

**Forschungsberichte
des
Fachbereichs Agrarwirtschaft Soest
Universität - Gesamthochschule Paderborn**

Nr. 13

**"Umweltschonende Verwertung von Klärschlamm
in der Landwirtschaft
P-Wirkung des Klärschlammes in Abhängigkeit
von der P-Fällung und vom Substrat"**

© 2001

Forschungsschwerpunkt
"Umweltverträgliche und standortgerechte Landwirtschaft"

Universität-Gesamthochschule Paderborn, Abteilung Soest
Fachbereich Agrarwirtschaft
Lübecker Ring 2
59494 Soest
Tel.: 02921/378210
Fax.: 02921/378200

ISSN: 1435 - 3032
ISBN: 3 - 935807 - 06 - 6

Druck: Universität-Gesamthochschule Paderborn

**Forschungsberichte
des
Fachbereichs Agrarwirtschaft Soest
Universität - Gesamthochschule Paderborn**

Nr. 13

**"Umweltschonende Verwertung von Klärschlamm
in der Landwirtschaft
P-Wirkung des Klärschlammes in Abhängigkeit
von der P-Fällung und vom Substrat"**

Vom Fachbereich Philosophie, Geschichte, Geographie,
Religions- und Gesellschaftswissenschaften der
Universität-Gesamthochschule Paderborn
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Philosophie
- Dr. phil.-

angenommene Dissertation

von

Dipl.-Ing. agr. Ortrun Onnen

1. Gutachter: Prof. Dr. K. Barth, Fachbereich 1 Geographie
Universität-Gesamthochschule Paderborn

2. Gutachter: Prof. Dr. J. Oehmichen, Fachbereich 9 Agrarwirtschaft
Universität-Gesamthochschule Paderborn

Tag der Prüfung: 11.07.2001

0 Verzeichnisse**Inhaltsverzeichnis**

0	Verzeichnisse	III
1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm	3
2.1	Entstehung von Klärschlamm	3
2.2	Rechtliche Rahmenbedingungen	8
2.2.1	Abfallgesetze	9
2.2.2	Wasserhaushaltsgesetz	10
2.2.3	Klärschlammverordnung	10
2.2.4	Klärschlamm-Entschädigungsfonds	13
2.2.5	Düngerecht	13
2.2.6	Bundesbodenschutzgesetz	14
2.3	Stoffliche Zusammensetzung von Klärschlamm	15
2.3.1	Stickstoff	17
2.3.2	Phosphor	18
2.3.3	Kalium, Calcium und Magnesium	22
2.3.4	Schwermetalle	23
2.3.5	Organische Schadstoffe	29
2.4	Initiativen zum umweltverträglichen Klärschlamm Einsatz	34
3.	Material und Methode	40
3.1	Versuchsfaktoren	40
3.1.1	Klärschlamm	40
3.1.2	Standort	43
3.1.2.1	Beschreibung der Böden	44
3.1.2.2	Bodenkundliche Kennzeichnung des Substrates	47
3.2	Anlage des Versuches	49
3.2.1	Das erste Untersuchungsjahr	49
3.2.2	Das zweite Untersuchungsjahr	50
3.2.3	Das dritte Untersuchungsjahr	51

3.3	Durchführung des Versuches	51
3.4	Witterung	52
3.5	Analysen	55
3.5.1	Pflanzen: Entnahme - Behandlung - Untersuchung	55
3.5.2	Boden: Entnahme - Behandlung - Untersuchungen	56
3.6	Statistische Auswertung	57
4	Ergebnisse	57
4.1	Einfluß der Klärschlamm-Düngung auf das Pflanzenwachstum	57
4.1.1	Erträge und P-Entzüge im ersten Untersuchungsjahr	58
4.1.2	Erträge und P-Entzüge im zweiten Untersuchungsjahr	60
4.1.3	Erträge und P-Entzüge im dritten Untersuchungsjahr	67
4.1.4	Auswirkungen der Klärschlammdüngung auf die Anbaufolge	72
4.2	Einfluß der Klärschlamm-Düngung auf den Boden	78
4.2.1	Veränderungen des pflanzenverfügbaren Phosphates innerhalb der Anbaufolge	78
4.2.2	Veränderungen des Gesamt-P-Gehaltes innerhalb der Anbaufolge	82
4.2.3	Veränderungen der P-Fraktionen innerhalb der Anbaufolge	85
5	Diskussion	91
5.1	Einfluß der Düngung auf die Erträge	91
5.2	Einfluß der Düngung auf die P-Entzüge	95
5.3	Einfluß der Düngung auf den pflanzenverfügbaren Phosphat-Gehalt im Boden	105
5.4	Einfluß der Düngung auf die Gesamt-P-Gehalte	108
5.5	Einfluß der P-Fällung auf die P-Fraktionierung im Boden	112
6	Ausblick und abschließende Betrachtung	115
7	Zusammenfassung	122
8	Literaturverzeichnis	127
9	Anhang	135

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1:	Klärschlammfall in den Gemeinden Nordrhein-Westfalens (Karte 2)	6
Abb. 2-2:	Mögliche Bindungsformen von Phosphat an Eisen- bzw. Aluminium-Hydroxiden	19
Abb. 2-3:	Schematische Darstellung von Phosphatzuständen und deren mögliche Umwandlungsrichtungen im Boden	20
Abb. 2-4:	Schwermetallgehalte im Klärschlamm in mg/kg Trockensubstanz	28
Abb. 2-5:	Verteilung der Phosphatgehalte der vorliegenden Bodenuntersuchungs-ergebnisse	37
Abb. 2-6:	Phosphat-Versorgung der Ackerböden Nordrhein-Westfalens	38
Abb. 2-7:	Verwertungspotential für Sekundärrohstoffdünger in Nordrhein-Westfalen	39
Abb. 4-1:	Erträge des Einjährigen Weidelgrases in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Varianten	59
Abb. 4-2:	P-Entzug Einjähriges Weidelgras in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Varianten.	59
Abb. 4-3-1:	Erträge Weizen-Korn in Abhängigkeit der Anlagen und Varianten	61
Abb. 4-3-2:	Erträge Weizen-Korn in Abhängigkeit der Substrate und Varianten	61
Abb. 4-4-1:	Erträge Weizen-Stroh in Abhängigkeit der Anlagen und Substrate	63
Abb. 4-4-2:	Erträge Weizen-Stroh in Abhängigkeit der Anlagen und Varianten	63
Abb. 4-5:	P-Entzug Weizen-Korn in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Varianten	64
Abb. 4-6:	P-Entzug Weizen-Stroh in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Varianten	64
Abb. 4-7:	Erträge Mais nach Weizen in Abhängigkeit der Substrate und Varianten	66
Abb. 4-8:	P-Entzug Mais in Abhängigkeit der Substrate und Varianten	66
Abb. 4-9:	Erträge Haferkorn in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Varianten	68
Abb. 4-10:	Erträge Haferstroh in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Varianten	68
Abb. 4-11:	P-Entzug von Haferkorn in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Varianten	70
Abb. 4-12:	P-Entzug von Haferstroh in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Varianten	70
Abb. 4-13:	Erträge Mais in Abhängigkeit der Substrate und Varianten	71
Abb. 4-14:	P-Entzug von Mais in Abhängigkeit der Substrate und Varianten	71
Abb. 4-15:	Relativverträge (%) in Abhängigkeit der Ernten und Substrate	75

Abb. 4-16:	Relativerträge (%) in Abhängigkeit der Substrate und Varianten	75
Abb.4-17:	Jährlicher P-Entzug der Kulturen in Abhängigkeit der Anlagen, Jahre und Substrate	77
Abb. 4-18:	Jährlicher P-Entzug der Kulturen in Abhängigkeit der Jahre, Substrate und Varianten	77
Abb. 4-19:	P-CAL-Gehalt des Bodens in Abhängigkeit der Anlagen, Jahre und Substrate	79
Abb. 4-20:	P-CAL-Gehalt des Sandbodens in Abhängigkeit der Anlagen, Jahre und Varianten	80
Abb. 4-21:	P-CAL-Gehalt des Lößbodens in Abhängigkeit der Anlagen, Jahre und Varianten	80
Abb. 4-22:	Gesamt P-Gehalt des Bodens in Abhängigkeit der Anlagen, Jahre und Substrate	83
Abb. 4-23:	Gesamt-Phosphat-Gehalt des Bodens in Abhängigkeit der Varianten für drei Jahre	83
Abb. 4-24:	P-Fraktionierung des Bodens in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Jahre	86
Abb. 4-25:	Fe/AL-P-Fraktion des Bodens in Abhängigkeit der Jahre, Substrate und Varianten	88
Abb. 4-26:	Ca-P-Fraktion des Bodens in Abhängigkeit der Jahre und Varianten	88
Abb. 4-27:	Org.-P-Fraktion des Sandbodens in Abhängigkeit der Anlagen, Jahre und Varianten	90
Abb. 4-28:	Org.-P-Fraktion des Lößbodens in Abhängigkeit der Anlagen, Jahre und Varianten	90
Abb. 5-1:	Prozentuale Düngerausnutzung in Abhängigkeit der Varianten	98
Abb. 5-2:	Relative P-Verfügbarkeit des Sandbodens in Abhängigkeit der Jahre und Varianten	110
Abb. 5-3:	Relative P-Verfügbarkeit des Lößbodens in Abhängigkeit der Jahre und Varianten	111
Abb. 6-1:	Kreislaufführung von Nähr- und Schadstoffen, schematische Darstellung	120

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Klärschlammengen der Bundesrepublik Deutschland, sowie der Anteil der landwirtschaftlichen Verwertung	4
Tabelle 2-2:	Verbleib der Klärschlämme in Nordrhein-Westfalen (Daten des Kläranlagenkatasters für 1993)	5
Tabelle 2-3:	Ausgewählte EG-Richtlinien sowie nationale Umweltgesetze	8
Tabelle 2-4:	Klärschlammwerte der Klärschlammverordnung und der -EG-Klärschlammrichtlinie	11
Tabelle 2-5:	Grenzwerte der organischen Schadstoffe der Klärschlammverordnung	11
Tabelle 2-6:	Bodenwerte der Klärschlammverordnung und der EG-Klärschlammrichtlinie	12
Tabelle 2-7:	Kenndaten von Klärschlämmen des Zeitraumes 1986 – 1990 (Spannbreite, die von den Bundesländern (alt) angegeben wurden)	15
Tabelle 2-8:	Bodenverbessernde und -schützende Wirkung der Rezyklierung von Siedlungsabfällen (Klärschlämmen und Komposte) in der Landwirtschaft	16
Tabelle 2-9:	Durchschnittliche Nährstoffgehalte in kg/5t Trockensubstanz verschieden aufbereiteter Klärschlämme	17
Tabelle 2-10:	Schwermetalle in der Umwelt	24
Tabelle 2-11:	Jährliche Zufuhr an Schwermetallen durch eine ordnungsgemäße NPK-Mineraldüngung, sowie vom Gesetzgeber festgelegte oder nach Richtwerten empfohlene Menge an Gülle, Kompost und Klärschlamm	24
Tabelle 2-12:	Transferkoeffizient Boden-Pflanze und kritische Konzentrationen von Schwermetallen im Pflanzenmaterial	26
Tabelle 2-13:	Organische Schadstoffe in Klärschlämmen	29
Tabelle 2-14:	Polychlorierte Biphenyl Gehalte verschiedener Böden	32
Tabelle 2-15:	Benz[a]pyren in Böden unterschiedlicher Herkunft, Relativzahlen	33
Tabelle 2-16:	Einstufung der bewerteten Stoffe, Stoffe der Gruppe I, Stoffe mit vorrangiger Relevanz	34
Tabelle 2-17	Beispiele unterschiedlicher Regelungen in Schleswig-Holstein und Sachsen	35
Tabelle 3-1:	Ergebnisse der Klärschlammuntersuchungen nach Klärschlammverordnung	41
Tabelle 3-2:	Übersicht der Varianten beider Anlagen	42
Tabelle 3-3:	Fraktionierung der Klärschlämme [mg P/100 g Boden] und pH-Wert	43
Tabelle 3-4:	Allgemeine bodenchemische und -physikalische Eigenschaften des Standortes Versuchsgut Welver-Merklingsen	46

Tabelle 3-5:	Witterungsverlauf im Kreis Soest und Kreis Steinfurt	46
Tabelle 3-6:	Allgemeine Bodenkenndaten	47
Tabelle 3-7:	Phosphatgehalte der Substrate	48
Tabelle 3-8:	P-Fraktionierung der Substrate	49
Tabelle 3-9:	Versuchsanlagen	49
Tabelle 3-10:	Einwaage Klärschlamm bzw. mineralischer Dünger beider Anlagen	50
Tabelle 3-11:	Aussaattermine und -stärken der Kulturen beider Versuchsanlagen	51
Tabelle 3-12:	Düngergaben (Angaben in g pro Gefäß)	52
Tabelle 3-13:	Pflanzenschutzmaßnahmen in beiden Versuchsanlagen	52
Tabelle 3-14:	Wetterdaten für 1995-1998 (Ermittelt auf dem Versuchsgut Merklingen)	54
Tabelle 4-1:	Erträge (%) in Abhängigkeit der Ernten, Substrate und Varianten	73
Tabelle 5-1:	Erträge (%) in Abhängigkeit der Varianten (2. Spalte) und der Substrate und Varianten (3. und 4. Spalte)	92
Tabelle 5-2:	P-Entzüge (%) in Abhängigkeit der Ernten, Substrate und Varianten	96
Tabelle 5-3:	P-Bilanz [mg P/100 g Boden] sowie Effizienz [%] von Phosphat in Abhängigkeit der Substrate und Varianten	101
Tabelle 5-4:	P-Bilanz [mg P/100 g Boden] in Abhängigkeit der Substrate und Varianten	109
Tabelle 6-1:	Vergleich der Vorsorgewerte für Metalle in Böden, durchschnittliche Schwermetallgehalte von Bioabfällen und Klärschlämmen, Grenzwerte für Metalle im Klärschlamm und Boden und Schwermetallgehalte der eingesetzten Klärschlämme aus dem Kreis Soest.	118
Tabelle 7-1:	Versuchsserien zur Überprüfung der P-Wirkung in Klärschlämmen	123

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
Abb.	Abbildung
AbfKlärV	Klärschlammverordnung
ÄD	Äquivalentdurchmesser
AG	Anfangsgehalt
A _h	huminstoffakkumulierter Mineralhorizont im Oberboden
Al	Aluminium
A _{IS}	lessivierter und sequioxidakkumulierter Mineralhorizont im Oberboden
AOX	adsorbierbare organische Halogenverbindungen
A _p	gepflügter Mineralhorizont im Oberboden
ATV	Abwassertechnische Vereinigung
B[a]p	Benz[a]pyren
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundesbodenschutzverordnung
BGBI	Bundesgesetzblatt
B _U S _d	tonakkumulierter und marmorierter Mineralboden im Unterboden
B _U S _w	tonakkumulierter und nassgebleichter Mineralhorizont im Unterboden
C	Kohlenstoff
Ca(H ₂ PO ₄) ₂	Calciumdihydrogenphosphat
CAL	Calcium-Aacetat-Lactat-Methode
CaO	Calciumoxid, Branntkalk
Ca-P	Calcium-Phosphat-Fraktion
Cd	Cadmium
CO ₂	Kohlendioxid
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
D	mineralischer Dünger
DE	Dunkeinheit
DS	Durchschnitt
E	Phosphat-Entzug der gedüngten Variante
E _o	Phosphat-Entzug der ungedüngten Variante
EG	Europäische Gemeinschaft
EW	Einjähriges Weidelgras
Fe	Eisen
Fe/Al-P	Eisen-Aluminium-Phosphat-Fraktion
FeCl ₃	Eisen-III-Chlorid
g	Gramm
GD	Grenzdifferenz
GH	Gesamthochschule
GW	Grenzwert
ha	Hektar
HCH	Hexachlorcyclohexan
Hg	Quecksilber
HK	Haferkorn
HPO ₄ ²⁻	Orthophosphat, sekundäres Phosphat
H ₂ PO ₄ ⁻	Orthophosphat, primäres Phosphat, Monophosphat
HS	Haferstroh
H ₂ SO ₄	Schwefelsäure
Kf	Keimfähigkeit
kg	Kilogramm
K ₂ O	Kaliumoxid
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
KS	Klärschlamm

l	Liter
LUFA	Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt
m^3	Kubikmeter
mg	Milligramm
MgO	Magnesiumoxid
MKS	Maul- und Klauenseuche
MW	Mais nach Weizen
N	Stickstoff
NaAlO ₂	Natriumaluminat
NaOH	Natronlauge
ng	Nanogramm
NH ₄ -N	Ammoniumstickstoff
NN	Normalnull
O	Sauerstoff
Org.-P	Organische Phosphat-Fraktion
p	Irrtumswahrscheinlichkeit
P	Phosphor
PAK	polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
P(H ₂ O)	Wassermethode zur Bestimmung der Phosphat-Versorgung von Böden
P ₂ O ₅	Phosphor(V)-oxid, Diphosphorpentoxid
Pb	Blei
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD/PCDF	Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane
R	Reinheit
S	Sand
SZ	Szenario
t	Tonne
TA	Technische Anleitung
TE	Toxizitätsäquivalent
TKG	Tausendkorngewicht
TS	Trockensubstanz
UL	Umweltgerechte Landwirtschaft
Ut3	toniger Schluff
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungseinrichtungen
Wdh.	Wiederholung
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WHK	Wasserhaltekapazität
WK	Weizenkorn
WS	Weizenstroh
Zn	Zink

1 Einleitung und Zielsetzung

Durch die veränderten gesetzlichen Bestimmungen und durch den quantitativen Zuwachs von Klärschlamm gewinnt die ökologisch und ökonomisch sinnvolle Verwertung von Klärschlamm zunehmend an Bedeutung. Die Deponierung in ihrer bisherigen Form ist durch die Vorgaben der TA Siedlungsabfall vom 14. Mai 1993 nicht mehr zulässig. Im Jahre 2005 läuft die derzeitig noch geltende Übergangszeit aus, und jeder Klärschlamm muß die gültigen Gehalte der TA Siedlungsabfall einhalten. Für Klärschlamm ist der Parameter des Glühverlustes nur einzuhalten, wenn zuvor ein Behandlungsschritt dazwischen geschaltet wird. Dies könnte u.a. die thermische Verwertung sein.

Neben dieser Entsorgungsalternative steht jedoch weiterhin die landwirtschaftliche Verwertung zur Verfügung. Die Verwertung der organischen Substanz im Sinne der Kreislaufführung Boden - Pflanze - Nahrungsmittel - Mensch - Klärschlamm - Boden ist eindeutig zu bevorzugen, sofern die Sekundärrohstoffdünger aus landwirtschaftlicher Sicht unbedenklich sind.

Ein Konzept, welches die verschiedenen pflanzenbaulichen Problemfelder verbindet, ist im Sinne des integrierten Umweltschutzes und der Kreislaufwirtschaft erforderlich. Eine Förderung des Klärschlammes als Sekundärrohstoffdünger kann jedoch nur sinnvoll erfolgen, wenn es zu keinen Ertragsausfällen, erkenntlich an Überschuß- bzw. Mangelsymptomen in Pflanzenbeständen, kommt. Gezielte Dünge- und Anwenderberatungen für die Landwirte, wie sie vereinzelt erfolgen, sind daher zu begrüßen. Diese Beratungen können jedoch nur sinnvoll sein, wenn Fragen der Anrechenbarkeit und Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe des Klärschlammes geklärt sind.

Der Anbau landwirtschaftlicher Kulturpflanzen muß sowohl ökologischen als auch ökonomischen Kriterien folgen. Ausgeglichene Nährstoffbilanzen und die am Bedarf orientierte Nährstoffversorgung erfordern aber die Beachtung grundsätzlicher Aspekte der umweltorientierten Landbewirtschaftung (Integrierter Pflanzenbau) durch praxisbezogene Versuchsaktivitäten.

Der limitierende Faktor bei der landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlamm ist das Phosphat, da die Böden gut bis sehr gut damit versorgt sind. Ein Problem des Phosphates liegt in der Pflanzenverfügbarkeit. In einen Boden eingebrachtes lösliches Phosphat lässt die

P-Konzentration zunächst stark ansteigen, um dann im Laufe der Zeit wieder stark abzunehmen. Die Phosphationen werden zunehmend an der Bodenmatrix gebunden und treten aus der labilen Phase in die stabile Phase über. Dieser Prozess wird als P-Alterung bezeichnet. Diesem Prozess unterliegt auch Düngerphosphat, das im Jahr der Anwendung nur selten zu mehr als 20 % ausgenutzt wird [WENDT et al., 1996]. Dies bewahrt Phosphate weitgehend vor der Auswaschung.

Damit gewinnt die P-Freigabe und die Anrechenbarkeit bei Düngeempfehlungen mit Klärschlamm an Bedeutung. Neben der P-Versorgung und dem pH-Wert des Bodens wird die P-Freigabe maßgeblich durch die angewandte P-Fällungsmethode im Klärwerk bestimmt. Bei einer Al- und Fe-Fällung entstehen schwerlösliche Al- bzw. Fe-Phosphate, die begrenzt pflanzenverfügbar sind.

Ziel dieser Arbeit ist die Überprüfung der Wirksamkeit von Klärschlamm als Sekundärrohstoffdünger im Vergleich zu mineralischen Phosphatdüngern. Dabei soll die Phosphat-Wirkung des Klärschlammes in Abhängigkeit von unterschiedlichen Fällungsmethoden der Kläranlagen und unterschiedlicher Böden untersucht werden.

Mit Hilfe von spezifischen Untersuchungen, die im Fachbereich Agrarwirtschaft der Universität-Gesamthochschule Paderborn in Soest erfolgten, sollten deshalb folgende Arbeitshypothesen diskutiert werden:

- Die P-Wirkung im Klärschlamm auf den Ertrag ist der Mineraldüngung mit Superphosphat ebenbürtig.
- Die P-Entzüge der unterschiedlich aufbereiteten Klärschlämme sind vergleichbar mit den P-Entzügen der Mineraldüngung mit Superphosphat. Eine Anrechnung auf die Düngung kann erfolgen.
- Die P-Fällung der Klärschlämme mit Eisen, Aluminium und Eisen mit Kalkung hat einen Einfluß auf den Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphat im Boden.
- Die Entwicklung der P-Gesamt-Gehalte der Klärschlamm-Varianten ist mit der Mineraldüngung vergleichbar.
- Die eisen- oder aluminiumgefällten Klärschlämme wirken sich im Boden nur auf die Eisen/Aluminium Fraktion aus, dagegen haben die gekalkten und eisengefällten Klärschlämme noch zusätzlich einen Einfluß auf die Calcium-Fraktion im Boden.

2 Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm

Die landwirtschaftliche Nutzung von Klärschlamm wird bereits seit Jahrhunderten praktiziert. Seit den 70er Jahren mit steigendem Umweltbewußtsein begann die Diskussion der umweltverträglichen Verwertung von Klärschlamm in der Landwirtschaft. Seitdem sind zum einen die Anforderungen an die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm gestiegen, zum anderen änderte sich die Zusammensetzung des Klärschlammes selber. Mit gestiegenem Klärschlammaufkommen der vergangenen Jahre stellt sich die Frage, ob geeignete landwirtschaftliche Flächen für eine umweltverträgliche Verwertung zur Verfügung stehen, die auch die gesetzlichen Anforderungen erfüllen.

2.1 Entstehung von Klärschlamm

Klärschlamm fällt beim Reinigungsprozess von Abwasser in der Kläranlage an. Nach den verschiedenen Reinigungsstufen, die das Abwasser in der Kläranlage durchläuft, entstehen drei verschiedene Arten von Rohschlamm. Mit Hilfe der Schwerkraft fällt der Primärschlamm bei der mechanischen Reinigungsstufe an, nachdem das Abwasser Rechen und Sandfang durchlaufen hat. Der Sekundärschlamm stammt aus der biologischen Stufe und wird auch als Überschüßschlamm bezeichnet. Durch Stoffwechselprozesse der Mikroorganismen werden die organischen Stoffe aus dem Abwasser in gelöster oder kolloider Form aufgenommen, von den Mikroorganismen veratmet und in feste Substanz umgewandelt. [ATV, 1996] Im Nachklärbecken setzen sich diese Teile ab und werden als Sekundärschlamm, mit einem hohen Anteil an organischer Substanz entfernt. Der Tertiärschlamm entsteht vor allem durch chemische Fällungs- oder Flockungsmaßnahmen, bei denen auch u.a. Phosphate gefällt werden.

Die Rohschlämme werden aufgrund ihres Wassergehaltes in Naß-, Dick- und Preßschlamm eingeteilt. Der Naßschlamm weist einen Feststoffgehalt von weniger als 5 % auf. Durch Eindicken erhält man einen Dickschlamm, der mit einem Feststoffgehalt von 5 - 15 % noch pumpfähig und flüssig ist. Mit Hilfe von Zentrifugen und Pressen kann der Feststoffanteil auf 15 - 40 % angehoben werden, dieser Preßschlamm erhält dadurch eine stichfeste bis krümmelige Konsistenz. Er ist ein teils ausgefaulter bzw. stabilisierter Klärschlamm, der mit Kalk oder Polymeren versetzt worden sein kann. Ein streufähiger bis staubförmiger Klärschlamm mit einem Feststoffanteil von 40 - 100 % kann nur durch verschiedene Trocknungsverfahren erreicht werden. [TABARASAN, 1977; AICHLERGER UND TAUBER, 1996]

Die Art und Menge von Klärschlamm ist abhängig von der Abwasserbelastung, von den unterschiedlichen Prozessen, die entsprechend dem Reinigungsziel gewählt werden. Dies hat zur Folge, daß Klärschlamm einer großen Vielfalt bezüglich der Schlammmeinige und -beschaffenheit unterliegen. [ATV, 1996] Im Laufe der Jahre stieg daher das Klärschlammaufkommen stetig an, in den neunziger Jahren blieb es konstant bei ca. 2,7 Mill. t Trockensubstanz. Anfang der neunziger Jahre wurde für das Jahr 2000 ein Aufkommen von fast 4 Mill. t Trockensubstanz Klärschlamm geschätzt, die jedoch nach den Werten von 1998 eher unwahrscheinlich sind (vgl. dazu Tabelle 2-1). Die Raten für die landwirtschaftliche Verwertung haben seit 1957 zunächst langsam, ab Mitte der Achtziger Jahre stärker abgenommen und pendelten sich auf einem Niveau zwischen 25 - 30 % ein. Das Jahr 1998 liegt mit einer Verwertungsrate von 45 % weit über dem jährlichen Durchschnitt und könnte der Beginn der Steigerung der landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlamm darstellen.

In Nordrhein-Westfalen fielen im Jahr 1993 582.000 t Klärschlamm an, davon wurden innerhalb von Nordrhein-Westfalen ca. 98.000 t TS und außerhalb ca. 33.000 t TS landwirtschaftlich verwertet (Tabelle 2-2). Fast im gleichen Umfang wie in der Landwirtschaft

Tabelle 2-1 Klärschlammengen der Bundesrepublik Deutschland, sowie der Anteil der landwirtschaftlichen Verwertung [ATV, 1996; BMU, 1992; LINDNER, 1995; N.N., 1998b; BMU in: KLUGE UND EMBERT, 1996; BIRER, ET AL. 1994 in: HENNING 1995]

Jahr	Klärschlamm- menge [Mill. t TS]	Landwirtschaftliche Verwertung [Mill. t TS]	[Prozent]
1957 ¹	0,6	0,3	50
1963 ¹	1,17	0,5	43
1969 ¹	1,56	0,75	48
1975 ¹	1,9	0,8	42
1983 ¹	2,2	0,75	34
1986 ²	2,00	0,48	24
1987 ²	2,10	0,59	28
1988 ²	2,09	0,54	26
1989 ²	2,21	0,55	25
1990 ²	2,45	0,71	29
1991 ⁶	3,0	0,82	27
1992 ³	2,7	0,73	27
1998 ⁴	2,7	1,21	45
2000 ⁵	3,8	1,3	34

¹ATV, 1996

⁴N.N, 1998b:

²BMU, 1992

⁵BMU in: KLUGE UND EMBERT, 1996 geschätzt

³LINDNER, 1995

⁶BIRER, ET AL. 1994 in: HENNING, 1995

Tabelle 2-2: Verbleib der Klärschlämme in Nordrhein-Westfalen (Daten des Kläranlagenkatasters für 1993) [nach WERNER UND BRENK, 1997]

Landwirtschaftliche Verwertung	[%]	nicht landwirtschaftliche Verwertung	[%]
Landwirtschaft in Nordrhein-Westfalen	17	Deponie	25
Landwirtschaft außerhalb von Nordrhein-Westfalen	6	Verbrennung	31
Landschaftsbau in Nordrhein-Westfalen	15	Zwischenlagerung	4
Landschaftsbau außerhalb von Nordrhein-Westfalen	2		
Summe	40	Summe	60

findet Klärschlamm auch im Landschaftsbau Verwendung. 31 % des anfallenden Klärschlammes werden in Nordrhein-Westfalen thermisch verwertet und 25 % gelangten im Jahre 1993 noch zur Deponie. Da der Entsorgungsweg Deponie durch die Vorgaben der TA-Siedlungsabfall ohne Vorbehandlung des Klärschlammes ab dem Jahre 2005 nicht mehr beschritten werden kann, besteht ein gewisser Handlungsbedarf für die Gemeinden.

Betrachtet man die Verteilung des Klärschlammanfalles innerhalb von Nordrhein-Westfalen (Abbildung 2-1), so ist es nicht verwunderlich, daß in den Ballungsgebieten des Rhein- und Ruhrgebietes das höchste Aufkommen zu finden ist. Dagegen sind in bevölkerungsärmeren Gegenden, wie z.B. dem Sauerland, geringere Mengen an Klärschlamm zu entsorgen.

Eine Neukonzeption der Klärschlammensorgung ist aufgrund der geänderten gesetzlichen Voraussetzungen in vielen Gemeinden notwendig geworden. Alternative Entsorgungswege wie z.B. die thermische Verwertung, die eine getrennte Verbrennung, Mitverbrennung bzw. Mitvergasung sein kann, oder auch die industrielle Nutzung in Asphaltmischchanlagen bzw. bei der Zementherstellung wurden eingeschlagen. Aber auch die umweltverträgliche Verwertung von Klärschlamm in der Landwirtschaft wird neu diskutiert, auch weil sie eine preiswerte Alternative zu den anderen Entsorgungswegen darstellt.

Die Qualität des Klärschlammes steht in direktem Zusammenhang mit der Qualität des eingeleiteten Abwassers. Es wird unterschieden in Direkt- und Indirekteinleiter. Die Direkeinleiter leiten ihr Abwasser nicht in das öffentliche Kanalnetz ein, sondern das gereinigte Wasser fließt direkt in den Vorfluter. Dagegen wird von den Indirekeinleitern das Abwasser in das öffentliche Kanalnetz eingeleitet. Der Klärschlamm der öffentlichen Kläranlagen wird daher maßgeblich durch die Qualität des Abwassers und des Kanalnetzes beeinflußt. Es gibt zwei Arten von Indirekeinleitungen. Dies ist zum einen die

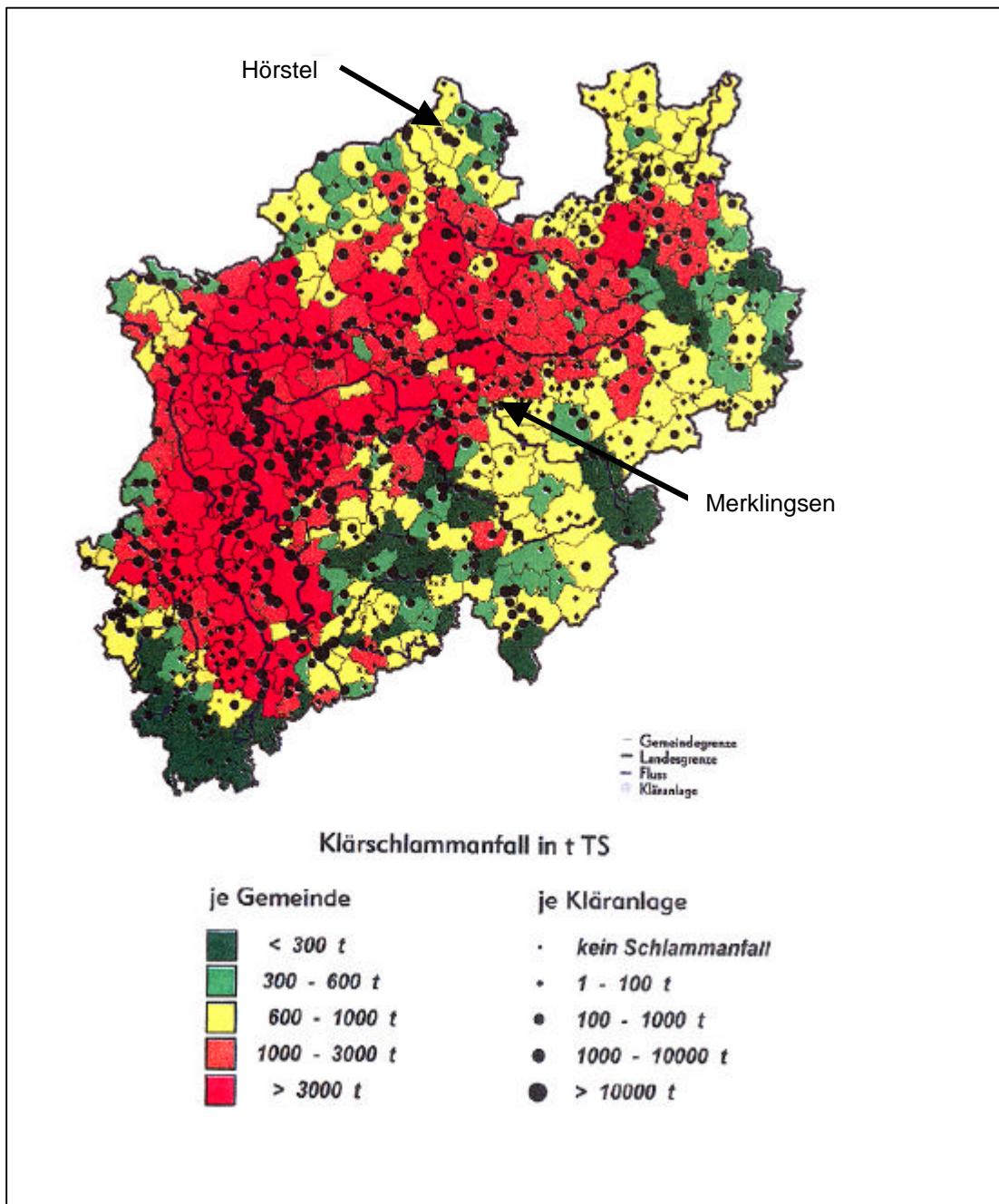


Abbildung 2-1: Klärschlammanfall in den Gemeinden Nordrhein-Westfalens
[nach WERNER UND BRENK, 1997]

Punkteinleitung der gewerblichen oder industriellen Betriebe, die ihr Abwasser in das öffentliche Kanalnetz einleiten. Durch die Indirekteinleitervorschrift, die Grenzwerte für das einleitende Abwasser festlegt, hat sich die Qualität des Abwassers und damit des Klärschlammes in den vergangenen Jahren verbessert. Zum anderen gelangt das Abwasser aus privaten Haushaltungen und Oberflächenwasser in das Abwassersystem. Diese diffusen Einleitungen können für die Kläranlagen problematisch sein, da Art und Menge an möglichen Schadstoffen nicht bekannt sind, nicht zurückverfolgt und verhindert werden können.

Dies soll an einigen Beispielen verdeutlicht werden. 1985 betragen die Bleigehalte der Kläranlage Düsseldorf - Nord 500 mg Pb/kg TS Klärschamm. Das Blei kam zu ca. 70 % durch die Entwässerung der Oberflächen in das Abwasser. 1985 fuhren noch 99 % der Personenkraftwagen mit verbleitem Kraftstoff. Nach Einführung des unverbleiten Kraftstoffes benötigten 1991 nur noch 30 % der Kraftfahrzeuge verbleiten Kraftstoff. Daraufhin sanken auch im Abwasser und somit im Klärschlamm der Bleigehalt auf 130 mg Pb/kg TS Klärschlamm. Die Bleigehalte konnten durch diese gesetzlichen Maßnahme stark reduziert werden. Eine Reduzierung der Bleigehalte wurde auch durch das Verbot von Bleirohren bei der Wasserinstallation herbeigeführt. Inzwischen werden überwiegend verkupferete und verzinkte Wasserleitungen und Dachrinnen eingesetzt. Damit sind jedoch die Kupfer- und Zinkgehalte im Klärschlamm auf konstanten Niveau geblieben bzw. angestiegen. Eine Alternative stellt nach heutigem Wissenstand Chromnickelstahl dar, der jedoch aufgrund der höheren Kosten abgelehnt wird. Eine Änderung könnte nur durch den Gesetzgeber herbeigeführt werden. [FRIEGER, 1993; WITTE, 1994a] Aufgrund des 1981 in der Bundesrepublik Deutschland erlassenen Gebrauchsverbotes von Polychlorierten Biphenylen (PCB) haben sich die PCB-Gehalte im Abwasser reduziert, sind aber weiterhin im Klärschlamm nachweisbar. [WITTE, 1994a]

Diese Beispiele machen deutlich, dass alle Stoffe, die nicht in geschlossenen Systemen gehandhabt werden, in die Umwelt und von dort auch in den Klärschlamm gelangen. Einige dieser Inhaltsstoffe sorgen bei der späteren Reinigung des Abwassers für Probleme bzw. bei der Entsorgung der Klärschlämme. Auch nach einem Verbot gefährlicher Stoffe sind diese noch lange Zeit später im Klärschlamm nachweisbar. Politische Entscheidungen sind daher nötig, um eine Entlastung des Klärschlammes sowie der Umwelt zu erreichen. [FRIEGER, 1993]

2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

Für die Verwertung von Klärschlamm insbesondere auch die landwirtschaftliche Verwertung sind in den vergangenen Jahren eine Vielzahl von Umweltgesetzen erlassen worden. In Tabelle 2-3, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt, sind Umweltgesetze chronologisch geordnet, bevor anschließend auf einige nationale Gesetze, die bei der landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlamm zu beachten sind, eingegangen wird. Neben den nationalen Umweltgesetzen, sind sowohl die diversen Verwaltungsvorschriften als auch internationale Gesetze und Vereinbarungen zu beachten.

Tabelle 2-3: Ausgewählte EG-Richtlinien sowie nationale Umweltgesetze

Jahr	EG-Richtlinien¹	Gesetz/Verordnung Bundesrepublik Deutschland
1972		Abfallbeseitigungsgesetz ²
1977		Düngemittelgesetz ²
1982		Klärschlammverordnung ²
1984	EG-Abfallverbringungs-Richtlinien (84/631/EWG)	
1986	EG-Klärschlamm-Richtlinie (86/278/EWG)	Abfallgesetz ² Wasserhaushaltsgesetz ²
1989	Basler Übereinkommen	Düngemittelgesetz (Novellierung) ²
1990		Wasserhaushaltsgesetz (Novellierung) ²
1991	EG-Abwasser-Richtlinie (91/271/EWG) EG-Nitrat-Richtlinie (91/676/EWG)	Düngemittelverordnung ²
1992		Klärschlammverordnung (Novellierung) ²
1993	EG Abfallverbringungs-verordnung	TA Siedlungsabfall ¹
1994	Ausführungsgesetz zum Basler Übereinkommen	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz ¹
1995		Düngemittelverordnung ³
1996		Düngeverordnung ³
1997		Düngeverordnung (Novellierung) ³ Düngemittelverordnung (Novellierung) ³
1999		Klärschlamm-Entschädigungsgesetz ⁴ Bundesbodenschutzgesetz ⁵

¹ ATV-HANDBUCH, 1996;

⁴ N.N., 1998c

² UMWELT-RECHT, 1992

⁵ OTTO, 1999

³ KLUGE UND EMBERT, 1996

2.2.1 Abfallgesetze

Mit dem Abfallbeseitigungsgesetz von 1977 begab sich die Bundesrepublik Deutschland in eine Vorreiterrolle in Europa. Klärschlamm wurde als "industrielles Nebenprodukt" klassifiziert und erhielt eine Sonderstellung, wodurch nach § 15 AbfbesG. eine eigene Verordnung für das Produkt Klärschlamm erfolgen konnte. Die Umsetzung erfolgte durch die Klärschlamm-Verordnung im Jahre 1982. [GOSSOW, 1992]

Neun Jahre später hatte sich das Umweltbewußtsein soweit verschärft, daß ein neues Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (Abfallgesetz) erlassen wurde. Die neue Sichtweise wird im Namen des Gesetzes erkennbar, es ging nicht mehr um eine Beseitigung der Abfälle, sondern die Abfälle sollten gezielt vermieden, vermindert oder verwertet werden. Erst wenn dies nicht mehr möglich war, konnte eine umweltschonende Beseitigung der Abfälle erfolgen.

1994 wurde u.a. durch die EG-Richtlinie über Abfälle vom 21. Mai 1991, die EG einheitliche Abfallbegriffe vorgibt, eine weitere Novellierung des Abfallgesetzes notwendig. Das Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (KrW-/AbfG BGBl. I S. 2705) greift die Definition der EG-Richtlinie auf, danach erfolgt eine Differenzierung in Abfälle zur Verwertung und in Abfälle zur Beseitigung. Im Bezug auf Klärschlamm bedeutet dies, daß Klärschlamm, soweit dies möglich ist, vermieden werden soll. Da aber stets Klärschlamm anfallen wird, ist er möglichst vollständig in Form einer Rückführung in den Stoffkreislauf der Natur zu verwerten. Klärschlamm ist dann ein Sekundärrohstoffdünger und unterliegt neben dem Abfallrecht auch dem Düngerecht. Als weitere Möglichkeit ist eine energetische Verwertung von Klärschlamm zulässig, jedoch nur dann, wenn der Klärschlamm einen höheren Heizwert als 11.000 kJ pro kg TS Klärschlamm aufweist. Dies wird jedoch von getrocknetem Klärschlamm nicht immer erreicht.

Von dem Gebot der Verwertung darf nur dann abgewichen werden, wenn die Verwertung nicht wirtschaftlich zumutbar ist oder wenn die Beseitigung die umweltverträglichste Handhabung darstellt. Das heißt, erst wenn Klärschlamm weder vermieden noch verwertet werden kann, ist nach dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz eine Beseitigung erlaubt. [N.N., 1998a] Die Beseitigung von Klärschlämmen erfolgte lange Zeit in Monodeponien oder in Mülldeponien. Die Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Sied-

lungsabfall), die seit dem 01.06.1993 in Kraft ist, verlangt ab dem Jahre 2005, daß der Glühverlust von Abfällen maximal 5 % nicht übersteigen darf. Um die Ablagerungsbedingungen der TA Siedlungsabfall einhalten zu können, ist eine thermische Vorbehandlung nötig.

2.2.2 Wasserhaushaltsgesetz

Der Geltungsbereich des Gesetzes zur Ordnung des Wasserhaushaltes (BGBl. 1990, I S.205) besteht für oberirdische Gewässer, Küstengewässer sowie das Grundwasser. Zwei Paragraphen sind von besonderer Bedeutung. Dies ist zum einen § 7a WHG, der die Anforderungen an das Einleiten von Abwasser regelt und dazu beitragen soll, daß überhöhte Nährstoff- und Schadstoffbelastungen nicht in das Wasser gelangen. Zum anderen ist dies § 22 WHG, der die Haftungsfrage bei Änderung der physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit des Wassers klärt. Landwirte sind verschuldensunabhängig haftbar für unvorhersehbare Schäden zu machen. Neben dem Wasserhaushaltsgesetz gibt es weitere Verwaltungsvorschriften, die die Mindestanforderungen an die Reinhaltung des Wassers regeln und berücksichtigt werden müssen.

2.2.3 Klärschlammverordnung

Die erste Klärschlammverordnung (BGBl. I , S. 734) trat 1982 in Kraft und regelte die Aufbringung von Klärschlamm in die Landwirtschaft. Es galt u.a. gewisse Grenzwerte für Schwermetalle im Sinne der Vorsorge einzuhalten. Im Gesetz war gleichzeitig eine fünfjährige Begrenzung enthalten, damit die Schwermetallgrenzwerte überarbeitet und an die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse angepasst werden konnten. Die Novellierung erfolgte 1992 und war u.a. auch notwendig geworden, um die EG-Richtlinie 86/278/EWG des Rates vom 12. Juni 1986 über den Schutz der Umwelt und insbesondere der Böden bei der Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft umzusetzen. Diese Richtlinie hatte zum primären Ziel eine sichere Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft zu garantieren. Zum anderen beinhaltet sie erste gemeinsame europäische Maßnahmen zum Schutz des Bodens. Durch die Novellierung erfolgte eine Anpassung der Schwermetallwerte, wie aus der Tabelle 2-4 zu entnehmen ist. Die Grenzwerte von Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Quecksilber und Zink sind in der Klärschlammverordnung von 1992 nach unten

Tabelle 2-4: Klärschlammwerte der Klärschlammverordnung und der EG-Klärschlammrichtlinie [ATV, 1996]

Metall	AbfKlärV vom 25.06.1982	AbfKlärV vom 15.04.1992	EG-Richtlinie 86/278/EWG	
	[mg/kg m _T]	[mg/kg m _T]	Anhang I B [mg/kg m_T]	Anhang I C² [kg/ha · a]
Blei	1200	900	750-1200	15
Cadmium	20	10/5 ¹	20-40	0,15
Chrom	1200	900	1000-1500	3 ³
Kupfer	1200	800	1000-1750	12
Nickel	200	200	300-400	3
Quecksilber	25	8	16-25	0,1
Zink	3000	2500/2000 ¹	2500-4000	30

¹ Wert gilt für Aufbringung auf leichte Böden mit einem Tongehalt von < 5% und auf Böden mit pH-Wert zwischen 5-6 Leichte Böden: Sande, anlehmiger Sand, lehmiger Sand im Sinne des Schätzrahmens der Bodenschätzung

² Frachtgrenzwerte in kg/ha und Jahr (Zehnjahres-Mittelwerte)

³ geplant

korrigiert werden. Für organische Schadstoffe (Tabelle 2-5) wurden erstmalig Grenzwerte eingeführt. Dabei stand der vorsorgliche Bodenschutz im Vordergrund und nicht die Annahme, daß ein Transfer vom Boden in die Pflanze erfolgt. [ATV, 1996]

Im Gegensatz zur EG-Richtlinie, die keine Mengenbegrenzung vorgibt, enthält die Klärschlammverordnung eine Begrenzung der durch Klärschlamm zugeführten Nährstoff- und Schadstofffracht pro Hektar und Jahr. Es darf maximal eine Ausbringung von 5 t TS/ha · 3a erfolgen, zudem wird durch die Düngemittelanwenderverordnung die Nährstoffmenge begrenzt. Durch die Bodengrenzwerte wird sichergestellt, daß vorbelastete Böden von weiteren Schadstoffzufuhren ausgeschlossen werden. Tabelle 2-6 stellt die nationalen und EG-Gehalte für den Boden dar. Die Bandbreite der Grenzwerte der EG-Richtlinie ergibt sich

Tabelle 2-5: Grenzwerte der organischen Schadstoffe der Klärschlammverordnung [UMWELT-RECHT, 1992]

Schadstoffe	AbfKlärV vom 15.04.1992
PCB ¹ Komponenten 28, 52, 101, 138, 153, 180	0,2 mg/kg m _T
PCDD/PCDF ²	100 ng TCDD-T/kg m _T ⁴
AOX ³ , Summenparameter	500 mg/kg m _T

¹ polychlorierte Biphenyle

² polychlorierte Dibenzodioxine/Dibenzofurane

³ Summe der halogenorganischen Verbindungen

⁴ T - Toxizitätsäquivalent

Tabelle 2-6: Bodenwerte der Klärschlammverordnung und der EG-Klärschlammrichtlinie [ATV, 1996]

Metall	AbfKlärV vom 25.06.1982 [mg/kg Boden]	AbfKlärV vom 15.04.1992 [mg/kg Boden]	EG-Richtlinie 86/278/EWG [mg/kg Boden]
Blei	100	100	50-300
Cadmium	3	1,5/1 ¹	1-3
Chrom	100	100	100-150 ²
Kupfer	100	60	50-140
Nickel	50	50	30-75
Quecksilber	2	1	1-1,5
Zink	300	200/150 ¹	150-300

¹ Wert gilt für Aufbringung auf leichte Böden mit einem Tongehalt von < 5% und auf Böden mit pH-Wert zwischen 5-6 Leichte Böden: Sande, anlehmiger Sand, lehmiger Sand im Sinne des Schätzrahmens der Bodenschätzung

² geplant

aus den unterschiedlichen klimatischen und auch geologischen Verhältnissen der europäischen Böden. Für die Bundesrepublik Deutschland werden die Bodenwerte nur bei Cadmium und Zink entsprechend dem Ton- und pH-Gehalt im Boden unterschieden.

Um besonders empfindliche landwirtschaftliche Nutzungen zu schonen, wurde in der Klärschlammverordnung eine Reglementierung bzw. ein Verbot für die Klärschlammausbringung auf Flächen des Obst- und Gemüsebaues, des Dauergrünlandes, der Flächen in den Wasserschutzzonen I und II und Uferrandstreifen ausgesprochen.

Zur Einhaltung der Grenzwerte sind Bodenproben und Klärschlammuntersuchungen in regelmäßigen Abständen vorgegeben (Bodenuntersuchungen im Abstand von 10 Jahren, Klärschlammuntersuchungen im Abstand von längstens sechs Monaten, bzw. 2 Jahre für PCB und PCDD/PCDF). Eine Düngeberatung wird vorgeschrieben, um die Nährstoffe des Klärschlammes optimal in die Düngeplanung einzubeziehen. Ein Nachweis- und Lieferscheinsystem soll ermöglichen, daß kein mit Schadstoffen belasteter Klärschlamm auf landwirtschaftliche Flächen aufgebracht wird.

Kritik an der Klärschlammverordnung wird von Seiten des Verbandes Deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungseinrichtungen (VDLUFA) geübt. Sie halten die Grenzwerte bei Schwermetallen für nicht ausreichend an den Bodenarten und -typen, sowie an den geogenen Ausgangsbedingungen orientiert. So liegen die Gehalte für Cadmium und Nickel im Jura über denen der Bodengehalte der Klärschlammverordnung, und

eine Ausbringung von Klärschlamm wäre dadurch nicht möglich. Der Verband schlägt daher vor, daß der Status Quo der Schadstoffgehalte des Bodens beibehalten werden soll, d.h. es darf grundsätzlich zu keiner weiteren Überschreitung der regionalen und standorttypischen Referenzwerte im Boden kommen. [VDLUFA, 1996]

2.2.4 Klärschlamm-Entschädigungsfonds

Der gesetzliche Klärschlamm-Entschädigungsfond (BGBl. I vom 28. Mai 1998) löst den Klärschlammfonds auf freiwilliger Basis ab, der seit dem 01.01.1990 in Kraft war und eine Vereinbarung zwischen den Klärschlammabgebern (Kommunen bzw. Kläranlagenbetreibern) und den Klärschlammabnehmern (Landwirten) darstellte, um das Risiko, das über den Rahmen der Klärschlammverordnung hinausging, abzudecken. Bei der Beschußfassung zum Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz hat der Gesetzgeber eine Ermächtigung zum Erlaß einer Rechtsverordnung über einen Entschädigungsfonds in das Düngemittelgesetz (§ 9) festgelegt [BERGS, 1998]. Dieser ist seit dem 01.01.1999 in Kraft und wird von der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung verwaltet. Die Kläranlagenbetreiber zahlen einen Beitrag von 20 DM/Tonne Trockenmasse für landwirtschaftlich genutzten Klärschlamm ein, bis die Grundausstattung des Fonds einen Beitrag von 125 Millionen DM erreicht hat. Bei Bedarf kann dieses Fondvolumen verdoppelt werden. Geschädigte Landwirte können maximal eine Entschädigung von 5 Millionen DM pro Schadensfall erhalten, wobei ein Eigenanteil von 1125 DM je Schadensfall selbst zu tragen ist. [ESCH, 1999]

2.2.5 Düngerecht

Im Düngemittelgesetz wurde 1996 der Begriff des Sekundärrohstoffdüngers, zu dem auch Klärschlamm zählt, eingeführt. Dadurch unterliegen alle Stoffe aus Siedlungsabfällen, die landwirtschaftlich eingesetzt werden, dem Düngemittelrecht. Durch diese einheitliche Regelung soll die Akzeptanz des Produktes Klärschlamm gefördert werden. Für alle Düngemittel erfolgt eine Einsortierung als Düngemitteltyp. Im Anhang 1 der Düngemittelverordnung vom 24.07.1997 (BGBl. I S. 1835) finden sich die detaillierten Anforderungsprofile der einzelnen Düngemitteltypen, die Mindestanforderungen an ihren Nährstoffgehalt aufweisen. Eine Verzahnung zwischen dem Abfall- und Düngemittelrecht ist dadurch gegeben, daß das Abfall-

recht vor allem die Schadstoffseite bei der Verwertung der Sekundärrohstoffdünger definiert und das Düngemittelrecht die Anforderungen an die Nährstoffe sowie die Zulassung regelt.

Die landwirtschaftliche Ausbringung von Klärschlamm wird weiter in der Verordnung über die Grundsätze der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung) geregelt. Die Verordnung, die seit Juli 1996 in Kraft ist, arbeitet bei der Anwendung von Düngemitteln nach dem Prinzip der "Guten fachlichen Praxis". Das heißt u.a., daß sich die Düngung zeitlich und mengenmäßig stets am Nährstoffbedarf der Pflanzen zu orientieren hat um Nährstoffverluste zu vermeiden. Langfristig sollen die Nährstoffeinträge in die Gewässer und andere Ökosysteme weitestgehend vermieden werden. Standort- und Anbaubedingungen sind dabei genauso zu berücksichtigen wie das Nährstoffangebot des Bodens. Um diese Ziele umzusetzen, sind einige Begrenzungen der Düngung erlassen worden, die ebenfalls für die Ausbringung von Klärschlamm gelten. Seit dem 01.07.1997 darf auf Ackerland im Betriebsdurchschnitt nur noch 170 kg N/ha ausgebracht werden. Ammoniakverluste bei der Ausbringung sind zu minimieren durch u.a. eine unverzügliche Einarbeitung. Bei sehr hohen Phosphat- und Kalium Gehalten im Boden in der Gehaltsstufe E darf nur noch in Höhe des Entzuges gedüngt werden, jedoch nur, wenn keine Grundwassergefährdung vorliegt. Eine Ausbringungssperrfrist besteht zwischen dem 15.11. - 15.01. und es darf erst dann wieder Dünger ausgebracht werden, wenn die Vegetationsruhe abgeschlossen ist und bei den Pflanzen ein Nährstoffbedarf besteht. [WERNER, 1996; WERNER UND BRENK, 1998] Dies hat insbesondere für die Kläranlagen große Auswirkungen, da sie die Stapellager weiter ausbauen und über eine höhere Schlagkraft verfügen müssen, da die Zeiträume, in denen Klärschlamm ausgebracht werden kann, kürzer geworden sind.

2.2.6 Bundesbodenschutzgesetz

Das Bundesbodenschutzgesetz (BGBl. 1998 I S. 502) ist seit dem 01. März 1999 in Kraft und damit das jüngste Umweltgesetz. Die Funktionen des Bodens sollen nachhaltig gesichert bzw. wiederhergestellt werden. Die Landwirtschaft hat entsprechend der Düngeverordnung nach der guten fachlichen Praxis die Ziele des Bodenschutzes zu berücksichtigen. Das bedeutet, daß die Bodenfruchtbarkeit nachhaltig zu sichern ist, ebenso wie die Leistungsfähigkeit des Bodens als natürliche Ressource. Um dies zu erreichen, ist eine standortgemäße Bodenbearbeitung unter Berücksichtigung der Witterung durchzuführen, damit die Bodenstruktur erhal-

ten bzw. verbessert werden kann. Das Bundesbodenschutzgesetz ist den anderen Umweltgesetzes nachgelagert, d.h. die Vorschriften des Düngemittel- und Pflanzenschutzrechtes haben bei der Umsetzung Vorrang. In Bezug auf die Ausbringung von Klärschlamm haben die Vorschriften der Klärschlammverordnung Vorrang gegenüber dem Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG). [FRIELINGHAUS UND SCHÄFER; 1999; OTTO, 1999]

2.3 Stoffliche Zusammensetzung von Klärschlamm

Der landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlamm liegt der Gedanke zugrunde, Stoffkreisläufe zu schließen. Im Klärschlamm sind neben der organischen Substanz eine Vielzahl von Makro- und Mikronährstoffen, die zum Teil essentiell für das Pflanzenwachstum benötigt werden (Tabelle 2-7).

Der Boden dient dabei als natürliches Filter- und Puffersystem gegenüber verschiedenen Umwelteinflüssen. In diesem offenen System finden ständige Wechselwirkungen statt, die für die Stabilität des Gesamtsystems von großer Bedeutung sind. [JELENIC, 1986] Mögliche Auswirkungen einer Klärschlammdüngung auf den Boden sind in Tabelle 2-8 zusammengefaßt.

Unbelastete Klärschlämme wirken sich überwiegend positiv auf bodenbiologische Eigenschaften aus. Mit steigendem schädlichen Einfluß z.B. infolge steigender Schwermetallgehalte sinkt die mikrobielle Leistung der Biomasse aufgrund der toxischen Wirkung der Schwermetalle im Vergleich zur mineralisch gedüngten Kontrolle [BALZER UND AHRENS, 1990; FLIEßBACH, 1991; LÜBBEN, 1991; BARAKAH ET AL., 1996] Die gestiegene Mikroorganismenaktivität führt durch den verstärkten Abbau der organischen Substanz zu einem

Tabelle 2-7: Kenndaten von Klärschlämmen des Zeitraumes 1986 - 1990
(Spannbreite, die von den Bundesländern (alt) angegeben wurden)
[BMU, 1992]

Trockensubstanz in % vom Gesamtanfall	5,7 - 22,9
Organische Substanz in % von der TS	32,9 - 58,1
pH-Wert	6,9 - 8,3
N in % von TS	1,87 - 6,0
P in % von TS	1,63 - 7,2

Tabelle 2-8: Bodenverbessernde und -schützende Wirkung der Rezyklierung von Siedlungsabfällen (Klärschlämmen und Komposte) in der Landwirtschaft [SAUERBECK, 1994]

- Zufuhr organischer Substanz als Humusquelle
 - Förderung der biologischen Aktivität
 - Verbesserung des Luft- und Wasserhaushaltes
Durchlüftung Wasserleit- und haltefähigkeit
 - Erhöhung der Austauschkapazität (Nährstoffbindevermögen)
 - Steigerung der Gefügestabilität (Erosions- und Verschlämungsschutz)
- Beitrag zur Nährstoffzufuhr
 - Zufuhr von Hauptnährstoffen
 - Zufuhr von Spurenelementen
 - Anhebung des pH-Wertes
- Rückführung dem Boden entnommener Stoffe
- Einsparung von Deponiefläche
- Vermeidung bzw. Entlastung anderer Abfallbeseitigungsverfahren mit potentiellen Bodenbelastungen

Anstieg der Nährstoffe. In Zeiten von hohem Pflanzenentzug ist dies sehr positiv zu beurteilen. In Zeiten mit geringem oder keinem Nährstoffentzug durch die Pflanzen, kann es zu Stickstoff-Verlusten durch Auswaschung kommen. STADELMANN [1982] schließt in dem Zusammenhang nicht aus, daß es durch die Überdüngung der Böden zu einer Verringerung des mikrobiellen Artenspektrums und somit zu einer Reduktion des biologischen Potentials für den Abbau von organischen Hilfs- und Fremdstoffen im Boden kommen kann. TERRY ET AL. [1979, in: STICHLER, 1983] konnte durch ¹⁴C-markierten Schlamm zeigen, daß ungefähr die Hälfte des eingesetzten Kohlenstoffes bereits während der ersten 28 Tage als CO₂ freigesetzt wurde. Der im Boden verbliebene markierte Kohlenstoff wurde als Huminstoff extrahiert. Dies schließt nicht nur auf eine Mineralisierung, sondern auch auf eine beträchtliche Humifizierung des Kohlenstoffes. Der Einfluß auf die Humusbilanz ist dann durch den Anstieg der Umsetzung der organischen Substanz ("priming effect") gering. [STICHLER, 1983; OLFS ET AL., 1994] In Feldversuchen konnte MEDIAVILLA [1995a] in langjährig mit sehr hohen Klärschlammgaben (5 t organische Substanz pro ha und Jahr) auf sandigen Lehm eine Erhöhung der organischen Kohlenstoffgehalte (Humus) des Bodens feststellen. Die Folge waren positive Auswirkungen auf das Porenvolumen und die Lagerungsdichte. Bei geringen Klärschlammgaben von nur 2 t organische Substanz pro ha und Jahr konnte keine signifikante Beeinflussung auf die bodenphysikalischen Eigenschaften festgestellt werden.

Tabelle 2-9: Durchschnittliche Nährstoffgehalte in kg/5t Trockensubstanz verschieden aufbereiteter Klärschlämme [POLTSCHNY UND RIESS, 1992 in: POLTSCHNY 1994]

	N [kg/5t TS]	NH₄ [kg/5t TS]	P₂O₅ [kg/5t TS]	K₂O [kg/5t TS]	MgO [kg/5t TS]	CaO [kg/5t TS]
Flüssigschlamm	180	70	195	10	40	375
entwässerter Schlamm	140	55	180	10	30	375
kalkstabilisierter Schlamm	70	2,5	170	8	35	1125

Die Zusammensetzung der durchschnittlichen Nährstoffgehalte im Klärschlamm sind von verschiedenen Variablen abhängig, u.a. vom Klärverfahren, vom eingeleiteten Abwasser und von der Aufbereitung des Klärschlammes. Insbesondere der Stickstoffgehalt korreliert eng mit dem Wassergehalt der Klärschlämme (Tabelle 2-9). Im folgenden wird insbesondere auf die Wirksamkeit der Nährstoffe Stickstoff und Phosphat ausführlicher eingegangen.

2.3.1 Stickstoff

Die Stickstoffgehalte im Klärschlamm liegen zwischen 1,87 - 6,0 % der Trockensubstanz. Über die Wirksamkeit des Stickstoffes für die Pflanzen sagt dies aber noch nichts aus. Diese ist abhängig von der Bindungsform des Stickstoffes im Klärschlamm. Zum einen liegt der Stickstoff in wasserlöslichen Formen vor, hauptsächlich als Ammonium. Diese können von den Pflanzen leicht aufgenommen werden und haben daher einen vergleichbaren Wirkungsgrad mit dem Stickstoff in Handelsdüngern. Zum anderen liegt der Stickstoff organisch gebunden im Klärschlamm vor. Dieser muß, um pflanzenverfügbar zu werden, zunächst mineralisiert werden, so dass auch in den Folgejahren eine Wirkung besteht. Die Wirksamkeit schwankt je nach Ansicht der Autoren, KLUGE ET AL. [1997] empfiehlt anzurechnende Anteile von 5 - 60 % im Anwendungsjahr je nach der Entwässerung des Klärschlammes. DIEZ [1981] rechnet mit 50 % des Stickstoffgehaltes bei einer Ausbringung im Frühjahr. Bis zu 25 % des Gesamtstickstoffes bei einer Klärschlammausbringung im Sommer oder Herbst und bis zu 50 % bei einer Verteilung des Klärschlammes zu Vegetationsbeginn bzw. in den wachsenden Bestand gibt FISCHER [1994] an. FURRER [1980] hat die Wirksamkeit des Stickstoffes mit mineralischem Dünger (Ammoniumnitrat) verglichen und daraus die folgende Formel für die Gegebenheiten der Schweiz abgeleitet:

$$N_W = 0,9 N_A + 0,25 N_O$$

N_W = wirksame Stickstoff

N_A = Ammonium-Stickstoff

N_O = organisch gebundener Stickstoff

Die Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Augustenberg, Karlsruhe überprüfte die Wirksamkeit des Stickstoffes an Hand der Formel von FURRER in einem Gefäßversuch mit Weidelgras. Im Durchschnitt der Versuche konnte die Bestimmung der N-Verfügbarkeit an Hand der Formel von FURRER [1980] bestätigt werden. Ausnahmen bestehen bei hohen Ammoniumgehalten, bei denen nur eine geringere N-Wirksamkeit gefunden wurde. Dies kann durch Stickstoff-Verluste bei der Ausbringung (Verflüchtigung) oder auch mit Ertragsdepressionen durch ein Stickstoffüberangebot zu Vegetationsbeginn zu erklären sein. Die Wirksamkeit des Stickstoffes bei Klärschlämmen mit einem Trockengehalt von ca. 25 % sind nach der Formel von FURRER [1980] unterbewertet. Der Stickstoff wies eine gute Nachwirkung auf und eignet sich von daher besonders für Kulturen mit einer längeren Vegetationszeit. [SCHWEIGER UND VÖLKEL, 1980]

Wie bereits aus Tabelle 2-9 hervorgeht, ist der Stickstoffgehalt stark vom Wassergehalt des Klärschlammes abhängig, da bei der Entwässerung des Klärschlammes der Stickstoff in den Vorfluter fließt. Es gilt daher, je höher der Wassergehalt im Klärschlamm ist, desto höher auch der Stickstoffanteil. Der Wirkungsgrad des Stickstoffes ist weiterhin abhängig von den Verlusten, die bei der Lagerung, beim Transport und Aufbringung des Klärschlammes entstehen. Chemische Bodeneigenschaften wie der pH-Wert, das C/N-Verhältnis und das Calciumangebot haben ebenfalls eine Auswirkung auf den Wirkungsgrad. [SAUERBECK, 1979; FURRER UND CANDINAS, 1984; JELENIC, 1986; CANDINAS UND SIEGENTHALER, 1991] In Abhängigkeit der Mineralisationsrate kann dies eine Stickstoff-Anreicherung im Boden begünstigen. Diese fördert einerseits die Ertragssicherheit und das Bodengefüge, lässt andererseits die Gefahr der Nitratauswaschung ansteigen. [TIMMERMANN ET AL., 1985; GUTSER, 1996]

2.3.2 Phosphor

Die mittleren Gehalte von Klärschlamm ohne eine Phosphat-Fällung liegen im Durchschnitt bei 2 %, erfolgt eine Phosphat-Fällung, steigen sie auf durchschnittlich 3,9 % an. Obwohl durch den Rückgang der Waschmittelphosphate die Abwasserkonzentration signifikant zurückging, ist mit einer weiteren Steigerung der Phosphat-Gehalte im Klärschlamm zu rechnen, da die Klärtechnik und Schlammbewirtschaftung einer steten Weiterentwicklung unterliegen. Der Klärschlamm der Abwasserverbände Emschergenossenschaft/Lippeverband

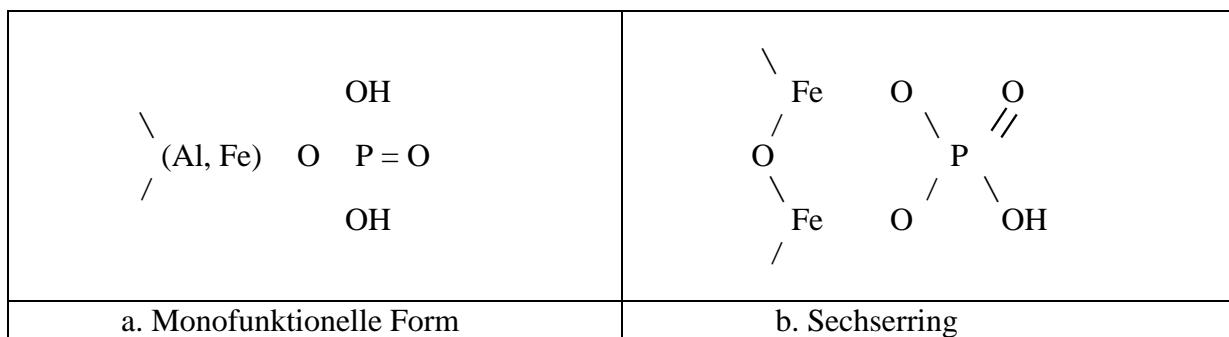


Abb. 2-2: Mögliche Bindungsformen von Phosphat an Eisen- bzw. Aluminium-Hydroxiden [WELP ET AL., 1981 in: STICHLER, 1983]

weist im Durchschnitt 54 kg P₂O₅/t Klärschlamm (24 kg P/t Klärschlamm) auf, davon können rund 70 % des Phosphates von der Pflanze aufgenommen werden. [MALZ, 1987]

Im Klärschlamm ist das Phosphat nur zu einem geringen Teil an die organische Fraktion gebunden. Der weitaus größte Teil ist adsorbiert an Eisenhydroxid, Aluminumhydroxid und Calciumcarbonat. Im Bereich des pH-Wertes von 5 bis 6 liegen die Eisen- und Aluminium-Hydroxide im stabilen Sechsring (siehe Abbildung 2-2) vor. Steigt der pH-Wert an, verschiebt sich das Gleichgewicht unter Aufnahme von OH-Ionen zu Gunsten der monofunktionellen Form. In dieser Form als H₂PO₄⁻ (Monophosphat) nehmen die Pflanzen hauptsächlich Phosphor auf, zu einem geringeren Teil als HPO₄²⁻. [STICHLER, 1983; FROSSARD UND STADELmann, 1987] Unter alkalischen Bedingungen im Boden kommen dagegen überwiegend Ca-Phosphate vor. Im mittleren pH-Bereich liegen daher beide Gruppen in wechselnden Verhältnissen vor [MUNK, 1971/1972].

In einen Boden eingebrachtes lösliches Phosphat lässt die P-Konzentration zunächst stark ansteigen, im Laufe der Zeit nimmt sie jedoch wieder stark ab. Die Phosphationen werden zunehmend an die Bodenmatrix gebunden und treten aus der labilen Phase in die stabile Phase über. Dieser Prozess wird als P-Alterung bezeichnet (Abbildung 2-3). Diesem Prozess unterliegt auch Düngerphosphat, das im Jahr der Anwendung nur selten zu mehr als 20 % ausgenutzt wird [WENDT ET AL., 1996] und verhindert weitestgehend die Auswaschung von Phosphaten.

Außer der P-Alterung kann auch zusätzlich eine Festlegung der im Boden vorhandenen Phosphate erfolgen. Dies ist daran zu erkennen, daß nicht einmal diese Phosphate ertragswirksam umgesetzt werden können. Diese Effekte treten in der Praxis bei Klärschlämmen auf und erschweren eine fachgerechte Düngeberatung. [THERING, 1994a]

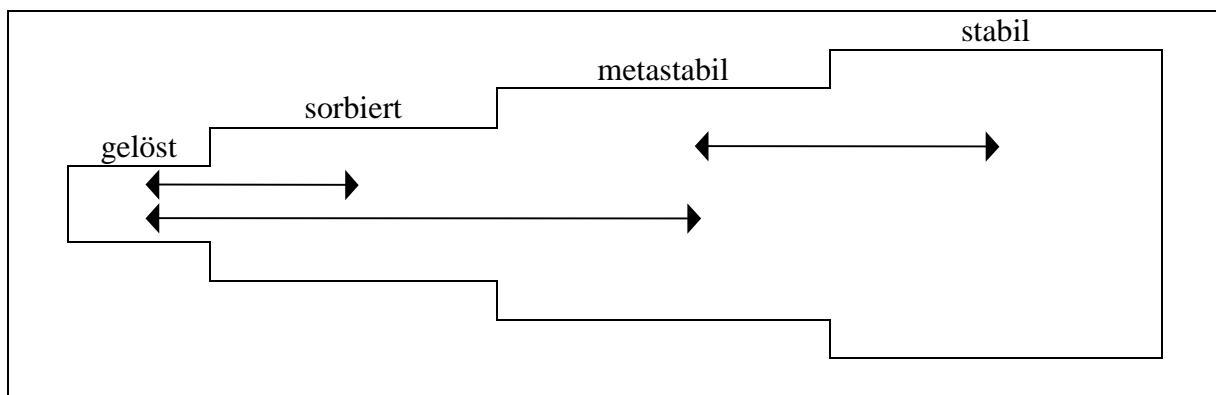


Abb. 2-3: Schematische Darstellung von Phosphatzuständen und deren mögliche Umwandlungsrichtungen im Boden [eigene Darstellung nach MUNK, 1971/72]

Wird das gelöste Phosphat von den Pflanzen nicht aufgenommen, wird es im Boden sorbiert und gelangt in metastabile bzw. stabile Zustände. Der P-Pool im Boden wird dadurch angereichert, eine Auswaschungsgefahr in den Untergrund bzw. in das Grundwasser ist relativ unwahrscheinlich. [KIRKHAM, 1982] Die Gefahr der oberflächlichen Erosion des Bodens in den Vorfluter und damit steigende P-Gehalte in Gewässern besteht jedoch.

Über die Frage in welchem Maße das im Klärschlamm vorliegende Phosphat pflanzenverfügbar ist, gehen die Meinungen weit auseinander. Die Verfügbarkeit ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Diese sind erstens die Bodeneigenschaften wie pH-Wert, Redoxpotential, Bodenart, Humusgehalt, organische Substanz, P-Versorgungszustand, zweitens die Schlammbehandlung und angewandte P-Fällungsmethode in der Kläranlage und drittens das P-Aneignungsvermögen des Pflanzenbestandes. [STICHLER, 1983; TIMMERMANN ET AL., 1980]

Nach SUNTHEIM UND DITTRICH [1996] stellt Klärschlamm keinen wertvollen P-Dünger dar, da u.a. durch die P-Fällung mit Eisen/Aluminium die P-Verfügbarkeit eingeschränkt ist. Klärschlämme sind nur langsam fließende Nährstoffquellen, bei denen zum Erreichen des Höchstertrages stets eine mineralische Düngung zusätzlich erfolgen muß. Sie schlagen daher vor, den P-Gehalt solcher Sekundärrohstoffdünger bei der Berechnung der P-Düngempfehlung nicht zu berücksichtigen [SUNTHEIM UND DITTRICH, 1998].

Im Vergleich zum Monocalciumphosphat werden bei STICHLER (1983) Werte über die Phosphat-Wirksamkeit zwischen 20 - 100 % angegeben. Frische Klärschlämme sind in ihrer Wirksamkeit mit Monocalciumphosphat oder basischen Schlacken vergleichbar. Dabei spielt die Art der P-Elimination in der Kläranlage keine Bedeutung. Eine Trocknung der Schlämme

führt hingegen zu einer Reduzierung der Wirksamkeit bis 40 %, kommt es zur Veraschung der Klärschlämme steigt die Abnahme auf 80 % an. [STICHLER, 1983]

TIMMERMANN ET AL. [1980] setzt in den Untersuchungen Klärschlämme aus der mechanischen bzw. mechanisch-biologischen Reinigung und Fällungsschlämme der dritten Reinigungsstufe ein. Während erstgenannte eine geringere P-Verfügbarkeit und -Wirksamkeit im Vergleich zu den Mineraldüngern besitzen, konnte bei den letztgenannten eine vergleichbare P-Löslichkeit und in Gefäßversuchen eine der Mineraldüngung entsprechende Wirkung festgestellt werden.

KLUGE ET AL. [1997] und GUTSER [1996] sehen einen wesentlichen Faktor der schlechteren Wirksamkeit von Klärschlamm-Phosphat im Vergleich zum Mineraldünger-phosphat in der schlechteren räumlichen Verteilung im Wurzelbereich. Durch eine gleichmäßige räumliche Verteilung könnte in Zukunft die Wirksamkeit erhöht werden.

FRITSCH UND WERNER [1988] gehen von einer verminderten Wirksamkeit von Klärschlamm-P im Vergleich zu Mineraldünger-P aus. Dies wird begründet mit einer eingeschränkten Mobilität der Bodenphosphate. Durch die mehrjährige Anwendung von Klärschlamm ist das P-Sorptionsvermögen des Bodens erhöht und dadurch die P-Konzentration in der Bodenlösung relativ zur P-Anreicherung erniedrigt worden.

Nach WERNER [1976] zeigten alle Klärschlämme eine verzögerte Anfangswirkung im Vergleich zu Dicalciumphosphat. In ihrer Gesamtwirkung konnten die Klärschlämme auf sauren Boden befriedigen, während sie auf neutralem Boden eine deutlich schlechtere Wirkung zeigten. DIEZ UND WEIGELT [1980] beurteilen die Verfügbarkeit des Phosphates im Klärschlamm auf schwach sauren Böden etwas besser, auf neutralen Böden etwas schlechter, im Mittel der Böden aber etwa mit dem Mineraldünger-Phosphat vergleichbar. FISCHER [1994] geht langfristig von einer vollen Anrechenbarkeit der P_2O_5 -Gehalte bei der Düneplanung aus.

Neben der Frage der P- Anrechenbarkeit sind in der Literatur unterschiedliche Angaben zu finden, bei welchem Phosphat-Fällungsmittel die größte P-Verfügbarkeit vorhanden ist. Die Angaben für die beste Verfügbarkeit reichen von biologischer P-Fällung [SUNTHEIM,

1996], Kalkhydrat bzw. Kalkhydrat plus Eisenchlorid [BARAN, 1985] bis Al-Fällung [WERNER, 1976].

Die Verfügbarkeit mit Kalk gefälltem Phosphat ist in der Regel besser als jene mit Eisen bzw. Aluminium gefälltem Phosphat. Mineraldünger wirkte jedoch im Vergleich zum gefällten Klärschlamm-Phosphat schneller. Zur Anreicherung des Bodenpools und damit für die langfristige Wirkung kann Klärschlamm entsprechend anderen pflanzlichen Ernterückständen, Wirtschaftsdüngern oder Mineraldünger für die P-Bilanzierung zu 100 % berücksichtigt werden. [GUTSER, 1996] Für spezielle Entwicklungsstadien der Pflanze z.B. Jugendphase von P-bedürftigen Pflanzen wie Mais kann eine Startdüngung nötig sein.

2.3.3 Kalium, Calcium und Magnesium

Im Klärschlamm ist ein Kaliumgehalt von ca. 0,2 - 0,6 % vorhanden. Da Kalium wasserlöslich ist, geht es mit dem Abwasser in den Vorfluter. Für die Klärschlamm-Düngung heißt dies, daß die geringen Mengen an Kalium zwar pflanzenverfügbar sind, den Bedarf der Pflanzen jedoch nicht decken und somit eine zusätzliche Kalium-Düngung erfolgen muß. [JELENIC, 1986; ATV, 1996]

Der Kalkgehalt in nicht aufgekalkten Klärschlämmen beträgt ungefähr 8 %. Das Calcium ist organisch gebunden und daher nicht sofort wirksam. Je nach eingesetzter Klärtechnik erfolgt bei der Entwässerung eine Zugabe von Kalk in Form von Lösch- oder Branntkalk. Dadurch steigt der Kalkgehalt auf ca. 40 % an. Eine Verschiebung des Boden-pH-Wertes hat einerseits positive Auswirkungen auf die verminderte Löslichkeit von Schwermetallen, andererseits kann es beim Überschreiten des optimalen pH-Wertes zu z.B. Manganmangelerscheinungen in Sandböden kommen [KÖSTER, 1981].

In Abhängigkeit von der Bodenart werden aufgrund von Kalkauswaschung, Kalkentzug der Pflanzen, sauren Niederschlägen, Anwendung physiologisch sauren Düngemittel etwa 300 - 500 kg/ha CaO pro Jahr verbraucht. Wird für die Entseuchung eine Kalkmenge von ungefähr 20 % eingesetzt, gelangen bei einer maximalen Klärschlammmenge von 1,67 t/ha Trockensubstanz pro Jahr etwa 330 kg/ha Kalkhydrat auf die Fläche. Zufuhr und Entzug stehen dadurch im Gleichgewicht und eine Überkalkung ist ausgeschlossen.

Übersteigt die Kalkzugabe jedoch stark die 20 %, ist zu prüfen, ob dadurch nicht eine Überkalkung des Bodens eintreten kann. Gegebenenfalls müssen die aufzubringenden Klärschlamm mengen reduziert werden. [PESCHEN, 1987]

Die Magnesiumgehalte im Klärschlamm sind davon abhängig, welcher Kalk eingesetzt wird. Bei den Schlämmen, die mit Branntkalk konditioniert worden sind, steigt der Gehalt von 0,1 - 0,5 % MgO auf 5 - 7 % MgO an. Das Magnesium liegt in pflanzenverfügbarer Form vor. Bei den gekalkten Klärschlämmen reicht das damit zugefügte Magnesium für den Bedarf aus. Liegen jedoch die Magnesiumgehalte oberhalb von 15 %, wie es durch die Verwendung von dolomitischen Branntkalk geschehen kann, so kann es zu einer Verschiebung des Ca/Mg-Verhältnisses kommen. Das Gleichgewicht würde sich zu Gunsten des Magnesiums verschieben und ein Calciummangel wäre die Folge. [JELENIC, 1986; ATV, 1996]

2.3.4 Schwermetalle

In jedem Boden sind von Natur aus Schwermetalle enthalten, diese werden durch Verwitterung der Gesteine langsam freigesetzt. Durch Niederschläge und Staub-Depositionen gelangen sie auf den Boden und die Pflanze. Ebenfalls können Erosion aber auch Überschwemmungen zu Anreicherungen von Schwermetallen in den Boden führen. Das heißt, je nach Standort und Bodenbeschaffenheit sind die Gehalte im Boden sehr unterschiedlich. In Tabelle 2-10, in der Orientierungsdaten, die im einzelnen stark abweichen können, dargestellt sind, ist der Normalbereich für Schwermetallgehalte des Bodens im Allgemeinen und für landwirtschaftlich genutzten Boden im Besonderen angegeben POLETSCHNY [1993]. Aber auch in allen anderen Umweltmedien wie Luft und Wasser sind Schwermetalle in verschiedenen Konzentrationen anzutreffen. Zwischen den Gehalten der städtischen und ländlichen Luft bestehen zum Teil große Differenzen, insbesondere ist dies bei den Bleiwerten sichtbar, die in Ballungsgebieten um den Faktor 100 höher liegen als im ländlichen Raum. Da Klärschlamm einen Schwermetall-Pool darstellt, da dort die Reinigung der Abwasser der Haushalte, Gewerbe und Oberflächenwasser erfolgt, ist es nicht verwunderlich, daß die Konzentrationen höher liegen als in den anderen Umweltmedien, jedoch mit abnehmender Tendenz.

Auf landwirtschaftlich genutzten Böden gelangen Schwermetalle neben den bereits erwähnten Eintragswegen auch über die Düngung von Wirtschafts- und Handelsdüngern (Tabelle 2-11).

Tabelle 2-10: Schwermetalle in der Umwelt [eigene Darstellung nach POLETSCHNY, 1993; CRAMER ET AL. 1981 und HASSELBACH, 1992]

	Boden Normal- bereich ¹ [mg/kg TS]	Boden landwirt- schaftlich genutzt ² [mg/kg TS]	Meer- wasser ³ [mg/l]	Fluß- wasser ³ [mg/l]	Luft Rein/ Stadt ³ [ng/m ³]	Staub- Deposition (naß und trocken) ³ [mg/m ² · a]	Klärschlamm	
							1993 ⁴ [mg/kg TS]	2001 ⁵ [mg/kg TS]
Pb	0,1-20	35	0,000003	0,0003	6/590	14-62	159	63
Cd	0,01-1,0	0,4	0,0001	0,0004	1/10	0,4-2,6	3	1,4
Cr	2-50	24	0,0002	0,001	0,3/15		91	46
Cu	1-20	15	0,0003	0,002	10/27	0,4-11	330	274
Ni	2-50	15	0,0006	0,0003	2/42	0,04-2,6	38	23
Hg	0,01-1,0	0,1	0,00002	0,00007	3/6		2	1
Zn	3-50	67	0,0006	0,0007		100-300	1318	809

¹ CRAMER ET AL., 1981² POLETSCHNY, 1993, Mittelwert aus 18100 untersuchten Böden³ HASSELBACH, 1992⁴ POLETSCHNY, 1993, Mittlerer Gehalt von 6800 untersuchten Schlämmen⁵ BMU, 2001, Königswasseraufschluß

Im Mineraldünger liegen die Schwermetallgehalte überwiegend im unteren Bereich. Eine Ausnahme stellt das Cadmium dar, das im Rohphosphat enthalten ist. Durch veränderte Importstrukturen des Rohphosphates und einer geringeren Phosphatdüngungsintensität konnte der Cadmiumeintrag im Durchschnitt auf 3 g Cd pro Hektar und Jahr reduziert werden. [SAUERBECK, 1985b] Nach neueren Angaben von LAVES ET AL. [1999] gelangen in Sachsen durch Mineraldüngung nur noch 1,34 g Cd pro Hektar und Jahr auf landwirtschaftlich genutzte Flächen. Die Schwermetalle Kupfer und Zink sind sowohl im Klärschlamm kritisch zu beurteilen, als auch in der Gülle und dort insbesondere in der Schweinegülle.

Tabelle 2-11: Jährliche Zufuhr an Schwermetallen durch eine ordnungsgemäße NPK-Mineraldüngung, sowie vom Gesetzgeber festgelegte oder nach Richtwerten empfohlene Menge an Gülle, Kompost und Klärschlamm [SEVERIN, 1991 in: TRITT, 1994]

	NPK- Mineral- dünger [g/ha · a]	Rinder- gülle 1,5 DE/ha [g/ha · a]	Schweine- gülle 1,5 DE/ha [g/ha · a]	Hühner- gülle 1,2 DE/ha [g/ha · a]	Kompost 100 kg N/ha [g/ha · a]	Klär- schlamm 1,7 t [g/ha · a]
Pb	28	29	12	14	941	148
Cd	6	0,9	0,8	0,5	7	5
Cr	45	15	11	14	166	63
Cu	19	114	374	132	448	540
Ni	17	9	12	12	92	45
Hg		0,2	0,05	0,05	2	4
Zn	132	585	1009	767	2251	1878

DE Dunkeinheit = 80 kg N (Gülleverordnung Niedersachsen)

Im Boden und auch im Klärschlamm sind Schwermetalle an den funktionellen Gruppen der Huminstoffe gebunden. Jedes Element weist daher eine unterschiedliche Bindungsstärke auf, aber auch die Art der funktionellen Gruppen und der pH-Wert üben Einfluß aus. Je mehr Schwermetalle bereits am Substrat gebunden sind, um so kleiner ist die Bindungsstärke. Die Metalle untereinander konkurrieren ebenfalls um die Bindungsplätze, so dass ihre Verfügbarkeit und Aufnahme unterschiedlich ist. Liegt eine geringe Sättigung im Boden vor, steigt die Konzentration in der Bodenlösung auch bei einer starken Zunahme von Schwermetallen nur gering an. Ist jedoch die Sättigungsgrenze erreicht, steigt die Konzentration in der Bodenlösung stark an, da das Substrat keine weiteren Metallionen aufnehmen kann. [STICHLER ET AL., 1987] Die Metalle mit der höheren Affinität, wie z.B. Blei, werden bevorzugt gebunden. Metalle wie Zink, Nickel oder Cadmium mit einer geringen Affinität werden leichter verdrängt und gehen in Lösung. In Versuchen mit Spinat konnte STICHLER ET AL. [1987] zeigen, dass bei gleichem Angebot von Blei und Cadmium der Spinat um so mehr Cadmium aufnahm, je höher die Bleigehalte wurden. Da im Boden und im Klärschlamm eine Vielzahl von Schwermetallen vorliegen, empfiehlt er, nicht nur Grenzwerte für einzelne Schwermetalle, sondern auch die kompetiven Verhältnisse ausgedrückt als Sättigungs- bzw. Löslichkeitsgrad anzugeben.

Nach langjähriger Ausbringung von Klärschlamm auf den Boden, ist nur eine sehr geringe Verlagerung von Schwermetallen in den Untergrund festgestellt worden. LÜBBEN [1993] fand geringfügig höhere Gehalte unterhalb der Ackerkrume, wobei zwischen den mobilen und weniger mobilen Elementen kein Unterschied bestand. Es wird angenommen, daß diese Verlagerungen wahrscheinlich von Wurzeleinflüssen und Bioturbationen hervorgerufen werden.

Die Schwermetalle können unterschieden werden in die für die Pflanze essentiellen und nicht essentiellen. Es gilt wie für alle anderen Nährstoffe auch die Dosis-Wirkungs-Beziehung. Bei der Zufuhr von den essentiellen Metallen (Eisen, Kupfer, Zinn, Bor und Molybdän) steigt im Mangelbereich der Ertrag an, im Optimalbereich ist keine Wirkung festzustellen, bevor es bei einem Überschuß zu Ertragsdepressionen kommt. Diese äußern sich in Form von Welkeerscheinungen, Nekrosen oder Chlorosen. Bei den nicht essentiellen Metallen wie Chrom, Cadmium und Blei können geringe Konzentrationen toleriert werden, bevor es zu Schädigungen an der Pflanze kommt. Bei einigen Pflanzen ist die Schädigung noch nicht zu erkennen, jedoch würden bereits für Menschen und Tiere Gefahren durch den Verzehr eintreten (vgl. Tabelle 2-12) [JELENIC, 1986].

Tabelle 2-12: Transferkoeffizient Boden-Pflanze und kritische Konzentrationen von Schwermetallen im Pflanzenmaterial [SAUERBECK, 1985a; KLOKE ET AL. 1984 in: SAUERBECK, 1985b]

	Transfer-Koeffizient Boden-Pflanze¹	Pflanzen Normalbereich² [mg/kg TS]	Pflanzen kritisch für Pflanzenwuchs³ [mg/kg TS]	Pflanzen kritisch für Tierfutter⁴ [mg/kg TS]
Pb	0,01-0,1	1-5	10-20	10-30
Cd	1-10	< 0,1-1	5-10	0,5-1
Cr	0,01-0,1	< 0,1-1	1-2	50-3000
Cu	0,1-1	3-15	15-20	30-100
Ni	0,1-1	0,1-5	20-30	50-60
Hg	0,01-0,1	< 0,1-0,5	0,5-1	>1
Zn	1-10	15-150	150-200	300-1000

¹ Nur Größenordnung; im Einzelfall sind die Werte abhängig von Bodeneigenschaften und Pflanzenart

² Stark abhängig von Bodentyp, Ausgangsgestein, Pflanzenart, -alter und -organ

³ Schwellenwerte, bei denen die Wachstumshemmung von besonders sensiblen Pflanzenarten beginnt [SAUERBECK, 1985a]

⁴ Verschiedene Haustiere

GRÜN UND PUSCH [1990] aber auch SAUERBECK UND LÜBBEN [1991] konnten in diversen Untersuchungen keinen linearen Anstieg zwischen den Boden- und Pflanzengehalten feststellen. Jedes Metall weist unterschiedliche Boden-Pflanzen-Verhältnisse auf (siehe Tabelle 2-12 Transfer-Koeffizient Boden-Pflanze). Blei, Chrom und Quecksilber sind in normalen Böden sehr fest gebunden und werden von den dort wachsenden Pflanzen nur in sehr geringen Konzentrationen aufgenommen. Cadmium und Zink werden dagegen im großen Umfang von den Pflanzen aufgenommen. Die Aufnahme in die Pflanzen ist vergleichbar der Mobilität der Schwermetalle im Boden entsprechend Cadmium, Zink > Kupfer, Nickel > Chrom, Blei Quecksilber [SAUERBECK, 1995b].

Innerhalb der Pflanze ist die Verteilung der Schwermetalle nicht homogen. In den Wurzeln findet eine Akkumulation der Schwermetalle statt, während sie in den oberirdischen Sproßteil geringer ist. Hier sind sie in physiologisch besonders aktiven Pflanzenteilen transloziert GRÜN UND PUSCH [1990]. Es besteht daher ein Konzentrationsgradient Wurzel > Blätter > Sproß > unterirdische Speicherorgane > Früchte. Im Einzelfall können jedoch große Abweichungen davon bestehen. [DELSCHEN, 1989] Je nach Sorte und Pflanzenalter kommt es zu einer unterschiedlichen Aufnahmerate der Schwermetalle [SCHENKEL, 1994] Faustzahlen über den Gehalt der Schwermetalle in Pflanzen sind in Tabelle 2-12 zu finden. Cadmium und Zink reichern sich stark in den Wurzeln an. Dies könnte wie GRÜN UND PUSCH [1990] vermuten, auf eine Wurzel-Sproß-Barriere zurückzuführen sein. Cadmium

und Zink besitzen eine hohe Bioakkumulation, insbesondere Cadmium ist schon in geringen Konzentrationen für den Menschen toxisch, auch wenn die entsprechenden Futter-, bzw. Nahrungspflanzen noch keine Ertragsdepressionen zeigen (Tabelle 2-12). Es ist daher bei vielen Untersuchungen in den Vordergrund gerückt worden, da es über den Weg Boden-Pflanze-(Tier)-Mensch aufgenommen werden kann und bei dem Menschen zu gesundheitlichen Schäden führt. Bei den Schwermetallen Zink, Kupfer und Nickel ist es umgekehrt, hier treten zunächst Pflanzenschäden auf, bevor Konzentrationen erreicht werden, die für Tiere schädlich sind. In Immissionsgebieten sind daher oftmals Zinküberschüsse für Pflanzenschäden verantwortlich. [SAUERBECK, 1985b]

Wie bereits oben erwähnt, stellt Klärschlamm ein Spiegelbild der in der Umwelt vorhandenen Schwermetalle dar. Eine Entwicklung der Schwermetallgehalte im Klärschlamm über 20 Jahre zeigt Abbildung 2-4. Zusammengefaßt sind drei Datenreihen dargestellt, erstens die Durchschnittswerte unterschiedlicher Erhebungen von Lehr- und Versuchsanstalten in Deutschland ab dem Jahr 1977, zweitens die Ergebnisse des Lippeverbandgebietes für die Jahre 1980 bis 1988 und drittens die gewogenen Schadstoffgehalte landwirtschaftlich verwerteter Klärschlämme in Deutschland für die Jahre 1995 bis 1997. Seit 1977 ist bei allen Schadstoffen die Konzentration im Klärschlamm gesunken. Bei einigen Schwermetallen ist eine sehr starke Reduzierung zu beobachten wie z.B. beim Cadmium und Chrom, deren gewogene Mittel von 1995 - 1997 weniger als 1/10 der Gehalte von 1977 betragen. Bei anderen Metallen, wie beim Kupfer, konnte hingegen nur eine sehr geringe Reduzierung erreicht werden, so dass 34 % des Grenzwertes der AbfKlärV ausgeschöpft werden. Eine Ursache besteht u.a. in der Zunahme von Kupfer in der Installation. Trotz der Reduzierung der Zinkgehalte in den vergangenen Jahren werden ebenfalls 33 % bzw. 42 % des Grenzwertes der AbfKlärV erreicht.

Mit dem Erlaß der Klärschlammverordnung 1982 wurden Grenzwerte für die Schwermetallkonzentrationen für den Klärschlamm und den Boden festgelegt. Gleichzeitig wurden Forschungsprojekte u.a. das Verbundprojekt des Umweltbundesamtes 'Auswirkungen von Siedlungsabfällen auf Böden, Bodenorganismen und Pflanzen' ausgeschrieben, in denen die Grenzwerte auf ihre Richtigkeit hin überprüft werden sollten. Dies führte 1992 zu einer Neufassung der Klärschlammverordnung, in der die Grenzwerte mit Ausnahme des Nickels nach unten korrigiert wurden.

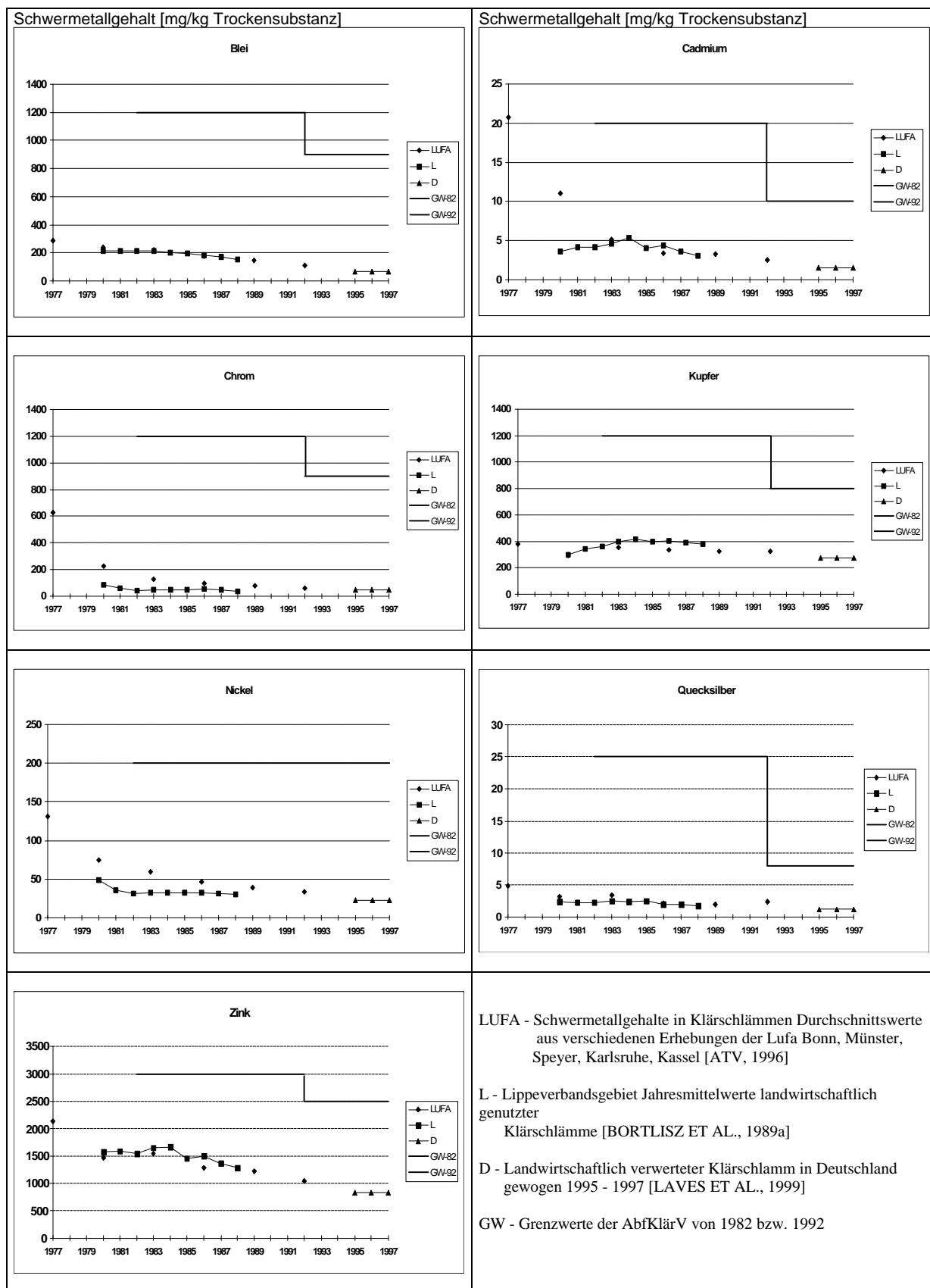


Abb. 2-4: Schwermetallgehalte im Klärschlamm in mg/kg Trockensubstanz
[eigene Darstellung nach ATV, 1996; BORTLISZ ET AL., 1989a und LAVES ET AL., 1999]

2.3.6 Organische Schadstoffe

In den Achtziger Jahren begann die Diskussion über die organischen Schadstoffe im Klärschlamm. Im Oktober 1984 wurde erstmals bei einem WHO-Expertentreffen, das sich schwerpunktmäßig mit der Schwermetallproblematik befaßte, über die Belastung von Klärschlämmen mit organischen Stoffen und deren gesundheitlichen Folgen diskutiert. Es erfolgte eine Auflistung der Stoffe, deren Vorkommen im Klärschlamm bekannt waren bzw.

Tabelle 2-13: Organische Schadstoffe in Klärschlämmen

PCDD/PCDF: polychlorierte Dibenzodioxide und -furane, PCB: polychlorierte Biphenyle, AOX: Summe der adsorbierten organisch gebundenen Halogene, PAK: polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe, B[a]p: Benz[a]pyren,

	PCDD/F [ng TE/kg TS]	PCB (6) [mg /kg TS]	AOX [mg /kg TS]	PAK/B[a]p [mg /kg TS]
Einzugsgebiet Neckar, bezogen auf techn. Gemische (n=290) HAGENMAIER 1981/82 in: OFFENBÄCHER, 1991		0,8-1,7		Ö6 PAK TrinkwV Frisch- und Belebtschlamm: 2-20 Mittelwert: 9,7 Faulschlamm: 5-66 Mittelwert: 15,9
BRÜNE, 1985		Boden: 0,1 industriefern 100 industrienah		KS: B[a]p: 1,568 (n=30) Acker: B[a]p: 0,016 (n=21)
Schlämme verschiedener Herkunft ALBERTI, 1987 in: OFFENBÄCHER, 1981		Kommunal K1: 1,1 K2: 0,1 Gemischt IK: 0,7 Industriell I1: 1,2 I2: 4,8		Ö6 PAK TrinkwV Kommunal K1: 4,3 K2: 4,1 Gemischt IK: 7,2 Industriell I1: 96 I2: 1,1
Untersuchung aus Niedersachsen 1990-1991 MERKEL, MATTER, 1994	Kalk > 120 kg CaO/t (n=26) Mittelwert: 30, Median: 18 Kalk < 120 kg CaO/t (n=103) Mittelwert: 46 Median: 29		Kalk > 120 kg CaO/t (n=201) Mittelwert: 101, Median: 79 Kalk < 120 kg CaO/t (n=521) Mittelwert: 200, Median: 181	
Untersuchungen aus dem Rheinland OFFENBÄCHER, 1991 und POLETSCHNY, 1994	38,6 ± 9,7 (n=47)	0,16 ± 0,14 (n= 47)	Mittelwert: 206 Median 192 (n=88)	
Untersuchungen aus Bremen HÖPER, 1992 in: POLETSCHNY, 1994	40,6 (n=9)	0,11 (n=22)	170 (n=4)	
UBA, LESCHBER, 1993	< 50 (n= 65%) <100 (n=80%) > 200 (n=2%)	< 0,1 für die Einzelkomponenten		B[a]p KS: 0,2-1,1 Boden: 0,03-0,3

mit deren Vorkommen zu rechnen war. [LESCHBER. 1993] Die erste größere Studie des Umweltbundesamt über den Gehalt an Dioxinen und Furanen in Klärschlämmen wurde 1986/87 durchgeführt. [BUTZKAMM-ERKER UND MACH, 1990] Bei der Novellierung der Klärschlammverordnung wurden 1992 erstmalig auch Grenzwerte für organische Schadstoffe im Klärschlamm jedoch nicht für den Boden aufgenommen (vgl. Tabelle 2-5): Polychlorierte Dibenzodioxide und -furane (PCDD/PCDF), Summe der adsorbierten organisch gebundenen Halogene (AOX) und Polychlorierte Biphenyle (PCB). In Tabelle 2-13 sind Klärschlammbelastungen mit organischen Schadstoffen unterschiedlicher Untersuchungen dargestellt. Zum einen geben sie einen Eindruck, in welchen Größenordnungen die verschiedenen organischen Schadstoffe im Klärschlamm anzutreffen sind, zum anderen können die Ergebnisse unterschiedlicher Herkünfte verglichen werden.

PCDD/PCDF

PCDD und PCDF sind keine industriell hergestellten Chemikalien, sondern entstehen bei thermischen Prozessen und bei chemischen Syntheseverfahren (Chlorphenole, PCB). PCDD/PCDF sind ubiquitär in unserer Umwelt vorhanden, da sie weiträumig über den Luftweg verteilt werden. Dies ist auch der Haupteintragspfad in den Boden, nur auf Standorten, die mit sehr hohen Klärschlammgaben gedüngt worden sind, ist die Belastung auf Klärschlamm zurückzuführen. [FÜHR ET AL., 1985; BUTZKAMM-ERKER, 1991] Bei Untersuchungen des Lippeverbandes in Zusammenhang mit der Landesanstalt für Ökologie in Nordrhein-Westfalen konnte eindeutig belegt werden, daß es bei einem Konzentrationsvergleich zwischen beschlammten und unbeschlammten Böden zu keiner Anreicherung mit PCDD/PCDF in Böden durch die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung gekommen ist. Zusammenfassend heißt es dort, daß die immissionsbedingte "Grundlast Dioxin/Furan" im Boden ein geringeres Risiko birgt als in den anderen Kompartimenten Luft und Wasser (Bioverfügbarkeit). [BORTLISZ ET AL., 1989a] PCDD/PCDF sind im Boden weitgehend immobil. Es erfolgt eine Fixierung an Sedimente aquatischer Systeme, die nur eine geringe vertikale Verlagerung im Boden aufweisen. Horizontal wird PCDD/PCDF dagegen bei Erosionsvorgängen verfrachtet. Nur 0,1 % des 2,3,7,8- TCDD (Toxizitätsäquivalent Faktor 1,0), welches in einem kontaminiertem Boden vorlag, konnte in Landpflanzen bestimmt werden. [BORTLISZ ET AL., 1989a] Über den Weg Klärschlamm - Boden - Pflanze - (Tier) - Mensch ist daher nicht mit einem Transfer von PCDD/PCDF zu rechnen. [BUTZKAMM-ERKER, 1991]

Erste Untersuchungen bezüglich des PCDD/PCDF-Gehaltes in Klärschlamm wurden von HAGENMAIER und Mitarbeitern im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführt. Es wurden 26 Kläranlagen untersucht, dabei wurde eine Bannbreite von 28-1560 ng TE/kg Trockensubstanz ermittelt. Aufgrund dieser Extremwerte veranlaßten mehrere Bundesländer eigene Untersuchungen, und auch das Umweltbundesamt gab neue Untersuchungen in Auftrag. Diese Ergebnisse fielen mit Konzentrationen zwischen 30-60 ng TE/kg TS wesentlich positiver aus, wie aus Tabelle 2-13 hervorgeht. Nach einer Auswertung von ca. 300 Einzel- ergebnissen des Umweltbundesamtes lagen die Gehalte bei 65 % aller Proben unter 50 ng TE/kg TS, 80 % unter 100 ng TE/kg TS und nur 2 % der Proben enthielten Konzentrationen, die größer als 200 ng TE/kg TS waren. Dies führte dazu, daß das Bundesumweltministerium den Grenzwert für PCDD/PCDF auf 100 ng TE/kg TS festlegte. [LESCHBER, 1993]

PCB

Die Gruppe der polychlorierten Biphenyle sind unterschiedlich persistente niedermolekulare organische Chemikalien, die ubiquitär im Boden nachweisbar sind. Da schon früh ihre umweltschädigende Wirkung erkannt wurde, besteht ein Gebrauchsverbot der PCB's seit 1981 in der Bundesrepublik Deutschland und seit 1986 in der Europäischen Gemeinschaft. Langfristig werden die PCB's an Bedeutung verlieren, trotzdem besteht der Grenzwert von 0,2 mg/kg Trockensubstanz für jede der sechs Verbindungen nach Ballschmiter [BORTLIZS, ET AL., 1989a]. Der "Gesamt-PCB"-Gehalt ergibt sich aus der Summe der sechs Komponenten Nr. 28, 52, 101, 138, 153, 180, multipliziert mit dem Faktor 5 [BUTZKAMM-ERKER, 1991]. Das Gebrauchsverbot führte zur Reduzierung der Gehalte im Boden und Nahrungsmitteln. [FÜHR ET AL. 1985; BRÜNE, 1985] Es besteht jedoch weiter eine Grundbelastung von weniger als 0,1 mg PCB/kg Boden bei Acker- und Grünland, der in industrienahen Böden auf 100 mg/kg Boden ansteigen kann. Äcker mit Klärschlammgaben können bis zu 1 mg PCB/kg Boden enthalten, jedoch sind in der Regel die Konzentrationen geringer als 0,5 mg PCB/kg Boden (vgl. Tabelle 2-14) [BUTZKAMM-ERKER, 1991]. Die Verdampfung aus Gewässern ist ein Haupteintragsweg in die Umwelt. Die Belastung der kommunalen Klärschlämme liegt dabei unterhalb derer industrieller Herkunft. Innerhalb einer längeren Periode sind die Gehalte ziemlich konstant. [ALBERTI UND PLÖGER, 1986]. Für die Bodenbelastung spielt die Belastung der Klärschlämme nur eine geringe Rolle. Die Pflanzenverfügbarkeit ist nach derzeitigem Kenntnisstand sehr gering. Nach SAUERBECK [1985a] und KAMPE UND SCHAAF [1990] besteht keine Signifikanz zwischen den Bodenbelastungen und der Aufnahme der

Tabelle 2-14: Polychlorierte Biphenyl (PCB) -Gehalte¹ verschiedener Böden
[BORTLISZ ET AL., 1989b]

PCB [$\mu\text{g}/\text{kg}$]	Acker/Grünland Grundbelastung (n=25) [%]	Acker mit Klärschlammgaben (n=43) [%]	Grünland in Über- schwemmungsbereiche n (n=25) [%]
< 100	100	81,4	13,6
100 - 500		14,0	22,7
500 - 1000		4,6	22,7
> 1000			40,0

¹ berechnet aus der Summe Nr. 28, 52, 101, 138, 153, 180 multipliziert mit 5

Pflanze an PCB. Innerhalb der Pflanze sind die Gehalte in der Blattmasse im Vergleich zu den übrigen Pflanzenteilen höher. Dies kann zum einen durch den Lufteintrag verursacht werden, aber auch durch eine erhöhte Ausgasung des Bodens. [BUTZKAMM-ERKER, 1991]

AOX

Der AOX-Wert dient als Indikator für die Summe der halogenierten, insbesondere chlorierten Kohlenwasserstoffe. Tabelle 2-13 stellt die Ergebnisse einiger Untersuchungen dar. Im Durchschnitt liegt der AOX-Wert bei 200 mg/kg TS und erreicht damit nur 40 % des Grenzwertes von 500 mg/kg Klärschlamm-Trockenmasse. [LESCHBER, 1993]

In die Stoffgruppe der chlorierten Kohlenwasserstoffe gehören z.B. die Insektizide DDT, seine Abbauprodukte DDE, Methoxychlor, Hexachlorcyclohexan (HCH), Endosulfan. Es sind in erster Linie Kontakt- und Fraßgifte. Lindan, ein Isomer des HCH stellt aufgrund seines hohen Dampfdruckes auch ein Atemgift dar. Die Insektizide haben eine große Dauerwirkung aufgrund der geringen Flüchtigkeit und Wasserlöslichkeit. Da sie sich nur langsam abgebaut werden, kommt es zu einer Anreicherung in der Nahrungskette. In der Bundesrepublik Deutschland besteht seit 1972 ein Verbot für die Ein- und Ausfuhr, den Erwerb und die Anwendung von DDT, aber weiterhin ist es im Boden und Klärschlamm nachweisbar, auch wenn in den vergangenen Jahren die Konzentrationen weiter rückläufig sind. Da es weltweit jedoch noch angewendet werden darf, können Lebens- und Futtermittel, die aus diesen Gebieten importiert werden, weiterhin mit DDT belastet sein, wodurch eine fortlaufende Belastung des hiesigen Klärschlammes nicht zu vermeiden ist. [HOFFMANN ET AL., 1985; GELBERT ET AL., 1992]

PAK

Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) entstehen bei unvollständigen Verbrennungen von Kohlenwasserstoffen bei 500 bis 700 °C. Daher liegen die Winterkonzentrationen in Städten höher als die Sommerkonzentrationen. PAK's sind ebenfalls ubiquitär vorhanden, und einige Verbindungen haben sich in Tierversuchen als eindeutig krebserregend erwiesen. [BRÜNE, 1985] PAK's werden im Boden insbesondere am Humus stark gebunden, es findet jedoch im Gegensatz zu den PCB's ein Abbau im Boden statt. [BUTZKAMM-ERKER, 1991] In Tabelle 2-15 sind die Konzentrationen von Benz[a]pyren, das als Leitsubstanz gilt für unterschiedliche Böden, zusammengestellt. Die Gehalte des Klärschlammes liegen zwischen 0,2 bis 1,1 mg B[a]p/kg Trockensubstanz, wie auch aus der Tabelle 2-13 hervorgeht [LESCHBER, 1993]. Für die Belastung des Bodens ist jedoch der atmosphärische Eintrag bedeutender als der durch Klärschlamm. Die Pflanzenverfügbarkeit in Böden ist gering, Es bestehen keine signifikanten Zusammenhänge zwischen den Klärschlammgehalten, dem Boden und der Aufnahme durch die Pflanzen. [BUTZKAMM-ERKER, 1991] Neben den hier vorgestellten Schadstoffen gibt es noch eine Vielzahl weiterer organischer Schadstoffe. Eine Arbeitsgruppe, die durch die Umwelt-Minister-Konferenz installiert wurde, beschäftigt sich mit den "relevanten" Schadstoffen. Dazu wurden Datenblätter für einzelne Stoffe sowie für Stoffgruppen erstellt und beurteilt. Darin werden säuger- und humantoxische, sowie ökotoxische Eigenschaften beurteilt. Neben dem allgemeinen chemisch-physikalischen Verhalten im Boden spielt der Transfer Boden-Grundwasser bzw. Boden-Pflanze eine besondere Bedeutung. Es werden die Gehalte von Klärschlamm, die in die landwirtschaftliche Verwertung gehen, zusammengestellt und die ermittelten Daten auf ihre Zuverlässigkeit überprüft. Am Ende der Erhebung erfolgt eine Gesamtbewertung in drei Gruppen: vorrangig relevant, nachrangig relevant und Stoffe mit Informationsbedarf. Die Stoffe, die der

Tabelle 2-15: Benz[a]pyren in Böden unterschiedlicher Herkunft, Relativzahlen
[BRÜNE, 1985]

	Anzahl der Proben	Benz[a]pyren
Acker	21	0,016
• absolut [mg/kg Boden]		1
• relativ		
Wiese	5	2
Kleingärten	26	4
Waldboden (Humusaufklage)	9	7
Kompost	15	95
Klärschlamm	30	98

Tabelle 2-16: Einstufung der bewerteten Stoffe, Stoffe der Gruppe I, Stoffe mit vorrangiger Relevanz [LITZ, 1998]

PCDD/PCDF: polychlorierte Dibenzodioxide und -furane, PCB: polychlorierte Biphenyle, AOX: Summe der adsorbierten organisch gebundenen Halogene, PAK: polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe, B[a]p: Benz[a]pyren,

Stoff	Säuger/Human-Toxizität (akut)	Ökotoxizität	Wasserlöslichkeit	Persistenz	Gehalte
PCDD/F Einzelsubstanz/ Summenparameter	hoch kanzerogen	aquatisch hoch terrestrisch hoch Bioakk. hoch	gering	hoch	gering
AOX Summenparameter					hoch, Indikator
PCB Einzelsubstanzen/ Summenparameter	mittel tumor-promovierend, immun-toxisch	aquatisch hoch terrestrisch mittel Bioakk. hoch	gering	hoch	gering und weiter rückläufig
B[a]p Einzelsubstanz (PAK)	kanzerogen, mutagen, teratogen	hoch Bioakk. hoch	gering	hoch	hoch
LAS (Lineares Alkylbenzolsulfonat)	mittel	aquatisch hoch terrestrisch mittel Bioakk. hoch	hoch, Erhöhung der Mobilität anderer Schadstoffe	mittel	hoch
Nonylphenol	mittel, Verdacht auf östrogene Wirkung	aquatisch hoch terrestrisch mittel Bioakk. hoch	hoch	mittel	hoch
Tributylzinnoxid	hoch	aquatisch hoch terrestrisch hoch endokrine Wirkung	mittel	hoch	hoch
DEHP (Di-(2-ethylhexyl)-phthalat)	gering, Verdacht auf östrogene Wirkung	aquatisch mittel-hoch terrestrisch gering Bioakk. hoch	gering	mittel	hoch

Stoffgruppe I vorrangig relevant angehören sind in Tabelle 2-16 dargestellt. Inzwischen sind bereits 44 verschiedene Stoffe und Stoffgruppen bewertet worden. [LESCHBER, 1998]

2.4 Initiativen zum umweltverträglichen Klärschlamm Einsatz in der Landwirtschaft

Die Umsetzung des umweltverträglichen Klärschlamm Einsatzes in der Landwirtschaft kann unterschiedlich gestaltet werden. Beispielsweise sollen zwei unterschiedliche Ansätze der Bundesländer Schleswig-Holstein und Sachsen vorgestellt werden. Des Weiteren sollen die

Möglichkeiten des Klärschlammmeinsatzes in Nordrhein-Westfalen aufgezeigt werden, die aufgrund der Bodengehalte noch bestehen, Klärschlamm umweltverträglich auszubringen.

Die Ausgangslage in Schleswig-Holstein war, daß einige große Getreidemühlen in Norddeutschland kein Getreide von mit Klärschlamm beschlammten Flächen abnahmen. Ebenso erlaubten Ökoverbände auf den Feldern der Mitgliedsbetriebe sowie Kirchen und Kommunen auf ihren eigenen Flächen keine Nutzung von Klärschlamm. Daraufhin haben sich Vertreter des Umweltministeriums, des Landwirtschaftsministeriums, des Institutes für Toxikologie der Christian-Albrecht-Universität Kiel, der Landwirtschaftskammer und ihrer LUFA, eines Kreisumweltamtes sowie dem Vorsitzenden des Städtebundes zusammengesetzt und über diesen Sachverhalt diskutiert. Als Ergebnis wurden einvernehmlich vorsorgeorientierte Referenzwerte für Boden- und Klärschlammgehalte (Tabelle 2-17) erarbeitet. Oberhalb dieser Referenzwerte für den Boden sollte keine Ausbringung von Klärschlämmen und anderen belasteten Düngern erfolgen. Ebenso sollte kein Klärschlamm landwirtschaftlich verwertet werden, der oberhalb des Referenzwertes für Klärschlamm liegt.

Tabelle 2-17 Beispiele unterschiedlicher Regelungen in Schleswig-Holstein und Sachsen

	Grenzwerte gem. AbfKlärv § 4		Referenzwerte Schleswig-Holstein ²		Zulässige Höchst- konzentration Sachsen ⁴ Klärschlamm [mg/kg TS]
	Boden [mg/kg TS]	Klärschlamm [mg/kg TS]	Boden [mg/kg TS]	Klärschlamm [mg/kg TS]	
As			4 ³	30	
Pb	100	900	30	300	200
Cd	1/1,5 ¹	10/5 ¹	0,6/0,8 ¹	3/4 ¹	1,5
Cr	100	900	30	300	200
Cu	60	800	30	400	200
Ni	50	200	20	50	50
Hg	1	8	0,4	3	2
Zn	150/200 ¹	2500/2000 ¹	100	1000	1000
AOX		500		200	250
PCB		einzelne: 0,2 Summe: 1,2	einzelne: 0,01 Summe: 0,05	einzelne: 0,08 Summe: 0,4	Summe: 0,6
PCCD/F ⁵		100	4	30	15
PAK/ B[a]p			PAK: 1,0 B[a]p: 0,1	PAK: 8 B[a]p: 0,8	

¹ gem. § 4 Abs. 8, 11 und 12 AbfKlärv

² HENNING ET AL., 1995

³ bodenartspezifisch abweichende Werte

⁴ Zulässige Höchstkonzentration des Förderprogrammes "Umweltgerechte Landwirtschaft" (UL) in Sachsen [LAVES ET AL., 1999]

⁵ Einheit [ng TE/kg TS]

Eine Verbesserung der Klärschlammqualität ist aus Gründen der Vorsorge zu veranlassen. Die Einführung der Referenzwerte wird als erster Schritt dazu gesehen, eine Senkung der Grenzwerte zu erreichen [HENNING ET AL., 1995].

Einen anderen Weg schlug das Land Sachsen ein, in dem seit 1993/94 das Förderprogramm "Umweltgerechte Landwirtschaft" (UL) besteht. Eine Bestimmung des Förderprogrammes besagt, daß kein Klärschlamm ausgebracht werden darf. [LÜTKE ENTRUP ET AL., 1998]. Um jedoch Klärschlämme und Bioabfälle mit verminderteren Schadstofffrachten auch landwirtschaftlich zu nutzen, wurde 1999 ein neues UL-Förderprogramm aufgelegt, in dem neue Höchstkonzentrationen für Klärschlamm entsprechend Tabelle 2-17 gelten. Neben der Verringerung der Konzentrationen ist auch die Ausbringungsmenge von 1,7 t TS/ha·a auf 1 t TS/ha·a reduziert worden. Durch diese Maßnahmen erreichen die Höchsteinträge nur noch 9 - 24 % der Höchstmenge der Klärschlammverordnung. Durch die verschärften Regelungen sollen bei der Nutzung von Sekundärrohstoffdünger Anreize und Garantien für eine hohe Qualität gegeben werden und eine nachhaltig ökologisch verträgliche Abfallverwertung umgesetzt werden [LAVES ET AL., 1999].

Um den Grundsätzen der ordnungsgemäßen Düngung zu entsprechen, sind die vorhandenen Nährstoffmengen des Bodens bei der Düngeplanung zu berücksichtigen. Für den Nährstoff Phosphat liegen Untersuchungsergebnisse der Böden in Nordrhein-Westfalen vor. Auf der Grundlage der Jahre 1991 bis 1994 sind die Ergebnisse der LUFA-Bodenuntersuchungsergebnissen von WERNER UND BRENK [1997] ausgewertet worden. Die Berechnungen erlauben Aussagen über die aktuelle P-Versorgung der Böden in Nordrhein-Westfalen zu treffen. Abbildung 2-5 stellt die kumulierte Häufigkeitsverteilung der Phosphatgehalte aller untersuchten Proben dar, sie sind getrennt für Acker- und Grünland. Beim Grünland liegt das Maximum in der Gehaltsklasse C ($10 - 18 \text{ mg P}_2\text{O}_5/100 \text{ g Boden} = 4,4 - 7,9 \text{ mg P}/100 \text{ g Boden}$), wogegen beim Ackerland über 80 % der Proben der Gehaltsklasse D ($19 - 32 \text{ mg P}_2\text{O}_5/100 \text{ g Boden} = 8,3 - 14,0 \text{ mg P}/100 \text{ g Boden}$) zuzuordnen sind. Die niedrigen Gehaltsstufen A und B sind insbesondere beim Ackerland kaum anzutreffen, dem steht eine erheblich größere Anzahl von Proben der Gehaltsklasse E gegenüber.

Werden die Phosphatgehalte der Ackerflächen gemeindebezogen umgerechnet, erhält man für Nordrhein-Westfalen die folgende Verteilung der Phosphat-Gehalte (Abbildung 2-6). Durch die gemeindebezogene Berechnung sind die Gehaltsklassen A, B und E entfallen, alle

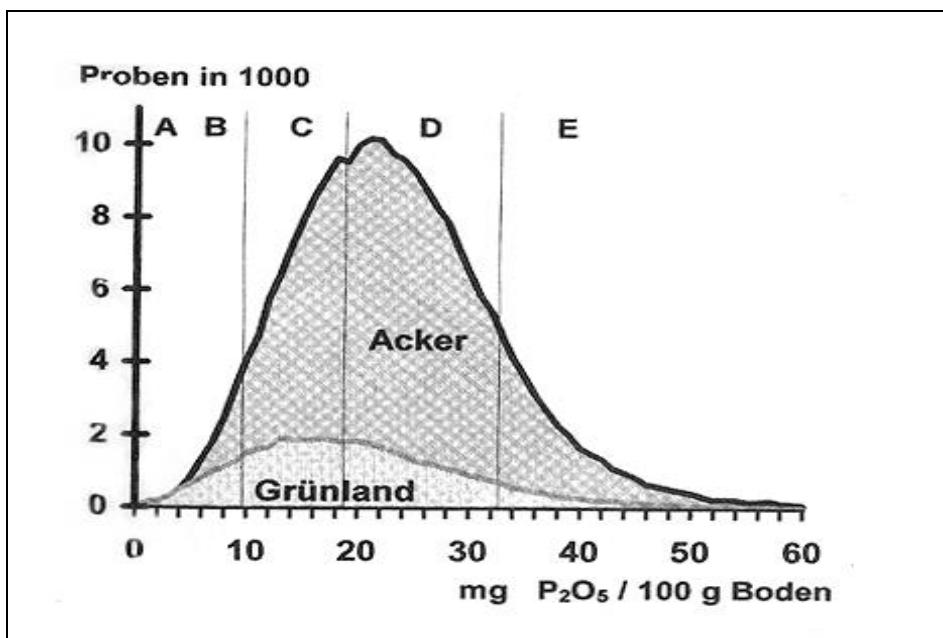


Abb. 2-5: Verteilung der Phosphatgehalte der vorliegenden Bodenuntersuchungsergebnisse [WERNER UND BRENK, 1997]

Ackerböden sind in den Gehaltsklassen C und D wiederzufinden. Die Gehalte zwischen 22 - 28 mg P₂O₅/100 g Boden (9,6 - 12,2 mg P/100 g Boden) sind am häufigsten anzutreffen, insbesondere in den viehhaltungsintensiven Regionen von Nordrhein-Westfalen wie z.B. im Münsterland. Dagegen weisen Gemeinden des Rheinlandes, des Sauerlandes und Gemeinden aus der Region Ostwestfalen/Lippe geringere Gehalte der Klasse C auf. Allgemein kann jedoch festgestellt werden, daß die Böden gut bis sehr gut mit Phosphat versorgt sind. Daher ist Phosphat inzwischen bei der Suche nach geeigneten Böden für die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm zum limitierenden Faktor geworden.

Die anfallenden Phosphatmengen der Sekundärrohstoffdünger wurden dem P-Restbedarf unter Berücksichtigung der aktuelle Phosphat-Versorgung der Böden gegenüber gestellt, um das Verwertungspotential (Abbildung 2-7) zu bestimmen. Dieses gibt einen Einblick, welche Gemeinden in Nordrhein-Westfalen noch freie Kapazitäten besitzen um Klärschlamm auf den landwirtschaftlichen Nutzflächen zu verwerten. Bei einer regionalen Verwertung weisen mehr als die Hälfte aller Gemeinden in Nordrhein-Westfalen keine weiteren Verwertungsmöglichkeiten für Sekundärrohstoffdünger auf. Dies gilt insbesondere für dieviehstarke Region des Münsterlandes, aber auch für gemischt landwirtschaftliche Strukturen oder auch für Regionen mit intensiver Milchviehhaltung, wie das Bergische Land. Dagegen weisen Gemeinden der Köln-Aachener Bucht und in Ostwestfalen zusätzliche Verwertungspotentiale von Sekundärrohstoffdüngern auf. Das bedeutet für die umweltverträgliche Klärschlammverwertung, daß eine Vielzahl von landwirtschaftlichen Flächen von vornherein ausgeschlossen sind.

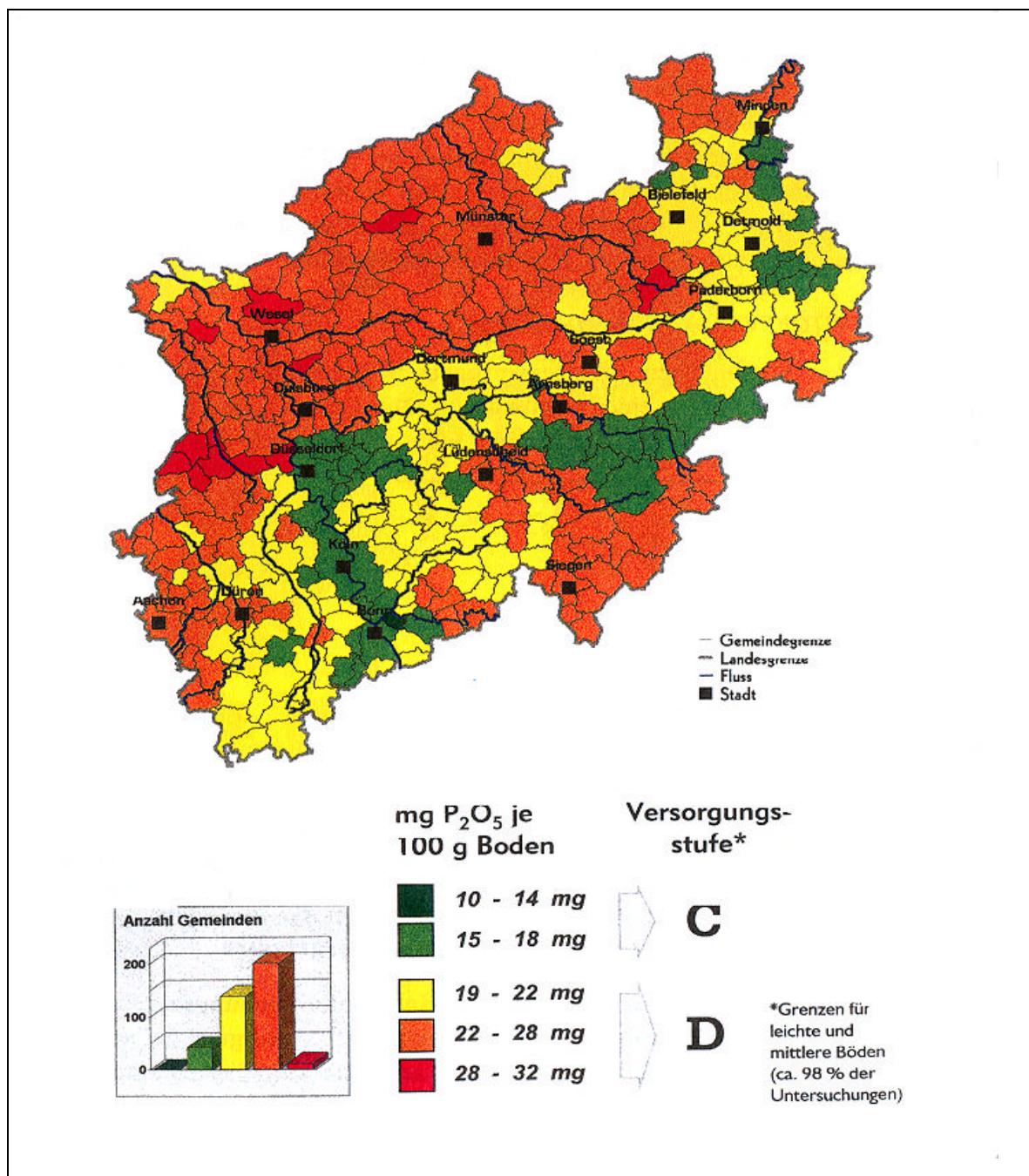


Abb. 2-6: Phosphat-Versorgung der Ackerböden Nordrhein-Westfalens [WERNER UND BRENK, 1997]

Da die Berechnungen jedoch auf Gemeindeebene durchgeführt wurden, wird es möglich sein, daß auch in Gemeinden, in denen laut Abbildung kein Verwertungspotential besteht, landwirtschaftliche Flächen zur Verfügung stehen. Um hier eine umweltverträgliche Verwertung von Klärschlamm durchzuführen, ist eine gute Planung notwendig. Die Nährstoffgehalte der Böden sowie des Klärschlammes müssen dazu regelmäßig bestimmt werden und in der Düngoplanung Berücksichtigung finden. Andererseits wird man auch in den Regionen mit einem Verwertungspotential von größer als 100 % Flächen vorfinden, auf

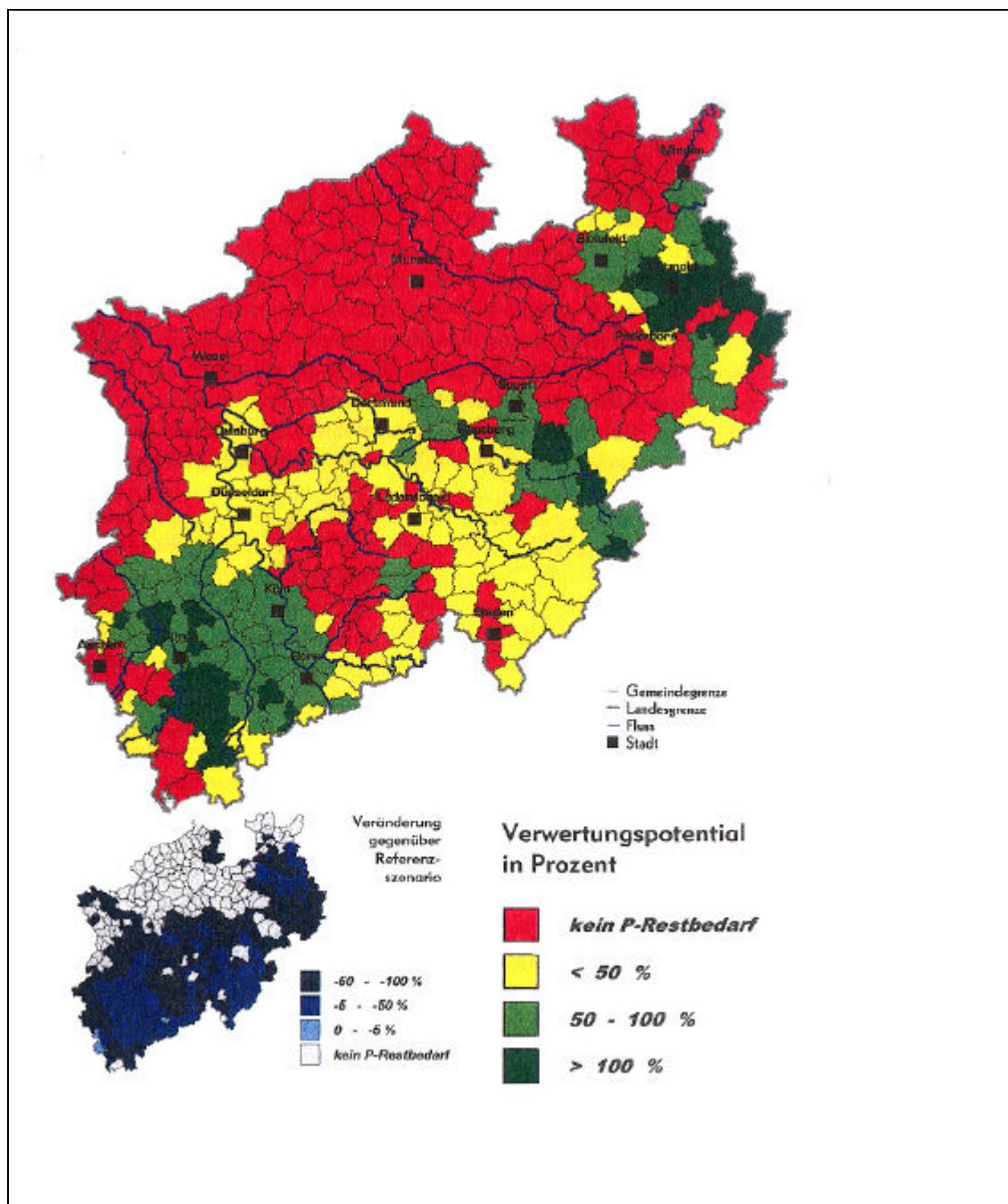


Abb. 2-7: Verwertungspotential für Sekundärrohstoffdünger in Nordrhein-Westfalen (Prozent der lokal anfallenden Mengen - SZ 1 b: bei Berücksichtigung der Phosphat-Versorgung der Böden [WERNER UND BRENK, 1997])

denen keine umweltverträgliche Ausbringung erfolgen kann, da die Bodengehalte oder Klärschlammgehalte den Anforderungen nicht genügen.

3 Material und Methode

Phosphat ist ein limitierender Faktor für eine umweltverträgliche Klärschlammausbringung in der Landwirtschaft. Auf vielen Böden von Nordrhein-Westfalen ist daher eine Nutzung nicht mehr oder nur eingeschränkt möglich. Für die nutzbaren Böden stellt sich die Frage, inwieweit die Phosphat-Wirkung des Klärschlammes vergleichbar der von mineralischen Düngern ist.

3.1 Versuchsfaktoren

In einem Gefäßversuch soll die P-Wirkung von Klärschlamm in Abhängigkeit von der P-Fällung und vom Substrat untersucht werden. Es wird ein Gefäßversuch gewählt, da hier unter kontrollierten Bedingungen erste Untersuchungen modellhaft durchgeführt werden können. Im Vergleich zum Freiland steht den Pflanzen in den Gefäßen weniger Boden zur Verfügung, dies hat zur Folge, daß der Boden eine wesentlich höhere Durchwurzelungsdichte aufweist und der P-Vorrat stärker ausgeschöpft werden kann. Da alle anderen Nährstoffe optimal angeboten werden können und mehrere Ernten pro Jahr durchführbar sind, ist in einer relativ kurzen Zeitspanne eine Bewertung des Konzeptes möglich. BOGUSLAWSKI UND LACH [1973, in: WENDT, 1991] sind der Meinung, daß vier Ernten im Gefäßversuch zu einem annähernd gleichen P-Entzug pro Einheit Boden führen wie 16jährige Feldversuche.

3.1.1 Klärschlamm

Für den Gefäßversuch haben drei Klärwerke im Kreis Soest jeweils einen flüssigen und einen stichfesten Klärschlamm zur Verfügung gestellt. Laut Klärschlammverordnung müssen die Klärschlämme im regelmäßigen Abständen untersucht werden. Für die Zeiträume Frühjahr 1995 und 1996, in welchen der Klärschlamm bei den Kläranlagen abgeholt worden ist, liegen die Auszüge aus den Untersuchungsprotokollen von fünf der sechs eingesetzten Klärschlämme in der Tabelle 3-1 vor. Von der flüssigen Klärschlamm-Variante 3 ist kein Untersuchungsergebnis beigefügt worden. Die stichfeste Klärschlamm-Variante 5 ist vor der Kalkung auf dem Schlammstapelplatz für den Gefäßversuch von der Kläranlage abgeholt

Tabelle 3-1: Ergebnisse der Klärschlammuntersuchungen nach Klärschlammverordnung
 (LIPPEVERBAND, 1995 und 1996; RUHRVERBAND, 1995 und 1996;
 INGENIEURBÜRO SOWA, 1995 und 1996)

Varianten	Einheit	Grenzwert	2	4	5¹	6²	7
Trockensubstanz	%		3,0-3,2	2,5-3,4	32,4	18,2-20,1	31,5
pH-Wert			7,5	7,6-7,9	12,0	7,2-7,6	7,4
Basisch wirksame Stoffe (als CaO)	%		8,4-9,3	8,8-12,9	19,4	4,8-6,5	14,0
Nährstoffgehalt in der Frischsubstanz							
Organische Substanz	%		1,5-1,6	1,0	13	10,4-10,9	
Gesamtstickstoff (N)	%		0,22	0,10-0,14	0,80	0,72-0,79	0,76
Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	%		0,12-0,14 (als N)	0,05-0,08	0,10 (als N)	0,13	0,16
Phosphat (P ₂ O ₅)	%		0,15-0,18	0,17-0,20	1,34	1,4-1,5	1,7
Kaliumoxid (K ₂ O)	%		0,02	0,01	0,08	0,022-0,053	0,04
Calciumoxid (CaO)	%		0,20-0,26	0,26-0,34	6,00	0,96-1,2	4,3
Magnesiumoxid (MgO)	%		0,02	0,03-0,04	0,20	0,048-0,058	0,32
Nährstoffgehalt in der Trockensubstanz							
Organische Substanz	%		49,5-50,4	40,5-40,5	40,7	54,2-56,9	34,7
Gesamtstickstoff (N)	%		6,99-7,36	4,2	2,47	3,9-4,0	2,5
Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	%		4,16-4,33 (als N)	1,9-2,3	0,31 (als N)	0,64-0,71	0,54
Phosphat (P ₂ O ₅)	%		4,59-6,00	5,9-6,4	4,14	6,9-8,0	5,4
Kaliumoxid (K ₂ O)	%		0,76-0,78	0,39-0,40	0,25	0,11-0,29	0,14
Calciumoxid (CaO)	%		6,72-8,16	9,9-10,0	18,5	4,8-6,5	14
Magnesiumoxid (MgO)	%		0,69-0,78	1,2	0,62	0,26-0,29	1,0
Schwermetalle							
Blei (Pb)	mg/kg	900	167-269	<5	209	94-100	<5
Cadmium (Cd)	mg/kg	10/5 ³	1,4-1,6	1,0	1,6	2,3-4,4	<1
Chrom (Cr)	mg/kg	900	47-53	63-70	32	39-66	61
Kupfer (Cu)	mg/kg	800	257-272	77-81	244	720	77
Nickel (Ni)	mg/kg	200	24-27	27-31	29	30-31	30
Quecksilber (Hg)	mg/kg	8	1,0-1,8	0,5-0,6	1,1	0,74-1,3	<0,5
Zink (Zn)	mg/kg	2500/2000 ³	818-924	490-500	861	710-740	440
Organische Schadstoffe							
AOX ⁴	mg/kg	500	174-233	95-96	199	190-210	90
PCB Nr. 28	mg/kg	0,2	0,01	0,01-0,02	0,01		<0,01
PCB Nr. 52	mg/kg	0,2	0,01-0,02	<0,01-0,02	0,01		<0,01
PCB Nr. 101	mg/kg	0,2	0,02	<0,01-0,01	0,02		<0,01
PCB Nr. 138	mg/kg	0,2	0,03-0,06	<0,01-0,01	0,03		<0,01
PCB Nr. 153	mg/kg	0,2	0,03-0,06	<0,01-0,01	0,03		<0,01
PCB Nr. 180	mg/kg	0,2	0,02-0,04	<0,01-0,01	0,02		<0,01
PCDD, PCDF	ng TE/kg	100	18-30	<0,01-0,01	30		<0,01

¹ Untersuchung ist von Faulschlamm, der auf dem Schlammstapelplatz nachgekalkt wurde. Für den Versuch wurde jedoch ungekalkter Klärschlamm eingesetzt.

² vom Klärschlamm flüssig P-Fällung mit Natriumaluminat (Variante 3) liegen eine Untersuchungsergebnisse vor.

³ Hoher Wert gemäß § 4 Abs. 11 und 12 AbfKlärV, niederer Wert gemäß § 4 Abs. 12 Satz 2 AbfKlärV.

⁴ AOX = Ads. org. geb. Halogene

worden. Dies wird an Hand des pH-Wert deutlich, der im eingesetzten Klärschlamm bei pH = 6,8 und im Untersuchungsprotokoll einen pH-Wert = 12 aufweist.

Die Nährstoffgehalte der drei Kläranlagen liegen überwiegend in der Spannbreite, die auch im Durchschnitt die Klärschlämme im Zeitraum 1986 - 1990 aufweisen. Die Gesamtstickstoffgehalte des flüssigen Klärschlammes (Variante 2) liegen mit ca. 7 % N in der TS verhältnismäßig hoch, bei der stichfesten Variante 5 (ca. 2,5 % N in der TS) ist dann der Stickstoff im abgepreßten Wasser und nicht mehr im Klärschlamm zu finden. Bei den Ammoniumgehalten ist der Unterschied zwischen flüssigen und stichfesten Klärschlämmen noch ausgeprägter.

Bei den Schwermetallgehalten sind die größten Unterschiede zwischen den Klärschlämmen festzustellen. Während bei den Gehalten des Klärwerkes III (Variante 4 und 7) sehr geringe Konzentrationen vorliegen, die zum Teil unterhalb der Bodengrenzwerte liegen, sind sie bei den Klärschlämmen der anderen beiden Kläranlagen wesentlich höher. Insbesondere bei der Klärschlamm-Variante 6 liegt der Kupfer-Gehalt mit 720 mg/kg nahe des Grenzwertes von

Tabelle 3-2: Übersicht der Varianten beider Anlagen

Var.	P-Angebot	P-Fällung in der Kläranlage	1995: Anlage 1			1996: Anlage 2		
			TS [%]	P ₂ O ₅ -Gehalt in TS [%]	P-Gehalt in TS [%]	TS [%]	P ₂ O ₅ -Gehalt in TS [%]	P-Gehalt in TS [%]
1	Kontrolle		-	-	-	-	-	-
2	KS I flüssig	P-Fällung mit Eisen (Fe ³⁺)	3,03	5,02	2,19	3,50	5,20	2,27
3	KS II flüssig	P-Fällung mit Natriumaluminat	4,46	7,69	3,36	3,65	8,86	3,87
4	KS III flüssig	P-Fällung mit Eisen (Fe ³⁺), Zugabe von CaO	3,30	6,27	2,74	3,50	5,13	2,24
5	KS I stichfest	P-Fällung mit Eisen (Fe ³⁺)	33,80	3,89	1,70	31,30	5,13	2,24
6	KS II stichfest	P-Fällung mit Natriumaluminat	20,20	7,76	3,39	17,70	9,07	3,96
7	KS III stichfest	P-Fällung mit Eisen (Fe ³⁺), Zugabe von CaO	26,00	5,86	2,56	29,20	4,56	1,99
8	D: Superphosphat			18,00	7,86		18,00	7,86
9	D: Hyperphos			31,00	13,54		31,00	13,54

KS - Klärschlamm, D - Dünger, mineralisch

Tabelle 3-3: Fraktionierung der Klärschlämme [mg P/100 g Boden] und pH-Wert
 Darstellung der Fraktionen, die pro 100 g Boden den Varianten zu Beginn des Versuches zugefügt wurde, Mittelwert der 2 Anlagen

Varianten	Gesamt-P	Fe/AL-P	Ca-P	Org. P	Rest-P	pH-Wert
2	4,85	1,6	2,7	0,3	0,25	6,8
3	4,85	1,7	2,3	0,2	0,65	7,0
4	4,85	1,6	1,9	0,3	1,05	8,7
5	4,85	1,6	2,5	0,4	0,35	6,8
6	4,85	1,6	2,0	0,2	1,05	6,8
7	4,85	1,5	2,5	0,2	0,65	8,4

800 mg/kg. Auch bei den Organischen Schadstoffen weist die Kläranlage III die geringsten Gehalte auf, die für die sechs Einzelsubstanzen der Polychlorierten Biphenyle und der Dioxine/Furane bei 0,01 mg/kg liegen. Bei der Kläranlage I (Varianten 2 und 5) liegen die Einzelkomponenten der Polychlorierten Biphenyle im Vergleich leicht erhöht, jedoch sind die Dioxin/Furan-Gehalte von 18 - 30 ng TE/kg sehr viel höher. Somit entsprechen die Klärschlämme alle den Vorgaben der Klärschlammverordnung § 4, Abs. 10, 11 und 12 AbfKlärV. Es sind keine Überschreitungen der zulässigen Schadstoffgehalte ermittelt worden, so dass sie alle für die landwirtschaftliche Verwertung stehen können.

In den Klärwerken sind verschiedene P-Fällungs-Methoden in den Reinigungsprozess integriert. Im Klärwerk I erfolgt die P-Fällung mit Eisen-III-Chlorid-Lösung (FeCl_3). Im Klärwerk II war die Phosphorelimination als Simultanfällung installiert. Das Fällmittel Natriumaluminat (NaAlO_2) wurde für die Schwachlastbelebung im Zulauf zur B-Stufe (AB-Verfahren) zugegeben. In der Kläranlage III erfolgt die Phosphatelimination simultan im Belebungsbecken unter Zugabe von 40 % Eisen- III-Chlorid-Lösung (FeCl_3). Nach der P-Fällung wird zur Stabilisierung eine Kalkung des Klärschlammes mit Branntkalk (CaO) durchgeführt (Tabelle 3-2). Da im Boden festgestellt werden sollte, in welchen Fraktionen das Phosphat im Boden vorliegt, wurde die Fraktionierung nach KURMIES [1971] (vgl. 3.5 Analyse) sowohl für den Boden als auch für den Klärschlamm durchgeführt (Tabelle 3-3).

3.1.2 Standort

Für die Untersuchungen sind zwei Böden unterschiedlicher Bodenarten aus Nordrhein-Westfalen ausgewählt worden, deren Phosphat-Gehalte im Durchschnitt der Gemeinden von Nordrhein-Westfalen liegen (vgl. Abbildung 2-6). Der erste Standort liegt in Hörstel, Kreis

Steinfurt und wird als Grünland genutzt. Der zweite ackerbaulich genutzte Standort ist Merklingen im Kreis Soest. Beide Standorte liegen am nördlichen bzw. südlichen Rand der Westfälischen Bucht, die mit ca. 9000 km² der zweitgrößte natürliche Großraum Westfalens ist (vgl. Abbildung 2-1).

3.1.2.1 Beschreibung der Böden

Die Stadt Hörstel liegt 40 bis 145 m über NN am 52° 16' Breiten- und 7° 36' Längengrad. Verkehrsgeographisch liegt Hörstel an dem Abzweig des Mittellandkanals vom Dortmund-Ems-Kanal, der im Süden der Stadt verläuft, im Norden fließt die Hörsteler Aa an der Stadt vorbei. Für den Kraftfahrzeugverkehr ist Hörstel im Süden an die Bundesautobahn A 30 angeschlossen, die Bundesstraße B 65 kreuzt in Ost-West-Richtung die Stadt.

Der Dortmund-Ems-Kanal verläuft südlich des Höhenrückens des Osning. In Bevergern, ein Stadtteil von Hörstel, schneidet der Mittellandkanal den Osning und fließt weiter in Richtung Nordosten. [MUSS UND SCHÜTTLER, 1969] Der Osning-Sandstein entstand in der Unterkreide als ein marines Küstensediment. Er ist ein heller, gelblich oder braun gefärbter Stein, der oftmals kreuzgeschichtet ist und sowohl tierische als auch pflanzliche Fossilien enthält. Er erreicht eine Mächtigkeit von 10 m an der südlichen Egge und bis zu 1500 m am Teutoburger Wald. Bei Bevergern besteht der Osning aus einer schmalen niedrigen, aber markant ansteigenden Schichtrippe aus steilgestellten, intensiv rotbraunen verwitterten Sandsteinen (Dörenther Sand) [MUSS UND SCHÜTTLER, 1969, HESEMANN, 1975]

Nach dem Rückzug des Meeres entstand in der Münsterländer Oberkreidebucht ein Tiefland, das von einem nach Westen entwässernden Flussystem überzogen war. Es entstand ein flaches Relief mit breiten Tälern und tiefen Rinnen, die als Ergebnis eiszeitlicher Flüsse angesehen werden können. Im Nordosten wird die im wesentlichen altpleistozäne Erosionslandschaft durch den Teutoburger Wald beschränkt. Es bildeten sich jedoch in der Hügellandschaft verschiedene Durchlässe. Im allgemeinen sind sie 100 - 300 m breit, das "Tor" von Bevergern erreicht jedoch eine Breite von 2 km [HESEMANN, 1975].

Merklingen liegt in der Gemeinde Welver im Kreis Soest. Es liegt ca. 2 km nördlich der Bundesstraße B1, dem Hellweg. Der Kreis Soest liegt zwischen dem 52° 25' und 51° 44'

nördlicher Breite und zwischen der $7^{\circ} 50'$ und $8^{\circ} 15'$ östlichen Länge des Regierungsbezirkes Arnsberg, wobei Merklingen im westlichen Teil des Kreises liegt [LUCAS, 1974 in ADRIAN, 1996] Ein Seitenarm der Ahse, der in die Lippe mündet, fließt durch Merklingen.

Zu Beginn der Oberkreide erweiterte sich das Großbecken zu einem ausgedehnten kontinentalen Flachmeer, das Münsterland lag nun unter dem Meeresspiegel, wodurch Grünsande (Soester Grünsand), Kalke, Plankalke und Mergel entstanden [SCHMIDT, 1990] Das Leitmineral des Grünsandsteines ist das Glaukonit, ein Kalium-Aluminium-Eisenmineral (chemisch) bzw. ein Hydroglimmer (mineralogisch). Wahrscheinlich wegen der annähernd gleichen Atomradien von Aluminium, Silicium und Eisen aus Sedimenten kam es zur Herauslösung und Ausfällung der Kationen. Der Soester Grünsand ist ein frisch giftgrüner und kalkiger Sandstein. [HESEMANN, 1975]

Die heutige Morphologie der Münsterschen Bucht entstand aus einer altpleistozänen Erosionslandschaft mit Schichtstufenentwicklungen sowohl entlang ihres Süd- und Ostrand (Haarstrang und Egge-Gebirge) als auch in ihrem Zentrum (Baumberge und Beckumer Berge). Die Münsterländer Oberkreidemulde ist weitestgehend gekennzeichnet durch verschiedene mächtige Lockerablagerungen des Mittel- und Jungpleistozän.

Den südlichen Rand der Westfälischen Bucht stellt der Haarstrang oder Hellweggebiet dar. Dieser wird untergliedert in mehrere Klein-Naturräume: südliche Haar, Haarhöhe, Oberhellweg und Niederhellweg [TIMMERMANN, 1955 in: HOHNVEHLMANN, 1963]. Merklingen liegt im Niederhellweg oder auch Niederbörde bezeichneten Gebiet, das eben bis flachwellig mit einer Höhenlage zwischen 80 und 100 m NN liegt. Die Böden der Niederbörde stehen im Gegensatz zu den Böden der Oberbörde unter Grundwassereinfluß. In der Niederbörde sind die Schichten der Oberkreide Cenoman, ein fester grauer Kalkmergel, Turon, braungelben und dunkelgrünen Kalk- und Sandsteinen und Coniac (früher Emscher), ein wasserundurchlässiger, hellgrauer Tonmergel zu finden. Die Lößauflage im Hellweltal erreicht eine Mächtigkeit von 5 - 8 m.

Im Versuchsgut Merklingen ist die verbreitetste Bodenart eine Pseudogley Parabraunerde aus Löß. Als Folge der Tondurchschlämmung stehen die Böden unter Einfluß des Stauwassers. Durch die Einwaschung von Calcium- und Magnesiumcarbonaten tritt eine Versauerung ein. Die obersten 30 cm des A_p-Horizontes sind geprägt von einem braunen bis

Tabelle 3-4: Allgemeine bodenchemische und -physikalische Eigenschaften des Standortes Versuchsgut Welver-Merklingsen [ADRIAN, 1996]

C/N-Verhältnis	13/1 - 15/1
Gesamt N (0-30 cm)	0,98 - 1,61 %
Luft-und Wasserdurchlässigkeit	mittel - gering
Gesamtporenvolumen	43 - 46 Vol. %
"Luftporen" Grobporen	9 - 12 Vol. %
Rohdichte	1,4 - 1,6 Vol. %
nutzbare Feldkapazität (0 - 100 cm)	220 mm
Totwasser pf > 4,2 (0 - 100 cm)	95 mm
Feldkapazität (0 - 100 cm)	315 mm

grauen, schwach humosen und mittel tonigen Schluff und einem Subpolyedergefüge der zur Verschlämzung neigt. Die folgenden 15 cm - ein A_{IS}-Horizont - sind gekennzeichnet von mittel bis stark tonigem Schluff und bereits leichten Staunässeerscheinungen. Ab ca. 45 cm schließt sich der B_tS_d und ab ca. 80 cm der B_tS_w-Horizont an. Die Bodenhorizonte besitzen ein Polyedergefüge und bestehen aus stark tonigem Schluff, der obere Horizont weist Rost- und Bleichflecken auf, der untere ist dicht gelagert und staunaß. Der Boden ist durch die wechselnden Wassergehalte geprägt und gewährleistet in trockenen Jahren eine sichere Wasserversorgung. Die Böden weisen eine gute Nährstoffversorgung auf und besitzen eine gute Fruchtbarkeit mit Bodenzahlen um 70. Die Schwermetalluntersuchungen ergaben, daß alle Schwermetallgehalte unterhalb der Grenzwerte für Böden der Klärschlammverordnung

Tabelle 3-5: Witterungsverlauf im Kreis Soest und Kreis Steinfurt
langjähriges Mittel

Monat	Lufttemperatur [°C] ¹		Niederschläge [mm] ²	
	Kreis Steinfurt	Kreis Soest	Kreis Steinfurt	Kreis Soest
Januar	1,2	1,6	58	60
Februar	1,4	1,8	45	46
März	4,2	4,8	51	56
April	8,2	8,2	52	55
Mai	12,4	12,7	50	66
Juni	15,4	15,5	63	80
Juli	17,1	17,4	77	81
August	16,7	16,9	77	73
September	13,4	14,1	81	68
Oktober	9,9	10,1	63	54
November	5,3	5,5	55	63
Dezember	2,4	2,7	54	64
langj. Mittel	9,0	9,1	681	722

¹ Erdbodentemperatur, es wird die Temperatur 5 cm über dem Boden gemessen, Durchschnittswert des Monats

² Summe der Niederschläge eines Monats

AbfKlärV 1992 liegen. [ADRIAN, 1996] Weitere Kenndaten bodenchemischer und -physikalischer Eigenschaften des Standortes Merklingsen sind der Tabelle 3-4 zu entnehmen. Das Grünland in Hörstel steht aufgrund der gesetzlichen Bestimmungen der Abfallverordnung nach AbfKlärV § 4 (4) nicht als Standort für eine Klärschlammverwertung zur Verfügung, weitere Daten sind daher nicht erhoben worden.

Die langjährigen Mittel sowohl der Niederschläge als auch der Lufttemperaturen sind bei beiden Standorten mit ca. 9 °C bzw. ca. 700 mm gleich. Auch sind keine großen Abweichungen bei den Mittelwerten bzw. Summenwerten innerhalb der Monate festzustellen, wie aus Tabelle 3-5 hervorgeht.

3.1.2.2 Bodenkundliche Kennzeichnung der Substrate

Als Substrat (Tabelle 3-6) wurde A_h-Material des Hörsteler Sandbodens und Material aus dem A_p-A_l-Horizonten einer Pseudogley Parabraunerde aus Löß vom Versuchsgut Merklingsen eingesetzt. Der Boden aus Hörstel ist ein reiner Sandboden (S), der leicht bearbeitbar ist und aufgrund seines hohen Sandanteils eine hohe Durchlässigkeit aufweist. Die Korngrößenfraktion Mittelsand (0,2-0,63 mm Äquivalendurchmesser ÄD), die einen Anteil von größer 50 % aufweist, ist am stärksten vertreten, gefolgt von der Feinsandfraktion (0,063-0,2 mm ÄD) mit

Tabelle 3-6: Allgemeine Bodenkenndaten

Prüfparameter	Einheit	Sand, 1995/96	Löß, 1995	Löß, 1996
pH-Wert		5,7	6,4	6,7
Kalium ¹	mg K ₂ O/100 g Boden	3	16	26
	Gehaltsklasse	B	C	D
Magnesium ²	mg Mg/100 g Boden	4	5	7
	Gehaltsklasse	C	C	D
Humus im Mineralboden ³	%	1,4	2,6	2,6
Ton ⁴	%	4,3	13,8	12,5
Schluff ⁴	%	3,8	83,7	84,8
Sand ⁴	%	91,9	2,5	2,7
Bodenart ⁵		Sand (S)	toniger Schluff (Ut3)	toniger Schluff (Ut3)

¹ Prüfmethode HOFFMANN, 1991 VDLUFA Methodenbuch Band I, A6.2.1.1

² Prüfmethode HOFFMANN, 1991 VDLUFA Methodenbuch Band I, A6.2.4.1

³ Prüfmethode DIN ISO 10694

⁴ Prüfmethode DIN 19683-2

⁵ SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1984

Tabelle 3-7: Phosphatgehalte der Substrate

Substrat	Herkunft	Gesamt-P [mg P ₂ O ₅ / 100 g Boden]	[mg P/ 100 g Boden]	CAL-P [mg P/ 100 g Boden]	P- Gehalts- Klasse	rel. P- Verfüg- barkeit ¹ [%]	
Sand, 1995/96	Hörstel, Kreis Steinfurt	87,97	38,41	13,2	5,8	C	15,0
Löß, 1995	Versuchsgut Merklingsen	132,32	57,78	14,8	6,5	C	11,3
Löß, 1996	Versuchsgut Merklingsen	140,46	61,34	22,4	9,8	D	15,9

¹ relative P-Verfügbarkeit = CAL-P/Gesamt-P

fast 40 %. Alle anderen Fraktionen weisen Anteile, die geringer als 5 % sind, auf. Die Kalium- bzw. Magnesiumgehalte liegen in der Gehaltsklassen B bzw. C. Bei dem Boden aus Merklingsen handelt es um einen tonigen Schluff (Ut3). Die Hauptfraktion stellt der grobe Schluff (0,02-0,063 mm ÄD) mit einem Anteil von 60 % dar. Daneben ist der Mittelschluff (0,0063-0,02 mm ÄD) mit 20 % und der Ton (< 0,002 mm ÄD) mit ca. 13 % an den Korngrößen vertreten. Kalium- und Magnesiumgehalte gehören den Gehaltsgruppen C und D an. Für den Versuch ist daher maximal eine Erhaltungsdüngung, die die Höhe des Nährstoffentzuges durch die einzelnen Kulturen ausgleicht, notwendig [SCHEFFER UND SCHACHT-SCHABEL, 1984, LANDWIRTSCHAFTSKAMMER WESTFALEN-LIPPE, 2000].

Eine Zusammenstellung der Phosphat-Gehalte für die drei Böden kann der Tabelle 3-7 entnommen werden. Die Gesamt-Phosphat-Gehalte liegen zwischen ca. 40 mg P/100 g Boden (Sand) und ca. 60 mg P/100 g Boden bei den beiden Lößböden. Einen entsprechenden Unterschied weisen auch die CAL-P-Gehalte auf, die zwischen 6 - 10 mg P/100 g Boden liegen und damit den Gehaltsklassen C bzw. D angehören. Die relative P-Verfügbarkeit, die sich aus dem Verhältnis CAL-P-Gehalt zum Gesamt-P-Gehalt ergibt, reicht von 11 - 16 %. Die relative Verfügbarkeit des Sandboden ist mit der des Lößbodens, 1996 vergleichbar. Die relative Verfügbarkeit des Lößbodens, 1995 liegt um ca. ein Viertel darunter.

Um die Veränderungen der Phosphat-Fraktionen des Bodens zu bestimmen, wurde die P-Fraktionierung nach KURMIES [1971] (vgl. 3.5 Analyse) durchgeführt (Tabelle 3-8). Die größte Fraktion stellt für alle Böden die Fe/Al-P-Fraktion dar. Die Ca-P und Org. P-Fraktion sind annähernd gleich groß. Die Rest-P-Fraktion ergibt sich aus der Differenz der drei P-Fraktionen zur Gesamt-P-Fraktion.

Tabelle 3-8: P-Fraktionierung der Substrate [mg P/100 g Boden]

Substrat	Gesamt-P	Fe/Al-P	Ca-P	Org. P	Rest P
Sand, 1995/96	38,41	25,30	2,73	4,78	5,60
Lößlehm, 1995	57,78	29,86	9,89	6,16	11,87
Lößlehm, 1996	61,34	26,98	12,20	11,95	10,24

3.2 Anlage des Versuchs

Zur Untersuchung der Fragestellung der P-Wirkung des Klärschlammes in Abhängigkeit von der P-Fällung in der Kläranlage und vom Substrat wurden zwei Versuchsanlagen (Tabelle 3-9) angelegt, die um ein Jahr versetzt durchgeführt wurden. Jeder Gefäßversuch begann mit 126 Gefäßen. Als Gefäße wurden einheitlich Kick-Brauckmann-Gefäße mit einem Innendurchmesser von 21,3 cm und einer Oberfläche von 356 cm² verwendet. Es wurde 9 kg trockener Boden eingewogen. Um Verlusten durch Vogelfraß bei Sommerweizen und Hafer vorzubeugen, wurden die Gefäße 1996 zur Abreifungsphase des Sommerweizens in ein unbeheiztes Gewächshaus gestellt. In den Jahren 1997 und 1998 wurden hingegen vor der Abreife des Getreides Vogelnetze gespannt.

Tabelle 3-9: Versuchsanlagen

	Anlage 1	Anlage 2
1995	Einjähriges Weidelgras	
1996	Sommerweizen Mais	Einjähriges Weidelgras
1997	Hafer Mais	Sommerweizen Mais
1998		Hafer

3.2.1 Das erste Untersuchungsjahr

Im ersten Jahr der Versuchsanlagen wurde der Klärschlamm (Tabelle 3-10) mit 7 kg Boden vermischt und in das Gefäß gegeben. Die restlichen 2 kg Boden wurden locker aufgeschichtet, um erhöhte Salzgehalte im Saathorizont zu vermeiden. Es wurden sieben Wiederholungen angelegt, um bei dem geringen Bodenvolumen aussagefähige Ergebnisse zu erhalten. Über die Gefäßoberfläche wurden gleichmäßig neun Löcher ca. 10 mm tief gedrückt und Einjährige Weidelgras 'LIMELLA' in Horstsaaat ausgesät. Die Wahl dieser Grasart gewährleistet eine

Tabelle 3-10: Einwaage Klärschlamm bzw. mineralischer Dünger beider Anlagen

Variante	P-Angebot	P-Fällung in der Kläranlage	Anlage 1 Einwaage KS bzw D je Gefäß* [ml bzw. g]	Anlage 2 Einwaage KS bzw D je Gefäß* [ml bzw. g]
1	Kontrolle		-	-
2	KS I flüssig	P-Fällung mit Eisen (Fe^{3+})	657,0	549,6
3	KS II flüssig	P-Fällung mit Natriumaluminat	292,0	309,1
4	KS III flüssig	P-Fällung mit Eisen (Fe^{3+}), Zugabe von CaO	482,0	557,0
5	KS I stichfest	P-Fällung mit Eisen (Fe^{3+})	74,3	62,3
6	KS II stichfest	P-Fällung mit Natriumaluminat	63,7	62,3
7	KS III stichfest	P-Fällung mit Eisen (Fe^{3+}), Zugabe von CaO	65,6	75,1
8	D: Super-phosphat		5,6	5,6
9	D: Hyper-phos		3,2	3,2

*um eine Konz. von 1000 mg P_2O_5 bzw. 436,7 mg P je Gefäß zu erreichen

intensive Durchwurzelung des Substrates und durch die mehrfache Schnittnutzung hohe Entzüge. Nach der Saatgutablage wurden die Löcher wieder verschlossen.

3.2.2 Das zweite Untersuchungsjahr

Im zweiten Jahr der Versuchsanlage wurde der Boden der sieben Wiederholungen gemischt, 9 kg trockener Boden abgewogen und in die Gefäße gefüllt. Da aufgrund der Entnahme für die Bodenproben Boden fehlte, konnten nur noch sechs Wiederholungen angelegt werden. Es wurden in 25 Saatstellen jeweils zwei Saatkörner des Sommerweizens 'TINOS' abgelegt, nach dessen Aufgang wurde auf 25 Pflanzen vereinzelt. In der ersten Versuchsanlage 95 kam es aufgrund extremer Witterungsbedingungen zu einem schlechten Auflauf des Sommerweizens. Anfang Mai wurde der Boden nochmals gelockert und eine erneute Aussaat durchgeführt. Nach der Ernte des Sommerweizens wurde der Boden gelockert, bevor in 4 Saatstellen je ein vorgekeimtes Korn der Maissorte 'HELIX' ausgesät wurde.

3.2.3 Das dritte Untersuchungsjahr

Im dritten Jahr der Versuchsanlage wurde der Boden jeder Variante nochmals gemischt und jeweils 9 kg Boden in die Gefäße der fünf Wiederholungen gefüllt. In 25 Saatstellen wurden zwei Körner der Hafersorte 'FUCHS' ausgesät, die später auf 25 Pflanzen pro Gefäß vereinzelt wurden. Bei der Versuchsanlage 95 wurde nach der Ernte des Hafers Mais der Sorte 'HELIX' ausgesät und nach dem Auflaufen auf vier Pflanzen je Gefäß vereinzelt. Die Aussaattermine und -stärke der einzelnen Kulturen können der Tabelle 3-11 entnommen werden.

Tabelle 3-11: Aussaattermine und -stärken der Kulturen beider Versuchsanlagen

Kultur	Anlage 1		Anlage 2	
	Termin	Aussaatstärke¹	Termin	Aussaatstärke¹
Einjähriges Weidelgras 'LIMELLA' (R 99%, Kf 85%, TKG 2,8 g)	19.05.95	9 Saatstellen/ Gefäß, Horstsaa	22.05.96	9 Saatstellen/ Gefäß, Horstsaa
Sommerweizen 'TINOS' (Kf 98%, TKG 41 g)	03.05.96 ²	40 Pfl./Gefäß	11.03.97	25 Pfl./Gefäß
Mais 'HELIX'	09.09.96	4 Pfl./Gefäß	28.07.97	4 Pfl./Gefäß
Hafer 'FUCHS' (Kf 98%, TKG 36,3 g)	10.03.97	25 Pfl./Gefäß	17.03.98	25 Pfl./Gefäß
Mais 'HELIX'	28.07.97	4 Pfl./Gefäß		

¹ Pflanzenzahl nach Vereinzeln

² Auflaufprobleme in Folge extremer Witterung, 2. Aussaat

3.3 Durchführung des Versuches

Für die Grunddüngung (Tabelle 3-12) wurde reines Ammoniumnitrat und reines Kaliumchlorid eingesetzt, wobei der Dünger in den Boden eingearbeitet wurde. Nach jedem Schnitt des Einjährigen Weidelgrases erfolgte eine Flüssigdüngung mit Ammoniumnitrat. Der Sommerweizen und der Hafer erhielten eine zweite Stickstoffdüngung, der Sommerweizen zusätzlich noch eine Magnesiumdüngung in Form von Magnesiumoxid.

Pflanzenschutzmaßnahmen (Tabelle 3-13) wurden an Hand des Schadschwellenprinzips durchgeführt. In den Jahren 1995, 1996 und 1998 erfolgten die Spritzungen mit Pirimor Granulat 0,05 %. 1997 erfolgte im Juli jeweils eine Behandlung im Sommerweizen- und Haferbestand mit Juwel.

Tabelle 3-12: Düngergaben (Angaben in g pro Gefäß)

Kultur	Termin		Dünger		
	Anlage 1	Anlage 2	N als NH₄NO₃	K als KCl	Mg als MgO
Einjähriges Weidelgras 'LIMELLA'	15.05.95	13.05.96	3,4	3,4	
	11.07.95	06.07.96	1,2		
	28.07.95	30.07.96	1,2		
	25.08.95	21.08.96	1,2		
Sommerweizen 'TINOS'	21.03.96	03.03.97	2,9	2,9	0,35
	25.06.96	28.05.97	1,0		
Mais 'HELIX'	27.09.96	28.07.97	1,0		
Hafer 'FUCHS'	03.03.97	10.03.98	3,4	1,9	
	28.05.97	27.05.98	1,0		
Mais 'HELIX'	28.07.97		1,0		

Der Wassergehalt wurde zunächst auf 40% der maximalen Wasserhaltekapazität (WHK), später auf 50 % WHK eingestellt. Bei sehr hohem Wasserverbrauch wurde der Wassergehalt kurzfristig bis zu 100 % der maximalen WHK erhöht. Alle Gefäße wurden regelmäßig mit Wasser auf ihr Sollgewicht eingestellt, wobei das Wasser in den Gefäßmantel gegeben wurde. Wenn die Wasserhaltekapazität nach sehr starken Niederschlägen überschritten wurde, wurde das überschüssige Wasser aufgefangen und beim nächsten Gießen verwendet.

Tabelle 3-13: Pflanzenschutzmaßnahmen in beiden Versuchsanlagen

Kultur	Anlage 1		Anlage 2	
	Termin	Pflanzenschutzmittel	Termin	Pflanzenschutzmittel
Einj. Weidelgras 'LIMELLA'	04.08.95	Pirimor Granulat ¹	31.07.96	Pirimor Granulat ¹
Sommerweizen 'TINOS'	11.06.96 31.07.96	Pirimor Granulat ¹ Pirimor Granulat ¹	18.06.97	Juwel
Hafer 'FUCHS'	18.06.97	Juwel	05.06.98	Pirimor Granulat ¹

¹ Pirimor Granulat 0,05%

3.4 Witterung

Die Gefäße der beiden Versuchsanlagen standen während des gesamten Versuchszeitraumes im Freien und waren primär den natürlichen Witterungsverhältnissen ausgesetzt. Über den Winter standen sie im ersten Jahr in einer ungeheizten Halle und in den folgenden Jahren im frostfrei gehaltenen Gewächshaus. Aus der Tabelle 3-14 gehen die Wetterdaten

Lufttemperatur und Niederschläge für die Vegetationsperiode März - November der Jahre 1995 bis 1998 hervor.

Die durchschnittliche Jahrestemperatur des Jahres 1995 lag bei 9,8 °C und damit 0,8 °C über dem langjährigen Mittel. Im Frühjahr fielen die Temperaturabweichungen vom langjährigen Mittel nur gering aus. Die Monate Juli, August und Oktober waren hingegen deutlich wärmer als das langjährige Mittel. Erhebliche Niederschläge fielen im März und September des Jahres 1995. Dagegen kam es in den Sommermonaten Juli und August sowie im Oktober zu Niederschlagsdefiziten.

Die Vegetationsperiode des Jahres 1996 begann kalt und trocken. Noch im Mai kam es zu Nachtfrösten. Im Juni stieg die durchschnittliche Monatstemperatur auf 15,2 °C, stieg aber in den folgenden Sommermonaten nur noch geringfügig an, bevor im September die Temperaturen wieder unter das durchschnittliche Jahresmittel fielen. Zu größeren Niederschlagsereignissen kam es erst ab dem Monat Mai. Die Monate März, April, Juni und September lagen unterhalb der zu erwartenden Niederschlagsmengen.

Auch im Jahre 1997 gab es im Mai Nachtfröste. Der August lag mit 20,3 °C über dem langjährigen Jahresschnitt. Im September traten bereits wieder Temperaturen um den Gefrierpunkt auf, bevor es im Oktober zu Temperaturen von -6,1 °C kam. In den Monaten März und April fielen unterdurchschnittliche Niederschläge. Dieses wurde ausgeglichen durch einen sehr feuchten Juni und Juli, in denen bis zu 38,3 mm Niederschlag an einem einzelnen Tag fiel. Die folgenden Monate waren durch unterdurchschnittliche Niederschlagsmengen geprägt.

Im Jahre 1998 kam es zu einem warmen Frühjahr, die Tagestemperaturen kletterten im März bereits auf 23,9 °C. Die Sommertemperaturen lagen im langjährigen Durchschnitt. Die Niederschläge fielen hingegen im Frühjahr größer als erwartet aus. Der Mai war ein recht trockener Monat, bevor es im Juni wieder zu erheblichen Niederschlägen kam. Juli und August liegen geringfügig unterhalb des Jahresschnittes, jedoch im September kam es wiederum zu großen Niederschlagsereignissen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß 1995 etwas wärmer war, aber mit durchschnittlichen Niederschlägen. 1996 war hingegen zu kalt. 1997 und 1998 lagen

hinsichtlich ihrer Temperaturverläufe im Durchschnitt. In den Vegetationsperioden (März bis Oktober) der Jahre 1995 bis 1997 kam es zu Niederschlägen von ca. 410 mm. Das Jahr 1998 war hingegen feuchter, dort fielen in dem gleichen Zeitraum 760 mm Niederschlag.

Tabelle 3-14: Wetterdaten für 1995-1998
(Ermittelt auf dem Versuchsgut Merklingsen)

Jahr	Monat	Lufttemperatur [°C] ¹			Niederschläge [mm]	
		Min.	Max.	DS ²	Max. Tag ³	Summe ⁴
1995	März	-3,4	16,1	4,1	3,1	57,7
	April	0,6	25,0	9,4	11,9	45,5
	Mai	2,9	31,5	14,3	16,7	51,8
	Juni	7,1	37,0	15,7	14,2	49,0
	Juli	10,7	38,0	21,8	12,7	47,9
	August	9,6	38,3	20,1	10,8	41,8
	September	6,8	22,2	14,2	32,9	101,5
	Oktober	1,7	28,8	13,4	5,8	14,3
1996	März	-5,9	11,0	2,4	8,1	8,3
	April	-5,4	26,2	8,8	4,7	7,1
	Mai	-0,3	27,0	10,9	12,0	58,8
	Juni	2,6	33,0	15,2	12,0	32,9
	Juli	4,7	27,8	15,7	8,6	81,8
	August	6,7	29,0	16,9	19,0	98,7
	September	2,5	20,0	11,3	17,0	46,3
	Oktober	0,1	20,8	10,0	28,0	71,0
1997	März ⁵	-1,6	14,8	6,3	7,8	27,9
	April	-2,8	16,7	7,4	9,0	38,9
	Mai	1,7	28,3	13,0	13,5	50,0
	Juni	2,5	28,7	15,9	38,3	102,6
	Juli	8,7	29,7	17,4	22,2	98,0
	August	9,7	33,9	20,3	10,2	23,7
	September	0,0	28,3	14,2	3,4	8,4
	Oktober	-6,1	24,3	9,1	24,9	63,2
1998	November	-3,9	13,7	6,0	6,6	25,7
	März	1,1	23,9	6,9	18,4	77,8
	April	-0,5	23,9	9,5	12,5	72,7
	Mai	2,1	30,1	14,4	6,8	30,1
	Juni	3,8	32,5	16,3	24,3	135,9
	Juli	7,2	33,0	16,2	10,1	74,3
	August	8,6	33,7	17,1	27,0	74,5
	September	5,3	23,8	14,5	38,2	130,8

¹ Erdbodentemperatur, es wird die Temperatur 5 cm über dem Boden gemessen

² Durchschnittswert des Monats

³ Maximale Niederschlagsmenge eines einzelnen Tages

⁴ Summe der Niederschläge eines Monats

⁵ gemessen ab dem 15.03.97

Für einen Gefäßversuch ist es wünschenswert, wenn die Niederschlagsereignisse das Wachstum der Kulturen begünstigen. Größere Niederschlagsereignisse sind für einen Gefäßversuch ungünstig, da es sehr schnell zu einer Sättigung des Bodens kommt und das Wasser in dem Gefäß stehen bleibt. Um dies zu vermeiden, wurde überschüssiges Regenwasser, welches sich nach mehrtägigen Niederschlägen im Außentopf der Kick-Brauckmann Gefäße sammelt, in spezielle Gefäße abgefüllt.

Im Jahre 1995 trat ein solches Ereignis auch kurz nach der Aussaat auf. Damit sich dies in den Jahren 1996 - 1998 nicht wiederholte, wurde eine UV-durchlässige Folie über die Gefäße gelegt. Diese wurde entfernt, sobald der Pflanzenbewuchs soweit entwickelt war, daß die Wassermengen einzelner Niederschlagsereignisse verwertet werden konnten.

3.5 Analysen

Sowohl die Pflanzen- als auch die Bodenergebnisse werden als Durchschnittswerte der sieben, sechs bzw. fünf Wiederholungen angegeben.

3.5.1 Pflanzen: Entnahme - Behandlung - Untersuchung

Die Schnitte des Einjährigen Weidelgrases erfolgten bei Silierreife (kurz vor der Blüte). Um einen zügigen weiteren Aufwuchs zu ermöglichen, wurde das Einjährige Weidelgras 5 cm über dem Boden abgeschnitten. Beim Sommerweizen und Hafer wurden die Ähren und die Halme getrennt geerntet. In einem Einzelährendrescher wurden die Ähren ausgedroschen, die Spindeln und Spelzen wurden der Strohfraktion zugeschlagen. Der Mais wurde als Gesamtpflanze direkt über dem Boden abgeschnitten.

Die Proben wurden getrocknet, der Ertrag ermittelt und anschließend auf 1 mm gemahlen. Mit dem gemahlenen Material wurde der Gesamtphosphor-Gehalt der Pflanzen nach der amtlichen LUFA-Methode (Methodenbuch III, 10.6.1) [NAUMANN et al., 1976] bestimmt. Die naß mit Säure aufgeschlossenen Proben wurden mit Hilfe der Vanadatmolybdat-Methode bei 430 nm im Spektralphotometer bestimmt. Der Gesamtphosphor-Gehalt, ausgedrückt in Prozent wurde in Milligramm Phosphor pro Gefäß (mg P/Gefäß) umgerechnet und angegeben.

3.5.2 Boden: Entnahme - Behandlung - Untersuchungen

Nach der letzten Ernte jeden Jahres wurden Bodenproben mit jeweils 10 Einstichen pro Gefäß entnommen. Der luftgetrocknete Boden wurde auf 2 mm gesiebt.

Das pflanzenverfügbare Phosphat wurde als CAL-P nach LUFA-Methodenbuch I A 6.2.1.1 [HOFFMANN, 1991] bestimmt. Dazu wird eine Extraktionslösung mit einer sauren auf pH 4,1 gepufferten Lösung aus Acetat, Lactat und Essigsäure hergestellt, mit der der Boden für neunzig Minuten geschüttelt wird. Im Filtrat wird das Phosphat mit Molybdatreagenz angefärbt und bei 580 nm photometrisch bestimmt.

Die Bestimmung des Gesamt-Phosphat-Gehaltes erfolgte nach der LUFA-Methode A 2.4.2.1 [HOFFMANN, 1991] im Aufschluß mit Schwefelsäure und Perchlorsäure unter Zusatz von Salpetersäure nach Beendigung der Hauptreaktion. Die photometrische Bestimmung des Phosphors wurde bei 578 nm als Molybdänblau durchgeführt.

Um festzustellen, in welchen Fraktionen die Phosphate im Boden vor bzw. nach der Düngung mit Klärschlamm vorliegen, wurde eine P-Fraktionierung nach KURMIES [KURMIES, 1971] durchgeführt. Die Eisen- und Aluminiumphosphate werden nach der Eliminierung des Calciums (Ca^{2+}) als Summe durch Lösen mit 1 n Natronlauge (NaOH) in einer zweistündigen Behandlung im Wasserbad erfaßt. Daran schließt sich zur Bestimmung der Calciumphosphate eine zweistündige Behandlung im Wasserbad mit 1 n Schwefelsäure (H_2SO_4) an. Die Fraktion des organisch gebundenen Phosphates, welche mit dem Eisen- und Aluminium-Phosphaten gelöst wurde, wird mit Hilfe des Säureaufschlusses bestimmt. Diese Methode soll ermöglichen, Aussagen über die Alterung der Phosphate zu geben. Des Weiteren soll gezeigt werden, in welchen Fraktionen die Phosphate im Boden vorliegen und in welche Fraktion die zugefügten Phosphate innerhalb des Versuchszeitraumes gelangen.

Die elektrometrische Messung des pH-Wertes erfolgte nach LUFA-Methode A 5.1.1 [HOFFMANN, 1991] in einer Suspension aus Boden und Calciumchlorid im Verhältnis 1+2,5.

Über die drei Jahre werden Phosphat-Bilanzen berechnet, bei denen die Phosphat-Zugänge (Bodengehalt zu Beginn der Untersuchung, Klärschlamm bzw. Mineraldünger) den Phosphat-

Abgängen (durch die Pflanzenmasse und Bodengehalt am Ende der Untersuchung) gegenübergestellt werden. Der Saldo einer Bilanz läßt Aussagen über die Effizienz des Phosphateinsatzes zu.

3.6 Statistische Auswertung

Die statistische Verrechnung der Daten (mehrfaktorielle Varianzanalyse) erfolgte mit SPSS für Windows 6.0.1. mit der Procedur 'Anova'. Die Auswertung erfolgte zunächst über die drei Jahre der beiden Versuchsanlagen. Anschließend wurde auch eine Verrechnung über die Jahre der einzelnen Versuchsanlagen bzw. beider Versuchsanlagen zusammen durchgeführt. Eine Überprüfung der Varianzen und der Differenzen der Mittelwerte auf ihre Signifikanzen wurde mit dem F-Test durchgeführt, wobei eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % angenommen wurde.

4 Ergebnisse

Zur Erfassung der Pflanzenerträge und der Phosphatdynamik im Boden nach einer Klärschlamm- bzw. Mineraldüngung wurde im Fachbereich Agrarwirtschaft der Universität-GH Paderborn in Soest Untersuchungen in dem Zeitraum von 1995 - 1998 durchgeführt. Im ersten Ergebnisteil wird der Einfluß der Klärschlammdüngung auf das Pflanzenwachstum betrachtet, bevor im zweiten Teil näher auf die Auswirkungen auf den Boden eingegangen wird.

4.1 Einfluß der Klärschlamm-Düngung auf das Pflanzenwachstum

Im folgenden werden die Erträge und die P-Entzüge der drei Versuchsjahre zunächst einzeln dargestellt. Im ersten Versuchsjahr wurde Einjähriges Weidelgras angebaut, im zweiten Jahr Sommerweizen und Mais als Nachfrucht, im dritten Jahr Hafer und in der ersten Anlage zusätzlich Mais. Daran schließen sich die Auswirkungen über die gesamte Fruchfolge an.

4.1.1 Erträge und P-Entzüge im ersten Untersuchungsjahr

Abbildung 4-1 stellt die Erträge des Einjährigen Weidelgrases der beiden Untersuchungsjahre dar. Für beide Jahre gilt, daß die Erträge der Sand-Varianten mit ca. 20 g/Gefäß und Schnitt nur ca. 2/3 der Löß-Varianten (30 g/Gefäß) betragen. Innerhalb der Sand-Variante der ersten Anlage sind bei den mit Klärschlamm und Mineraldünger gedüngten Varianten im Vergleich zur Kontrolle keine statistisch gesicherten Mehrerträge erzielt worden. In der zweiten Anlage sind hingegen höhere Erträge bei den flüssigen und stichfesten Klärschlamm-Varianten mit dem Fällungsmittel Eisen (2 und 5) und Aluminat (3 und 6) sowie bei der Dünger-Variante Superphosphat (8) erreicht worden.

Bei den Löß-Varianten der ersten Anlage sind bei den drei flüssigen Klärschlamm-Varianten (2, 3 und 4) signifikant höhere Erträge im Vergleich zur Kontrolle ermittelt worden. Die Erträge der zweiten Anlage liegen insgesamt auf einem höheren Niveau. Dort erreichten nur die beiden Klärschlamm-Varianten mit dem Fällungsmittel Aluminat (3 und 6) noch statistisch gesicherte Mehrerträge gegenüber der ungedüngten Kontrolle (1).

Das Ergebnis zeigt, daß in der ersten Anlage nur bei den Löß-Varianten der flüssige Klärschlamm ertragssteigernd wirkte. In der zweiten Anlage kommt es hingegen bei der Klärschlamm-Variante mit dem Fällungsmittel Aluminat sowohl bei den Sand- als auch bei den Löß-Varianten zu einer Steigerung des Ertrages.

Abbildung 4-2 stellt den P-Entzug der beiden Jahre für das Einjährige Weidelgras dar. In der ersten Anlage erzielte bei den Sand-Varianten die mit Eisen gefällte, flüssige Klärschlamm-Variante (2) und die Dünger-Variante Superphosphat (8) signifikant höhere P-Entzüge als die Kontrolle. In der 2. Anlage stieg der P-Entzug bei allen signifikant an. Nur bei den beiden eisengefällten aufgekalkten Klärschlämmen (4 und 7) konnten keine signifikant höheren P-Entzüge erreicht werden. Der P-Entzug der mit Eisen gefällten Klärschlamm-Variante (2) und der Dünger-Variante Superphosphat (8) liegen auf einem gleichen Niveau. Bei den Löß-Varianten lagen die P-Entzüge um ca. 1/3 höher als bei den Sand-Varianten. Bei den zwei stichfesten mit Eisen gefällten Klärschlamm-Varianten (ungekalkt 5, gekalkt 7) lag der P-Entzug nicht signifikant höher als die ungedüngte Kontrolle. Im ersten Jahr der 2. Anlage waren alle P-Entzüge größer als bei der Kontrolle.

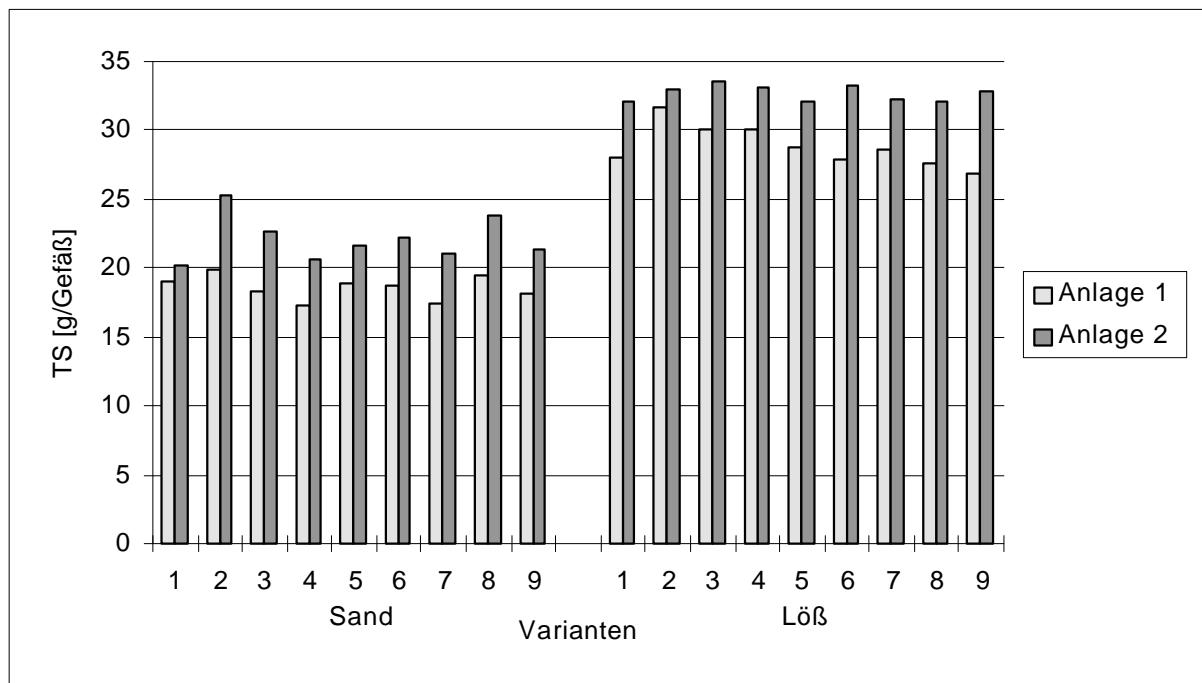


Abb. 4-1: Erträge des Einjährigen Weidelgrases in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Varianten, Mittelwert der 4 Schnitte und 7 Wdh.
 Anlage 1 = 1995, Anlage 2 = 1996
 $GD(5\%) \text{ Ertrag Anlage/Substrat/Variante} = 1,4$

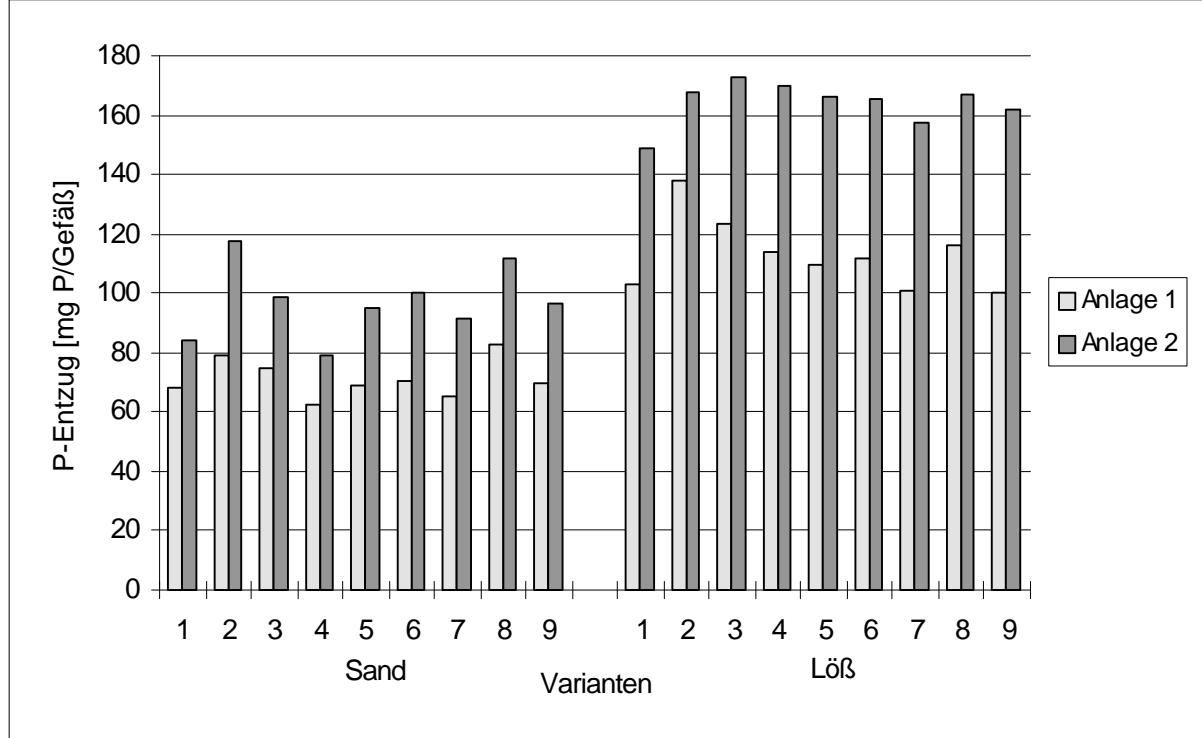


Abb. 4-2: P-Entzug Einjähriges Weidelgras in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Varianten, Mittelwerte der 4 Schnitte und 7 Wdh.
 Anlage 1 = 1995, Anlage 2 = 1996
 $GD(5\%) \text{ P-Entzug Anlage/Substrat/Variante} = 8,1$

Aus beiden Versuchsjahren und beiden Substraten läßt sich der gleiche Trend herauslesen. Bei den flüssigen Klärschlamm-Varianten kommt es zu Abstufungen in der Reihenfolge der Fällungsmittel Eisensalz (2), Aluminat (3) und Eisensalz mit anschließender Kalkung (4). Bei den Löß-Varianten bestehen diese Unterschiede für das erste Jahr der 2. Anlage nicht.

4.1.2 Erträge und P-Entzüge im zweiten Untersuchungsjahr

Im zweiten Jahr erfolgte vor der Aussaat des Sommerweizens 'TINOS' zunächst innerhalb einer Variante eine Durchmischung des Bodens. Bei der Ernte wurden die beiden Fraktionen Korn und Stroh voneinander getrennt und separat untersucht.

Abbildung 4-3 stellt die erzielten Erträge vom Weizen-Korn dar. Die Wechselwirkungen der Faktoren Jahr-Substrat-Variante sind nicht signifikant, daher werden die beiden Wechselwirkungen Jahr-Variante (Abbildung 4-3-1) und Substrat-Variante (Abbildung 4-3-2) dargestellt. Letztere liegt mit $p = 5,8\%$ sehr knapp außerhalb der Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%.

Die Korn-Erträge der ersten Anlage variieren von 26 g/Gefäß bis 43 g/Gefäß, dagegen sind die Erträge der zweiten Anlage wesentlich ausgeglichener mit Unterschieden von nur 5 g/Gefäß zwischen der Kontrolle (1) und der flüssigen Klärschlamm-Variante mit dem Fällungsmittel Eisen (2). Innerhalb der ersten Anlage bestehen signifikante Unterschiede von allen Varianten zur Kontrolle (1), außer der flüssigen Klärschlamm-Variante mit dem Fällungsmittel Eisen (2). Bei den stichfesten Klärschlamm-Varianten mit dem Fällungsmitteln Eisen (5) und Aluminat (6) konnten zudem höhere Erträge ermittelt werden als bei den entsprechend flüssigen Klärschlamm-Varianten (2 bzw. 3).

Betrachtet man nun die Korn-Erträge in Abhängigkeit der Substrate und Varianten wird deutlich, daß die Erträge der Sand-Varianten stets niedriger sind als die der Löß-Varianten. Am Extremsten ist dies bei den Kontrollen sichtbar, wo ein Unterschied des Trockensubstanzgehaltes von 14 g/Gefäß erzielt wurde. Bei den Sand-Varianten kommt es innerhalb der Klärschlamm-Varianten nur bei der stichfesten Variante mit Aluminat (6) als Fällungsmittel zu einem größeren Anstieg der Korn-Erträge. Bei den Löß-Varianten liegen die meisten Varianten um die 40 g/Gefäß. Zwischen den flüssigen und stichfesten

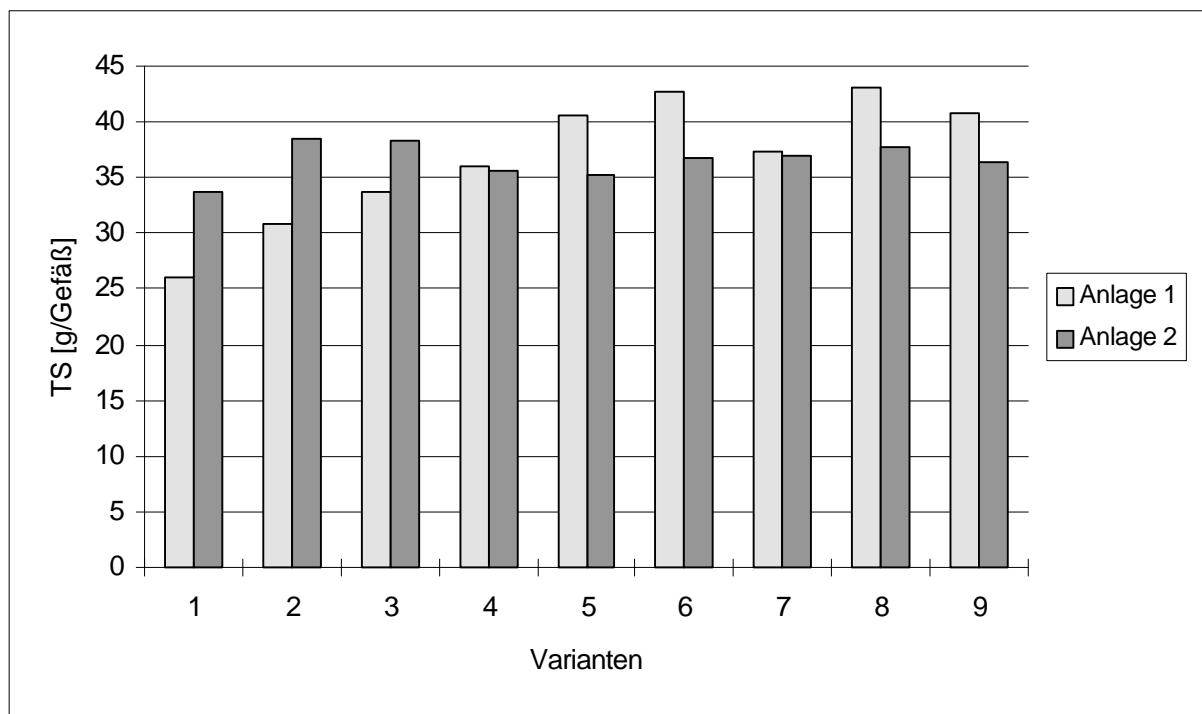


Abb. 4-3-1: Erträge Weizen-Korn in Abhängigkeit der Anlagen und Varianten
Mittelwert der 6 Wdh.

Anlage 1 = 1996, Anlage 2 = 1997
GD(5%) Ertrag Anlage/Variante = 5,7

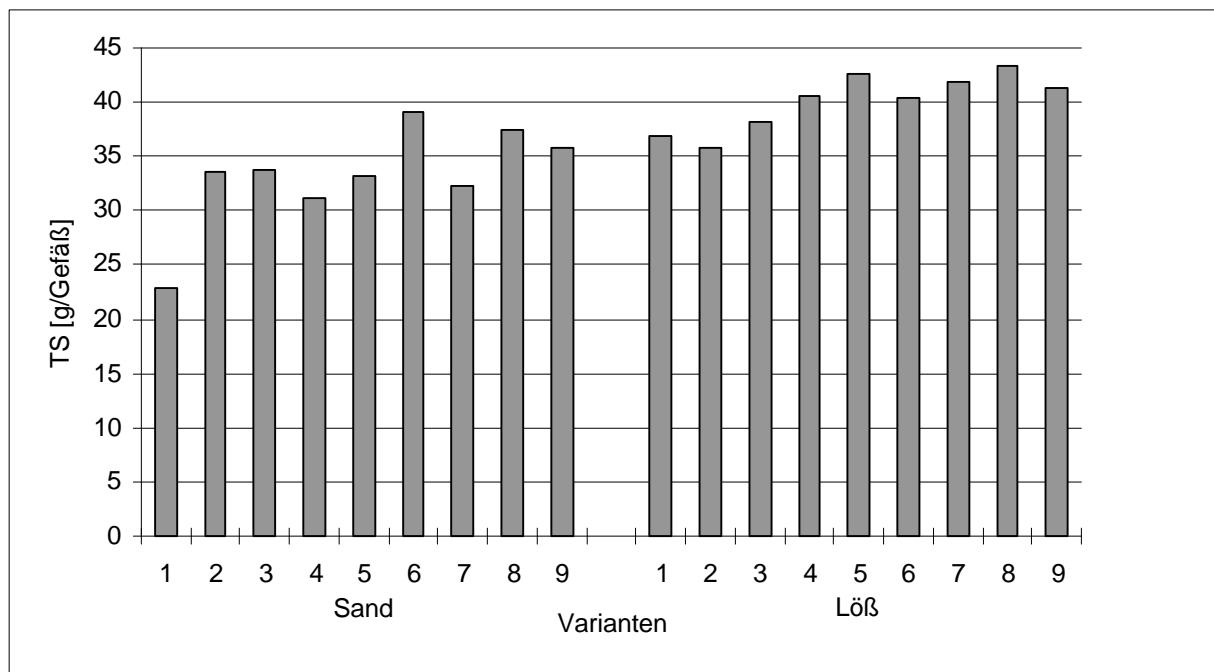


Abb. 4-3-2: Erträge Weizen-Korn in Abhängigkeit der Substrate und Varianten
Mittelwert der 2 Anlagen und 6 Wdh.

p Substrat/Variante = 6 %, GD(5%) P-Entzug Substrat/Variante = 5,7

Klärschlamm-Varianten bestehen nur bei der Variante mit Eisen (2 und 5) als eingesetztem Fällungsmittel größere Unterschiede.

Auch bei den Erträgen des Weizen-Strohes bestehen keine signifikanten Wechselwirkungen zwischen den Faktoren Jahr-Substrat-Variante. Es werden signifikante Wechselwirkungen geringerer Ordnung der Faktoren Jahr und Substrat (Abbildung 4-4-1) und der Faktoren Jahr und Variante (Abbildung 4-4-2) dargestellt.

Werden die Stroh-Erträge in Abhängigkeit der Jahre und Substrate (Abbildung 4-4-1) dargestellt, so ist zu erkennen, daß zwischen allen vier Varianten signifikante Unterschiede bestehen. Diese sind zwischen den Sand-Varianten der beiden Anlagen nur sehr gering, dagegen bei den Löß-Varianten mit 22 g/Gefäß sehr erheblich, dies kann auf die verschiedenen Ausgangssubstrate zurückgeführt werden.

Bei der Berücksichtigung der Varianten statt der Substrate erhält man folgendes Bild (Abbildung 4-4-2). In der ersten Anlage kommt es zu signifikanten Mehrerträgen aller Varianten, außer der flüssigen Klärschlamm-Variante mit Aluminat als Fällungsmittel (3). Es bestehen ebenso signifikante Unterschiede zwischen den flüssigen und stichfesten Klärschlamm-Varianten mit dem Fällungsmittel Eisen (2 und 5) und dem Fällungsmittel Aluminat (3 und 6). Bei der zweiten Anlage sind hingegen keine signifikanten Mehrerträge des Weizen-Strohes erzielt worden, sondern die Erträge liegen auf einem einheitlichen Niveau von 58 g/Gefäß.

Entsprechend den Erträgen weisen die Sand-Varianten geringere P-Entzüge des Weizen-Korns auf als bei den Löß-Varianten (Abbildung 4-5). Bei den Sand-Varianten liegen sie zwischen 50 - 142 mg P/Gefäß. Besonders geringe P-Entzüge sind bei den Kontrollen (1) mit 50 in der ersten bzw. 87 mg P/Gefäß in der zweiten Anlage festgestellt worden. Die P-Entzüge der stichfesten Klärschlamm-Varianten (5-7) variieren zwischen den beiden Anlagen am meisten. Im Durchschnitt der beiden Anlagen können zwischen den behandelten Varianten keine signifikant höheren Entzüge festgestellt werden. Bei den Löß-Varianten, die in der Streubreite von 134 und 219 mg P/Gefäß liegen, erreichen in der ersten Anlage die beiden flüssigen Klärschlämme mit Eisen (2) bzw. Aluminat (3) als Fällungsmittel das gleiche Niveau wie die Kontrolle (1). Bei den drei festen Klärschlämmen (5, 6 und7) kommt es zu

vergleichbaren P-Entzügen wie bei den beiden Dünger-Varianten (8 und 9). In der zweiten Anlage liegen hingegen alle Varianten mit der Kontrolle (1) auf einem einheitlichen Niveau.

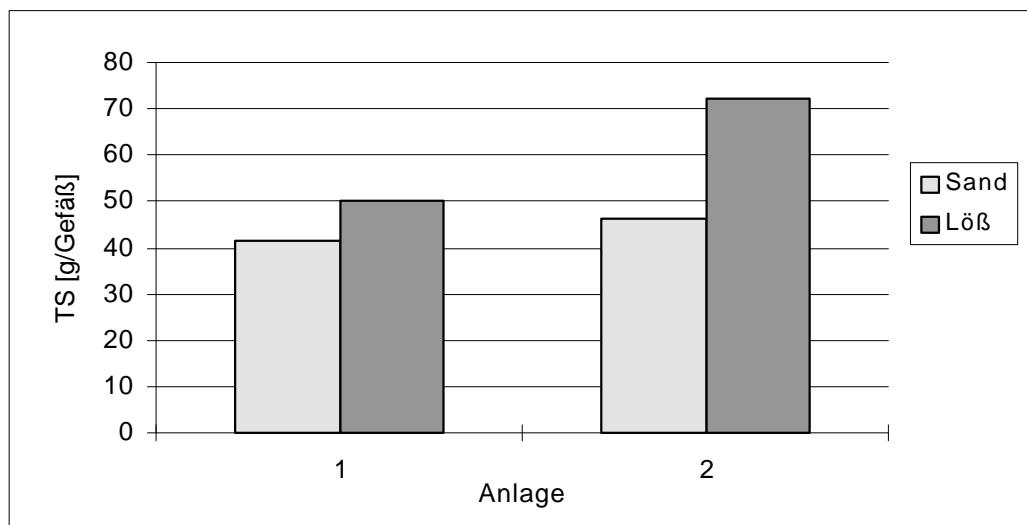


Abb. 4-4-1: Erträge Weizen-Stroh in Abhängigkeit der Anlagen und Substrate
Mittelwert der 9 Varianten und 6 Wdh.
GD(5%) Ertrag Anlage/Substrat = 3,7

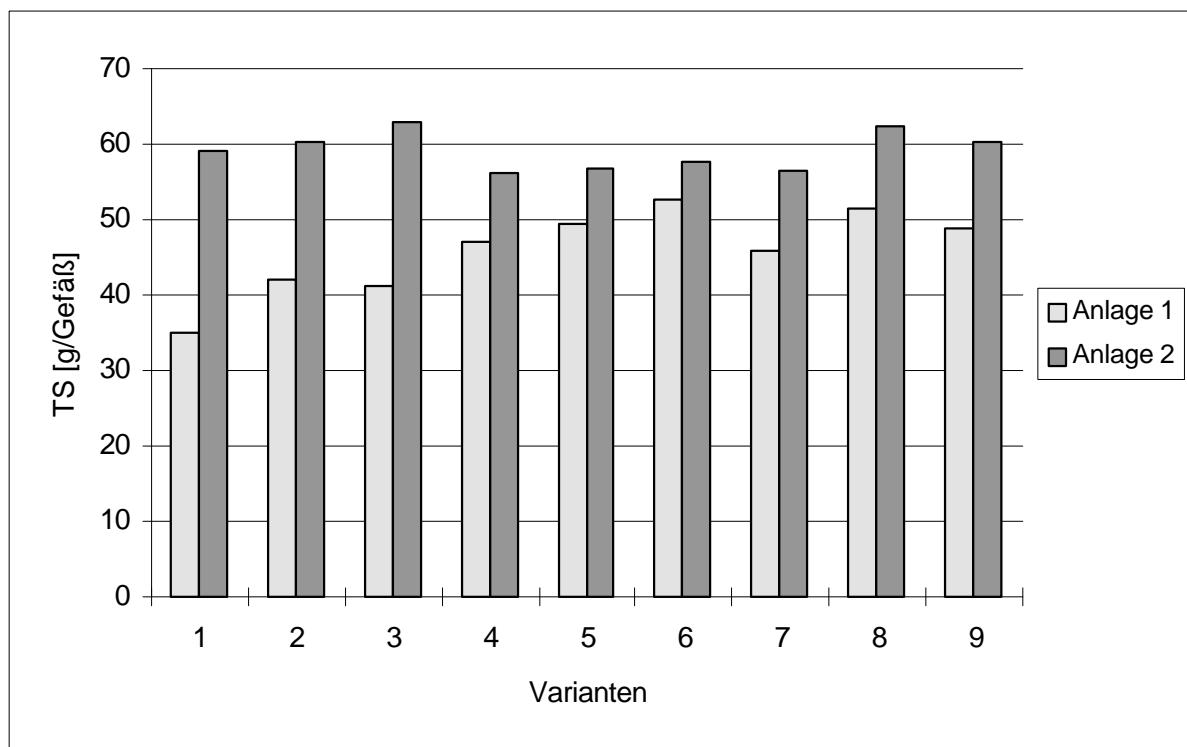


Abb. 4-4-2: Erträge Weizen-Stroh in Abhängigkeit der Anlagen und Varianten
Mittelwert der 2 Substrate und 6 Wdh.
Anlage 1 = 1996, Anlage 2 = 1997
GD(5%) Ertrag Anlage/Variante = 6,5

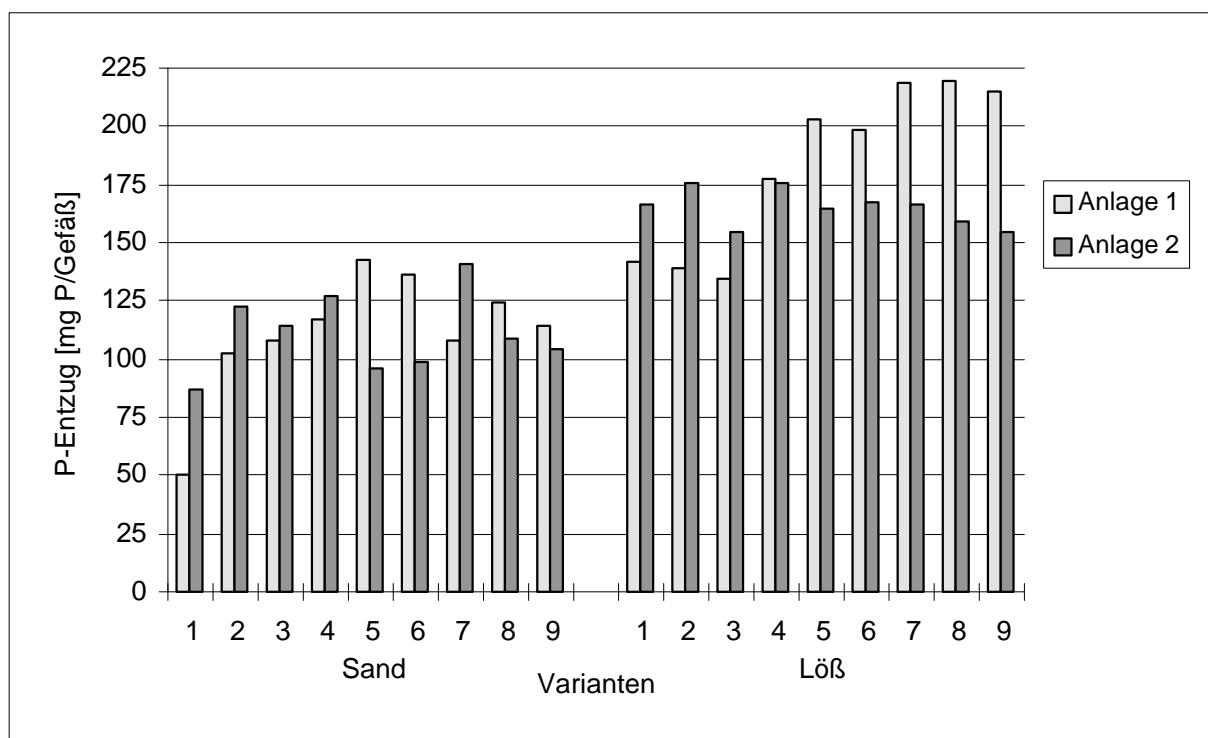


Abb. 4-5: P-Entzug Weizen-Korn in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Varianten, Mittelwert der 6 Wdh.
 Anlage 1 = 1996, Anlage 2 = 1997
 $GD(5\%) \text{ P-Entzug Anlage/Substrat/Variante} = 33$

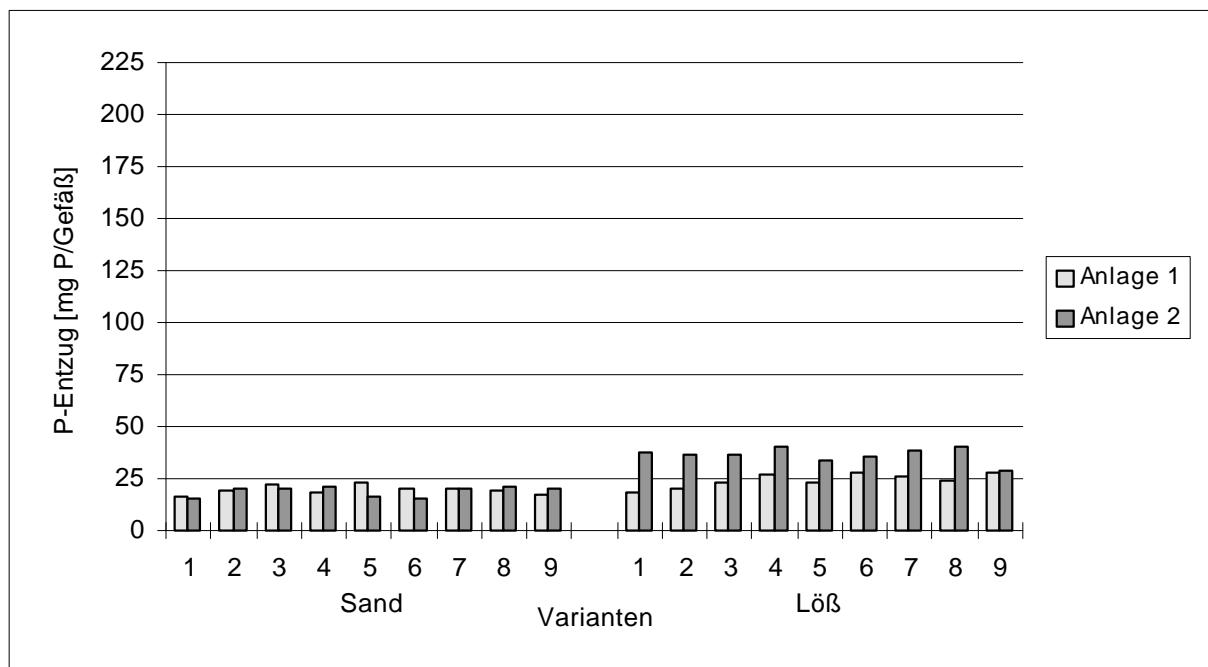


Abb. 4-6: P-Entzug Weizen-Stroh in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Varianten, Mittelwert der 6 Wdh.
 Anlage 1 = 1996, Anlage 2 = 1997
 $GD(5\%) \text{ P-Entzug Anlagen/Substrat/Variante} = 6,2$

Der Anteil des Weizen-Strohes am Gesamt-P-Entzug (Abbildung 4-6) ist gering. Bei den Sand-Varianten werden nur maximal 23 mg P/Gefäß entzogen und bei den Löß-Varianten sind es 40 mg P/Gefäß. Dies entspricht ungefähr einem Anteil zwischen 10 - 16 %. Bei den Sand-Varianten sind keine Unterschiede zwischen den P-Entzügen beider Anlagen festzustellen. Bei den Löß-Varianten sind in der ersten Anlage bis 10 mg P/Gefäß mehr als bei der Kontrolle entzogen worden und in der zweiten Anlage liegen alle Varianten außer der Dünger-Variante Hyperphos (9) auf dem gleichen Niveau wie die Kontrolle mit 38 mg P/Gefäß.

Nach der Ernte des Weizens wurde der Oberboden gelockert, um Mais auszusäen. Der Mais wurde als Ganzpflanze geerntet und erzielte die Trockensubstanzerträge, die in der Abbildung 4-7 dargestellt sind. Die Mais-Erträge sind innerhalb der Varianten uneinheitlich, so dass dieses zu einer relativ großen Grenzdifferenz von 7 g/Gefäß führt.

Bei den Sand-Varianten erzielt nur der stichfeste Klärschlamm mit Eisen als Fällungsmittel (5) signifikant höhere Mehrerträge. Bei den beiden Dünger-Varianten Superphosphat (8) und Hyperphos (9) fallen die Erträge noch geringer als bei der Kontrolle (1) aus. Bei den Löß-Varianten kommt es im Vergleich zu den Sand-Varianten zu einem Anstieg der Erträge, der jedoch nur bei der flüssigen Klärschlamm-Variante mit Eisen als Fällungsmittel (2) und den beiden Dünger-Varianten (8 und 9) statistisch gesichert ist. Innerhalb der Löß-Varianten erzielen nur zwei Varianten (2 und 8) statistisch abgesicherte Mehrerträge.

Die P-Entzüge des nach Weizen angebauten Maises (Abbildung 4-8) liegen zwischen 25 und 92 mg P/Gefäß, wobei die meisten Varianten einen P-Entzug um die 50 mg P/Gefäß aufweisen. Bedeutende Unterschiede zwischen den Dünger-Varianten (Superphosphat 8, Hyperphos 9) liegen zwischen den beiden Substraten vor. In den Sand-Varianten konnte der Mais nur noch 30 mg P/Gefäß dem Boden entziehen, hingegen liegen die P-Entzüge der Löß-Varianten oberhalb aller anderen Varianten bei 73 mg P/Gefäß Superphosphat und 58 mg P/Gefäß Hyperphos.

Zusammenfassend läßt sich für die Erträge der Weizen- und Maisernte sagen, daß in der ersten Anlage größere Unterschiede zwischen den Varianten vorhanden sind, die sich in der zweiten Anlage nivellieren. Die Erträge der Löß-Varianten fallen zudem höher aus als die der Sand-Varianten. Ein einheitliches Bild innerhalb der Erträge aller Varianten ist nicht festzustellen.

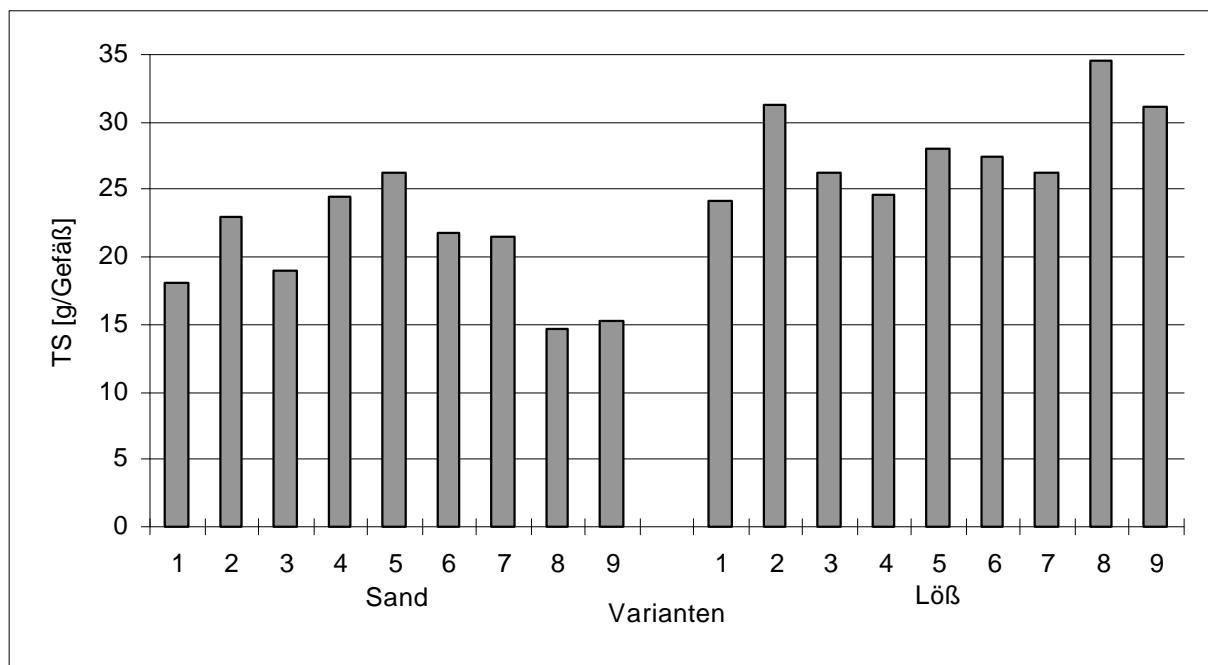


Abb. 4-7: Erträge Mais nach Weizen in Abhängigkeit der Substrate und Varianten
Mittelwert der 2 Anlagen und 6 Wdh.
GD(5%) Ertrag Substrat/Variante = 7,0

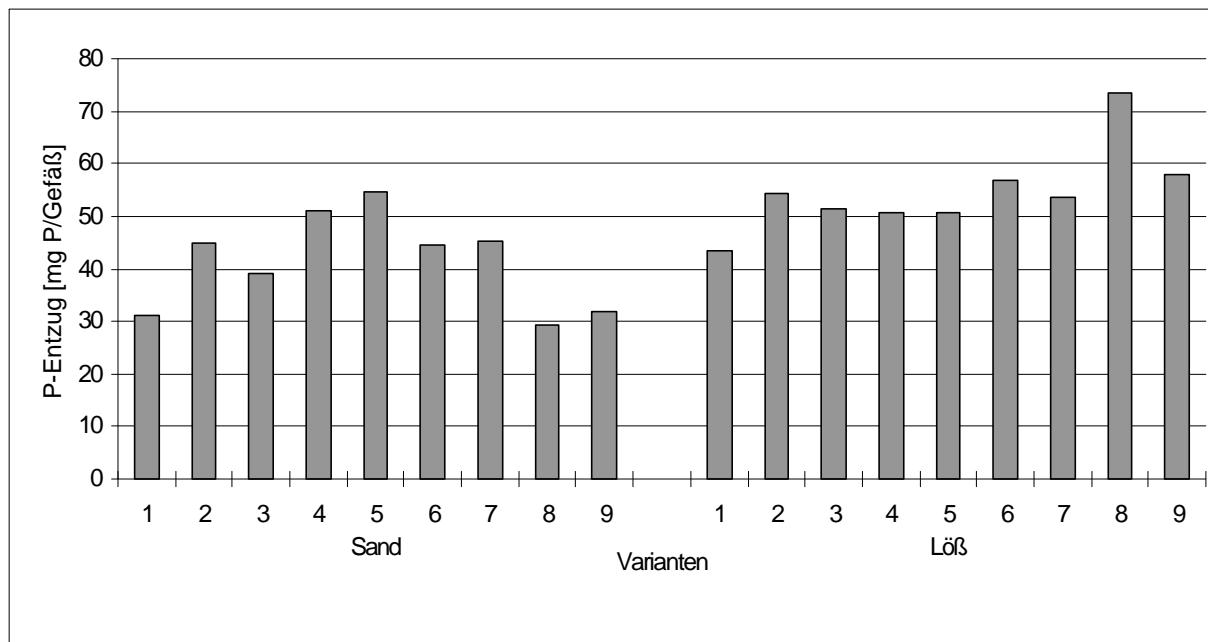


Abb. 4-8: P-Entzug Mais in Abhängigkeit der Substrate und Varianten
Mittelwert der 2 Anlagen und 6 Wdh.
GD(5%) P-Entzug Variante/Substrat = 11,8

4.1.3 Erträge und P-Entzüge im dritten Untersuchungsjahr

Im dritten Versuchsjahr wurden zunächst die Böden der einzelnen Varianten erneut miteinander vermischt und 5 Wiederholungen je Variante hergestellt. Danach erfolgte die Aussaat des Hafers. Bei der Ernte erfolgte die Trennung der beiden Fraktionen Korn und Stroh, die im weiteren gesondert untersucht wurden. Nur in der ersten Anlage wurde nach der Ernte des Hafers der Boden gelockert und Mais ausgesät. Dieser wurde als Ganzpflanze geerntet und analysiert. Abbildung 4-9 stellt die Erträge des Haferkornes der beiden Anlagen dar und Abbildung 4-10 die Erträge des Haferstrohes. Es zeigt sich, daß das Verhältnis Haferkorn zu Haferstroh (5:4) wesentlich enger ist als beim Weizen.

Es fällt auf, daß die Körnerträge der Sand-Varianten höher ausgefallen sind als die der Löß-Varianten. Auch die beiden Anlagen unterscheiden sich relativ stark voneinander. In der ersten Anlage liegen die Erträge sowohl bei den Sand- als auch bei den Löß-Varianten auf einem einheitlichen Niveau von ca. 57 g/Gefäß bzw. 50 g/Gefäß. In der zweiten Anlage kommt es hingegen bei einigen Varianten zu geringeren Erträgen. Innerhalb der drei KlärschlammVarianten mit den Fällungsmitteln Eisen (2 und 5), Aluminat (3 und 6) und Eisen mit zusätzlicher Kalkung (4 und 7) erreichen die Varianten mit der Fällung durch Aluminat die höchsten Erträge, daran schließen sich die Varianten mit einer Eisenfällung an und die geringsten Erträge liefern die Varianten mit Eisenfällung und zusätzlicher Kalkung. Die Erträge der flüssigen Klärschlamm-Varianten (2, 3 und 4) liegen bei beiden Substrat-Varianten oberhalb der Erträge der entsprechenden stichfesten Varianten (5, 6 und 7). Eine Ausnahme stellt lediglich bei den Sand-Varianten die flüssige Klärschlamm-Variante (4) dar, die geringere Erträge liefert als die entsprechende stichfeste Klärschlamm-Variante (7). Die Erträge der Dünger-Varianten liegen bei den Sand-Varianten bei ca. 44 g/Gefäß. Bei den Löß-Varianten erreicht die Dünger-Variante Superphosphat (8) der zweiten Anlage vergleichbar hohe Erträge wie in der ersten Anlage mit über 50 g/Gefäß, die Variante Hyperphos (9) kann in der zweiten Anlage jedoch nur noch 20 g/Gefäß erzielen. Für das Haferstroh gelten weitestgehend die gleichen Aussagen, wobei die Erträge insgesamt niedriger sind und zwischen 14 und 50 g/Gefäß liegen.

Bei den P-Entzügen (Abbildung 4-11) des Hafer-Kornes ist der Unterschied zwischen den beiden Anlagen noch deutlicher als bei den Erträgen. Belaufen sich die P-Entzüge in der ersten Anlage zwischen 130 - 170 mg P/Gefäß, sind es in der zweiten Anlage nur noch

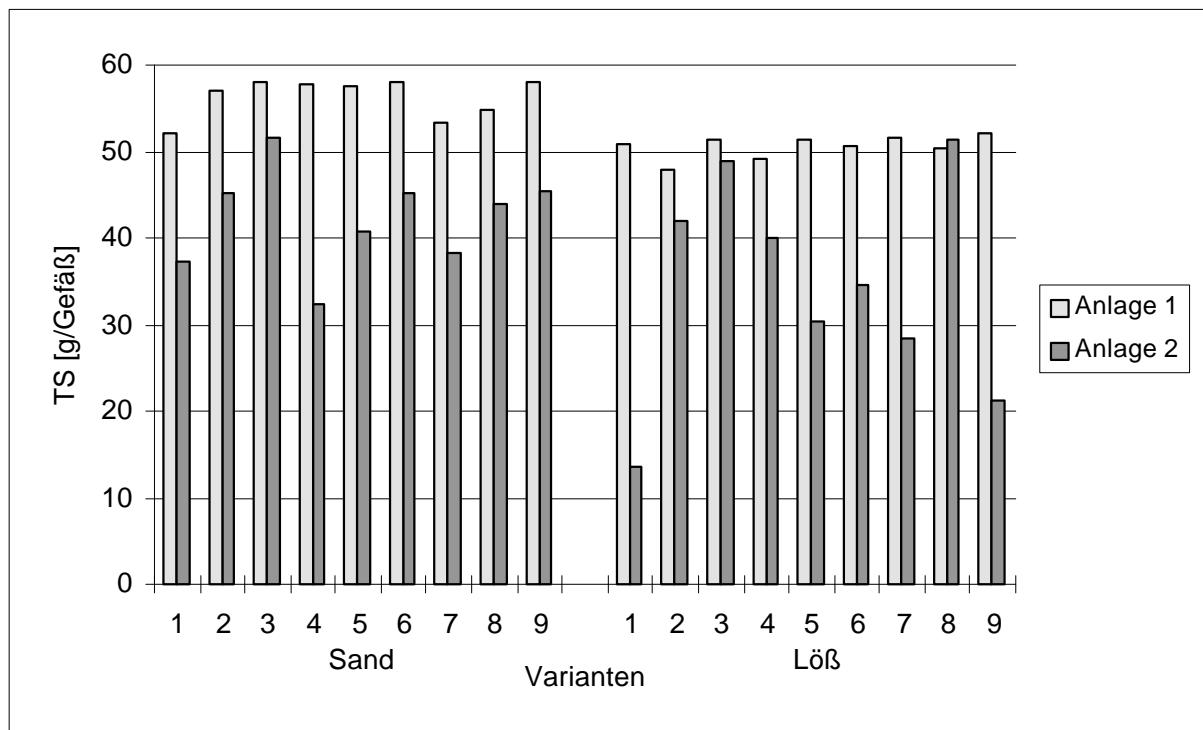


Abb. 4-9: Erträge Haferkorn in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Varianten,
Mittelwerte der 5 Wdh.,
Anlage 1 = 1997, Anlage 2 = 1998
GD(5%) Ertrag Anlage/Substrat/Variante = 7,1

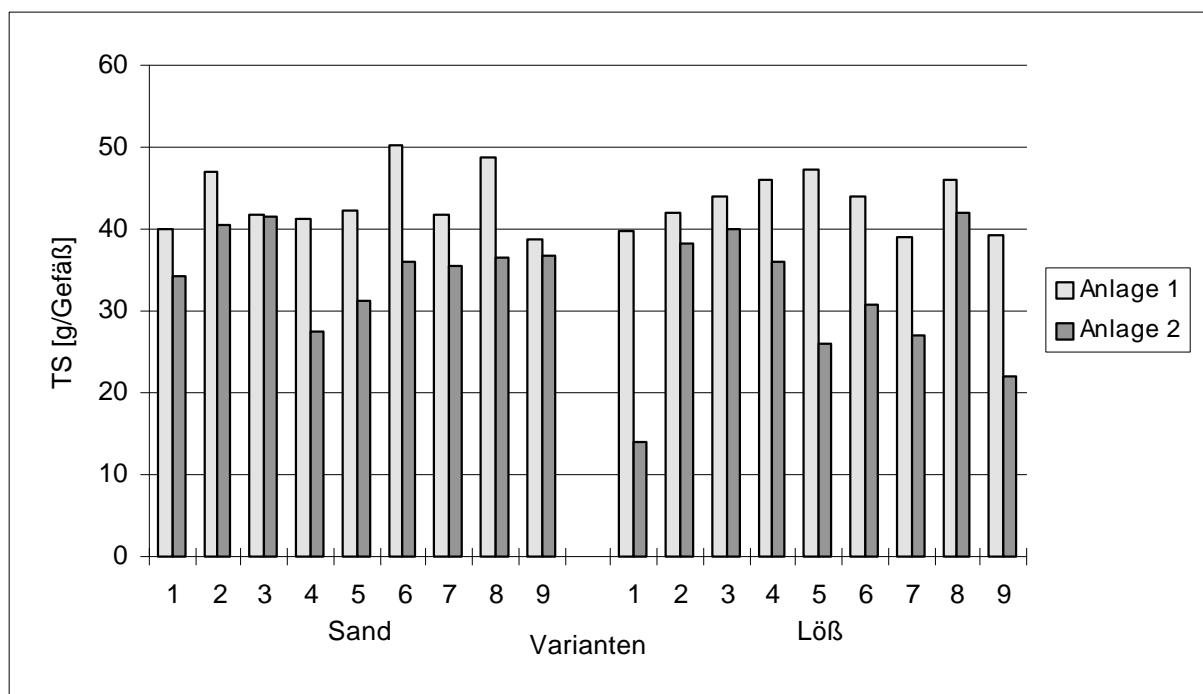


Abb. 4-10: Erträge Haferstroh in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Varianten,
Mittelwerte der 5 Wdh.,
Anlage 1 = 1997, Anlage 2 = 1998
GD(5%) Ertrag Anlage/Substrat/Variante = 5,8

24 - 82 mg P/Gefäß. Dieser extreme Unterschied kann damit zusammenhängen, daß in der zweiten Anlage der Hafer vierzehn Tage früher geerntet wurde. Dies mußte erfolgen, um einem Verlust durch Vogelfraß vorzubeugen. Dadurch konnte Phosphat eventuell nicht in ausreichendem Maße in das Haferkorn eingelagert werden.

Betrachtet man die Sand-Varianten, so zeigt sich, daß in beiden Anlagen nur die flüssige Klärschlamm-Variante mit dem Füllungsmittel Aluminat (3) signifikant höhere P-Entzüge als die Kontrolle aufweist. In der ersten Anlage sind auch bei den drei stichfesten Klärschlamm-Varianten (5, 6 und 7) statistisch höhere P-Entzüge als bei der Kontrolle ermittelt worden. In der zweiten Anlage konnten hingegen bei der flüssigen Klärschlamm-Variante mit Eisen als Füllungsmittel (2) und bei der Dünger-Variante Superphosphat (8) höhere P-Entzüge erzielt werden. Bei den Löß-Varianten weisen in der ersten Anlage alle Klärschlamm-Varianten höhere P-Entzüge als die Kontrolle auf. In der zweiten Anlage konnten sowohl bei den Sand- als auch bei den Löß-Varianten im Vergleich zur Kontrolle höhere P-Entzüge ermittelt werden. Sowohl bei der Sand-Variante der ersten Anlage als auch bei beiden Löß-Varianten bestehen statistische Unterschiede zwischen den flüssigen und stichfesten Klärschlamm-Varianten mit dem Füllungsmittel Eisen (2 und 5). Dies führt in der ersten Anlage zu einer P-Gehalte von der flüssigen zur stichfesten Klärschlamm-Variante und in der zweiten Anlage zu einer Verringerung der P-Gehalte.

Für die P-Entzüge des Haferstrohes gelten tendenziell die gleichen Aussagen wie für die P-Entzüge des Haferkorns nur auf niedrigerem Niveau. Die P-Entzüge liegen zwischen 2 und 31 mg P/Gefäß und erreichen damit max. 1/6 der P-Entzüge des Haferkornes.

Der Mais der ersten Anlage liefert nach dem Anbau von Hafer in seinen Erträgen kein einheitliches Bild mehr (Abbildung 4-13). Die Unterschiede der Wiederholungen innerhalb der Varianten waren so groß, daß die Grenzdifferenz mit 11 g/Gefäß recht hoch ausfällt. Statistisch abgesicherte Ergebnisse liegen daher nicht vor. Auch lassen sich die Ergebnisse des Hafers nicht auf den Mais übertragen. Die Erträge der Kontrollen liegen sowohl bei den Sand- als auch bei den Löß-Varianten mit fast 45 g/Gefäß bzw. fast 40 g/Gefäß recht hoch. Bei der Dünger-Variante Superphosphat (8) konnten nur gering höhere Erträge erzielt werden und die Variante Hyperphos (9) liegt sogar unterhalb der Kontrolle.

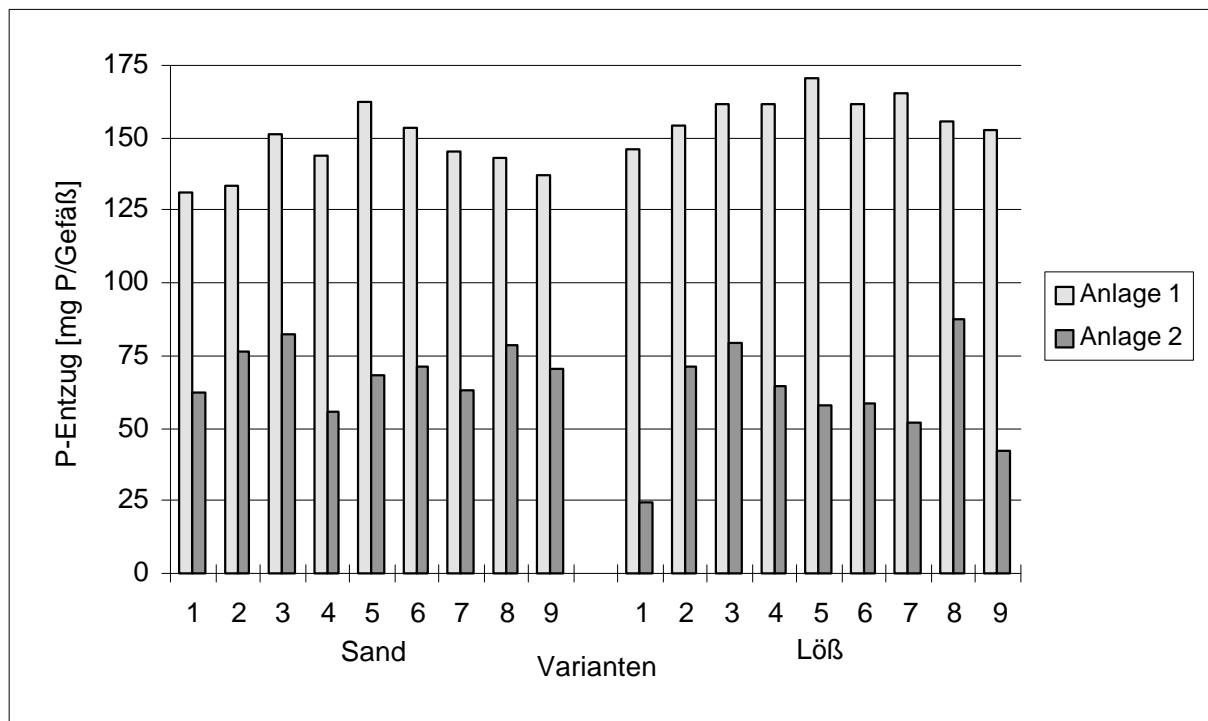


Abb. 4-11: P-Entzug von Haferkorn in Abhängigkeit der Anlagen, der Substrate und Varianten, Mittelwerte der 5 Wdh.

Anlage 1 = 1997, Anlage 2 = 1998

GD(5%) P-Entzug Anlage/Substrat/Variante = 13,5

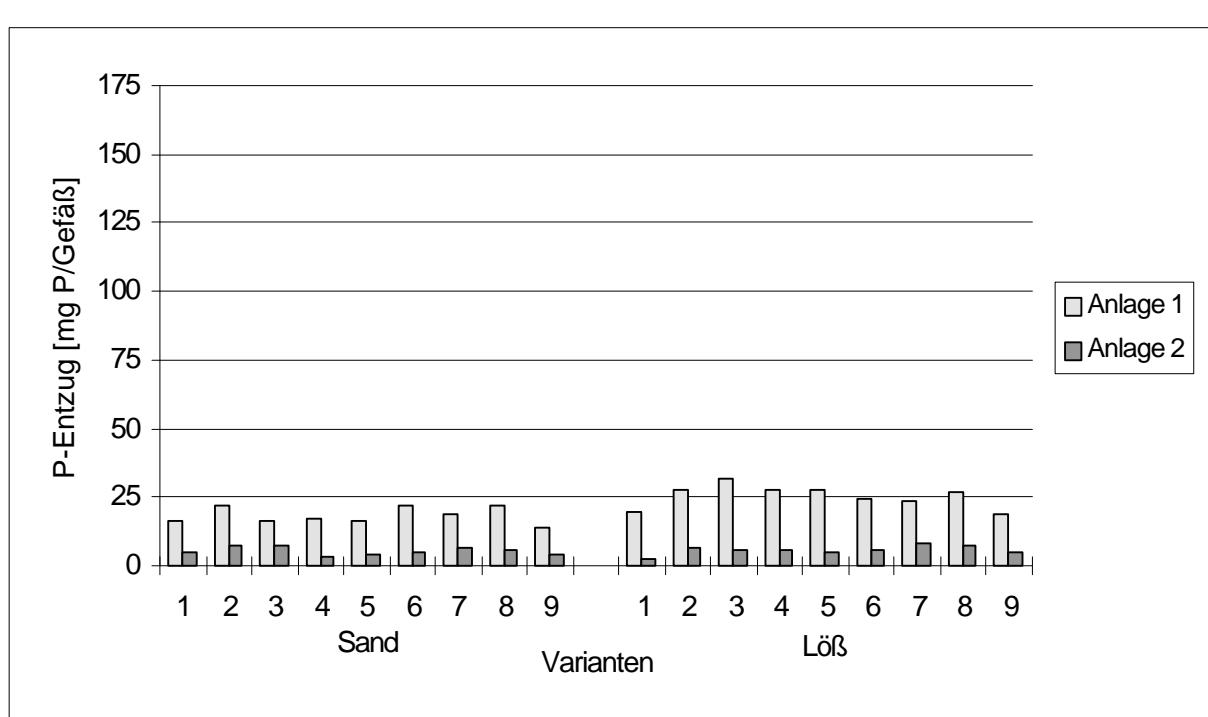


Abb. 4-12: P-Entzug von Haferstroh in Abhängigkeit der Anlagen, der Substrate und Varianten, Mittelwerte der 5 Wdh.

Anlage 1 = 1997, Anlage 2 = 1998

GD(5%) P-Entzug Anlage/Substrat/Variante = 3,7

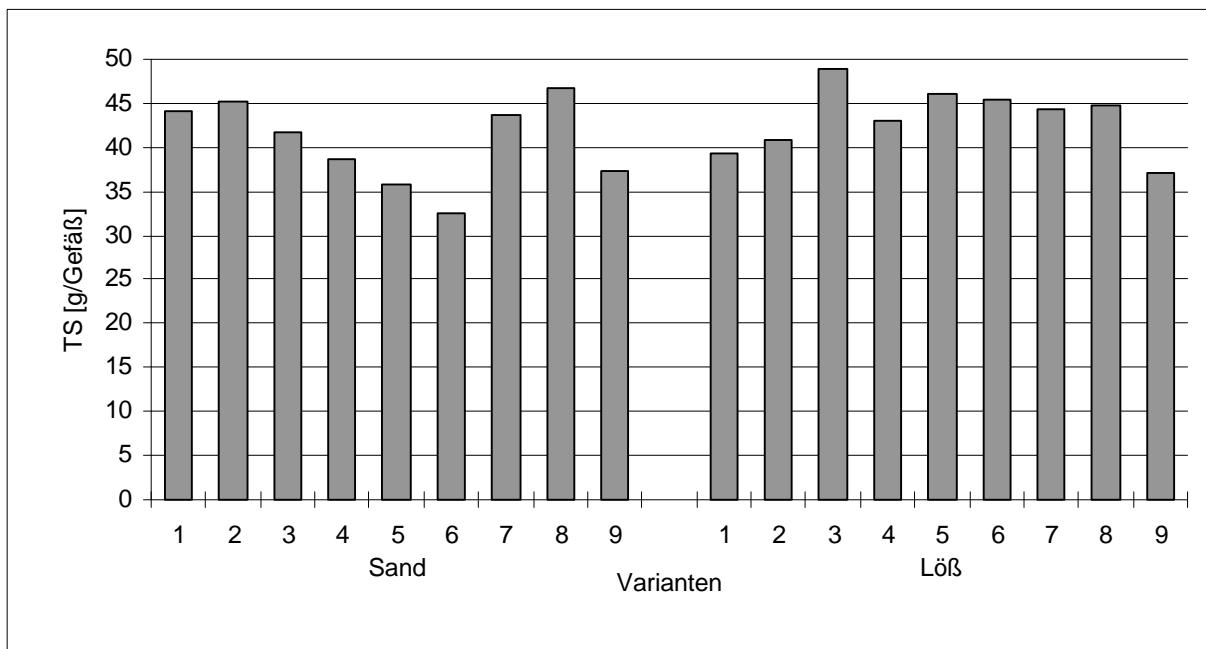


Abb. 4-13: Erträge Mais in Abhängigkeit der Substrate und Varianten
Anlage 1 = 1997, Mittelwerte der 5 Wdh.,
GD(5%) Ertrag Substrat/Variante = 10,8

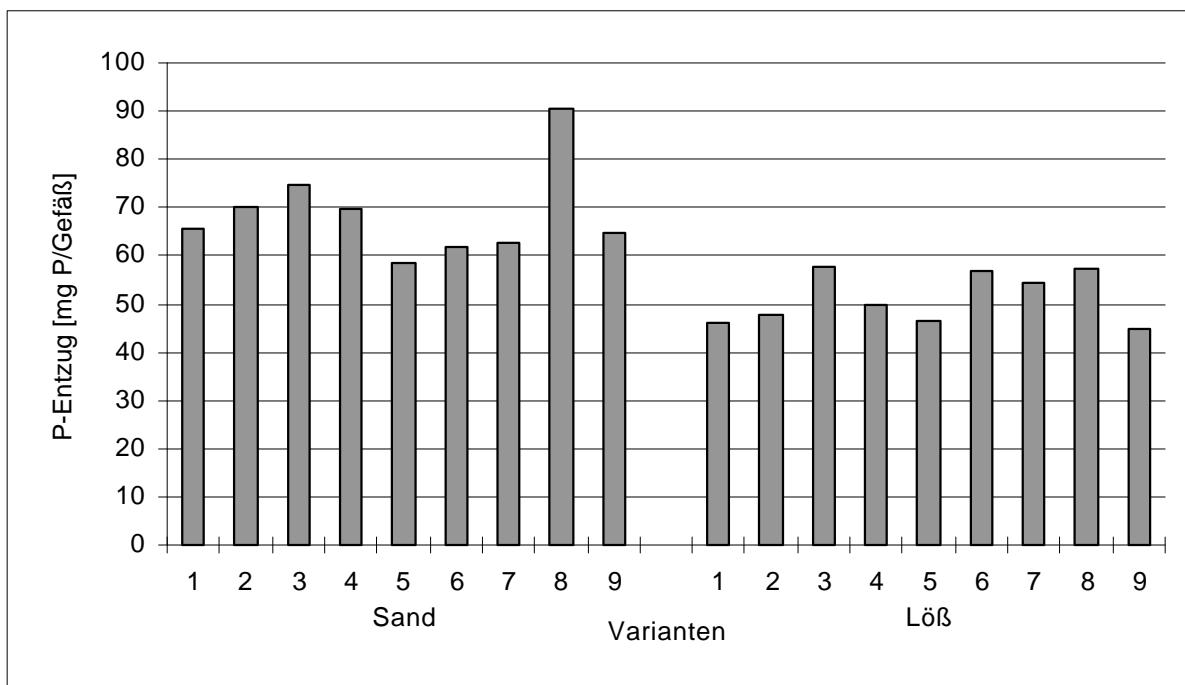


Abb. 4-14: P-Entzug von Mais in Abhängigkeit der Substrate und Varianten
Anlage 1 = 1997, Mittelwerte der 5 Wdh.
GD(5%) P-Entzug Substrat/Variante = 19,0

Beim Mais, der nur in der ersten Anlage nach Hafer angebaut wurde, ist auffällig, daß die P-Entzüge der Sand-Varianten mit 62 - 90 mg P/Gefäß größer ausfallen als die der Löß-Varianten, deren Entzüge zwischen 44 - 57 mg P/Gefäß liegen. Auch wenn dies statistisch nicht abgesichert ist, besteht dennoch der Trend, daß die Klärschlamm-Varianten (3 und 6), bei denen Aluminat als Fällungsmitteln eingesetzt wurde, höhere Entzüge aufweisen als die mit Eisensalzen gefällten Klärschlamm-Varianten (2 und 4, 5 und 7). Die Dünger-Variante Superphosphat (8) erzielte bei der Sand-Variante mit 90 mg P/Gefäß die höchsten P-Entzüge. Bei den Löß-Varianten war der P-Entzug der Superphosphat-Variante (8) ebenbürtig mit den Varianten flüssiger und stichfester Klärschlamm mit Aluminat als Fällungsmittel (3 und 6). Die P-Entzüge der Dünger-Variante Hyperphos (9) sind bei beiden Substraten gleich denen der Kontrolle.

Werden beide Anlagen zusammengefaßt, wird deutlich, daß die Haferkörnerträge bei den Sand-Varianten größer als bei den Löß-Varianten ausgefallen sind. Dagegen liegen die P-Entzüge der Löß-Varianten über denen der Sand-Varianten. Die Varianten mit flüssigem Klärschlamm weisen höhere Erträge, jedoch keine höheren P-Entzüge als die stichfesten Klärschlamm-Varianten auf. Eine Kalkung der mit Eisen gefällten Klärschlamm-Varianten hat keinen positiven Einfluß auf den Ertrag und P-Entzug. Beim Mais bestehen zwischen den Sand- und Löß-Varianten hinsichtlich der Erträge keine Unterschiede, jedoch bei den P-Entzügen, die bei den Sand-Varianten höher ausfallen.

4.1.4 Auswirkungen der Klärschlamm-Düngung auf die Anbaufolge

Im folgenden sollen die Auswirkungen der Klärschlammdüngung über die Anbaufolgen der Früchte betrachtet werden. Da die absoluten Erträge nicht vergleichbar sind, erfolgte die Umrechnung in Relativverträge. Dazu wurde jeweils der Ertrag der Dünger-Variante Superphosphat (8) gleich 100 % gesetzt und alle anderen Varianten wurden entsprechend berechnet. Um die zeitliche Wirkung darstellen zu können, wurden die einzelnen Ernten unabhängig vom Jahr miteinander verrechnet. Die Mäisernte nach Hafer der ersten Versuchsanlage bleibt bei der Darstellung der Erträge unberücksichtigt.

In der Tabelle 4-1 sind die Relativverträge als Mittelwerte der beiden Versuchsanlagen zusammengefaßt dargestellt. In den Abbildungen 4-15 und 4-16 sind zur besseren Veranschauli-

chung der Ergebnisse die Wechselwirkungen Ernten/Substrat und Substrat/Variante abgebildet. Aus Tabelle 4-1 ist zu erkennen, daß bei den Sand-Varianten beim Weidelgras keine ertragswirksame P-Wirkung zu verzeichnen ist, da keine statistisch gesicherten Mehrerträge gegenüber der ungedüngten Kontroll-Variante (1) aufgetreten sind. Eine Ausnahme stellt der erste Schnitt des Einjährigen Weidelgrases der flüssigen Klärschlamm-Variante mit Eisen als Fällungsmittel (2) dar, der signifikant höhere Erträge als die Kontrolle aufweist. Im zweiten Jahr (WK, WS und MW) erreicht die Kontrolle nicht mehr die hohen Erträge im Vergleich zu den gedüngten Varianten. Jedoch schon im dritten Jahr bestehen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten, auch wenn die Kontrolle die geringsten Erträge aufweist.

Bei den Löß-Varianten kommt es erst ab dem Mais nach Weizen im zweiten Jahr zu gesicherten höheren Relativverträgen der Dünger-Variante Superphosphat (8) gegenüber den

Tabelle 4-1 Erträge (%) in Abhängigkeit der Ernten, Substrate und Varianten
Mittelwerte der 2 Anlagen, Dünger-Variante Superphosphat (8) = 100 %
GD (5%) Ertrag Ernte/Substrat/Variante = 17,8
GD (5%) Ertrag Ernte/Substrat = 5,9
GD (5%) Ertrag Substrat/Variante = 5,9

	Varianten	1. Jahr				2. Jahr				3. Jahr		1.-3. Jahr
		EW1	EW2	EW3	EW4	WK	WS	MW	HK	HS	DS	
Sand	1	89,92	93,12	85,86	101,66	62,20	75,81	115,23	90,02	88,05	89,10	
	2	113,07	108,77	96,12	104,00	90,56	91,89	142,47	103,47	103,57	105,99	
	3	101,59	99,93	96,84	78,62	90,78	88,64	118,57	111,94	99,98	98,54	
	4	86,71	88,63	91,12	89,93	83,47	85,49	156,18	89,49	79,90	94,55	
	5	92,75	91,72	89,37	114,39	88,77	90,15	169,62	98,92	86,13	102,42	
	6	92,34	99,44	91,19	105,70	104,16	100,95	145,29	104,53	100,80	104,93	
	7	88,47	94,61	86,83	90,71	87,00	81,16	139,99	92,43	91,38	94,73	
	8	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
	9	89,23	97,00	84,88	95,08	95,56	95,01	105,74	104,75	90,17	95,27	
DS Sand		94,90	97,02	91,36	97,79	89,17	89,90	132,57	99,50	93,33		
Löß	1	95,24	101,29	94,99	115,06	85,94	85,55	67,94	63,52	59,82	85,48	
	2	108,80	107,95	104,50	112,64	83,69	86,90	87,70	88,24	91,22	96,85	
	3	103,41	105,85	107,52	112,85	89,05	91,81	77,51	98,35	95,69	98,00	
	4	107,26	101,68	98,48	121,77	93,78	94,13	71,30	87,53	92,92	96,54	
	5	98,02	101,41	103,43	110,53	98,32	95,94	74,43	80,52	82,50	93,90	
	6	99,19	100,91	100,22	112,76	93,56	94,07	76,26	83,91	84,45	93,93	
	7	99,22	102,23	95,49	114,74	96,63	96,80	76,35	78,78	74,55	92,75	
	8	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
	9	98,06	95,18	97,48	111,00	95,47	96,25	99,58	72,39	68,89	92,70	
DS Löß		101,02	101,83	100,23	112,37	92,94	93,49	81,23	83,69	83,34		

EW - Einjähriges Weidelgras, WK - Weizenkorn, WS - Weizenstroh,
MW - Mais nach Weizen, HK - Haferkorn, HS - Haferstroh, DS Durchschnitt der neun Ernten
Erträge Mais nach Hafer der 1. Versuchsanlage sind unberücksichtigt

gleichen Ertrag wie die Superphosphat-Variante (8). Ebenfalls keine signifikanten Unterschiede sind bei der flüssigen Klärschlamm-Variante mit Eisenfällung (2) festzustellen, auch wenn diese nur 87,7 % der Superphosphat-Variante erreicht. Im dritten Jahr können die Kontrolle (1) und die Hyperphos-Variante (9) das hohe Ertragspotential der Superphosphat-Variante nicht mehr erreichen.

Betrachtet man die Sand-Varianten in der Abbildung 4-15 so erkennt man, daß die Relativverträge des Einjährigen Weidelgrases und des Weizens im Durchschnitt der Anlagen und Varianten unter 100 % liegen. Erst beim Mais nach Weizen kommt es zu einem starken Anstieg der Relativverträge von ca. 130 % und damit zum höchsten Anstieg innerhalb der Fruchtfolge. Die Relativverträge des Haferkorns erreichen ca. 100 %, die Relativverträge des Haferstrohs sind mit 93 % geringfügig niedriger.

Auf dem Lößboden ist hingegen eine andere Entwicklung erkennbar. Die Relativverträge liegen bei den vier Schnitten des Einjährigen Weidelgrases oberhalb von 100 %, besonders bei dem vierten Schnitt kommt es zu einem Ertragsanstieg. Die Relativverträge vom Weizenkorn und -stroh fallen im Durchschnitt der Varianten unter 100 %. Ab der Ernte Mais nach Weizen sinkt das Ertragspotential auf 83 % ab.

Die Unterschiede der Varianten sind für beide Substrate in Abbildung 4-16 zusammengestellt. Im Vergleich zur Superphosphat-Variante (8) weist die Kontrolle (1) einen signifikanten Minderertrag und die flüssige Klärschlamm-Variante mit Eisen als Fällungsmittel (2) einen signifikanten Mehrertrag auf. Zur Kontrolle sind hingegen alle Varianten, außer den beiden Klärschlamm-Varianten mit Eisenfällung und zusätzlicher Kalkung (4 und 7), signifikant. Läßt man bei der Berechnung des Mittelwertes die Maisernte nach Weizen unberücksichtigt, erhält man ein entsprechendes Ergebnis, jedoch unterscheiden sich Variante 2 und die Superphosphat-Variante (8) nur sehr geringfügig um 1,4 %.

Bei den Löß-Varianten ergibt sich ein verändertes Bild im Verhältnis der Varianten zueinander. Die drei flüssigen Klärschlamm-Varianten (2, 3 und 4) erreichen das gleiche Ertragsniveau wie die Superphosphat-Variante (8). Die drei stichfesten Klärschlamm-Varianten (5, 6 und 7) liegen auf einem signifikant niedrigeren Niveau und bei der Kontrolle (1) wurde ein noch geringerer Ertrag ermittelt.

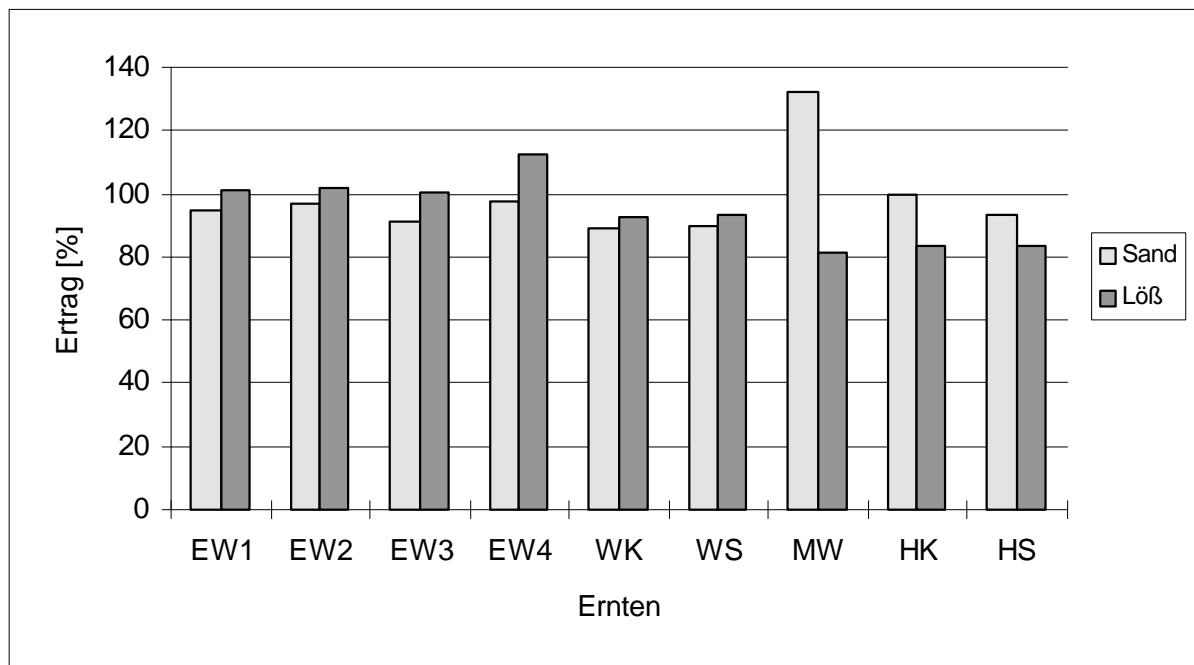


Abb. 4-15: Relativverträge (%) in Abhängigkeit der Ernten und Substrate
Mittelwert der 2 Anlagen und 9 Varianten
Dünger-Variante Superphosphat (8) = 100 %
EW - Einjähriges Weidelgras, WK - Weizenkorn, WS - Weizenstroh,
MW - Mais nach Weizen, HK - Haferkorn, HS - Haferstroh
Erträge Mais nach Hafer der 1. Versuchsanlage sind unberücksichtigt
GD (5%) Relativvertrag $\frac{\text{Ernte/Substrat}}{\text{Substrat}} = 5,9$

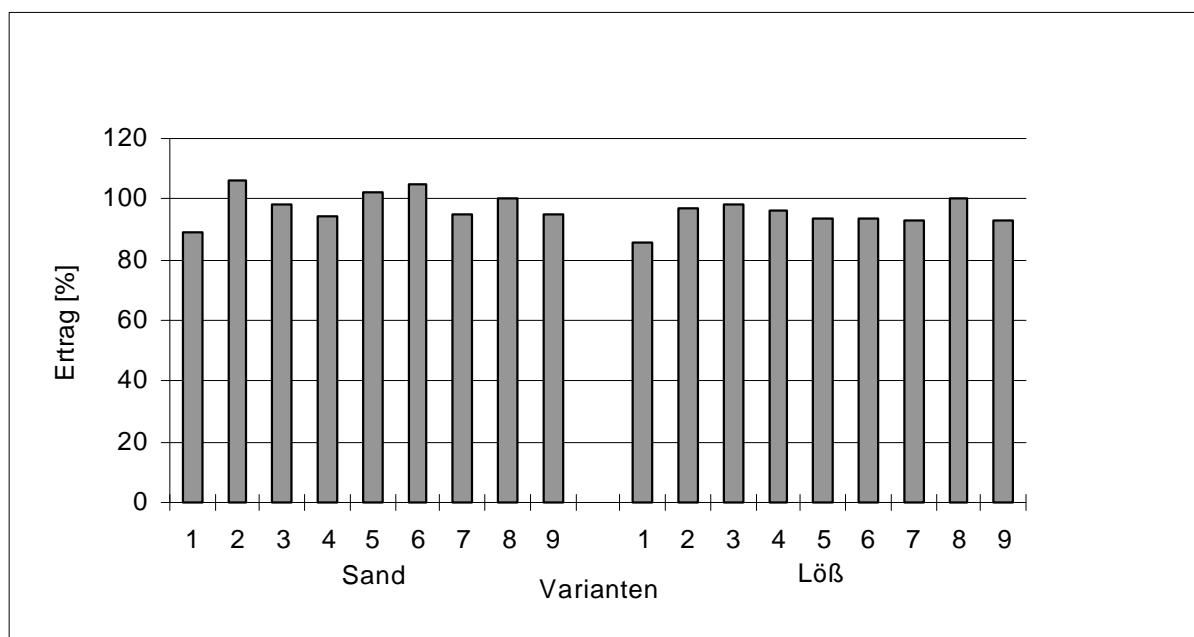


Abb. 4-16: Relativverträge (%) in Abhängigkeit der Substrate und Varianten
Mittelwert der 2 Anlagen und 9 Ernten
Dünger-Variante Superphosphat (8) = 100 %
Erträge Mais nach Hafer der 1. Versuchsanlage sind unberücksichtigt
GD (5%) Relativvertrag $\frac{\text{Ernte/Substrat}}{\text{Substrat}} = 5,9$

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Relativverträge der Klärschlamm-Varianten z.T. nur geringfügig unterhalb der Dünger-Variante Superphosphat liegen. Zwischen den Substraten werden größere Differenzen erst ab der Kultur Mais nach Weizen erkennbar. Von da an liegen die Relativverträge der Sand-Varianten oberhalb der Löß-Varianten.

Die P-Entzüge der Anbaufolge können als Absolutwerte dargestellt werden, dabei ist jeweils der Summenwert für das Jahr berechnet worden. Die Darstellung der Werte als Vierfach-Wechselwirkung wird so unübersichtlich, daß in diesem Falle in den Abbildungen 4-17 und 4-18 die Dreifach-Wechselwirkungen dargestellt sind, um die Einflüsse der Düngung besser verdeutlichen zu können.

Abbildung 4-17 stellt die jährlichen P-Entzüge der Kulturen in Abhängigkeit der Anlagen, Jahre und Substrate dar. Für beide Anlagen und Substrate gilt, daß im ersten Jahr durch das Einjährige Weidelgras die höchsten P-Entzüge eingetreten sind, dabei sind jeweils in der zweiten Anlage die Entzüge des Einjährigen Weidelgrases höher ausgefallen als die der ersten Anlage. Die P-Entzüge des zweiten Jahres durch die Weizen- und Maisernten liegen bei beiden Anlagen sowohl bei den Sand- als auch bei den Löß-Varianten auf einem gleichen Niveau, jedoch bei den Löß-Varianten um das 1,5-fache höher. Im dritten Jahr liegen die P-Entzüge der beiden ersten Anlagen auf einem Niveau von 230 mg P/Gefäß. In der zweiten Anlage ist eine starke Reduzierung festzustellen, da hier auf den Nachbau von Mais nach Hafer verzichtet wurde. Trotz dieses "Maiseffektes" liegt die Summe der P-Entzüge beider Anlagen der Sand-Varianten bei ca. 650 mg P/Gefäß und bei den Löß-Varianten bei 950 mg P/Gefäß.

Da jedoch die Verhältnisse der Varianten zueinander von Interesse sind, sind diese in Abbildung 4-18 abgebildet. Für beide Substrate gilt, daß die Unterschiede zwischen den Varianten im ersten Jahr größer sind und es in den folgenden Jahren zu einer Angleichung der P-Entzüge gekommen ist. Betrachtet man zunächst nur die Sand-Varianten, erreichen im ersten Jahr alle Varianten, mit Ausnahme der flüssigen Klärschlamm-Variante mit Eisen als Fällungsmittel und Kalkung (4), sowie die stichfesten Varianten mit dem Fällungsmittel Eisen (5) und Eisen und Kalkung (7) statistisch höhere P-Entzüge als die Kontrolle. Im zweiten Jahr haben alle Varianten signifikant höhere P-Entzüge. Im dritten Jahr liegen alle Varianten außer den beiden Varianten flüssiger Klärschlamm mit Aluminatfällung (3) und der Dünger-Variante Superphosphat (8) auf einem gleichen Niveau.

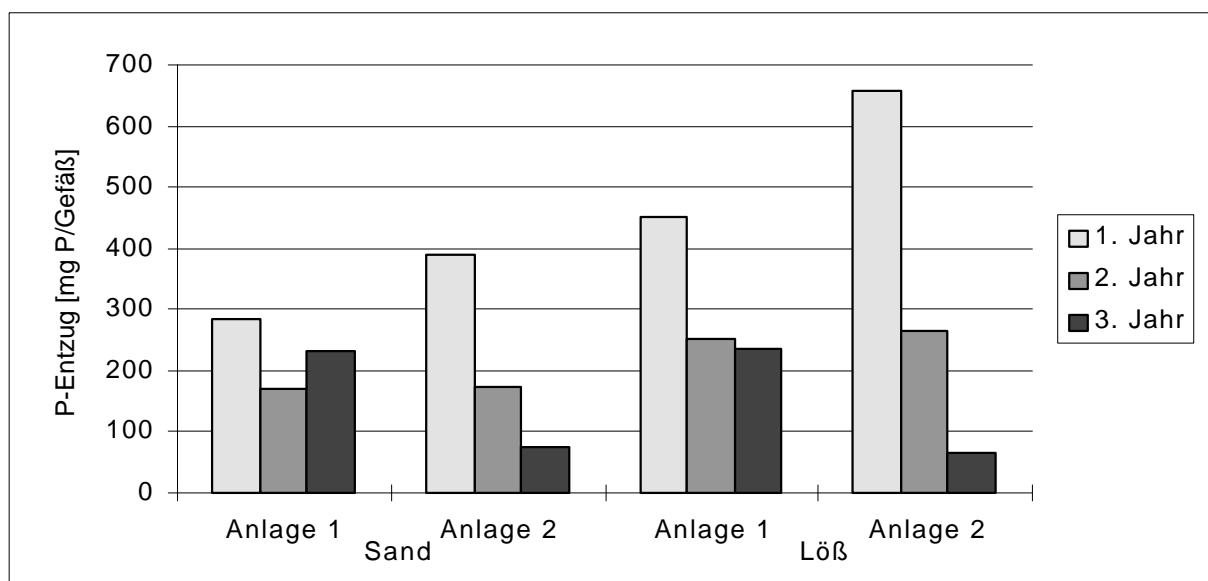


Abb.4-17: Jährlicher P-Entzug der Kulturen in Abhängigkeit der Anlagen, Jahre und Substrate, Mittelwert der 9 Varianten und Wiederholungen,
Erträge Mais nach Hafer der 1. Versuchsanlage sind berücksichtigt
GD (5%) P-Entzug Anlage/Jahr/Substrat = 12,1
GD (5%) P-Entzug Anlage/Jahr/Substrat/Variante = 36,3

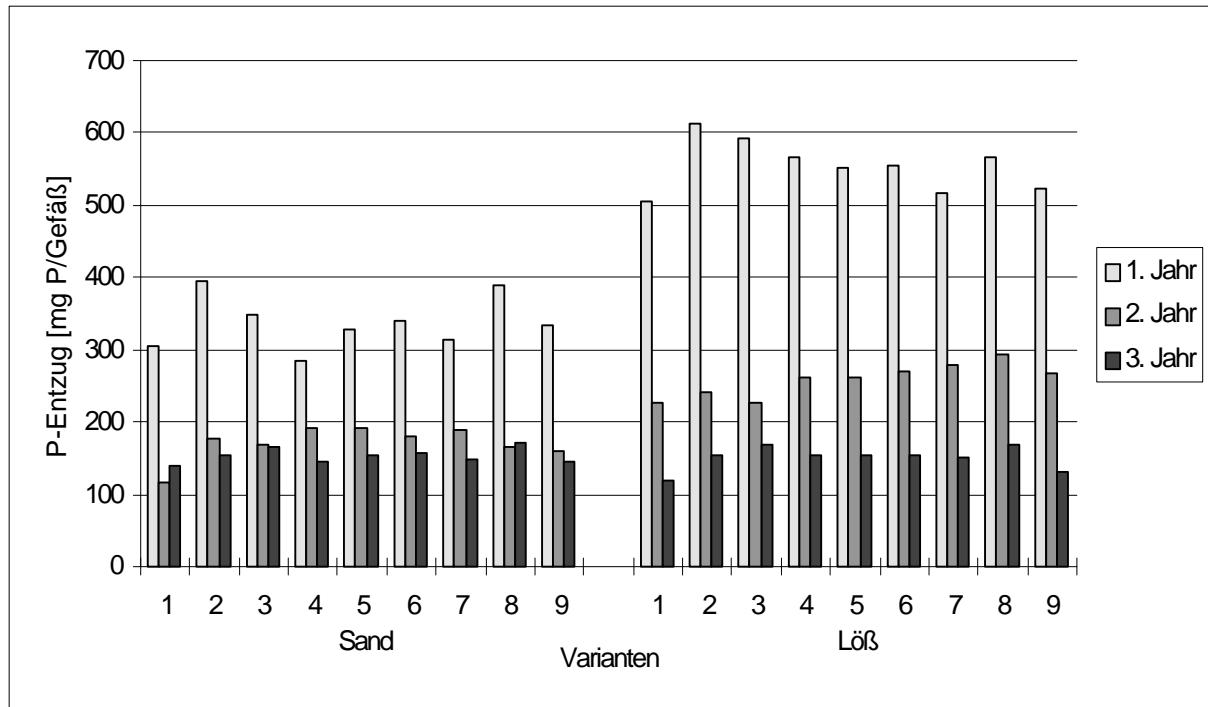


Abb. 4-18: Jährlicher P-Entzug der Kulturen in Abhängigkeit der Jahre, Substrate und Varianten, Mittelwert der 2 Anlagen und Wiederholungen,
Erträge Mais nach Hafer der 1. Versuchsanlage sind unberücksichtigt
GD (5%) P-Entzug Jahr/Substrat/Variante = 25,7
GD (5%) P-Entzug Anlage/Jahr/Substrat/Variante = 36,3

Bei den Löß-Varianten ergibt sich ein verändertes Bild. Im ersten Jahr erreichen alle Varianten außer der stichfesten Klärschlamm-Variante mit Eisen als Fällungsmittel und Kalkung (7) sowie die Dünger-Variante Hyperphos (9) signifikant höhere P-Entzüge. Im zweiten Jahr konnten hingegen bei allen Varianten außer den beiden flüssigen Klärschlamm-Varianten mit Eisen- bzw. Aluminatfällung (2 und 3) erhöhte P-Entzüge jeweils zur Kontrolle festgestellt werden. Im dritten Jahr weisen im Unterschied zu den Sand-Varianten alle Löß-Varianten außer der Dünger-Variante Hyperphos (9) höhere P-Entzüge im Vergleich zur Kontrolle auf.

Innerhalb der drei Jahre kommt es zu abnehmenden P-Entzügen. Im ersten Jahr in dem auch die Unterschiede zwischen den Sand- und Löß-Varianten am ausgeprägtesten sind, liegen die höchsten P-Entzüge vor. In den beiden folgenden Jahren fallen sowohl zwischen den Substraten als auch zwischen den Varianten die Unterschiede geringer aus.

4.2 Einfluß der Klärschlamm-Düngung auf den Boden

Bei den Auswirkungen der Klärschlammdüngung im Vergleich zur Mineraldüngung sollen drei Bodenparameter besprochen werden. Zunächst werden die Veränderungen der pflanzenverfügbaren Phosphat-Gehalte betrachtet. Im Anschluß erfolgt die Darstellung der Gesamt-P-Gehalte und zum Schluß wird der Einfluß der Düngung auf die Fraktionen (Fe/Al-P, Ca-P, Org.-P und Rest-P) vorgestellt. Die Probennahme erfolgte stets am Ende der Vegetationsperiode, d.h. 6, 18 bzw. 30 Monate nach der Klärschlammausbringung. Zur Vereinfachung wird im folgenden Text die Bezeichnung 1., 2. bzw. 3. Jahr benutzt.

4.2.1 Veränderungen des pflanzenverfügbaren Phosphates innerhalb der Anbaufolge

Die Bestimmung der P-Versorgung der Böden wird in den meisten Landwirtschaftskammern mit Hilfe der Lactatmethode (P-CAL) durchgeführt. Das pflanzenlösliche Phosphat stellt dabei die Phosphatmenge dar, die von den Pflanzen aufgenommen werden kann. In Abbildung 4-19 ist der P-CAL-Gehalt in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Jahre dargestellt, zusätzlich wurde der Anfangsgehalt der Substrate mit aufgenommen, um die zeitliche Entwicklung besser beurteilen zu können.

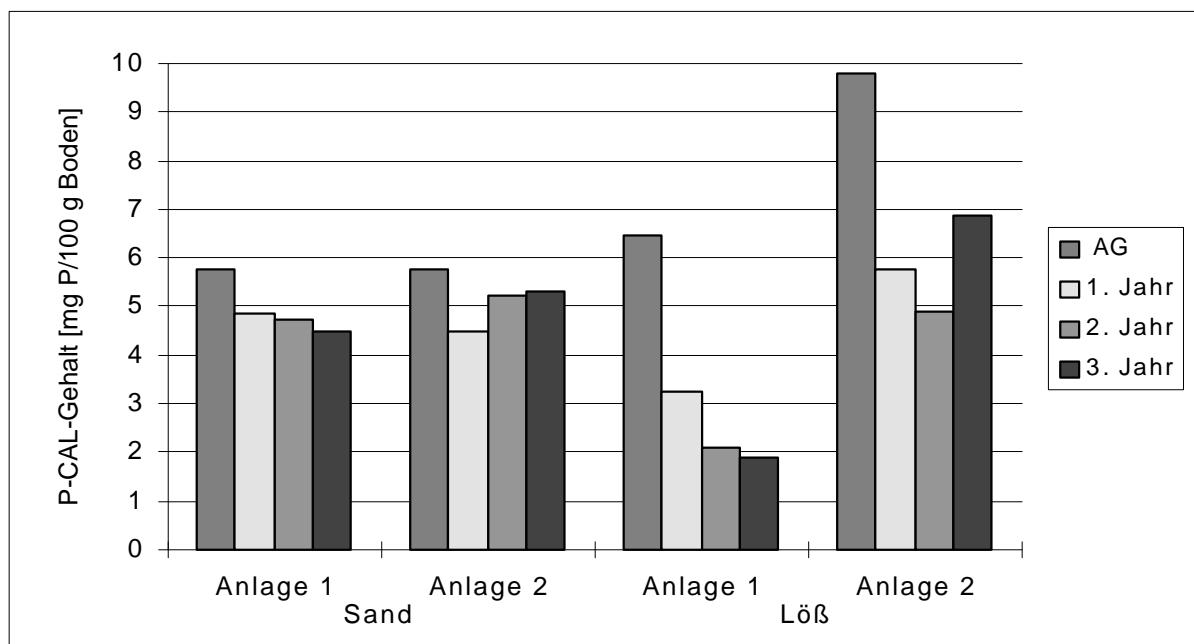


Abb. 4-19: P-CAL-Gehalt des Bodens in Abhängigkeit der Anlagen, Jahre und Substrate
Mittelwert der 9 Varianten und Wiederholungen, AG - Anfangsgehalt
GD (5%) P-CAL Anlage/Jahr/Substrat = 0,16

Bei den Sand-Varianten lag der Anfangsgehalt in beiden Anlagen bei 5,8 mg P/100 g Boden (13,2 mg P₂O₅/100 g Boden). Am Vegetationsende des ersten Jahres kommt es in beiden Anlagen zu einer Reduzierung der Gehalte um ca. 1 mg P/100 g Boden. Nach dem Vegetationsende des zweiten Jahres entwickeln sich die beiden Anlagen unterschiedlich. Während sich in der ersten Anlage der P-CAL-Gehalt nicht ändert, steigt in der zweiten Anlage der P-CAL-Gehalt um 0,7 mg P/100 g Boden an. Im dritten Jahr kommt es dann in der ersten Anlage zu einer geringen Reduzierung der P-CAL-Gehalte um 0,24 mg P/100 g Boden, während die P-CAL-Gehalte in der zweiten Anlage unverändert blieben.

Bei den Löß-Varianten findet im ersten Jahr durch den Anbau von Einjährigem Weidelgras ein starker P-Entzug statt, der wiederum zu einer erheblichen Reduzierung des P-CAL-Gehaltes führt. Im zweiten Jahr ist die Reduzierung durch die P-Entzüge von Weizen und Mais nicht so groß, so dass auch der Rückgang des pflanzenverträglichen P-Gehaltes gering ausfällt. Im dritten Jahr entwickeln sich die beiden Anlagen unterschiedlich. Der Anbau von Mais nach Hafer der ersten Anlage bedingt eine weitere Reduzierung des pflanzenverfügbaren P-Gehaltes im Boden. Dagegen steigt der P-Gehalt in der zweiten Anlage an, dort wurde auf den Anbau von Mais nach Hafer verzichtet.

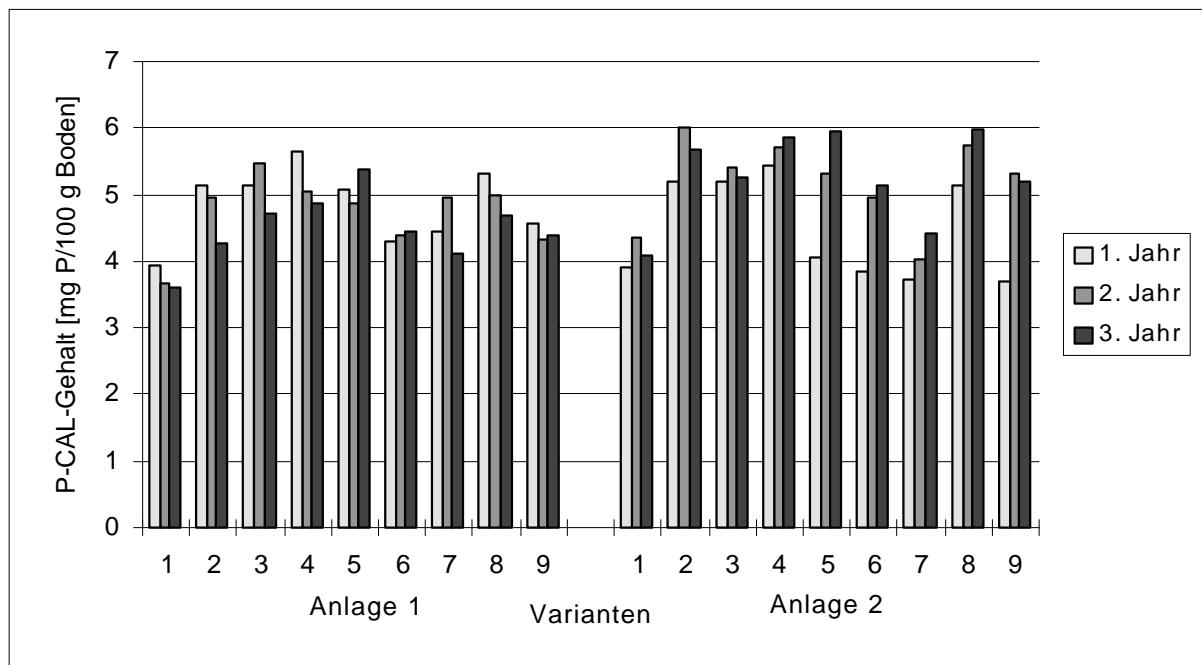


Abb. 4-20: P-CAL-Gehalt des Sandbodens in Abhängigkeit der Anlagen, Jahre und Varianten, Mittelwert der Wiederholungen,
Anfangsgehalt P-CAL-Gehalt Sand = 5,8 mg P/100 g Boden
GD (5%) P-CAL Anlage/Jahr/Substrat/Variante = 0,45

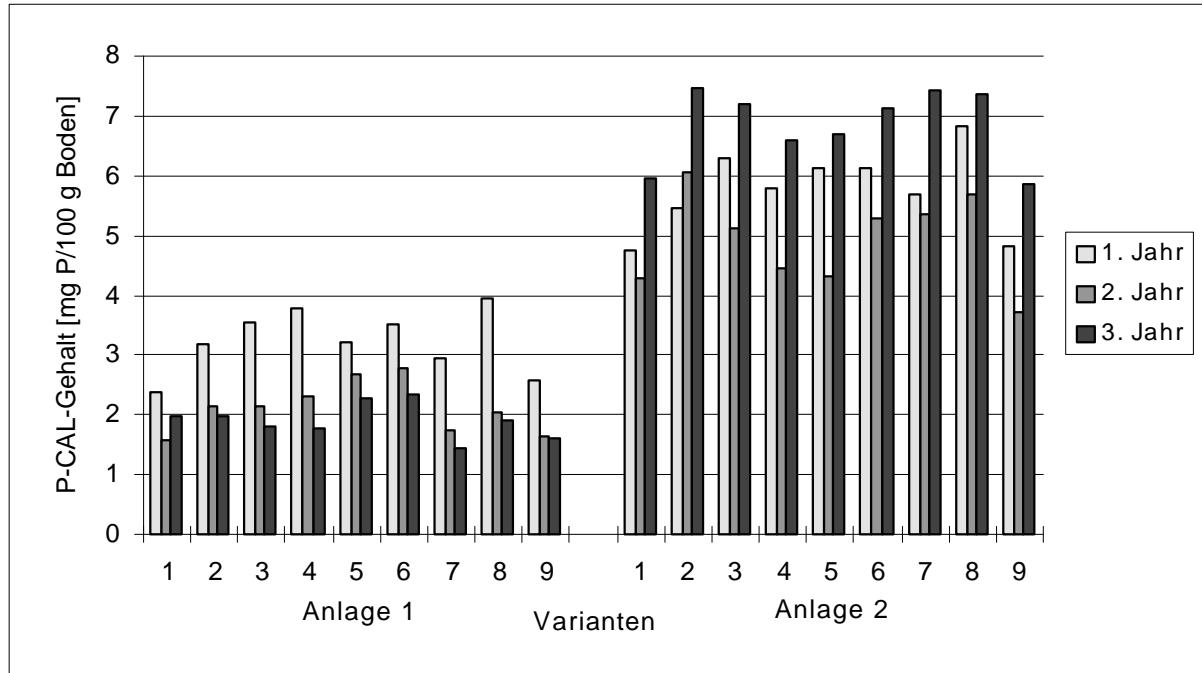


Abb. 4-21: P-CAL-Gehalt des Lößbodens in Abhängigkeit der Anlagen, Jahre und Varianten, Mittelwert der Wiederholungen,
Anfangsgehalt P-CAL-Gehalt Anlage 1 = 6,46 mg P/100 g Boden
Anfangsgehalt P-CAL-Gehalt Anlage 2 = 9,78 mg P/100 g Boden
GD (5%) P-CAL Anlage/Jahr/Substrat/Variante = 0,45

In den Abbildungen 4-20 und 4-21 sind die P-CAL-Gehalte für Sand- und Lößboden getrennt dargestellt. Im ersten Jahr sinken bei der Kontrolle (1) der ersten Anlage der Sand-Varianten die P-CAL-Gehalte (Abbildung 4-20). Die P-Gehalte bleiben in den folgenden zwei Jahren konstant. Die gleiche Entwicklung ist auch bei den Varianten stichfester Klärschlamm (6) und den Dünger-Varianten (8 und 9) festzustellen, wobei dort die Abnahme im ersten Jahr geringer ausfiel als bei der Kontrolle. Bei den anderen Varianten (2, 3, 4, 5, 7) kommt es innerhalb des ersten Jahres zu einer stärkeren Verringerung und im zweiten bzw. dritten Jahr überwiegend zu einer geringen Reduzierung der P-Gehalte.

In der zweiten Anlage der Sand-Varianten ist die Entwicklung der Kontrolle weitestgehend identisch mit der Kontrolle der ersten Anlage, auch wenn es im zweiten Jahr zu einer geringen Anhebung des P-CAL-Gehaltes kam. Ebenfalls bei den drei flüssigen Klärschlamm-Varianten (2, 3 und 4) und der Dünger-Variante Superphosphat (8) fällt die Reduzierung der P-CAL-Gehalte geringer als bei den stichfesten Klärschlamm-Varianten (5, 6 und 7) und der Hyperphos-Variante (9) aus. Im zweiten Jahr erfolgt eine Zunahme der P-CAL-Gehalte, die besonders hoch bei den Klärschlamm-Varianten (2, 5 und 6) ausfallen. Im dritten Jahr liegen dagegen die P-CAL-Gehalte überwiegend auf dem Vorjahresniveau.

Für die Löß-Varianten sind beide Anlagen in Abbildung 4-21 dargestellt. Bei allen Varianten der Anlage 1 erfolgt eine Reduzierung des Anfangsgehaltes, der bei 6,5 mg P/100 g Boden gelegen hat. Diese Abnahme fällt im ersten Jahr am stärksten bei der Kontrolle (1) und der Dünger-Variante Hyperphos (9) aus. Im zweiten Jahr findet ebenfalls durch den Anbau von Weizen und Mais eine Verminderung des pflanzenverfügbaren P-Gehaltes im Boden statt, der im dritten Jahr nur noch bei einigen Varianten statistisch nachweisbar ist.

Der Anfangsgehalt der zweiten Anlage lag mit 9,8 mg P/100 g Boden wesentlich höher als in der Anlage 1. Wie auch in Anlage 1 ist der Rückgang der P-Gehalte im ersten Jahr bei den beiden Varianten Kontrolle (1) und Hyperphos (9) am größten (ca. 5 mg P/100 g Boden) und bei der Variante Superphosphat (8) am geringsten (ca. 3 mg P/100 g Boden) ausgefallen. Im zweiten Jahr kommt es zu einer weiteren Abnahme der P-Gehalte im Boden außer bei der flüssigen Klärschlamm-Variante mit dem Fällungsmittel Eisen (2), bei der eine Steigerung der Bodengehalte festzustellen ist. Im dritten Jahr steigen die Gehalte wieder an. Dieser Unterschied zur Anlage 1 kann durch den in der zweiten Anlage nicht durchgeföhrten Anbau

von Mais nach Weizen erklärt werden. Die Kontrolle (1) und die Dünger-Variante Hyperphos (9) weisen nach den drei Jahren die geringsten P-Gehalte auf.

Ungeachtet einiger Ausnahmen kommt es innerhalb des dreijährigen Versuchszeitraumes sowohl bei der Sand- als auch bei den Löß-Varianten der ersten Anlage zu einer Abnahme des pflanzenverfügbaren Phosphates. Bei den Varianten der zweiten Anlage kommt es hingegen zu einem uneinheitlichen Verlauf.

4.2.2 Veränderungen des Gesamt-P-Gehaltes innerhalb einer Anbaufolge

Neben dem pflanzenverfügbaren Phosphat soll im Kapitel 4.2.2.1 auch der Gesamt-P-Gehalt des Bodens betrachtet werden. Dazu ist in Abbildung 4-22 der Gesamt-P-Gehalt des Bodens in Abhängigkeit der Anlagen, Jahre und Substrate dargestellt, da sowohl die Wechselwirkungen Anlage/Jahr/Substrat/Variante als auch Jahr/Substrat/Variante nicht signifikant sind. Ebenso ist die Wechselwirkung Jahr/Substrat nicht signifikant, so dass auf die Darstellung der jährlichen Ergebnisse zurückgegriffen und die Hauptwirkung Variante für alle drei Jahre gewählt wird (Abbildung 4-23).

Der Sandboden (Abbildung 4-22) weist einen Anfangsgehalt von 38,4 mg P/100 g Boden auf, hinzu kommt die Düngung der Varianten 2-9 mit 4,9 mg P/100 g Boden, so dass sich ein rechnerischer Gesamt-P-Gehalt für alle 9 Varianten von 42,7 mg P/100 g Boden ergibt. Nach dem ersten Jahr ist die Reduzierung der Gesamt-P-Gehalte im Boden durch den Anbau von Einjährigem Weidelgras am größten, in den beiden folgenden Jahren fallen durch den Anbau von Getreide die Abnahme des Gesamt-P-Gehaltes geringer aus. Der Gesamt-P-Gehalt nach drei Jahren liegt für beide Anlagen bei 36 mg P/100 g Boden.

Beim Lößboden liegen die Ausgangsgehalte beider Anlagen geringfügig auseinander. In der ersten Anlage beträgt der Gehalt 57,8 mg P/100 g Boden und in der zweiten Anlage 61,3 mg P/100 g Boden, addiert man nun für die Varianten 2-9 die Düngung von 4,9 mg P/100 g Boden, erhält man einen durchschnittlichen Anfangsgehalt von 62,1 bzw. 65,7 mg P/100 g Boden. Entsprechend dem Sandboden ist auch beim Lößboden die Verringerung der Gesamt-P-Gehalte nach dem ersten Jahr am größten. Nach dem dritten Jahr liegen beide Anlagen bei ca. 52 mg P/100 g Boden.

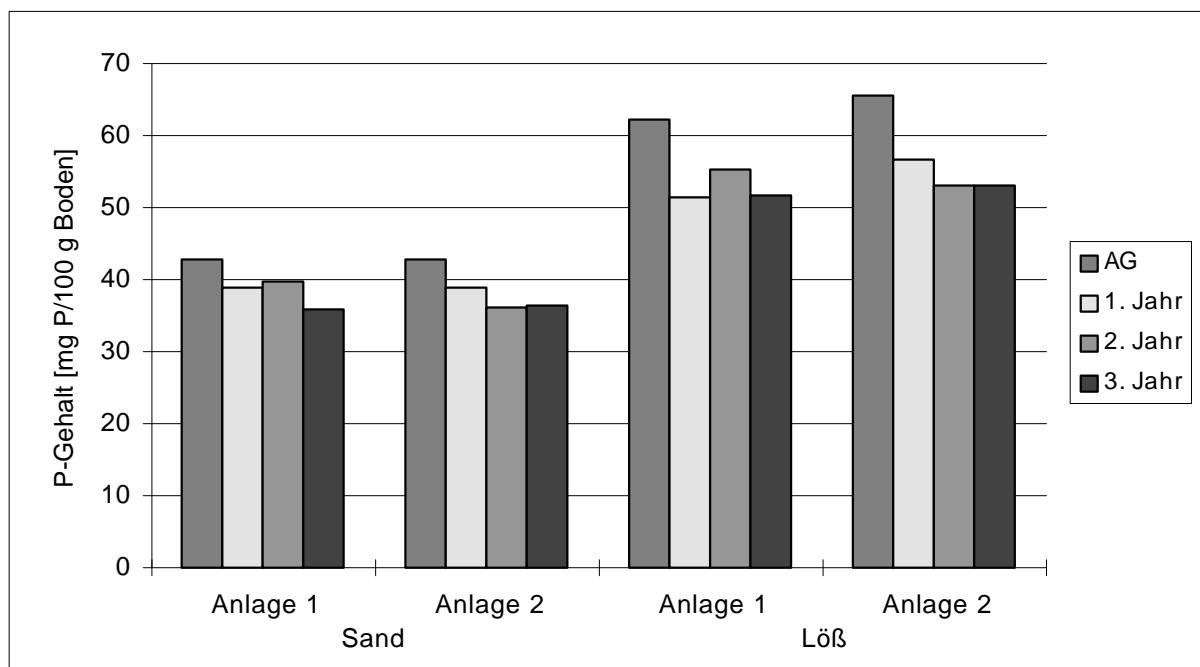


Abb. 4-22: Gesamt P-Gehalt des Bodens in Abhängigkeit der Anlagen, Jahre und Substrate Mittelwert der 9 Varianten und Wiederholungen,
AG - Anfangsgehalt und Düngung, GD (5%) Gesamt-P $\frac{\text{Anlage}}{\text{Jahr/Substrat}} = 1,1$

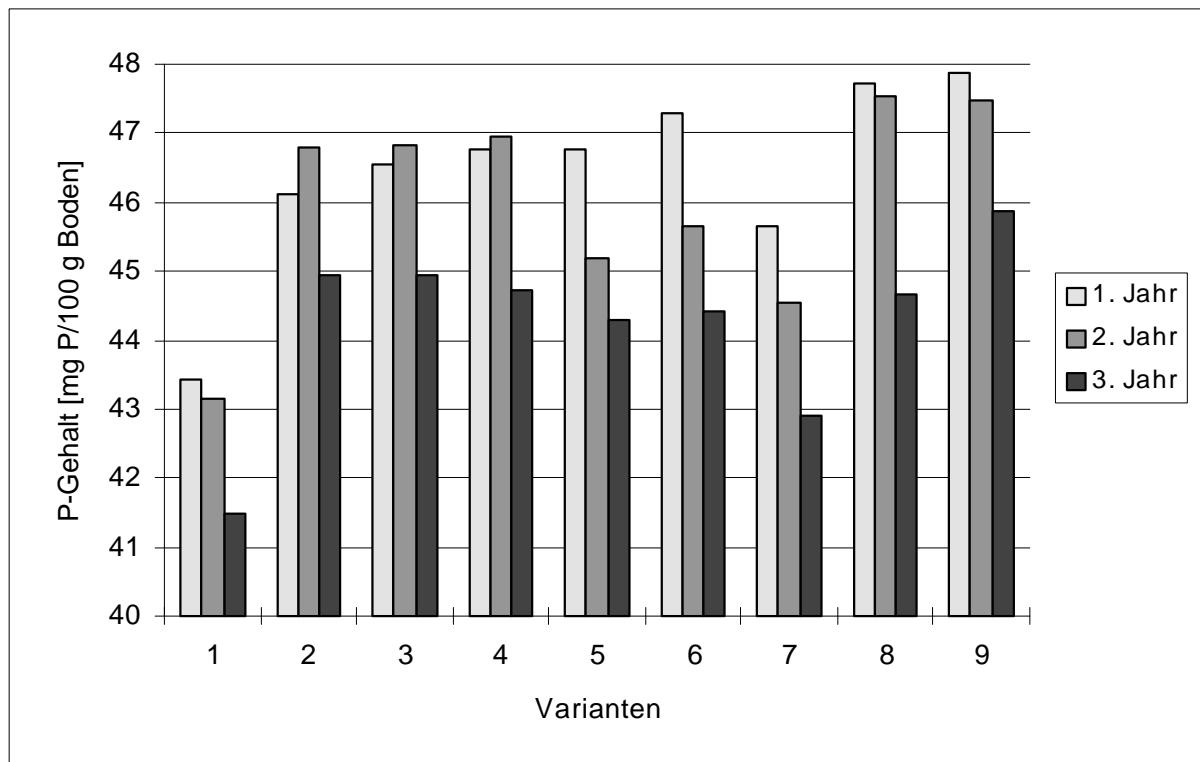


Abb. 4-23: Gesamt-Phosphat-Gehalt des Bodens in Abhängigkeit der Varianten für drei Jahre Mittelwerte der Anlagen, Substrate und Wiederholungen des jeweiligen Jahres,
AG: 49,0 mg P/100 g Boden, Düngung der Varianten 2-9: 4,9 mg P/100 g Boden,
1. Jahr, GD (5%) Gesamt-P Variante = 2,1
2. Jahr, GD (5%) Gesamt-P Variante = 1,1
3. Jahr, GD (5%) Gesamt-P Variante = 1,0

In der Abbildung 4-23 sind für jedes Jahr die Gesamt-Phosphat-Gehalte des Bodens in Abhängigkeit der Varianten dargestellt. Der Anfangsgehalt des Bodens hat für beide Substrate und Anlagen bei 49 mg P/100 g Boden gelegen. Die Düngung von 4,9 mg P/100 g Boden erfolgte bei den Varianten 2-9, so dass der dreijährigen Fruchfolge ein Gesamt-P-Angebot von 53,9 mg P/100 g Boden zur Verfügung stand. Am Ende der ersten Vegetationsperiode verringert sich der Gesamt-P-Gehalt der Kontrolle um 5,5 mg P/100 g Boden. Bei den Dünger-Varianten (8 und 9) erfolgt eine Reduzierung um 6 mg P/100 g Boden und bei den Klärschlamm-Varianten sinkt der Gehalt in der Spanne von 6,5 mg P/100 g Boden (Variante 6) bis 8,2 mg P/100 g Boden (Variante 7).

Im zweiten Jahr sind die Gesamt-P-Gehalte der Kontrolle (1), der drei flüssigen Klärschlämme (2, 3 und 4) sowie der Dünger-Varianten (8 und 9) konstant geblieben. Bei den drei stichfesten Klärschlämmen kam es zu einer Abnahme der Gehalte, die signifikant niedriger im Vergleich zu den entsprechenden flüssigen Klärschlamm-Varianten sind.

Im dritten Jahr kommt es bei allen Varianten zu einer Reduzierung der Gesamt-P-Gehalte. Alle Varianten haben im Vergleich zur Kontrolle höhere Gesamt-P-Gehalte. Zwischen den flüssigen und stichfesten Klärschlamm-Varianten besteht nur noch bei den mit Eisen gefällten und gekalkten Klärschlämmen (4 und 7) ein signifikanter Unterschied. Bei der Hyperphosphat-Variante (9) ist der Gesamt-P-Gehalt nicht so stark gesunken, so dass ein signifikanter Unterschied zur Superphosphat-Variante (8) besteht.

Bei einem Vergleich der Substrate innerhalb der Fruchfolge sind den Sand-Varianten ca. 7 mg P/100 g Boden und den Löß-Varianten 11 bzw. 13 mg P/100 g Boden entzogen worden. Betrachtet man nun die Varianten untereinander zeigt sich, daß die geringsten Entzüge der Gesamt-P-Gehalte mit 7,5 mg P/100 g Boden bei der Kontrolle (1) bzw. 8,0 mg P/100 g Boden bei der Dünger-Variante Hyperphosphat (9) vorliegen. Die höchsten Entzüge konnten mit 10,9 mg P/100 g Boden bei der festen Klärschlamm-Variante mit Eisen-Fällung und Kalkung (7) festgestellt werden. Alle anderen Klärschlamm-Varianten und die Dünger-Variante Superphosphat (8) weisen einen Entzug von ca. 9 mg P/100 g Boden auf.

4.2.3 Veränderungen der P-Fraktionen innerhalb einer Anbaufolge

Nachdem nun die Entwicklung des Gesamtphosphates im Boden betrachtet wurde, sollen im folgenden Kapitel die Veränderungen der einzelnen Fraktionen innerhalb der dreijährigen Fruchtfolge erfolgen. Dazu werden in den Abbildungen 4-24 bis 4-28 die einzelnen Fraktionen (Fe/Al-P, Ca-P, Org. P und Rest P) zunächst zusammen und dann einzeln dargestellt. Abbildung 4-24 stellt die Summe der Fraktionen in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Jahre dar, die Anfangsgehalte der Substrate (AG) sind ebenfalls aufgenommen worden. Im Vergleich zur Abbildung 4-22 ist bei den Anfangsgehalten die Düngung nicht berücksichtigt worden.

Die größte Fraktion bei den Sand-Varianten ist die des Fe/AL-Phosphates mit einem Anteil am Gesamt-P von 60-70 %. Diese bleibt in der ersten Anlage über die drei Jahre unverändert. In der zweiten Anlage steigt hingegen der Fe/Al-P-Gehalt im ersten Jahr geringfügig um 0,8 mg Fe/Al-P/100 g Boden an, er bleibt im zweiten Jahr unverändert und sinkt im dritten Jahr wieder auf 25,1 mg Fe/AL-P/100 g Boden. Die Ca-P-Fraktion mit ca. 10 % am Gesamt-P beteiligt, steigt im ersten Jahr sehr leicht an (0,6 mg Ca-P/100 g Boden) bleibt in den folgenden Jahren jedoch auf gleichem Niveau. Die Fraktion, die größeren Veränderungen unterliegt, ist die Org. P-Fraktion mit einen Anfangsgehalt von 4,8 mg P/100 g Boden. Dies entspricht einem Anteil am Gesamt-P von 12 %. In der ersten Anlage ist eine geringfügige Reduzierung der Org. P-Gehalte feststellbar, dann steigt im zweiten Jahr der Gehalt stärker an. Im dritten Jahr kommt es dann wieder zu einer Reduzierung um 5,2 mg Org.-P/100 g Boden. Die Org. P-Gehalte der zweiten Anlage steigen bereits im ersten Jahr an, im zweiten Jahr halbieren sie sich und im dritten Jahr steigen sie erneut an. Der Rest-P-Gehalt, der sich aus der Differenz des Gesamt-P-Gehaltes minus der drei bereits besprochenen Fraktionen ergibt, ist die Fraktion mit der größten Fehlerwahrscheinlichkeit. Dadurch ist auch die hohe Grenzdifferenz von 3,7 zu erklären. Der Anfangsgehalt bei den Sand-Varianten beträgt 5,6 mg Rest-P/100 g Boden, dieser fällt in beiden Anlagen ab, jedoch in der zweiten Anlage stärker. Es kommt zu keinen statistischen Unterschieden zwischen den Anlagen und Jahren.

Bei den Löß-Varianten bestehen aufgrund unterschiedlicher Ausgangssubstrate auch Unterschiede in dem Umfang der Fraktionen. Der Anfangsgehalt an Fe/Al-P am Gesamt-P-Gehalt in den Anlagen 1 und 2 beträgt 29,9 bzw. 27,0 mg Fe/Al-P/100 g Boden und erreicht damit einen prozentualen Anteil von 52 bzw. 44 % am Gesamt-P-Gehalt. In beiden Anlagen

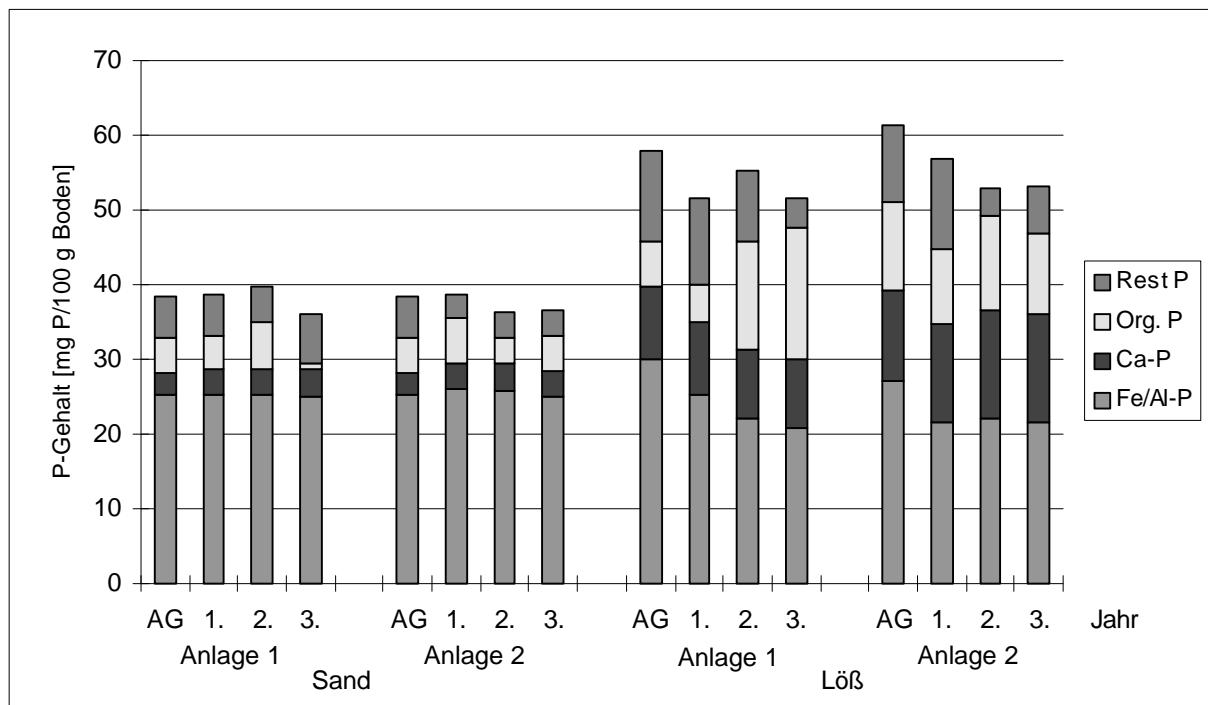


Abb. 4-24: P-Fraktionierung des Bodens in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Jahre
Mittelwert der 9 Varianten und Wiederholungen,
Anfangsgehalt (AG) der Kontrollen (ohne P-Düngung)

$$\text{GD (5\%)} \text{ Gesamt-P}_{\text{Anlage/Jahr/Substrat}} = 1,1$$

$$\text{GD (5\%)} \text{ Fe/Al-P-Fraktion}_{\text{Anlage/Jahr/Substrat}} = 0,5$$

$$\text{GD (5\%)} \text{ Ca-P-Fraktion}_{\text{Anlage/Jahr/Substrat}} = 0,2$$

$$\text{GD (5\%)} \text{ Org.-P-Fraktion}_{\text{Anlage/Jahr/Substrat}} = 0,5$$

$$\text{GD (5\%)} \text{ Rest-P-Fraktion}_{\text{Anlage/Jahr/Substrat}} = 3,7$$

kommt es zu einer Reduzierung der Fe/Al-P-Gehalte. Während in der ersten Anlage eine stetige Reduzierung innerhalb der drei Jahre erfolgt, kann sie in der zweiten Anlage nur im ersten Jahr statistisch nachgewiesen werden. Im dritten Jahr besitzt die Fe/AL-P-Fraktion einen Anteil von 39 bzw. 41 % am Gesamt-P-Gehalt. Der Gehalt der Ca-P-Fraktion der ersten Anlage beträgt 9,9 mg Ca-P/100 g Boden, dieser verringert sich in den ersten beiden Jahren und bleibt im dritten Jahr unverändert. In der zweiten Anlage liegt er bei 12,2 mg Ca-P/100 g Boden und steigt im Laufe der drei Jahre auf 14,2 mg Ca-P/100 g Boden an. Bei der Org. P-Fraktion ist der Anfangsgehalt der ersten Anlage bei 6,2 mg Org.-P/100 g Boden und verdreifacht sich fast innerhalb der Fruchfolge. Bei dem Boden der zweiten Anlage ist die Org. P-Fraktion bereits zu Beginn auf einem höheren Niveau von 12,0 mg Org.-P/100 g Boden, in den drei Jahren kommt es zu einer uneinheitlichen Entwicklung. Der Rest-P-Gehalt der ersten Anlage beträgt 11,9 mg Rest-P/100 g Boden. Er bleibt über die ersten zwei Jahre unverändert, fällt im dritten Jahr stärker ab und erreicht den Wert 3,8 mg Rest-P/100 g Boden. In der zweiten Anlage ist der Ausgangsgehalt mit 10,2 mg

Rest-P/100 g Boden etwas geringer. Im zweiten Jahr kommt es hier bereits zu einer größeren Reduzierung auf 3,8 mg Rest-P/100 g Boden, die statistisch im dritten Jahr unverändert bleibt.

Da jedoch der Einfluß der Klärschlamm-Düngung auf die Fraktionen von Interesse ist, werden diese im folgenden vorgestellt. In Abbildung 4-25 ist die Fe/Al-P-Fraktion in Abhängigkeit der Jahre, Substrate und Varianten dargestellt. Der Anfangsgehalt der Sand-Varianten beträgt 25,3 mg Fe/AL-P/100 g Boden. Bei den drei flüssigen Klärschlamm-Varianten (2, 3 und 4) kommt es innerhalb des ersten Jahres zu einem Anstieg auf 27,2 - 28,3 mg Fe/AL-P/100 g Boden. Auch bei der Dünger-Variante Superphosphat kommt es zu einem sehr geringen Anstieg des Fe/Al-P-Anteiles. Die anderen Varianten bleiben auf dem gleichen Niveau oder sinken ab. In den folgenden Jahren sinken die Gehalte bei der Kontrolle (1) und den drei flüssigen Klärschlamm-Varianten (2, 3 und 4) entweder im zweiten bzw. dritten Jahr oder in beiden Jahren. Bei den stichfesten Klärschlamm-Varianten und den Dünger-Varianten bleiben die Fe/Al-P-Gehalte konstant.

Bei den Löß-Varianten kommt es innerhalb des ersten Jahres zu einer großen Reduzierung der Fe/Al-P-Gehalte von 28,4 mg Fe/AL-P/100 g Boden auf bis zu 20,6 mg Fe/AL-P/100 g Boden (Kontrolle 1) bzw. 25,9 mg Fe/Al-P/100 g Boden (stichfester Klärschlamm mit dem Fällungsmittel Aluminat 6). Im zweiten Jahr sinken bei den stichfesten Klärschlämmen (4, 5 und 6) und bei der Dünger-Variante Superphosphat (8) die Fe/Al-P-Gehalte am stärksten ab. Aber auch bei der flüssigen Klärschlamm-Variante mit dem Fällungsmittel Eisen und anschließender Kalkung (4) und der Dünger-Variante Hyperphos (9) kommt es zu einer Reduzierung der Fe/Al-P-Gehalte. Im dritten Jahr erreichen alle Varianten außer der Kontrolle (1) und der Hyperphos-Variante (9) ein Niveau von ca. 22 mg Fe/Al-P/100 g Boden.

Da die Wechselwirkung Jahr-Substrat-Variante der Ca-P-Fraktion nicht signifikant ist, ist in der Abbildung 4-26 die Darstellung Jahr-Variante gewählt worden. Der Anfangsgehalt beider Substrate hat im Durchschnitt bei 6,9 mg Ca-P/100 g Boden gelegen. Dieser ist im ersten Jahr aufgrund der Düngereigenschaften - wie zu erwarten war - bei der Dünger-Variante Hyperphos (9) stark erhöht und bei der Superphosphat-Variante (8) leicht erhöht. Im zweiten Jahr tritt eine Steigerung bei den Klärschlamm-Varianten mit Aluminatfällung (3 und 6), bei der stichfesten Klärschlamm-Variante Eisenfällung und Kalkung (7) und bei den beiden Dünger-Varianten (8 und 9) ein. Im dritten Jahr erfolgt kein weiterer Anstieg der Ca-P-Gehalte.

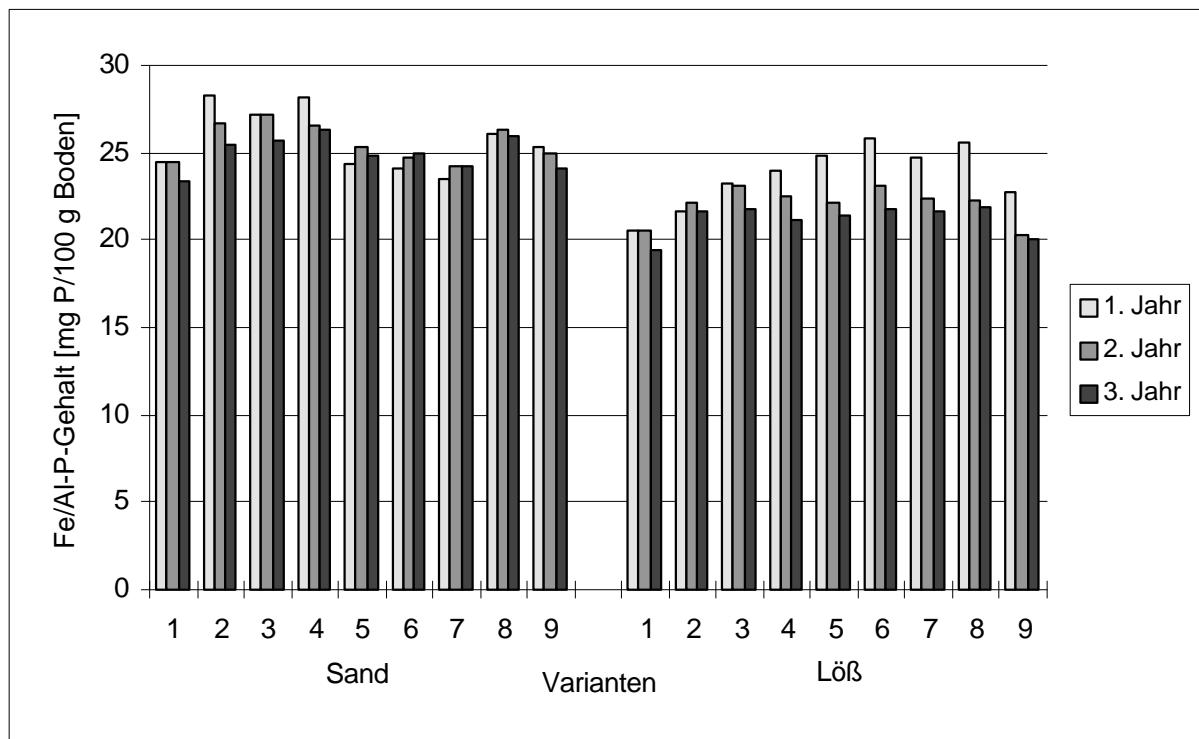


Abb. 4-25: Fe/AL-P-Fraktion des Bodens in Abhängigkeit der Jahre, Substrate und Varianten, Mittelwert der 2 Anlagen, Wiederholungen,
Anfangsgehalt Fe/AL-P-Fraktion _{Sand} = 25,3 mg P/100 g Boden
Anfangsgehalt Fe/AL-P-Fraktion _{Löß} = 28,4 mg P/100 g Boden
GD (5%) Fe/Al-P-Fraktion _{Jahr/Substrat/Variante} = 1,0

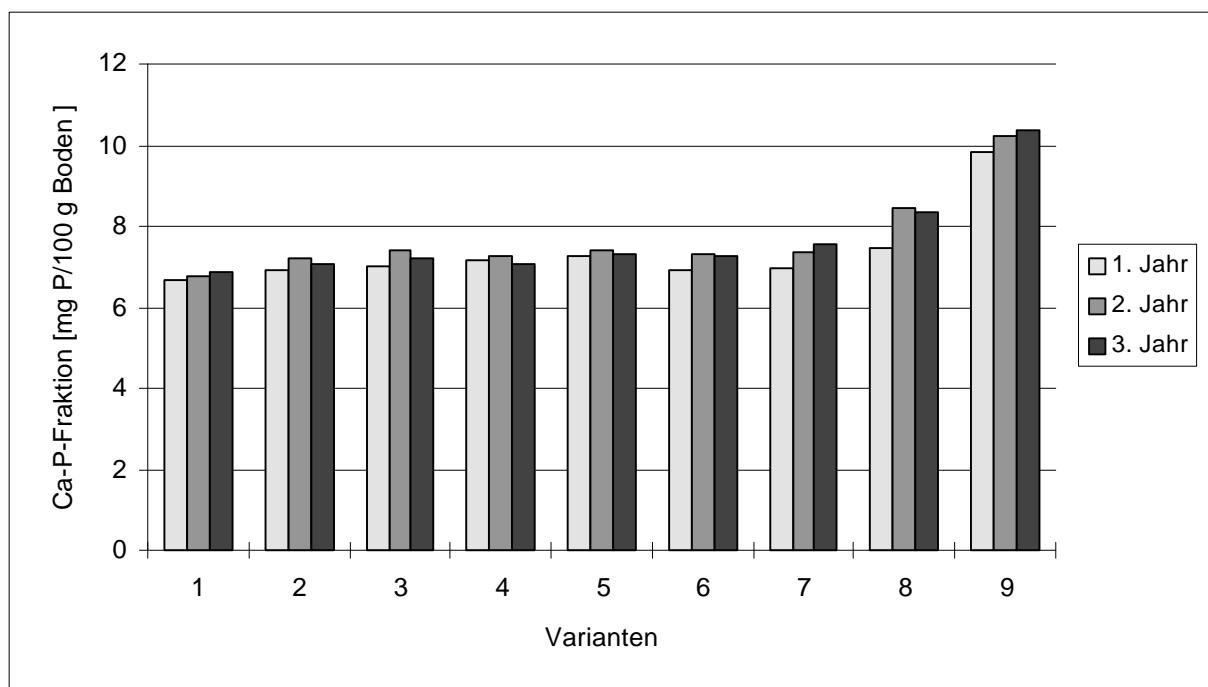


Abb. 4-26: Ca-P-Fraktion des Bodens in Abhängigkeit der Jahre und Varianten, Mittelwert der 2 Anlagen, 2 Substrate und Wiederholungen, Anfangsgehalt Ca-P-Fraktion = 6,9 mg P/100 g Boden
GD (5%) Ca-P-Fraktion _{Jahr/Variante} = 0,3

Die Org. P-Fraktion ist für die beiden Substrate getrennt dargestellt. In der ersten Abbildung 4-27 sind die Gehalte der Sand-Varianten aufgeführt. Der Anfangsgehalt für beide Anlagen beträgt 4,7 mg Org.-P/100 g Boden. In Anlage 1 kommt es bei den stichfesten Klärschlamm-Varianten (5, 6 und 7) und der Dünger-Variante Superphosphat (8) zu einem schnellen Anstieg der Gehalte, bei den fünf übrigen Varianten fällt der Org. P-Gehalt im ersten Jahr ab. Im zweiten Jahr stellt sich der Gehalt der fünf Varianten auf das höhere Niveau der bereits im ersten Jahr erhöhten Varianten ein, so dass zwischen den Varianten keine statistischen Unterschiede mehr vorhanden sind. Im dritten Jahr fallen die Gehalte stark ab. In der zweiten Anlage kommt es im ersten Jahr wie bei den stichfesten Klärschlamm-Varianten der ersten Anlage zu einem Anstieg der Org. P-Fraktion. Die Gehalte nach dem ersten Jahr liegen bei durchschnittlich 6,1 mg Org.-P/100 g Boden und sinken im zweiten Jahr bei allen Varianten signifikant ab. Im dritten Jahr steigen sie tendenziell an, statistisch abgesichert sind jedoch nur die Erhöhungen der Varianten Kontrolle (1), flüssiger und stichfester Klärschlamm mit Eisen als Fällungsmittel und anschließender Kalkung (4 und 7).

Bei den Löß-Varianten (Abbildung 4-28) wurde für beide Anlagen unterschiedlicher Boden eingesetzt, der immer direkt vor Versuchsbeginn im Versuchsgut abgegraben worden ist. In der Anlage 1 beträgt der Gehalt an der Org. P-Fraktion 6,2 mg Org.-P/100 g Boden, dieser steigt im ersten Jahr bei der flüssigen Klärschlamm-Variante mit Eisen als Fällungsmittel (2) an. Bei den Varianten 4-8 hingegen sinkt der Gehalt und bei den vier übrigen Varianten (1-3 und 9) verändert er sich nicht signifikant. Im zweiten und dritten Jahr kommt es bei allen Varianten zu einem Aufbau der Org. P-Fraktion. Die stichfeste Klärschlamm-Variante mit dem Fällungsmittel Eisen (5) bleibt mit den Org. P-Gehalten in den drei Jahren immer signifikant niedriger als die Kontrolle. Auch die beiden anderen stichfesten Klärschlamm-Varianten (6 und 7) liegen im ersten und dritten Jahr signifikant unterhalb der Kontrolle.

In der zweiten Anlage liegt der Anfangsgehalt mit 12,0 mg Org.-P/100 g Boden fast doppelt so hoch wie in der ersten Anlage. Außer bei der Kontrolle verringern sich die Org. P-Gehalte bei allen Varianten im ersten Jahr. Im zweiten Jahr verändern sich die Org. P-Gehalte der Varianten 1-3 und 7 nicht, bei allen anderen Varianten steigen die Org. P-Gehalte an. Im dritten Jahr erfolgt bei den meisten Varianten wieder eine Verringerung der Org. P-Gehalte außer bei der stichfesten Klärschlamm-Variante mit Eisenfällung und Kalkung (7) und den beiden Dünger-Varianten (8 und 9).

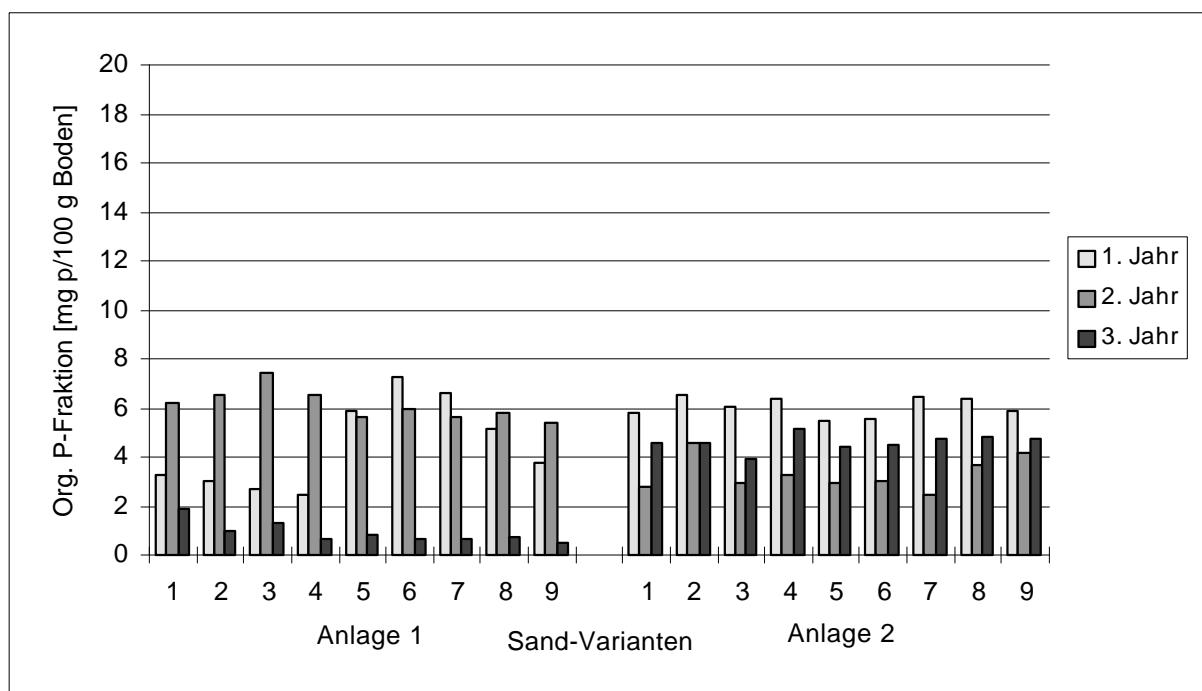


Abb. 4-27: Org.-P-Fraktion des Sandbodens in Abhängigkeit der Anlagen, Jahre und Varianten, Mittelwert der Wiederholungen,
 Anfangsgehalt Org.-P-Fraktion Sand = 4,8 mg P/100 g Boden
 GD (5%) Org.-P-Fraktion Anlage/Jahr/Substrat/Variante = 1,6

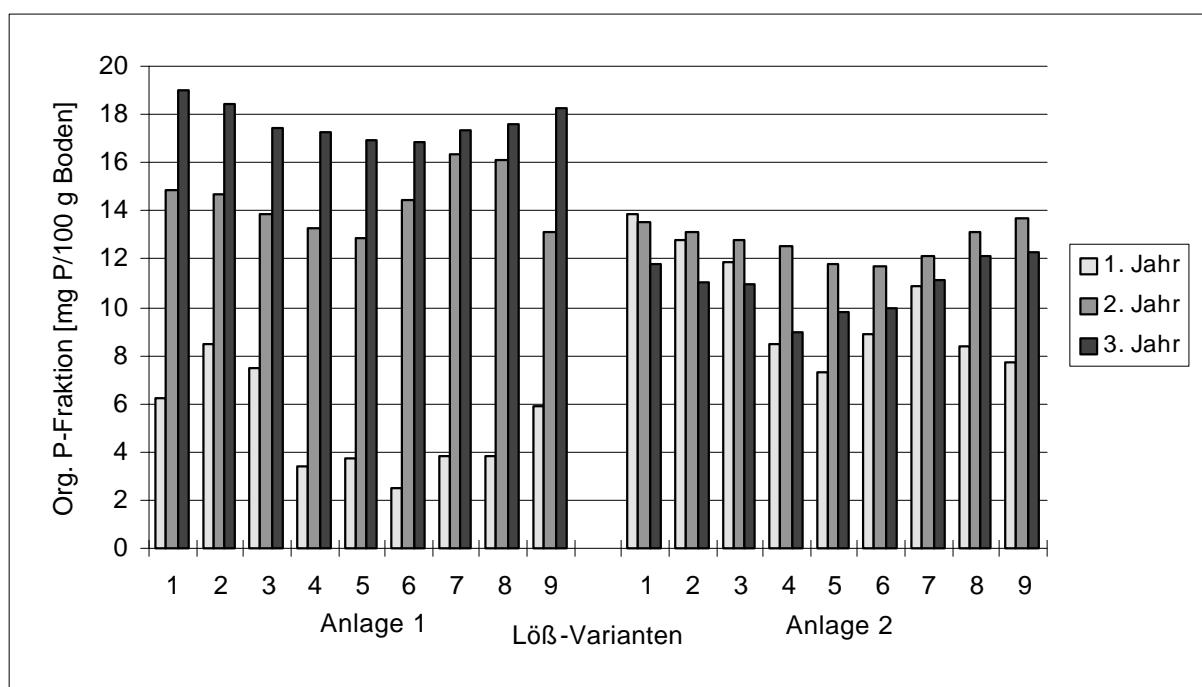


Abb. 4-28: Org.-P-Fraktion des Lößbodens in Abhängigkeit der Anlagen, Jahre und Varianten, Mittelwert der Wiederholungen,
 Anfangsgehalt Org.-P-Fraktion Anlage 1 = 6,2 mg P/100 g Boden
 Anfangsgehalt Org.-P-Fraktion Anlage 2 = 12,0 mg P/100 g Boden
 GD (5%) Org.-P-Fraktion Anlage/Jahr/Substrat/Variante = 1,6

Für die P-Fraktionierung der Böden lässt sich zusammenfassend sagen, daß bei den Sand-Varianten die Fe/Al-P-Fraktionen und die Ca-P-Fraktion weitestgehend konstant bleiben. Bei der Organischen P-Fraktion sind innerhalb der drei Jahre die größten Schwankungen zu verzeichnen. Bei dem Lößboden der ersten Anlage ist die hauptsächliche Entwicklung die Reduzierung der Fe/Al-P-Gehalte und der Anstieg der Org. P-Fraktion. Bei dem Lößboden der zweiten Anlage reduziert sich zunächst geringfügig der Fe/Al-Gehalt. Bei der Org. P-Fraktion liegt für die dreijährige Fruchfolge ein uneinheitlicher Verlauf vor.

5 Diskussion

Im Kapitel 4 ist mit Hilfe von Vegetationsversuchen die P-Düngewirkung verschiedener Klärschlamm- und Düngemittel-Varianten für die Anbaufolge erfaßt und beschrieben worden. In diesem Kapitel sollen insbesondere die Auswirkungen über die Zeit diskutiert werden.

5.1 Einfluß der Düngung auf die Erträge

1. Arbeitshypothese:

Die P-Wirkung im Klärschlamm auf den Ertrag ist der Mineraldüngung mit Superphosphat ebenbürtig.

Die Düngewirkung eines Nährstoffes wird in aller Regel am Ertrag gemessen, da dies die Größe ist, die zum einen den Landwirt interessiert und zum anderen am einfachsten zu bestimmen ist. In diesem Kapitel soll betrachtet werden, ob es eine Düngewirkung aufgrund der Klärschlamm-Düngung gegeben hat und ob diese sich in gleicher Weise wie die mineralische Düngung mit Superphosphat verhält. Daneben ist zu diskutieren, ob zwischen den beiden Substraten unterschiedliche P-Wirkungen aufgetreten sind und wie die Art der P-Fällung sich auf den Ertrag auswirkt.

In Tabelle 5-1 sind die Ergebnisse der Relativverträge sowohl in Abhängigkeit der Varianten als auch in Abhängigkeit der Substrate und Varianten dargestellt (siehe auch Tabelle 4-1). Bei der Betrachtung der Relativverträge in Abhängigkeit der Varianten (Spalte 2) wird deutlich, dass bei der Kontrolle (1), den Klärschlämmen mit dem Fällungsmittel Eisen und Kalkung (4 und 7), sowie die Dünger-Variante Hyperphos (9) geringere Erträge im Vergleich zur Dünger-

Tabelle 5-1: Erträge (%) in Abhängigkeit der Varianten (2. Spalte) und der Substrate und Varianten (3. und 4. Spalte)
 Mittelwert der 2 Anlagen, 9 Ernten und (2 Substrate)
 Dünger-Variante Superphosphat (8) = 100 %
 GD (5%) Ertrag Variante = 4,2
 GD (5%) Ertrag Substrat/Variante = 5,9

Varianten	Erträge in Abhängigkeit der		
	Varianten	Substrate und Varianten	
		Sand	Löß
1	87,29	89,10	85,48
2	101,42	105,99	96,85
3	98,27	98,54	98,00
4	95,54	94,55	96,54
5	98,16	102,42	93,90
6	99,43	104,93	93,93
7	93,74	94,73	92,75
8	100,00	100,00	100,00
9	93,98	95,27	92,70
DS	96,43	98,39	94,46

DS - Durchschnitt der 9 Varianten,
 Erträge Mais nach Hafer der 1. Versuchsanlage sind unberücksichtigt

Variante Superphosphat (8) erzielt worden sind. Demnach sind die Relativverträge der flüssigen und stichfesten Klärschlämme mit den Fällungsmitteln Eisen (2 und 5) und Aluminat (3 und 6) mit der Mineraldüngung mit Superphosphat vergleichbar.

Bei einem Vergleich der Substrate (Spalte 3 und 4) ist jedoch zu erkennen, daß dieses gleiche Ergebnis dort nicht vorliegt, außer bei den Kontrollen, die sowohl bei der Sand- als auch bei der Löß-Variante geringere Erträge erzielt haben. Bei den anderen Sand-Varianten erreicht die flüssige Klärschlamm-Variante mit dem Fällungsmittel Eisen (2) einen signifikant höheren Mehrertrag im Vergleich zur Dünger-Variante Superphosphat. Bei allen anderen Klärschlamm-Varianten ist die P-Wirkung vergleichbar der Dünger-Variante Superphosphat. Bei den Löß-Varianten unterscheiden sich alle drei flüssigen Klärschlamm-Varianten (2, 3 und 4) nicht von der Superphosphat-Variante (8). Die stichfesten Klärschlamm-Varianten (5, 6 und 7) erreichen das gleiche Ertragspotential wie die Dünger-Variante Hyperphos (9). Die größten Unterschiede zwischen den Sand- und Löß-Varianten bestehen bei der stichfesten Klärschlamm-Variante mit Aluminatfällung (6). Während bei der Sand-Variante ab dem vierten Schnitt des Einjährigen Weidelgrases die Erträge oberhalb von 100 % liegen, erreichen sie bei der Löß-Variante nur bei drei der vier Schnitte des Einjährigen Weidelgrases die 100 % - Marke.

Ebenfalls größere Unterschiede zwischen den Sand- und Löß-Varianten bestehen bei den flüssigen und stichfesten Klärschlamm-Varianten mit dem Fällungsmittel Eisen (2 und 5). Diese Unterschiede beruhen auf der Tatsache, daß die Relativverträge der Maisernte nach Weizen bei den Sand-Varianten fast doppelt so hoch wie bei den Löß-Varianten ausgefallen sind. Wie bereits in Abbildung 4-7 gezeigt, konnte bei der Superphosphat-Variante auf Sand nur ca. 15 g/Gefäß geerntet werden (= 100 %), während bei der Löß-Variante ein Ertrag von fast 35 g/Gefäß (= 100 %) erwirtschaftet worden ist.

Der Vergleich der Ergebnisse mit Angaben der Literatur macht deutlich, daß es sehr verschiedene Angaben über die Ertragswirksamkeit von Klärschlamm im Vergleich zu Mineraldüngern gibt. Diese reichen von unwirksam [SUNTHEIM, 1996] bis gleichwertig [BARAN, 1985].

DIEZ UND WEIGELT [1980] weisen nach, daß auf Lößböden der Ertrag durch eine Klärschlammdüngung (Naßschlamm) mit einer NPK-Düngung vergleichbar ist. Insbesondere bei Getreide sind gleiche Erträge erzielt worden. Größere Unterschiede sind bei den Erträgen der Zuckerrübe aufgetreten, dort aber vorwiegend bei den Blatt- und nicht bei Rüben- und Zuckererträgen. Auf einem kiesigen, stark sandigen Lehm sind im Mittel der Früchte Kartoffeln, W.-Weizen und So.-Gerste niedrigere Erträge im Vergleich zur NPK-Düngung erzielt worden, wobei auch hier wieder die geringsten Unterschiede beim Getreide aufgetreten sind.

WERNER [1975] setzt in seinen Versuchen überwiegend mit Al-gefällten Klärschlämmen ein. Die Gesamterträge aus Hafer und Raps der Klärschlamm-Varianten liegen um ca. 5-20 % unter der Dünger-Variante Dicalciumphosphat. Auf neutralem bis leicht kalkhaltigen Böden (pH 7,1) waren die Unterschiede, die in der Jugendphase bestanden, auch bei der Ernte zwischen den Klärschlamm-Varianten und der Dünger-Variante noch sichtbar. Dagegen konnten zwischen den Varianten auf einem sauren Boden (pH 5,1) diese Differenzierung nicht mehr festgestellt werden. Es ist ebenfalls festgestellt worden, daß bei Getreide, als einer weniger P-bedürftigen Kultur, geringere Unterschiede zwischen den Varianten sichtbar waren als bei stark P-bedürftigen Kulturen.

KERSCHBERGER UND SCHRÖTER [1998] überprüften die Wirkung von 20 verschiedenen Klärschlämmen im Vergleich zu einer mineralischen 0,5 g P-Düngung/Gefäß. Auf einem Boden aus Buntsandstein (pH 6,0 und P-CAL 4,3 mg/100 g Boden) lag der

Mehrertrag durch die mineralische Düngung bei 11 %. Von den 20 Klärschlämmen erreichten nur 12 Klärschlämme einen Mehrertrag, der bei ca. 5 % lag. Dagegen fielen die Mehrerträge auf einer Schwarzerde (pH 6,4 und P-CAL 3,0 mg/100 g Boden) bei der mineralischen Düngung mit 78 % wesentlich höher aus. Auch bei den Klärschlämmen erreichten 18 Schlämme einen maximalen Mehrertrag von rund 30 %. Im Vergleich zu den vorliegenden Versuchen sind die Ausgangsgehalte des P-CAL-Gehaltes und pH-Wertes niedriger und konnten von daher im ersten Jahr ein differenzierteres Ergebnis liefern. Eine Langzeitwirkung wird von den Autoren nicht ausgeschlossen.

SUNTHEIM [1996] setzte in seinen Versuchen Klärschlämme mit unterschiedlichen P-Fällungsmethoden ein. Er vergleicht Fe-, Al- und Bioschlämme mit Superphosphat bei verschiedenen Düngungsstufen von 0,1-1,0 g P/Gefäß. Bei den Fe-Schlämmen wurde z. T. nicht einmal der Ertrag der Kontrolle erreicht, bei den Al-Schlämmen liegt der Ertrag ab 0,4 g/Gefäß gering über der Kontrolle. Die Bioschlämme weisen höhere Erträge auf, können aber auch nicht das Ertragspotential der Superphosphat-Varianten erreichen. Auch hier wies der sandige Lehm einen niedrigeren Gehalt an pflanzenverfügbarer Phosphat (P-DL = 2,7 mg P/100 g Boden) auf.

BARAN [1985], der in einem zweijährigen Gefäßversuch unterschiedliche P-haltige Fällungsprodukte zu Düngungszwecken untersuchte, gibt die Empfehlung, daß das Phosphat im Klärschlamm mit Kalkhydrat bzw. Kalkhydrat plus Eisenchlorid gefällt werden soll, da sie eine mit Super- und Thomasphosphat vergleichbare Wirkung zeigen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß eine Klärschlammdüngung mit einer mineralischen Düngung in der P-Wirkung prinzipiell vergleichbar ist. Im Durchschnitt der dreijährigen Anbaufolge war die Ertragswirksamkeit der flüssigen und stichfesten Klärschlämme auf dem Sandboden gleichwertig. Auf dem Lößboden hingegen waren die flüssigen Klärschlämme den stichfesten Klärschlämmen hinsichtlich des Ertrages überlegen. Die stichfesten Klärschlämme konnten das Ertragsniveau von Superphosphat nicht erreichen. Sie sind in der Ertragswirksamkeit vergleichbar mit Hyperphos. Eine zusätzliche Kalkung der mit Eisen gefällten Klärschlämme zeigte unabhängig von der Bodenart keine Wirksamkeit.

5.2 Einfluß der Düngung auf die P-Entzüge

2. Arbeitshypothese:

Die P-Entzüge der unterschiedlich aufbereiteten Klärschlämme sind vergleichbar mit den P-Entzügen der Mineraldüngung mit Superphosphat. Eine Anrechnung auf die Düngung kann erfolgen.

Neben dem Ertrag zeigt der P-Gehalt an, ob die Pflanzen während der Vegetationsperiode ausreichend mit Phosphat versorgt waren. Unterhalb der Grenzkonzentration (Ertrag im Maximum) kann eine weitere Zufuhr von Nährstoffen ertragswirksam umgesetzt werden. Oberhalb der Grenzkonzentration ist die vermehrte Nährstoffaufnahme wirkungslos (Luxuskonsum), falls diese zusätzlichen Nährstoffe nicht noch zu einem späteren Zeitpunkt in Ertrag umgesetzt werden. [MENGEL, 1984] Um die Erträge mit den P-Entzügen besser vergleichen zu können, sind neben den absoluten Summenwerten (Abb. 4-17 und 4-18) auch die Relativentzüge jeweils zur Dünger-Variante Superphosphat (8) berechnet worden. Liegen die Erträge und P-Entzüge der Varianten niedriger als die der Superphosphat-Variante, könnten sich die Kulturen in einer P-Mangel-Situation vorgefunden haben. Bei gleichen Erträgen und P-Entzügen wie die Superphosphat-Variante (8) kann davon ausgegangen werden, daß die Klärschlamm-Düngung der Mineraldüngung gleichwertig ist. Übersteigen die P-Entzüge der Varianten jedoch die der Superphosphat-Variante (8) bei gleichen Erträgen, konnte die vermehrte P-Aufnahme nicht in Ertrag umgesetzt werden. In diesem Falle würde ein Luxuskonsum der Varianten vorliegen.

Bei der Betrachtung der Relativentzüge (Tabelle 5-2) fällt auf, daß im ersten Jahr die Entzüge der Sand-Varianten niedriger aber in den kommenden Jahren höher als die Entzüge der Löß-Varianten sind. Bei den Sand-Varianten erreichen innerhalb der drei Jahre einige Varianten höhere Relativentzüge als die Superphosphat-Variante (8). Bei den Löß-Varianten ist dies besonders im ersten Jahr beim ersten Schnitt des Einjährigen Weidelgrases ausgeprägt. Dagegen liegen im dritten Jahr alle Relativentzüge unterhalb der Superphosphat-Variante (8).

Bei den Sand-Varianten Kontrolle (1), flüssiger und stichfester Klärschlamm mit Fällungsmittel Eisen und Kalkung (4 und 7) sind beim ersten Schnitt des Einjährigen Weidelgrases niedrige P-Entzüge (67 - 74 %) ermittelt worden. Diese liegen signifikant unterhalb der Entzüge der Dünger-Variante Superphosphat (8) bei jedoch statistisch gleichem

Tabelle 5-2: P-Entzüge (%) in Abhängigkeit der Ernten, Substrate und Varianten
Mittelwert der 2 Anlagen
Dünger-Variante Superphosphat (8) = 100 %
GD (5%) P-Entzug Ernte/Substrat/Variante = 21,5
GD (5%) P-Entzug Ernte/Substrat = 7,2

	Varianten	1. Jahr				2. Jahr			3. Jahr	
		EW1	EW2	EW3	EW4	WK	WS	MW	HK	HS
	1	72,18	79,99	70,61	97,40	59,83	82,60	107,42	85,39	75,46
	2	107,82	92,63	91,30	108,08	97,29	98,14	156,08	95,27	110,67
	3	88,95	91,33	90,52	82,23	95,92	107,71	129,12	105,22	95,08
	4	67,02	71,31	73,94	88,37	105,54	99,80	176,15	85,41	65,70
Sand	5	80,83	80,76	78,78	102,34	101,10	99,84	187,62	100,27	72,27
	6	85,85	89,38	78,00	97,78	100,16	89,19	152,40	98,89	92,29
	7	74,53	85,50	77,83	83,73	107,91	102,39	156,14	91,18	94,83
	8	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	9	83,55	90,62	76,18	90,30	93,83	95,90	108,91	92,53	63,44
	DS Sand	84,53	86,83	81,91	94,47	95,73	97,29	141,54	94,91	85,53
	1	97,35	86,12	81,69	89,30	84,79	85,30	60,30	60,71	49,47
	2	123,66	102,33	100,30	106,22	86,85	89,15	74,53	90,00	95,06
	3	116,40	94,74	101,55	103,51	79,14	95,28	70,35	96,99	96,96
	4	114,09	86,35	91,57	106,39	95,70	107,44	69,65	88,72	91,18
Löß	5	107,41	87,58	94,85	97,07	97,93	90,00	70,26	87,46	83,45
	6	106,25	90,21	93,43	101,36	97,93	103,86	78,80	85,44	84,32
	7	99,27	84,32	83,27	96,24	101,99	103,14	74,62	82,77	95,77
	8	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	9	98,78	85,12	87,63	94,41	97,80	94,40	75,87	73,00	70,08
	DS Löß	107,02	90,75	92,70	99,39	93,57	96,51	74,93	85,01	85,14

EW - Einjähriges Weidelgras, WK - Weizenkorn, WS - Weizenstroh,

MW - Mais nach Weizen, HK - Haferkorn, HS - Haferstroh

Erträge Mais nach Hafer der 1. Versuchsanlage sind unberücksichtigt

Erträge wie die Superphosphat-Variante. Auch wenn diese tendenziell am unteren Rand der Signifikanz liegen, weist dies auf einen Luxuskonsum zu Beginn des Versuches bei der Dünger-Variante Superphosphat hin. Dieses Phänomen ist ebenfalls beim dritten Schnitt des Einjährigen Weidelgrases zu beobachten, wobei in diesem Falle die Kontrolle (1) und die Dünger-Variante Hyperphos (9) mit 70 bzw. 76 % des P-Entzuges gegenüber der Superphosphat-Variante das gleiche Ertragsniveau wie die Superphosphat-Variante erreicht.

Bei den Löß-Varianten sind bei den P-Entzügen statistische Unterschiede erst ab dem Maisanbau nach Weizen zu beobachten. Ansonsten gibt es zwei Ausnahmen. Im ersten Schnitt des Einjährigen Weidelgrases entzieht die flüssige Klärschlamm-Variante mit dem Fällungsmittel Eisen (2) mit 124 % signifikant mehr als die Superphosphat-Variante (8), erzielt dadurch jedoch keinen statistisch abgesicherten Mehrertrag. Bei dieser Variante kann zu Beginn des Versuches ein P-Überangebot vorgelegen haben, das bereits nach dem ersten

Schnitt abgebaut worden ist. Bei der flüssigen Klärschlamm-Variante mit Fällungsmittel Eisen und Kalkung (4) tritt dagegen der entgegengesetzte Fall ein. Für den signifikant höheren Mehrertrag des vierten Schnittes von 122 % (Tabelle 4-1) gegenüber der Superphosphat-Variante (8) ist kein höherer P-Entzug benötigt worden.

Bei der Kontrolle der Sand-Variante ist trotz z. T. geringerer P-Entzüge im Vergleich zur Superphosphat-Variante bei den vier Schnitten des Einjährigen Weidelgrases keine Ertrags einbuße (Tabelle 4-1) zu erkennen. Ebenso verhält es sich bei der Kontrolle der Löß-Variante, auch hier ist ohne Düngung beim Einjährigen Weidelgras und beim Weizenkorn und -stroh der gleiche Ertrag wie bei der Dünger-Variante Superphosphat erreicht worden. Dies weist darauf hin, daß der P-Anfangsgehalt des Bodens ausreichend für die Kulturen war und die zusätzliche P-Düngung nicht ertragswirksam umgesetzt werden konnte. Erst ab dem Weizen beim Sandboden bzw. Mais nach Weizen beim Lößboden erreichen die Kontrollen signifikant geringere Entzüge im Vergleich zur Superphosphat-Variante.

Bei allen Klärschlamm-Varianten kommt es erst ab dem Mais nach Weizen zu signifikanten Unterschieden im Vergleich zur Superphosphat-Variante. Bei den Sandböden bei denen die Superphosphat-Variante (8) nur sehr geringe Erträge und P-Entzüge ermittelten konnte, steigen die Erträge und P-Entzüge bis auf max. 187 % (Variante 5) an. Bei den Löß-Varianten tritt hingegen eine Reduzierung der P-Entzüge bis 70 % (Variante 5) ein, die den Ertrag auch auf 74 % reduziert. Bei den P-Entzügen vom Haferkorn und -stroh kommt es nicht zu diesen Unterschieden zwischen Klärschlamm-Varianten und Superphosphat-Varianten.

Da die Erträge und P-Entzüge der Kontrolle im Vergleich zu den gedüngten Varianten z.T. keine Signifikanzen aufweisen, ist festzustellen, inwieweit die Dünger von den Kulturen ausgenutzt werden konnten. Die prozentuale P-Ausnutzung gibt die Wirkungsunterschiede der entzogenen P-Mengen der einzelnen Varianten im Vegetationsablauf in Beziehung zu den gedüngten Phosphatmengen an. Mit Hilfe der Differenzmethode wird die aus dem Klärschlamm- und Dünger-Phosphat entzogene Phosphat-Menge bestimmt und diese relativ zur gedüngten Phosphat-Menge ins Verhältnis gesetzt.

$$\text{P-Ausnutzung [\%]} = (E - E_0) \cdot 100 / D$$

E = P-Entzug der gedüngten Variante [mg P/Gefäß]

E_0 = P-Entzug der ungedüngten Variante [mg P/Gefäß]

D = Düngungshöhe [mg P/Gefäß]

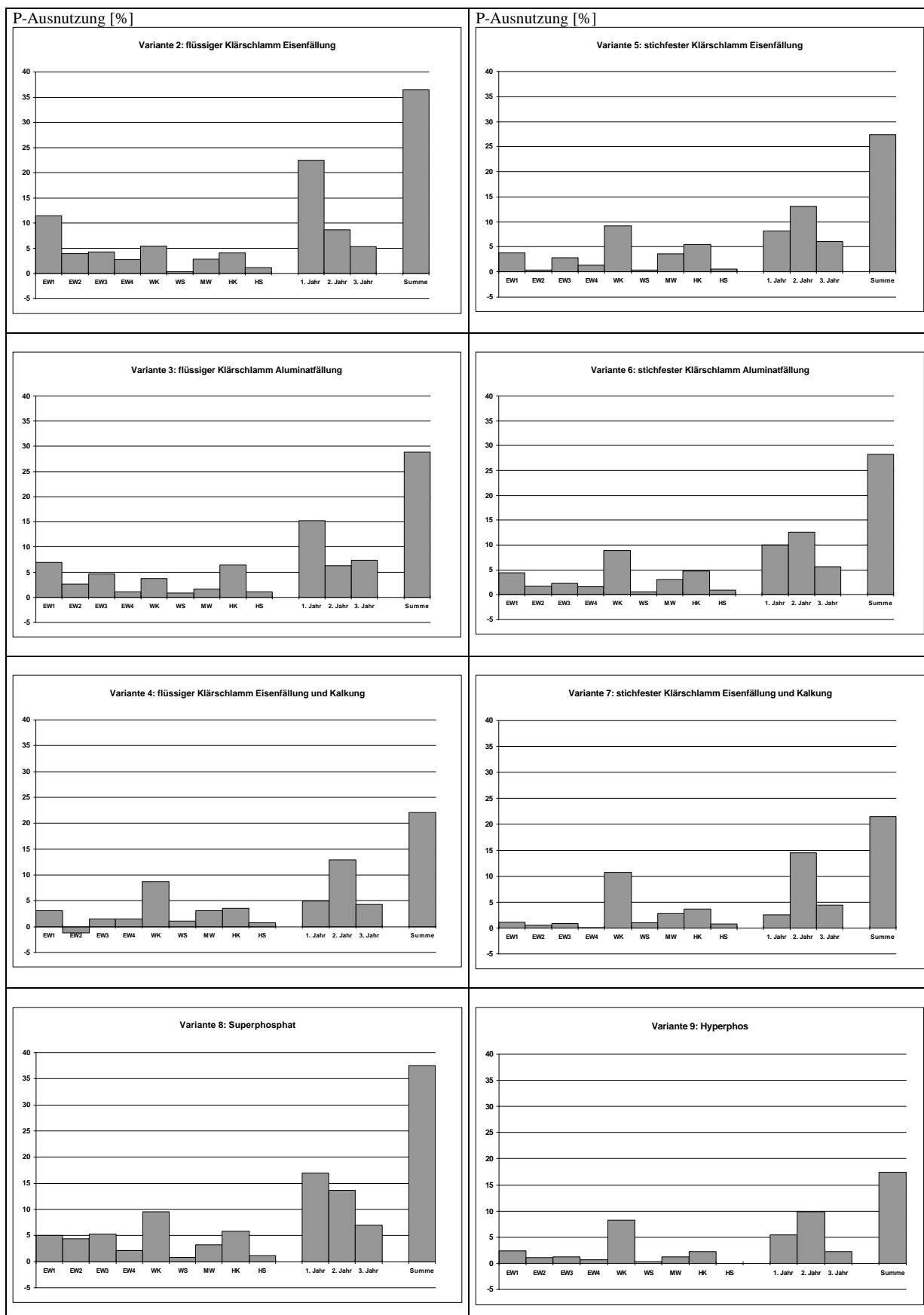


Abb. 5-1: Prozentuale Düngerausnutzung in Abh. der Varianten, Mittelwert der 2 Anlagen und 2 Substrate, P-Entzüge Mais nach Hafer der 1. Anlage sind unberücksichtigt, GD (5%) P-Ausnutzung Ernte/Variante = 3,2
GD (5%) P-Ausnutzung Jahr/Variante = 7,8

Die Darstellung der Varianten hinsichtlich der P-Ausnutzung (%) erfolgt in der Abbildung 5-1. Um eine bessere Übersicht zu erhalten, sind die Varianten mit dem gleichen Fällungsmittel nebeneinander, links die flüssigen und rechts die stichfesten Varianten, dargestellt. In der letzten Zeile sind die beiden Dünger-Varianten abgebildet. Der Mais nach Hafer der ersten Anlage wurde in die Berechnungen nicht mit einbezogen, die P-Ausnutzung fällt daher bei allen Varianten etwas geringer aus.

Die Summe der prozentualen Düngerausnutzung der Superphosphat-Variante (8) liegt bei 38 %, dagegen erreicht die Hyperphos-Variante (9) nur 17 %. Nur die Klärschlamm-Variante mit Eisenfällung (2) erreicht das Niveau der Superphosphat-Variante. Bei den anderen fünf Klärschlamm-Varianten liegt die Summe der P-Ausnutzung mit 21 - 29 % zwischen den beiden Dünger-Varianten.

Die zeitliche Entwicklung der Dünger-Variante Superphosphat (8) zeigt, daß die P-Ausnutzung der ersten drei Schnitte des Einjährigen Weidelgrases bei ca. 5 % liegt und es beim vierten Schnitt zu einer Reduzierung der P-Ausnutzung kommt. Im zweiten Jahr erfolgt eine fast 10 % ige Ausnutzung durch das Weizenkorn. Das Weizenstroh spielt bei der P-Ausnutzung nur eine sehr geringe Rolle. Im dritten Jahr sinkt die P-Ausnutzung des Haferkornes im Vergleich zu dem des Weizenkornes weiter ab.

Die Hyperphos-Variante (9) verhält sich abweichend dazu. Die Ausnutzung des P-Düngers ist im ersten Jahr durch die vier Schnitte des Einjährigen Weidelgrases gering. Erst im zweiten Jahr kommt es durch das Weizenkorn zu einer höheren P-Ausnutzung, die im dritten Jahr durch den Hafer wieder geringer ist. Bei einem Vergleich der beiden Dünger-Varianten miteinander wird deutlich, daß das wasserlösliche Superphosphat bereits im ersten Jahr der Ausbringung eine hohe Ausnutzung erfährt, die im Laufe der Jahre geringer wird (P-Alterung). Das schwer lösliche Hyperphos ist dagegen im ersten Jahr der Ausbringung nur zu einem geringen Teil düngerwirksam und erreicht nach drei Jahren nur die Ausnutzung, die das Superphosphat (8) bereits im ersten Jahr erzielen konnte.

Die flüssige Klärschlamm-Variante mit Eisen als Fällungsmittel (2) erreicht beim ersten Schnitt des Einjährigen Weidelgrases bereits 10 % der Düngerausnutzung, danach fallen die Ausnutzungsrationen ab. Das Phosphat im Klärschlamm ist also direkt wirksam, besser noch als das wasserlösliche Superphosphat. Die stichfeste Variante (5) wirkt hingegen verzögert. Dort

steigt die P-Ausnutzung erst im zweiten Jahr an. Insgesamt erreicht sie mit 27 % nicht das Niveau der flüssigen Variante (2).

Bei der flüssigen Klärschlamm-Variante mit dem Fällungsmittel Aluminat (3) ist auch direkt im ersten Schnitt eine höhere P-Ausnutzung festzustellen. Im zweiten Jahr ist diese geringer und im dritten Jahr kann das Haferkorn nochmals zu einer über 5 % igen P-Ausnutzung beitragen. Bei der entsprechenden stichfesten Variante (6) ist die Situation vergleichbar wie bei der stichfesten Variante 5. Erst im zweiten Jahr kommt es insbesondere über das Weizenkorn zu einem größeren Anstieg der Düngerausnutzung. Die jeweiligen Summen der beiden Varianten 5 und 6 liegen jedoch auf einem gleichen Niveau von 28 %.

Bei der flüssigen Klärschlamm-Variante mit Eisen als Fällungsmittel und Kalkung erreicht die Dünger-Ausnutzung im ersten Jahr nicht einmal 5 %. Die Düngerausnutzung ist negativ, d.h. durch die Düngung ist es zu einer Festlegung von Boden-P gekommen. Erst im zweiten Jahr wird das gedüngte Phosphat wirksam. Bei der stichfesten Variante zeichnet sich die gleiche Entwicklung ab. Es wird im ersten Jahr eine geringe P-Menge ausgenutzt, z. T. kommt es ebenfalls zu einer Festlegung von Boden-P durch die Düngung. Erst im zweiten Jahr erreicht die P-Ausnutzung 10 %. Insgesamt kommt es bei beiden Varianten zu einer geringen P-Ausnutzung von 22 %, die jedoch noch größer ist als die der Dünger-Variante Hyperphos (9).

Die beiden flüssigen Klärschlamm-Varianten (2 und 3) verhalten sich in der P-Ausnutzung vergleichbar der Superphosphat-Variante, das gedüngte Phosphat wird direkt umgesetzt. Im Laufe der Zeit kommt es zur Verminderung der Ausnutzung. Dagegen kommt es bei allen anderen Klärschlamm-Varianten (4, 5, 6 und 7) zu entsprechenden Reaktionen wie bei der Hyperphos-Variante. Im Boden findet eine verzögerte Umsetzung des gedüngten Phosphates statt. Daher steigt die P-Ausnutzung erst im zweiten Jahr stärker an.

Da die Verwertung von Sekundärrohstoffdüngern im Sinne der Kreislaufführung zu erfolgen hat, sind ausgeglichene Nährstoffbilanzen für eine Fruchtfolge anzustreben. Dabei werden die Nährstoffzugänge den Nährstoffabgängen gegenübergestellt. Der sich daraus ergebende Saldo lässt Aussagen über die Effizienz des Nährstoffeinsatzes zu. Ein negativer Bilanzsaldo bzw. eine Effizienz von größer 100 % bedeutet, daß die Summe der Entzüge größer ist als die Summe der Zufuhren. Langfristig würde dieser Boden an diesem Nährstoff verarmen. Um den Boden von einem Nährstoff, der im Überschuß vorliegt, abzureichern, kann dies

kurzzeitig sinnvoll sein, langfristig sollte im Sinne der Nachhaltigkeit jedoch eine ausgeglichene Bilanz angestrebt werden. Übersteigt jedoch über einen längeren Zeitraum die Zufuhr die Nährstoffabfuhr, reichert sich dieser Nährstoff im Boden an. Dies ist in der Bilanz an einem positiven Bilanzsaldo zu erkennen.

In diesem Versuch sind die P-Düngung als einziger P-Zugang und die P-Entzüge der Pflanzen als P-Abgänge zu betrachten. In Tabelle 5-3 sind die Ergebnisse zusammengefaßt. Wie daraus entnommen werden kann, sind sowohl bei den Sand- als auch bei den Lößvarianten negative Bilanzsalden eingetreten. Bei den Lößvarianten trat dies bereits nach dem ersten Versuchsjahr, bei den Sand-Varianten erst nach dem zweiten Jahr ein. Das hat zur Folge, daß die Effizienzen bei den Sand-Varianten über 100 % und bei den Löß-Varianten sogar über 200 % liegen. Trotz dieser hohen Effizienzen konnte nur bei der Löß-Variante Anlage 1 eine Verringerung der P-CAL-Gehalte (Abb. 4-21) festgestellt werden. Die P-Entzüge sind im dritten Jahr sehr gering, was auf eine Unterversorgung hindeuten würde.

Tabelle 5-3: P-Bilanz [mg P/100 g Boden] sowie Effizienz [%] von Phosphat in Abhängigkeit der Substrate und Varianten
Mittelwert der 2 Anlagen

Substrat	Variante	P-Zufluß	P-Abfluß				P-Saldo ¹	P-Effizienz ²
			Entzug im 1. Jahr ¹	Entzug im 2. Jahr ¹	Entzug im 3. Jahr ¹	Entzug im 1. - 3. Jahr		
	1	-	3,38	1,28	1,55	6,21	-6,21	
	2	4,85	4,38	1,96	1,72	8,06	-3,21	166,18
	3	4,85	3,87	1,91	1,84	7,62	-2,77	157,10
	4	4,85	3,15	2,15	1,61	6,90	-2,06	142,43
Sand	5	4,85	3,65	2,15	1,72	7,51	-2,66	154,96
	6	4,85	3,79	2,01	1,74	7,54	-2,69	155,51
	7	4,85	3,48	2,11	1,65	7,24	-2,39	149,34
	8	4,85	4,34	1,84	1,89	8,07	-3,22	166,45
	9	4,85	3,70	1,78	1,61	7,09	-2,24	146,22
	2-9	4,85	3,79	1,99	1,72	7,50	-2,65	154,77
	1	-	5,60	2,51	1,32	9,43	-9,43	
	2	4,85	6,79	2,67	1,71	11,17	-6,32	230,41
	3	4,85	6,59	2,51	1,87	10,96	-6,12	226,21
	4	4,85	6,31	2,90	1,72	10,92	-6,08	225,39
Löß	5	4,85	6,14	2,93	1,70	10,77	-5,93	222,25
	6	4,85	6,17	3,03	1,71	10,91	-6,06	225,06
	7	4,85	5,75	3,09	1,68	10,52	-5,67	217,05
	8	4,85	6,28	3,27	1,86	11,42	-6,57	235,61
	9	4,85	5,82	3,01	1,45	10,28	-5,43	211,99
	2-9	4,85	6,23	2,93	1,71	10,87	-6,02	224,25

¹ in mg P/100 g Boden

² Effizienz [%] = Nährstoffabfluß *100 / Nährstoffzugang

Die höchste Effizienz ist bei beiden Böden durch die Dünger-Variante Superphosphat (8) erzielt worden, dagegen weist die Variante Hyperphos (9) bei den Sand-Varianten die zweitniedrigste und bei den Löß-Varianten die niedrigste Effizienz auf. Die flüssige Klärschlamm-Variante mit Eisenfällung (2) erreicht auf dem Sandboden die gleiche und auf dem Lößboden eine um 5 % verringerte Effizienz als die Superphosphat-Variante (8). Die Varianten mit Eisenfällung und Kalkung erreichen innerhalb der Klärschlämme die niedrigsten Effizienzen, eine Ausnahme stellt die flüssige Löß-Variante (4) dar. Die Klärschlämme mit der Aluminatfällung (3 und 6) liegen stets im mittleren Bereich.

Keiner der drei flüssigen und drei stichfesten Klärschlämme weist höhere P-Ausnutzungsrationen und Effizienzen als die Dünger-Variante Superphosphat auf. Sie schnitten jedoch alle besser als die Dünger-Variante Hyperphos ab.

Der flüssige Klärschlamm mit Eisen als Fällungsmittel (2) zeigte eine sehr gute Düngewirkung im ersten Jahr. Der stichfeste Klärschlamm weist hingegen erst im zweiten Versuchsjahr deutliche Nachwirkungen der P-Düngung auf. Eine verzögerte Anfangswirkung von stichfesten Klärschlamm mit Eisenfällung fand auch WERNER [1975] in seinen Versuchen; ebenso eine bessere Wirkung von Klärschlamm auf sauren Böden als auf neutralen Böden. WERNER [1975] setzte in seinen Untersuchungen feuchte Schlämme ein, die jedoch bei 120 °C im Labor getrocknet wurden. Eine sehr schlechte Wirksamkeit von mit Eisensulfat ausgefällten Abwasserphosphaten wies BARAN [1985] nach, der mit fein vermahlenen Fällungsprodukten gearbeitet hat. Auch SUNTHEIM [1996] stellte bei Eisen-Schlämmen geringere P-Entzüge fest als durch die Kontrolle (ohne Düngung) entzogen wurden.

Bei den geprüften Klärschlämmen mit Aluminat als Fällungsmittel wirkte die flüssige Variante schlechter als die flüssige Klärschlamm-Variante mit Eisen als Fällungsmittel. Die stichfeste Variante erreichte in der Summe die gleiche P-Ausnutzung wie die entsprechende Variante mit Eisenfällung. Die Nachwirkung ist im zweiten Jahr angestiegen und nahm im dritten Jahr wieder ab. Auch hier sind in der Literatur unterschiedliche Angaben zur Bewertung von mit Aluminat gefällten Abwasserphosphaten zu finden. Die Angaben reichen von guter vergleichbarer Wirkung entsprechend den P-Handelsdüngern [WERNER, 1975] bis zu einer Unwirksamkeit [SUNTHEIM, 1996].

Durch eine Kalkung der mit Eisen als Fällungsmittel eingesetzten Klärschlämme konnten gegenüber den Varianten ohne Kalkung keine besseren Ergebnisse erzielt werden. Die Aufnahme war im ersten Jahr gering und stieg erst im zweiten Jahr an. Die P-Ausnutzungsrationen der Varianten ohne Kalkung konnten jedoch nicht erreicht werden. Dies fand auch WERNER [1975] in seinen Untersuchungen, dagegen war eine Kalkung bei BARAN [1986] der ungekalkten Variante überlegen. In einem Gefäßversuch der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft fanden KRAUSE UND ZORN [2000], daß die relativen P-Entzüge der gekalkten Varianten entsprechend groß wie die der ungekalkten Varianten waren. Ein weiteres Ergebnis der bisherigen Untersuchungen ist, daß die "biologische" Verfügbarkeit für die Pflanzenwurzeln alleine nicht durch die chemische Bestimmung der Löslichkeit vorhergesagt werden kann.

Daher verwundert es nicht, daß unterschiedliche Aussagen über die Düngewirkung der Phosphate in der Literatur vorliegen. Neben den Fällungsbedingungen in der Kläranlage ist auch der Boden kein statisches System, sondern es bestehen eine Vielzahl von Wechselwirkungen zwischen Boden-Dünger-Pflanze. Zudem wird mit dem Klärschlamm auch immer eine Vielzahl anderer Stoffe in den Boden eingebracht, die ihrerseits einen Einfluß auf die Bodenverhältnisse ausüben. Es wird z.B. durch kalkstabilisierte Schlämme der pH-Wert angehoben und damit Einfluß auf die Nährstoffverfügbarkeit ausgeübt. Zudem spielen Umwandlungsreaktionen der Phosphate im Boden eine erhebliche Rolle, wie durch die steigende Aufnahmerate im Laufe der Zeit ersichtlich ist. Diese werden jedoch nicht unabhängig von der gedüngten P-Form im Boden ablaufen.

Wenn die nachlassende Wirksamkeit der gedüngten Phosphate im Laufe der Zeit bei Superphosphat (8) und der flüssigen Klärschlamm-Variante mit dem Fällungsmittel Eisen (2) auf eine Alterung hinweist, ist ebenso der entgegengesetzte Effekt zu beobachten, dass es auch zu einem Anstieg der Verfügbarkeit mit der Zeit kommt. Dies ist bei der flüssigen Klärschlamm-Variante mit Eisenfällung und Kalkung (4), bei allen drei stichfesten Varianten (5, 6 und 7) und bei der Dünger-Variante Hyperphos (9) zu beobachten. Es laufen Umsetzungsprozesse im Boden ab, die die Phosphate in eine löslichere Form überführen. Das Ausgangsprodukt ist mithin schlechter verfügbar als die während des dreijährigen Vegetationsverlaufes im Boden entstandenen Umwandlungsprodukte. Neben der Sofortwirkung, die z.B. bei P-bedürftigen Pflanzen wie beim Mais von Bedeutung ist, kann dieser verzögerte Prozess für die mehrjährige Fruchfolge interessant sein, da eine zu schnelle

Alterung der Phosphate keine ausreichende Wirkung im zweiten und dritten Jahr nach der Düngung erzielen würde. So ist die Wirkung einer gleichmäßigen P-Ausnutzungsrate über die drei Jahre vergleichbar mit einer Depotdüngung.

Im geringen Umfang spielt auch die P-Festlegung von bodeneigenem Phosphat eine Rolle. Dies ist in der Abbildung 4-29 bei der Klärschlamm-Variante mit Eisenfällung und Kalkung (4) festzustellen, bei der die P-Ausnutzungsrate negativ ist. Eine Festlegung von bodeneigenem Phosphat bei dem Eisenfällungsprodukt hat BARAN [1985] ebenfalls ermittelt. Eisenhydroxide und -oxidhydrate sind zur spezifischen Adsorption von Phosphat fähig. So ist anzunehmen, daß die Festlegung durch eine spezifische Adsorption an der Oberfläche der Sesquioxide erfolgt ist.

In der dreijährigen Anbaufolge waren die P-Entzüge der Klärschlämme in den Kulturen Einjähriges Weidelgras und Getreide mit denen der Superphosphat-Variante ebenbürtig. Beim Mais, der im zweiten Jahr als Nachfrucht angebaut wurde, konnten bei den Sand-Varianten höhere P-Entzüge und bei den Löß-Varianten nur geringere P-Entzüge ermittelt werden. Zwischen den Klärschlamm-Varianten bestanden statistisch keine Unterschiede. Bei der P-Ausnutzung und Effizienz des eingesetzten Düngers ist festzustellen, daß der flüssige Klärschlamm mit Eisenfällung gleichwertig der Superphosphat-Variante ist. Bei allen anderen Klärschlamm-Varianten ist eine geringere P-Ausnutzung ermittelt worden. Bei den stichfesten Klärschlamm-Varianten ist die Hauptwirkung erst im zweiten Jahr nach der Klärschlammdüngung aufgetreten. Die mit Eisen gefällten und gekalkten Klärschlämme (4 und 7) erreichen eine geringe P-Ausnutzung und Effizienz, die jedoch stets über der Hyperphos-Variante liegt.

Aufgrund des unterschiedlichen P-Ausnutzungsraten der Pflanzen in den drei Jahren stellt sich die Frage, ob sich dieses Verhalten auch im Boden widerspiegelt. Hier ist besonders von Interesse, wie sich die Gehalte des pflanzenverfügaren Phosphates aber auch des Gesamt-Phosphates im Boden verändern.

5.3 Einfluß der Düngung auf den pflanzenverfügbaren Phosphat-Gehalt im Boden

3. Arbeitshypothese:

Die P-Fällung der Klärschlämme mit Eisen, Aluminium und Eisen mit Kalkung hat einen Einfluß auf den Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphat im Boden.

Bodenuntersuchungen stellen eine Möglichkeit dar, die Nährstoffbedürftigkeit des Pflanzenbestandes zu bestimmen. Dazu entwickelten sich im Laufe der Jahre unterschiedliche Methoden. Die P-CAL-Methode ist eine von ihnen. In einer Vielzahl von Arbeiten wird die Wirkung der P-Düngung auf den Einfluß des P-Gehaltes im Boden untersucht, die Zusammenhänge sind jedoch umstritten. BAUMGÄRTEL [1989] konnte nachweisen, daß auf niedersächsischen Lößböden im Bereich von 5-38 mg P(H₂O)/kg Boden (entspricht 2,2 - 16,6 mg P-CAL/100 g Boden) nur eine geringe Wirksamkeit auf die Erträge von Zuckerrüben und Getreide ausgeübt wird und keine Abhängigkeit zum Ertrag erkennbar ist. MUNK UND REX [1990] geben einen Wert von 20 mg P₂O₅/100 g Boden (= 8,7 mg P-CAL/100 g Boden) an, um das ökonomische Optimum zu erzielen. JUNGK et. al. [1993] weisen nach, daß der Höchstertrag bereits bei 11 mg P(H₂O)/kg Boden (= 4,8 mg P-CAL/100 g Boden) erzielt werden kann. In den Untersuchungen konnte er zeigen, daß die P(H₂O)-Werte bei den ungedüngten Varianten erst nach etwa vier Jahren mit vorher unklarem Verlauf abnahmen. Es kam zu konstanten Werten, wenn die P-Düngung etwa die P-Abfuhr ausglich und zu einer Steigerung, wenn die Abfuhr geringer war als die P-Düngung. Dabei waren jedoch die Entwicklungen über 15 Jahre nicht gleichmäßig, sondern es wechselten sich immer Phasen mit einem Anstieg und einer Verringerung der P-Gehalte ab, trotz gleichbleibender Versuchsdurchführung. Die Angabe "mg P(H₂O)/kg Boden" kann im Durchschnitt der Proben mit "mg P₂O₅(CAL, DL)/100 g Boden" verglichen werden [BAUMGÄRTEL, 1988 und MUNK UND REX, 1990].

In diesem Versuch liegen die P-Anfangsgehalte vom Sand und Löß (Tabelle 4-3) nicht unterhalb des von JUNGK et. al. [1993] empfohlenen Grenzwertes von 11 mg P(H₂O)/kg Boden (4,8 mg P-CAL/100 g Boden), jedoch noch in dem von BAUMGÄRTEL [1989] angegebenen Bereich von 5 - 38 mg P(H₂O)/kg Boden (2,2 - 16,6 P-CAL/100 g Boden). Demnach kann nicht mit einer großen Wirksamkeit der Düngung gerechnet werden. Jedoch kann davon ausgegangen werden, daß diese Richtwerte, die für das Freiland bestimmt wurden, nur eingeschränkt für Gefäßversuche gelten, da hier eine höhere Ausnutzung des P-Düngers durch

eine bessere Durchwurzelung des Bodens gegeben ist. Zudem sind im Gefäßversuch mehrere Ernten pro Jahr möglich, so dass dort die P-Entzüge höher ausfallen können als im Freiland.

Die Ergebnisse der Abbildungen 4-20 und 4-21 zeigen, daß die Reduzierung der P-CAL-Gehalte im ersten Jahr unabhängig von der Anlage, den Substraten und der P-Fällung am größten gewesen sind. In den folgenden Jahren kommt es dann überwiegend zu einer weiteren Reduzierung der P-CAL-Gehalte, aber es sind auch Steigerungen festzustellen, so dass z. T. wieder der Anfangsgehalt erreicht wird. Diese starke Reduzierung im ersten Jahr lässt sich auf die hohen P-Entzüge des Einjährigen Weidelgrases von 3,2 - 6,8 mg P/100 g Boden zurückführen.

Bei den Kontrollen der Sand-Varianten sind die P-CAL-Gehalte um den Gehalt des P-Entzuges gesunken. Da kein Düngerphosphat dem Einjährigen Weidelgras zur Verfügung stand, ist Bodenphosphat genutzt worden und dementsprechend ist der Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphat gesunken. Die Nachlieferung aus dem Gesamtvorrat ist gering. Bei der Superphosphat-Variante liegt der P-CAL-Gehalt nach dem ersten Jahr nur sehr geringfügig unterhalb des Ausgangsgehaltes. Es müßte durch die Düngung und den Boden genügend pflanzenlösliches Phosphat vorhanden gewesen sein, so dass sich der Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphat am Ende der ersten Vegetationszeit nicht geändert hat. Bei den Klärschlamm-Varianten besteht im Durchschnitt der Anlagen ein Unterschied zwischen den flüssigen und stichfesten Varianten. Während bei den flüssigen Varianten der gleiche Effekt eintritt, d.h. nur eine geringe Reduzierung im ersten Jahr zum Ausgangsgehalt besteht, kommt es bei den stichfesten Varianten sowie der Hyperphos-Variante zur Reduzierung der P-CAL-Gehalte.

In der zweiten und dritten Vegetationsperiode sind die P-Entzüge bei den Sand-Varianten gering gewesen und hatten nur einen geringen Einfluß auf den P-CAL-Gehalt. Im Durchschnitt der Anlagen ist es nur bei den stichfesten Klärschlamm-Varianten zu einem Anstieg der P-CAL-Gehalte gekommen, der bei der Variante mit dem Fällungsmittel Eisen (2) am größten ausfiel. Betrachtet man die P-Ausnutzungsraten, so stiegen diese bei den stichfesten Varianten erst im zweiten Jahr auf Werte zwischen 10 - 15 % an. Diese Nachwirkung hat dazu geführt, daß erst im zweiten Jahr durch Umwandlungsprozesse im Boden pflanzenverfügbares Phosphat vorhanden gewesen ist, wodurch der Gehalt an P-CAL ansteigen konnte.

Bei den Löß-Varianten ist ebenfalls im ersten Jahr die größte Reduzierung der P-CAL-Gehalte festzustellen. Diese fällt wie auch bei den Sand-Varianten bei den Kontrollen beider Anlagen am größten aus. Eine vergleichbare Reduzierung ist nur bei den schwerlöslichen Hyperphos-Varianten (9) festzustellen. Dort liegt der Dünger nicht in pflanzenverfügbarer Form vor, so dass im gleichen Maße wie bei der Kontrolle leicht verfügbares Bodenphosphat genutzt wurde. Da die Ausgangsgehalte der beiden Löß-Anlagen unterschiedlich hoch waren, ergeben sich in der zweiten Anlage höhere P-CAL-Gehalte, die aber im ersten Jahr mit der Abstufung der ersten Anlage übereinstimmen. Im zweiten Jahr kommt es zu einer weiteren Reduzierung der P-CAL-Gehalte, erst im dritten Jahr erfolgt eine unterschiedliche Entwicklung zwischen den beiden Anlagen. Während die P-Gehalte der ersten Anlage weiter absinken (um 2 mg P-CAL/100 g Boden) bzw. konstant bleiben, steigen sie in der zweiten Anlage auf 6 - 7,5 mg P-CAL/100 g Boden an. Dies kann zum einen durch die Absenkung der pH-Werte von 7,9 im zweiten Jahr auf 7,4 im dritten Jahr verursacht worden sein, da die P-Löslichkeit mit sinkendem pH-Wert ansteigt. Ein weiterer Grund könnte der nicht erfolgte Maisanbau nach Hafer in der zweiten Anlage sein, so dass pflanzenverfügbares Phosphat im Boden verblieb. Da jedoch die P-Entzüge vom Mais nach Hafer bei den Sand-Varianten 0,7 - 0,8 mg P/100 g Boden und bei den Löß-Varianten ca. 0,6 mg P/100 g Boden betragen haben, kann dies nur einen Teil des Anstieges erklären.

Die Änderungen des pflanzenverfügbaren Phosphates sind bei den Löß-Varianten größer als bei den Sand-Varianten. Bei den Sand-Varianten ist die Reduzierung der P-CAL-Gehalte der flüssigen Klärschlamm-Varianten im Durchschnitt der drei Jahre nicht so ausgeprägt (0,5 mg P/100 g Boden) wie bei den festen Klärschlamm-Varianten, deren Gehalt sich um durchschnittlich 1,2 mg P/100 g Boden zum Anfangsgehalt verringerte. Eine parallele Entwicklung zwischen den flüssigen Klärschlamm-Varianten und der Superphosphat-Variante sowie den stichfesten Klärschlamm-Varianten und der Hyperphos-Variante zeichnet sich bei den Sand-Varianten ab. Bei den Löß-Varianten bestehen zwischen den flüssigen und stichfesten Klärschlamm-Varianten keine Unterschiede. Es ist nur im ersten Jahr ein Unterschied zwischen den Klärschlamm-Varianten und der Superphosphat-Variante erkennbar, in den beiden folgenden Jahren liegen die Gehalte auf einem Niveau.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß bei den Sand-Varianten zwischen den flüssigen und stichfesten Klärschlamm-Varianten Unterschiede bestehen, jedoch nicht bei den

Löß-Varianten. Zwischen den flüssigen bzw. stichfesten Klärschlamm-Varianten konnte der Einfluß des Fällungsmittels auf die P-CAL-Gehalte nicht nachgewiesen werden.

5.4 Einfluß der Düngung auf die Gesamt-P-Gehalte

4. Arbeitshypothese:

Die Entwicklung der P-Gesamt-Gehalte der Klärschlamm-Varianten ist mit der Mineraldüngung vergleichbar.

Durch den P-Entzug der Pflanzen ist der Gesamt-P-Gehalt innerhalb der dreijährigen Fruchfolge im Boden gesunken. Der Gesamt-P-Gehalt (siehe Abbildung 4-22) ist im ersten Jahr aufgrund der hohen P-Entzüge des Einjährigen Weidelgrases am stärksten abgefallen. In den beiden folgenden Jahren erreichen die P-Entzüge des Getreides wesentlich geringere Werte, wodurch auch der Gesamt-P-Gehalt im Boden sich nur geringfügig ändert. In Abbildung 4-23 sind die Gesamt-P-Gehalte der drei Jahre dargestellt. Das Ergebnis zeigt, daß die Gesamt-P-Gehalte der Kontrolle aufgrund der fehlenden Düngung am niedrigsten liegen. Bei der Variante stichfester Klärschlamm mit dem Fällungsmittel Eisen und Kalkung (7) ist die Differenz zwischen dem Anfangsgehalt und dem Endgehalt nach drei Jahren Versuchsdauer mit 6 mg P/100 g Boden am größten. Bei den anderen Klärschlamm-Varianten liegen die Differenzen zwischen 4 - 4,7 mg P/100 g Boden. Die Kontrollen haben 16 % des ihnen zur Verfügung stehenden Gesamt-P-Gehaltes entzogen. Auch bei den anderen Varianten fällt der Wert mit 17 % nicht höher aus.

Im Hinblick auf die P-Bilanz und P-Gehaltsänderungen (Tabelle 5-4) innerhalb des dreijährigen Versuches, die in Abhängigkeit der Substrate und Varianten zusammengestellt wurden, interessiert die Frage, welche Gesamt-P-Gehalte im Boden zu erreichen gewesen wären und inwieweit die Gehalte durch die Analysen bestätigt worden sind. Bei den beiden Kontrollen liegen die Anfangsgehalte, die analytisch bestimmt wurden, bei 38,4 mg P/100 g Boden (Sand) bzw. 59,6 mg P/100 g Boden (Löß). Die Varianten 2 - 9 erhielten eine Düngung von 4,9 mg P/100 g Boden, so dass die Gehalte im Boden zu Beginn des Versuches bei 43,3 mg P/100 g Boden bzw. 64,5 mg P/100 g Boden liegen. Damit beträgt der Anteil der Düngung am Gesamt-P-Gehalt ca. 11 % beim Sandboden und ca. 7,5 % beim Lößboden. Die P-Entzüge der drei Jahre werden von dem Bodengehalt substrahiert, so dass ein theoretisch

Tabelle 5-4: P-Bilanz [mg P/100 g Boden] und P-Gehaltsänderungen in Abhängigkeit der Substrate und Varianten
Mittelwert der 2 Anlagen (alle Angaben in mg P/100 g Boden)

Substrat	Varianten	P-Gehalt zu Beginn der Fruchtfolge	P-Entzug Summe der 3 Jahre	P-Gehalt am Ende der Fruchtfolge berechnet	P-Gehalt am Ende der Fruchtfolge gefunden	P-Gehaltsänderung berechnet	P-Gehaltsänderung gefunden
Sand	1	38,42	6,21	32,20	33,72	-6,21	-4,70
	2	43,26	8,06	35,21	37,05	-3,21	-1,37
	3	43,26	7,62	35,65	36,43	-2,77	-1,99
	4	43,26	6,90	36,36	37,52	-2,06	-0,90
	5	43,26	7,51	35,75	36,73	-2,66	-1,69
	6	43,26	7,54	35,73	35,73	-2,69	-2,68
	7	43,26	7,24	36,03	34,54	-2,39	-3,88
	8	43,26	8,07	35,20	36,38	-3,22	-2,04
	9	43,26	7,09	36,18	37,79	-2,24	-0,63
Löß	2.-9.	43,26	7,50	35,76	36,52	-2,65	-1,90
	1	59,56	9,43	50,13	49,25	-9,43	-10,31
	2	64,41	11,17	53,24	52,85	-6,32	-6,71
	3	64,41	10,96	53,44	53,42	-6,12	-6,13
	4	64,41	10,92	53,48	51,91	-6,08	-7,65
	5	64,41	10,77	53,63	51,88	-5,93	-7,68
	6	64,41	10,91	53,50	53,10	-6,06	-6,46
	7	64,41	10,52	53,89	51,26	-5,67	-8,30
	8	64,41	11,42	52,99	52,98	-6,57	-6,58
	9	64,41	10,28	54,13	53,92	-5,43	-5,63
	2.-9.	64,41	10,87	53,54	52,67	-6,02	-6,89

errechneter P-Gehalt entsteht. Diesem wird der am Ende der drei Versuchsjahre ermittelte Gesamt-P-Gehalt gegenübergestellt. Die Differenzen zwischen den berechneten und analysierten Nährstoffgehalten im Boden schwanken von -1,8 bis 2,6 mg P/100 g Boden. Im Durchschnitt liegen die Unterschiede bei den Sand-Varianten bei -0,8 mg P/100 g Boden und bei den Löß-Varianten bei 0,9 mg P/100 g Boden. Dabei sind bei den Sand-Varianten überwiegend negative Salden, d.h. der analysierte Gesamt-P-Gehalt liegt oberhalb des berechneten Gesamt-P-Gehaltes und bei den Löß-Varianten nur positive Salden aufgetreten. Da die Anfangsgehalte ebenfalls analytisch bestimmt sind, muß eine gewisse Schwankungsbreite der Werte berücksichtigt werden. Die Übereinstimmung ist damit sehr gut (durchschnittliche Abweichung < 2,5 %).

Um Rückschlüsse auf die relative Verfügbarkeit des Phosphors zu erhalten, werden die CAL-P-Gehalte zu den Gesamt-P-Gehalten in Beziehung gesetzt (Abb. 5-2 und 5-3) Bei einem direkten Vergleich beider Böden wird deutlich, daß beim Lößboden der Anfangsgehalt etwas niedriger ist, über die dreijährige Fruchtfolge jedoch eine stärkere Abnahme als bei den Sandböden zu beobachten ist.

Zwischen den Varianten des Sandbodens verhalten sich die flüssigen Klärschlamm entsprechend der Dünger-Variante Superphosphat. Die relative P-Verfügbarkeit nimmt im ersten Jahr stärker ab und steigt dann leicht an, ohne jedoch das Ausgangsniveau von 15 % zu erreichen. Innerhalb der drei flüssigen Klärschlamm-Varianten liegt die relative P-Verfügbarkeit im ersten und dritten Jahr der Variante mit Eisenfällung und Kalkung (4) signifikant oberhalb der Variante mit nur Eisenfällung (2). Die drei stichfesten Klärschlamm-Varianten (5 - 7), die Dünger-Variante Hyperphos (9), sowie die Kontrolle verhalten sich ebenfalls recht einheitlich. Die relative P-Verfügbarkeit ist im ersten Jahr um ca. 4 % gesunken und ist in den beiden folgenden Jahren leicht angestiegen. Eine Ausnahme stellt die Variante mit Eisenfällung (5) dar. Sie fällt zwar zunächst im ersten Jahr auch um 3 % ab, anschließend kommt es jedoch zu einer Steigerung, so dass im dritten Jahr eine höhere relative P-Verfügbarkeit vorliegt als zu Beginn der Untersuchungen.

Beim zweiten Substrat Löß ist der Verlauf der Varianten einheitlicher. Die Kontrolle und die Dünger-Variante Hyperphos (9) liegen über den gesamten Versuchszeitraum im unteren Bereich. Zwischen den flüssigen und stichfesten Klärschlamm-Varianten kann nicht eine klare Abgrenzung wie bei den Sand-Varianten gezogen werden. Eine ähnliche

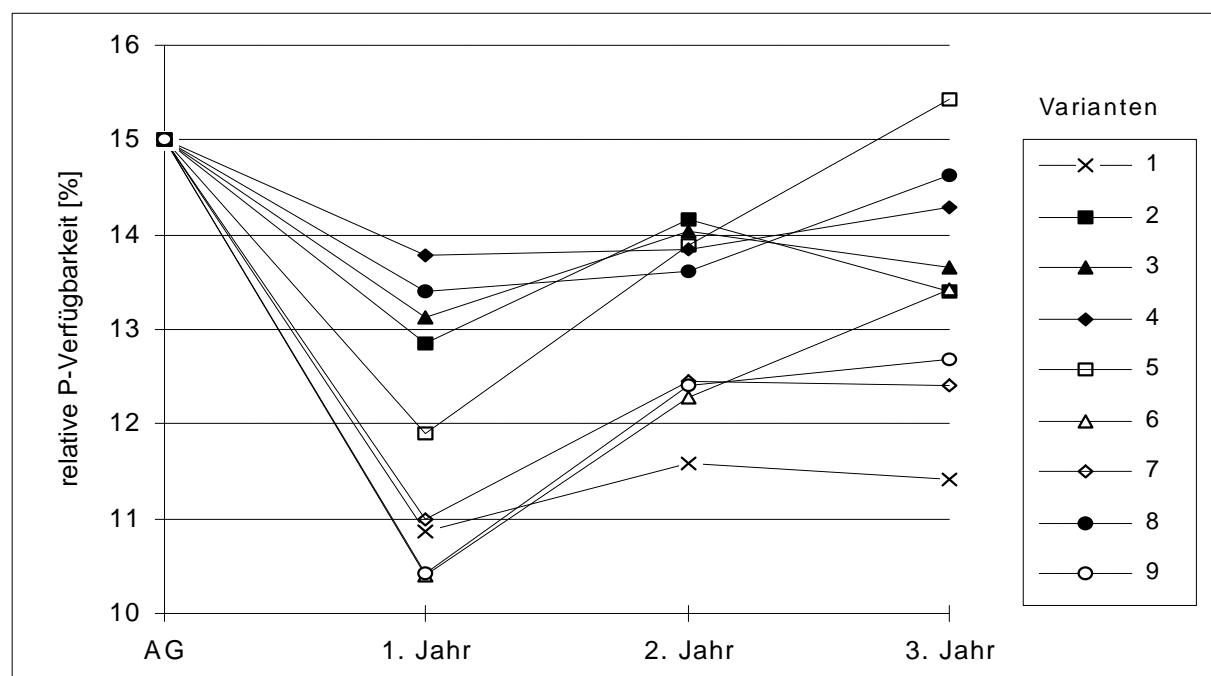


Abb. 5-2: Relative P-Verfügbarkeit des Sandbodens in Abhängigkeit der Jahre und Varianten, Mittelwert der Anlagen und Wiederholungen
GD (5%) Relative Verfügbarkeit Substrat/Jahr/Variante = 0,8

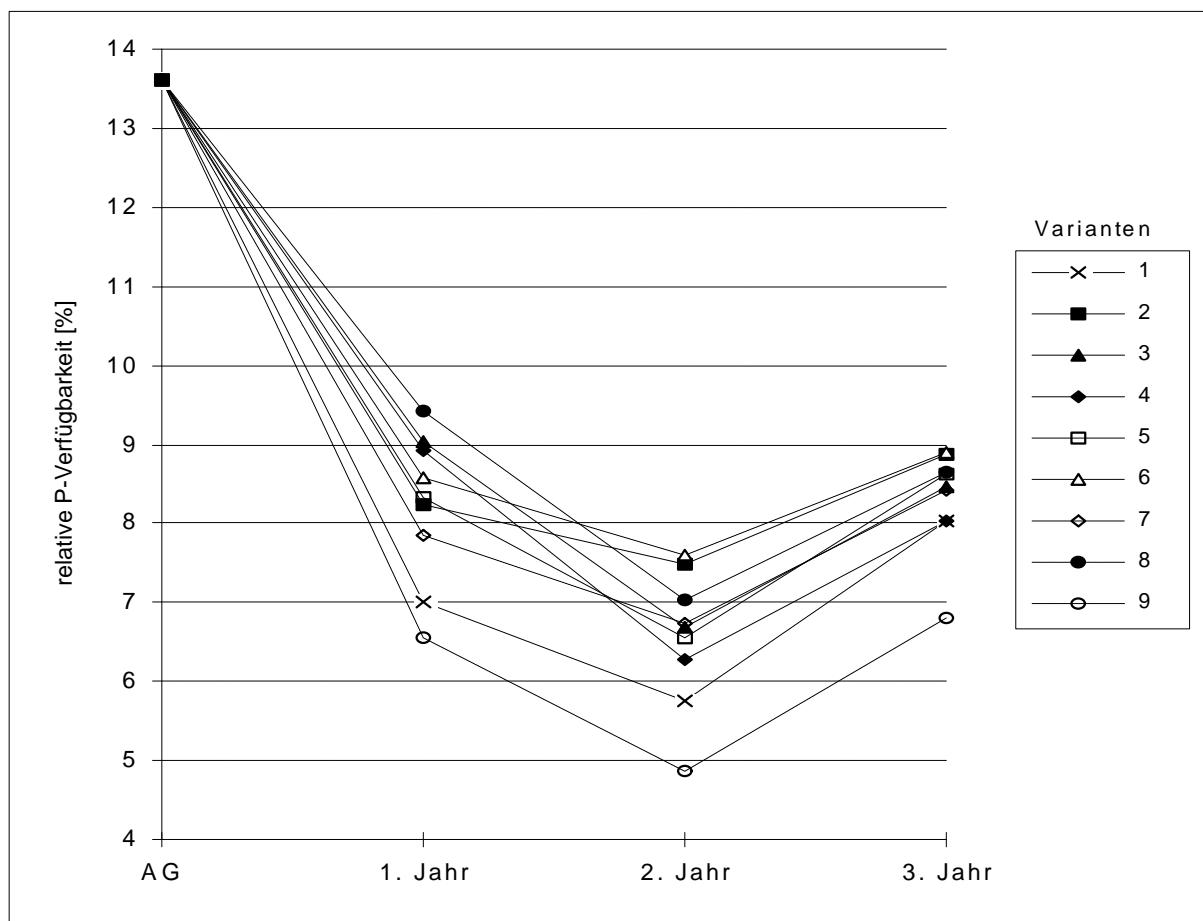


Abb. 5-3: Relative P-Verfügbarkeit des Lößbodens in Abhängigkeit der Jahre und Varianten, Mittelwert der Anlagen und Wiederholungen
GD (5%) Relative Verfügbarkeit Substrat/Jahr/Variante = 0,8

P-Sofortwirkung wie für Mineraldünger weisen auch DIEZ UND WEIGELT, 1980 in einer neunjährigen Fruchfolge nach. Auf sauren Böden fiel die Verfügbarkeit geringfügig höher aus als auf neutralen bis alkalischen Böden.

Die Entwicklungen der Gesamt-P-Gehalte der flüssigen Klärschlamm-Varianten sind mit der Mineraldüngung vergleichbar. Bei den stichfesten Klärschlämmen lag eine gleichmäßigere Abnahme der Gesamt-P-Gehalte vor. Die Veränderungen der Gesamt-P-Boden gehalte konnte mit Hilfe der P-Entzüge durch die Pflanzen sehr gut nachvollzogen werden. Für die Klärschlämme ergibt sich eine vergleichbare P-Verfügbarkeit wie für Superphosphat, wobei dies beim Sand nur für die flüssigen Klärschlamm-Varianten gilt.

5.5 Einfluß der P-Fällung auf die Fraktionierung des Bodens

5. Arbeitshypothese:

Die eisen- oder aluminiumgefällten Klärschlämme wirken sich im Boden nur auf die Eisen/Aluminium-Phosphat-Fraktion aus, dagegen haben die gekalkten und eisengefällten Klärschlämme noch zusätzlich einen Einfluß auf die Calcium-Phosphat-Fraktion im Boden.

Der Einfluß der bei der P-Fällung unterschiedlich eingesetzten Fällungsmittel auf die Fraktionen im Boden soll in diesem Kapitel diskutiert werden. Alle Varianten außer der Kontrolle sind zu Beginn mit 4,9 mg P/100 g Boden gedüngt worden. Trotz der P-Fällung mit Eisen oder Aluminium besteht bei allen flüssigen und stichfesten Klärschlämmen der Hauptanteil aus der Ca-P-Fraktion (siehe Tabelle 3-2). Superphosphat enthält hauptsächlich $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ und Hyperphos besteht aus Apatit und nur zu einem geringen Teil aus Al- und Fe-Phosphaten [MENGEL, 1984].

Bei den Sand-Varianten hat sich die Fe/Al-P-Fraktion (Abbildung 4-25) durch die Zufuhr der 1,6 mg Fe/Al-P/100 g Boden bei den drei flüssigen Klärschlämmen erhöht. Der Anstieg variiert von 0,3 mg Fe/Al-P/100 g Boden bei Variante (4) mit Aluminiumfällung bis 1,3 mg Fe/Al-P/100 g Boden bei der Variante mit Eisenfällung (2). Bei den zwei stichfesten Klärschlamm-Varianten mit Aluminatfällung (6) und Eisenfällung und Kalkung (7) konnte in der ersten Vegetationsperiode kein Anstieg beobachtet werden, sondern es kam zu einer Reduzierung um 1,2 bzw. 1,9 mg Fe/Al-P/100 g Boden.

Bei den Löß-Varianten ist dieser gleiche Effekt jedoch nicht vorhanden. Zu dem Anfangsgehalt von 28,4 mg Fe/Al-P/100 g Boden kommt bei den Klärschlamm-Varianten 1,6 mg Fe/Al-P/100 g Boden hinzu. Bei den Varianten Kontrolle (1), der flüssigen Klärschlamm-Variante mit Eisenfällung (2) und der Dünger-Variante Hyperphos (9) kommt es zu einer stärkeren Reduzierung der Fe/Al-P-Gehalte um ca. 8 mg Fe/Al-P/100 g Boden. Bei den anderen Varianten liegt der Fe/Al-P-Gehalt am Ende der ersten Vegetationsperiode bei 23,3 - 25,9 mg Fe/Al-P/100 g Boden. Bei den stichfesten Klärschlamm-Varianten war der Fe/Al-P-Entzug nicht so groß wie bei den flüssigen Klärschlamm-Varianten.

MACHOLD, 1963 [in: MENGEL, 1984] zeigte wiederholt mit Hilfe von markiertem Phosphat (^{32}P), daß Düngerphosphat zunächst in der Al-Phosphatfraktion eintritt. Jedoch wird

es aus dieser Fraktion auch als erstes dem Boden durch die Pflanzen entzogen [HAGEMANN UND MÜLLER, 1976 in: MENGEL, 1984]. Da keine Bodenanalysen nach der Ausbringung des Düngers (Klärschlamm und Mineraldünger) durchgeführt wurden, kann nicht genau geklärt werden, ob das Phosphat des Düngers zunächst in die Al-Fraktion übergetreten ist. Durch die Zahlen lässt sich nur darlegen, wie die Verhältnisse nach dem ersten Versuchsjahr ausgesehen haben.

Bei den flüssigen Klärschlamm-Varianten auf Sand ist es im ersten Jahr zu einem Anstieg von durchschnittlich 2,6 mg Fe/Al-P/100 g Boden gekommen. Die Fe/Al-P-Fraktion des Klärschlammes betrug 1,6 mg Fe/Al-P/100 g Boden, so dass es noch zu einer zusätzlichen Verlagerung von 1 mg Fe/Al-P/100 g Boden aus anderen Fraktionen gekommen sein muß. Diese müßte noch weiter zunehmen, wenn davon ausgegangen werden kann, daß nach HAGEMANN UND MÜLLER [1976 in: MENGEL, 1984] zunächst nur Al-P von den Pflanzen aufgenommen wurde. Bei den stichfesten Klärschlamm-Varianten verringerte sich im ersten Jahr der Fe/Al-P-Gehalt um 2,6 - 3,5 mg Fe/Al-P/100 g Boden. Würde auch hier ebenfalls angenommen, daß die Fe/Al-P-Gehalte in Ertrag umgesetzt worden sind, würde das Fe/Al-P ca. 71 - 100 % der P-Entzüge betragen. Die Ergebnisse relativieren sich, da in den Untersuchungen stets die Konzentrationen von Fe/Al-P gemessen wurden und nicht nur die Gehalte von Al-P.

Bei den Löß-Varianten ist es im ersten Jahr bei allen Varianten zu einer Abnahme der Fe/Al-P-Gehalte gekommen. Unter der Annahme von HAGEMANN UND MÜLLER [1976 in: MENGEL, 1984], daß zunächst von der Pflanze Fe/AL-P aufgenommen wird, sind 67 - 100 % der P-Entzüge als Fe/Al-P entzogen worden. Bei den beiden flüssigen Klärschlämmen mit Eisen- (2) bzw. Aluminat- (3) fällung, bei denen im ersten Jahr die Reduzierung des Fe/Al-P-Gehaltes größer als die der P-Entzüge war, erfolgte eine Verlagerung in eine andere Fraktion. Diese könnte die Org. P-Fraktion sein, da deren Gehalte insbesondere bei der ersten Anlage angestiegen sind.

Ein weiterer Grund für die unterschiedliche Entwicklung der Fe/Al-P-Fraktion könnte im pH-Wert liegen. Der pH-Wert spielt im Boden eine wesentliche Rolle dafür, in welcher Fraktion das Phosphat im Boden vorkommt. Fe/AL-Phosphate liegen fast ausschließlich in stark sauren Böden vor, Ca-Phosphate in vorwiegend alkalischen Böden. Dazwischen sind beide Formen in unterschiedlichen Abstufungen anzutreffen. Je höher der pH-Wert, desto

stärker verschiebt sich das Gleichgewicht zum Ca-Phosphat [BAREKZAI, 1984]. Von daher ist es zu erklären, daß zu Beginn der Untersuchungen im Sandboden mit einem pH-Wert von 5,7 ein höherer Anteil an Fe/AL-P (65 %) vorgelegen hat als im Lößboden mit einem pH-Wert > 6 (52 bzw. 44 %). Auch zwischen den beiden Lößböden besteht der Unterschied, daß der Lößboden der ersten Anlage mit einem pH-Wert von 6,4 einen höheren Fe/Al-P-Gehalt aufweist als der Lößlehm der zweiten Anlage mit einem pH-Wert von 6,7. Entsprechend verhalten sich die Ca-P-Gehalte (Abbildung 5-26), beim Sandboden liegt der geringste Gehalt vor, beim Lößboden der zweiten Anlage der höchste Ca-P-Gehalt.

Die pH-Werte insbesondere der zweiten Anlage steigen innerhalb der drei Jahre an, wodurch die Entwicklung der Fe/Al-P- und Ca-P-Gehalte erklärt werden kann. Die Fe/Al-P-Gehalte sinken im Laufe der drei Vegetationsperioden und die Ca-P-Konzentrationen steigen geringfügig an. Die Entwicklung ist bei den Löß-Varianten ausgeprägter, da der Anstieg des pH-Wertes im Durchschnitt der beiden Anlagen größer ist (Änderung des pH-Wertes: Sand Anlage 1: 0,4; Anlage 2: 0,1; Löß Anlage 1: 0,3 und Anlage 2: 1,0). Der Anstieg der Ca-P-Fraktion bei der Hyperphos-Variante ist nicht weiter verwunderlich, da hier feingemahlener Apatit d.h. mit einem Ca-Phosphat gedüngt wurde. Nur in der zweiten Anlage bei der Löß-Variante wurde dadurch auch der pH-Wert signifikant zu allen anderen Varianten im ersten Jahr angehoben.

Die Klärschlämme bestehen zu 30-70 % aus organischer Substanz (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL, 1984). Bei den hier eingesetzten Klärschlämmen liegt der Gehalt an organischer Substanz in der Trockenmasse zwischen 30 - 50 %, dies entspricht ca. 10 g organischer Substanz/Gefäß und ca. 110 mg/100 g Boden. Der Gehalt an der org. P-Fraktion (Tabelle 3-3) beträgt ca. 0,3 mg Org. P/100 g Boden. Dies erhöht bei den mit Klärschlamm gedüngten Böden den Ausgangsgehalt des Sandbodens um ca. 6,3 %, den Lößboden der Anlage 1 um 4,9 % und der Anlage 2 um 2,5 %. Nach MUNK [1971/72] bleibt die Org. P-Fraktion auf gleichem Niveau, soweit nicht frische organische Substanz, die schnell abbaubar ist, zugefügt wird. Durch die Düngung mit Klärschlamm wurde den Böden jedoch leicht abbaubares organisches Material zugefügt. Bei den Sand-Varianten ist es im Durchschnitt der Anlagen und Varianten zu einem Anstieg der Organischen P-Fraktion im ersten Jahr gekommen. Dieser Anstieg ist jedoch auch bei der Kontrolle und den mineralisch gedüngten Varianten zu verzeichnen, so dass es durch die Klärschlammdüngung nicht zufriedenstellend erklärt werden kann. Bei dem Löß-Boden der ersten Anlage ist der Anstieg

innerhalb der drei Jahre noch größer und nimmt um ca. das zweieinhalbfache zu. Hier kann es zu einer starken Vermehrung der Bodenmikroorganismen gekommen sein, die innerhalb des zweiten Jahres wieder abgestorben sind. Bei dem Löß-Boden der zweiten Anlage lag zu Beginn bereits ein hoher Gehalt an Org. P im Boden vor, so dass keine weitere Mikroben-Biomasse mehr aufgebaut und später umgesetzt wurde.

Zusammenfassend lässt sich die Arbeitshypothese nicht bestätigen. Nur bei den flüssigen Klärschlämmen der Sand-Varianten kommt es zu einem Anstieg der Fe/Al-P-Gehalte aber ein genereller Anstieg bei beiden Substraten und bei dem Einsatz von flüssigem oder stichfestem Klärschlamm findet nicht statt. Ebenso konnte nicht nachgewiesen werden, daß die Ca-P-Fraktion bei den gekalkten Varianten ansteigt, sondern alle Klärschlamm-Varianten verhalten sich gleich. Die Klärschlamm-Fraktions-Anteile sind wahrscheinlich im Vergleich zu den Fraktionen des Bodens zu gering gewesen, um die vermuteten Effekte sichtbar machen zu können.

6 Ausblick und abschließende Betrachtung

Die landwirtschaftliche Nutzung von Klärschlamm wird bereits seit Jahrhunderten praktiziert. Mit zunehmender Verstädterung wurde aus dem natürlichen Dünger ein Abfallstoff. Die umweltverträgliche und gleichzeitig kostengünstige Entsorgung von Klärschlamm ist für viele Kommunen zur großen Herausforderung geworden. Eine regelmäßige Anpassung der Entsorgungspraxis an die gesetzlichen Bestimmungen (Einführung der Klärschlammverordnung 1982, Novellierung 1992) führte zur steten Überarbeitung der Klärschlamm-Konzepte.

Eine Phase der Neubewertung der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung ist nicht zuletzt durch die jüngsten Ereignisse in der Landwirtschaft (BSE, MKS) hervorgerufen worden. Viele Bereiche der Landwirtschaft sind dabei in die Kritik geraten u.a. auch die derzeitige Praxis der landwirtschaftlichen Verwertung von Abfallstoffen. Die jetzige Neubewertung wird sich an den Anforderungen des Umwelt- und Verbraucherschutzes orientieren, die aufgrund der Ereignisse in den Vordergrund gerückt worden sind. Neue Positionen einzelner an der Diskussion Beteiligten sollen im folgenden kurz skizziert werden.

Umweltministerin von Nordrhein-Westfalen Bärbel Höhn spricht sich für einen differenzierten Weg der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung aus. Gering belastete

Klärschlämme aus ländlichen Regionen sollten wie bisher landwirtschaftlich verwertet werden, jedoch sollte der Klärschlamm aus urbanen Gebieten, der meist auch stärker belastet ist, in Kraftwerken mitverbrannt werden [VORHOLZ, 2001]. Wie unterschiedlich belastet auch Klärschlamm aus ländlichen Raum sein können, wird an den in dieser Arbeit untersuchten Klärschlämmen deutlich. Alle Klärschlämme stammen aus dem Kreis Soest, aber die Bleiwerte weisen eine Streuung von < 5 bis 269 mg/kg TS auf. Während in der einen Kläranlage ca. 1/10 des Grenzwertes für Kupfer erreicht wird, ist in der anderen Kläranlage 9/10 des Grenzwertes ausgeschöpft. Dies zeigt, dass nicht nur die Standortfrage der Kläranlage eine Rolle bei der Bewertung von Klärschlämmen für die landwirtschaftliche Verwertung spielt, sondern auch die Verunreinigung des eingeleiteten Abwassers in die Kläranlage und deren Klärtechnik.

Die Europäische Union begrüßt die Transparenz in der Bundesrepublik Deutschland, die bei der Verwertung von Klärschlämmen eine Minimierung der schädlichen Auswirkungen vorsieht. Gleichzeitig forciert sie ein Qualitätssicherungssystem auf freiwilliger Basis, um die Verwertung noch sicherer zu gestalten [ATV-DWK, 2001]. Diese sieht u.a. eine Verschärfung der Grenzwerte für organische Schadstoffe vor. Es wird auf europäischer Ebene auch darüber diskutiert, ob eine Ausweitung der Einsatzgebiete von Klärschlamm erfolgen soll, wie z.B. auf Weiden und in Forsten [ASMUSSEN, 2001]. Dies ist nach der deutschen Klärschlammverordnung nicht erlaubt und kann aus hygienischen Gründen auch nicht empfohlen werden.

Auch der ATV-DWK empfiehlt ein freiwilliges, privates Gütesicherungssystem, damit die Transparenz der Qualität der Klärschlammverwertung erhöht und sichergestellt werden kann. Kriterien im Sinne des vorsorgenden Verbraucherschutzes sollen darin stärker Berücksichtigung finden. [ATV-DWK, 2001]

Ebenfalls im März diesen Jahres hat der Freistaat Bayern einen Antrag an den deutschen Bundestag eingereicht, nachdem die Bundesregierung gebeten werden soll, die Ausbringung von Klärschlamm auf landwirtschaftlich genutzten Flächen gesetzlich zu verbieten und ebenfalls bei der Europäischen Union darauf hinzuwirken, dass die Richtlinie über den Schutz der Umwelt und insbesondere der Böden bei der Verwertung von Klärschlamm in der Landwirtschaft eine entsprechende Änderung erfährt. Der Antrag wird damit begründet, dass die Erforschung der organischen Schadstoffe noch nicht ausreichend durchgeführt worden

sind. Zudem würden Risiken für den Gewässer- und Bodenschutz bestehen, für die verbraucherorientierte Qualitätssicherung im Lebensmittelbereich und für den Schutz der Landwirtschaft durch wirtschaftlichen Schaden. Die Auswirkungen der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung wie die Kreislaufführung von Sekundärrohstoffdüngern und den damit verbundenen Schutz der Phosphatreserven werden positiv bewertet, jedoch seien die anderen Argumente gewichtiger zu beurteilen. [BUNDESRAT, 2001] Wenn es zu einer Umsetzung dieses Antrages kommen würde, würde die gesamte landwirtschaftliche Verwertung entfallen, in NRW müßten dann ca. 25 % des Klärschlammaufkommens thermisch verwertet werden. Wenn die Verwertung ebenfalls im Landschaftsbau damit untersagt wäre, würden zusätzlich noch 15 % thermisch entsorgt werden müssen.

Ein weiterer Aspekt in der Klärschlammdiskussion kommt vom Umweltbundesamt, das im Juni die 'Grundsätze und Maßnahmen für eine vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in landwirtschaftlich genutzte Böden' herausgegeben hat. Es wird die besondere Bedeutung der landwirtschaftlich genutzten Böden für die Produktion gesunder Nahrungsmittel hervorgehoben. Durch Bewirtschaftungsmaßnahmen (Aufbringung von Klärschlamm, Gülle, mineralische Düngemittel und Komposte) dürfe es zu keiner langfristigen Erhöhung der Schadstoffkonzentrationen in den Böden kommen. Dabei sind die Schadstoffe unabhängig vom aufgebrachten Material zu bewerten. Ein Hauptkriterium des Bundesbodenschutzgesetzes und der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung stelle der vorsorgende Bodenschutz dar, indem Maßnahmen getroffen werden müssen, die das Entstehen schädlicher Bodenveränderungen minimiert. Dies führt dazu, dass die Gehalte von Schadstoffen im Boden auch langfristig nicht ansteigen sollten, um die natürlichen Bodenfunktionen auf Dauer zu erhalten. Danach darf es zu keiner Verschlechterung der Standorte durch den irreversiblen Eintrag von Fremdstoffen kommen, die aus der Umwelt nicht mehr entfernt werden können. Demnach ist zu prüfen, inwieweit das eingebrachte Material die Standorteigenschaften des Bodens langfristig verändern. Zunächst erfolgte die Überprüfung für die Schwermetallgehalte (Tabelle 6-1).

Betrachtet man die Schwermetallgehalte von Klärschlamm mit den Vorsorgewerten für Metalle im Boden, so wird deutlich, dass das Ziel keine Verschlechterung des Standortes durch eine Klärschlammdüngung nicht erreicht werden kann. Die Gehalte Kupfer und Zink übersteigen um das Vierfache die Gehalte der Bodenart Ton. Bei den Schwermetallgehalten für Cadmium und Quecksilber werden die Vorsorgegehalte für die Bodenart Lehm und Schluff

Tabelle 6-1: Vergleich der Vorsorgewerte für Metalle in Böden (Anhang 2 Nr. 4 BBodSchV), durchschnittliche Schwermetallgehalte von Bioabfällen und Klärschlämmen, Grenzwerte für Metalle im Klärschlamm und Boden (AbfKläV) und Schwermetallgehalte der eingesetzten Klärschlämme aus dem Kreis Soest [UMWELTBUNDESAMT, 2001, UMWELT-RECHT, 1992, LIPPEVERBAND, 1995 und 1996, RUHRVERBAND 1995 und 1996, INGENIEURBÜRO SOWA 1995 und 1996]

Boden	Cadmium	Blei	Chrom	Kupfer	Quecksilber	Nickel	Zink
Bodenart Ton ¹	1,5	100	100	60	1	70	200
Bodenart Lehm/Schluff ¹	1	70	60	40	0,5	50	150
Bodenart Sand ¹	0,4	40	30	20	0,1	15	60
Klärschlämme ¹	1,4	63	46	274	1	23	809
Rindergülle ¹	0,28	7,7	7,3	44,5	0,06	5,9	270
Schweinegülle ¹	0,40	6,2	9,4	309	0,02	10,3	858
Geflügelkot ¹	0,25	7,2	4,4	52,6	0,02	8,1	336
Bioabfälle ¹	0,51	52,7	25,6	49,6	0,16	15,9	195
GW der EU-ÖkolandbauVO ¹	0,7	45	70	70	0,4	25	200
GW Klärschlamm n. AbfKläV ²	10/5	900	900	800	8	200	2500/2000
GW Boden n. AbfKläV ²	1,5/1	100	100	60	1	50	200/150
KS 2 ³	1,4-1,6	167-269	47-53	257-272	1,0-1,8	24-27	818-924
KS 4 ³	1,0	<5	63-70	77-81	0,5-0,6	27-31	490-500
KS 5 ³	1,6	209	32	244	1,1	29	861
KS 6 ³	2,3-4,4	94-100	39-66	720	0,74-1,3	30-31	710-740
KS 7 ³	<1	<5	61	77	<0,5	30	440

¹ UMWELTBUNDESAMT, 2001

² UMWELT-RECHT, 1992

³ LIPPEVERBAND, 1995 und 1996, RUHRVERBAND 1995 und 1996, INGENIEURBÜRO SOWA 1995 und 1996

zusätzlich überschritten und für die Bodenart Sand liegen alle Schwermetallgehalte zu hoch. Die Vorsorgewerte für die Bodenart Ton und die Bodenwerte der Klärschlammverordnung sind weitestgehend gleich. Eine Ausnahme stellt der Nickelwert dar, der in der BBodSchV um 20 mg /kg TM oberhalb des Bodenwertes der Klärschlammverordnung liegt.

Das Umweltbundesamt empfiehlt daher von der praktizierten Form der Klärschlammverwertung nach den gültigen Qualitätsanforderungen Abstand zu nehmen. Die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung ist auf die Ansprüche des vorsorgenden Bodenschutzes abzustimmen. Mit Hilfe von technischen Verfahren sollte aus dem Klärschlamm schadstoffarmes Phosphat zurückgewonnen werden, welches als Düngemittel wieder eingesetzt werden kann.

Dies ist sinnvoll, da die natürlichen Phosphatkörper, die weltweit begrenzt vorhanden sind, geschont werden müssen. [UMWELTBUNDESAMT, 2001]

Wenn sich diese neuen Maßnahmen und Grundsätze des Umweltbundesamtes durchsetzen würden, wäre die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm stark eingeschränkt. Die sechs im Versuch eingesetzten Klärschlämme (Tabelle 6-1) liegen oberhalb der Vorsorgewerte und hätten nicht landwirtschaftlich verwertet werden dürfen. Bei den Klärschlämmen 4 und 7 sind es jedoch nur die Schwermetalle Kupfer und Zink, wobei der Wert von Kupfer nur geringfügig oberhalb des Vorsorgewertes liegt. Aus pflanzenbaulicher Sicht stellen die beiden Schwermetalle jedoch nur ein geringes Problem dar, da Kupfer nur eine minimale Beweglichkeit in der Pflanze aufweist und überwiegend in der Wurzel lokalisiert ist [MENGEL, 1984]. Auch für Zink konnte nachgewiesen werden, daß es sich sehr stark in den Wurzeln anreichert, da vermutlich eine Wurzel-Sproß-Barriere den Transport in die übrigen Pflanzenteile unterbindet [GRÜN UND PUSCH, 1990].

Aber nicht nur die Klärschlämme könnten nicht mehr für Düngungsmaßnahmen eingesetzt werden, auch die Rinder- und Schweinegülle, sowie der Geflügelkot weisen zu hohe Zinkgehalte auf. Einzig alleine die Bioabfälle liegen geringfügig unterhalb der Vorsorgewerte für die Bodenart Ton und dürften auf anderen Böden ebenfalls nicht ausgebracht werden. Dies hätte für die Landwirtschaft weitreichende Folgen, da ein wesentlicher Baustein der Düngung stark eingeschränkt sein würde.

Die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm wäre stark eingeschränkt bzw. gänzlich verboten, wenn die Grundsätze und Maßnahmen des Bundesumweltamt bzw. der Antrag des Freistaates Bayerns umgesetzt werden würden. Klärschlamm würde dann zu nahezu 100 % thermisch verwertet werden müssen, mit allen Folgen für andere Umweltmedien, die durch eine Verbrennung hervorgerufen werden können. Wie die Arbeit jedoch gezeigt hat, kann Klärschlamm als P-Dünger mit einer vergleichbaren Wirkung wie Superphosphat eingesetzt werden. Auf dem Sandboden war im Durchschnitt der dreijährigen Fruchfolge die Ertragswirksamkeit der flüssigen und stichfesten Klärschlämme mit der des Superphosphates vergleichbar. Auf dem Lößboden zeigte sich dagegen eine Überlegenheit der flüssigen im Gegensatz zu den stichfesten Klärschlämmen. Eine zusätzliche Kalkwirkung der mit Eisen gefällten Schlämme konnte sowohl bei den Sand- als auch bei den Löß-Varianten zu keiner Ertragssteigerung führen. Die P-Ausnutzungsrate im besonderen von flüssigen

Klärschlämmen, in denen das Phosphat mit Eisen- oder Aluminiumsalzen gefällt wurde, weist eine entsprechende Wirkung wie der Mineraldünger Superphosphat auf. Und auch im Boden insbesondere im Sandboden verlief die relative P-Verfügbarkeit parallel zur Verfügbarkeit des Superphosphates.

Der Einsatz von flüssigem Klärschlamm hat zudem den Vorteil, daß Stickstoff zu einem hohen Anteil als Ammonium in der wässrigen Phase vorliegt. Da der Ammoniumstickstoff von den Pflanzen leicht aufgenommen werden kann und wie mineralischer Handelsdünger wirkt, kann die Nutzung von Klärschlamm ebenfalls Stickstoffdünger einsparen helfen.

Neben den rein pflanzenbaulichen Kriterien für eine umweltverträgliche landwirtschaftliche Klärschlammausbringung spielen jedoch noch andere Faktoren eine Rolle. In Abbildung 6-1 sind die Zusammenhänge der Kreislaufführung des Klärschlammes schematisch dargestellt. Für die Reinhaltung des Abwassers sind die Kläranlagen verantwortlich. In der Kläranlage ist

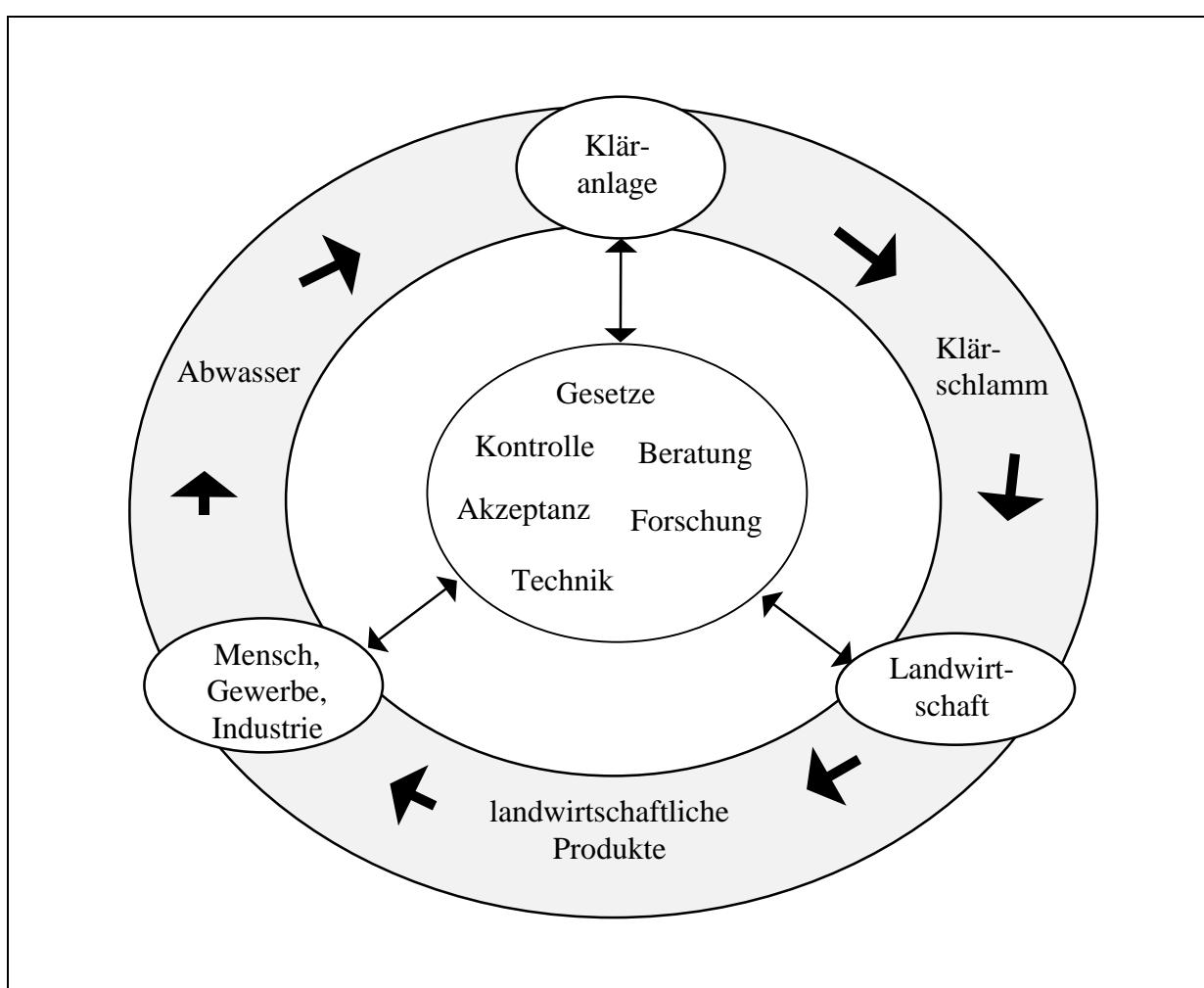


Abb. 6-1: Kreislaufführung von Nähr- und Schadstoffen, schematische Darstellung

dafür zu sorgen, daß der Klärschlamm mit möglichst gleichbleibender Qualität anfällt, um den Landwirten ein möglichst einheitliches Produkt anbieten zu können. Auf die Einhaltung der Vorgaben der Klärschlammverordnung, wie Beratung, Erstellung von Düngeplänen, regelmäßige Klärschlamm- und Bodenuntersuchungen, ist zu achten. Für eine langfristige Beurteilung der Böden sind Bodenkataster anzulegen. Da die Ausbringung von Klärschlamm nicht ganzjährig erfolgen kann, sondern überwiegend im Frühjahr und Herbst, sind geeignete Vorratsbehälter mit ausreichendem Stapelvolumen bereitzustellen. Das Ausbringen des Klärschlammes sollte mit bodenschonenden Geräten erfolgen, die dem neuesten Stand der Technik entsprechen. Um das Vertrauen der Landwirte und der Bevölkerung zu erhalten, ist eine seriöse Vermarktung und stetige Kontrolle notwendig.

Ebenso wie die Kläranlagenbetreiber können auch die Landwirte dazu beitragen, daß das Vertrauen in das Produkt Klärschlamm wächst. Eine ordnungsgemäße Düngeplanung und Ausbringung des Klärschlammes sind durchzuführen. In die Düngeplanung sind die Angaben über die Bodengehalte, wirtschaftseigene Dünger, denen der Vorzug vor Klärschlamm eingeräumt werden sollte, und die voraussichtliche Ertragshöhe der anzubauenden Kulturen zu berücksichtigen.

Als Nahrungsmittel oder Rohstoff gelangen die landwirtschaftlichen Produkte zum Endverbraucher oder in Gewerbe- und Industriebetriebe. Das anfallende Abwasser wird von privaten und gewerblichen Betrieben wiederum eingeleitet. Alle Einleiter haben darauf zu achten bzw. sind dazu verpflichtet, keine wassergefährlichen Stoffe einzuleiten, sondern sie separat zu entsorgen. Innerhalb der Betriebe sollte darauf geachtet werden, daß modernste Verfahren eingesetzt werden, um die unliebsamen Stoffe nicht in das Abwasser gelangen zu lassen damit sie anschließend in aufwendigen Verfahren beseitigt werden müssen. Geschlossene Kreisläufe und abwasserreduzierte Verfahren wären Möglichkeiten, die Kläranlagen zu entlasten. Es ist jedoch auch zu überlegen, ob Verfahren oder Materialien verboten werden müßten, wie dies früher bei Bleirohren oder PCB gemacht worden ist. Die Kupfergehalte ließen sich reduzieren, indem statt Kupfer Chromnickelstahl in der Installation von Wasserleitungen Verwendung finden würde. Regelmäßige Informationen über den neusten Stand der Technik sind notwendig. Um die Umsetzung der entsprechenden Vorschriften zu überprüfen, sind Kontrollen durchzuführen.

Abschließend kann festgehalten werden, dass bei den Untersuchungen sich keine Hinweise ergaben, die eine von mineralischen Düngemitteln abweichende Berücksichtigung der P-Gehalte in Klärschlämmen im Rahmen der Düngeverordnung erfordern. Im Rahmen der Klärschlammverordnung sind die Grenzwerte für die Schwermetallgehalte für den Klärschlamm und den Boden einzuhalten. Aus pflanzenbaulicher Sicht besteht nur ein geringes Risiko bezüglich der Schwermetallgehalte im Boden, da in Untersuchungen festgestellt werden konnte, daß es keinen direkten Zusammenhang zwischen den Schwermetallgehalten im Boden und den Schwermetallgehalten in der Pflanze gibt. Durch die Faktoren Pflanzenart, Pflanzenorgan, Erntezeitpunkt, Bodeneigenschaften und Schwermetall wird der Transfer vom Boden in die Pflanze bzw. Wurzel in den Sproß modifiziert. Die Bodeneigenschaften, insbesondere der pH-Wert, aber auch die Konzentration der Kontamination spielen für die Verfügbarkeit eine wesentliche Rolle.

Unter Abwägung aller diskutierten Fakten kann festgestellt werden, dass die Verwendung von schadstoffarmen Klärschlämmen in der Landwirtschaft nach wie vor umweltschonend möglich ist. Ihr sachgerechter Einsatz ist unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten uneingeschränkt zu empfehlen.

7 Zusammenfassung

Im Sinne der Kreislaufführung ist die umweltgerechte Verwertung von Klärschlamm anzustreben. Ein besonderes Gewicht ist auf das Phosphat zu legen. Laut Düngeverordnung sind alle Düngungsmaßnahmen generell zu bilanzieren. Dabei müssen die P-Gehalte aller Dünger und somit auch die des Klärschlammes auf den P-Bedarf der Fruchfolge voll angerechnet werden. Viele Böden in Nordrhein-Westfalen weisen bereits heute eine ausreichende P-Versorgung auf. Insbesondere in den viestarken Regionen ist der Phosphat-Gehalt der Böden zum limitierenden Faktor für die Ausbringung von Klärschlamm geworden. Dennoch ist in manchen Regionen, wie in der Köln-Aachener Bucht oder in Ostwestfalen mit geringerer Viehdichte oder in Betrieben ohne Vieh eine zusätzliche Verwertung von Klärschlamm möglich. Andererseits werden in einigen Böden trotz langfristiger Klärschlammdüngung keine Steigerungen der Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphat gefunden. Als Ursache wird ein immobilisierender Effekt der zur P-Fällung in den Klärwerken eingesetzten Chemikalien diskutiert.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit war ein Schwerpunkt die P-Wirkung des Klärschlammes in Abhängigkeit von der P-Fällung und vom Substrat zu untersuchen (Tabelle 7-1). Dazu wurden drei flüssige und drei stichfeste Klärschlämme aus der laufenden Produktion von drei Kläranlagen untersucht, bei denen für die Fällung der Phosphate unterschiedliche Fällmittel eingesetzt werden. Die Fällung erfolgt im ersten Klärwerk mit Eisensalzen (FeCl_3), im zweiten Klärwerk werden Aluminate (NaAlO_2) eingesetzt und im dritten Klärwerk wird neben der Fällung mit Eisen eine Kalkung ($\text{FeCl}_3 + \text{CaO}$) durchgeführt. Die Klärschlämme entsprechen alle den Vorgaben der Klärschlammverordnung § 4, Abs. 10, 11 und 12 AbfKlärV. Es sind keine Überschreitungen der zulässigen Schadstoffgehalte ermittelt worden, so dass sie alle für die landwirtschaftliche Verwertung zur Verfügung stehen können. Mit Hilfe eines Gefäßversuches sollte die Düngewirkung der Klärschlämme und die Auswirkungen auf den Boden im Vergleich zu mineralischen Düngern beurteilt werden. Als Substrat wurde A_h -Material eines Sandbodens und Material aus dem A_p - A_l -Horizont einer Pseudogley-Parabraunerde aus Löß eingesetzt. In zwei um ein Jahr versetzten Versuchen wurde jeweils eine dreijährige Anbaufolge gewählt: Einjähriges Weidelgras, Weizen/Mais, Hafer/Mais.

Tab. 7-1: Versuchsserien zur Prüfung der P-Wirkung in Klärschlämmen

Faktor	Stufen
Anlage	1 = 1995 - 1997 2 = 1996 - 1998
Klärschlamm/P-Düngung [1000 mg P_2O_5 /Gefäß = 436,68 mg P/Gefäß = 4,85 mg P/100 g Boden]	1 Kontrolle 2 Klärschlamm, flüssig, P-Fällung mit FeCl_3 3 Klärschlamm, flüssig, P-Fällung mit NaAlO_2 4 Klärschlamm, flüssig, P-Fällung mit $\text{FeCl}_3 + \text{CaO}$ 5 Klärschlamm, stichfest, P-Fällung mit FeCl_3 6 Klärschlamm, stichfest, P-Fällung mit NaAlO_2 7 Klärschlamm, stichfest, P-Fällung mit $\text{FeCl}_3 + \text{CaO}$ 8 Superphosphat 9 Hyperphos
Bodenart	1 = Sand 2 = Lößlehm
Wiederholung	1. Anlagejahr n = 7 2. Anlagejahr n = 6 3. Anlagejahr n = 5
Fruchtfolge	1. Anlagejahr: Einjähriges Weidelgras (4 Schnitte) 2. Anlagejahr: Sommerweizen, Zwischenfrucht Mais 3. Anlagejahr: Hafer, Zwischenfrucht Mais (Mais nur in Anlage 1)

Folgende Ergebnisse sind festzustellen:

- Im ersten Anlagenjahr war weder die Zugabe von Klärschlamm noch von Düngemitteln für das Einjährige Weidelgras ertragswirksam gegenüber der Kontrolle. Erst ab dem zweiten Jahr konnten Mehr- oder Mindererträge beobachtet werden. Eine Klärschlammdüngung ist mit einer mineralischen Düngung in der P-Wirkung prinzipiell vergleichbar. Im Durchschnitt der dreijährigen Anbaufolge war die Ertragswirksamkeit der flüssigen und stichfesten Klärschlämme auf Sandboden gleichwertig. Auf dem Lößboden hingegen waren die flüssigen Klärschlämme den stichfesten Klärschlämme hinsichtlich des Ertrages überlegen. Die stichfesten Klärschlämme konnten das Ertragsniveau von Superphosphat nicht erreichen. Sie sind in der Ertragswirksamkeit vergleichbar mit Hyperphos. Eine zusätzliche Kalkung der mit Eisen gefällten Klärschlämme zeigte unabhängig von der Bodenart keine Wirksamkeit, tendenziell waren die Erträge unabhängig von der Bodenart vermindert.
- In der dreijährigen Fruchtfolge waren die P-Entzüge der Klärschlämme in den Kulturen Einjähriges Weidelgras und Getreide mit denen der Superphosphat-Variante ebenbürtig. Nur beim Mais, der im zweiten Jahr als Nachfrucht angebaut wurde, konnten im Sandboden bei den Klärschlamm-Varianten höhere P-Entzüge als bei mineralischer P-Düngung festgestellt werden. Bei den Löß-Varianten wurden dagegen die höheren P-Entzüge nach Superphosphatdüngung ermittelt. Zwischen den Klärschlamm-Varianten bestanden in beiden Böden statistisch keine Unterschiede.
- Die prozentuale Düngerausnutzung liegt bei der Dünger-Variante Superphosphat - über die drei Anlagenjahre betrachtet - bei 38 %. Eine vergleichbar hohe Ausnutzung erreichte nur noch die flüssige Klärschlamm-Variante mit der Eisenfällung. Bei allen anderen Klärschlämmen war sie geringer, jedoch höher als bei der Dünger-Variante Hyperphos mit nur 17 % P-Ausnutzung. Bei den beiden Varianten flüssiger Klärschlamm mit Eisen- bzw. Aluminatfällung war die P-Ausnutzung im ersten Jahr am größten und damit vergleichbar der Superphosphat-Variante. In den folgenden Jahren haben die P-Ausnutzungsrate abgenommen. Bei allen anderen Varianten kommt es zu einer größeren Nachwirkung im zweiten Jahr, die sich im dritten Jahr wieder reduziert. Dies ist zum einen mit einer schnelleren Alterung von Superphosphat zu erklären. Zum anderen dürften aufschließende Reaktionen im Boden stattgefunden haben, die zu einem Anstieg der Verfügbarkeit in der dreijährigen Fruchtfolge führten. Bei dem Klärschlamm mit Eisenfällung und Kalkung kam es bereits im ersten Jahr zu Festlegungsprozessen.

- Die P-Mobilität nach Düngung mit den drei flüssigen Klärschlämmen, sowie den beiden stichfesten Klärschlämmen mit Eisen- und Aluminatfällung ist im Durchschnitt der Anlagen und Substrate vergleichbar der Dünger-Variante Superphosphat. Obwohl hier die höchsten Erträge mit hohen P-Entzügen erreicht wurden, ist der Rückgang der P-CAL-Gehalte im ersten Jahr gering. Die CAL-lösliche P-Fraktion muß somit ständig aus dem Dünge- bzw. Klärschlammvorrat aufgefüllt worden sein. Im zweiten Jahr stockt diese Nachlieferung bei den Düngervarianten und den flüssigen bzw. stichfesten Klärschlamm-Varianten mit Aluminatfällung und Eisenfällung mit anschließender Kalkung, so dass die P-CAL-Gehalte weiter zurückgehen. Im dritten Jahr erfolgt ein Anstieg der P-CAL-Gehalte bei allen Varianten, außer der flüssigen Klärschlamm-Variante mit Eisenfällung. Aufgrund der Aufnahme von Phosphaten aus dem pflanzenverfügbareren Gehalt im Boden muß es zu neuerlichen Umsetzungsprozessen im Boden gekommen sein.
- Die erwarteten bzw. berechneten Veränderungen der Gesamt-P-Bodengehalte durch die Düngung bzw. durch die P-Entzüge konnten analytisch sehr gut nachvollzogen werden.
- Innerhalb der dreijährigen Fruchfolge verhalten sich die relativen P-Verfügbarkeiten der flüssigen Klärschlamm-Varianten auf Sandboden entsprechend der Dünger-Variante Superphosphat. Dagegen verlaufen die relativen P-Verfügbarkeiten der stichfesten Klärschlamm-Varianten zum Teil mit der Dünger-Variante Hyperphos parallel. Auf dem Lößboden kann zwischen den flüssigen und stichfesten Klärschlamm-Varianten keine klare Abgrenzung zwischen den relativen P-Verfügbarkeiten gezogen werden.
- Im Rahmen der Versuchsreihen sind die Veränderungen der Fraktionen Fe/Al-P, Ca-P, Org. P und Rest-P untersucht worden. In beiden Böden sind die Fe/Al-P- und die Ca-P- Fraktionen relativ stabil. Nur die Fraktion des organisch gebundenen Phosphates ist vor allem im Lößboden starken Veränderungen unterworfen. Bei niedrigem Ausgangsgehalt wie z. B. in der Anlage 1 nimmt der Anteil im Verlauf der drei Anlagenjahre stark zu, bei höheren Ausgangsgehalten an Org. P ist der Anstieg geringer aber noch erkennbar. Im Sandboden sind diese Veränderungen kaum noch feststellbar, einem Anstieg während des ersten und teilweise zweiten Jahres steht ein deutlicher Rückgang im (zweiten) - dritten Jahr gegenüber. Mögliche Auf- und Abbauprozesse der mikrobiellen Biomasse werden als Ursache diskutiert. Diese Effekte sind weitgehend unabhängig von der Klärschlamm- bzw. Düngerform.

Ein genereller Anstieg der Fe/Al-P-Gehalte bei beiden Substraten und bei dem Einsatz von flüssigem oder stichfestem Klärschlamm findet durch den Einsatz von eisen- oder aluminiumgefälltem Klärschlamm nicht statt. Es konnte nicht nachgewiesen werden, daß die Ca-P-Fraktion bei den gekalkten Varianten ansteigt, sondern alle Klärschlamm-Varianten verhalten sich diesbezüglich gleich. Die Klärschlamm-Fraktions-Anteile sind wahrscheinlich im Vergleich zu den Fraktionen des Bodens zu gering gewesen, um die vermuteten Effekte sichtbar machen zu können.

Aufgrund der Ergebnisse kann eine umweltverträgliche landwirtschaftliche Verwertung empfohlen werden. Bezüglich der P-Wirkung in Abhängigkeit der Fällung und des Substrates sollte daher flüssiger Klärschlamm mit einer Phosphat-Fällung durch Eisen bevorzugt ausgebracht werden. Diese Form erreicht die höchsten Erträge und die beste P-Ausnutzung im Vergleich zu einer Düngung mit Superphosphat. Die anderen Klärschlämme liegen in der Ertragswirksamkeit und in der P-Ausnutzung zwischen Superphosphat und Hyperphos. Somit haben sich keine Hinweise ergeben, die eine von mineralischen Düngemitteln abweichende Berücksichtigung der P-Gehalte in Klärschlämmen im Rahmen der Düngeverordnung erfordern. Bezüglich des Bodenschutzes werden aus Vorsorgegründen neue Regelungen diskutiert, die zu einer Reduzierung der Schwermetallgrenzwerte der Klärschlammverordnung führen würden. Aus pflanzenbaulicher Sicht ist dies jedoch nicht erforderlich, da keine lineare Beziehung zwischen Boden- und Pflanzengehalten besteht. Durch die Faktoren Pflanzenart, Pflanzenorgan, Erntezeitpunkt, Bodeneigenschaften (z.B. pH-Wert, Konzentration der Kontamination) und Art des Schwermetalls wird der Transfer vom Boden in die Wurzel bzw. Wurzel in den Sproß modifiziert. Unter Abwägung aller diskutierten Fakten kann daher festgestellt werden, daß die Verwendung von schadstoffarmen Klärschlämmen in der Landwirtschaft nach wie vor umweltschonend möglich ist. Ihr sachgerechter Einsatz ist unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten uneingeschränkt zu empfehlen.

8 Literaturverzeichnis

- ABWASSERTECHNISCHE VEREINIGUNG E.V. (1996): ATV-Handbuch Klärschlamm. 4. Auflage, Berlin: Ernst & Sohn.
- ABWASSERTECHNISCHE VEREINIGUNG E.V. (2001): Memorandum der ATV-DVWK zur landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung im März 2001.
- AICHTBERGER, K. UND K. TAUBER (1996): Vergleich der Stoffgruppe von Naß- und Preßschlämmen und der daraus resultierenden Frachten beim Einsatz in der Landwirtschaft. VDLUFA-Schriftenreihe 44, S. 265 ff.
- ASMUSSEN, S. (2001): Persönliche Mitteilung.
- ALBERTI, J. UND E. PLÖGER (1986): Organische Schadstoffe im Klärschlamm. Gewässerschutz - Wasser - Abwasser, S. 483 ff.
- BALZER, W. UND E. AHRENS (1990): Auswirkungen langjähriger Klärschlammdüngung und daraus resultierender Schwermetall-Akkumulationen auf die mikrobielle Aktivität von drei verschiedenen Böden. VDLUFA-Schriftenreihe 32, S. 615 ff.
- BARAKAH, F. N., S. SALEM UND A. M. HEGGO (1996): Effect of Sewage Sludge on Nodulation and N₂-Fixation in Alfalfa Grown on Calareous Loamy Soils. Z. Pflanzenernährung und Bodenkunde Jg. 159, S. 289 ff.
- BARAN, E. (1985): Zusammensetzung und Düngewirkung von Phosphat-Fällungsprodukten aus der dritten Abwasserreinigungsstufe. Dissertation, Göttingen.
- BAREKZAI, A. M. (1984): Alterung von wasserlöslichem Phosphat untersucht in Gefäß- und Modellversuchen. Dissertation, Gießen.
- BAUMGÄRTEL, G. (1988): Beurteilung der Phosphatversorgung von Lößböden in Südniedersachsen durch Düngungsversuche, Boden- und Pflanzenanalysen. Dissertation, Hannover.
- BERGS, C. (1998): Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung im Licht nationaler und internationaler rechtlicher Regelungen. ATV-Seminar 'Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung' GFA Hamburg.
- BORTLISZ, J., H.-G. KORBER UND F. MALZ (1989a): Organische Komponenten und Schwermetalle in kommunalen Klärschlämmen und landwirtschaftlich genutzten Böden. Z. abwassertechnik Nr. 4, S. 3 ff.
- BORTLISZ, J., H.-G. KORBER UND F. MALZ (1989b): Über PCB, PAK, PCDD, PCDF und Tenside im Klärschlamm. Bericht des Lippeverbandes/Emschergenossenschaft, Geschäftsbericht Wassergüte, Abteilung Chemie, Essen.
- BRÜNE, H. (1985): Schadstoffeintrag in Böden durch Industrie, Besiedlung, Verkehr und Landbewirtschaftung. VDLUFA Schriftenreihe 16, S. 85 ff.
- BUNDESMINISTER FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (1992a): Bericht gemäß Artikel 17 der EG-Richtlinie 86/278/EWG über die Klärschlammverwertung in der Bundesrepublik Deutschland.
- BUNDESMINISTER FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (1992b): Klärschlammverordnung (AbfKlärV) vom 15.April 1992, BGBl, 1S, 912.
- BUNDESRAT (2001): Vorschau zur Plenarsitzung des Bundesrates vom 28.03.2001, TO-Punkt 46: Entschließung des Bundesrates für ein Verbot der Klärschlammausbringung

auf landwirtschaftlich genutzten Flächen, Antrag des Freistaates Bayern, Drucksache 226/01. Pressemitteilung 50/2001.

BUTZKAMM-ERKER, R. (1991): Organische Schadstoffe im Klärschlamm, Boden und in Pflanzen. Z. Wasser und Boden, Nr. 5, S. 295 ff.

BUTZKAMM-ERKER, R. UND R. E. MACH (1990): Neuere Daten über Dioxingehalte in Klärschlämmen. Z. Korrespondenz Abwasser, Jg. 37, Nr. 2, S. 161 ff.

CANDINAS, T. UND A. SIEGENTHALER (1991): Klärschlamm und Kompost in der Landwirtschaft. Eidgenössische Forschungsanstalt Liebefeld-Bern, S. 49 ff.

CRAMER, H.-H., A. KLOKE, H. JARCZYK UND H. KICK (1981): Bodenkontamination. Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, 4. Auflage, Band 6 Weinheim: Chemie, S. 501 ff.

DELSCHEN, T. (1989): Untersuchung zur Schwermetallverfügbarkeit in klärschlammgedüngten Böden unter Feldbedingungen und im Gefäßversuch. Dissertation, Bonn.

DIEZ, T. (1981): Mit Klärschlamm Düngekosten senken. Z. Bayerisches landwirtschaftliches Wochenblatt, Jg. 171, Nr. 33, S. 12 f.

DIEZ, TH. UND H. WEIGELT (1980): Zur Düngewirkung von Müllkompost und Klärschlamm. Landwirtschaftliche Forschung 33, S. 47 ff.

ESCH, B. (1999): Gegenüberstellung der Regelungen des gesetzlichen Klärschlamm-Entschädigungsfonds und des freiwilligen Klärschlammfonds. Z. Korrespondenz Abwasser, Jg. 46, Nr. 1, S. 82 ff.

FISCHER, D. von (1994): Organische Abfallverwertung mit Nutzen und Risiken. Z. mais Jg. 22, Nr. 2, S. 78f.

FLIESSBACH, (1991): Auswirkungen mehrjähriger abgestufter Klärschlammgaben auf die mikrobielle Biomasse des Bodens und ihre Aktivität. Dissertation, Göttingen.

FRIEGER, H. (1993): Anforderungen an Produkte und Produktionsanlägen zur Verminderung bzw. Vermeidung der Belastung von Klärschlamm. Gewässerschutz - Wasser - Abwasser Bd. 135, S. 374 ff.

FRIELINGHAUS, M. UND H. SCHÄFER (1999): Umsetzung des praktischen Bodenschutzes. In: BUCHWALD, K. UND W. ENGELHARDT: Umweltschutz: Grundlagen und Praxis, Band 4 Schutz des Bodens, Bonn: Economica Verlag, S. 96 ff.

FRITSCH, F. UND W. WERNER (1988): Einfluß langjähriger Klärschlammdüngung auf Löslichkeitsskriterien der Bodenphosphate. Landwirtschaftliche Forschung 41, S. 305ff.

FROSSARD; R. UND F. X. STADELmann (1987): Phosphor in der Pflanze - Funktion, Bedarf. Schriftenreihe der FAC, Liebefeld, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agriculturchemie und Umwelthygiene (Hrsg.), Liebefeld-Bern.

FÜHR, F., B. SCHEELE UND G. KLOSTER (1985): Schadstoffeinträge in den Boden durch Industrie, Besiedlung, Verkehr und Landbewirtschaftung (organische Stoffe). VDLUFA Schriftenreihe 16, S. 73 ff.

FURRER, O. J. (1980): Landwirtschaftlicher Wert des Klärschlamm. Dokumentation EAS Seminar Basel.

FURRER, O. J. UND T. CANDINAS (1984): Art, Menge und Wirksamkeit des Stickstoffs im Klärschlamm. Gewässerschutz - Wasser - Abwasser Nr. 65, S. 519 ff.

- GELBERT, G., G. HASSELBACH, S. GEORGLL UND H. BRUNN (1992): Chlorkohlenwasserstoffe und polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe in Acker- und Grünlandboden - Ergebnisse aus langjährigen Klärschlamm-Feldversuchen. Z. Agribiological Research, Jg. 45, Nr. 1, S. 77 ff.
- GOSSOW, K. (1992): Keine Alternative zur landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung. Z. abwassertechnik, Jg. 43, Nr. 4, S. 37 ff.
- GRÜN, R. UND F. PUSCH (1990): Schwermetalle im System Boden/Pflanze nach praktischer Klärschlammdüngung auf charakteristischen Böden des Weser-Ems-Gebietes. Dissertation, Oldenburg.
- GUTSER, R. (1996): Klärschlamm und Kompost als Sekundärrohstoffdünger. VDLUFA-Schriftenreihe 44, S. 29 ff.
- HASSELBACH, G. (1992): Ergebnisse zum Schwermetalltransfer Boden/Pflanze aufgrund von Gefäßversuchen und chemischen Extraktionsverfahren mit Böden aus langjährigen Klärschlamm-Feldversuchen. Dissertation, Gießen.
- HENNING, K., H. GERTH UND H. KRUSE (1995): Klärschlammverwertung im Landbau Position der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein. Betriebswirtschaftliche Mitteilungen der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein, Nr. 478.
- HESEMANN, J. (1975): Geologie Nordrhein-Westfalens. Paderborn: Ferdinand Schöningh Verlag.
- HOFFMANN, G. (1991): Die Untersuchung von Böden. VDLUFA-Methodenbuch Band I, 4. Auflage, Darmstadt: VDLUFA-Verlag.
- HOFFMANN, G., F. NIENHAUS, F. SCHÖNBECK, H. WELTZIEN UND H. WILBERT (1985): Lehrbuch der Phytomedizin, 2. Auflage, Berlin, Hamburg: Parey Verlag.
- HOHNVEHLMANN, J. (1963): Vergesellschaftung, Entstehung und Eigenschaften der Böden im Soester Hellweggebiet. Dissertation, Bonn.
- INGENIEURBÜRO SOWA (1995): Klärschlammuntersuchung gemäß Klärschlammverordnung der Kläranlage Lippstadt.
- INGENIEURBÜRO SOWA (1996): Klärschlammuntersuchung gemäß Klärschlammverordnung der Kläranlage Lippstadt.
- JELENIC, N. (1986): Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft. KTBL (Hrsg.), Darmstadt.
- KEDING, M. (1991): Maßnahmen zur Entwicklung und Sicherung der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung, Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft - SIWAWI Bochum - Band 21.
- KERSCHBERGER, M. UND H. SCHRÖETER (1998): Einsatz von Sekundärrohstoffdüngern in der Pflanzenproduktion. Z. Getreide, Jg. 4, Nr. 3, S. 124 ff.
- KIRKHAM, M. B. (1982): Agricultural use of phosphorus in sewage sludge. Advances in Agronomy, New York, Jg. 35, S. 129 ff.
- KLUGE, G. UND G. EMBERT (1996): Das Düngemittelrecht mit fachlichen Erläuterungen 1996. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag.

- KLUGE, R., H. SCHAAF, K. SEVERIN UND P. RIESS (1997): VDLUFA-Standpunkt Landbauliche Verwertung von geeigneten Abfällen als Sekundärrohstoffdünger, Bodenhilfsstoffe und Kultursubstrate. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Jg. 83, S. 325 ff.
- KÖSTER, W. (1981): Die Bodenverträglichkeit unterschiedlich konditionierter Schlämme unter besonderer Berücksichtigung der Einsparung von Dünger. Z. Korrespondenz Abwasser, Information für das Betriebspersonal von Abwasseranlagen, Folge 2/3, S. 148 ff.
- KRAUSE, O. UND W. ZORN (2000): Düngen mit Klärschlamm. Z. Neue Landwirtschaft Nr. 11, S. 50 ff.
- KREIS GÜTERSLOH, KLÄRSCHLAMMBERATUNG (Hrsg.) (1993): Klärschlamm Konzept zur Förderung einer sachgemäßen landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung im Kreis Gütersloh, 2/1993.
- KURMIES, B. (1971): Zur Fraktionierung der Bodenphosphate. Die Phosphorsäure, Bd. 29, S. 118 ff.
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER WESTFALEN-LIPPE (2000): Empfehlungen für die Düngung von Acker- und Grünland.
- LAVES, D. UND B. DITTRICH (1996): Ökologisch verträgliche Klärschlammverwertung. VDLUFA-Schriftenreihe 44, S. 277 ff.
- LAVES, D., B. DITTRICH UND I. KÜHN (1999): Verwertung von Klärschlamm und Bioabfall bei Anwendung des Förderprogramms "Umweltgerechte Landwirtschaft (UL)" in Sachsen - Richtwerte und Regelungen. VDLUFA-Schriftenreihe 52, S. 537 ff.
- LESCHBER, R. (1993): Organische Stoffe im Klärschlamm. Müll-Handbuch Bd. 3, Kapitel XV, System-Nr. 3033.
- LESCHBER, R. (1998): Anorganische und organische Schlamminhalte - Risiken für die Schlammverwertung. ATV-Seminar "Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung" GFA Hamburg.
- LIPPEVERBAND (1995): Klärschlammuntersuchung nach §3, Abs. 5 und 6 AbfKläV vom 15.04.92 der Kläranlage Soest.
- LIPPEVERBAND (1996): Klärschlammuntersuchung nach §3, Abs. 5 und 6 AbfKläV vom 15.04.92 der Kläranlage Soest.
- LITZ, N., R. BOJE-HADERER, S. JUNG, D. MERKEL, G. OFFENBÄCHER UND W. SCHNAAK (1998): Konzept zur Ermittlung und Bewertung der Relevanz schädlicher organischer Inhaltsstoffe im Klärschlamm. Z. Korrespondenz Abwasser, Jg. 45, Nr. 3, S. 492 ff.
- LÜBBEN, B. (1991): Auswirkungen von Klärschlammdüngung und Schwermetallbelastung auf die Colleenbohlenfauna eines Ackerbodens. Dissertation, Braunschweig.
- LÜBBEN, S. (1993): Vergleichende Untersuchungen zur Schwermetallaufnahme verschiedener Kulturpflanzen aus klärschlammgedüngten Böden und deren Prognose durch Bodenextraktion. Landbauforschung Völkerode, SH 140.
- LÜTKE ENTRUP, N.; ONNEN, O. UND TEICHGRÄBER, B. (1998): Zukunftsähige Landwirtschaft, Integrierter Landbau in Deutschland und Europa. Fördergemeinschaft Integrierter Pflanzenbau e.V. (Hrsg.), Bonn.

- MALZ, F. UND J. BORTLISZ (1988a): Die landwirtschaftliche Nutzung des Klärschlammes
1. Teil: Rückführung in den bio- und geochemischen Zyklus ist ökologisch und
wirtschaftlich sinnvoll. Z. abwassertechnik, Nr. 1, S. 11 ff.
- MALZ, F. UND J. BORTLISZ (1988b): Die landwirtschaftliche Nutzung des Klärschlammes
2. Teil: Strategie praktischer Nutzung. Z. abwassertechnik, Nr. 2, S. 9 ff.
- MEDIAVILLA, V., W. STAUFFER UND A. SIEGENTHALER, (1995): Schweinegülle und
Klärschlamm: Einfluß auf Bodeneigenschaften. Z. Agrarforschung Schweiz, Nr. 5,
S. 193 ff.
- MENGEL, K. (1991): Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. 7. Auflage, Stuttgart: Fischer
Verlag.
- MERKEL, D. UND Y. MATTER (1994): Klärschlammuntersuchungen aus Niedersachsen II.
Z. Korrespondenz Abwasser, Jg. 41, Nr. 1, S. 76 ff.
- MÖNICKE, R. (1994): Nähr- und Schadstoffaspekte bei der Verwertung von Klärschlamm in
der Landwirtschaft. Z. Korrespondenz Abwasser Jg. 41, Nr. 8, S.1320ff.
- MUNK, H. (1971): Phosphatdüngung - Phosphatverfügbarkeit. Die Phosphorsäure Bd. 29,
S. 35 ff.
- MUNK, H. UND C. BÄRMANN (1978): Zur Frage der Phosphatdüngung im Bereich
optimaler bis hoher Anreicherung des Bodens. Landwirtschaftliche Forschung. SH 35,
S. 311 ff.
- MUUSS, U. UND A. SCHÜTTLER (1969): Luftbildatlas Nordrhein-Westfalen. Neumünster:
Karl Wachholtz Verlag,, S. 151 ff.
- NAUMANN, C., R. BASSLER, R. SEIBOLD UND C. BARTH (1976): Die chemische
Untersuchung von Futtermitteln. VDLUFA-Methodenbuch Band III, mit
Ergänzungslieferungen 1983, 1988 und 1993, Darmstadt: VDLUFA-Verlag.
- NL. (1998): Klärschlamm - Als Dünger kaum Bedeutung. Z. Neue Landwirtschaft Nr. 8,
S. 54 f.
- N.N. (1998a): Gesetzessammlung zur Klärschlammverwertung. Z. Korrespondenz Abwasser,
Jg. 45, Nr. 11.
- N.N. (1998b): Verbrennung auf dem Vormarsch. Z. Land & Forst, Jg. 7, S. 17 ff.
- N.N. (1998c): Verordnung über den Klärschlamm-Entschädigungsfonds (Klärschlamm-
Entschädigungsfondverordnung - KlärEV) vom 20.Mai 1998. BGBI 1998, I, S. 1048.
- OFFENBÄCHER, G. (1991): Untersuchungen organischer Schadstoffe in Klärschlämmen.
LUFA Bonn.
- OTTO, F. (1999): Land- und forstwirtschaftliche Bodennutzung nach dem BBodSchG.
Z. Wasser und Boden, Jg. 51/52, S. 5 f.
- PESCHEN, N. (1987): Stand der Klärschlammseuchung mit Kalk. Z. abwassertechnik
Nr. 2, S. 27 ff.
- POLETSCHNY, H. (1993): Klärschlamm und Abfallkompost im Ackerbau. Z. Zuckerrübe
Jg. 42, S. 304 ff.
- POLETSCHNY, H. (1994a): Nährstoffe und organische Substanz. Berichte über
Landwirtschaft, Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit Band 6, SH 208, S. 83 ff.

- POLETSCHNY, H. (1994b): Organische Schadstoffe. Berichte über Landwirtschaft, Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit Band 6, SH 208, S. 83 ff.
- REX (1995): Versuchsanstalt Kamperhof, Mülheim/Ruhr. Persönliche Mitteilung.
- RUHRVERBAND (1995): Ergebnisse der Klärschlammuntersuchung der Kläranlage Warstein.
- RUHRVERBAND (1996): Ergebnisse der Klärschlammuntersuchung der Kläranlage Warstein.
- SAUERBECK, D. (1979): Der Stickstoffkreislauf im Agrarökosystem. Landbauliche Forschung SH 47, Braunschweig-Völkerode, S. 44 ff.
- SAUERBECK, D. (1985a): Funktionen, Güte und Belastbarkeit des Bodens aus agrikulturchemischer Sicht. Stuttgart, Mainz: Kohlhammer Verlag.
- SAUERBECK, D. (1985b): Schadstoffeinträge in den Boden durch Industrie, Besiedlung, Verkehr und Landbewirtschaftung (anorganische Stoffe). VDLUFA Schriftenreihe 16, S. 59 ff.
- SAUERBECK, D. (1994): Möglichkeiten des Einsatzes organischer Abfallstoffe in der Landwirtschaft und spezielle Anforderungen an Klärschlamm und Kompost. Berichte über Landwirtschaft, Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit Band 6, SH 208, S. 152 ff.
- SAUERBECK, D. UND S. LÜBBEN (1991): Transferfaktoren und Transferkoeffizienten für den Schwermetallübergang Boden - Pflanze. In: Forschungszentrum Jülich GmbH (Hrsg.): Auswirkungen von Siedlungsabfällen auf Boden, Bodenorganismen und Pflanzen., Berichte aus der ökologischen Forschung, Jg. 6, S. 180 ff.
- SAUERBECK, D. UND P. STYPEREK (1987).: Schadstoffe im Boden, insbesondere Schwermetalle und organische Schadstoffe aus langjähriger Anwendung von Siedlungsabfällen - Teilbericht Schwermetalle, Umweltbundesamt FB 87- 003.
- SCHEFFER, F. UND P. SCHACHTSCHABEL (1984): Lehrbuch der Bodenkunde. 11. Auflage, Stuttgart:Enke Verlag.
- SCHENKEL, H. (1994): Verhalten der Klärschlamm-Schwermetalle in der Nahrungskette. 10. Jahrestagung Gesellschaft für Mineralstoffe und Spurenelemente.
- SCHMIDT, K. UND R. WALTER (1990): Erdgeschichte. 4. vollst. neu bearbeitete Auflage von R. Walter, Sammlung Göschen 2616, Berlin, New York: de Gruyter Verlag.
- SCHRÖETER, H. UND ZORN, W. (1997): P-Düngewirkung von Klärschlamm in Gefäßversuchen. Posterpräsentation VDLUFA-Jahrestagung.
- SCHWEIGER, P. UND R. VÖLKEL (1980): Zur N-Wirkung von Klärschlämmen im Gefäßversuch mit Weidelgras. Z. Landwirtschaftliche Forschung, Jg. 33, Nr. 4, S. 323 ff.
- SPEETZEN, E. (1986): Das Eiszeitalter in Westfalen. In: GÜNTHER, K.: Alt- und mittelsteinzeitliche Fundplätze in Westfalen.
- STADELmann, F. X. (1982): Die Wirkung steigender Gaben von Klärschlamm und Schweinegülle in Feldversuchen II Auswirkungen auf Population und Aktivität von Bodenorganismen. Z. Schweizerische Landwirtschaftliche Forschung, Jg. 21, Nr. 3./4., S. 239 ff.

- STICHLER, H. (1983): Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft und Belastbarkeit des Bodens? Z. Schweizerische Landwirtschaftliche Monatshefte, Nr. 3, S. 65 ff.
- STICHLER, H., S. K GUPTA UND H. W. SCHMITT (1987): Auswirkung von Sättigung und Kompetition von Schwermetallen im Klärschlamm auf die Pflanzenaufnahme. Z. Schweizerische Landwirtschaftliche Forschung, Jg. 26, Nr. 1./2., S. 69 ff.
- SUNTHEIM, L. (1996): Nährstoffverfügbarkeit und Klärschlämme. Tagung des Verbandes der Landwirtschaftskammern e.V. und des Bundesarbeitskreises Düngung (BAD) am 23. und 24. April 1996 in Würzburg: Einsatz von Abfällen zur Verwertung in der Düngung. S. 15ff.
- SUNTHEIM, L. UND B. DITTRICH (1996): Klärschlamm - (k)ein wertvoller P-Dünger? VDLUFA-Schriftenreihe 44, S. 313 ff.
- SUNTHEIM, L. UND B. DITTRICH (1998): Klärschlamm Als Dünger kaum Bedeutung. Z. Neue Landwirtschaft, Jg. 8, S. 54 ff.
- SÜSS, A. (1978): Die Entseuchung von Klärschlamm bei der landwirtschaftlichen Verwertung. Z. Landwirtschaftliche Forschung, SH 35.
- TABARASAN, O. (1977): Arten und Behandlung von Abwasserschlämmen. Z. Österreichische Abwasserrundschau, Jg. 22, S. 99 ff.
- THERING, U. (1994a): Klärschlammberaterin Kreis Gütersloh, persönliche Mitteilung.
- THERING, U. (1994b): Klärschlammberatung: Kooperation hat sich bewährt. Z. Ausbildung und Beratung Nr. 1, S.4 f.
- TIMMERMANN, F., L. CERVENKA UND E. BARAN (1980): Phosphatrückgewinnung aus Abwässern und Einsatz der Fällungsprodukte in der Düngung. Z. Landwirtschaftliche Forschung, SH 37.
- TIMMERMANN, F., H. SÖCHTIG UND R. KRAUSE (1985): Wirkung mehrjähriger hoher Klärschlammdüngung auf Humus- und Stickstoffhaushalt von zwei lehmigen Sandböden. VDLUFA Schriftenreihe 16, S. 369 ff.
- TRITT, W. P. (1994): Zur Problematik der Akzeptanz von Klärschlämmen. Z. Korrespondenz Abwasser, Jg. 41, Nr. 8, S. 1306 ff.
- UMWELTBUNDESAMT (2001): Grundsätze und Maßnahmen für eine vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in landwirtschaftlich genutzte Böden.
- UMWELT-RECHT (1992): Wichtige Gesetze und Verordnungen zum Schutz der Umwelt. 7. neubearbeitete und erweiterte Auflage Stand 15. Mai 1992, Beck-Texte, Deutscher Taschenbuch Verlag.
- VDLUFA (1996): Standpunkt des VDLUFA: Landbauliche Verwertung von geeigneten Abfällen als Sekundärrohstoffdünger, Bodenhilfsstoffe und Kultursubstrate. VDLUFA-Schriftenreihe 44, S. 13 ff.
- VORHOLZ, F. (2001): "Prinzip Hoffnung" NRW-Umweltministerin Bärbel Höhn warnt vor den Risiken durch Klärschlamm auf dem Acker. Die Zeit Nr. 6 vom 01.02.2001, S. 20.

WALTER, R. (1992): Geologie von Mitteleuropa. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, S. 324 ff.

WENDT, J., A. JUNGK UND N. CLAASSEN (1996): Höhe der Erhaltungsdüngung und Ausnutzung von Düngerphosphat vor dem Hintergrund der P-Alterung im Boden. Z. Pflanzenernährung und Bodenkunde, Nr. 159, S. 271 ff.

WERNER, W. (1975): Untersuchungen zur Phosphatwirkung von Klärschlämmen aus der chemischen Abwasserreinigung. Landwirtschaftliche Forschung, SH 32, S. 177ff.

WERNER, W. (1996): Düngen nach guter fachlicher Praxis? Aus der Sicht der Pflanzenernährung. Vorträge der 48. Hochschultagung, Bonn, S. 127 ff.

WERNER, W. UND C. BRENK (1997a): Regionalisierte und einzelbetriebliche Nährstoffbilanzierung als Informationsgrundlage zur gezielten Quantifizierung der Wirkungspotentiale von Maßnahmen zur Vermeidung auftretender Überschüsse. Forschungsberichte der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn Landwirtschaftliche Fakultät, Heft Nr. 46.

WERNER, W. UND C. BRENK (1997b): Entwicklung eines integrierten Nährstoffversorgungs-Konzepts als Basis eines umweltverträglichen, flächendeckenden Recyclings kommunaler Abfälle (Sekundärrohstoffdünger) in Nordrhein-Westfalen und regionalisierte Bilanzierung der Schwermetallflüsse. Forschungsberichte der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn Landwirtschaftliche Fakultät, Heft Nr. 48.

WERNER, W. UND C. BRENK (1998): Wohin mit Klärschlamm und Kompost? Z. Landwirtschaftliche Forschung, Nr. 4, S. 44 f.

WITTE, H. (1994): Entwicklungsstand der technischen Aufbereitung von Klärschlamm zur Weiterverwertung in der Landwirtschaft. Berichte über Landwirtschaft, Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit Band 6, SH 208, S. 13 ff.

9 Anhang

Anhang 1: Erträge der Anlage 1 [g/Gefäß] in Abhängigkeit der Ernten, Substrate und Varianten

	TS-Erträge		[g/Gefäß]	Anlage 1								
Substrat	Varianten	EW195	EW295	EW395	EW495	WK96	WS96	MW96	HK97	HS97	MH97	
	1	28,03	14,96	19,60	13,25	17,41	29,72	8,87	52,15	39,95	44,15	
	2	31,00	17,04	18,58	13,01	30,55	40,11	9,75	57,04	46,91	45,21	
	3	29,92	14,86	19,12	9,27	31,19	36,17	8,29	58,05	41,84	41,74	
	4	26,18	13,09	18,66	11,28	30,23	42,30	12,36	57,67	41,22	38,67	
Sand	5	27,52	14,04	18,34	15,47	34,86	45,07	14,04	57,49	42,34	35,87	
	6	26,91	15,47	18,70	13,61	45,40	52,85	13,54	58,02	50,19	32,43	
	7	27,57	13,85	17,26	11,33	29,78	37,60	12,00	53,32	41,76	43,61	
	8	29,74	14,98	21,96	10,97	39,11	47,71	10,18	54,77	48,83	46,75	
	9	28,09	14,73	18,80	10,93	37,51	43,61	11,27	57,98	38,72	37,36	
	1	39,89	25,54	25,86	20,71	34,80	40,19	10,63	50,82	39,64	39,35	
	2	47,20	29,23	30,18	19,77	31,22	43,75	13,70	47,81	42,06	40,85	
	3	42,50	28,10	29,73	19,69	36,10	45,90	13,42	51,29	44,03	48,95	
	4	41,39	26,44	28,66	23,80	41,70	51,59	11,88	49,11	46,08	43,12	
Löß	5	41,55	25,62	27,57	20,54	46,31	53,95	10,28	51,37	47,22	46,03	
	6	39,47	25,30	27,28	19,56	40,11	52,57	11,71	50,70	43,89	45,32	
	7	39,22	26,58	27,31	21,24	44,81	54,31	12,82	51,59	38,95	44,30	
	8	41,11	25,29	27,35	16,81	47,08	55,27	16,62	50,49	45,90	44,79	
	9	38,49	22,82	26,80	19,37	43,92	53,89	19,60	52,22	39,31	37,02	

Anhang 2: Erträge der Anlage 2 [g/Gefäß] in Abhängigkeit der Ernten, Substrate und Varianten

	TS-Erträge	[g/Gefäß]	Anlage 2									
Substrat	Varianten	EW196	EW296	EW396	EW496	WK97	WS97	MW97	HK98	HS98		
	1	23,47	27,99	10,31	18,75	28,50	44,69	27,43	37,20	34,34		
	2	33,43	33,62	13,45	20,31	36,75	49,88	36,23	45,08	40,45		
	3	28,13	32,61	13,33	16,52	36,33	50,77	29,82	51,71	41,62		
	4	23,41	29,12	12,16	17,49	31,99	41,18	36,54	32,32	27,46		
Sand	5	25,49	29,07	11,90	19,93	31,54	42,94	38,51	40,73	31,16		
	6	25,83	30,98	12,15	19,83	32,91	45,60	30,11	45,23	35,99		
	7	23,10	31,35	11,88	17,75	34,92	41,79	31,00	38,38	35,42		
	8	27,42	32,40	12,50	22,71	35,68	50,03	19,22	43,86	36,42		
	9	23,03	31,00	10,52	20,56	33,97	49,34	19,22	45,46	36,80		
	1	34,62	40,74	18,33	34,49	38,94	73,63	37,84	13,55	13,98		
	2	38,07	40,23	18,95	34,73	40,18	70,83	48,91	42,01	38,14		
	3	38,31	40,34	20,43	35,02	40,32	75,27	39,08	48,85	40,09		
	4	42,16	39,62	17,70	32,89	39,35	71,04	37,42	39,95	35,89		
Löß	5	35,17	40,70	20,37	31,90	39,07	70,55	45,77	30,45	26,09		
	6	37,92	40,81	19,34	35,22	40,51	69,63	43,17	34,62	30,78		
	7	38,16	39,84	17,51	33,27	38,99	71,35	39,75	28,44	26,98		
	8	37,04	40,10	19,21	32,26	39,75	74,84	52,61	51,36	42,00		
	9	37,96	40,15	18,63	34,44	38,82	71,10	42,73	21,24	21,90		

Anhang 3: P-Entzüge der Anlage 1 [mg P/Gefäß] in Abhängigkeit der Ernten, Substrate und Varianten

	P-Gehalt	[mg P/Gefäß]		Anlage 1							
Substrat	Varianten	EW195	EW295	EW395	EW495	WK96	WS96	MW96	HK97	HS97	MH97
	1	116,49	54,73	45,27	56,89	49,93	16,77	25,12	130,89	15,90	65,55
	2	132,50	64,04	56,45	63,01	102,38	18,89	31,23	133,66	21,66	70,09
	3	130,35	64,51	59,05	46,09	108,14	21,74	33,24	150,94	16,34	74,89
	4	97,31	53,16	47,75	52,36	117,21	18,57	44,49	143,69	17,12	69,82
Sand	5	111,74	56,57	47,31	59,91	142,46	22,64	52,88	162,19	15,91	58,58
	6	113,94	62,97	48,11	57,19	136,09	19,75	48,02	153,32	21,87	62,03
	7	106,98	56,89	49,83	47,11	108,38	19,77	43,02	145,64	18,41	62,54
	8	138,61	72,87	68,54	52,35	124,20	18,79	30,82	143,24	22,03	90,34
	9	117,31	63,85	51,64	45,22	114,72	17,33	35,58	137,07	13,63	64,54
	1	155,20	106,98	77,33	73,29	141,67	18,00	35,90	145,81	19,25	45,86
	2	217,12	141,00	108,63	85,86	138,85	20,38	42,14	153,91	27,43	47,72
	3	192,73	121,60	100,38	79,44	134,06	23,32	39,58	161,75	31,39	57,71
	4	171,59	102,97	94,61	86,19	177,14	26,87	39,96	162,00	27,37	49,66
Löß	5	168,43	102,85	89,88	77,45	202,63	22,82	41,12	170,52	27,51	46,44
	6	163,91	110,22	92,97	80,97	198,06	28,07	46,73	161,74	24,82	56,94
	7	146,85	99,68	81,62	76,23	218,15	26,31	45,00	165,41	23,45	54,38
	8	166,94	127,93	98,53	71,52	219,26	23,63	54,93	155,85	27,16	57,27
	9	147,17	96,91	86,51	70,26	215,14	27,79	48,47	153,04	18,79	44,78

Anhang 4: P-Entzug der Anlage 2 [mg P/Gefäß] in Abhängigkeit der Ernten, Substrate und Varianten

	P-Entzug	[mg P/Gefäß]		Anlage 2							
Substrat	Varianten	EW196	EW296	EW396	EW496	WK97	WS97	MW97	HK98	HS98	
	1	88,60	117,36	73,67	56,15	86,82	15,72	36,86	62,33	4,73	
	2	176,31	134,63	98,26	62,45	122,55	19,82	58,28	76,33	7,39	
	3	123,16	130,16	93,00	49,82	114,49	20,65	41,57	82,47	6,97	
	4	93,76	96,33	76,65	50,02	127,53	20,86	57,47	55,36	3,23	
Sand	5	119,05	116,00	86,78	58,82	95,62	16,40	56,29	68,53	4,35	
	6	131,44	127,68	84,10	56,27	99,17	15,17	41,18	71,24	5,13	
	7	105,56	128,49	81,30	50,51	140,49	20,61	47,73	63,34	6,38	
	8	146,87	138,27	98,01	65,19	109,28	20,70	27,64	78,51	6,01	
	9	121,13	129,43	75,50	61,41	104,15	20,61	28,30	70,16	3,91	
	1	224,29	131,10	128,69	111,44	166,86	37,82	55,39	24,46	2,09	
	2	258,53	139,71	136,94	135,22	175,44	36,86	66,62	71,32	6,63	
	3	258,73	139,68	153,42	140,43	154,41	36,78	63,21	79,18	5,83	
	4	276,44	136,42	132,04	135,04	175,81	40,50	61,28	64,52	6,07	
Löß	5	251,17	140,19	149,24	125,63	164,45	33,40	60,48	57,51	4,88	
	6	252,05	139,47	140,19	131,00	167,75	35,60	66,80	58,91	5,75	
	7	243,80	134,21	126,87	125,71	166,10	38,01	62,00	52,15	7,83	
	8	220,47	147,94	151,56	146,36	158,96	40,04	92,09	87,79	7,44	
	9	241,21	139,79	132,55	132,57	154,96	28,50	58,48	41,96	5,28	

Anhang 5: P-CAL-Gehalt [mg P/100 g Boden] in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Varianten

		P-Gehalt	[mg P/ 100 g Boden]						
			Anlage1				Anlage 2		
Substrat	Variante	EW95	WM96	HM97			EW96	WM97	HA98
Sand	1	3,93	3,65	3,60			3,91	4,37	4,10
	2	5,15	4,94	4,27			5,18	6,02	5,69
	3	5,15	5,48	4,71			5,20	5,42	5,25
	4	5,63	5,05	4,86			5,43	5,71	5,86
	5	5,09	4,88	5,38			4,06	5,31	5,96
	6	4,28	4,37	4,45			3,83	4,97	5,13
	7	4,45	4,95	4,13			3,74	4,02	4,43
	8	5,30	4,99	4,70			5,12	5,75	5,97
	9	4,58	4,32	4,39			3,71	5,33	5,21
Löß	1	2,39	1,58	1,97			4,76	4,28	5,97
	2	3,19	2,13	1,99			5,45	6,05	7,48
	3	3,54	2,15	1,81			6,29	5,11	7,21
	4	3,79	2,33	1,78			5,78	4,46	6,58
	5	3,21	2,67	2,27			6,12	4,31	6,68
	6	3,51	2,78	2,33			6,14	5,28	7,12
	7	2,94	1,75	1,45			5,70	5,36	7,42
	8	3,96	2,24	1,92			6,83	5,68	7,37
	9	2,58	1,65	1,61			4,82	3,72	5,86

Anhang 6: Gesamt-P-Gehalt [mg P/100 g Boden] in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Varianten

		Gesamt P	mg P/100 g Boden						
			Anlage 1				Anlage 2		
Substrat	Varianten	EW95	WM96	HM97			EW96	WM97	HA98
Sand	1	36,38	36,47	34,09			35,81	33,18	33,35
	2	39,72	39,00	36,19			40,70	38,48	37,91
	3	40,03	41,02	35,76			38,84	36,83	37,10
	4	40,58	41,56	37,58			39,75	36,71	37,46
	5	38,62	38,52	36,13			38,17	35,22	37,33
	6	39,97	40,23	36,13			38,02	36,30	35,33
	7	36,80	37,94	35,25			37,71	33,92	33,83
	8	37,83	40,83	34,71			40,11	38,28	38,05
	9	39,36	41,04	37,62			40,17	37,28	37,96
Löß	1	49,95	52,80	48,96			51,56	50,19	49,55
	2	50,18	55,45	51,96			53,89	54,29	53,74
	3	50,13	55,89	53,50			57,13	53,54	53,35
	4	51,91	56,94	51,60			54,85	52,55	52,22
	5	51,79	54,76	51,76			58,42	52,24	52,00
	6	53,06	53,22	53,06			58,15	52,83	53,14
	7	50,34	53,75	49,13			57,72	52,57	53,39
	8	51,87	56,80	51,56			61,06	54,22	54,39
	9	53,80	57,12	52,25			58,18	54,44	55,60

Anhang 7: Fe/Al-P-Gehalt [mg P/100 g Boden] in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Varianten

		Fe/Al-P	mg P/100 g Boden					
			Anlage 1				Anlage 2	
Substrat	Varianten	EW95	WM96	HM97		EW96	WM97	HA98
	1	24,22	24,40	23,86		24,64	24,51	22,77
	2	28,34	25,22	24,49		28,15	28,04	26,43
	3	27,84	26,88	26,01		26,59	27,43	25,48
	4	29,34	26,71	26,37		26,97	26,44	26,26
Sand	5	23,22	24,66	24,48		25,42	25,93	25,14
	6	23,02	24,68	24,98		25,11	24,84	24,90
	7	22,00	24,57	24,76		24,86	23,85	23,78
	8	24,96	25,44	24,69		27,11	27,17	27,10
	9	24,42	25,03	24,58		26,24	25,01	23,66
	1	23,59	20,75	18,94		17,53	20,29	19,87
	2	25,05	21,36	20,71		18,29	22,97	22,54
	3	25,49	22,99	21,15		21,06	23,19	22,45
	4	26,92	23,09	21,02		20,94	22,01	21,34
Löß	5	26,28	22,53	21,08		23,27	21,82	21,82
	6	28,06	23,44	21,58		23,67	22,90	21,97
	7	25,34	21,81	20,49		24,02	22,89	22,75
	8	26,32	21,03	21,18		24,84	23,54	22,63
	9	24,37	21,29	20,19		21,21	19,36	20,00

Anhang 8: Ca-P-Gehalt [mg P/100 g Boden] in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Varianten

		Ca-P	mg P/100 g Boden					
			Anlage 1				Anlage 2	
Substrat	Varianten	EW95	WM96	HM97		EW96	WM97	HA98
	1	3,20	3,18	3,40		3,28	3,16	3,09
	2	3,36	3,18	3,37		3,36	3,53	3,15
	3	3,10	3,14	3,25		3,14	3,32	2,91
	4	3,36	3,19	2,96		3,07	3,25	3,09
Sand	5	3,07	3,35	3,70		3,27	3,59	3,11
	6	2,60	3,13	3,32		3,19	3,06	3,09
	7	2,64	3,18	3,46		3,53	3,12	3,10
	8	3,00	3,75	3,91		3,53	4,22	3,96
	9	5,72	5,51	5,58		4,76	5,33	5,10
	1	8,80	8,44	8,68		11,44	12,29	12,28
	2	9,18	8,78	8,89		11,71	13,39	12,85
	3	9,19	9,32	9,08		12,66	13,86	13,62
	4	9,76	9,11	8,97		12,54	13,41	13,22
Löß	5	9,54	8,95	9,18		13,18	13,66	13,31
	6	9,61	8,99	8,90		12,20	14,04	13,74
	7	9,02	8,73	8,97		12,59	14,33	14,59
	8	9,49	9,66	9,82		13,82	16,06	15,73
	9	12,07	11,20	11,77		16,75	18,88	18,95

Anhang 9: Org. P-Gehalt [mg P/100 g Boden] in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Varianten

		Org. P	mg P/100 g Boden					
			Anlage 1				Anlage 2	
Substrat	Varianten	EW95	WM96	HM97		EW96	WM97	HA98
	1	3,27	6,21	1,89		6,24	14,90	18,98
	2	3,03	6,54	0,98		8,43	14,68	18,42
	3	2,66	7,41	1,33		7,45	13,89	17,44
	4	2,47	6,55	0,64		3,37	13,29	17,29
Sand	5	5,84	5,66	0,79		3,75	12,84	16,95
	6	7,25	5,99	0,69		2,48	14,48	16,89
	7	6,64	5,65	0,64		3,80	16,32	17,37
	8	5,15	5,80	0,72		3,85	16,13	17,55
	9	3,76	5,36	0,52		5,89	13,12	18,29
	1	5,83	2,77	4,54		13,89	13,49	11,82
	2	6,50	4,58	4,53		12,79	13,12	11,07
	3	6,06	2,95	3,93		11,90	12,79	10,92
	4	6,40	3,25	5,17		8,49	12,51	9,00
Löß	5	5,43	2,94	4,39		7,34	11,78	9,79
	6	5,51	3,02	4,50		8,89	11,68	9,94
	7	6,46	2,47	4,72		10,85	12,10	11,11
	8	6,39	3,71	4,82		8,39	13,09	12,10
	9	5,86	4,18	4,71		7,75	13,68	12,25

Anhang 10: Rest-P-Gehalt [mg P/100 g Boden] in Abhängigkeit der Anlagen, Substrate und Varianten

		Rest-P	mg P/100 g Boden					
			Anlage 1				Anlage 2	
Substrat	Varianten	EW95	WM96	HM97		EW96	WM97	HA98
	1	5,70	2,69	4,92		2,06	2,73	2,95
	2	4,99	4,06	7,35		2,68	2,32	3,79
	3	6,45	3,60	5,18		3,05	3,13	4,78
	4	5,41	5,10	7,60		3,32	3,77	2,95
Sand	5	6,49	4,85	7,15		4,05	2,75	4,69
	6	7,09	6,42	7,15		4,21	5,38	2,85
	7	5,52	4,54	6,39		2,85	4,48	2,23
	8	4,71	5,84	5,39		3,08	3,19	2,17
	9	5,47	5,14	6,93		3,32	2,77	4,49
	1	12,54	8,72	2,37		8,70	4,12	5,58
	2	8,95	10,62	3,94		11,10	4,81	7,29
	3	9,34	9,68	5,83		11,50	3,70	6,36
	4	11,86	11,45	4,31		12,87	4,62	8,65
Löß	5	12,23	10,45	4,54		14,63	4,97	7,08
	6	12,91	6,31	5,69		13,39	4,21	7,50
	7	12,19	6,89	2,30		10,26	3,25	4,94
	8	12,21	9,98	3,01		14,00	1,54	3,93
	9	11,48	11,51	2,00		12,46	2,51	4,40

Danksagung

Herrn Prof. Dr. H. K. Barth gilt mein besonderer Dank für die Themenstellung und die Möglichkeit im Fachbereich Philosophie, Geschichte, Geographie, Religions- und Gesellschaftswissenschaften der Universität-GH-Paderborn promovieren zu können. Für die vielfältigen Hinweise und Ratschläge bei der Bearbeitung dieses Themas und der Abfassung der Dissertation möchte ich mich recht herzlich bedanken.

Herrn Prof. Dr. J. Oehmichen danke ich sehr für die Möglichkeit der Durchführung dieser Arbeit im Fachbereich Agrarwirtschaft der Universität-GH-Paderborn. Durch die zahlreichen Hinweise und Hilfestellung hat er sehr zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr. N. Lütke Entrup danke ich für die vielseitigen Anregungen und Diskussionen bei der Bearbeitung des Themas. Sein Engagement über die fachlichen Hinweise hinaus, waren mir eine große Hilfe.

Herrn Dr. F.-F. Gröblinghoff danke ich sehr für die Diskussions- und Hilfsbereitschaft bei der Durchführung der vorliegenden Arbeit.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Fachbereichs Agrarwirtschaft danke ich für Ratschläge und Hinweise sowie für die tatkräftige Unterstützung bei der praktischen Versuchsdurchführung.

Dem Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, sei für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit gedankt.

Mein besonderer Dank geht an meine Familie und Freunde, die immer wieder neu Verständnis für mich zeigten und mich über die Jahre hindurch unterstützten.

Forschungsberichte des Fachbereichs Agrarwirtschaft Soest

Universität-Gesamthochschule Paderborn

- Band 1** **Norbert Lütke-Entrup, Hans-Ulrich Hensche, Nils Brodowski und Dirk Kerstin:**
Umweltrelevante Verhaltensmuster der Landwirte – Umsetzungsstrategien und Transferdefizite für den integrierten Pflanzenbau in Nordrhein-Westfalen. 1995, 178 Seiten, ISBN3-00-000194-8
- Band 2** **Hans-Ulrich Hensche und Harald Vogt:**
Marktorientierte Kooperation im Agrarbereich. 1995, 138 Seiten, ISBN 3-00-000224-3
- Band 3** **Hans-Ulrich Hensche, Christiane Wildraut, Norbert Lütke-Entrup und Harald Vogt:**
Die Kooperation Landwirtschaft und Wasserwirtschaft im Einzugsgebiet der Stevertalsperre – Eine Zwischenbilanz. 1995, 95 Seiten, ISBN 3-00-000397-5
- Band 4** **Qualitätsmanagement-Systeme und Ökobilanzen in der Landwirtschaft**
Teil A: Norbert Lütke-Entrup, Ortrun Onnen und Hans-Ulrich Hensche:
Einführung der DIN EN ISO Norm 9000 ff. (Qualitätsmanagement-Systeme) in die Landwirtschaft.
Teil B: Norbert Lütke-Entrup, Britta Teichgräber und Petra Zerhusen-Blecher:
Energie- und Kohlendioxidbilanzen (Ökobilanzen) landwirtschaftlicher Betriebe.
1996, 110 Seiten, ISBN 3-00-000760-1
- Band 5** **Hans-Ulrich Hensche und Else Herwing-Hujer**
Landbau-Studium in Soest – Ergebnisse einer Befragung. 1996, 59 Seiten, ISBN 3-00-000904-3
- Band 6** **Hans-Ulrich Hensche, Martin Spielhoff und Harald Vogt:**
Analyse der Schweinfleischproduktion seit 1980 – Ein inter- und intraregionaler Vergleich.
1996, 252 Seiten, ISBN- 3-00-000923-X
- Band 7** **Hans-Ulrich Hensche, Martin Spielhoff und Harald Vogt:**
Schweinefleischproduktion in 2000 und 2010 – Szenarien und zukunftsrobuste Strategien.
1998, 164 Seiten, ISBN 3-00-002487-5
- Band 8** **Mechthild Freitag, Hans-Ulrich Hensche, Heinrich Schulte-Sienbeck, Brigitte Reichelt:**
Kritische Betrachtung des Einsatzes von Leistungsförderern in der Tierernährung.
1998, 199 Seiten, ISBN 3-00-003331-9
- Band 9** **Norbert Lütke-Entrup, Jobst Oehmichen, Hubertus Wieker, Franz-Ferdinand Gröblinghoff:**
Stickstoffmineralisation des Bodens und Stickstoffbedarf im Maisanbau und Berücksichtigung zeitabhängiger N-Sollwerte und verschiedener Standorte. 2001, 118 Seiten, ISBN 3-00-007307-8
- Band 10** **Norbert Lütke-Entrup, Reinhard Schüttert, Franz-Ferdinand Gröblinghoff, Hubert Kivelitz:**
Langzeitwirkung integrierter Pflanzenbausysteme bei praxisgerechter Bewirtschaftung sowie ökologischer und ökonomischer Bewertung. 2001, 174 Seiten, ISBN 3-935807-00-7
- Band 11** **Hans-Ulrich Hensche, Hubert Kivelitz:**
Nachfragepotenzial für Öko-Produkte in Nordrhein-Westfalen.
2001, 153 Seiten, ISBN 3-935807-01-5
- Band 12** **Nils Brodowski, Norbert Lütke Entrup:**
Untersaaten in Winterweizen in Abhängigkeit von Sortenwahl und Herbizideinsatz. 2001, 106 Seiten,
ISBN 3-935807-05-8
- Band 13** **Ortrun Onnen**
Umweltschonende Verwertung von Klärschlamm in der Landwirtschaft, P-Wirkung des Klärschlammes in Abhängigkeit von der P-Fällung und vom Substrat. 2001, 141 Seiten, ISBN 3-935807-06-6