILL, E., E. L. WINNACKER & M. H. ZENK (1987). Phytochelatins, a class of heavy-metal-binding peptides from plants, are functionally analogous to metallothioneins. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 84(2): 439-443.
- HALL, J. L. (2002). Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Botany* 53(366): 1-11.
- HARTMANN, R. (2002). Studien zur standortgerechten Kompostanwendung auf drei pedologisch unterschiedlichen, landwirtschaftlich genutzten Flächen der Wildeshauser Geest, Niedersachsen. Dissertation, Universität Bremen.
- HASENBUSCH, R. (1999). Ausbleibender Erfolg beim Einsatz der arbuskulären Mykorrhiza bei Saint-paulia-Ionantha-Hybriden und Streptocarpus-Hybriden unter Praxisbedingungen. *Mitt. Biol. Bundesanst. Land- und Forstwirtsch., Berlin-Dahlem* 363: 45-53.
- HILDEBRANDT, U (2000). Mündliche Mitteilung
- HILDEBRANDT, U., K. JANETTA, F. OUZIAD, B. RENNE, K. NAWRATH & H. BOTHE (2001). Arbuscular mycorrhizal colonization of halophytes in Central European salt marshes. *Mycorrhiza* 10(4): 175-183.
- HILDEBRANDT, U., M. KALDORF & H. BOTHE (1999). The zinc violet and its colonization by arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Plant Physiology* 154(5/6): 709-717.
- HOAGLAND, D. R. & D. J. ARNON (1939). The water-culture method for growing plants without soil. *California Agricultural Experiment Station Circular*. Springer Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg 347: 1-16.
- HOFFMANN, C. (2000). Berliner Rieselfelder. Web-Master der Bodenkunde.
- HOFFMANN, G. (1982). Zusammenhänge zwischn kritischen Schadstoffgehalten im Boden, in Futter- und Nahrungspflanzen. *Landwirtschaftliche Forschung* 39: 130-153.
- HÖFLICH, G. & R. METZ (1997). Interactions of plant-microorganism-associations in heavy metal containing soils from sewage farms. *Bodenkultur* 48(4): 239-247.
- HÖFLICH, G., W. WIEHE & C. HECHT-BUCHHOLZ (1995). Rhizosphere colonization of different crops with growth promoting *Pseudomonas* and *Rhizobium* bacteria. *Microbiological Research* 150(2): 139-147.

- HÖFLICH, G., W. WIEHE & G. KÜHN (1994). Plant growth stimulation by inoculation with symbiotic and associative rhizosphere microorganisms. *Experientia* 50(10): 897-905.
- IQBAL, S. H. & K. S. QURESHI (1977). The effect of vesicular arbuscular mycorrhizal associations on growth of sunflower (*Helianthus annuus* L.) under field conditions. *Biologia, Pakistan* 23(2): 189-196.
- IRHA, N., J. SLET & V. PETERSELL (2002). Effect of heavy metals and PAH on soil assessed via dehydrogenase assay. *Environment International* 28(8): 779-782.
- JAHN, M., G. HÖFLICH & H.-G. KAUFMANN (1995). Einfluss von AM-Pilzen und *Pseudomonas fluorescens* auf das Wachstum und den Zierwert von *Tagetes erecta*. *Ökophysiologie des Wurzelraumes* 6: 87-94.
- JARAK, M., M. GOVEDARICA, N. MILOSEVIC, N. PETROVIC & M. UBAVIC (1997). The effect of heavy metals on nodulation and microbial activity in the rhizosphere of the pea. *Acta Horticulturae* (No. 462): 229-234.
- JEFFREY, S., BUYER, G. MARIAN, KRATZKE & L. J. SIKORA (1993). A method for detection of Pseudobactin, the siderophore produced by a plant-growth-promoting *Pseudomonas* strain, in the barley rhizosphere. *Microbiology* 59(3): 677-681.
- JIANG, X. & K. ZHAO (2001). Mechanism of heavy metal injury and resistance of plants. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* 7(1): 92-99.
- JONER, E. J., R. BRIONES & C. LEYVAL (2000). Metal-binding capacity of arbuscular mycorrhizal mycelium. *Plant and Soil* 226(2): 227-234.
- JONER, E. J. & C. LEYVAL (1997). Plant uptake of Cd through arbuscular mycorrhiza, an important group of symbiotic fungi. Contaminated soils: 3rd International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, Paris, France, 15-19 May, 1995. Paris France, Institut National de la Recherche Agronomique (INRA).
- JONER, E. J. & C. LEYVAL (2001). Time-course of heavy metal uptake in maize and clover as affected by root density and different mycorrhizal inoculation regimes. *Biology and Fertility of Soils* 33(5): 351-357.

- JONES, M. D. & T. C. HUTCHINSON (1988). Nickel toxicity in mycorrhizal birch seedlings infected with *Lactarius rufus* or *Scleroderma flavidum*. II Uptake of nickel, calcium, magnesium, phosphorus and iron. *New Phytologist* 108: 461-470.
- JURKEVITCH, E., Y. HADAR, Y. CHEN, M. CHINO & S. MORI (1993). Indirect utilization of the phyto-siderophore mugineic acid as an iron source to rhizosphere fluorescent *Pseudomonas*. *BioMetals* 6(2): 119-123.
- KALDORF, M., A. J. KUHN, W. H. SCHRÖDER, U. HILDEBRANDT & H. BOTHE (1999). Selective element deposits in maize colonized by a heavy metal tolerance conferring arbuscular mycorrhizal fungus. *Journal of Plant Physiology* 154(5/6): 718-728.
- KALIESS, D. (2000). Einfluss von *Pseudomonas fluorescens* RA56 auf die pflanzliche Aufnahme von Schwermetallen PAK aus einem hoch belasteten Rieselfeldboden. Diplomarbeit.
- KARAGIANNIDIS, N. & N. NIKOLAOU (1999). Arbuscular mycorrhizal root infection as an important factor of grapevine nutrition status. Multivariate analysis application for evaluation and characterization of the soil and leaf parameters. *Agrochimica* 43(3-4): 151-165.
- KARAGIANNIDIS, N. & N. NIKOLAOU (2000). Influence of arbuscular mycorrhizae on heavy metal (Pb and Cd) uptake, growth, and chemical composition of *Vitis vinifera* L. (cv. Razaki). *American Journal of Enology and Viticulture* 51(3): 269-275.
- KELLY, J. J., M. HAGGBLOM & R. L. TATE, III (1999). Changes in soil microbial communities over time resulting from one time application of zinc: a laboratory microcosm study. *Soil Biology & Biochemistry* 31(10): 1455-1465.
- KELTJENS, W. G. & M. L. V. BEUSICHEM (1998). Phytochelatins as biomarkers for heavy metal toxicity in maize: single metal effects of copper and cadmium. *Journal of Plant Nutrition* 21(4): 635-648.
- KLOBUS, G. & J. BUCZEK (1985). Chlorophyll content, cells and chloroplast number and cadmium distribution in Cd-treated cucumber plant. *Acta Physiol. Plant* 7: 139-147.
- KONG, F., M. ZHANG, F. KONG & M. ZHANG (1996). Effects of copper, manganese and pH on the growth and several enzyme activities of mycorrhizal fungus *Cenococcum geophilum* Fr. *Journal of Environmental Sciences*. 8(4): 419-425.

- KRIEGER, C. (2001). Wachstum, Entwicklung und Ertrag sowie ausgewählte Qualitäten von Kartoffeln unter dem Einfluss von *Pseudomonas fluorescens* RA56.
- KUMAR, B. S. D. & H. C. DUBE (1993). Siderophore production by a plant growth-promoting fluorescent pseudomonad, RBT13. *Indian Journal of Microbiology* 33(1): 61-65.
- KUMAR, K. S. M., A. R. ALAGAWADI & V. C. PATIL (2002). Studies on microbial diversity and their activity in soil under bamboo plantation. Bamboo for sustainable development. Proceedings of the Vth International Bamboo Congress and the VIth International Bamboo Workshop, San Jose, Costa Rica, 2-6 November 1998.
- LAHEURTE, F., C. LEYVAL and J. BERTHELIN (1990). Root exudates of maize, pine and beech seedlings influenced by mycorrhizal and bacterial inoculation. *Symbiosis (Rehovot)* 9(1-3): 111-116.
- LANFRANCO, L., A. BOLCHI, E. C. ROS, S. OTTONELLO and P. BONFANTE (2002). Differential expression of a metallothionein gene during the presymbiotic versus the symbiotic phase of an arbuscular mycorrhizal fungus. *Plant Physiology* 130(1): 58-67.
- LEBLOVA, S., A. MUCHA and E. SPIRHZANOVA (1986). Compartmentation of cadmium, copper, lead and zinc in seedlings of maize (*Zea mays* L.) and induction of metallothionein. *Biologia, Czechoslovakia* 41(8): 777-785.
- LEYVAL, C. and J. BERTHELIN (1982). Separate or simultaneous effects of endomycorrhizal fungi and non-symbiotic microflora on nutrition and growth of maize. *Colloques de l'INRA (No. 13)*: 207-213.
- LEYVAL, C. and J. BERTHELIN (1993). Rhizodeposition and net release of soluble organic compounds by pine and beech seedlings inoculated with rhizobacteria and ectomycorrhizal fungi. *Biology and Fertility of Soils* 15(4): 259-267.
- LEYVAL, C., B. R. SINGH and E. J. JONER (1995). Occurrence and infectivity of arbuscular mycorrhizal fungi in some Norwegian soils influenced by heavy metals and soil properties. *Water, Air, and Soil Pollution* 84(3/4): 203-216.
- LEYVAL, C., K. TURNAU and K. HASELWANDTER (1997). Effect of heavy metal pollution on mycorrhizal colonization and function: physiological, ecological and applied aspects. *Mycorrhiza* 7(3): 139-153.

- LI, X. L., H. MARSCHNER and E. GEORGE (1991). Acquisition of phosphorus and copper by VA-mycorrhizal hyphae and root-to-shoot transport in white clover. *Plant and Soil* 136: 49-57.
- LIAO, J. P., X. G. LIN, Z. H. CAO, Y. Q. SHI and M. H. WONG (2003). Interactions between arbuscular mycorrhizae and heavy metals under sand culture experiment. *Chemosphere* 50(6): 847-853.
- LOPER, J. E. and J. S. BUYER (1991). Siderophores in microbial interactions on plant surfaces. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 4(1): 5-13.
- LOPER, J. E., C. HAAK and M. N. SCHROTH (1984). Population dynamics of soil pseudomonas in the rhizosphere of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Applied and Environmental Microbiology* 43: 422-442.
- LOTH, F.-G. (1994). Einfluss der vesikulär-arbuskulären Mykorrhiza auf Ertrag und Schwermetallakkumulation von klärschlammgedüngten Kulturpflanzen in Gefäß- und Feldversuchen. Dissertation, Wissenschaftlicher Fachverlag, Gießen.
- LOTH, F. G. (1996). Abundance of arbuscular mycorrhizal fungi spores at different native sites as affected by sewage sludge applications. *Bodenkultur* 47(2): 89-96.
- LOTH, F. G. and W. HÖFNER (1995). Einfluss von klärschlammbehandelten Böden auf die Infektiosität von VA-Mykorrhiza-Pilzisolaten bei verschiedenen Kulturpflanzen. *Agribiol. Res.* 48(3-4): 269-281.
- LOTH, F. G. and W. HÖFNER (1995). Influence of VA-mycorrhiza on heavy metal uptake of oat (*Avena sativa* L.) from soils differing in heavy metal contamination. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 158(4): 339-345.
- LUDWIG-MÜLLER, J. (2000). Hormonal Balance in Plants during Colonisation by Mycorrhizal Fungi. In *Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function*. Edited by Y. Kapulnik & D.D. Douds. Dordrecht, Niederlande: Kluwer Academic Publishers.
- LÜDERSDORF, M., M. Frost and W. Pestemer (1995). Einfluss von Schadstoffen auf mehrfach kontaminierten Böden auf Gehölzpflanzen. Statusseminar Förderschwerpunkt „Ökotoxikologie“ des BMBF. 04.-05.10.1994 Neuherberg: 181-195.
- LÜDERSDORF, M., M. Frost and W. Pestemer (1996). Zur Aufnahme von PCB 52 und BaP in Gehölzpflanzen. *Landschaftsentwicklung und Umweltforschung. – Schriftenreihe im Fachbereich Umwelt und Gesellschaft- Nr. 101*: 125-133.

- MALCOVA, R. and M. GRYNDLER (2003). Amelioration of Pb and Mn toxicity to arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* by maize root exudates. *Biologia Plantarum* 47(2): 297-299.
- MALCOVA, R., M. VOSATKA and M. GRYNDLER (2003). Effects of inoculation with *Glomus intraradices* on lead uptake by *Zea mays* L. and *Agrostis capillaris* L. *Applied Soil Ecology* 23(1): 55-67.
- MANSKE, G. G. B. (1989). Die Effizienz einer Beimpfung mit dem VA-Mykorrhizapilz *Glomus manihotis* bei Sommerweizenotypen und ihre Vererbung in F1- und R 1-Generationen bei verschiedenen Phosphatdüngungsformen und Witterungsbedingungen. Dissertation, Universität Göttingen.
- MARSCHNER, P., D. E. CROWLEY & B. SATTELMACHER (1997). Root colonization and iron nutritional status of a *Pseudomonas fluorescens* in different plant species. *Plant and Soil* 196(2): 311-316.
- MARSCHNER, P., C. H. YANG, R. LIEBEREI & D. E. CROWLEY (2001). Soil and plant specific effects on bacterial community composition in the rhizosphere. *Soil Biology & Biochemistry* 33: 1437-1445.
- MAZZOLA, M., R. J. COOK, L. S. THOMASHOW, D. M. WELLER & L. S. PIERSON (1992). Contribution of phenazine antibiotic biosynthesis to the ecological competence of Fluorescent pseudomonads in soil habitats. *Applied and Environmental Microbiology* 58(8): 2616-2624.
- MERIAN, E., M. GELDMACHER-V MASLLINCKRODT & G. MACHATA (1984). *Metalle in der Umwelt*. Verlag Chemie, Weinheim 2. Auflage.
- MIKANOVA, O., J. KUBAT, N. MIKHAILOVSKAYA, I. VOROS & B. BIRO (2001). Influence of heavy metal pollution on some soil-biological parameters in the alluvium of the Litavka river. *Rostlinna Vyroba* 47(3): 117-122.
- MORSELT, A. F. W., W. T. M. SMITS & T. LIMONARD (1986). Histochemical demonstration of heavy metal tolerance in ectomycorrhizal fungi. *Plant and Soil* 96(3): 417-420.
- MULLEN, M. D., D. C. WOLF, F. G. FERRIS, T. J. BEVERIDGE, C. A. FLEMMING & G. W. BAILEY (1989). Bacterial sorption of heavy metals. *Applied and Environmental Microbiology* 55(12): 3143-3149.
- NEWMAN, E. I. (1985). The rhizosphere: carbon sources and microbial population. *Ecological Interactions in Soil, Plants, Microbes and Animals*. (Ed. Fitter, A.H.). Oxford, Blackwell Scientific: 107-121.

- O'SULLIVAN, D. J. & F. O'GARA (1991). Genetic improvement of siderophore production aimed at enhancing biocontrol in *Pseudomonas* strains. Beltsville Symposia in Agricultural Research. 14. The rhizosphere and plant growth (edited by Keister, D. L.; Cregan, P. B.).(No. 14): 310.
- ORTAS, I. (2003). Effect of selected mycorrhizal inoculation on phosphorus sustainability in sterile and non-sterile soils in the Harran Plain in South Anatolia. *Journal of Plant Nutrition* 26(1): 1-17.
- PALLERONI, N. J., R. KUNISAWA, R. CONTOPOULOU & M. DOUDOROFF (1973). Nucleic acid homologies in the genus *Pseudomonas*. *International Journal of Systematic Bacteriology* 23(4): 333-339.
- PAULITZ, T. C. & R. G. LINDERMAN (1989). Interactions between fluorescent pseudomonads and VA mycorrhizal fungi. *New Phytologist* 113(1): 37-45.
- POKOJSKA-BURDZIEJ, A., E. STRZELCZYK, H. DAHM & C. Y. LI (2004). Effect of endophytic bacterium *Pseudomonas fulva* on growth of pine seedlings (*Pinus sylvestris*), formation of mycorrhizae and protection against pathogens. *Phytopathologia Polonica* (No.32): 33-47.
- QUINTERO-RAMOS, M., D. ESPINOZA-VICTORIA, R. FERRERA-CERRATO and G. J. BETHLENFALVAY (1993). Fitting plants to soil through mycorrhizal fungi: mycorrhiza effects on plant growth and soil organic matter. *Biology and Fertility of Soils* 15(2): 103-106.
- RAUSER, W. E. (1981). Occurrence of metal-binding proteins in plants. *Heavy Metals in the Environment*.
- RICKEN, B. & W. HÖFNER (1996). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on heavy metal tolerance of lucerne (*Medicago sativa* L.) and oat (*Avena sativa* L.) on a sewage-sludge treated soil. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 159(2): 189-194.
- RIVERA-BECERRIL, F., C. CALANTZIS, K. TURNAU, J. P. CAUSSANEL, A. A. BELIMOV, S. GIANINAZZI, R. J. STRASSER & V. GIANINAZZI-PEARSON (2002). Cadmium accumulation and buffering of cadmium-induced stress by arbuscular mycorrhiza in three *Pisum sativum* L. genotypes. *Journal of Experimental Botany* 53(371): 1177-1185.
- SABER, N. E., A. M. ABDEL-MONEIM & S. Y. BARAKAT (1999). Role of organic acids in sunflower tolerance to heavy metals. *Biologia Plantarum* 42(1): 65-73.
- SAUERBECK, D. (1983). Which heavy metal contents in plants should not be exceeded to avoid detrimental effects on their growth? *Landwirtschaftliche Forschung (Sonderheft 39)*: 108-129.

- SAUERBECK, D. & P. STYPEREK (1988). Heavy metals in soils and plants of 25 long-term field experiments treated with sewage sludge. Abfallstoffe als Dünger. Proceedings of the 99th VDLUFA congress, September 1987, Koblenz, German Federal Republic. VDLUFA-Schriftenreihe No. 23.
- SAXENA, P. K., S. KRISHNARAJ, T. DAN, M. R. PERRAS & N.N. VETTAKKORUMAKANKA (1999). Phytoremediation of metal contaminated and polluted soils. In: Heavy metal stress in plants- From molecules to ecosystems. M.N.V Prasad and J. Hagemeyer (eds), Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin, New York: 305-329.
- SCHEFFER, F. & P. SCHACHTSCHABEL (1992). Lehrbuch der Bodenkunde Ferdinand Enke Verlag Stuttgart. 13. Auflage. 491 S.
- SCHLEGEL, H. G. (1992). Allgemeine Mikrobiologie. Thieme Verlag Stuttgart New York: 220-222.
- SCHLENTHER, L., C. HOFFMANN & M. RENGGER (1995). Distribution model of nutrients and pollutants within a former series of sewage farms. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 76(1): 433-436.
- SCHMITZ, O., G. DANNEBERG, B. HUNDESHAGEN, A. KLINGNER & H. BOTHE (1991). Quantification of vesicular-arbuscular mycorrhiza by biochemical parameters. Plant Physiology 139(106-114).
- SCHÜSSLER, A. (2002). Molecular phylogeny, taxonomy, and evolution of *Geosiphon pyriformis* and arbuscular mycorrhizal fungi. Plant and Soil 244(1/2): 75-83.
- SCHÜTZENDÜBEL, A. & A. POLLE (2002). Plant responses to abiotic stresses: heavy metal-induced oxidative stress and protection by mycorrhization. Journal of Experimental Botany 53(372): 1351-1365.
- SCHWANTES, H.O. (1995). Biologie der Pilze. Eine Einführung on die angewandte Mykologie. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart. 478 S.
- SIMON, L., S. VAGVOLGYI & Z. GYORI (1999). Investigation of cadmium accumulation in sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants. Agrochimica es Talajtan 48(1/2): 99-110.
- SMITH, S. E. & D. J. READ (1997). Mycorrhizal symbiosis. San Diego, US, Academic Press.

- SREENIVASA, M. N. & P. U. KRISHNARAJ (1992). Synergistic interaction between VA mycorrhizal fungi and a phosphate solubilizing bacterium in Chilli (*Capsicum annuum*). *Zentralblatt für Mikrobiologie* 147(1-2): 126-130.
- STRACK, D., T. FESTER, B. HAUSE & M. H. WALTER (2001). Die arbuskuläre Mykorrhiza: Eine unterirdische Lebensgemeinschaft. *Biologie in unserer Zeit* 31(5): 286-295.
- TAKACS, T., B. BIRO & I. VOROS (2001). Arbuscular mycorrhizal effect on heavy metal uptake of ryegrass (*Lolium perenne* L.) in pot culture with polluted soils. Plant nutrition: food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research. Fourteenth International Plant Nutrition Colloquium, Hannover, Germany. Dordrecht Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- TAKACS, T. & I. VOROS (2003). Effect of metal non-adapted arbuscular mycorrhizal fungi on Cd, Ni and Zn uptake by ryegrass. *Acta Agronomica Hungarica* 51(3): 347-354.
- TOMSETT, A. B. & D. A. THURMAN (1988). Molecular biology of metal tolerances in plants. *Plant, Cell and Environment* 11: 383-394.
- TOYOTA, K. & K. IKEDA (1997). Relative importance of motility and antibiosis in the rhizosphere competence of a biocontrol agent *Pseudomonas fluorescens* MelRC2Rif. *Biol Fertil Soils* 25: 416-420.
- TRAULSEN, B. D., G. SCHÖNHARD & W. PESTEMER (1997). Risk assessment of the application of biological waste compost on agricultural land use. *Agrobiological Research* 50(2): 102-114.
- TRAULSEN, B. D., T. STRUMPF, & G. SCHÖNHARD (1998) Effekte von ausgewählten Bodenhilfsstoffen auf die Cadmium-Aufnahme verschiedener Nutzpflanzen. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd.*, 50 (10): 263-267.
- TREVORS, J. T. (1984). Dehydrogenase activity in soil: a comparison between the INT and TTC assay. *Soil Biol. Biochem.* 16: 673-674.
- TREVORS, J. T., C. I. MAYFIELD & W. E. INNISS (1982). Measurement of electron transport system (ETS) activity in soil. *Microbiol. Ecology* 8: 163-168.
- VAL, C. D., J. M. BAREA & C. AZCON-AGUILAR (1999). Assessing the tolerance to heavy metals of arbuscular mycorrhizal fungi isolated from sewage sludge-contaminated soils. *Applied Soil Ecology* 11(2/3): 261-269.

- VIERHEILIG, H., A. P. COUGHLAN, U. WYSS & Y. PICHE (1998). Ink and vinegar, a simple staining technique for arbuscular-mycorrhizal fungi. *Applied and Environmental Microbiology* 64(12): 5004-5007.
- VILLEGAS, J. & J. A. FORTIN (2001). Phosphorus solubilization and pH changes as a result of the interactions between soil bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi on a medium containing NH₄⁺ as nitrogen source. *Canadian Journal of Botany* 79(8): 865-870.
- VILLEGAS, J. & J. A. FORTIN (2002). Phosphorus solubilization and pH changes as a result of the interactions between soil bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi on a medium containing NO₃⁻ as nitrogen source. *Canadian Journal of Botany* 80(5): 571-576.
- VIVAS, A., B. VÖRÖS, B. BIRÓ, J. M. BAREA, J. M. RUIZ-LOZANO & R. AZCÓN (2003). Beneficial effects of indigenous Cd-tolerant and Cd-sensitive *Glomus mosseae* associated with a Cd-adapted strain of *Brevibacillus* sp. in improving plant tolerance to Cd contamination. *Soil Ecology* 24: 177-186.
- VON ARX, U. (1998). Kupfer in der Schweiz (Standortbestimmung). Berichtsentwurf BUWAL, Bern.
- WEBER, G. & M. CLAUS (2000). The influence of chemical soil factors on the development of VA mycorrhizas of ash (*Fraxinus excelsior* L.) and sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.) in pot experiments. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 163(6): 609-616.
- WEISSENHORN, I., A. GLASHOFF, C. LEYVAL & J. BERTHELIN (1994). Differential tolerance to Cd and Zn of arbuscular mycorrhizal (AM) fungal spores isolated from heavy metal-polluted and unpolluted soils. *Plant and Soil* 167(2): 189-196.
- WEISSENHORN, I., C. LEYVAL, G. BELGY & J. BERTHELIN (1995). Arbuscular mycorrhizal contribution to heavy metal uptake by maize (*Zea mays* L.) in pot culture with contaminated soil. *Mycorrhiza* 5(4): 245-251.
- WEISSENHORN, I., C. LEYVAL & J. BERTHELIN (1993). Cd-tolerant arbuscular mycorrhizal (AM) fungi from heavy-metal polluted soils. *Plant and Soil* 157(2): 247-256.
- WELCH, R., W. NORVELL, S. SCHÄFER, J. SHAFF & L. KOCHIAN (1993). Induction of iron (III) and copper (II) reduction in pea roots by Fe and Cu status. *Planta* 1.

- WELP, G. (1999). Inhibitory effects of the total and water-soluble concentrations of nine different metals on the dehydrogenase activity of a loess soil. *Biology and Fertility of Soils* 30(1/2): 132-139.
- WHITFIELD, L., A. J. RICHARDS & D. L. RIMMER (2004). Relationships between soil heavy metal concentration and mycorrhizal colonisation in *Thymus polytrichus* in northern England. *Mycorrhiza* 14(1): 55-62.
- WIEHE, W. & G. HÖFLICH (1995). Rhizosphere colonization of different crops with growth promoting *Pseudomonas* and *Rhizobium* bacteria. *Microbiol. Res.* 150: 139-147.
- XIE, Y., Z. LI & Z. YANG (2002). Effect of pH value, salt concentration and Al^{3+} on mycorrhizal fungus growth. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis* 24(2): 204-207.
- XU, G. W. & D. C. GROSS (1986). Field evaluations of the interactions among fluorescent *Pseudomonas*, *Erwinia carotovora*, and potato yields. *Phytopathology* 76: 423-430.
- ZAGHLOUL, R. A., M. H. MOSTAFA & A. A. AMER (1996). Influence of wheat inoculation with mycorrhizal fungi, phosphate solubilizing bacteria and *Azospirillum* on its growth and soil fertility. *Annals of Agricultural Science, Moshtohor* 34(2): 611-626.

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1: Mögliche Mechanismen der Schwermetalltoleranz (TOMSETT & THURMAN, 1988).....	11
Abb. 2: Skizze eines Mitscherlich-Gefäßes mit Versuchsboden und Mykorrhizapilz.....	22
Abb. 3: Klimadiagramme der drei Versuchsjahre 2000, 2001 und 2002 am Standort Berlin-Dahlem.....	33
Abb. 4: Wachstumskurven der Maispflanzen im Mitscherlich-Gefäßversuch (n=4): A. Boden Malchow, 2001; B. Boden Malchow, 2002; C. Boden Großbeeren, 2001; D. Boden Großbeeren, 2002.....	38
Abb. 5: Proteingehalte im Maiskorn auf dem mäßig belasteten Boden Malchow und dem hoch belasteten Boden Großbeeren im Jahr 2001	41
Abb. 6: Mykorrhizastrukturen mit Hyphen und Vesikel in der Maiswurzel (Vergrößerung x 500)	42
Abb. 7: Mykorrhizierung der Maiswurzeln im Gefäßversuch im mäßig belasteten Boden Malchow und im hoch belasteten Boden Großbeeren der Jahre 2001/02	42
Abb. 8: pH Werte in der Bodenlösung im Mais im mäßig belasteten Boden Malchow und im hoch belasteten Boden Großbeeren 2001/02	46
Abb. 9: Cd n der Bodenlösung im Mais im mäßig belasteten Boden Malchow und im hoch belasteten Boden Großbeeren 2001/02.....	47
Abb. 10: Cu n der Bodenlösung im Mais im mäßig belasteten Boden Malchow und im hoch belasteten Boden Großbeeren 2001/02.....	48
Abb. 11: K in der Bodenlösung im Mais im mäßig belasteten Boden Malchow und im hoch belasteten Boden Großbeeren 2001/02.....	49
Abb. 12: P n der Bodenlösung im Mais im mäßig belasteten Boden Malchow und im hoch belasteten Boden Großbeeren 2001/02.....	50
Abb. 13: Mykorrhizierung des Weidelgrases im Mitscherlich-Gefäßversuch im Boden Malchow und Großbeeren der Jahre 2001/02	52
Abb. 14: pH-Werte der Bodenlösung im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Weidelgras im mäßig belasteten Boden Malchow und im hoch belasteten Boden Großbeeren.....	55
Abb. 15: Cd in der Bodenlösung im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Weidelgras im mäßig belasteten Boden Malchow und im hoch belasteten Boden Großbeeren.....	56
Abb. 16: Cu in der Bodenlösung im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Weidelgras im mäßig belasteten Boden Malchow und im hoch belasteten Boden Großbeeren.....	57
Abb. 17: K in der Bodenlösung im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Weidelgras im mäßig belasteten Boden Malchow und im hoch belasteten Boden Großbeeren.....	58
Abb. 18: P in der Bodenlösung im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Weidelgras im mäßig belasteten Boden Malchow und im hoch belasteten Boden Großbeeren.....	59

Abb. 19: Wachstumskurven der Sonnenblumen: A. Referenzboden, 2001; B. Referenzboden, 2002; C. Hoch belasteten Boden, 2001; Hoch belasteten Boden, 2002	60
Abb. 20: Mykorrhizierung der Sonnenblumenwurzeln auf dem Referenzboden BBA und dem hoch belasteten Boden BBA der Jahre 2001/02.....	61
Abb. 21: Wachstumskurven der Sonnenblumen: A. Referenzboden BBA, 2003; B. mäßig belasteter Boden BBA, 2003 u. C. hoch belasteter Boden Großbeeren, 2003	65
Abb. 22: Blattentwicklung der Sonnenblumen im Vergleich Kontrolle und Beimpfung mit Mykorrhizapilzen und Bakterien	66
Abb. 23: Geerntete Sonnenblumenkörbe zur Vollreife und -wurzeln aller Varianten im hoch belasteten Boden Großbeeren.....	67
Abb. 24: Ertragsstruktur der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch 2003 nach Stängel, Blätter, Wurzel und Blütenkorb getrennt.....	69
Abb. 25: Mykorrhizierung der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch im Referenzboden BBA, mäßig belasteter Boden BBA und hoch belasteter Boden Großbeeren.....	70
Abb. 26: pH-Werte der Bodenlösungen im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen im Jahr 2003	74
Abb. 27: Ca-Gehalte der Bodenlösungen im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen im Jahr 2003	75
Abb. 28: K-Gehalte der Bodenlösungen im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen im Jahr 2003	75
Abb. 29: Mg-Gehalte der Bodenlösungen im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen im Jahr 2003	75
Abb. 30: P-Gehalte der Bodenlösungen im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen im Jahr 2003.....	76
Abb. 31: Cd-Gehalte der Bodenlösungen im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen im Jahr 2003	77
Abb. 32: Cu-Gehalte der Bodenlösungen im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen Großbeeren im Jahr 2003	77
Abb. 33: Zn-Gehalte der Bodenlösungen im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen im Jahr 2003	78
Abb. 34: Heterogenität des Cd auf der Versuchfläche BBA Berlin-Dahlem.....	84
Abb. 35: Entwicklung der Transferfaktoren im Mais (oberirdische Pflanzenteile und Wurzeln) 2000, 2001 u. 2002 mit je zwei Ernteterminen	87
Abb. 36: Mykorrhizierungsgrad der Maiswurzeln im Feldversuch BBA zu beiden Ernteterminen in den Jahren 2000, 2001 und 2002.....	88
Abb. 37: Korrelationen zwischen dem Cd-Transfer und dem Mykorrhizierungsgrad im Feldversuch beim Mais zu beiden Ernteterminen 2000-2002	89
Abb. 38: Weidelgrasgrasparzellen des Feldversuches BBA im Vergleich Kontrolle und Mykorrhiza mit Bakterien	92

Abb. 39: Mykorrhizierungsgrad der Weidelgraswurzeln im Feldversuch BBA zum zweiten Schnitt, 2000, 2001 und 2002.	94
Abb. 40: Entwicklung der Transferfaktoren im Weidelgras (Weidelgras und Wurzeln) 2000, 2001 u. 2002 mit je zwei Schnittterminen.....	95

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1: Gefäßversuche mit mono- und dikotylen Pflanzen im Gefäßversuch 2001-2003	20
Tab. 2: Bezeichnung der verwendeten Böden im Gefäßversuch.....	21
Tab. 3: Vorsorgewerte für Sandböden nach § 8 Abs. 2 Nr. 1 des Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV).....	23
Tab. 4: Angaben zur ermittelten Bodentextur der Böden Malchow und Großbeeren bis 30 cm Tiefe	23
Tab. 5: Untersuchte Elementgehalte der Böden Malchow und Großbeeren bis 30 cm Tiefe	23
Tab. 6: Anbaudaten und Ernte der Gefäßversuche mit Mais und Weidelgras 2001/02	24
Tab. 7: Ermittelte Bodentextur der Böden im Gefäßversuch der Sonnenblumen 2001/02 bis zu 30 cm Tiefe	25
Tab. 8: Untersuchte Elementgehalte der Böden im Gefäßversuch der Sonnenblumen 2001/02 bis zu 30 cm Tiefe	26
Tab. 9: Aussaat- und Erntezeitpunkte der Sonnenblume der Jahre 2001 und 2002.....	26
Tab. 10: Ermittelte Bodentextur der Böden im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen 2003 bis 30 cm Tiefe	28
Tab. 11: Ermittelte Elementgehalte des Bodens im Mitscherlich-Gefäßversuch mit Sonnenblumen 2003 bis 30 cm Tiefe	28
Tab. 12: Anzucht und Ernte der Sonnenblumen im Mitscherlich-Gefäßversuch 2003	29
Tab. 13: Bodenentnahme der Mitscherlich-Gefäße mit Sonnenblumen 2003 für die Dehydrogenasebestimmung	30
Tab. 14: Untersuchte physikalische Bodeneigenschaften im Ap-Horizont	30
Tab. 15: Untersuchte Elementgehalte und chemische Bodeneigenschaften im Ap-Horizont	31
Tab. 16: Klimawerte der Versuchsjahre 2000 bis 2002 und langjährige Mittel (1961-90) am Standort Berlin-Dahlem.....	32
Tab. 17: Prüfglieder am Standort BBA Berlin-Dahlem.....	34
Tab. 18: Aussaat und Ernte des Feldversuches in den Vegetationen 2000, 2001 u. 2002	35
Tab. 19: Erträge des Maises in g/Gefäß im mäßig belasteten Boden Malchow, 2001	39

Tab. 20: Erträge des Mais in g/Gefäß im mäßig belasteten Boden Malchow, 2002	39
Tab. 21: Erträge des Mais in g/Gefäß im hoch belasteten Boden Großbeeren, 2001	40
Tab. 22: Erträge des Mais in g/Gefäß im hoch belasteten Boden Großbeeren, 2002.....	40
Tab. 23: Korrelationen zwischen Mykorrhizierungsgrad und TM-Erträge beim Mais	43
Tab. 24: Weidelgraserträge als FM in g/Gefäß im mäßig belasteten Boden Malchow, 2001/02.....	51
Tab. 25: Weidelgraserträge als TM in g/Gefäß im mäßig belasteten Boden Malchow, 2001/02.....	51
Tab. 26: Weidelgraserträge als FM in g/Gefäß im hoch belasteten Boden Großbeeren, 2001/02	51
Tab. 27: Weidelgraserträge als TM in g/Gefäß im hoch belasteten Boden Großbeeren, 2001/02.....	52
Tab. 28: Sonnenblumenерträge als TM in g/Gefäß auf dem Referenzboden und dem hoch belasteten Boden, 2001/02	61
Tab. 29: Korrelationen zwischen TM-Erträge und Mykorrhizierungsgrad	62
Tab. 30: TM-Erträge in g/Gefäß der Sonnenblume im Gefäßversuch 2003.....	67
Tab. 31: Korrelation zwischen TM-Erträge und Mykorrhizierungsgrad	71
Tab. 32: Dehydrogenaseaktivität der Mikroorganismen zu verschiedenen Entwicklungs-stadien der Sonnenblume im Referenzboden BBA, 2003	72
Tab. 33: Dehydrogenaseaktivität der Mikroorganismen zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Sonnenblume im mäßig belasteten Boden BBA, 2003	72
Tab. 34: Dehydrogenaseaktivität der Mikroorganismen zu verschiedenen Entwicklungs-stadien der Sonnenblume im hoch belasteten Boden Großbeeren, 2003.....	73
Tab. 35: Korrelation zwischen TM-Erträge und Dehydrogenaseaktivität der Sonnenblume	73
Tab. 36: Ertragsstruktur von Mais im Feldversuch BBA, 2000	85
Tab. 37: Ertragsstruktur von Mais im Feldversuch BBA, 2001	85
Tab. 38: Ertragsstruktur Mais im Feldversuch BBA, 2002	85
Tab. 39: Korrelation zwischen Transferfaktor und Mykorrhizierungsgrad	90
Tab. 40: Ertragsstruktur des Weidelgrases im Feldversuch BBA 2000	90
Tab. 41: Ertragsstruktur des Weidelgrases im Feldversuch BBA, 2001	91
Tab. 42: Ertragsstruktur des Weidelgrases im Feldversuch BBA, 2002.....	91

Anhang

Tabelle 1: Nährelemente in mg/kg TM Mais im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden Malchow, 2001	140
Tabelle 2: Nährelemente in mg/kg TM Mais im Mitscherlich- Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden Malchow, 2002	140
Tabelle 3: Nährelemente in mg/kg TM Mais im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, 2001	140
Tabelle 4: Nährelemente in mg/kg TM Mais im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, 2002	141
Tabelle 5: Schadelemente in mg/kg TM Mais im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden Malchow, 2001	141
Tabelle 6: Schadelemente in mg/kg TM Mais im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden Malchow, 2002	141
Tabelle 7: Schadelemente in mg/kg TM Mais im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, 2001	142
Tabelle 8: Schadelemente in mg/kg TM Mais im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, 2002	142
Tabelle 9: Nährelemente in mg/kg TM Weidelgras im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden Malchow, 2001	142
Tabelle 10: Nährelemente in mg/kg TM Weidelgras im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden Malchow, 2002	143
Tabelle 11: Nährelemente in mg/kg TM Weidelgras im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, 2001	143
Tabelle 12: Nährelemente in mg/kg TM Weidelgras im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, 2002	143
Tabelle 13: Schadelemente in mg/kg TM Weidelgras im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden Malchow, 2001	144
Tabelle 14: Schadelemente in mg/kg TM Weidelgras im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden Malchow, 2002	144
Tabelle 15: Schadelemente in mg/kg TM Weidelgras im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, 2001	145
Tabelle 16: Schadelemente in mg/kg TM Weidelgras im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, 2002	145

Tabelle 17: Nährelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Gefäßversuch Referenzboden BBA, 2001	146
Tabelle 18: Nährelemente in mg/kg TM der Sonnenblume Referenzboden BBA, 2002	146
Tabelle 19: Nährelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Gefäßversuch hoch belasteter Boden BBA, 2001	147
Tabelle 20: Nährelemente in mg/kg TM der Sonnenblume, im Gefäßversuch hoch belasteter Boden BBA, 2002	147
Tabelle 21: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Gefäßversuch Referenzboden BBA, 2001	148
Tabelle 22: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Gefäßversuch Referenzboden BBA, 2002	148
Tabelle 23: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Gefäßversuch hoch belasteter Boden BBA, 2001	149
Tabelle 24: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Gefäßversuch hoch belasteter Boden BBA, 2002	149
Tabelle 25: Nährelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, Referenzboden BBA, Zwischenernte 2003	150
Tabelle 26: Nährelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden BBA, Zwischenernte 2003	150
Tabelle 27: Nährelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, Zwischenernte 2003	150
Tabelle 28: Nährelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, Referenzboden BBA, Haupternte 2003	151
Tabelle 29: Nährelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden BBA, Haupternte 2003	151
Tabelle 30: Nährelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, Haupternte 2003	151
Tabelle 31: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, Referenzboden BBA, Zwischenernte 2003	152
Tabelle 32: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden BBA, Zwischenernte 2003	152
Tabelle 33: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, Zwischenernte 2003	152
Tabelle 34: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, Referenzboden BBA, Zwischenernte 2003	153
Tabelle 35: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden BBA, Zwischenernte 2003	153

Tabelle 36: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, Zwischenernte 2003	153
Tabelle 37: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, Referenzboden BBA, Haupternte 2003	154
Tabelle 38: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden BBA, Haupternte 2003	154
Tabelle 39: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, Haupternte 2003	154
Tabelle 40: Korrelationen zwischen pH-Wert in der Bodenlösung und den Schad- und Nährelementen im Referenzboden BBA, 2003	155
Tabelle 41: Korrelationen zwischen pH-Wert in der Bodenlösung und den Schad- und Nährelementen im mäßig belasteten Boden BBA, 2003	155
Tabelle 42: Korrelationen zwischen pH-Wert in der Bodenlösung und den Schad- und Nährelementen im hoch belasteten Boden Großbeeren, 2003	155
Tabelle 43: Ca in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Zwischenernte 2003	156
Tabelle 44: Ca in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Haupternte 2003	157
Tabelle 45: K in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Zwischenernte 2003	158
Tabelle 46: K in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Haupternte 2003	159
Tabelle 47: Mg in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Zwischenernte 2003	160
Tabelle 48: Mg in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Haupternte 2003	161
Tabelle 49: P in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Zwischenernte 2003	162
Tabelle 50: P in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Haupternte 2003	163
Tabelle 51: Cd in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Zwischenernte 2003	164
Tabelle 52: Cd in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Haupternte 2003	165

Tabelle 53: Cu in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Zwischenernte 2003	166
Tabelle 54: Cu in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Haupternte 2003.....	167
Tabelle 55: Zn in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Zwischenernte 2003	168
Tabelle 56: Zn in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Haupternte 2003.....	169
Tabelle 57: Nichtlineare Regressionsfunktion vom Mais im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden Malchow 2001	170
Tabelle 58: Nichtlineare Regressionsfunktion vom Mais, im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden Malchow 2002	171
Tabelle 59: Nichtlineare Regressionsfunktion vom Mais im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren 2001.....	172
Tabelle 60: Nichtlineare Regressionsfunktion vom Mais im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren 2002.....	173
Tabelle 61: Nichtlineare Regressionsfunktion der Sonnenblume im Gefäßversuch, Referenzboden BBA 2001	174
Tabelle 62: Nichtlineare Regressionsfunktion der Sonnenblume im Gefäßversuch, Referenzboden BBA 2002	175
Tabelle 63: Nichtlineare Regressionsfunktion der Sonnenblume im Gefäßversuch, hoch belasteter Boden BBA 2001	176
Tabelle 64: Nichtlineare Regressionsfunktion der Sonnenblume im Gefäßversuch, hoch belasteter Boden BBA 2002	177
Tabelle 65: Nichtlineare Regressionsfunktion der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, Referenzboden BBA, 2003	178
Tabelle 66: Nichtlineare Regressionsfunktion der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden 2003	179
Tabelle 67: Nichtlineare Regressionsfunktion der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, 2003	180
Tabelle 68: Nährelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch BBA, Zwischenernte 2000	181
Tabelle 69: Nährelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch BBA, Zwischenernte 2001	181
Tabelle 70: Nährelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch BBA, Zwischenernte 2002	181
Tabelle 71: Schadelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch, Zwischenernte 2000.....	182
Tabelle 72: Schadelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch, Zwischenernte 2001	182

Tabelle 73: Schadelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch, Zwischenernte 2002.....	182
Tabelle 74: Nährelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch BBA, Haupternte 2000	183
Tabelle 75: Nährelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch BBA, Haupternte 2001	183
Tabelle 76: Nährelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch BBA, Haupternte 2002	183
Tabelle 77: Schadelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch, Haupternte 2000.....	184
Tabelle 78: Schadelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch, Haupternte 2001.....	184
Tabelle 79: Schadelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch, Haupternte 2002.....	184
Tabelle 80: Nährelemente in mg/kg TM Weidelgras im Feldversuch, 2000	185
Tabelle 81: Nährelemente in mg/kg TM Weidelgras im Feldversuch, 2001	185
Tabelle 82: Nährelemente in mg/kg TM Weidelgras im Feldversuch, 2002	185
Tabelle 83: Schadelemente in mg/kg TM Weidelgras im Feldversuch, 2000	186
Tabelle 84: Schadelemente in mg/kg TM Weidelgras im Feldversuch, 2001	186
Tabelle 85: Schadelemente in mg/kg TM Weidelgras im Feldversuch, 2002	186

Tabelle 1: Nährelemente in mg/kg TM Mais im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden Mal chow, 2001

Variante	Ca				K				Mg				P			
	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel
Kontrolle	15101a	2674a	63	4563	5384b	20280b	3913	3673b	5525a	1011a	1500	1028	594	455b	4026	1458
Bakterien	10859c	1685b	57	4467	13046a	36484a	4295	8696a	2573b	512b	1491	895	664	556ab	4130	1279
AM	14715ab	2124ab	53	4337	8667ab	30650a	3920	6382ab	4403a	631b	1353	1092	702	629a	3726	1178
AMB	13194b	1765b	54	4854	10058ab	29070a	4420	4883b	2932b	625b	1459	1163	856	539ab	4238	1167

T

Tabelle 2: Nährelemente in mg/kg TM Mais im Mitscherlich- Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden Malchow, 2002

Variante	Ca				K				Mg				P			
	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel
Kontrolle	7047ab	1380ab	146	3803	13303ab	18205b	5129	5592	1753ab	583	1169b	663a	640	696	4215b	1200
Bakterien	6272b	1207ab	107	3331	15150a	24845a	5021	6022	1276b	492	1136b	493b	585	691	4283ab	1025
AM	7627a	1483a	100	3737	13488ab	20905ab	5443	5676	1691ab	616	1392a	652a	604	667	4865a	1139
AMB	6558b	1151b	116	3836	11678b	17978b	4820	7231	1927a	598	1204b	621a	791	784	4183b	1403

Tabelle 3: Nährelemente in mg/kg TM Mais im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, 2001

Variante	Ca				K				Mg				P			
	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel
Kontrolle	20505a	5874ab	63b	9210	7144b	15154b	3810	3399b	3724b	1364b	1394ab	1160ab	1751	1213	3873ab	2220
Bakterien	16800b	4917b	62b	13933	14404a	22490a	4197	5479a	2010b	740c	1745a	1187a	1485	1043	4618a	2720
AM	23710a	7625a	84a	11118	4950bc	9101b	3879	1485c	6028a	1602ab	1333ab	914b	2712	508	3894ab	2050
AMB	20895a	6427ab	89a	10162	3312c	10096b	3650	1374c	6658a	1879a	1268b	916b	2435	760	3715b	2508

Tabelle 4: Nährelemente in mg/kg TM Mais im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, 2002

Variante	Ca				K				Mg				P			
	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel
Kontrolle	13175	4552	129	7939	13243	19578	5223	3255	2425	1454	1365	610	813	588	4905	1658
Bakterien	12303	4077	115	7952	14375	23085	5538	3759	2348	1396	1326	659	892	852	4975	1905
AM	12437	4797	136	6959	14895	22693	5160	4464	2291	1682	1365	635	727	454	4663	1340
AMB	12468	4473	151	7728	13658	20503	5221	3397	2603	1543	1408	644	627	315	4578	1703

Tabelle 5: Schadelemente in mg/kg TM Mais im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden Malchow, 2001

Variante	Cd				Cu				Ni				Zn			
	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel
Kontrolle	0,60	0,29a	0,02	1,76	18,5	3,2b	3,3	54,3	1,10ab	1,05	0,09	7,95	300	148a	54	166
Bakterien	0,57	0,18ab	0,01	1,41	13,5	3,6ab	2,9	55,3	1,53a	0,85	0,16	7,98	198	94b	51	145
AM	0,72	0,16b	0,02	1,36	20,8	4,0ab	2,7	39,3	0,90b	0,83	0,19	7,98	309	139ab	54	145
AMB	0,67	0,16b	0,02	1,35	19,8	4,1a	2,9	43,3	0,73b	1,35	0,15	7,25	273	128ab	56	141

Tabelle 6: Schadelemente in mg/kg TM Mais im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden Malchow, 2002

Variante	Cd				Cu				Ni				Zn			
	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel
Kontrolle	0,16	0,30	0,20	2,06a	6,3	2,5	2,9	51,3a	1,03	0,40	0,40ab	8,70	59b	66	36b	120a
Bakterien	0,00	0,13	0,09	1,22b	5,7	2,5	2,6	37,8b	1,23	0,48	0,36ab	6,13	53b	54	32b	86b
AM	0,02	0,15	0,07	1,32b	6,4	2,5	2,9	41,8ab	0,93	0,55	0,53a	8,95	78a	64	43a	102ab
AMB	0,03	0,17	0,08	1,58ab	6,3	2,5	2,8	42,3ab	1,03	0,35	0,20b	6,35	94a	66	37ab	100ab

Tabelle 7: Schadelemente in mg/kg TM Mais im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, 2001

Variante	Cd				Cu				Ni				Zn			
	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel
Kontrolle	27,85ab	5,16	0,22ab	40,90	42,00a	7,10ab	3,70ab	399	1,95ab	2,35	3,33	95,0	1422a	969a	79	1172
Bakterien	33,63a	4,81	0,29a	65,45	32,25b	5,95b	3,40b	480	1,70b	1,95	3,65	97,3	1062b	714b	89	1428
AM	22,15b	6,26	0,20b	47,65	35,00ab	6,93ab	3,68ab	427	2,45a	3,08	4,13	120,8	1538a	862ab	75	1318
AMB	23,55b	5,95	0,21ab	51,65	36,50ab	8,50a	4,58a	485	1,83b	2,83	3,10	104,5	1453a	938ab	70	1331

Tabelle 8: Schadelemente in mg/kg TM Mais im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, 2002

Variante	Cd				Cu				Ni				Zn			
	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel
Kontrolle	13,18	4,81	0,30	310	22,23ab	5,28	4,45	241	1,50	1,83	4,43	68,5	790	824	78	821
Bakterien	15,28	4,82	0,31	383	21,18b	6,00	4,55	252	1,48	1,60	3,90	59,3	748	688	81	886
AM	18,17	6,74	0,35	303	26,38a	6,15	4,73	202	1,73	2,18	4,25	50,8	868	847	90	677
AMB	16,93	6,69	0,34	343	23,28ab	5,85	4,58	269	1,48	1,25	3,53	56,5	813	767	86	776

Tabelle 9: Nährelemente in mg/kg TM Weidelgras im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden Malchow, 2001

Variante	Ca				K				Mg				P			
	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel
Kontrolle	6503	8092b	9431	9246	45525b	50509	40985	3223b	2058b	3658	3116	1220	3803b	4586	5751	2229
Bakterien	6853	8905ab	10680	8783	53159a	51551	39724	3214b	2197ab	3440	3093	1253	4419a	4569	5753	1905
AM	6856	8736ab	9177	8939	51145a	50214	39516	4754a	2386a	3526	3063	1169	4280a	4711	5761	2251
AMB	6306	9250a	10530	9373	49616ab	5199	38211	2875b	2215ab	3572	3294	1221	4094ab	4635	5309	2104

Tabelle 10: Nährelemente in mg/kg TM Weidelgras im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden Malchow, 2002

	Ca				K				Mg				P			
Variante	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel
Kontrolle	8541	8045ab	11383	7992	40378a	29460	27025	1742	3606	2739	3082	709	3768	3940	5068ab	1788
Bakterien	8194	8097a	9697	7808	35215b	27415	22458	1467	3694	2937	3186	691	3850	4040	4178b	2070
AM	7692	7540ab	10913	7655	36005b	25818	24985	1657	3619	2844	3349	661	3630	4138	4968ab	1728
AMB	7663	7357b	11492	7524	34248b	21153	24993	1979	3569	2758	3595	623	3693	3700	5990a	2118

Tabelle 11: Nährelemente in mg/kg TM Weidelgras im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, 2001

	Ca				K				Mg				P			
Variante	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel
Kontrolle	11645a	13558a	11729	12408	48048b	42316	40016	1691b	2816a	3124b	3120	1069b	4389c	4805b	6584ab	3855
Bakterien	9609b	12134ab	10315	12070	54518a	51298	44678	3434a	2919a	3713a	2728	1517a	5551a	6073a	5434b	5720
AM	8616b	10694b	11271	10519	46060b	48700	41648	1849b	2345b	3920a	2835	1053b	4540bc	6248a	7771a	3933
AMB	9173b	10786b	10886	10041	49414b	47216	31786	2571ab	3008a	3673a	2798	1157ab	5120ab	6498a	6628ab	4070

Tabelle 12: Nährelemente in mg/kg TM Weidelgras im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, 2002

	Ca				K				Mg				P			
Variante	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel
Kontrolle	9319a	9420	13695	6988	26088c	9835b	8864b	1382	2939b	3606a	2629	781	5518a	5485	5870	2353
Bakterien	7972bc	8047	12725	6640	29380c	11808b	10102b	1425	2922b	3405a	2729	803	5138ab	5618	5675	2848
AM	8852ab	8190	13878	7144	37068b	11789b	11693b	1612	2882b	3392a	2931	785	4980bc	5020	4905	2823
AMB	7306c	7950	12765	5815	48148a	29945a	25640a	2104	3619a	2570b	2942	667	4545c	5013	5340	2655

Tabelle 13: Schadelemente in mg/kg TM Weidelgras im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden Malchow, 2001

	Cd				Cu				Ni				Zn			
Variante	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel
Kontrolle	0,49	0,69	1,08	6,93	10,75b	12,75a	8,75a	101a	3,78	4,15ab	4,75	16,50	96ab	142	90ab	346
Bakterien	0,57	0,57	1,00	6,48	11,50ab	10,75c	7,75b	113a	5,23	3,80ab	4,13	13,50	102a	130	82b	377
AM	0,50	0,54	0,99	6,30	12,25a	12,50ab	8,75a	84b	4,53	4,98a	4,15	11,25	91ab	131	105a	346
AMB	0,50	0,65	1,08	7,18	11,75ab	11,00bc	8,00ab	105a	3,73	3,40b	4,63	16,75	88b	124	94ab	353

Tabelle 14: Schadelemente in mg/kg TM Weidelgras im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden Malchow, 2002

	Cd				Cu				Ni				Zn			
Variante	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel
Kontrolle	0,78	0,61ab	1,02a	2,90	16,0	9,18	6,74a	77	3,45ab	2,13	2,08a	12,00	124	86	66	323
Bakterien	0,60	0,48b	0,68c	2,75	15,5	8,88	4,96b	64	3,6a	2,11	1,43b	8,50	126	83	53	299
AM	0,78	0,64a	0,78bc	3,93	14,5	8,85	5,05b	66	2,67ab	1,90	1,46b	10,00	109	85	52	342
AMB	0,68	0,52ab	0,92ab	4,15	14,3	7,18	5,79b	77	2,45b	1,49	1,78ab	9,50	114	72	58	272

Tabelle 15: Schadelemente in mg/kg TM Weidelgras im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, 2001

	Cd				Cu				Ni				Zn			
Variante	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel
Kontrolle	8,81a	8,42	10,98	84	21,55ab	18,50	16,00a	579	25,35b	25,00ab	28,00	83	477ab	435b	379ab	1792
Bakterien	7,14ab	8,42	12,32	82	24,28a	18,25	11,50b	621	27,88a	28,75a	24,00	73	496a	556a	404a	1878
AM	6,43b	11,03	13,63	88	17,90b	17,00	10,25b	514	18,48c	23,50b	23,00	60	323c	408b	267c	1393
AMB	7,54ab	9,10	14,30	77	20,88ab	15,50	10,00b	425	23,53b	24,75ab	24,25	72	425b	400b	292bc	1370

Tabelle 16: Schadelemente in mg/kg TM Weidelgras im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, 2002

	Cd				Cu				Ni				Zn			
Variante	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Wurzel
Kontrolle	6,59b	6,44b	11,5b	32	22,25b	23,50a	11,25	202	24,00a	25,0a	19,0a	49	499a	498a	421a	1259ab
Bakterien	5,93b	5,49c	11,0b	43	20,75b	21,50ab	9,50	259	21,00b	20,75b	18,0a	52	449b	433b	386a	1355a
AM	7,57a	6,72ab	15,25a	47	20,50b	20,25b	10,25	230	18,25c	17,5b	17,0a	50	401c	385b	351a	1343a
AMB	6,21b	7,16a	17,75a	49	24,75a	13,75c	9,25	220	14,50d	11,15c	13,5b	39	368c	245c	260b	941b

Tabelle 17: Nährelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Gefäßversuch Referenzboden BBA, 2001

Variante	Ca		K		Mg		P	
	Oberird. Pflanze	Wurzel	Oberird. Pflanze	Wurzel	Oberird. Pflanze	Wurzel	Oberird. Pflanze	Wurzel
Kontrolle	26201bc	14426	28369b	2699a	6575a	2702	2626c	1905
Bakterien	34272a	13236	39597a	1640b	6095ab	1385	3812a	2118
AM	25059c	12059	26637b	2565ab	6405ab	2555	2602c	1698
AMB	33468ab	13386	35251ab	2361ab	5659b	2034	3220b	1848

Tabelle 18: Nährelemente in mg/kg TM der Sonnenblume Referenzboden BBA, 2002

Variante	Ca			K			Mg			P		
	Oberird. Pflanze	Blüten-korb	Wurzel	Oberird. Pflanze	Blüten-korb	Wurzel	Oberird. Pflanze	Blüten-korb	Wurzel	Oberird. Pflanze	Blüten-korb	Wurzel
Kontrolle	20608	20477	14603	17435	29997	1975	6941	3095b	2177	2070	5523	1980
Bakterien	22975	22977	14123	18983	31110	1459	6997	3623a	1850	2300	5407	1540
AM	23748	19367	13450	20620	29583	1705	6874	2857b	2085	2083	5690	1560
AMB	23338	23087	12923	19183	31890	1487	6690	3522a	1646	2138	5810	1480

Tabelle 19: Nährelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Gefäßversuch hoch belasteter Boden BBA, 2001

Variante	Ca		K		Mg		P	
	Oberird. Pflanze	Wurzel	Oberird. Pflanze	Wurzel	Oberird. Pflanze	Wurzel	Oberird. Pflanze	Wurzel
Kontrolle	30114	10147	18617ab	2240	10780a	2163b	1824	1079
Bakterien	27952	14193	18416ab	1121	10634a	2212ab	1677	1012
AM	29290	13309	21390a	1365	8775b	2884ab	1838	934
AMB	24992	16078	15402b	1930	9750ab	4255a	1686	1281

Tabelle 20: Nährelemente in mg/kg TM der Sonnenblume, im Gefäßversuch hoch belasteter Boden BBA, 2002

Variante	Ca			K			Mg			P		
	Oberird. Pflanze	Blüten-korb	Wurzel	Oberird. Pflanze	Blüten-korb	Wurzel	Oberird. Pflanze	Blüten-korb	Wurzel	Oberird. Pflanze	Blüten-korb	Wurzel
Kontrolle	24013	22917	11670	12628	30757	1044	12260	6763	2080	1713	5407	968
Bakterien	22025	24097	9796	12048	29657	1040	11710	6730	2214	1818	5213	896
AM	20310	20673	10504	9829	32027	852	11378	5906	1762	1680	5697	801
AMB	22725	22600	9278	11868	32343	1009	11943	7258	1986	1660	5570	807

Tabelle 21: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Gefäßversuch Referenzboden BBA, 2001

Variante	Cd		Cu		Ni		Zn	
	Oberird. Pflanze	Wurzel	Oberird. Pflanze	Wurzel	Oberird. Pflanze	Wurzel	Oberird. Pflanze	Wurzel
Kontrolle	0,98b	3,55a	5,54b	20,0a	0,52	7,36a	80,6b	166,4a
Bakterien	1,31a	1,88b	7,92a	12,6b	0,60	3,60b	114,2ab	106,4b
AM	0,98b	2,28b	6,02b	13,6b	0,52	4,52ab	86,2b	104,0b
AMB	1,27ab	2,50ab	7,76a	18,4a	0,54	7,16a	136,4a	160,2a

Tabelle 22: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Gefäßversuch Referenzboden BBA, 2002

Variante	Cd			Cu			Ni			Zn		
	Oberird. Pflanze	Blüten-korb	Wurzel	Oberird. Pflanze	Blüten-korb	Wurzel	Oberird. Pflanze	Blüten-korb	Wurzel	Oberird. Pflanze	Blüten-korb	Wurzel
Kontrolle	0.75	0.79	2.24	6.25	9.67	19.33	0.60a	0.87	4.40	63.33	57.67	89.33
Bakterien	0.65	0.66	1.97	4.88	9.00	17.67	0.45a	0.83	2.67	63.25	55.33	74.00
AM	0.66	0.63	1.78	5.00	10.67	17.67	0.48a	0.87	4.00	60.25	57.67	83.67
AMB	0.65	0.65	1.60	4.83	12.67	14.33	0.47a	0.95	2.57	62.25	63.00	68.33

Tabelle 23: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Gefäßversuch hoch belasteter Boden BBA, 2001

Variante	Cd		Cu		Ni		Zn	
	Oberird. Pflanze	Wurzel	Oberird. Pflanze	Wurzel	Oberird. Pflanze	Wurzel	Oberird. Pflanze	Wurzel
Kontrolle	14.86	30.8b	10.68	13.52b	0.54	2.22b	86.00b	47.6b
Bakterien	12.88	41.0b	10.10	16.90b	0.64	3.56b	84.60b	77.0ab
AM	12.52	46.8b	10.20	17.56ab	0.58	4.10ab	144.40a	83.2ab
AMB	11.08	121.0a	9.74	25.72a	0.52	6.88a	81.40b	98.0a

Tabelle 24: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Gefäßversuch hoch belasteter Boden BBA, 2002

Variante	Cd			Cu			Ni			Zn		
	Oberird. Pflanze	Blüten-korb	Wurzel	Oberird. Pflanze	Blüten-korb	Wurzel	Oberird. Pflanze	Blüten-korb	Wurzel	Oberird. Pflanze	Blüten-korb	Wurzel
Kontrolle	8.18	4.92	25.33	11.50	23.33	22.00	0.30	1.17	3.33	67.00	71.67	59.67
Bakterien	6.86	5.39	16.33	11.00	20.67	15.33	0.18	0.97	2.10	63.25	68.00	45.33
AM	6.23	4.72	24.33	9.50	21.33	20.00	0.25	1.10	2.97	65.00	68.67	49.00
AMB	7.01	4.61	15.33	10.50	21.00	14.67	0.27	0.90	1.43	67.25	71.33	42.33

Tabelle 25: Nährelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, Referenzboden BBA, Zwischenernte 2003

Variante	Ca		K		Mg		P	
	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel
Kontrolle	12253a	5204	7814a	3598	9451	4175	2930a	3168
Bakterien	10693b	5398	6563b	3210	8403	3870	2455b	2704
AM	10757b	5605	7246ab	3692	8906	3949	2523b	2757
AMB	10086b	5446	6950ab	3546	8308	3990	2335b	2820

Tabelle 26: Nährelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden BBA, Zwischenernte 2003

Variante	Ca		K		Mg		P	
	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel
Kontrolle	12911	5673	7384	5288a	6415	3788	2209	2914
Bakterien	12519	5286	7082	5124a	6368	3769	2214	3028
AM	12578	5529	6923	4003b	7463	3763	2255	2599
AMB	12276	5212	7146	4501ab	6740	3824	2204	2775

Tabelle 27: Nährelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, Zwischenernte 2003

Variante	Ca		K		Mg		P	
	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel
Kontrolle	14221a	8872a	3829	2203b	8190a	5050a	1529a	1484b
Bakterien	13991a	7613b	4758	2527ab	7659ab	4029b	1714a	1688a
AM	13439ab	6300c	3806	2494ab	7177b	3361c	1154b	1479b
AMB	12310b	6489c	3986	2688a	7096b	3291c	1129b	1660a

Tabelle 28: Nährelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, Referenzboden BBA, Haupternte 2003

Variante	Ca				K				Mg				P			
	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel
Kontrolle	6319	2863ab	n.n.	6814b	2151	9950	103	1639	4483	3289	n.n.	2810	990	6913	21,27	1896
Bakterien	6095	2928a	n.n.	7736ab	2033	10059	38	1610	4477	3049	n.n.	2924	953	6676	17,35	1918
AM	6736	2832ab	n.n.	8305a	1954	9904	16	1767	5107	3058	n.n.	2912	961	6815	21,10	2054
AMB	6146	2629b	n.n.	8357a	1948	9439	12	1741	4787	2970	n.n.	2863	1004	6775	9,62	1960

Tabelle 29: Nährelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden BBA, Haupternte 2003

Variante	Ca				K				Mg				P			
	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel
Kontrolle	7908	3049	n.n.	7090	4570	10030ab	3,17	4938	4378	3188a	n.n.	1715b	1374	7760a	10,50	2065
Bakterien	7299	3036	n.n.	7820	4352	10280a	5,17	4513	4049	2921bc	n.n.	1794ab	1286	7305a	13,67	2244
AM	7921	2977	n.n.	7631	3850	9497b	3,50	3722	4816	3039ab	n.n.	2187a	1155	7436a	31,17	2026
AMB	7645	2868	n.n.	6697	3669	10309a	2,67	3577	4414	2748c	n.n.	2146a	1115	6338b	20,33	1876

Tabelle 30: Nährelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, Haupternte 2003

Variante	Ca				K				Mg				P			
	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel
Kontrolle	14251	n.n.	n.n.	7777	21596a	n.n.	n.n.	15742a	5575a	n.n.	n.n.	2248a	1064a	n.n.	n.n.	1459ab
Bakterien	11780	n.n.	n.n.	8402	19393ab	n.n.	n.n.	16863a	4954ab	n.n.	n.n.	2349a	936a	n.n.	n.n.	1785a
AM	12331	3767	n.n.	9110	17567ab	8593	n.n.	8251b	4604b	3048	n.n.	1747b	639b	6255	n.n.	1484ab
AMB	12814	4458	n.n.	7963	14103c	8345	n.n.	5179b	4314b	2420	n.n.	1572b	551b	6023	n.n.	1283b

Tabelle 31: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, Referenzboden BBA, Zwischenernte 2003

Variante	Cd		Cu		Ni		Zn	
	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel
Kontrolle	0.21	0.48	5.75a	12.50	0.44	1.60	91	75
Bakterien	0.18	0.40	5.38ab	11.75	0.30	1.85	90	73
AM	0.18	0.43	5.25ab	12.50	0.39	2.37	97	70
AMB	0.16	0.39	4.75b	12.13	0.33	2.39	87	67

Tabelle 32: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden BBA, Zwischenernte 2003

Variante	Cd		Cu		Ni		Zn	
	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel
Kontrolle	2.60	6.60	7.50	37.5	0.35	2.39	109	85
Bakterien	2.50	5.8	7.25	35.4	0.40	1.98	106	78
AM	2.26	5.9	7.88	36.4	0.45	2.44	106	75
AMB	2.25	5.3	7.25	34.0	0.28	2.15	111	74

Tabelle 33: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, Zwischenernte 2003

Variante	Cd		Cu		Ni		Zn	
	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel
Kontrolle	12.14a	97ab	10.88	81	19.3a	71.1	1731a	957
Bakterien	12.66a	115a	11.00	89	16.8a	84.8	1564ab	1059
AM	9.71b	78b	9.50	83	10.6b	74.5	1399bc	999
AMB	9.03b	91b	9.50	89	9.0b	72.8	1276c	940

Tabelle 34: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, Referenzboden BBA, Zwischenernte 2003

Variante	Cd		Cu		Ni		Zn	
	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel
Kontrolle	0.21	0.48	5.75a	12.50	0.44	1.60	91	75
Bakterien	0.18	0.40	5.38ab	11.75	0.30	1.85	90	73
AM	0.18	0.43	5.25ab	12.50	0.39	2.37	97	70
AMB	0.16	0.39	4.75b	12.13	0.33	2.39	87	67

Tabelle 35: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden BBA, Zwischenernte 2003

Variante	Cd		Cu		Ni		Zn	
	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel
Kontrolle	2.60	6.60	7.50	37.5	0.35	2.39	109	85
Bakterien	2.50	5.8	7.25	35.4	0.40	1.98	106	78
AM	2.26	5.9	7.88	36.4	0.45	2.44	106	75
AMB	2.25	5.3	7.25	34.0	0.28	2.15	111	74

Tabelle 36: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, Zwischenernte 2003

Variante	Cd		Cu		Ni		Zn	
	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel	Stängel	Wurzel
Kontrolle	12.14a	97ab	10.88	81	19.3a	71.1	1731a	957
Bakterien	12.66a	115a	11.00	89	16.8a	84.8	1564ab	1059
AM	9.71b	78b	9.50	83	10.6b	74.5	1399bc	999
AMB	9.03b	91b	9.50	89	9.0b	72.8	1276c	940

Tabelle 37: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, Referenzboden BBA, Haupternte 2003

Variante	Cd				Cu				Ni				Zn			
	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel
Kontrolle	0,14	0,11	0,0046	0,44	2,9	12,5	1,86	15,4	1,19	1,3	n.n.	3,05	60,5	66,6	3,60	76,5
Bakterien	0,12	0,14	0,0017	0,46	2,5	11,0	0,95	16,1	0,20	1,0	n.n.	3,75	53,3	62,6	2,18	84,4
AM	0,11	0,08	0,002	0,50	2,5	11,0	2,25	18,5	0,30	1,3	n.n.	4,08	56,9	63,0	1,85	84,
AMB	0,10	0,07	0,0018	0,53	2,9	10,8	1,21	18,0	0,09	1,1	n.n.	4,23	48,8	65,8	2,80	80,6a

Tabelle 38: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden BBA, Haupternte 2003

Variante	Cd				Cu				Ni				Zn			
	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel
Kontrolle	2,26a	1,22	0,010	3,28	3,62	17,4a	1,67	37,9	0,34	2,39	n.n.	2,13	78	72a	11,83	71
Bakterien	2,03a	1,1	0,007	3,46	3,70	15,9ab	1,83	41,1	0,29	2,13	n.n.	2,58	66	67ab	8,50	76
AM	1,92b	1,12a	0,016	3,46	4,40	17,0ab	1,57	52,8	0,33	2,38	n.n.	3,31	73	72a	4,00	74
AMB	1,84b	1,10	0,018	3,24	4,01	15,0b	1,43	46,6	0,34	2,54	n.n.	2,66	71	63b	7,50	71

Tabelle 39: Schadelemente in mg/kg TM der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, Haupternte 2003

Variante	Cd				Cu				Ni				Zn			
	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel	Stängel	Pressk.	Öl	Wurzel
Kontrolle	12,82c	n.n.	n.n.	33,0b	6,66	n.n.	n.n.	48,8b	11,8a	n.n.	n.n.	22,9b	928ab	n.n.	n.n.	566
Bakterien	10,68bc	n.n.	n.n.	39,4b	7,02	n.n.	n.n.	6,6b	10,2ab	n.n.	n.n.	27,4b	785b	n.n.	n.n.	633
AM	14,56b	1,38	0,02	84,5a	7,35	19,68	1,4	131,9a	8,4b	10,29	n.n.	47,0a	983a	98	5,24	809
AMB	18,20a	2,31	0,03	85,2a	8,20	19,90	1,7	122,6a	9,3ab	16,05	n.n.	47,0a	1088a	137	7,83	804

Tabelle 40: Korrelationen zwischen pH-Wert in der Bodenlösung und den Schad- und Nährelementen im Referenzboden BBA, 2003

Referenzboden BBA							
	pH/Cd	pH/Cu	pH/ Zn	pH/Ca	pH/K	pH/Mg	pH/P
Kontrolle	-0,805**	-0,817**	-0,943**	-0,838**	-0,471*	-0,878**	-0,920**
Bakterien	-0,740**	-0,736**	-0,890**	-0,758**	-0,268	-0,805**	-0,885**
AM	-0,830**	-0,790**	-0,900**	-0,739**	-0,439*	-0,803**	-0,919**
AMB	-0,678**	-0,828**	-0,915**	-0,782**	-0,420*	-0,838**	-0,928**

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

Tabelle 41: Korrelationen zwischen pH-Wert in der Bodenlösung und den Schad- und Nährelementen im mäßig belasteten Boden BBA, 2003

mäßig belasteter Boden BBA							
	pH/Cd	pH/Cu	pH/ Zn	pH/Ca	pH/K	pH/Mg	pH/P
Kontrolle	-0,744**	-0,626**	-0,875**	-0,661**	0,395	-0,731**	-0,827**
Bakterien	-0,816**	-0,705**	-0,932**	-0,719**	-0,715**	-0,781**	-0,878**
AM	-0,874**	-0,762**	-0,939**	-0,689**	-0,631**	-0,807**	-0,879**
AMB	-0,899**	-0,745**	-0,942**	-0,816**	-0,770**	-0,873**	-0,911**

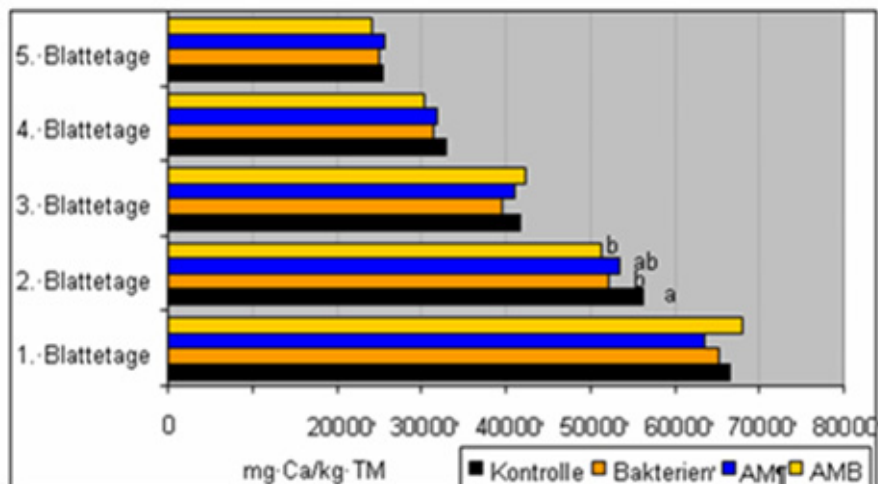
** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

Tabelle 42: Korrelationen zwischen pH-Wert in der Bodenlösung und den Schad- und Nährelementen im hoch belasteten Boden Großbeeren, 2003

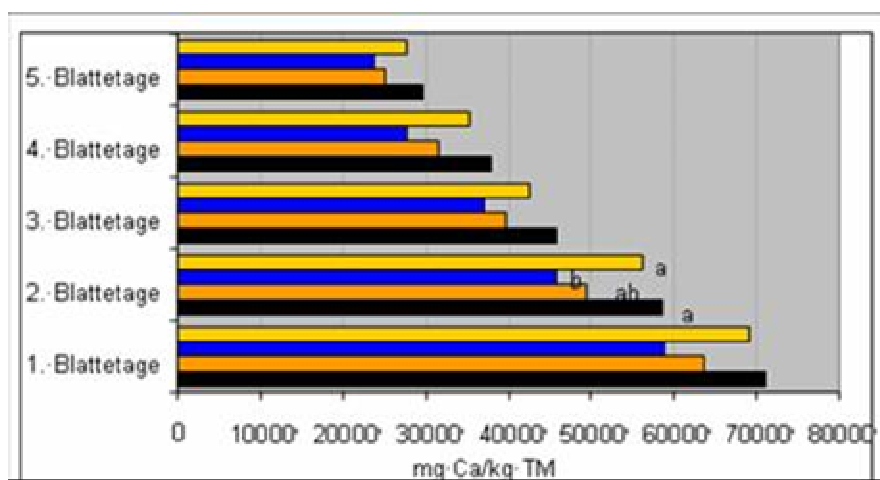
hoch belasteter Boden Großbeeren							
	pH/Cd	pH/Cu	pH/ Zn	pH/Ca	pH/K	pH/Mg	pH/P
Kontrolle	-0,161	-0,092	-0,041	-0,075	-0,322	-0,086	-0,374
Bakterien	0,026	-0,226	-0,110	-0,263	-0,017	-0,212	-0,594**
AM	0,007	-0,049	-0,057	-0,230	-0,118	-0,211	-0,625**
AMB	0,194	-0,305	-0,179	-0,214	0,019	-0,365	-0,606**

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

Referenzboden BBA



Mäßig belasteter Boden BBA



Hoch belasteter Boden Großbeeren

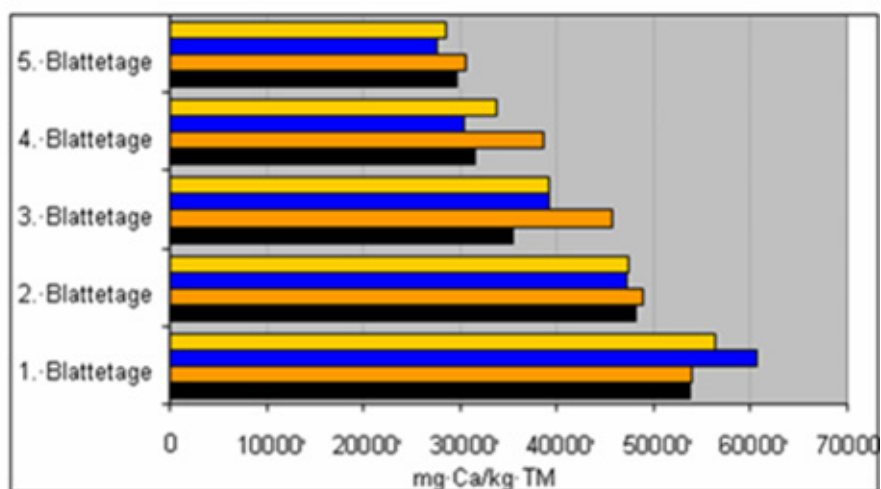
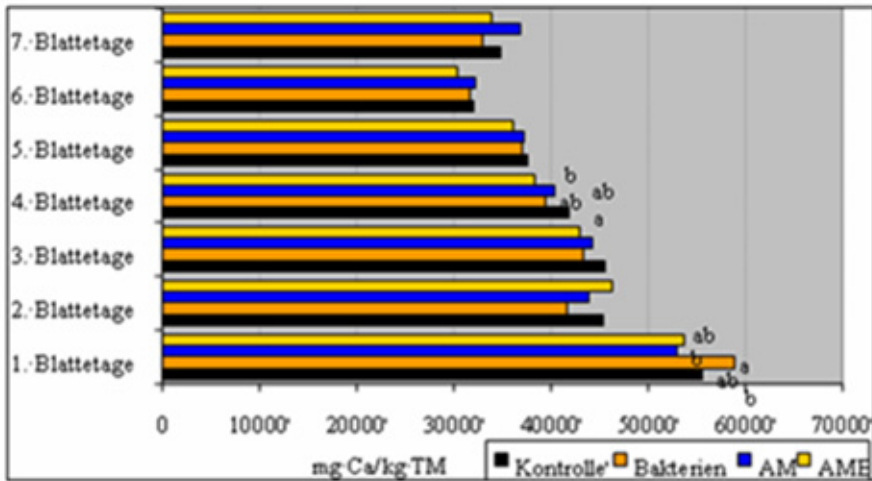
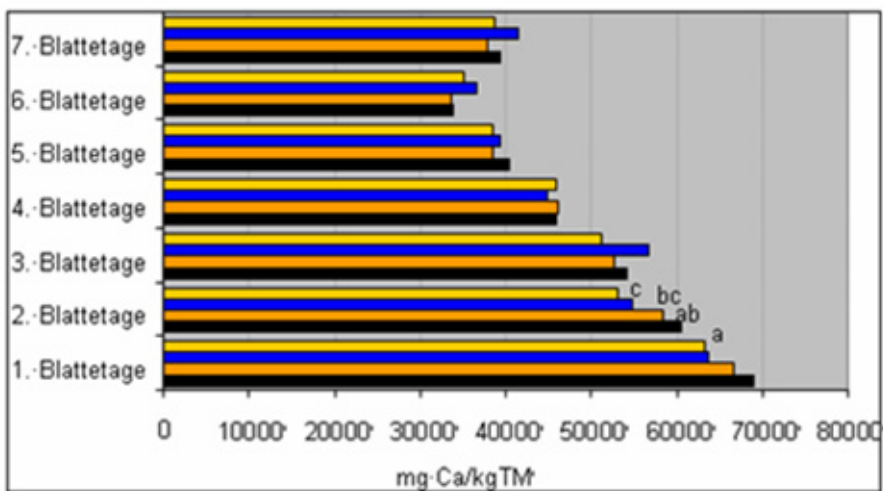


Tabelle 43: Ca in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Zwischenernte 2003

Referenzboden BBA



Mäßig belasteter Boden BBA



Hoch belasteter Boden Großbeeren

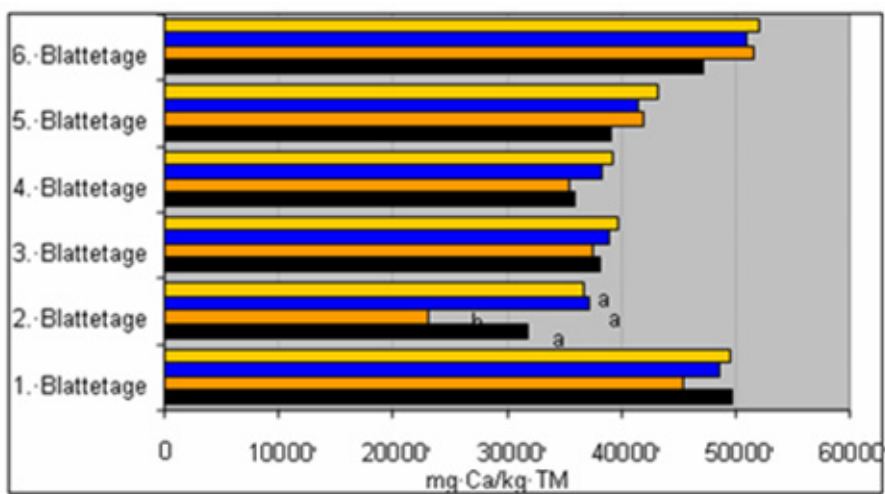
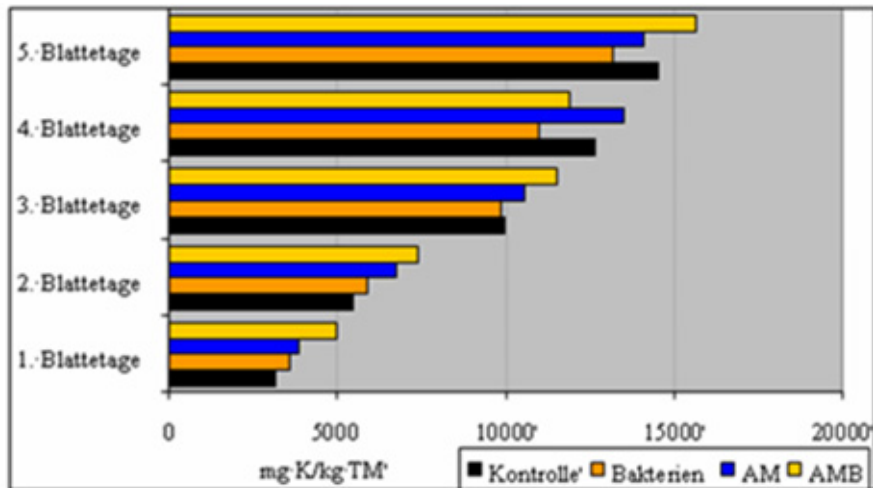
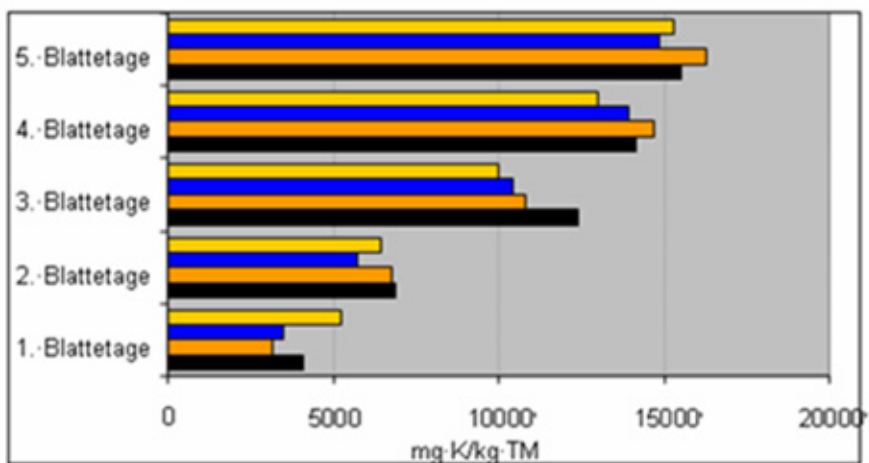


Tabelle 44: Ca in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Haupternte 2003

Referenzboden BBA



Mäßig belasteter Boden BBA



Hoch belasteter Boden Großbeeren

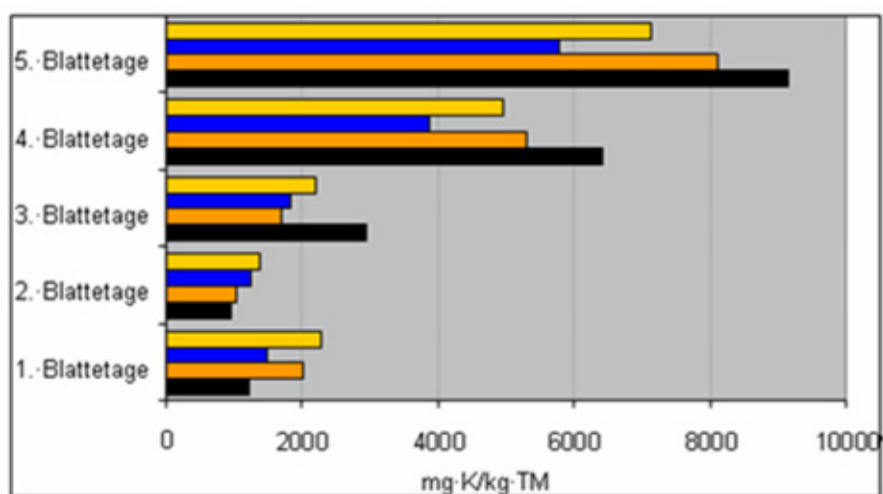
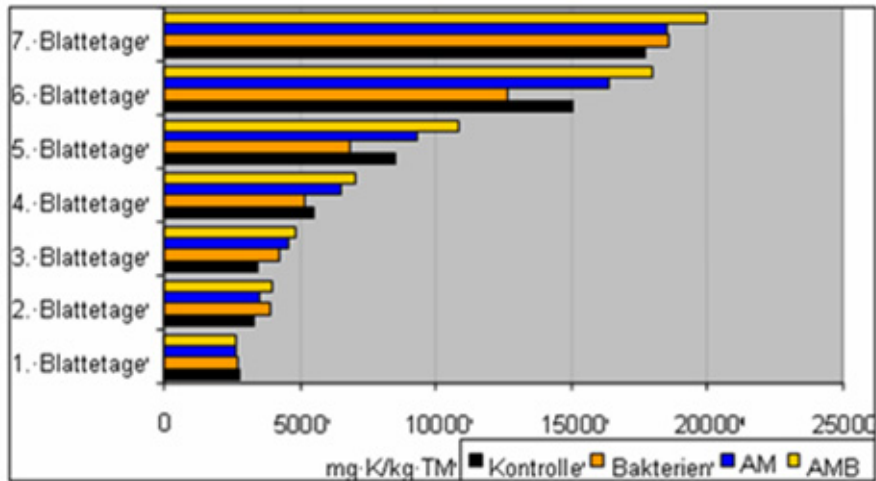
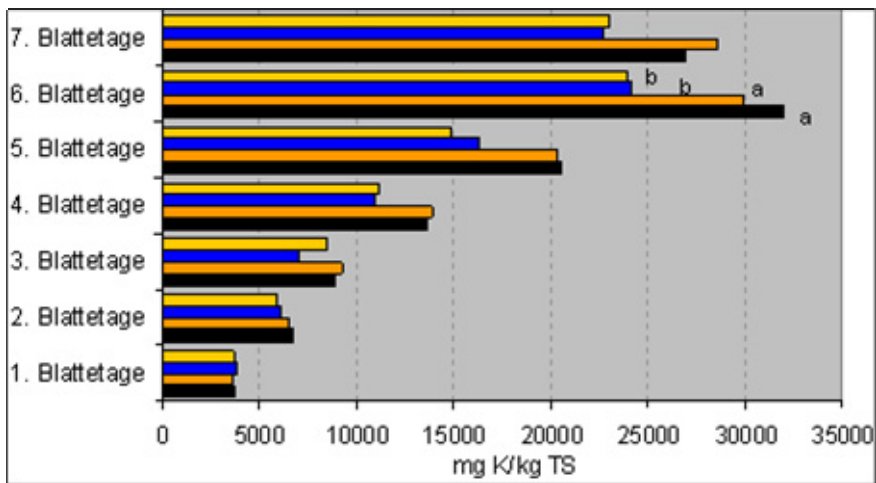


Tabelle 45: K in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Zwischenernte 2003

Referenzboden BBA



Mäßig belasteter Boden BBA



Hoch belasteter Boden Großbeeren

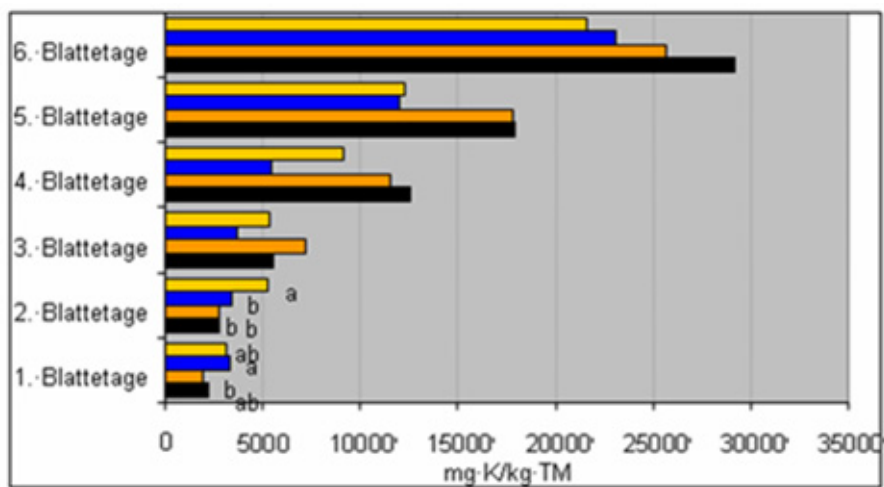
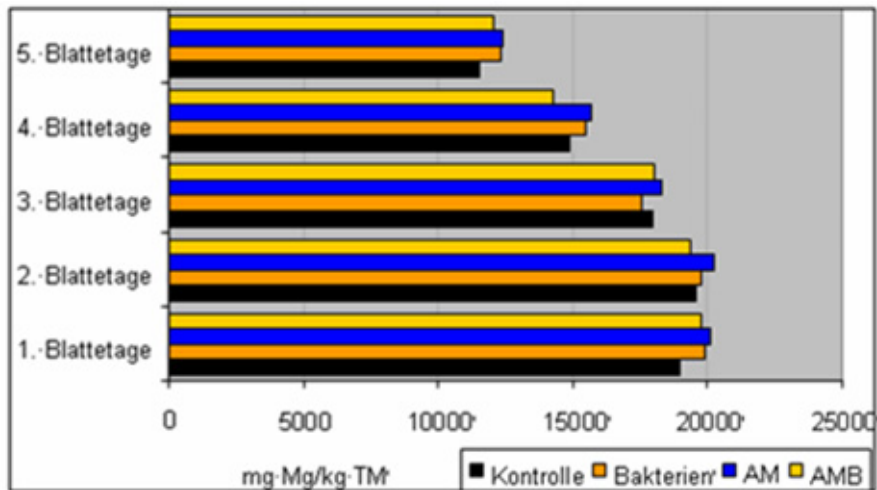
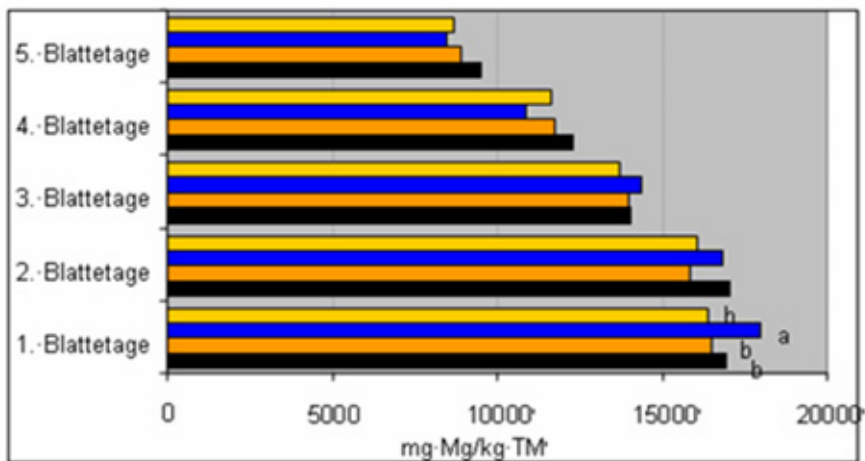


Tabelle 46: K in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Haupternte 2003

Referenzboden BBA



Mäßig belasteter Boden BBA



Hoch belasteter Boden Großbeeren

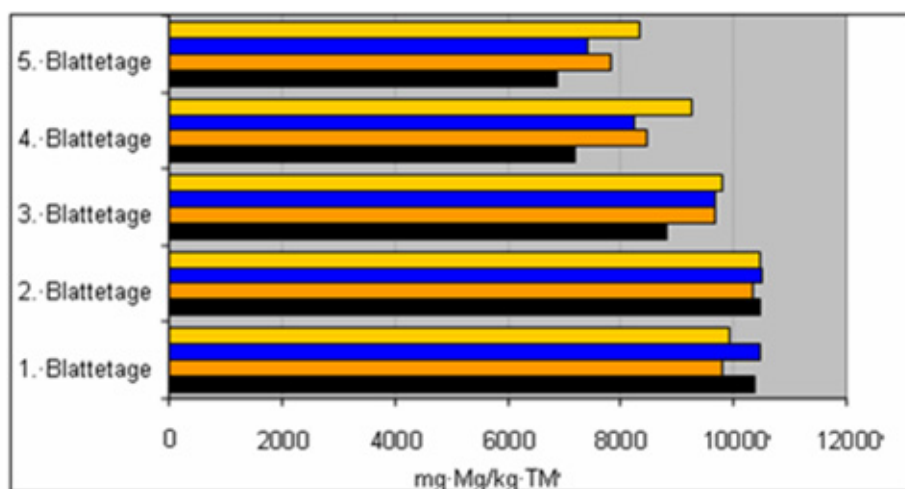
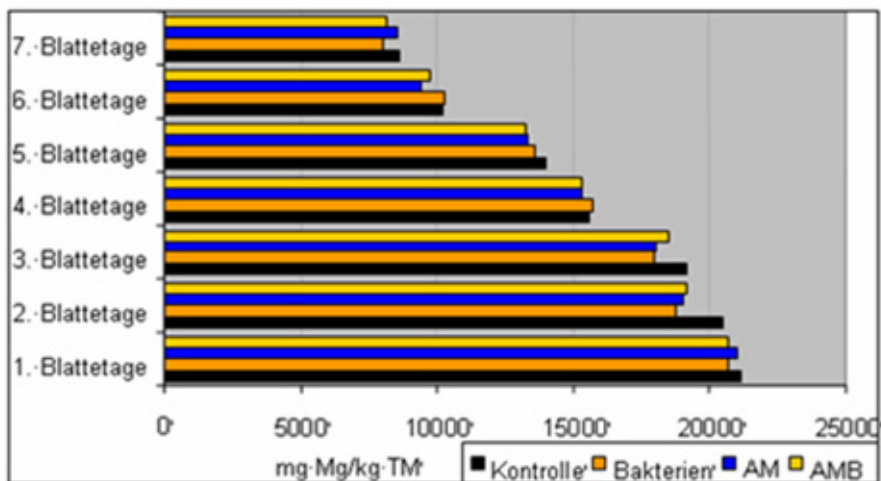
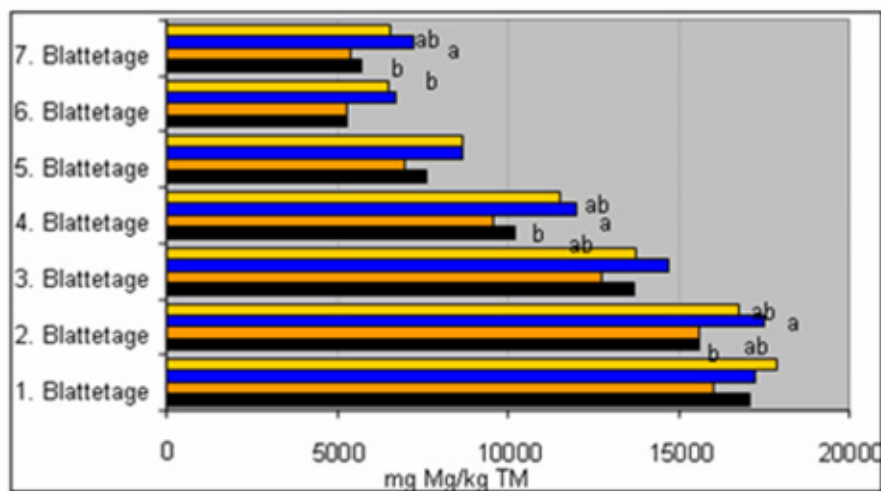


Tabelle 47: Mg in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Zwischenernte 2003

Referenzboden BBA



Mäßig belasteter Boden BBA



Hoch belasteter Boden Großbeeren

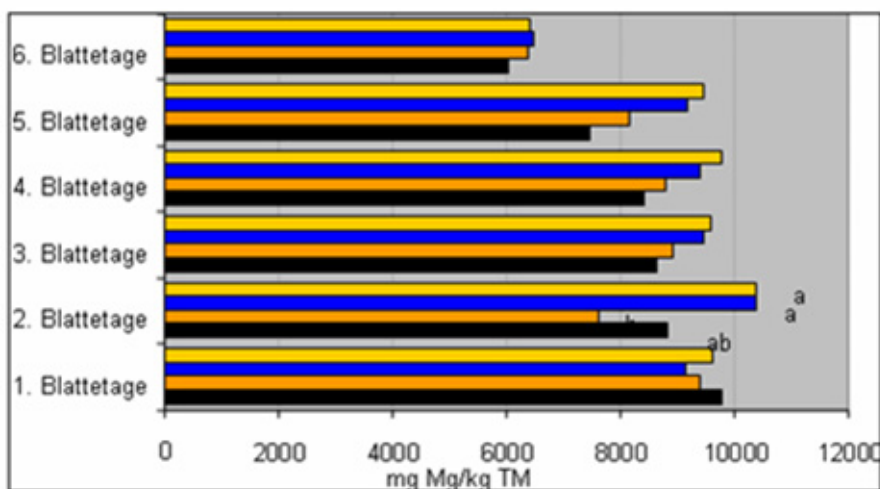
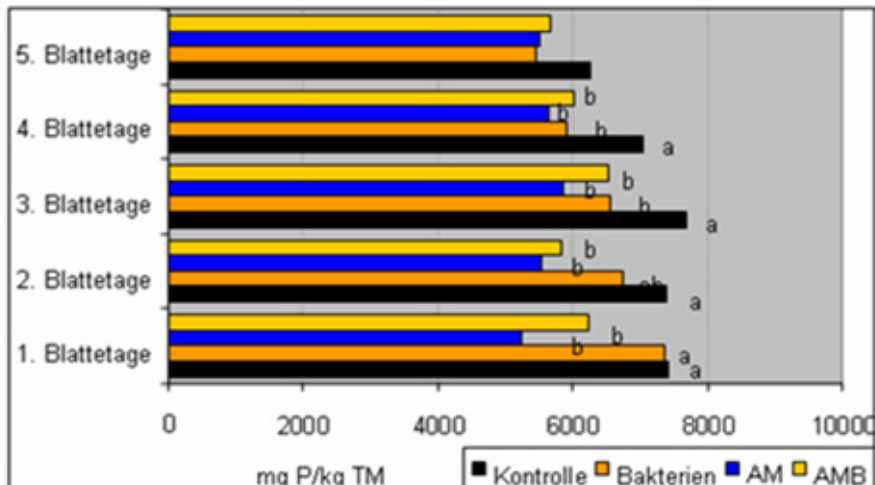
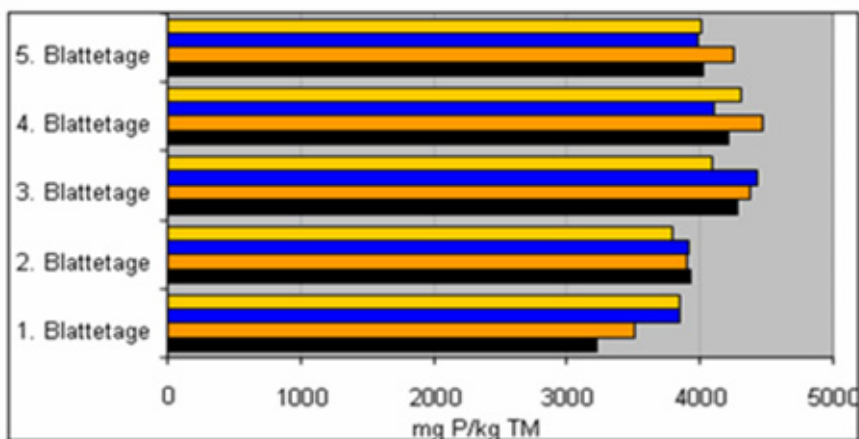


Tabelle 48: Mg in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Haupternte 2003

Referenzboden BBA



Mäßig belasteter Boden BBA



Hoch belasteter Boden Großbeeren

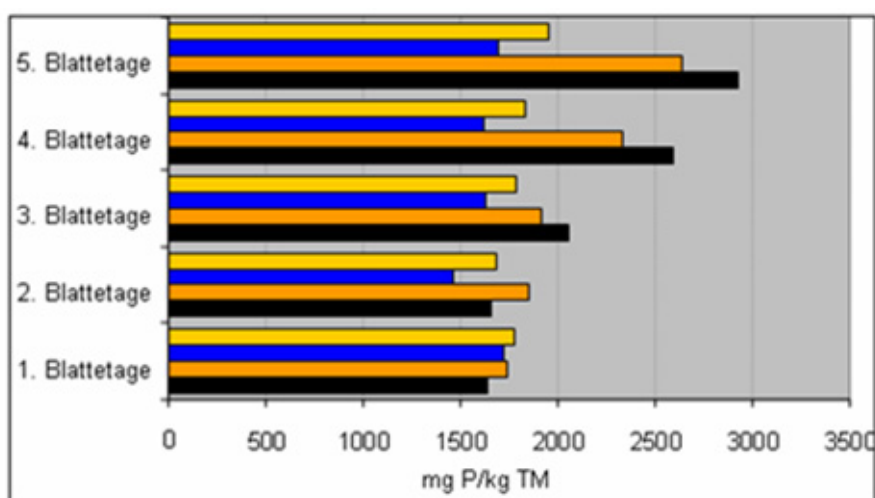
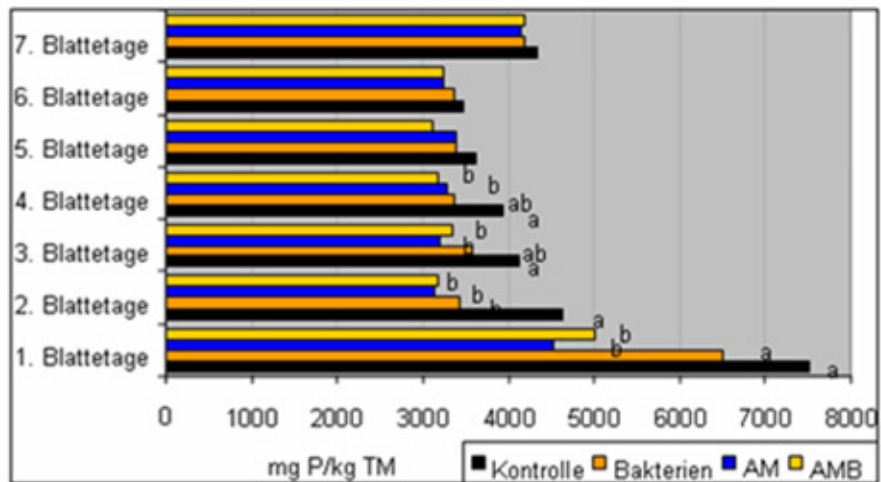
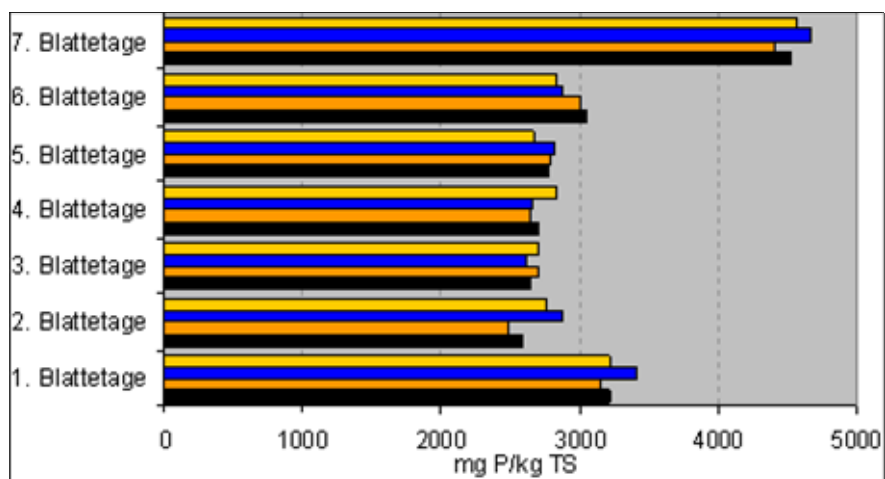


Tabelle 49: P in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Zwischenernte 2003

Referenzboden BBA



Mäßig belasteter Boden BBA



Hoch belasteter Boden Großbeeren

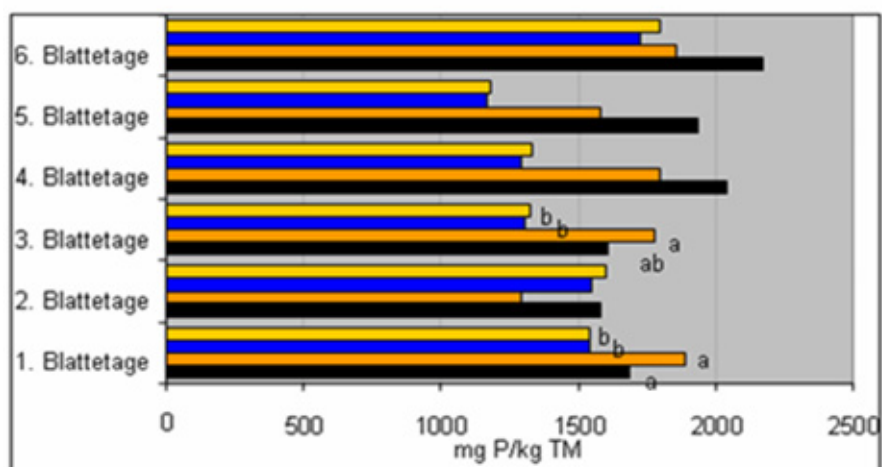
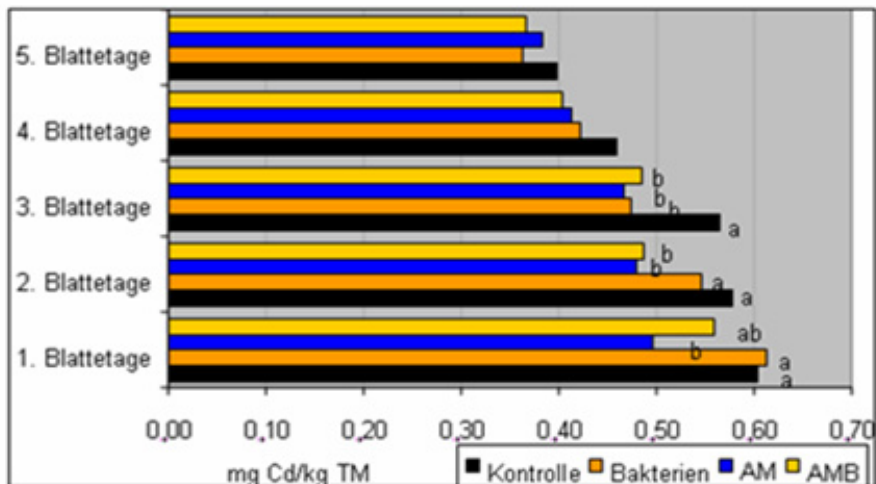
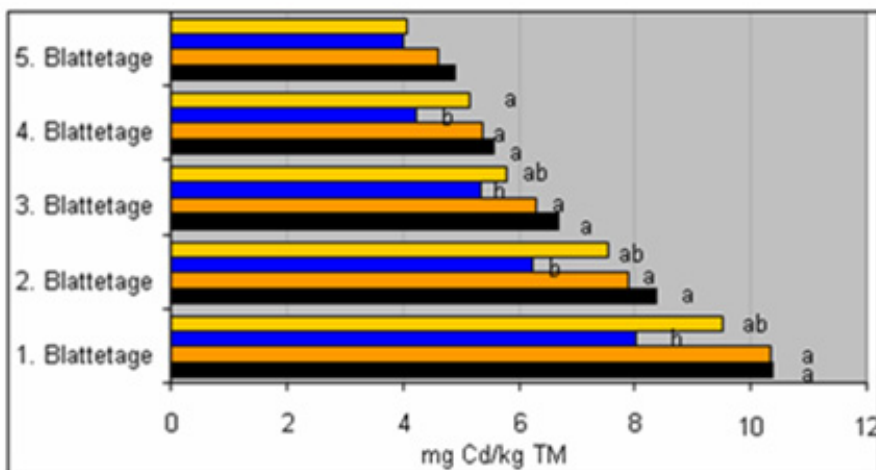


Tabelle 50: P in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Haupternte 2003

Referenzboden BBA



Mäßig belasteter Boden BBA



Hoch belasteter Boden Großbeeren

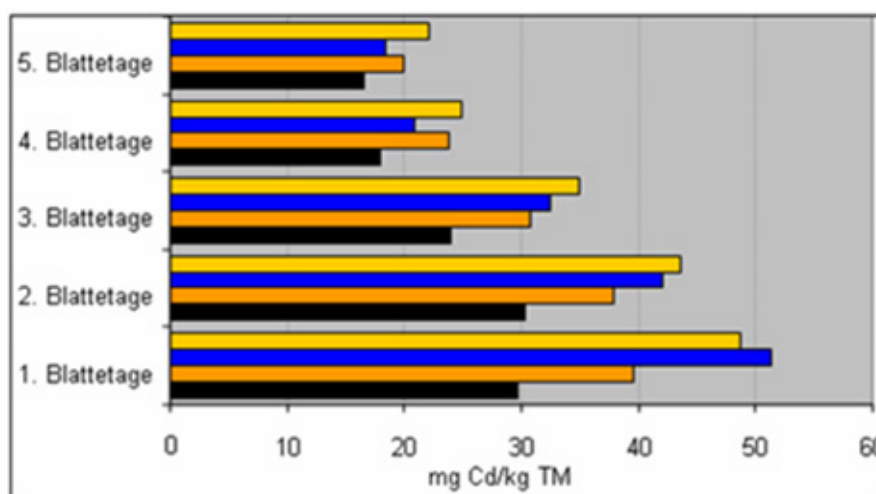
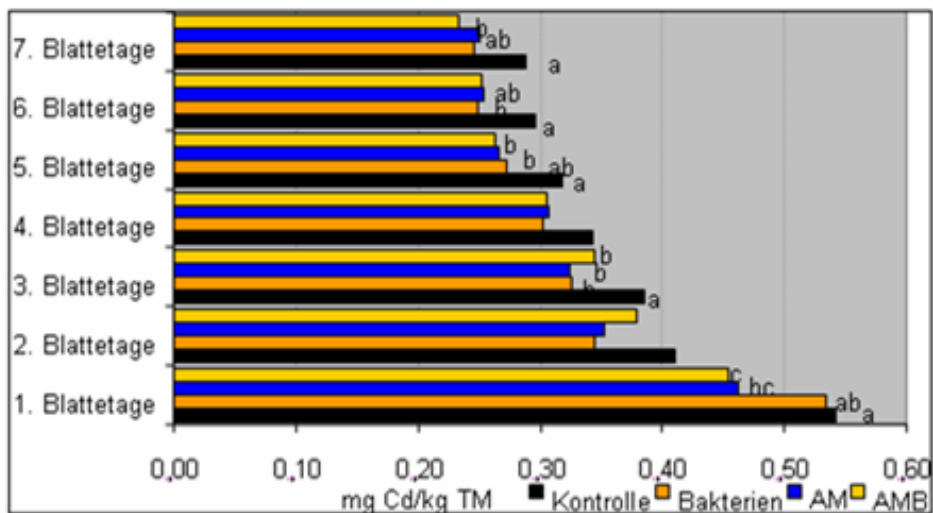
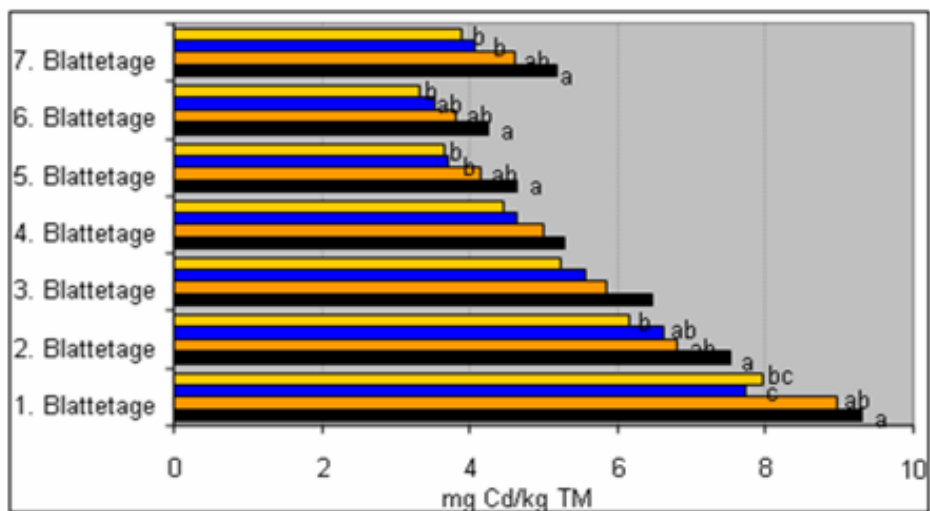


Tabelle 51: Cd in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Zwischenernte 2003

Referenzboden BBA



Mäßig belasteter Boden BBA



Hoch belasteter Boden Großbeeren

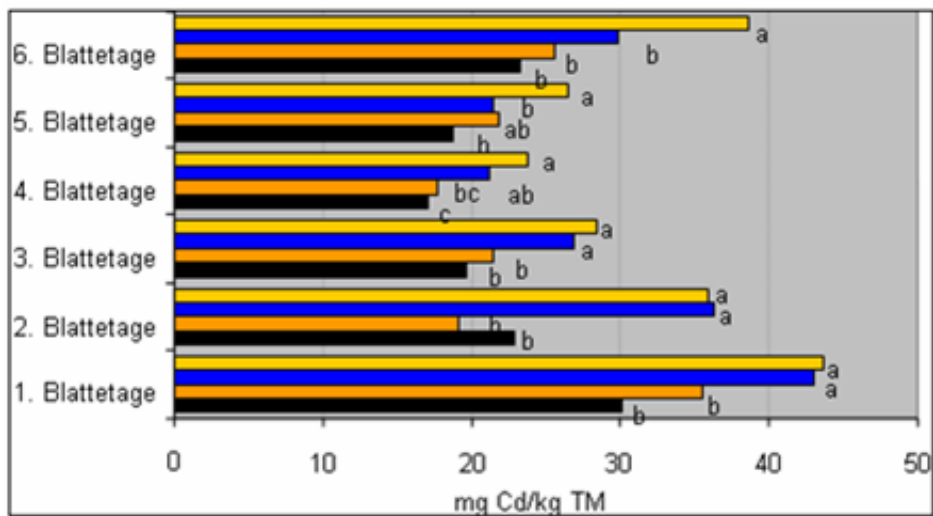
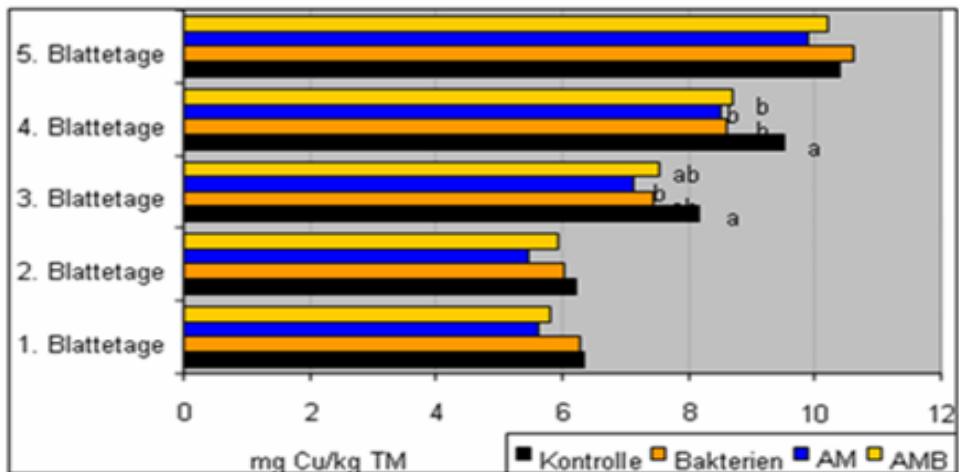
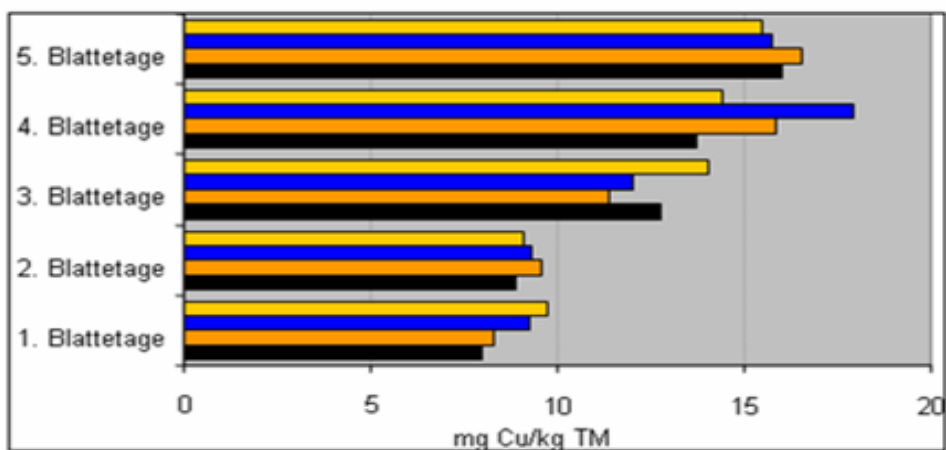


Tabelle 52: Cd in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Haupternte 2003

Referenzboden BBA



Mäßig belasteter Boden BBA



Hoch belasteter Boden Großbeeren

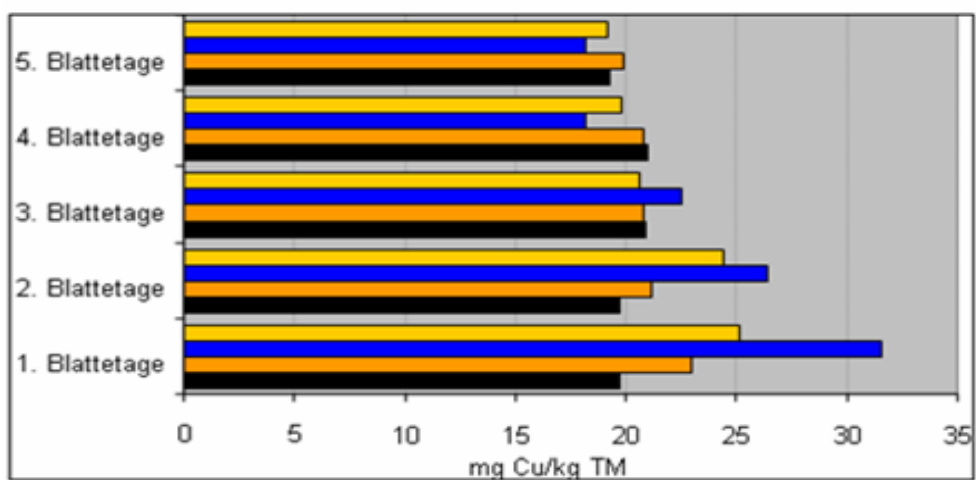
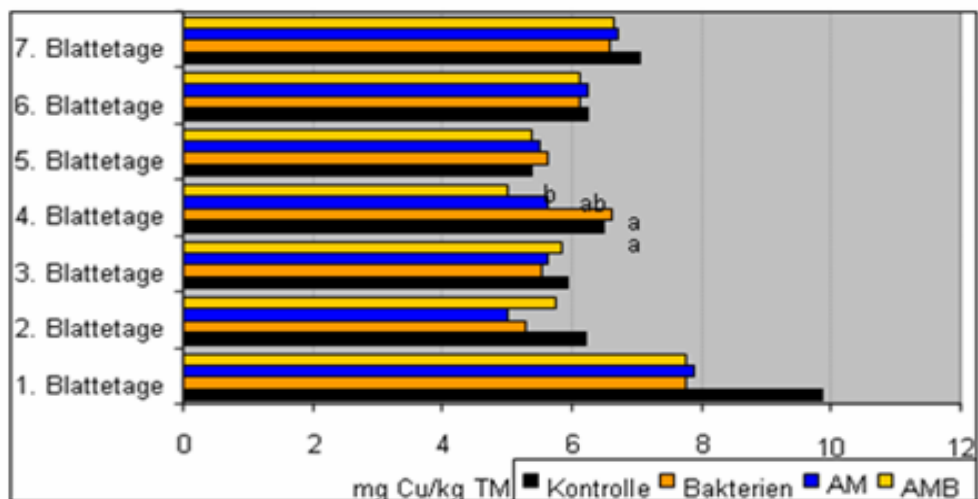
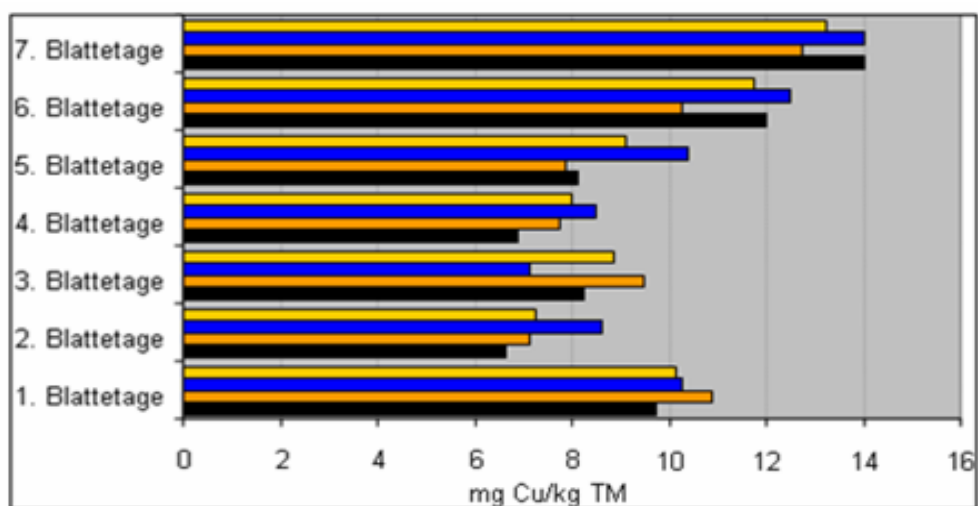


Tabelle 53: Cu in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Zwischenernte 2003

Referenzboden BBA



Mäßig belasteter Boden BBA



Hoch belasteter Boden Großbeeren

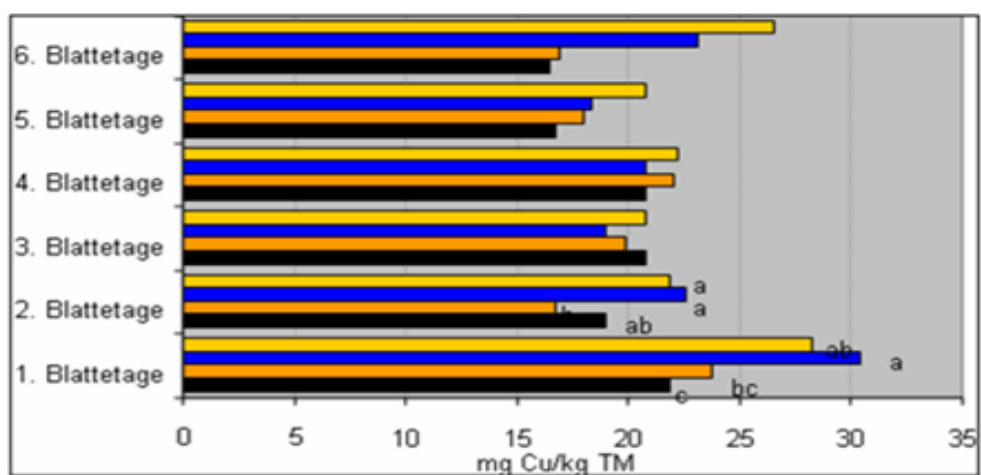
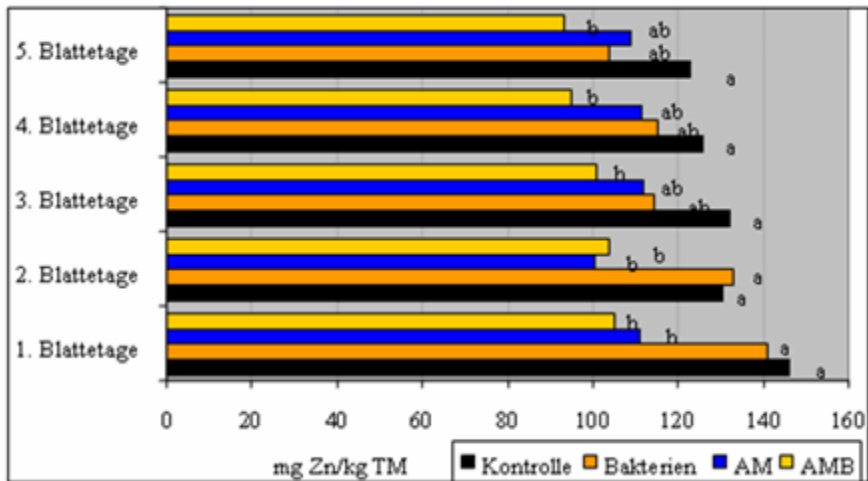
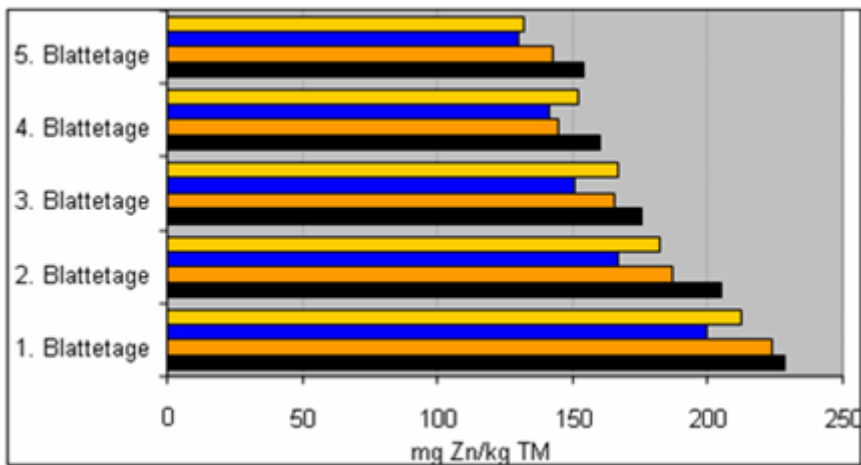


Tabelle 54: Cu in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Haupternte 2003

Referenzboden BBA



Mäßig belasteter Boden BBA



Hoch belasteter Boden Großbeeren

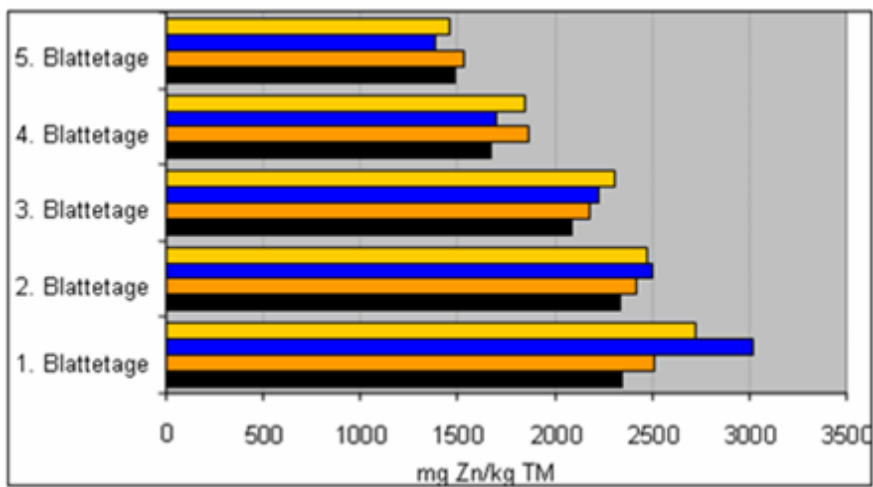
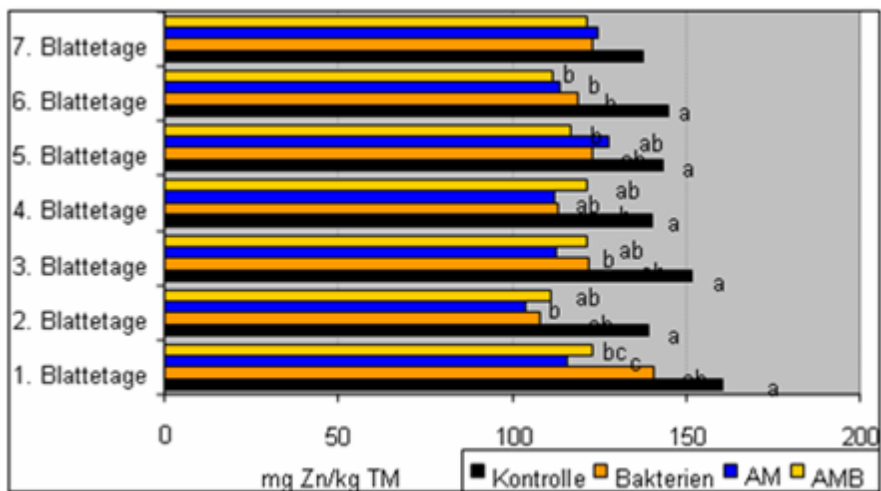
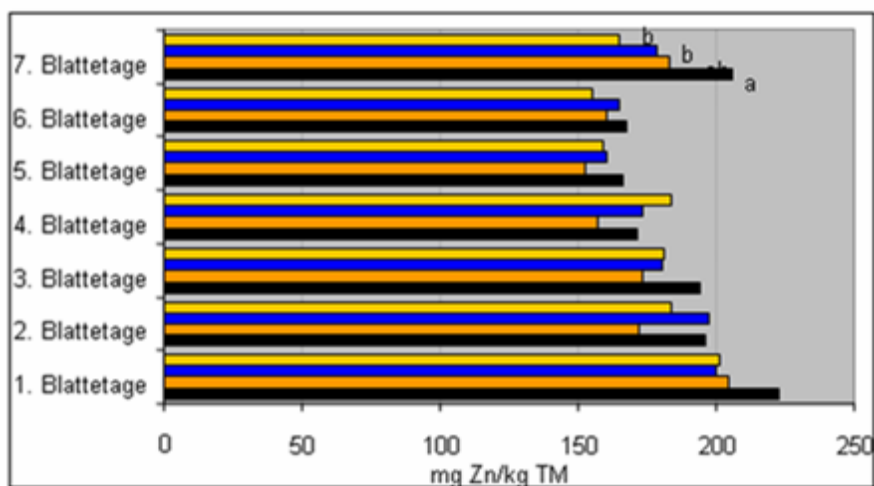


Tabelle 55: Zn in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Zwischenernte 2003

Referenzboden BBA



Mäßig belasteter Boden BBA



Hoch belasteter Boden Großbeeren

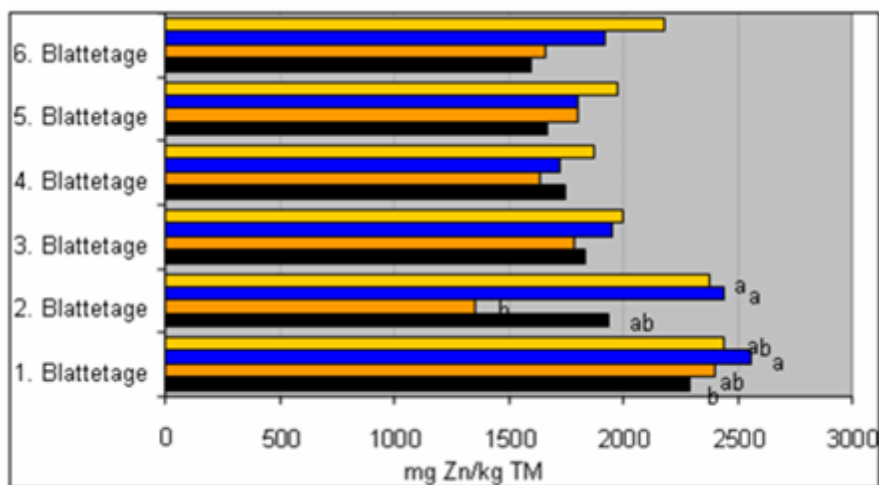


Tabelle 56: Zn in mg/kg TM der Sonnenblumenblätter im Mitscherlich-Gefäßversuch auf drei verschieden stark belasteten Böden, Haupternte 2003

Die statistische Auswertung der Wachstumskurven von Mais und Sonnenblumen wurde als Nichtlineare Regressionsfunktion dargestellt.

Tabelle 57: Nichtlineare Regressionsfunktion vom Mais im Mischerlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden Malchow 2001

Variante	Funktion	Restvarianz
AM	Tangenshyperbolicus(3)	45.835155
AMB	Tangenshyperbolicus(3)	149.600724
Bakterien	Tangenshyperbolicus (3)	55.504399
Kontrolle	Tangenshyperbolicus (3)	46.666896

Entscheidung für Tangenshyperbolicus (3): $f(x) = A/2 * \{1 + \tanh[C * (x - B)]\}$

Konfidenzschätzung (alpha = 0.05)

AM				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	199.2021	190.5114	207.8927	
B	4.3305	4.0383	4.6228	
C	0.2117	0.1898	0.2337	$s^2 = 45.8352.$
AMB				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	188.7251	171.7939	205.6563	
B	4.5804	3.9733	5.1874	
C	0.2052	0.1642	0.2462	$s^2 = 149.6007.$
Bakterien				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	191.0633	183.0397	199.0870	
B	3.8408	3.5669	4.1147	
C	0.2318	0.2048	0.2587	$s^2 = 55.5044.$
Kontrolle				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	195.7909	188.1632	203.4186	
B	4.1377	3.8857	4.3897	
C	0.2326	0.2090	0.2562	$s^2 = 46.6669.$

Tabelle 58: Nichtlineare Regressionsfunktion vom Mais, im Mischerlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden Malchow 2002

Variante	Funktion	Restvarianz
AM	Tangenshyperbolicus (3)	13.904155
AMB	Tangenshyperbolicus (3)	22.536424
Bakterien	Tangenshyperbolicus (3)	31.272204
Kontrolle	Tangenshyperbolicus (3)	36.356963

Entscheidung für Tangenshyperbolicus (3): $f(x) = A/2 * \{1 + \tanh[C * (x - B)]\}$

Konfidenzschätzung (alpha = 0.05)

AM				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	211.1728	207.2419	215.1036	
B	3.5254	3.4315	3.6192	
C	0.3261	0.3092	0.3430	$s^2 = 13.9042$
AMB				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	203.8748	198.8722	208.8775	
B	3.6421	3.5202	3.7641	
C	0.3329	0.3104	0.3554	$s^2 = 22.5364$
Bakterien				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	216.6093	210.5224	222.6963	
B	3.6348	3.4928	3.7767	
C	0.3202	0.2959	0.3445	$s^2 = 31.2722$
Kontrolle				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	214.1094	207.2632	220.9555	
B	3.7613	3.5990	3.9236	
C	0.3118	0.2859	0.3377	$s^2 = 36.3570$

Tabelle 59: Nichtlineare Regressionsfunktion vom Mais im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren 2001

Variante	Funktion	Restvarianz
AM	Tangenshyperbolicus (4)	148.630000
AMB	Tangenshyperbolicus (4)	14.071111
Bakterien	Tangenshyperbolicus (4)	31.776805
Kontrolle	Tangenshyperbolicus (4)	67.140086

Entscheidung für Tangenshyperbolicus (4): $f(x)=A+B*\tanh[D*(x-C)]$

Konfidenzschätzung (alpha = 0.05)

AM				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	107.1044	95.5950	118.6138	
B	85.9271	64.5787	107.2755	
C	5.6619	4.9032	6.4206	
D	0.2430	0.1432	0.3429	$s^2 = 148.6300$
AMB				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	98.7875	93.2989	104.2760	
B	90.3621	78.7446	101.9797	
C	5.4498	5.0514	5.8482	
D	0.1891	0.1548	0.2234	$s^2 = 14.0711$
Bakterien				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	97.3025	91.8491	102.7559	
B	83.2975	73.7190	92.8760	
C	5.3791	5.0207	5.7375	
D	0.2525	0.2045	0.3004	$s^2 = 31.7768$
Kontrolle				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	104.2611	96.0594	112.4629	
B	87.0881	71.1017	103.0745	
C	5.7416	5.1880	6.2952	
D	0.2293	0.1617	0.2969	$s^2 = 67.1401$

Tabelle 60: Nichtlineare Regressionsfunktion vom Mais im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren 2002

Variante	Funktion	Restvarianz
AM	Tangenshyperbolicus (4)	60.303841
AMB	Tangenshyperbolicus (4)	12.424094
Bakterien	Tangenshyperbolicus (4)	38.813930
Kontrolle	Tangenshyperbolicus (4)	42.278962

Entscheidung für Tangenshyperbolicus (4): $f(x)=A+B*\tanh[D*(x-C)]$

Konfidenzschätzung (alpha = 0.05)

AM				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	93.5295	80.6256	106.4334	
B	89.0628	70.2278	107.8978	
C	3.7649	3.1440	4.3859	
D	0.2979	0.2073	0.3884	$s^2 = 60.3038$
AMB				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	94.6002	90.0608	99.1396	
B	82.8837	76.2420	89.5254	
C	3.9077	3.6856	4.1298	
D	0.3332	0.2907	0.3757	$s^2 = 12.4241$
Bakterien				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	103.3493	96.6027	110.0958	
B	86.5847	76.7388	96.4306	
C	3.9996	3.6959	4.3034	
D	0.3633	0.2923	0.4342	$s^2 = 38.8139$
Kontrolle				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	91.9389	80.6900	103.1878	
B	88.0472	72.0973	103.9971	
C	3.6295	3.0963	4.1627	
D	0.3048	0.2268	0.3828	$s^2 = 42.2790$

Tabelle 61: Nichtlineare Regressionsfunktion der Sonnenblume im Gefäßversuch, Referenzboden BBA 2001

Variante	Funktion	Restvarianz
AM	Tangenshyperbolicus (4)	40.907691
AMB	Tangenshyperbolicus (3)	59.366854
Bakterien	Tangenshyperbolicus (4)	54.692114
Kontrolle	Tangenshyperbolicus (4)	66.573934

Entscheidung für Tangenshyperbolicus (4): $f(x)=A+B*\tanh[D*(x-C)]$

Konfidenzschätzung (alpha = 0.05)

AM				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	62.1800	54.8926	69.4674	
B	71.3379	49.9185	92.7574	
C	6.0972	5.4302	6.7641	
D	0.1849	0.1127	0.2571	$s^2 = 40.9077$.
AMB				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	56.3241	52.6570	59.9911	
B	54.0732	48.0911	60.0552	
C	5.7400	5.3804	6.0997	
D	0.2833	0.2247	0.3418	$s^2 = 59.8295$.
Bakterien				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	50.1524	43.4992	56.8056	
B	59.3958	48.4491	70.3425	
C	5.0164	4.3461	5.6867	
D	0.2134	0.1570	0.2698	$s^2 = 54.6921$.
Kontrolle				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	58.7957	41.6281	75.9633	
B	82.3543	33.5019	131.2066	
C	6.5317	4.9855	8.0780	
D	0.1506	0.0458	0.2555	$s^2 = 66.5739$.

Tabelle 62: Nichtlineare Regressionsfunktion der Sonnenblume im Gefäßversuch, Referenzboden BBA 2002

Variante	Funktion	Restvarianz
AM	Tangenshyperbolicus (3)	15.165685
AMB	Tangenshyperbolicus (3)	7.151714
Bakterien	Tangenshyperbolicus (3)	43.054311
Kontrolle	Tangenshyperbolicus (3)	29.473614

Entscheidung für Tangenshyperbolicus (3): $f(x) = A/2 * \{1 + \tanh[C * (x - B)]\}$

Konfidenzschätzung (alpha = 0.05)

AM				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	101.0663	96.2778	105.8549	
B	4.3181	4.1004	4.5359	
C	0.3064	0.2792	0.3336	$s^2 = 15.1657.$
AMB				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	97.6307	94.6127	100.6487	
B	4.0395	3.8941	4.1850	
C	0.3031	0.2841	0.3220	$s^2 = 7.1517.$
Bakterien				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	87.4201	79.9891	94.8510	
B	3.7906	3.3749	4.2062	
C	0.2869	0.2358	0.3381	$s^2 = 43.0543.$
Kontrolle				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	99.4793	90.5427	108.4158	
B	4.5097	4.0693	4.9502	
C	0.2672	0.2292	0.3053	$s^2 = 29.4736.$

Tabelle 63: Nichtlineare Regressionsfunktion der Sonnenblume im Gefäßversuch, hoch belasteter Boden
BBA 2001

Variante	Funktion	Restvarianz
AM	Tangenshyperbolicus (4)	30.972442
AMB	Tangenshyperbolicus (4)	26.955983
Bakterien	Tangenshyperbolicus (4)	32.954318
Kontrolle	Tangenshyperbolicus (4)	71.127569

Entscheidung für Tangenshyperbolicus (4): $f(x)=A+B*\tanh[D*(x-C)]$

Konfidenzschätzung (alpha = 0.05)

AM				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	49.0420	45.4148	52.6692	
B	52.7197	46.3085	59.1308	
C	5.5540	5.1493	5.9587	
D	0.2320	0.1868	0.2771	$s^2 = 30.9724$.
AMB				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	42.3638	37.3905	47.3371	
B	55.6844	42.4649	68.9039	
C	4.8829	4.3418	5.4240	
D	0.2061	0.1392	0.2731	$s^2 = 26.9560$.
Bakterien				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	57.1185	42.2921	71.9449	
B	77.5936	31.2268	123.9604	
C	6.5256	4.9720	8.0791	
D	0.1347	0.0430	0.2264	$s^2 = 32.9543$.
Kontrolle				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	39.6724	32.2036	47.1413	
B	44.3529	32.1810	56.5248	
C	5.0350	4.0530	6.0169	
D	0.2228	0.1327	0.3129	$s^2 = 71.1276$.

Tabelle 64: Nichtlineare Regressionsfunktion der Sonnenblume im Gefäßversuch, hoch belasteter Boden
BBA 2002

Variante	Funktion	Restvarianz
AM	Tangenshyperbolicus (3)	18.812002
AMB	Tangenshyperbolicus (3)	21.808540
Bakterien	Tangenshyperbolicus (3)	30.933336
Kontrolle	Tangenshyperbolicus (3)	38.829647

Entscheidung für Tangenshyperbolicus (3): $f(x) = A/2 * \{1 + \tanh[C * (x - B)]\}$

Konfidenzschätzung (alpha = 0.05)

AM				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	93.1438	86.1031	100.1844	
B	4.5630	4.1983	4.9277	
C	0.2731	0.2404	0.3058	$s^2 = 18.8120.$
AMB				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	97.3419	90.0709	104.6129	
B	4.6756	4.3296	5.0217	
C	0.2887	0.2543	0.3230	$s^2 = 21.8085.$
Bakterien				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	100.3328	90.2891	110.3765	
B	4.9565	4.4972	5.4157	
C	0.2837	0.2430	0.3245	$s^2 = 30.9333.$
Kontrolle				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	98.9281	83.8026	114.0536	
B	5.2169	4.4717	5.9620	
C	0.2521	0.2053	0.2989	$s^2 = 38.8296.$

Tabelle 65: Nichtlineare Regressionsfunktion der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, Referenzbo-den BBA, 2003

Variante	Funktion	Restvarianz
AM	Tangenshyperbolicus (4)	14.988644
AMB	Tangenshyperbolicus (3)	14.857154
Bakterien	Tangenshyperbolicus (3)	14.838630
Kontrolle	Tangenshyperbolicus (3)	35.223047

Entscheidung für Tangenshyperbolicus (4): $f(x)=A+B*\tanh[D*(x-C)]$

Konfidenzschätzung (alpha = 0.05)

AM				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	83.7334	82.0385	85.4282	
B	81.2659	78.4295	84.1023	
C	6.7737	6.6512	6.8963	
D	0.2646	0.2467	0.2825	$s^2=14.9886.$
AMB				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	82.4349	80.3805	84.4893	
B	81.9429	78.3137	85.5721	
C	6.7946	6.6399	6.9493	
D	0.2420	0.2224	0.2615	$s^2=18.4040.$
Bakterien				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	84.1623	82.4508	85.8738	
B	82.4822	79.5889	85.3754	
C	6.8794	6.7562	7.0027	
D	0.2592	0.2418	0.2766	$s^2=14.8572.$
Kontrolle				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	83.4646	80.9606	85.9687	
B	80.6793	76.5800	84.7787	
C	6.8328	6.6539	7.0117	
D	0.2742	0.2465	0.3019	$s^2=35.2230.$

Tabelle 66: Nichtlineare Regressionsfunktion der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, mäßig belasteter Boden 2003

Variante	Funktion	Restvarianz
AM	Tangenshyperbolicus (3)	24.418225
AMB	Tangenshyperbolicus (3)	52.521896
Bakterien	Tangenshyperbolicus (3)	42.666751
Kontrolle	Tangenshyperbolicus (3)	24.008611

Entscheidung für Tangenshyperbolicus (3): $f(x) = A/2 * \{1 + \tanh[C * (x - B)]\}$

Konfidenzschätzung (alpha = 0.05)

AM				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	157.3571	153.3758	161.3383	
B	6.9222	6.7611	7.0833	
C	0.2404	0.2276	0.2532	$s^2 = 24.4182$.
AMB				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	167.3691	160.4971	174.2411	
B	7.2970	7.0271	7.5669	
C	0.2185	0.2018	0.2353	$s^2 = 52.5219$.
Bakterien				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	154.6319	149.1055	160.1584	
B	6.9800	6.7485	7.2115	
C	0.2312	0.2144	0.2480	$s^2 = 42.6668$.
Kontrolle				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	160.6122	156.3043	164.9202	
B	7.1747	7.0023	7.3470	
C	0.2301	0.2179	0.2422	$s^2 = 24.0086$.

Tabelle 67: Nichtlineare Regressionsfunktion der Sonnenblume im Mitscherlich-Gefäßversuch, hoch belasteter Boden Großbeeren, 2003

Variante	Funktion	Restvarianz
AM	Tangenshyperbolicus (3)	25.005068
AMB	Tangenshyperbolicus (3)	15.305137
Bakterien	Tangenshyperbolicus (3)	4.930820
Kontrolle	Tangenshyperbolicus (3)	10.803456

Entscheidung für Tangenshyperbolicus (3): $f(x) = A/2 \cdot \{1 + \tanh[C \cdot (x-B)]\}$

Konfidenzschätzung (alpha = 0.05)

AM				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	73.3737	68.2709	78.4766	
B	6.6062	6.0890	7.1233	
C	0.1856	0.1617	0.2095	$s^2 = 25.0051.$
AMB				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	80.8736	76.3664	85.3809	
B	6.9963	6.5765	7.4161	
C	0.1777	0.1609	0.1945	$s^2 = 15.3051.$
Bakterien				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	50.8974	48.6459	53.1489	
B	5.6844	5.3280	6.0407	
C	0.1678	0.1528	0.1828	$s^2 = 4.9308.$
Kontrolle				
Parameter	Schätzwert	untere Grenze	obere Grenze	
A	41.9216	38.3056	45.5375	
B	5.1155	4.3754	5.8555	
C	0.1505	0.1233	0.1776	$s^2 = 10.8035.$

Tabelle 68: Nährelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch BBA, Zwischenernte 2000

Variante	Ca				K				Mg				P			
	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel
Kontrolle	7396b	2582	1363	2881	19393	20479	22068	11961	2727	2089	1607	1614	2741	1999	3802	1050
Bakterien	8214a	2692	1494	2825	18093	15886	21477	10924	3115	2485	1761	1612	2754	1720	3986	1043
AM	7909ab	2413	1475	2699	18981	16549	20624	10852	3094	2207	1787	1466	2665	1782	3952	1069
AMB	7636ab	2586	1388	2837	19429	16062	20223	12097	3018	2442	1723	1724	2651	1798	3831	995

Tabelle 69: Nährelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch BBA, Zwischenernte 2001

Variante	Ca				K				Mg				P			
	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel
Kontrolle	9923	2109	135	2471	13724	9874	5718	7126	3799	1694	1213	1307	2141	786ab	3425	967
Bakterien	9346	2132	85	2594	14591	9170	4991	5577	3892	1849	1193	1261	2106	558b	3226	804
AM	9913	2286	128	2445	13748	9369	5390	8458	3958	1812	1231	1211	2200	793ab	3373	1061
AMB	9412	2062	136	2645	13963	9748	5950	7575	3853	1704	1263	1315	2126	907a	3411	1093

Tabelle 70: Nährelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch BBA, Zwischenernte 2002

Variante	Ca				K				Mg				P			
	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel
Kontrolle	6954	2136	817	2132	17948	15608	13473	13698	2693	1764	1307	911	3118	2115	3493	1475
Bakterien	6403	2272	865	2045	19373	17058	14800	13813	2392	1813	1326	913	3158	2110	3673	1528
AM	6835	2250	850	2517	19563	17253	13595	14873	2473	1800	1291	1023	3088	1870	3350	1478
AMB	7112	1963	815	2440	19250	16968	13760	16280	2544	1572	1284	1033	3155	2015	3463	1565

Tabelle 71: Schadelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch, Zwischenernte 2000

Variante	Cd				Cu				Fe				Zn			
	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel
Kontrolle	9,33	3,35	0,48	13,05	9,18	2,23b	6,90	6,28	194	49	37	2848	38,5	29,3	33,8	29,0
Bakterien	11,50	4,47	0,68	11,73	9,70	4,13a	6,45	7,75	176	43	44	2039	40,0	35,3	37,8	26,3
AM	9,80	3,80	0,80	11,20	8,83	3,55ab	6,10	6,95	177	58	40	2389	42,0	32,5	36,3	27,0
AMB	10,93	4,94	0,79	12,03	9,85	3,93a	6,53	6,88	160	39	38	2181	39,3	36,8	36,3	28,3

Tabelle 72: Schadelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch, Zwischenernte 2001

Variante	Cd				Cu				Fe				Zn			
	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel
Kontrolle	6,03	2,36	0,10	8,05	10,53	3,45	3,25ab	4,60	123	28	24	1243	41	27	27	24
Bakterien	6,18	2,33	0,10	11,38	11,13	3,45	2,80b	6,90	124	31	24	1745	35	20	24	29
AM	6,55	2,37	0,10	10,25	10,83	3,78	3,58a	5,40	113	30	25	1087	47	27	27	25
AMB	6,95	2,53	0,15	11,65	9,90	3,73	3,30ab	5,88	133	29	25	1560	36	30	27	29

Tabelle 73: Schadelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch, Zwischenernte 2002

Variante	Cd				Cu				Fe				Zn			
	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel
Kontrolle	3,61	2,16	0,78	14,48	7,80	3,08	5,38	7,98	135	28	26	1403	40,0	33,5	39,0	28,0
Bakterien	3,80	2,50	0,91	16,60	8,65	3,48	5,55	7,48	121	31	24	1306	38,3	37,0	40,8	23,5
AM	3,82	2,18	0,89	20,80	8,40	3,18	5,23	9,60	125	35	24	1453	37,0	35,0	36,3	29,3
AMB	5,08	2,61	0,89	21,98	8,85	3,83	5,58	10,90	109	29	25	1585	42,8	36,8	39,0	31,3

Tabelle 74: Nährelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch BBA, Haupternte 2000

Variante	Ca				K				Mg				P			
	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel
Kontrolle	12408	2827	53	3059a	10184	21639	4016	13733	2663	1188	1219	1707	2320	624	3481	722a
Bakterien	13298	2800	57	3089a	9381	19210	3502	12567	3373	1603	1052	1519	1939	455	2978	577ab
AM	13231	2804	58	2362b	9541	19943	3582	13606	3301	1665	1153	1389	1855	342	3126	512b
AMB	12640	2752	55	2678ab	10185	19394	4034	13166	3236	1601	1207	1449	1882	441	3329	445b

Tabelle 75: Nährelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch BBA, Haupternte 2001

Variante	Ca				K				Mg				P			
	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel
Kontrolle	12774	2365	101	2420	11538	14174	3787b	11983	4523	1752	1529	1071	2246	585	4293	713
Bakterien	11389	2266	70	2654	10596	14283	3754b	9377	4662	1898	1663	1152	2144	494	4645	676
AM	12514	2555	95	2389	11016	14945	3956b	9342	4645	1677	1719	1136	2388	565	4778	668
AMB	12745	2142	112	2131	10599	13606	4671a	9797	5183	1711	1780	1020	2421	611	4340	614

Tabelle 76: Nährelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch BBA, Haupternte 2002

Variante	Ca				K				Mg				P			
	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel
Kontrolle	10186	1898	143a	2182	13328	20443	3833	13685	3016	1120	1210	1018	2303	854	3813	1025
Bakterien	9741	2023	66b	2242	13533	19163	3909	15703	3028	1421	1296	951	2923	1100	4008	1230
AM	9501	1976	64b	2359	13603	18883	3928	14670	2818	1289	1269	945	2705	977	3993	1047
AMB	9323	2195	79b	2293	14745	19993	3929	14845	2780	1305	1295	889	2405	1297	3983	1328

Tabelle 77: Schadelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch, Haupternte 2000

Variante	Cd				Cu				Zn			
	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel
Kontrolle	7,76	4,24	0,10	10,85	15,38	4,65	2,25	7,18	48,8	22,5	22,3	23,0
Bakterien	11,83	4,19	0,13	14,60	13,50	3,55	1,70	7,35	48,0	22,0	24,8	26,0
AM	10,55	3,66	0,13	11,18	13,95	4,58	1,98	6,33	55,0	22,3	23,0	19,8
AMB	10,67	4,32	0,13	11,43	13,40	4,88	2,05	7,85	50,5	24,8	23,5	20,0

Tabelle 78: Schadelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch, Haupternte 2001

Variante	Cd				Cu				Zn			
	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel
Kontrolle	5,83	2,36	0,13	10,60	12,25	4,43	1,93	6,13	50,8	28,5	32,0	26,5
Bakterien	6,03	2,38	0,17	12,85	9,35	3,55	2,15	6,45	38,5	28,8	33,8	24,3
AM	5,93	3,15	0,17	10,95	11,23	3,78	2,10	5,83	47,5	22,3	32,5	23,0
AMB	6,55	3,09	0,13	10,53	11,38	3,33	2,05	5,80	50,8	32,5	31,8	18,5

Tabelle 79: Schadelemente in mg/kg TM Mais im Feldversuch, Haupternte 2002

Variante	Cd				Cu				Zn			
	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel	Blätter	Stängel	Kolben	Wurzel
Kontrolle	4,33	2,11	0,21	14,75	13,50	2,81	2,35	10,88	38,3	26,5	25,8	31,0
Bakterien	4,55	2,96	0,21	19,75	13,50	2,94	2,50	12,98	42,0	32,0	28,3	30,8
AM	4,63	2,47	0,18	17,75	14,90	3,65	2,28	14,00	39,0	30,3	27,3	31,5
AMB	6,23	3,05	0,19	18,00	12,93	3,49	2,68	13,25	36,8	35,5	28,0	33,8

Tabelle 80: Nährelemente in mg/kg TM Weidelgras im Feldversuch, 2000

	Ca			K			Mg			P		
Variante	1. Schnitt	2. Schnitt	Wurzel	1. Schnitt	2. Schnitt	Wurzel	1. Schnitt	2. Schnitt	Wurzel	1. Schnitt	2. Schnitt	Wurzel
Kontrolle	7591	5380	5380	38854ab	34765b	2185	3072	2185	711	3000	3984	1846b
Bakterien	7376	5143	5143	36785ab	41834a	2116	3128	2116	783	3266	4109	2079ab
AM	6762	5126	5126	41825a	45569a	2148	2777	2148	769	3575	4080	2042ab
AMB	7999	5327	5327	34926b	46997a	2185	3142	2185	869	2896	3976	2345a

Tabelle 81: Nährelemente in mg/kg TM Weidelgras im Feldversuch, 2001

	Ca			K			Mg			P		
Variante	1. Schnitt	2. Schnitt	Wurzel	1. Schnitt	2. Schnitt	Wurzel	1. Schnitt	2. Schnitt	Wurzel	1. Schnitt	2. Schnitt	Wurzel
Kontrolle	2957	3155	8478	24960	23228	3602	1456	1701	1485a	3520	4175	1769
Bakterien	2810	3059	6946	25615	21768	3467	1465	1584	1137b	3505	3901	1595
AM	3072	3542	7439	27270	24101	3256	1496	1708	1199ab	3743	3991	1750
AMB	2851	3386	6818	23883	23216	3634	1390	1627	1257ab	3211	4049	1665

Tabelle 82: Nährelemente in mg/kg TM Weidelgras im Feldversuch, 2002

	Ca			K			Mg			P		
Variante	1. Schnitt	2. Schnitt	Wurzel	1. Schnitt	2. Schnitt	Wurzel	1. Schnitt	2. Schnitt	Wurzel	1. Schnitt	2. Schnitt	Wurzel
Kontrolle	4848ab	4779	3594	41495	45658	10000	2241	2212	681	4135	5225	2070
Bakterien	5326a	4344	3370	40540	45338	10127	2521	2164	582	4145	5130	2083
AM	4485b	4257	3664	43780	45038	9673	2179	2179	629	4650	5238	2310
AMB	4549b	4285	3443	41595	45140	9211	2311	2118	618	4118	5250	1905

Tabelle 83: Schadelemente in mg/kg TM Weidelgras im Feldversuch, 2000

	Cd			Cu			Zn		
Variante	1. Schnitt	2.Schnitt	Wurzel	1. Schnitt	2.Schnitt	Wurzel	1. Schnitt	2.Schnitt	Wurzel
Kontrolle	4,08	2,10	20,98	7,50	5,45b	44,75	43,0	24,5	141,3
Bakterien	4,27	1,75	26,01	8,08	6,43ab	18,25	42,8	27,8	118,3
AM	3,19	1,29	21,89	6,83	6,68a	26,25	37,0	24,5	104,0
AMB	4,23	2,43	23,82	7,50	7,50a	13,25	43,5	29,3	118,8

Tabelle 84: Schadelemente in mg/kg TM Weidelgras im Feldversuch, 2001

	Cd			Cu			Zn		
Variante	1. Schnitt	2.Schnitt	Wurzel	1. Schnitt	2.Schnitt	Wurzel	1. Schnitt	2.Schnitt	Wurzel
Kontrolle	0,77	0,80	43,75	4,33	4,78	29,50a	33,8	34,0	120,3
Bakterien	0,80	0,71	46,50	4,60	4,60	23,25ab	37,8	33,5	89,8
AM	0,71	0,88	47,50	4,88	5,30	25,00ab	40,8	36,8	89,0
AMB	0,90	0,81	50,25	4,30	4,88	21,25b	34,0	35,8	77,3

Tabelle 85: Schadelemente in mg/kg TM Weidelgras im Feldversuch, 2002

	Cd			Cu			Zn		
Variante	1. Schnitt	2.Schnitt	Wurzel	1. Schnitt	2.Schnitt	Wurzel	1. Schnitt	2.Schnitt	Wurzel
Kontrolle	4,30	2,98	49,25	7,78	8,13	10,78	36,3	30,5	62,0
Bakterien	5,02	2,98	57,00	7,98	7,73	9,85	37,8	31,3	56,8
AM	4,61	2,82	51,25	7,75	7,70	10,13	37,5	31,8	59,8
AMB	5,32	3,02	51,50	7,83	7,85	9,33	38,5	30,5	64,0

Erklärung

„Ich, Celia König, geb. Krieger, erkläre, dass ich die vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema: Einfluss von Mykorrhizapilzen und assoziativen Bakterien auf die Bioverfügbarkeit von Nähr- und Schadelementen bei Kulturpflanzen auf schwermetallbelasteten Böden– selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter verfasst und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt habe“.

Berlin, Juni 2006

Celia König

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Kollegen und Freunden bedanken, die mir bei der Erstellung meiner Doktorarbeit zur Seite standen.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. agr. Dr. habil. W. Pestemer, der für mich die Voraussetzungen für die Durchführung dieser Arbeit geschaffen hat. Er motivierte mich sehr in wissenschaftlichen Diskussionen und mit seinem unablässigen Optimismus.

Herrn Dr. R. Abdi Baghi möchte ich besonders herzlich danken, dass er mir einen wesentlichen Anteil dieser Arbeit mit der Firma Phytobacter ermöglicht hat. Mit der Anregung des Themas und der Gelegenheit, am Myco-rem-Projekt mitarbeiten zu können, hat er mir viel Vertrauen bei der Planung und Vorbereitung entgegengebracht und mich bei der Durchführung stets mit Rat und Tat unterstützt.

Herrn Prof. R. Achazi von der FU-Berlin, Institut für Ökotoxikologie und Biochemie, danke ich sehr für die Übernahme des zweiten Gutachtens, für sein Interesse am Fortgang dieser Arbeit und die Bereitstellung der Laboratorien für meine Untersuchungen an seinem Institut.

Bei Herrn Dr. T. Strumpf der BBA Berlin, Institut für Ökotoxikologie und Ökochemie im Pflanzenschutz, möchte ich mich sehr für seine konstruktive Diskussionsbereitschaft, maßgeblichen Anregungen und seine Unterstützung bei der Korrektur dieser Arbeit bedanken.

Mein Dank gilt allen Mitarbeitern dieses Institutes, insbesondere Uschi Stendel, Elke Zeidler und Catrin Vetter, die mich umfassend im Labor und bei den Messungen am ICP-AES unterstützt haben. Sie standen mir stets mit fachlichem und persönlichen Engagement zur Seite.

Für die gärtnerische und pflanzenbauliche Unterstützung des Freilandversuches möchte ich Herrn Buchhorn mit seinem Team der BBA Berlin danken. Mein besonderer Dank gilt Herrn Berg, der mich unermüdlich gärtnerisch und fachlich bei den Gewächshausversuchen unterstützt hat.

Für die freundliche Hilfe bei der statistischen Auswertung bedanke ich mich bei Herrn Dr. E. Moll aus der EDV-Gruppe der BBA Kleinmachnow.

Weiterhin möchte ich meinen Kollegen Dr. Stefan Heise und Dirk Kaliess der Arbeitsgruppe Bodenökologie der FU-Berlin für die vielen Diskussionen und Anregungen danken, die insbesondere bei der Auswahl verschiedener Untersuchungsmethoden sehr hilfreich waren.

Einen ganz lieben Dank möchte ich meiner Familie und insbesondere meinem Mann Dr. Benjamin König aussprechen. Ohne ihre umfassende Unterstützung wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen.