

Aus dem Institut für Agrikulturchemie  
der Georg-August-Universität Göttingen

---

**Phosphordüngewirkung von Klärschlämmen aus Klärwerken mit  
Phosphateliminierung durch Eisensalze**

(Phosphate fertilization effects of sewage sludges from waste water processing  
plants with phosphate elimination by iron salts)

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Fakultät für Agrarwissenschaften  
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von  
**M. Sc. agr. Ihab Mohamed Farid Abd El-Samie**  
geboren in Kairo, Ägypten

Göttingen, 6. Februar 2003

Gefördert durch die ägyptische Regierung,  
das Niedersächsische Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten  
sowie die Niedersächsische Umweltstiftung

**Abd El-Samie, Ihab Mohamed Farid**

**Phosphordüngewirkung von Klärschlämmen aus Klärwerken mit  
Phosphateliminierung durch Eisensalze**

Göttingen, Universität, Dissertation, 2003

D7

Referent:

Prof. Dr. W. Römer

Korreferent:

Prof. Dr. B. Meyer

Tag der mündlichen Prüfung:

6. Februar 2003

1. Referent: Prof. Dr. W. Römer

2. Korreferent: Prof. Dr. B. Meyer

Tag der mündlichen Prüfung: 6.02.2003

**WIDMUNG**

*Diese Arbeit widme ich*

*meiner Familie*

*besonders im Gedenken*

*an meinen Vater*

**DEDICATION**

*To my late father,*

*to my mother,*

*to my brothers,*

*to my wife and children*

# I

## Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XI</b>
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>

### Teil I

<b>2. Mehrjährige Experimente zur P- Aufnahme von Kulturpflanzen und zur P- Verfügbarkeit in Böden nach Applikation von zwei Klärschlämmen bzw. CaHPO<sub>4</sub> .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Generelle Ziele .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2 Dreijähriges Experiment zur P – Aufnahme der Pflanzen .....</b>	<b>6</b>
2.2.1 Vorbemerkungen und Versuchsziele .....	6
2.2.2 Versuchsanlage und Durchführung .....	7
2.2.2.1 Benutzte Klärschlämme .....	7
2.2.2.2 Benutzte Böden .....	8
2.2.2.3 Anlage des Gefäßversuchs zur P- Aufnahme .....	9
1. Versuchsjahr 1999 (Mais) .....	9
2. Versuchsjahr 2000 (Rotklee) .....	11
3. Versuchsjahr 2001 (Weidelgras) .....	12

## II

2.2.2.4 Pflanzenanalyse auf Phosphor .....	13
2.2.2.5 Ergebnisse .....	13
Gefäßversuche mit Mais .....	13
Maisanbau auf Boden mit hohem P-Gehalt .....	13
Maisanbau bei niedrigem und mäßigem P- Gehalt der Böden bzw. Substrate .....	14
Gefäßversuch mit Rotklee .....	19
Gefäßversuch mit Weidelgras .....	21
2.2.2.6 Überblick über die P- Entzüge in den drei Versuchsjahren .....	23
<b>2.3 Zweijähriges Experiment zur Prüfung der P- Aufnahme der Pflanzen .....</b>	<b>25</b>
2.3.1 Vorbemerkungen und Versuchsziele .....	25
2.3.2 Versuchsanlage und Durchführung .....	25
2.3.3 Ergebnisse: Sprossmassebildung und P- Entzüge .....	28
<b>2.4 Einjähriges Experiment zur Verfolgung der P- Verfügbarkeit in neuen Böden nach Klärschlammdüngung .....</b>	<b>33</b>
2.4.1 Vorbemerkungen und Versuchsziele .....	33
2.4.2 Versuchsanlage und Durchführung .....	34
2.4.3 Analysenmethoden in Böden .....	35

### III

2.4.4 Ergebnisse des Inkubationsversuches zu Verfolgung der P-Verfügbarkeit über 12 Monate .....	37
2.4.4.1 Orthophosphatkonzentration ( $P_i$ ) in den Bodenlösungen ....	37
2.4.4.2 P-Sorption der Böden .....	40
2.4.4.3 Beziehung zwischen den Bodengehalten an $Fe_{ox}$ und der P- Sorption .....	45
<b>2.5 Diskussion und Schlussfolgerungen .....</b>	<b>47</b>

### Teil II

<b>3. Einjährige Experimente zur P- Aufnahme von Kulturpflanzen und P- Verfügbarkeit im Boden nach Applikation von 13 Klärschlämmen und verschiedener P- Dünger in einen humosen Sandboden .....</b>	<b>57</b>
<b>3.1 Vorbemerkungen und Versuchsziel .....</b>	<b>57</b>
3.1.1 Verwendete Klärschlämme .....	58
3.1.2 Verwendeter Boden .....	59
3.1.3 Genereller Versuchsaufbau .....	60
3.1.3.1 Durchführung des Gefäßversuches mit Weidelgras unter Freilandbedingungen (Drahthaus) .....	62
3.1.4 Ergebnisse .....	62
3.1.4.1 Erträge und P- Entzüge des Grases .....	62
3.1.4.2 Bodenkenngrößen .....	69

## IV

3.1.4.3 Beziehungen zwischen den P- Entzügen und Bodenkenngrößen bzw. zwischen verschiedenen Bodenkenngrößen (Regressionsanalysen) .....	72
3.1.5 Diskussion und Schlussfolgerungen .....	83

## Teil III

<b>4. Kleingefäßversuch zur Prüfung der P- Aufnahme aus drei Klärschlämmen mit unterschiedlichen Werten des molaren Fe: P- Verhältnisses auf zwei verschiedenen ägyptischen Böden .....</b>	<b>87</b>
4.1 Vorbemerkungen und Versuchsziele .....	87
4.2 Versuchsanlage und Durchführung .....	87
4.3 Ergebnisse .....	90
<b>5. Abschließende Bemerkungen .....</b>	<b>93</b>
<b>6. Zusammenfassung .....</b>	<b>94</b>
<b>7. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>100</b>
<b>8. Anhang .....</b>	<b>104</b>

**Danksagung**

**Lebenslauf**

**Publikationen**

**Englische Zusammenfassung (Three Abstracts)**



## V

### Abkürzungsverzeichnis

AAS	Atomabsorptionsspektrometer
AbfKlärV	Klärschlammverordnung
ATV	Abwassertechnische Vereinigung
CAL- P	Calciumacetatlactat- P
Ca-P- Variante	CaHPO <sub>4</sub> - Variante
DL- P	Doppellactat- P
EU	Europäische Union
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
Fe <sub>ox</sub>	oxalatlösliches Eisen
GD	Grenzdifferenz
GK	Gehaltsklasse
Hy	Hyperphosphat
ICP	Induced Coupled Plasma
K0	Kontrolle
KS Gö	Klärschlamm Göttingen
KS Sh	Klärschlamm Salzhausen
KS	Klärschlamm, Klärschlämme
Mill	Million
Mol. Fe : P	molares Fe : P- Verhältnis
P- Sorp	Phosphat-Sorption
P	Phosphat, Phosphor
P <sub>i</sub> - Konz	Orthophosphat-Konzentration
P <sub>ox</sub>	oxalatlösliches Phosphat
Qs	Quarzsand

## VI

r	Korrelationskoeffizient
$r^2$	Bestimmtheitsmaß
TM	Trockenmasse
TSP	Triplesuperphosphat
Tukey <sub>0,05</sub>	signifikante Unterschiede nach Durchführung eines Tukeytestes bei 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
WG	Weidelgras
WK	Wasserkapazität

## VII

### Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Abhängigkeit des Maisertrages und des P- Entzuges von der P- Applikation zum Boden Börry P-80 .....	14
Abbildung 2:	Abhängigkeit des Maisertrages und des P- Entzuges von der P- Applikation zum Quarzsand .....	15
Abbildung 3:	Abhängigkeit des Maisertrages und des P- Entzuges von der P- Applikation zum Boden Elliehausen .....	16
Abbildung 4:	Abhängigkeit des Maisertrages und des P- Entzuges von der P- Applikation zum Boden Rehburg-Loccum .....	17
Abbildung 5:	Abhängigkeit des Maisertrages und des P- Entzuges von der P- Applikation zum Boden Düshorn (Brache) .....	18
Abbildung 6:	Abhängigkeit des Maisertrages und des P- Entzuges von der P- Applikation zum Boden Börry P-0 .....	19
Abbildung 7:	Beziehungen zwischen den Bodengehalten an oxalatlöslichem Eisen (Fe <sub>ox</sub> ) und der P- Sorption in zwei P- Varianten eines Schluffbodens (Börry P-0, P-80) 1 Monat nach der KS- Applikation .....	45
Abbildung 8:	Beziehungen zwischen den Bodengehalten an oxalatlöslichem Eisen (Fe <sub>ox</sub> ) und der P- Sorption in zwei P- Varianten eines Lehmbodens (Dorstadt P-0, P-20) ein Monat nach der KS- Applikation .....	46
Abbildung 9:	Beziehungen zwischen den Bodengehalten an oxalatlöslichem Eisen (Fe <sub>ox</sub> ) und der P- Sorption in drei Sandböden (Düshorn (Brache), P-22; Hodenhagen P-22) ein Monat nach der KS- Applikation .....	46
Abbildung 10:	Abhängigkeit des P- Entzuges des Weidelgrases vom DL-P-Gehalt des Bodens nach KS- Applikation .....	74
Abbildung 11:	Abhängigkeit des P- Entzuges des Weidelgrases von der P <sub>i</sub> - Konzentration der Bodenlösung nach KS- Applikation .....	74

## VIII

Abbildung 12:	Abhängigkeit des P- Entzuges des Weidelgrases von der P- Sorption des Bodens nach KS- Applikation .....	75
Abbildung 13:	Abhängigkeit des P- Entzuges des Weidelgrases vom $Fe_{ox}$ - Gehalt des Bodens nach KS- Applikation .....	75
Abbildung 14:	Abhängigkeit des P- Entzuges des Weidelgrases vom $Fe_{ox}$ - Gehalt des Bodens nach KS- Applikation .....	76
Abbildung 15:	Abhängigkeit des P- Entzuges des Weidelgrases vom molaren Fe: P- Verhältnis der Klärschlämme .....	76
Abbildung 16:	Abhängigkeit der $P_i$ - Konzentration vom DL-P-Gehalt des Bodens nach KS- Applikation .....	79
Abbildung 17:	Abhängigkeit der $P_i$ - Konzentration von der P- Sorption des Bodens nach KS- Applikation .....	79
Abbildung 18:	Abhängigkeit der $P_i$ - Konzentration vom Bodengehalt an $Fe_{ox}$ nach der KS- Applikation .....	80
Abbildung 19:	Abhängigkeit der $P_i$ - Konzentration in der Bodenlösung vom Boden- pH nach der KS- Applikation .....	80
Abbildung 20:	Abhängigkeit der $P_i$ - Konzentration vom molaren Fe: P- Verhältnis der Klärschlämme .....	81
Abbildung 21:	Abhängigkeit der P- Sorption vom $Fe_{ox}$ - Gehalt des Bodens nach der KS- Applikation .....	81
Abbildung 22:	Abhängigkeit der P- Sorption vom Boden- pH nach der KS- Applikation .....	82
Abbildung 23:	Abhängigkeit der P- Sorption vom molaren Fe: P- Verhältnis der Klärschlämme .....	82
Abbildung 24:	Abhängigkeit des Maisertrages und des P- Entzuges von der P- Applikation zum Lehmboden Moschtohor .....	90
Abbildung 25:	Abhängigkeit des Maisertrages und des P- Entzuges von der P- Applikation zum Sandboden Meetkenana .....	91

## IX

Abbildung 8.1:	Abhängigkeit des Rotkleeertrages und des P- Entzuges von der P- Applikation zum Quarzsand .....	119
Abbildung 8.2:	Abhängigkeit des Rotkleeertrages und des P- Entzuges von der P- Applikation zum Boden Elliehausen .....	120
Abbildung 8.3:	Abhängigkeit des Rotkleeertrages und des P- Entzuges von der P- Applikation zum Boden Rehbürg-Loccum .....	121
Abbildung 8.4:	Abhängigkeit des Rotkleeertrages und des P- Entzuges von der P- Applikation zum Boden Düshorn (Brache) .....	122
Abbildung 8.5:	Abhängigkeit des Rotkleeertrages und des P- Entzuges von der P- Applikation zum Boden Börry P-0 .....	123
Abbildung 8.6:	Abhängigkeit des Rotkleeertrages und des P- Entzuges von der P- Applikation zum Boden Börry P-80 .....	124
Abbildung 8.7:	Abhängigkeit des Weidelgrasertrages und des P- Entzuges von der P- Applikation zum Quarzsand .....	125
Abbildung 8.8:	Abhängigkeit des Weidelgrasertrages und des P- Entzuges von der P- Applikation zum Boden Elliehausen ...	126
Abbildung 8.9:	Abhängigkeit des Weidelgrasertrages und des P- Entzuges von der P- Applikation zum Boden Rehbürg-Loccum .....	127
Abbildung 8.10:	Abhängigkeit des Weidelgrasertrages und des P- Entzuges von der P- Applikation zum Boden Düshorn (Brache) .....	128
Abbildung 8.11:	Abhängigkeit des Weidelgrasertrages und des P- Entzuges von der P- Applikation zum Boden Börry P-0 .....	129
Abbildung 8.12:	Abhängigkeit des Weidelgrasertrages und des P- Entzuges von der P- Applikation zum Boden Börry P-80 ....	130

# X

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kenndaten der gefriergetrockneten applizierten Klärschlämme .....	8
Tabelle 2:	Kenngößen der Versuchsböden .....	9
Tabelle 3:	P- Düngungsvarianten des dreijährigen Experimentes .....	10
Tabelle 4:	Relativerträge der Rotkleetrockenmasse (Summe von 3 Schnitten) nach der P-Düngung in Höhe von 187 mg P je Gefäß zum Mais (Vorfrucht) .....	20
Tabelle 5:	Relative P-Entzüge der Rotkleepflanzen (Summe von 3 Schnitten) als 2. Kultur nach einer P-Düngung von 187 mg P/Gefäß zu Versuchsbeginn .....	20
Tabelle 6:	Relativerträge der Weidelgrastrockenmasse (Summe von 3 Schnitten) nach der P-Düngung in Höhe von 187 mg P je Gefäß zu Versuchsbeginn .....	21
Tabelle 7:	Relative P-Entzüge der Weidelgraspflanzen (Summe von 3 Schnitten) als 3. Kultur nach einer P-Düngung von 187 mg P/Gefäß zu Versuchsbeginn .....	22
Tabelle 8:	Übersicht über die relativen P-Entzüge nach Klärschlammdüngung mit einer P- Gabe von 187 mg P Gefäß durch Mais, Rotklee und Weidelgras (WG) auf verschiedenen Böden (P-Entzug nach CaHPO <sub>4</sub> -Düngung = 100 %) .....	24
Tabelle 9:	Kenndaten der verwendeten Böden (Korngrößenanteile, CaCO <sub>3</sub> - Gehalt und Humusgehalt nach Angaben der LUFA Hameln) .....	26
Tabelle 10:	Versuchsaufbau des zweijährigen Experimentes .....	27
Tabelle 11:	Absolut- und Relativerträge der Gesamttrockenmasse je Gefäß des Weidelgrases (3 Schnitte) .....	29

## XI

Tabelle 12:	Absolute und relative P-Entzüge je Gefäß des Weidelgrases (3 Schnitte) .....	30
Tabelle 13:	Einfluss einer Kalkung (0,72g CaO / kg Boden) auf den Ertrag (Summe von 3 Schnitten) und P-Entzug von Weidelgras ohne P-Düngung (Mittelwerte von 3 Wiederholungen) .....	32
Tabelle 14:	Orthophosphatkonzentration ( $P_i$ ) in der Bodenlösung ( $\mu\text{g l}^{-1}$ ) von 5 Schluffböden nach Inkubation von 1, 6 und 12 Monaten, P-Zugabe: 30mg P / kg Boden entsprechend 187 mg P / Gefäß .....	38
Tabelle 15:	Orthophosphatkonzentration ( $P_i$ ) in der Bodenlösung ( $\mu\text{g l}^{-1}$ ) von 4 Sandböden nach Inkubation von 1, 6 und 12 Monaten, P-Zugabe: 30mg P / kg Boden entsprechend 187 mg P / Gefäß .....	39
Tabelle 16:	P-Sorption von 5 Schluffböden 1 Monat bzw. 6 und 12 Monate nach der P-Düngung, 30 mg P / kg Boden entsprechend 187 mg P / Gefäß .....	42
Tabelle 17:	P-Sorption von 4 Sandböden 1 Monat bzw. 6 und 12 Monate nach der P-Düngung, 30 mg P / kg Boden entsprechend 187 mg P / Gefäß .....	43
Tabelle 18:	Einfluss von Klärschlamm (Höhe der P-Gabe) und Inkubationszeit (1, 6 und 12 Monate) auf die relative P-Sorption der Böden (P-Sorption der Böden ohne P = 100) .....	44
Tabelle 19:	pH-Werte der Böden 1 Monat nach der Düngung mit 187 mg P pro Gefäß (Mittelwerte aus 4 Wiederholungen) .....	50
Tabelle 20:	Wichtige Kenndaten der gefriergetrockneten 13 Klärschlämme .....	59
Tabelle 21:	Kenngößen des Versuchsbodens Düshorn (Brache) .....	60

## XII

Tabelle 22:	Versuchsvarianten der Gefäßversuche zur Prüfung von 13 Klärschlämmen auf ihre P- Düngewirksamkeit (P-Applikation: 30 mg P / kg Boden) .....	61
Tabelle 23:	Trockenmasseertrag und P-Entzug des Weidelgrases in Abhängigkeit von der mineralischen P-Quelle (1. bis 3. Schnitt) sowie die Relativwerte bezogen auf die Kontrolle (K0) ohne P-Düngung .....	63
Tabelle 24:	Trockenmasseerträge des Weidelgrases in Abhängigkeit von der P-Quelle (1. bis 3. Schnitt) sowie die Relativerträge bezogen auf die Kontrolle (K0) ohne P-Düngung .....	65
Tabelle 25:	P-Entzüge des Weidelgrases in Abhängigkeit von den P-Quellen (1. bis 3. Schnitt) sowie die Relativwerte bezogen auf die Kontrolle (K0) ohne P-Düngung .....	66
Tabelle 26:	Relative P-Entzüge aus den 13 Klärschlämmen bezogen auf die P- Entzüge aus TSP (3 Gruppen) (P-Entzug aus Triplesuperphosphat = 100 %) .....	66
Tabelle 27:	TM-Ertrag und P-Entzug von Weidelgras nach Applikation von Fe(OH) <sub>3</sub> (Variante Fe 1, Fe 2), Ca(OH) <sub>2</sub> (Ca 1, Ca 2) bzw. Fe(OH) <sub>3</sub> /Ca(OH) <sub>2</sub> (Variante Fe/Ca); Kontrolle = 100 % ....	68
Tabelle 28:	Einfluss der P- Mineral- und Klärschlammdüngung (KS) auf den DL-Phosphatgehalt, die P <sub>i</sub> - Konzentration der Bodenlösung und die pH-Werte des humosen Sandbodens 30 Tage nach der Düngerapplikation .....	70
Tabelle 29:	Einfluss der P- Mineral- und Klärschlammdüngung (KS) auf die P-Sorption, die Bodengehalte an oxalatlöslichem Fe ( Fe <sub>ox</sub> ) und Phosphor ( P <sub>ox</sub> ) des humosen Sandbodens 30 Tage nach der Düngerapplikation .....	71
Tabelle 30:	Bestimmtheitsmaße für 6 lineare Regressionen .....	73
Tabelle 31:	Bestimmtheitsmaße zwischen verschiedenen Parametern des Bodens bzw. der Klärschlämme .....	78



### XIII

Tabelle 32:	Kenndaten der gefriergetrockneten, applizierten Klärschlämme .....	87
Tabelle 33:	Kenngößen der ägyptischen Versuchsböden .....	88
Tabelle 34:	Versuchsaufbau und Design des Gefäßversuches in der Klimakammer .....	89
Tabelle 8.1:	EU-Grenzwertvorschläge für organische Schadstoffe im Klärschlamm bei landwirtschaftlicher Verwertung a) .....	104
Tabelle 8.2:	EU-Grenzwertvorschläge für Schwermetalle im Klärschlamm zur landwirtschaftlichen Verwertung a), (Grenzwerte können alternativ auf Trockenrückstand oder auf Phosphorgehalt bezogen werden) .....	104
Tabelle 8.3:	Analysendaten der zwei gefriergetrockneten, applizierten Klärschlämme .....	105
Tabelle 8.4:	P-Sorption von 5 Lehmböden (absolut und relativ) 1, 6 und 12 Monate nach der P-Düngung .....	106
Tabelle 8.5:	P-Sorption von 4 Sandböden (absolut und relativ) 1, 6 und 12 Monate nach der P-Düngung .....	107
Tabelle 8.6:	P <sub>i</sub> - Konzentration (mg L <sup>-1</sup> ) in der Bodenlösung 1 Monat, 6 und 12 Monate nach der P- Applikation zu den 5 Lehmböden .....	108
Tabelle 8.7:	P <sub>i</sub> - Konzentration (mg L <sup>-1</sup> ) in der Bodenlösung 1 Monat, 6 und 12 Monate nach der P- Applikation zu den 4 Sandböden .....	109
Tabelle 8.8:	pH- Werte der Lehmböden 1 Monat, 6 und 12 Monate nach der P- Applikation (CaCl <sub>2</sub> 0,01 M) .....	110
Tabelle 8.9:	pH- Werte der Sandböden 1 Monat, 6 und 12 Monate nach der P- Applikation (CaCl <sub>2</sub> 0,01 M) .....	111
Tabelle 8.10:	P- Gehalte der Lehmböden (CAL- Extraktion) 1 Monat, 6 und 12 Monate nach der P- Applikation (mg P 100g <sup>-1</sup> ) .....	112

## XIV

Tabelle 8.11:	P- Gehalte der Sandböden 1 Monat, 6 und 12 Monate nach der P- Applikation ( $\text{mg P } 100\text{g}^{-1}$ ) .....	113
Tabelle 8.12:	Relativerträge an Maistrockenmasse je Gefäß .....	114
Tabelle 8.13:	Relative P- Entzüge des Mais je Gefäß .....	115
Tabelle 8.14:	Analysendaten zu den 13 Klärschlämmen (Gehalte in der TM), nach LUFA- Hameln .....	116
Tabelle 8.15:	Mengen an gefriergetrocknetem Klärschlamm, die bei einer Applikation von ca. 30 mg P / kg Boden in die Gefäße eingearbeitet wurden sowie die je kg Boden eingesetzten Fe- und CaO- Mengen .....	117
Tabelle 8.16:	Absolute und relative Trockenmasseerträge und P- Entzüge des Maises in Abhängigkeit von der P-Quelle auf dem Lehmboden Moschtohor .....	118
Tabelle 8.17:	Absolute und relative Trockenmasseerträge und P- Entzüge des Maises in Abhängigkeit von der P-Quelle auf dem Sandboden Meetkenana .....	118

## 1 Einleitung

Gegenwärtig findet in der Europäischen Union (EU) und auch in Deutschland eine intensive Diskussion über die Verwertung von Klärschlämmen (KS) statt (Bannick, 2001, Hahn, 2001).

Ursache dafür ist, dass die EU- Klärschlammrichtlinie (86 / 278 / EWG) aus dem Jahr 1986 überarbeitet wird und dann die deutsche Klärschlammverordnung (Abf. Klär V) aus dem Jahr 1992 ebenfalls geändert werden muss. Bedeutsam an den geplanten Änderungen sind neue bzw. niedrigere Grenzwerte für organische Schadstoffe (Tabelle 8.1, Anhang) bzw. für Schwermetalle (Tabelle 8.2, Anhang) wie sie für die drei Etappen (2005, 2015, 2025) angestrebt werden (Bannick und Hahn, 2001).

Was diese neuen Richtlinien für die Verwertung der Klärschlämme in Deutschland bedeuten, ist noch unklar. In Deutschland fallen gegenwärtig (1993) ca. 2,4 Mill. t KS- Trockenmasse an, das sind innerhalb der EU 40 %. In der EU gelangen ca. 34 % in die Landwirtschaft, 37 % auf Deponien, 11 % werden verbrannt, ca. 5 % werden kompostiert (Bannick et al., 2002). In Deutschland sind die Relationen ähnlich (Bergs, 1998, ATV 1996). In Niedersachsen gelangen 74 % in den Landbau (Gunreben, 2000).

Sollte die KS- Menge ansteigen, die nicht mehr in die Landwirtschaft gelangen soll, so hat das mehrere ökonomische Folgen. Eine Verbrennung wird sehr teuer und der Preis für das Abwasser, den die Bevölkerung bezahlen muss, steigt. Landwirte, die den KS als Nährstoffquelle genutzt haben, müssten Dünger kaufen. Diese Problematik ist besonders für das Nährelement Phosphor bedeutsam.

Wenn die bisherige KS- Menge von ca. 2,4 Mill. t einen P- Gehalt von ca. 15 kg P / t enthält (Schaaf und Janssen, 2000), so wären dies 36 000 000 kg / Jahr. Wenn die mittlere P- Abfuhr ca. 25 kg P / ha Ackerfläche und Jahr beträgt, so könnte die P- Versorgung von 1,4 Millionen ha Ackerland allein über den KS erfolgen. Das ist eine ökonomisch relevante Größe. Diese Kalkulation gilt sicher nicht nur für Deutschland, sondern generell.

Außerdem sind die P- Vorräte der Welt begrenzt (Wachtel, 1976) und schon aus Gründen des Ressourcenschutzes sollte soviel KS wie möglich als Nährstoffquelle genutzt werden.

Die Landwirte müssen davon ausgehen, dass die KS die festgelegten Grenzwerte für Schadstoffe einhalten. Für deren Kontrolle sind sie nicht zuständig. Aber sie haben eigene Forderungen an die Qualität der KS. Sie sind vorrangig an den Nährstoffen in den KS interessiert. Hier in dieser Arbeit geht es um das Phosphat. Durch die Einführung der P- Elimination aus dem Klärwasser und seine Überführung in den KS in den Klärwerken mit Chemikalien wie Eisen- und Aluminium- Salzen bzw. Kalk sind die P- Einträge in die Fließgewässer stark zurückgegangen. Der Anteil der Kommunen an den insgesamt in die Fließgewässer eingeleiteten Phosphatmengen beträgt nur noch 30 % (Umweltbundesamt, 1997). Dieser Effekt war und ist erwünscht. Das eliminierte Phosphat ist nun in den KS gebunden. Die Landwirte sind sehr an diesem Phosphat interessiert. Es sollte eine hohe Löslichkeit besitzen, damit es von den Pflanzen gut aufgenommen werden kann. Hierbei gibt es jedoch ein Problem, das von einzelnen Autoren unterschiedlich gesehen wird. Interessant ist vor allem die Beurteilung der Phosphordüngewirkung von KS aus Klärwerken mit P- Elimination durch Eisen-Salze.

Bemerkenswert sind die Untersuchungen von Baran (1985). Er setzte Klärschlammuspensionen aus mechanisch / biologischer Reinigung zur Phosphateliminierung bis auf 1 – 2 mg P / l im Filtrat folgende Chemikalien zu:

1. nur  $\text{FeCl}_3$  oder
2.  $\text{FeCl}_3$  und dann zum abgetrennten Schlamm  $\text{CaO}$ .

Die separierten Klärschlämme wurden getrocknet, fein gemahlen und dann verschiedenen Böden (P- Gehaltsklasse A und B sowie pH-Werten 5,4 bis 7,7) zugesetzt und mit Weidelgras besät. Während das Weidelgras (7 Schnitte) in der 2. Variante weitgehend unabhängig vom Boden die gleichen P- Mengen aufnahm (92 – 103 %) wie aus Superphosphat (100 %), wurden auf den 3 Böden mit KS, die nur  $\text{FeCl}_3$  zur P- Fällung erhalten hatten, nur 51 % (Karbonathaltiger Boden) bzw. weniger als 11 % (Sandboden, Parabraunerde

mit pH-Werten < 5,5) des Phosphates im Vergleich zu Superphosphat aufgenommen. Die alleinige  $\text{FeCl}_3$ - Applikation zu dem biologisch aufbereiteten KS reduzierte also dessen P- Verfügbarkeit für die Graspflanzen in allen drei Böden im Vergleich zur kombinierten Anwendung von  $\text{FeCl}_3$  und  $\text{Ca(OH)}_2$ . Diesem Verhalten der Pflanzen widersprechen aber die chemischen Kenngrößen der KS (nach Tabelle 3.4 und 3.5 von Baran):

Variante	Desorbierte P- Menge ( $\mu\text{g P / l}$ ) (nach 6 Extraktionen)	$\text{H}_2\text{O}$ lösliches- P (% vom ges. P)	austauschbares $^{32}\text{P}$ (% vom ges. P)
1. $\text{FeCl}_3$	29	0,13	3,0
2. $\text{FeCl}_3$ + $\text{Ca(OH)}_2$	19	0,02	2,1

Das Phosphat in dem KS nur mit  $\text{FeCl}_3$ - Fällung (1. Variante) war nach diesen Angaben also sogar chemisch besser löslich als in der  $\text{FeCl}_3$  /  $\text{Ca(OH)}_2$  – Variante, obwohl die Pflanzen aus ihr weniger P aufgenommen hatten. Warum das Phosphat aus den Varianten nur mit  $\text{FeCl}_3$ - Zusatz von den Pflanzen weniger gut aufgenommen wurde als bei einem Zusatz von  $\text{FeCl}_3$  +  $\text{Ca(OH)}_2$ , bleibt hier somit unklar.

Die vergleichende Untersuchung von Suntheim und Dittrich (1996) zur P- Aufnahme von Mais aus einem sandigen Lehmboden mit einem P- Gehalt von 2,7 mg DL- P / 100 g und der Applikation verschiedener Klärschlämme ergab eine deutliche Unterlegenheit der P- Aufnahme der Pflanzen nach Applikation von Fe- haltigen KS im Vergleich zu Al- haltigem KS oder zu Bioschlamm bzw. Superphosphat.

In vergleichenden Untersuchungen mit Klärschlämmen, bei denen Al- und Fe- Salze zur P- Fällung eingesetzt waren, ergab sich, dass Hafer aus KS mit Fe- Fällung deutlich weniger P aufnahm als aus KS mit Al- Fällung bzw. Dicalciumphosphat (Werner, 1976). So lag die P- Ausnutzung aus dem

eisenhaltigen KS Eutin auf dem Boden Gleichungen mit pH 7 um 18 % niedriger als nach Dicalciumphosphatdüngung!

Aus den Untersuchungen von Frossard et al. (1996) mit zwei Böden (Tonboden, Lehmboden) und vier KS unterschiedlicher Fe: P- Verhältnisse mit *Lolium perenne* als Versuchspflanze geht folgendes hervor: Im Vergleich zur P- Düngung mit  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  nahmen die Graspflanzen auf dem Tonboden nur 62 bis 77 % der P- Menge auf, wenn sie mit vier eisenhaltigen KS gedüngt waren. Auf dem Lehmboden lag der relative Anteil der P- Aufnahme bei nur 72 – 86 % nach KS- Düngung im Vergleich zu  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ .

Aus all diesen Beispielen leitet sich ab, dass die zur Prüfung verwendeten Kulturpflanzen Mais, Weidelgras und Hafer offenbar nicht in der Lage waren, die gleichen P- Mengen aus KS mit P- Eliminierung im Abwasser durch Eisensalze aufzunehmen wie aus solchen mit Al- oder Ca- Konzentrierung.

Man kann davon ausgehen, dass in Deutschland 1. Mill. t Chemikalien in der Abwasserbehandlung, davon ca. 500 000 t Eisensalze, eingesetzt werden (Hahn, 2000, Scheffer, 2000). In den KS sind also Eisenverbindungen, die vermutlich in sehr unterschiedlichem Umfang Phosphat gebunden haben, enthalten. Daraus ergibt sich die Frage, welche P- Düngewirkung solche KS haben, wenn sie zur Düngung eingesetzt werden. Dabei interessiert nicht nur die P- Menge, die die Pflanzen aufnehmen, sondern auch die P- Verfügbarkeit im Boden. Denn, wenn eisenreiche KS in den Boden gelangen, ist denkbar, dass diese auch Phosphationen des Bodens binden, also dessen P- Verfügbarkeit sogar senken können. **Es war deshalb das Ziel der geplanten Untersuchungen**, KS mit unterschiedlichen Eisengehalten als P- Dünger einzusetzen und deren P- Düngewirksamkeit zu prüfen. Dabei sollten keine KS durch gezielte Fe- Salzzugaben selbst produziert werden, sondern KS geprüft werden, wie sie ganz konkret in Klärwerken mit variierter P- Elimination anfallen.

Im **Teil I** der Untersuchungen sollen folgende Fragen geklärt werden:

- Wie verlaufen Trockenmassebildung und P- Entzug von Mais, Rotklee und Weidelgras, wenn sie auf Böden (Schluffböden, Sandböden, Quarzsand) mit hohem und niedrigem P- Gehalt nacheinander angebaut werden und P als  $\text{CaHPO}_4$  oder in Form von KS mit engem bzw. weitem molarem Fe: P- Verhältnis einen Monat vor der Saat zum Mais angewendet werden?
- Wie verlaufen Wachstum und P- Entzug von Weidelgras, wenn dieses auf verschiedenen Böden (siehe oben) wächst und die P- Quellen 13 Monate vor der Saat ausgebracht werden?
- Wie verändern sich Parameter der P- Verfügbarkeit in den Böden (P- Sorption, Orthophosphatkonzentration der Bodenlösung) 1, 6 bzw. 12 Monate nach der P- Applikation?

Im **Teil II** soll die Frage geklärt werden, ob sich mit einem Spektrum von 13 Klärschlämmen unterschiedlichen molaren Fe: P- Verhältnisses (1:0,24 bis 1:7,94 entsprechend 4.2:1 bis 0,13:1) ein für Sandböden tolerables Fe: P- Verhältnis der KS ermitteln lässt. Als Versuchspflanze dient Weidelgras.

Im **Teil III** soll die P- Düngewirkung in zwei ägyptischen Böden an Mais in einem Kurzzeitversuch getestet werden.

## Teil I

### **2 Mehrjährige Experimente zur P- Aufnahme von Kulturpflanzen und zur P- Verfügbarkeit in Böden nach Applikation von zwei Klärschlämmen bzw. $\text{CaHPO}_4$**

#### **2.1 Generelle Ziele**

**(A)** Klärschlämme mit unterschiedlichem molaren Fe: P- Verhältnis und Orthophosphat sind in verschiedene Böden einzubringen und kurzfristig (1 Monat) und längerfristig (12 Monate) im Boden zu inkubieren. Danach ist die P- Aufnahme verschiedener Kulturpflanzen ein- bzw. mehrjährig vergleichend zu prüfen. (Kapitel 2.2 und 2.3)

**(B)** Parallel dazu sollen Parameter der P – Verfügbarkeit in den Böden in längeren Zeiträumen (1, 6 bzw. 12 Monate) gemessen werden. Diese Parameter sollen zur Erklärung möglicherweise auftretender Unterschiede in der P – Aufnahme der Pflanzen dienen (Kapitel 2.4)

#### **2.2 Dreijähriges Experiment zur P – Aufnahme der Pflanzen**

##### **2.2.1 Vorbemerkungen und Versuchsziele**

Das Ziel dieses Experimentes war, Wachstum (Trockenmassebildung) und P- Aufnahme von den drei aufeinander folgenden Kulturpflanzen Mais, Rotklee und Weidelgras in Abhängigkeit von der P- Düngung mit eisenhaltigen Klärschlämmen (KS) im Vergleich zum "P- Mineraldünger"  $\text{CaHPO}_4$  in den Jahren 1999, 2000 und 2001 zu prüfen. Dabei wurde so vorgegangen, dass die P- Dünger in die Böden eingebracht und 4 Wochen später die erste Kultur, der Mais, ausgesät wurde. Die Auswahl der Kulturpflanzen hat folgende Begründung. Mais ist eine Pflanze, die auf eine P- Mangelsituation stärker reagiert als z.B. andere Kulturpflanzen (Römer et al. 1998). Sie müsste als Testpflanze auf die Nutzbarkeit von KS – P gut geeignet sein. Rotklee scheidet nach Gerke (1995) organische Säuren aus, wenn die P- Versorgung niedrig ist. Diese Pflanze könnte eventuell P, das an Fe- Oxide gebunden ist, mobilisieren. Deshalb kam sie als Testpflanze in Frage. Weidelgras hat den Vorteil, dass



man mehrere Schnitte ernten und eventuell die P- Nachlieferung innerhalb eines Jahres verfolgen kann. Da ein P- Dünger auf Böden mit niedrigen P- Gehalten sicher am besten auf seine P- Düngewirkung geprüft werden kann, sind Böden ausgesucht worden mit möglichst niedrigem Gehalt an lactatlöslichem Phosphat. Aber der VDLUFA war auch daran interessiert, mehr über die KS- Wirkung auf Böden mit ausreichend hohen P- Gehalten zu erfahren (Merkel, 1999 pers. Mitt.). Deshalb wurde auch ein Boden mit hohem P- Gehalt (Börry P-80) mit untersucht.

## **2.2.2 Versuchsanlage und Durchführung**

### **2.2.2.1 Benutzte Klärschlämme**

Die zwei benutzten Klärschlämme stammten aus den Kläranlagen von Göttingen (KS Gö) und Salzhausen (KS Sh). Alle Klärschlammproben wurden aus frischem Material im März 1999 gewonnen. Für die Analysen und Gefäßversuche wurden Unterproben gefriergetrocknet. Wichtige Kenndaten der zwei benutzten Klärschlämme sind in Tabelle 1 wiedergegeben. Im Klärwerk Salzhausen wurde nur  $\text{FeCl}_3$  zur P- Fällung im Belebungsbecken eingesetzt, während im Klärwerk Göttingen  $\text{FeSO}_4$  zur Anwendung kam. Außerdem wurde dem Schlamm in Göttingen bei der Konditionierung  $\text{FeCl}_3$  und  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  zugesetzt. Der Klärschlamm Göttingen (KS Gö) wurde vor der Applikation in die Gefäße gefriergetrocknet und gemahlen, um eine Homogenisierung des grobstrukturierten Klärschlammes zu erreichen und um gleiche KS- Mengen mit identischen P- Gehalten für die jeweiligen Wiederholungen einwiegen zu können. Diese Vorbehandlung war für den Klärschlamm Salzhausen nicht erforderlich. Dessen KS- Suspension (3,6% TM) war homogen und konnte direkt volumetrisch abgemessen im Originalzustand in die Böden eingearbeitet werden. Die Trocknung von KS soll bis zu Trocknungstemperaturen von  $400\text{ }^\circ\text{C}$  keine Auswirkung auf die P- Löslichkeit und P- Wirksamkeit haben (Werner, 1976). Deshalb wurde nicht erwartet, dass die Gefriertrocknung negative oder positive Auswirkungen auf die P-Verfügbarkeit hat. Im Klärschlamm Göttingen betrug das molare Fe: P Verhältnis 1:0,3 und im Klärschlamm Salzhausen 1:1,1. Es wurde das molare Fe: P Verhältnis berechnet, da 1 Mol  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  theoretisch 3 Mol Phosphat binden kann. Das Verhältnis 1:0,3 wird als ein

weites, das von 1: 1,1 als relativ enges Verhältnis angesehen. Infolge der Zufuhr von  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  bei der Konditionierung des Klärschlammes Göttingen werden bei dieser Anwendung mit 30 mg P gleichzeitig 493 mg Ca  $\text{kg}^{-1}$  Boden appliziert. Bei dem Klärschlamm Salzhausen sind es nur 25 mg Ca. Die 493 mg Ca sind wie Tabelle 1 zeigt im wesentlichen basisch wirksam ( $\text{pH}=11,5$ ), da  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  zur Konditionierung benutzt wird. Diese hohe Basizität dürfte Auswirkungen auf die pH-Werte der Böden und eventuell die P- Verfügbarkeit haben, was später (Diskussion der Ergebnisse) zu bedenken ist. Als mineralische Vergleichssubstanz wurde bewusst  $\text{CaHPO}_4$  und nicht das wasserlösliche Triplephosphat benutzt, da die Schlämme kaum wasserlösliches Phosphat enthalten dürften.

**Tabelle 1:** *Kenndaten der gefriergetrockneten applizierten Klärschlämme (weitere Analysendaten vgl. Tabelle 8.3, Anhang)*

		Göttingen (Gö)	Salzhausen (Sh)
TM	(%)	32,4	3,6
P	( $\text{kg t}^{-1}$ TM)	12,0	25,0
Fe	( $\text{kg t}^{-1}$ TM)	65,0	39,0
Ca	( $\text{kg t}^{-1}$ TM)	197,0	21,0
pH	( $\text{H}_2\text{O}$ )	11,5	7,0
Fe : P	Molar	1 : 0,3	1:1,1

### 2.2.2.2 Benutzte Böden

In den Versuchen sollte die Phosphataufnahme von Pflanzen aus verschiedenen Böden, die mit Klärschlamm gedüngt waren, untersucht werden. Deshalb sollten die Versuchsböden möglichst unterschiedliche Bodenarten mit differenzierten Phosphatgehalten repräsentieren. So wurden drei bindige Böden (tonige Schluffe aus Börry P-0, P-80 und Elliehausen), zwei Sandböden (Rehburg, Düshorn) und Quarzsand als P- freies Substrat ausgewählt. Die Kenndaten der eingesetzten Böden gibt Tabelle 2 wieder. Die benutzten Böden entstammen landwirtschaftlich genutzten Ackerflächen. Das Bodenmaterial wurde meistens aus der Ackerkrume (0-30 cm) des jeweiligen Standortes

entnommen. Die beiden Böden Börry P-0 und P-80 stammen aus einem längerfristigen statischen P- Düngungsversuch aus dem Gebiet um Hameln (Parabraunerde aus Löß) und enthalten mäßige ( $46 \text{ mg kg}^{-1}$ ) bis hohe P-Gehalte ( $110 \text{ mg kg}^{-1}$ ) nach der CAL- Methode. Der Boden Elliehausen ist ein sehr P- armes und humusarmes Material aus dem C – Horizont einer Parabraunerde aus Löß (westlich von Göttingen). Die Böden aus Rehburg (Kreis Nienburg) und Düşhorn (Kreis Fallingb.ostel) sind anlehmige Sand- bzw. Sandböden pleistozänen Ursprungs mit relativ niedrigen P- Gehalten. Außerdem kam Quarzsand (Sandgrube Weferlingen, Kreis Haldensleben) als Substrat zur Anwendung. Die pH-Werte ( $\text{CaCl}_2$ ) der drei schweren Böden liegen im neutralen (6,3 bis 7,2) bzw. im basischen Bereich (7,7). Die zwei Sandböden zeigen saure Reaktion (pH 4,3 bis 4,9).

**Tabelle 2: Kenngrößen der Versuchsböden**

Ort	Ton %	Schluff %	Sand %	$\text{CaCO}_3$ %	pH $\text{CaCl}_2$	Humus %	CAL <sup>1</sup> /DL <sup>2</sup> $\text{mg P kg}^{-1}$
Börry P-0	20	75	5	1,3	7,2	2,22	46
Börry P-80 <sup>3</sup>	20	75	5	0,9	6,3	2,22	110
Elliehausen	16	75	9	13,3	7,7	0,50	6
Rehb.–Loccum	8	13	79	n.b.	4,3	7,20	17
Düşhorn (Brache)	3	13	84	n.b.	4,9	4,00	34

<sup>1</sup>) bei Lehm Böden, <sup>2</sup>) bei Sandböden, n.b. = nicht bestimmt, <sup>3</sup>) Jährliche P-Düngung der Parzellen in  $\text{kg ha}^{-1}$

### 2.2.2.3 Anlage des Gefäßversuchs zur P- Aufnahme

#### 1. Versuchsjahr 1999 (Mais)

Die fünf verschiedenen Böden und Quarzsand wurden mit dem fein gemahlten und gefriergetrockneten Klärschlamm Göttingen bzw. mit der Suspension Klärschlamm Salzhausen in drei P- Stufen gedüngt. Als Bezugsbasis galten  $5 \text{ t TM des Klärschlamm Göttingen ha}^{-1}$ , weil in

Deutschland nach der Klärschlammverordnung alle 3 Jahre 5 t TM ausgebracht werden dürfen. Nach Tab. 1 enthalten 5 t KS Gö 60 kg P. Auf die Oberfläche eines Mitscherlichgefäßes (314cm<sup>2</sup>) umgerechnet wären dies 187mg P Gefäß<sup>-1</sup> d.h. ca. 30 mg P kg<sup>-1</sup> Boden. Vom KS Salzhausen wurde Schlamm mit der gleichen P- Menge eingesetzt.

Da auch sehr P- arme Substrate wie Quarzsand und der Boden Elliehausen genutzt werden sollten, war zu erwarten, dass auch schon geringere P- Gaben positive Effekte (Biomassebildung) bewirken könnten. Deshalb wurde auch mit kleineren P- Gaben: 44 bzw. 87 mg P Gefäß<sup>-1</sup> gearbeitet. So ergab sich für die P- Düngung folgendes Schema (Tabelle. 3)

**Tabelle 3: P- Düngungsvarianten**

Boden	P-Gaben ( mg P Gefäß <sup>-1</sup> / mg P kg <sup>-1</sup> Boden)			
	0 / 0	44 / 7	87 / 15	187 / 30
Börry P-0	*			*
Börry P-80	*			*
Elliehausen	*	*	*	*
Rehburg- Loccum	*	*	*	*
Düshorn Brache	*			*
Quarzsand		*	*	*

Auf Basis der entsprechenden Schlammengen und deren Fe- Gehalten ergaben sich für die Gefäße mit 187 mg P folgende Fe- Mengen: im KS Gö: 157, im KS Sh: 44 mg kg<sup>-1</sup> Boden. Vor dem Befüllen der Mitscherlichgefäße wurden in die jeweils 6 kg Boden folgende Nährstoffmengen eingearbeitet:

? 44, 87 bzw. 187 mg P (= 100, 200 bzw. 428 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) als CaHPO<sub>4</sub>, oder KS Gö bzw. KS Sh,

? 0,6 g N als Calciumnitrat Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O,

? 1,0 g K als Kaliumsulfat K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,

0,2 g Mg als Magnesiumsulfat  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,

Mikronährstoffe nach Hoagland 1:10 verdünnt, 10 ml Gefäß<sup>-1</sup> (Lösung A+B)  
(vgl. Schilling, 2000)

Fe als Fe – Sequestren, 6%- ige Lösung, 1:20 Verdünnung, 10 ml Gefäß<sup>-1</sup>.

Während des Versuchsablaufs wurden alle Gefäße dreimal mit 0,3 g N als Calciumnitrat und die Gefäße mit den Böden Börry insgesamt viermal mit 0,3 g N Gefäß<sup>-1</sup> nachgedüngt. Die Varianten wurden in vierfacher Wiederholung angesetzt. 4 Wochen nach Versuchsansatz wurden die Gefäße mit Maissamen einer frühreifen Hybride (noch ohne Sortenname) pro Gefäß besät. Es wuchsen 4 Pflanzen je Gefäß. Die Pflanzen wuchsen 90 Tage. Gegossen wurde auf ca. 70% der maximalen Wasserkapazität. Die Wasserversorgung erfolgte täglich mit entmineralisiertem Wasser. Die Gefäße standen im Drahthaus des Instituts für Agrikulturchemie unter Freiluftbedingungen. Zu Versuchsende wurden die Pflanzen in Körner und Restpflanze getrennt, bei 105 ° C getrocknet, gemahlen und der P- Analyse zugeführt. Anschließend blieben die Gefäße in der Drahthalle stehen und der Witterung ausgesetzt, so dass mineralischer Stickstoff ausgewaschen werden konnte.

## **2. Versuchsjahr 2000 (Rotklee)**

Die P- Nachwirkung der KS wurde im zweiten Versuchsjahr mit Rotklee untersucht. Am 13. März 2000 wurden die Gefäße entleert, grobe Wurzelreste des Mais entfernt und die folgenden Nährstoffmengen in die Böden eingemischt:

0,6 g N als  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,

0,6 g K als  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,

0,1 g Mg als  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

Am 24. April 2000 erfolgte die Aussaat des Rotklees Sorte TITUS (0,28 g pro Gefäß). Die N- Düngung erfolgte in allen Gefäßen, da unklar war, inwieweit eine Inokulation der Böden mit Rhizobien (Elliehausen, Quarzsand) erfolgreich sein würde oder nicht. Alle Pflanzen sollten gleiche Startbedingungen haben. Ausgesät wurde aber nur in die Gefäße ohne P und mit 187 mg P Gefäß<sup>-1</sup>, weil die niedrigen P- Gaben von 44 bzw. 88 mg P Gefäß<sup>-1</sup> im ersten Anbaujahr auf den Böden mit niedrigem P- Gehalt Pflanzen mit deutlichem P- Mangel hervorgebracht hatten. Die Pflanzen wurden wieder in der Vegetationshalle wie oben beschrieben kultiviert. Es wurden 3 Schnitte geerntet (am 13.07, am 23.08 und am 24.10.2000), die ebenfalls getrocknet, gewogen und gemahlen zur Analyse gelangten. Anschließend blieben die Gefäße in der Drahtalle stehen.

### **3. Versuchsjahr 2001 (Weidelgras)**

Im Jahr 2001 erfolgte in den Gefäßen, die in der Drahtalle standen, ein Nachbau mit Weidelgras, um weiter die Nachwirkung der P- Düngung im dritten Anbaujahr zu prüfen. Die Gefäße wurden entleert. Die Wurzelreste verblieben im Boden. Am 11. April 2001 wurden folgende Nährstoffmengen in die Böden eingemischt:

0,6 g N als  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,

0,8 g K als  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,

0,15 g Mg als  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

Dann erfolgte die Aussaat des Weidelgrases Sorte LIRASAND (0,14g pro Gefäß). Ausgesät wurde nur in die Gefäße ohne P und mit 187 mg P Gefäß<sup>-1</sup>. Die Pflanzen standen unter den gleichen äußeren Bedingungen wie der Mais und der Rotklee. Es wurden 3 Schnitte geerntet (14. Juni, 14. Juli, 9. August). Nach dem ersten und zweiten Schnitt sind 0,6 g N in Form von Ammoniumnitrat nachgedüngt worden. Nach Ermittlung der Trockenmasse kam das gemahlene Material zu P- Analyse.

#### **2.2.2.4 Pflanzenanalyse auf Phosphor**

Zur Bestimmung der Phosphatgehalte wurden die getrockneten Pflanzenproben fein vermahlen und nass verascht. 200 mg Pflanzenmaterial wurden in einem Erlenmeyerkolben mit 5 ml eines Gemisches aus konzentrierter  $\text{HNO}_3$ :  $\text{HClO}_4$ :  $\text{H}_2\text{SO}_4$  im Verhältnis 7:2:1 (v: v: v) versetzt und auf dem Sandbad mit abgestuften Temperaturerhöhungen von 80 - 220 ° C aufgeschlossen. Die Aufschlusslösung wurde in 25 ml Messkolben aufgenommen und daraus 5 ml Aliquot zur Analyse benutzt. Die P- Gehalte wurden spektralphotometrisch mit der Molybdat- Vanadat- Methode nach Scheffer und Pajenkamp (1952) ermittelt. Die Messung erfolgte bei einer Wellenlänge von 436 nm.

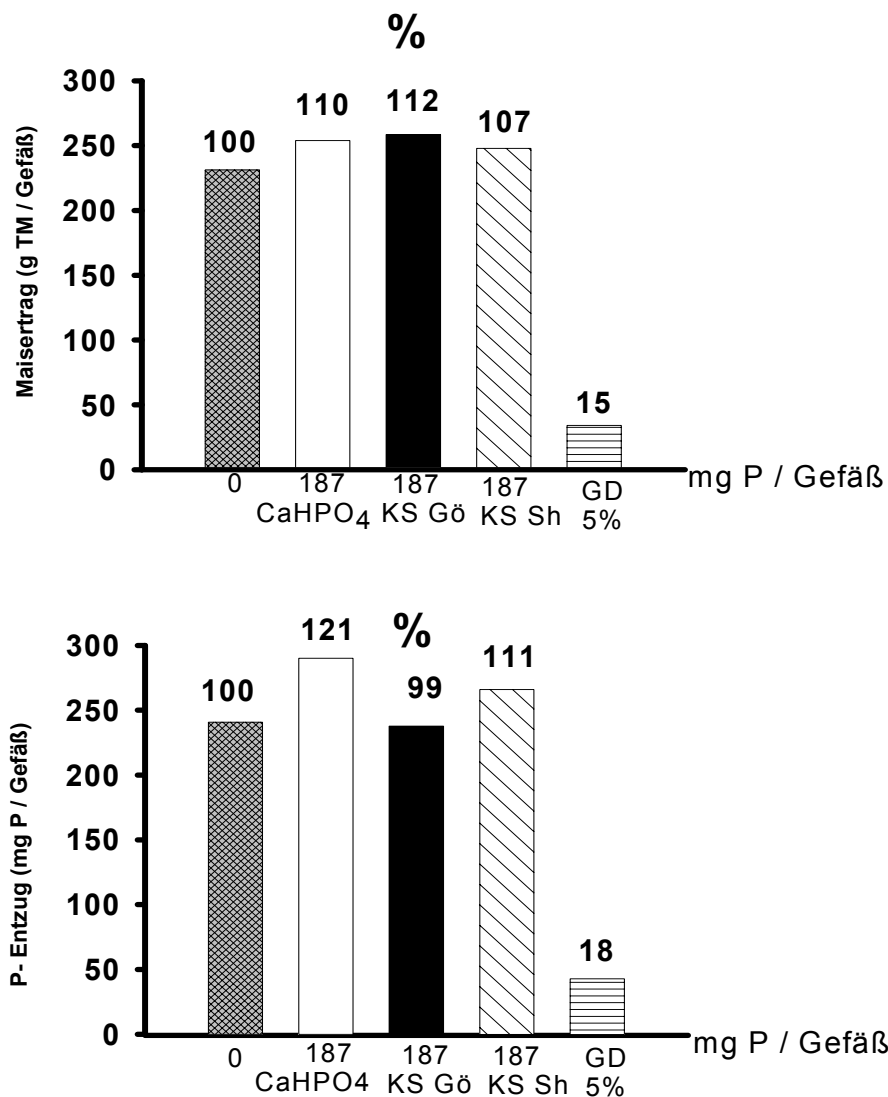
#### **2.2.2.5 Ergebnisse**

##### **Gefäßversuche mit Mais (1. Versuchsjahr): Sprossmassebildung und P-Entzüge**

##### **Maisanbau auf Boden mit hohem P-Gehalt**

Abbildung 1 zeigt, dass zwar durch die Zufuhr von  $\text{CaHPO}_4$  bzw. durch Klärschlamm der Ertrag auf dem hoch mit P versorgten Boden Börry P-80 um 7 bis 12 % gegenüber der ungedüngten Kontrolle anstieg, dass diese Anstiege aber statistisch nicht signifikant waren.

Die statistische Analyse der P-Entzüge zeigt ein interessantes Ergebnis, denn die P-Aufnahme aus der Variante KS Gö war identisch mit der der Kontrolle (0-Variante) und gleichzeitig signifikant geringer als die der Ca-P-Variante. Das heißt, der Mais hatte offenbar aus dem KS Gö zumindest rechnerisch kein P aufgenommen. Dessen P-Verfügbarkeit für die Maispflanzen war also offenbar die gleiche oder eine geringere wie die des Bodenphosphates, und sie war deutlich geringer als die von  $\text{CaHPO}_4$ . Die Verfügbarkeit des P aus KS Sh lag zwischen den beiden anderen P- Düngern. Die P-Verfügbarkeit der 3 P-Quellen zeigte also folgende Reihenfolge:  $\text{CaHPO}_4 > \text{KS Sh} > \text{KS Gö}$ .



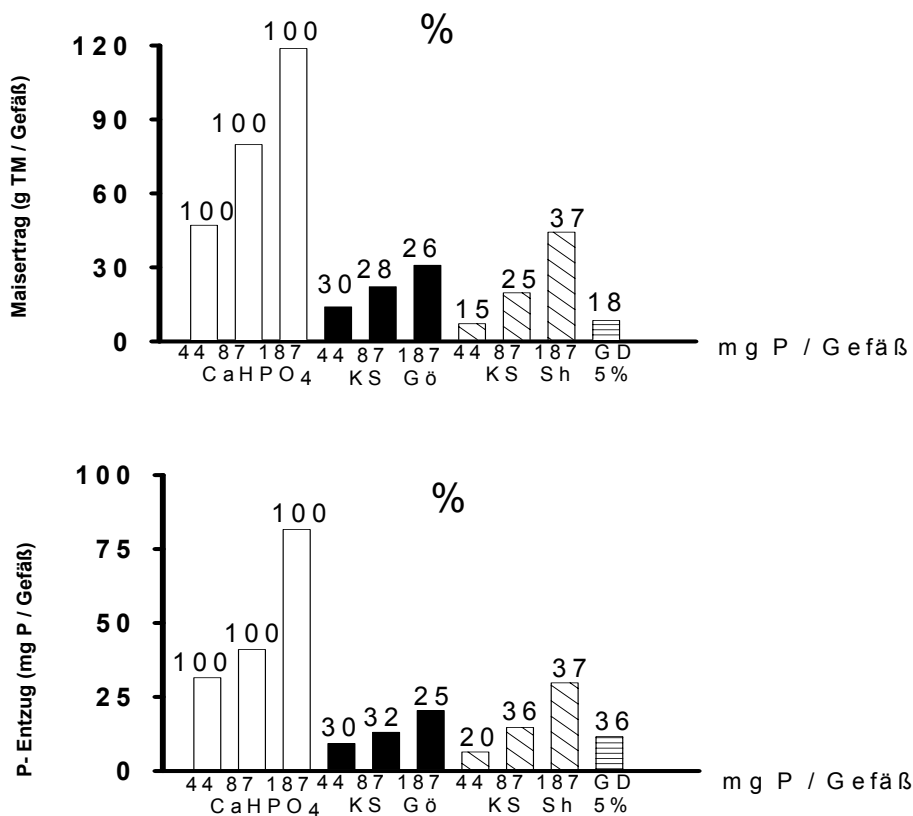
**Abbildung 1:** Abhängigkeit des Maisertrages und des P - Entzuges von der P - Applikation zum Boden Börry P - 80

### Maisanbau bei niedrigem und mäßigem P-Gehalt der Böden bzw. Substrate

Während, wie zu erwarten, auf einem Boden der Gehaltsklasse C/D durch P-Düngung trotz eventuell erhöhter P-Aufnahmen keine signifikanten Ertragswirkungen zu erwarten sind, sollten diese aber auf Böden bzw. Substraten mit niedriger bzw. mäßiger P-Versorgung auftreten. Das trifft für alle

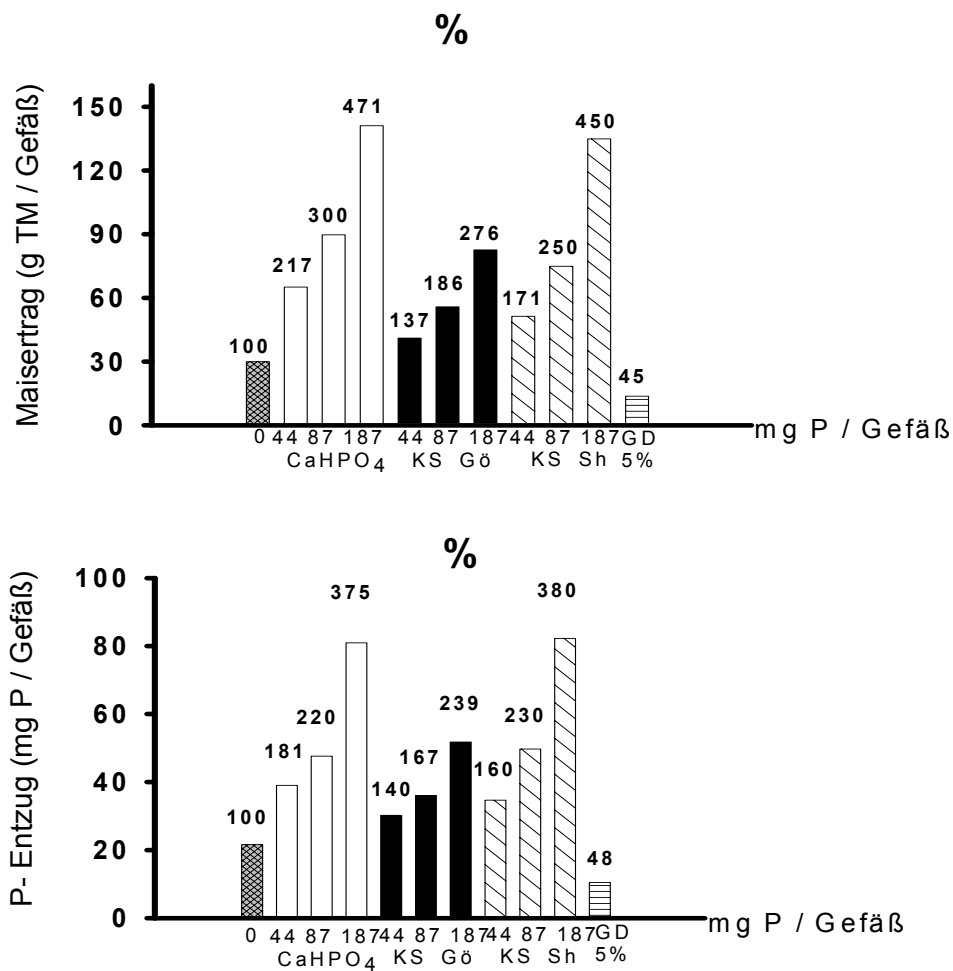


CaHPO<sub>4</sub>-Varianten tatsächlich zu, sowohl auf den sehr P-armen Substraten Quarzsand und dem Lößboden Elliehausen (Abbildung 2, 3) als auch auf den Böden Rehburg, Düşhorn und Börry P-0 (Abbildung 4, 5, 6) im Vergleich zur ungedüngten Variante (bei Quarzsand die P-44 Variante). Dabei verhalten sich die Zuwächse der Erträge meist sehr ähnlich wie die P-Entzüge. Damit kann die P-Düngewirkung der Klärschlämme (TM-Bildung und P-Entzug) mit der der CaHPO<sub>4</sub>-Variante verglichen und beurteilt werden. Lässt man den Quarzsand zunächst aus der Betrachtung der übrigen Vergleichsglieder heraus – bei beiden Klärschlämmen war dort die relative P-Aufnahme (20-37 %) und die relative TM-Bildung (15-37 %) sehr niedrig – und betrachtet zunächst die Wirkung des KS Sh mit seinem engen Fe:P - Verhältnis von 1:1,2, so zeigt sich folgendes:

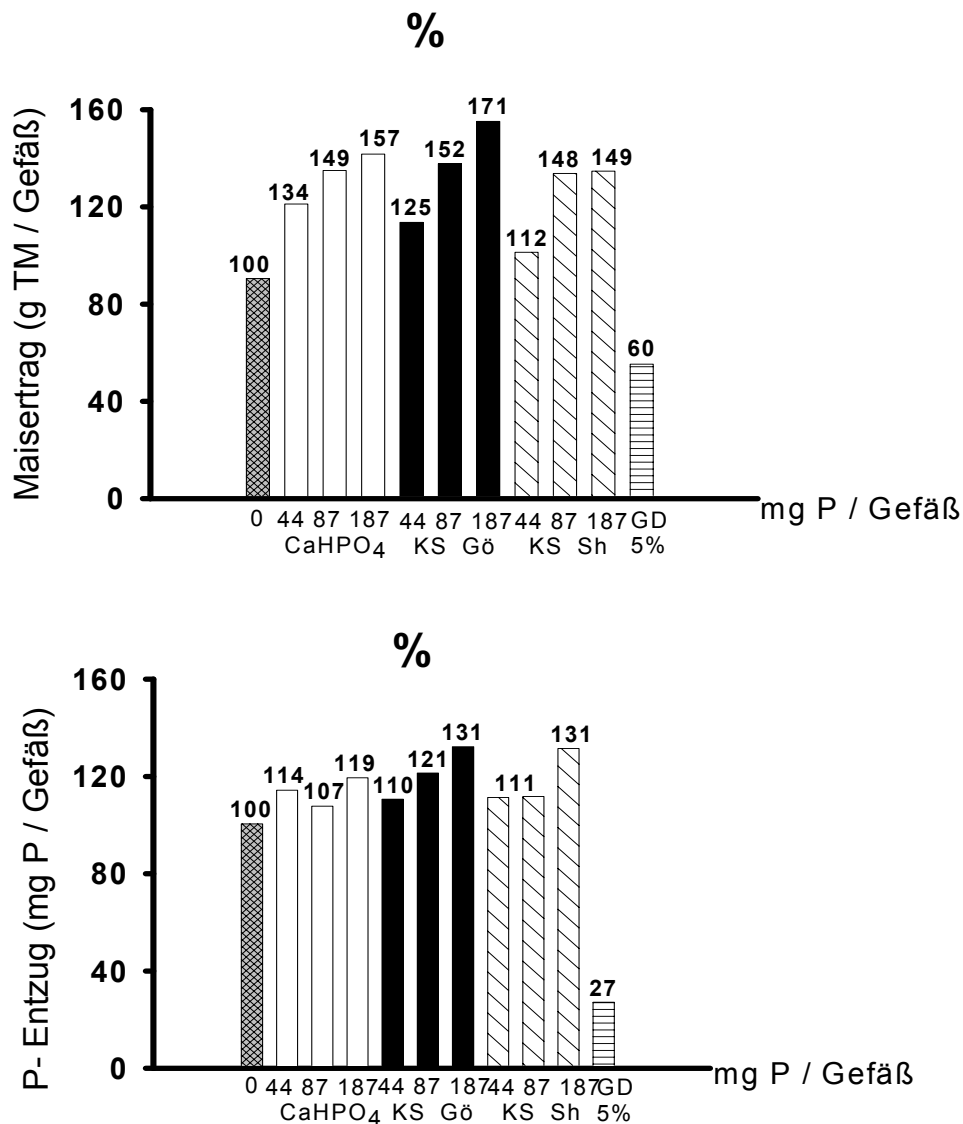


**Abbildung 2:** Abhängigkeit des Maisertrages und des P-Entzuges von der P - Applikation zum Quarzsand

Mit KS Sh wurden sowohl bei gestaffelter P-Zufuhr (Elliehausen und Rehburg, Abbildung 3, 4) als auch bei dem besser mit P versorgten Boden Düshorn (Abbildung 5) stets TM-Erträge erzielt, die dem mit  $\text{CaHPO}_4$ -Zufuhr erzielten sehr ähnlich waren. Nur auf dem Boden Börry P-0 (Abbildung 6) reichten die Erträge nicht an die der  $\text{CaHPO}_4$ -Variante heran, obwohl sie auch hier signifikant über der der Kontrolle lagen. Die prinzipiell gleiche Aussage gilt auch für die P-Entzüge. Bei vergleichbaren Düngungsvarianten wurden auch vergleichbare P-Entzüge erreicht - auch im Boden Börry P-0.



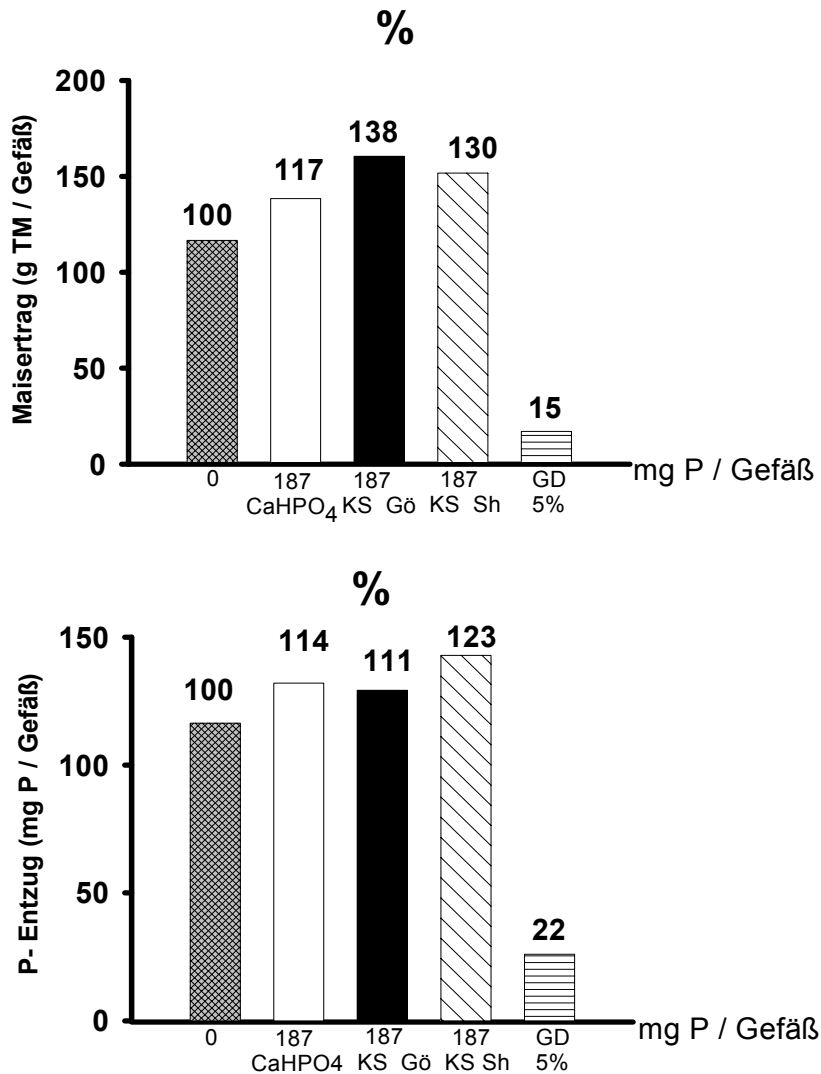
**Abbildung 3:** Abhängigkeit des Maisertrages und des P - Entzuges von der P - Applikation zum Boden Elliehausen



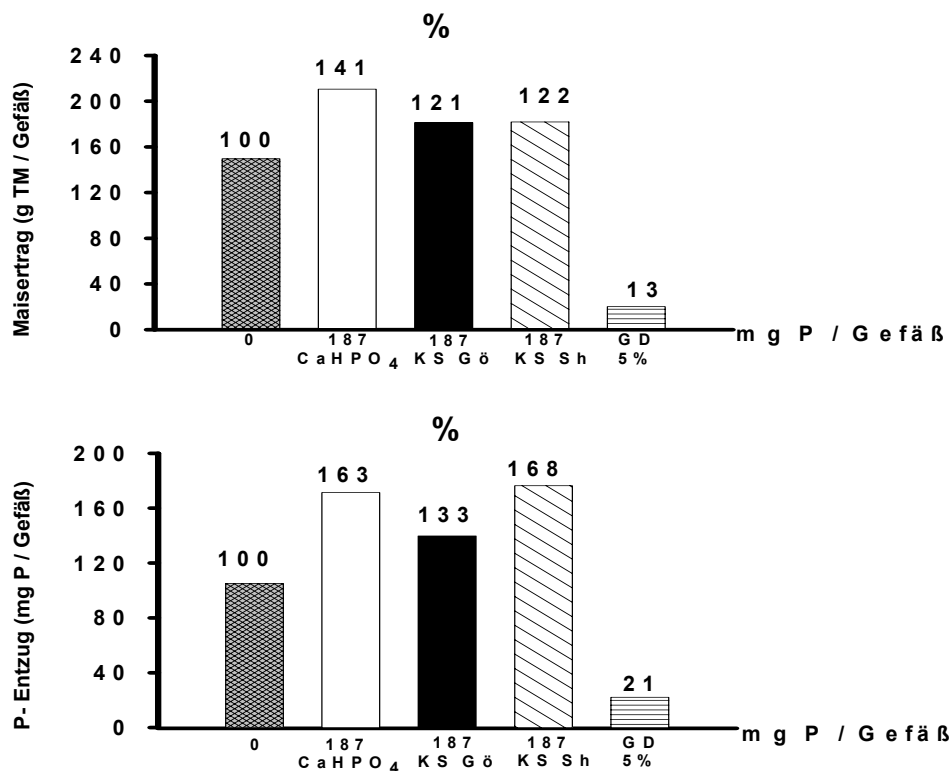
**Abbildung 4:** *Abhängigkeit des Maisertrages und des P - Entzuges von der P - Applikation zum Boden Rehburg- Loccum*

Der Vergleich der P-Düngungsvarianten zwischen CaHPO<sub>4</sub> und KS Gö fällt viel differenzierter aus. Bezüglich des TM- Ertrages bleibt die KS Gö - Variante nicht nur auf dem Quarzsand, sondern auch auf den Lößböden Elliehausen (Abbildung 3) und Börry P-0 (Abbildung 6) signifikant hinter der CaHPO<sub>4</sub>-Variante zurück. Sie übertrifft diese aber auf dem Boden Rehburg (P-187 mg-Variante, Abbildung 4) tendenziell und auf dem Boden Düshorn (Abbildung 5) signifikant um 21 %. Auch die P-Entzüge zeigen ein differenziertes Bild. Während auf dem Quarzsand, den Lößböden Elliehausen und Börry P-0

(Abbildung 2, 3, 6) die P-Aufnahme stets hinter der aus  $\text{CaHPO}_4$  zurück bleibt (wie die Erträge), ist sie auf den Böden Rehburg und Düshorn (Abbildung 4, 5) der  $\text{CaHPO}_4$ -Variante sehr ähnlich. Diese Resultate sind später zu diskutieren.



**Abbildung 5:** Abhängigkeit des Maisertrages und des P - Entzuges von der P - Applikation zum Boden Düshorn (Brache)



*Abbildung 6: Abhängigkeit des Maisertrages und des P-Entzuges von der P-Applikation zum Boden Börry P-0*

### Gefäßversuch mit Rotklee (2. Versuchsjahr): Sprossmassebildung und P-Entzüge

Tabelle 4 zeigt die Erträge von Rotklee im zweiten Versuchsjahr. Auf dem Boden in GK C/D (Börry P-80) trat wie beim Mais keine Ertragssteigerung ein. Die Erträge in der KS Sh- Variante und in der Ca-P-Variante waren genauso hoch wie die der Kontrolle (95 bzw. 96 %). Dagegen fiel die KS Gö- Variante deutlich ab (87 %).

Prinzipiell ähnlich ist das Ergebnis mit den Böden in GK A und B. In allen Fällen lagen die Erträge der KS Gö- Variante niedriger als die der Ca-P- Variante und signifikant niedriger als die der KS Sh- Variante. Die Erträge sind ein Spiegelbild der vorliegenden P-Entzüge (Tabelle 5).

**Tabelle 4:** Relativerträge der Rotkleetrockenmasse (Summe von 3 Schnitten) nach der P-Düngung in Höhe von 187 mg P je Gefäß zum Mais (Vorfrucht)

Bodenart/ Substrat	Standort	GK <sup>1)</sup>	Ohne P		CaHPO <sub>4</sub>	KS Gö	KS Sh	GD <sup>2)</sup>
			g	relativ	relativ	relativ	relativ	5 %
Ton.Schluff	Börry P-80	C/D	78	100	96	87	95	7
Ton.Schluff	Börry P-0	B/C	50	100	130	121	136	14
Ton.Schluff	Elliehausen	A	20	100	126	123	167	32
Lehm.Sand	Rehburg	A	50	100	113	98	106	8
Sand	Düshorn	B	54	100	109	106	113	5
Quarzsand	Weferlingen	A	---		100 <sup>3)</sup>	45	72	25

<sup>1)</sup> Gehaltsklasse, <sup>2)</sup> Tukey test, <sup>3)</sup> absolut = 14 g/Gefäß

**Tabelle 5:** Relative P-Entzüge der Rotkleepflanzen (Summe von 3 Schnitten) als 2. Kultur nach einer P-Düngung von 187 mg P/Gefäß zu Versuchsbeginn

Boden/ Substrat	Standort	Ohne P		CaHP O <sub>4</sub>	KS Gö	KS Sh	GD <sup>1)</sup>
		mg	relativ	relativ	relativ	relativ	5 %
Ton.Schluff	Börry P-80	204	100	100	77	98	10
Ton.Schluff	Börry P-0	61	100	159	131	158	17
Ton.Schluff	Elliehausen	15	100	167	181	213	21
Lehm.Sand	Rehburg	63	100	126	104	133	13
Sand	Düshorn	70	100	132	115	129	11
Quarzsand	Weferlingen	-	-	100 <sup>2)</sup>	49	90	34
<b>Mittelwert der relativen P-Entzüge:</b>							
5 Böden und Quarzsand			-	100	84	105	
5 Böden ohne Quarzsand			-	100	89	107	

<sup>1)</sup> Tukey test, <sup>2)</sup> absolut = 8,5 mg P/Gefäß

Auf allen Böden, außer Elliehausen, hatte der Rotklee nach KS Gö- Düngung deutlich weniger P aufgenommen als aus CaHPO<sub>4</sub> bzw. aus KS Sh. Der Boden Elliehausen machte eine Ausnahme. Hier gab es im Vergleich zu CaHPO<sub>4</sub> weder signifikante Differenzen beim Ertrag noch bei den P-Entzügen.

### **Gefäßversuch mit Weidelgras (3. Versuchsjahr): Sprossmassebildung und P- Entzüge**

In 3. Versuchsjahr wurde in den Gefäßen, die zu Beginn die höchste P- Gabe erhalten hatten (187 mg P Gefäß<sup>-1</sup> d.h. ca. 30 mg P kg<sup>-1</sup> Boden) Weidelgras angebaut. Tabelle 6 zeigt die Gesamttrockenmasseerträge der 3 Schnitte und Tabelle 7 die Gesamt P- Entzüge.

**Tabelle 6:** *Relativerträge der Weidelgrastrockenmasse (Summe von 3 Schnitten) nach der P-Düngung in Höhe von 187 mg P je Gefäß zu Versuchsbeginn*

Bodenart/ Substrat	Standort	GK <sup>1)</sup>	Ohne P		CaHPO <sub>4</sub>	KS Gö	KS Sh	GD <sup>2)</sup>
			g	relativ	relativ	relativ	relativ	5 %
Ton.Schluff	Börry P-80	C/D	84	100	101	96	102	14
Ton.Schluff	Börry P-0	B/C	25	100	149	120	140	33
Ton.Schluff	Elliehausen	A	4	100	170	195	295	29
Lehm.Sand	Rehburg	A	22	100	149	188	154	19
Sand	Düshorn	B	36	100	143	133	138	9
Quarzsand	Weferlingen	A	---	---	100 <sup>3)</sup>	128	202	42

<sup>1)</sup> Gehaltsklasse, <sup>2)</sup> Tukey test, <sup>3)</sup> absolut = 14 g/Gefäß

Wie erwartet trat nach P- Düngung auf dem hoch mit P versorgten Boden Börry P-80 keine Ertragssteigerung ein. Dagegen gab es auf den 4 Ackerböden mit niedriger P- Versorgung (Gehaltsklasse A bis B/C) stets signifikante Mehrerträge durch CaHPO<sub>4</sub>- Düngung. In ähnlicher Größenordnung lagen auch die Mehrerträge nach KS Sh. Im Boden Elliehausen übertraf KS Sh sogar die Ca-Phosphat-Variante. Nach KS Gö- Düngung sind die TM- Erträge stärker differenziert. Während auf den Böden Rehburg-Loccum und Elliehausen (beide

GK A) der Trockenmasseertrag sogar über dem der Ca-Phosphat-Variante lag, war er auf den Böden Börry P-0 und Düshorn (Brache) deutlich geringer. Auf dem Quarzsand war KS Sh dem KS Gö deutlich überlegen.

Die P- Entzüge (Tabelle 7) waren auf dem gut mit P- versorgten Boden Börry P-80 trotz P- Düngung in allen Varianten gleich. In den 4 Ackerböden mit GK A bis B/C stieg der P- Entzug nach  $\text{CaHPO}_4$ - Zufuhr immer deutlich, in 3 Fällen signifikant an. Eine gleiche Wirkung wurde auch mit KS Sh erreicht. Auf dem Boden Elliehausen mit seinem extrem niedrigen P- Gehalt war die P- Wirkung sogar deutlich höher. Klärschlamm Göttingen hatte eine differenziertere Wirkung. Gegenüber der Nullvariante war der P- Entzug nach KS Gö- Zufuhr stets, meist signifikant angestiegen. Aber im Vergleich zur Ca-P-Variante erreichte die Variante KS Gö nur die gleiche Wirkung in den Böden Elliehausen und Rehburg-Loccum.

**Tabelle 7:** Relative P-Entzüge der Weidelgraspflanzen (Summe von 3 Schnitten) als 3. Kultur nach einer P-Düngung von 187 mg P/Gefäß zu Versuchsbeginn

Boden/ Substrat	Standort	GK <sup>1)</sup>	Ohne P mg	relativ	$\text{CaHPO}_4$ relativ	KS Gö relativ	KS Sh relativ	GD <sup>1)</sup> 5 %
Ton.Schluff	Börry P-80	C/D	182	100	110	105	106	14
Ton.Schluff	Börry P-0	B/C	43	100	139	120	141	20
Ton.Schluff	Ellie- hausen	A	5	100	183	211	332	37
Lehm.Sand	Rehburg	A	39	100	163	183	164	19
Sand	Düshorn	B	61	100	147	134	170	41
Quarzsand	Wefer- lingen	A	---	---	100 <sup>2)</sup>	155	251	39
<b>Mittelwert der relativen P-Entzüge:</b>								
5 Böden ohne Quarzsand				---	100	101	123	
4 Böden ohne Elliehausen und Quarzsand				---	100	98	104	

<sup>1)</sup> Tukey test, <sup>2)</sup> absolut = 8,5 mg P/Gefäß



Auf den Böden Börry P-0 und Düşhorn (Brache) war die P- Aufnahme deutlich geringer als in der Ca-P- Variante. Auf dem Quarzsand konnte das Weidelgras aber nach KS Gö 55% und nach KS Sh 151% mehr P aufnehmen als aus  $\text{CaHPO}_4$  .

Lässt man die Extremvarianten mit Quarzsand und den Boden von Elliehausen (Material des C- Horizontes einer Parabraunerde) außer Betracht, so lagen im 3. Versuchsjahr die mittleren P- Entzüge des Weidelgrases bei allen 3 P- Quellen auf nahezu gleichem Niveau (Mittelwerte  $\text{CaHPO}_4$  : KS Gö : KS Sh = 100: 98: 104).

### **2.2.2.6 Überblick über die P- Entzüge in den drei Versuchsjahren**

Um einen Gesamtüberblick über die P- Entzüge der drei Kulturpflanzen in den drei Versuchsjahren zu gewinnen, werden die P- Entzüge in Tabelle 8 zusammengefasst. Dabei werden aber Relativwerte angegeben, wobei die P- Entzüge der  $\text{CaHPO}_4$  – Variante gleich 100% gesetzt werden. Damit soll klar werden, wie der Phosphor in den Klärschlämmen relativ zum P des  $\text{CaHPO}_4$  wirkt. Es werden auch nur die P- Varianten aufgeführt, in denen 187 mg P Gefäß<sup>-1</sup> (30 mg P kg<sup>-1</sup> Boden) zu Versuchsbeginn angewendet worden sind. Das war die P- Menge, die sich aus den 5 t TM ha<sup>-1</sup> des KS Gö ergeben hatte. Damit werden in der Praxis ca. 60 kg P ha<sup>-1</sup> ausgebracht. Das ist etwa die P- Menge, die durch 3 Ernten abgeführt wird. Tabelle 8 zeigt Folgendes:

Über alle Böden bzw. Substrate hinweg werden bei Anwendung von KS Sh 12% mehr P und bei KS Gö 11% weniger P (89%) als aus  $\text{CaHPO}_4$  aufgenommen. Das weist auf eine deutliche Differenz in der Ausnutzung des P bei den zwei Klärschlämmen hin. Bemerkenswert sind die Unterschiede im Verhalten der zwei Klärschlämme auf den verschiedenen Böden. Während alle 3 Kulturpflanzen auf dem tonigen Schluffboden des Standortes Börry unabhängig vom P- Gehalt der 2 Böden aus dem KS Sh nahezu die relativ gleichen P- Mengen wie aus  $\text{CaHPO}_4$  aufnehmen (95 – 101%) sind es aus dem KS Gö nur 83 bzw. 84%.

Auf dem extrem P- armen kalkhaltigen Löß (Elliehausen) steigen die P- Aufnahmewerte bei beiden KS vom Mais über Rotklee zum Weidelgras hin an. Aber auch hier wird der Wert der P- Aufnahme aus KS Gö nur im Mittel zu 96% der aus CaHPO<sub>4</sub> erreicht, während es beim KS Sh 137% sind.

**Tabelle 8:** Übersicht über die relativen P-Entzüge nach Klärschlammdüngung mit einer P- Gabe von 187 mg P Gefäß<sup>-1</sup> durch Mais, Rotklee und Weidelgras (WG) auf verschiedenen Böden (P-Entzug nach CaHPO<sub>4</sub>-Düngung = 100 %)

Boden/ Substrate	GK	KS Göttingen				KS Salzhausen			
		Relativer P-Entzug				Relativer P-Entzug			
		Mais	Rotklee	WG	Mittel	Mais	Rotklee	WG	Mittel
Börry P-80	C/D	78	76	95	83	90	98	96	95
Börry P-0	B/C	82	82	87	84	103	99	101	101
Elliehausen	A	64	108	116	96	101	128	182	137
<b>Schluffböden</b>		75	89	99	<b>88</b>	98	108	126	<b>111</b>
Rehburg	A	110	83	113	102	110	106	102	106
Düshorn	B	97	87	91	92	108	98	116	107
<b>Sandböden</b>		104	85	102	<b>97</b>	109	102	109	<b>107</b>
Quarzsand	A	25	49	155	76	37	90	251	126
<b>Alle Varianten</b>		76	81	110	<b>89</b>	92	103	141	<b>112</b>
<b>Alle Varianten ohne QS</b>		86	87	100	<b>91</b>	102	106	119	<b>109</b>
<b>Alle Varianten ohne QS und Elliehausen</b>		92	82	96	<b>90</b>	103	100	104	<b>102</b>

Auf den Sandböden Rehburg-Loccum und Düshorn (Brache) werden von beiden KS im Vergleich zu CaHPO<sub>4</sub> sehr ähnliche P- Entzüge (KS Gö 97%, KS Sh 107%) erreicht, trotzdem übertrifft auch hier der KS Sh auf dem Boden Düshorn den KS Gö im Mittel mit 15% mehr P- Entzug. Beim Weidelgras sind

es sogar 24%. Auch auf dem Quarzsand ist der KS Sh dem KS Gö bei jeder Kulturart überlegen. Im Mittel sind aus KS Sh 26% mehr P als aus  $\text{CaHPO}_4$  aufgenommen worden, aus KS Gö aber 24% weniger!

## **2.3 Zweijähriges Experiment zur Prüfung der P- Aufnahme der Pflanzen**

### **2.3.1 Vorbemerkungen und Versuchsziele**

Im vorausgegangenen Experiment wurden die Klärschlämme bzw.  $\text{CaHPO}_4$  in die Böden eingebracht und die ersten Pflanzen (Mais) 4 Wochen später ausgesät. In dem nun folgenden Experiment sollte die P- Aufnahme von Pflanzen erst nach längerer Reaktion der P- Dünger mit dem Boden geprüft werden. Die Klärschlämme mit ihren Eisensalz – bzw.  $\text{Ca(OH)}_2$  – Zugaben enthalten neu gebildete, also wenig gealterte Fe- Verbindungen. Es war zu erwarten, dass sich diese im Boden noch veränderten. Damit könnte sich auch die P- Verfügbarkeit ändern. Um dies zu prüfen, wurde wie folgt vorgegangen: Von den gleichen KS wie im obigen Experiment sowie von  $\text{CaHPO}_4$  wurden gestaffelte P- Mengen in die Böden eingemischt (Mitscherlich- Gefäße), diese mit Wasser auf ca. 50% der maximalen Wasserkapazität eingestellt und in der Klimakammer bei ca. 20 °C für 1 Jahr inkubiert. Nach dieser Zeit wurden die Böden je eines Mitscherlichgefäßes in 3 Portionen geteilt und in kleinere Gefäße eingefüllt. Diese wurden mit Weidelgras bepflanzt, das dreimal geschnitten wurde. Die P- Aufnahme des Grases sollte zur Beurteilung der P- Verfügbarkeit der verschiedenen P- Quellen nach 1- jährigem Umsatz im Boden dienen.

### **2.3.2 Versuchsanlage und Durchführung**

Am 20.04.1999 wurde dieser Gefäß-Versuch angesetzt. Auf neun verschiedenen Böden, die sich im verfügbaren Boden P- Gehalt und im pH- Wert unterscheiden, wird die Wirkung von zwei eisenhaltigen Klärschlämmen (Tabelle 1) und  $\text{CaHPO}_4$  untersucht. Die Kenndaten der eingesetzten Böden gibt Tabelle 9 wieder. Es handelt sich um die 5 Böden des ersten Experimentes (Tabelle 2) sowie zusätzlich um 2 lössbürtige tonige Schluffböden aus Dorstadt

(P-0, P-20) mit niedrigem und hohem P- Gehalt sowie um zwei Sandböden Düshorn P-22 und Hodenhagen P-22 (beide aus dem Raum Walsrode). Sie haben mittlere P- Gehalte und pH-Werte unter 5.

**Tabelle 9:** *Kenndaten der verwendeten Böden (Korngrößenanteile, CaCO<sub>3</sub>-Gehalt und Humusgehalt nach Angaben der LUFA Hameln)*

Ort	Ton	Schluff	Sand	CaCO <sub>3</sub>	pH	Humus	CAL <sup>1)</sup> /DL <sup>2)</sup>
	%	%	%	%	CaCl <sub>2</sub>	%	mg P / kg
Börry P-0	20	75	5	1,3	7,2	2,22	46
Börry P-80 <sup>3)</sup>	20	75	5	0,9	6,3	2,22	110
Dorstadt P-0	13	73	14	0,7	7,0	1,89	33
Dorstadt P-20 <sup>3)</sup>	13	73	14	0,7	7,1	1,90	98
Elliehausen	16	75	9	13,3	7,7	0,50	6
Rehb.–Loccum	8	13	79	n.b.	4,3	7,20	17
Düshorn (Brache)	3	13	84	n.b.	4,9	4,00	34
Düshorn P-22 <sup>3)</sup>	5	11	84	n.b.	4,9	2,20	69
Hodenh. P-22 <sup>3)</sup>	3	6	91	n.b.	4,7	5,50	93

<sup>1)</sup> bei Lehm Böden, <sup>2)</sup> bei Sandböden, n.b.= nicht bestimmt

<sup>3)</sup> Jährliche P-Düngung der Parzellen in kg ha<sup>-1</sup>

Bezugsbasis für die KS- Applikation waren wieder die 5 t TM ha<sup>-1</sup> des KS Göttingen. Damit wurden wie im Kapitel 1.2.2.3 dargelegt 30 mg P kg<sup>-1</sup> Boden angewendet. Hier wurden nun zusätzlich Varianten mit der doppelten Schlammmenge, d.h. auch P- Mengen von 60 mg P kg<sup>-1</sup> und der dreifachen Menge von 90 mg P kg<sup>-1</sup> angelegt. Gleiche P- Mengen wurden auch vom KS Salzhausen angewendet. Vom CaHPO<sub>4</sub> gab es nur die einfache Gabe von 30 mg P kg<sup>-1</sup>, da dessen Löslichkeit als hoch angesehen wurde. Entsprechend den P- Gaben und Fe: P- Verhältnissen der Schlämme wurden folgende Fe-Mengen zugegeben: KS- Gö 157, 314 und 471 mg Fe, KS- Sh 44, 88 und 132 mg Fe kg<sup>-1</sup> Boden. Die Böden (6 kg) wurden nach Einmischung der Schlämme bzw.

des  $\text{CaHPO}_4$  in die Mitscherlichgefäße eingefüllt und ihr Wassergehalt auf ca. 50 % der maximalen Wasserkapazität eingestellt. Unter Abdeckung wurden sie 12 Monate bei 20 °C in einer Klimakammer inkubiert.

**Tabelle 10: Versuchsaufbau**

Versuchsaufbau	Neun Böden (sich Tab. 9), 3 Wiederholungen
P- Varianten	(1) ohne P (2) $\text{CaHPO}_4$ (3) Klärschlamm Göttingen (KS Gö) (4) Klärschlamm Salzhausen, KS Sh
P- Applikationsstufen	(1) P0 (ohne P) (2) P1 (ca. 30 mg P / kg Boden) = 187 mg P / Gefäß (3) P2 (ca. 60 mg P / kg Boden) = 374 mg P / Gefäß (4) P3 (ca. 90 mg P / kg Boden) = 560 mg P / Gefäß

Am 07.06.2000, also nach 13,5 Monaten, begann ein Vegetationsversuch mit diesen Böden. Um die P- Aufnahme von Pflanzen aus diesen Böden zu prüfen, wurde das Bodenmaterial aus den Mitscherlichgefäßen entnommen, in 3 Portionen von je 1,5 kg Boden geteilt und in Plastikrohre überführt. Die Rohre hatten einen Durchmesser von 10,5 cm und eine Höhe von 38 cm. Da die 1,5 kg Boden nicht zur Befüllung der Gefäße ausreichten, wurde der untere Teil der Gefäße mit 2,8 kg Quarzsand befüllt. Vor dem Befüllen der Rohre wurden in die Böden folgende Nährstoffmengen eingearbeitet:

0,2 g N als  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,

0,16 g K als  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,

0,03 g Mg als  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .



### **Befüllung der Gefäße (QS = Quarzsand)**

Die Varianten wurden in dreifacher Wiederholung angesetzt. In diesem Versuch gab es ferner drei Varianten mit den Böden Dorstadt P-0, Rehburg-Loccum und Düshorn (Brache) ohne P- bzw. ohne KS- Düngung aber mit CaO- Gaben, um den möglichen Kalkungseffekt zu erfassen, denn der KS Gö enthält hohe CaO-Mengen. Es wurden 0,72g CaO pro kg Boden eingesetzt. Am 15.06.2000, also 1 Woche nach der Präparation der Gefäße, erfolgte die Aussaat des Weidelgrases der Sorte LIRASAND (0,05 g pro Gefäß). Die Pflanzen wurden im Drahthaus des Institutes kultiviert. Die Wasserzufuhr erfolgte nicht durch Gießen. Die Gefäße standen in großen Plastikwannen und wurden mit entmineralisiertem Wasser eingestaut (ca. 10 cm hoch). Dieser Wasserstand wurde alle 2Tage kontrolliert und wenn nötig ergänzt. Diese Wasserversorgung für die Pflanzen erschien ausreichend. Die Pflanzen wurden am 27.07, am 29.08 und am 12.10.2000 geschnitten. Nach dem 1.und 2. Schnitt wurden 0,2 g N in Form von Ammoniumnitrat nachgedüngt. Anschließend wurden die Trockenmasse und die P- Konzentration in der Trockenmasse bestimmt und der P- Entzug ermittelt.

### **2.3.3 Ergebnisse: Sprossmassebildung und P- Entzüge**

Tabelle 11 zeigt die gebildete Sprossmasse als Summe der drei Schnitte. Auf den mit P hoch versorgten Böden Börry P-80 und Dorstadt P-20 erbrachte die CaHPO<sub>4</sub>- Düngung keine Ertragssteigerung. Auf den Böden mit geringerer P-Versorgung traten nur auf den zwei Böden mit sehr niedrigem Lactat-P- Gehalt (Rehburg-Loccum, Elliehausen) deutliche Ertragssteigerungen nach P-Düngung mit CaHPO<sub>4</sub> auf.

**Tabelle 11:** Absolut und Relativerträge der Gesamttrockenmasse je Gefäß des Weidelgrases (3 Schnitte)

Nr.	Boden vom Standort	Kontrolle (P 0)		CaHPO <sub>4</sub>	KS Gö			KS Sh			GD <sub>0.05</sub> Tuk.
		g P	rel.	P-Düngungsvarianten (mg P kg <sup>-1</sup> Boden)							
				30 rel.	30 rel.	60 rel.	90 rel.	30 rel.	60 rel.	90 rel.	
1	Börry P-80	14,7	100	87	107	99	97	104	113	106	29
2	Dorstadt P-20	15,6	100	103	100	110	104	101	122	105	33
3	Börry P-0	12,9	100	101	110	113	110	112	118	125	35
4	Dorstadt P-0	13,7	100	102	113	125	109	113	121	120	23
5	Düshorn- (Brache)	7,93	100	111	152	148	157	174	173	197	56
6	Düshorn P-22	11,4	100	105	104	149	125	123	157	154	45
7	Rehburg- Loccum	6,09	100	153	138	176	166	178	143	206	52
8	Hodenhagen P-22	11,5	100	95	94	97	106	106	141	173	82
	<b>Mittelwert</b>	<b>12</b>	<b>100</b>	<b>107</b>	<b>115</b>	<b>127</b>	<b>122</b>	<b>126</b>	<b>136</b>	<b>148</b>	
	<b>Mittelwert aus Nr. 3-8</b>	<b>11</b>	<b>100</b>	<b>111</b>	<b>119</b>	<b>135</b>	<b>129</b>	<b>134</b>	<b>142</b>	<b>163</b>	
9	Elliehausen	2,2	100	362	282	441	446	275	636	774	151

Wichtiger als die Ertragssteigerungen sind die P- Entzüge (Tabelle 12) zur Beurteilung der P- Düngewirkung der Klärschlämme, denn das Wachstum der Pflanzen hängt neben der P- Versorgung von vielen anderen Faktoren ab.

**Tabelle 12:** Absolute und relative P-Entzüge je Gefäß des Weidelgrases  
(3 Schnitte)

Nr.	Boden vom Standort	Kontrolle (P 0)		CaHPO <sub>4</sub>	KS Gö			KS Sh			GD <sub>0.05</sub>
		mg P	rel.	P-Düngungsvarianten (mg P kg <sup>-1</sup> Boden)							
				31	31	62	93	31	62	93	
				rel.	rel.	rel.	rel.	rel.	rel.	rel.	
1	Börry P-80	46	100	101	103	92	95	115	123	128	12
2	Dorstadt P-20	54	100	99	98	99	106	106	118	107	18
3	Börry P-0	23	100	146	117	129	150	141	173	188	25
4	Dorstadt P-0	24	100	160	126	138	168	152	206	221	29
5	Düshorn- (Brache)	14	100	122	115	120	111	174	213	307	59
6	Düshorn P-22	32	100	118	89	138	139	135	170	192	35
7	Rehburg- Loccum	12	100	151	130	146	172	176	200	226	58
8	Hodenha- gen P-22	28	100	123	96	102	118	118	164	194	51
	<b>Mittelwert</b>	<b>29</b>	<b>100</b>	<b>128</b>	<b>109</b>	<b>121</b>	<b>132</b>	<b>140</b>	<b>171</b>	<b>195</b>	
	<b>Mittelwert aus Nr. 3-8</b>	<b>22</b>	<b>100</b>	<b>137</b>	<b>112</b>	<b>129</b>	<b>143</b>	<b>149</b>	<b>188</b>	<b>221</b>	
9	Elliehausen	3	100	426	299	338	551	280	683	956	169

Zunächst ist festzustellen, dass die Graspflanzen auf den 2 Böden Börry P-80 und Dorstadt P-20 nach P-Mineraldüngung mit CaHPO<sub>4</sub> nicht mehr Phosphor als aus den Kontrollgefäßen aufgenommen haben. Das war auch nicht unbedingt zu erwarten, da beide Böden ausreichend mit P versorgt sind (Tabelle 9), die Pflanzen also im ungedüngten Boden genug P fanden. Die gleiche Aussage gilt auch für den KS Gö und zwar unabhängig von der Höhe



der P-Zugabe (auf Boden Börry P-80 z.B. 103, 92 bzw. 95% zur Kontrolle). Interessant ist, dass das Weidelgras nach KS Sh- Düngung auf beiden Böden mehr P aufgenommen hat als nach  $\text{CaHPO}_4$ -Düngung, signifikant zumindest auf Boden Börry P-80.

**Aus diesem Resultat ergibt sich der Schluss**, dass nach KS-Anwendung im Vergleich zu einer mineralischen P-Düngerform bei hohem P-Niveau im Boden und gleich hohen P-Zugaben (30 mg P / kg) sowie einem Jahr Einwirkungszeit kein verringerter P-Entzug der Pflanzen auftritt.

Auf allen übrigen Lehmböden, die in ihren Laktatwerten unter 4,6 mg P/100 g Boden bzw. Sandböden mit Laktatwerten kleiner 9 mg DL-P/100 g Boden liegen, erbringt die Düngung mit  $\text{CaHPO}_4$  signifikant höhere P-Entzüge von 9 bis 60 %. Das heißt, auf diesen Böden tritt eine klare P-Düngewirkung ein, und damit können auch die KS als P-Quelle gut getestet werden. Die Betrachtung der Einzelböden ergibt folgendes:

**Boden Börry P-0:** Der KS Gö war dem  $\text{CaHPO}_4$  bei gleicher P-Gabe deutlich unterlegen. Erst bei Applikation der 3-fachen P-Menge (90 mg P  $\text{kg}^{-1}$ ) wird der gleiche P-Entzug (150 %) wie mit  $\text{CaHPO}_4$  (146 %) erreicht. Der KS Sh ist dagegen dem  $\text{CaHPO}_4$  nahezu gleichwertig, denn mit der niedrigsten P-Gabe wird fast das Resultat vom  $\text{CaHPO}_4$  erreicht (141 %).

**Boden Dorstadt P-0:** Mit der niedrigsten P-Stufe werden mit  $\text{CaHPO}_4$  160 % der P-Aufnahme der Kontrolle (P 0) erreicht, mit KS Gö nur 126 %, aber mit KS Sh 152 %, also fast das Ergebnis mit  $\text{CaHPO}_4$ .

**Die Ergebnisse beider Böden belegen eine fast gleiche Wirkung des KS Sh wie mit  $\text{CaHPO}_4$ , aber eine klare Unterlegenheit des KS Gö.**

Auf allen 4 Sandböden Düshorn (Brache), Düshorn P-22, Rehburg und Hodenhagen P-22 **ergibt sich stets eine Unterlegenheit des KS Gö gegenüber der P-Mineraldüngerform  $\text{CaHPO}_4$** . Vom KS Gö muss stets die doppelte P-Menge, bei Hodenhagen sogar die 3-fache P-Menge angewendet werden, um den gleichen P-Entzug zu erreichen wie mit der niedrigen P-Gabe

in Form von  $\text{CaHPO}_4$ . Dagegen wird mit dem KS Sh stets mit der niedrigen P-Gabe der gleiche bzw. sogar höhere P-Entzug wie mit  $\text{CaHPO}_4$  erzielt.

### Kalkwirkung

Tabelle 13 vermittelt einen Eindruck von der Wirkung einer Kalkgabe zu drei Böden auf Ertragsbildung und P- Entzüge der Pflanzen.

**Tabelle 13:** Einfluss einer Kalkung (0,72g CaO / kg Boden) auf den Trockenmasseertrag von Weidelgras (Summe von 3 Schnitten) und den P-Entzug von Weidelgras ohne P-Düngung (Mittelwerte von 3 Wiederholungen).

Standort	Bodenart	Trockenmasse (g)		P-Entzug (mg)		PH ( $\text{CaCl}_2$ )	
		ohne Kalk	mit Kalk	ohne Kalk	mit Kalk	ohne Kalk	mit Kalk
Dorstadt P-0	t. Schluff	13,7 (100)	12,9 (94)	24 (100)	22 (92)	7,0	6,8
Düshorn Brache	Sand	7,9 (100)	8,9 (113)	14 (100)	13 (93)	4,8	5,6
Rehburg- Loccum	Sand	6,1 (100)	9,9 (162)	12 (100)	12 (100)	4,3	5,2

Auf dem gut gepufferten tonigen Schluffboden Dorstadt hatte die Kalkzugabe keinen Effekt auf die Pflanzen und das Boden- pH. Auf dem Boden Düshorn stieg das pH zwar von 4,8 auf 5,6 an, aber auch hier war die Auswirkung auf den P- Entzug gering. Das Wachstum bei pH 4,8 wird offenbar nur wenig durch eventuell höhere Mn- Ionenkonzentrationen beeinflusst. Der Boden Rehburg- Loccum zeigt einen pH- Anstieg von 4,3 (Al und Mn Toxizität möglich) auf 5,2. Das wirkt sich positiv auf das Wachstum, aber wenig auf die P- Aufnahme aus. Die geringe Anhebung des pH 1 Jahr nach der CaO-Zugabe zeigt, dass das zugegebene CaO- so wie auch das  $\text{Ca(OH)}_2$  des KS Gö – während der Inkubation zu  $\text{CaCO}_3$  neutralisiert worden sind.

**Zusammenfassend ergibt sich nach 1- jähriger Einbringung der Dünger in die Böden Folgendes:**

Im Mittel der 2 Lehmböden mit niedrigem P-Gehalt ( Börry P-0, Dorstadt P-0 ) und den 4 Sandböden entzogen die Pflanzen bei Düngung mit

CaHPO<sub>4</sub> 137 % P gegenüber den ungedüngten Varianten,

KS Gö 112 % P gegenüber den ungedüngten Varianten,

KS Sh 149 %P gegenüber den ungedüngten Varianten.

Daraus ergibt sich eine klare **Unterlegenheit des KS Göttingen** gegenüber dem P-Mineraldünger, während der **KS Salzhausen** nach 1-jährigem Umsatz im Boden sogar **eine bessere P-Anlieferung als CaHPO<sub>4</sub>** an die Pflanzen gewährleistet.

## **2.4 Einjähriges Experiment zur Verfolgung der P- Verfügbarkeit in neun Böden nach Klärschlammdüngung**

### **2.4.1 Vorbemerkungen und Versuchsziele**

Pflanzen nehmen nur gelöste Nährstoffe so auch Phosphat auf. Infolge niedriger P- Konzentration in der Bodenlösung liegen nur einige Hundert Gramm P ha<sup>-1</sup> im Oberboden gelöst vor. Die Pflanzen nehmen aber bei hohen Erträgen bis ca. 30 kg P ha<sup>-1</sup> auf. D.h., die P- Konzentration der Bodenlösungen muß immer wieder ergänzt werden durch P- Freisetzung von der Festphase. Man spricht von der P- Pufferung. Für die P- Aufnahme der Pflanzen ist also die Orthophosphat (P<sub>i</sub>)-Konzentration der Bodenlösung und die P- Nachlieferung aus der Bodenfestphase wichtig. Gibt man mineralische P- Verbindungen wie Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> oder CaHPO<sub>4</sub> in den Boden, so erwartet man einen Anstieg der P<sub>i</sub> – Konzentration bis zur Höhe der Löslichkeit dieser Verbindungen. Für Klärschlämme, wenn sie mit Fe eliminiertes Phosphat enthalten, ist das nicht unbedingt zu erwarten. Es ist sogar denkbar, dass wenig mit P gesättigte Fe- Verbindungen die P- Sorption in Böden erhöhen. Aus diesen Überlegungen **resultierte das Versuchsziel**, die Klärschlämme und zum Vergleich CaHPO<sub>4</sub>

in Böden einzubringen, um nach einigen Wochen bzw. Monaten mehrere verschiedene Parameter der P- Verfügbarkeit zu messen:

$P_i$ - Konzentration der Bodenlösung,

P- Sorption,

pH-Werte der Böden.

Die gefundenen Werte sollen später mit den P- Aufnahmen der Pflanzen in den Experimenten unter 2.2 und 2.3 in Beziehung gesetzt werden, da diese gleichzeitig auf einigen Böden angezogen wurden. In den Experimenten des Kapitel 2.2 waren die Schlämme bzw.  $CaHPO_4$  in die Böden eingebracht und die Maissamen 4 Wochen später ausgesät worden. Somit wurde also die P- Düngewirkung geprüft, wenn die P- Quellen nur kurzfristig (4 Wochen) Kontakt zum Boden hatten. Die Zeit der Umsetzung der P- Quellen im Boden dürfte aber Auswirkungen auf die P- Verfügbarkeit für die Pflanzen haben. Daraus ergab sich die Frage nach der P- Verfügbarkeit, bei der sich die P- Quellen eine längere Zeit, also z.B. 1 Jahr im Boden umsetzen konnten, bevor die Gefäße bepflanzt wurden. Diese Frage sollte beantwortet werden, indem die Böden mit den zwei Klärschlämmen bzw.  $CaHPO_4$  für 1 Monat, 6 Monate bzw. 12 Monate inkubiert und dann auf ihre P- Verfügbarkeit überprüft wurden.

#### **2.4.2 Versuchsanlage und Durchführung**

Zur Erreichung des Versuchszieles wurde derselbe Versuchsansatz wie in Kapitel 2.3.2 verwendet. Dort ist beschrieben, welche P- Mengen (ca. 30, 60, 90 mg P / kg Boden) in die neun Böden eingebracht wurden und unter welchen Bedingungen sie inkubiert wurden (ca. 50% max. WK, ca. 20 °C, Klimakammer). Nach einem, 6 und 12 Monaten Inkubationszeit wurden die Gefäße beprobt, ihr Wassergehalt überprüft, wieder abgedeckt und weiter inkubiert.

Anschließend wurden die feuchten Bodenproben direkt zur Gewinnung der Bodenlösung nach Adams (1974) genutzt und deren  $P_i$ -Konzentration nach Murphy und Riley (1962) bestimmt. Parallel wurden aliquote Anteile des Bodens

luftgetrocknet und die P- Sorption mit einer definierten P-Vorlage nach Fritsch und Werner (1989) bestimmt. Die CAL/ DL- P- Gehalte wurden nach Schüller (1969), bzw. Egner et al., (1960) ermittelt. Die pH-Werte wurden in  $\text{CaCl}_2$  gemessen. Die Methoden sind in Kapitel 2.4.3 beschrieben. Den Versuchsaufbau und die Probenahme gibt Tabelle 10 wieder.

Es ist bekannt, dass die Al / Fe- Oxidhydrate eine wesentliche Rolle bei der Phosphatsorption spielen (Parfitt 1978). Nach Schwertmann (1964) können mit einer sauren Oxalatlösung die wenig geordneten, amorphen Eisenverbindungen, die eine hohe P- Sorptionsfähigkeit haben, extrahiert werden. Deshalb wurden in mehreren Böden nach der KS- Anwendung diese Fe- Fraktionen bestimmt, um zu sehen, ob ein Zusammenhang zwischen eventuell erhöhter P- Sorption und diesen Eisenverbindungen besteht. Außerdem wurde im Oxalatextrakt auch das darin gelöste Phosphat bestimmt.

### **2.4.3 Analysenmethoden in Böden**

#### **Gewinnung der Bodenlösung**

Nach der sogenannten Verdrängungsmethode (Adams, 1974) erfolgte die Gewinnung der Bodenlösung. Dabei wurde frischer feuchter Boden in einen 250 ml Standzylinder gefüllt, der am Boden eine mit einem Filterpapier abgedeckte Öffnung aufwies. Durch leichtes Aufstauchen des Zylinders wurde der Boden so gelagert, dass keine größeren Hohlräume zu sehen waren. Mit Hilfe einer Schlauchpumpe wurde tropfenweise entmineralisiertes Wasser auf die Bodensäulen getropft. Die Bodenlösung wurde nach unten verdrängt und in Bechergläsern aufgefangen (Lehmböden: 20 ml, Sandböden: 15 ml).

#### **$P_i$ – Konzentration in der Bodenlösung**

Die Bodenlösung wurde durch eine  $0,45 \mu\text{m}$  Membran filtriert, um eine von größeren Kolloiden weitgehend freie Lösung zu erhalten. Nach Murphy und Riley (1962) wurde die quantitative Bestimmung des anorganischen Phosphates in der Bodenlösung durchgeführt. Mit dieser Methode bildet Phosphat in Gegenwart von Molybdat und Kaliumantimonyltartrat einen blauen Farbkomplex. Die Menge des blauen Reaktionsproduktes ist proportional der

P<sub>i</sub>- Konzentration in der Bodenlösung. Die Messung erfolgte am Spektralphotometer bei 882 nm.

### **P- Sorptionsvermögen des Bodens**

Um ein Maß für die P- Sorption zu erhalten, wurde die luftgetrocknete Bodenprobe auf 1 mm gesiebt. 10 g luftgetrockneter Boden wurden in eine 500 ml Plastikflasche eingewogen, mit 100 ml P- Lösung [10 mg P L<sup>-1</sup> als Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>] versetzt, 2 Stunden auf dem Überkopfschüttler geschüttelt, mit aschefreiem Rundfilter Nr.589<sup>3</sup> filtriert. Aus dem Filtrat wurden einige ml Aliquot zur P- Bestimmung genommen. Nach Murphy und Riley (1962) wurde die P- Konzentration der Lösung gemessen. Durch die Differenzbildung von definiert zugegebener und gemessener (nicht gebundener P- Menge) wurde das P- Sorptionsvermögen des Bodens errechnet.

### **Bestimmung des oxalatlöslichen Eisens (Fe<sub>ox</sub>) im Boden**

Nach Schwertmann (1964) wurde das oxalatlösliche Fe bestimmt. Dazu wurden 2 g luftgetrockneter Boden (1mm gesiebt) mit 100 ml eines Gemisches aus 0,2mol NH<sub>4</sub>- Oxalat und 0,2mol Oxalsäure (pH3) versetzt, 2 Stunden auf dem Überkopfschüttler im Dunkelraum geschüttelt und mit aschefreiem Filterpapier filtriert. Im Filtrat wurde die Fe- und P- Bestimmung mittels ICP vorgenommen. Die Analysen führte das Institut für Geochemie der Universität Göttingen durch.

### **Phosphatgehalt des Bodens (CAL-P / DL- P)**

Nach Schüller (1969) wurde mit der Calcium- Acetat- Lactat- Methode der pflanzenverfügbare Phosphatgehalt in den Lehmböden bestimmt. Dazu wurden 5g luftgetrockneter Boden (2 mm gesiebt) mit 100ml CAL- Gebrauchslösung (pH4,1) und einer Spatelspitze Aktivkohle versetzt, 2 Stunden auf dem Horizontalschüttler geschüttelt und durch 595½ Faltenfilter filtriert. Aus dem Filtrat wurden einige ml Aliquot zur P- Bestimmung abpipettiert und der P- Gehalt nach Murphy und Riley (1962) bestimmt. In den Sandböden wurde nach Egnor et al., (1960) mit der Doppellaktat- Methode der pflanzenverfügbare Phosphatgehalt bestimmt. Dazu wurden 5 g luftgetrockneter Boden (2 mm gesiebt) mit 250ml DL- Gebrauchslösung (pH 3,6) versetzt, 1 1/2 Stunden auf

dem Überkopfschüttler geschüttelt und mit 595½ Faltenfilter filtriert. Aus dem Filtrat wurden einige ml Aliquot zur P- Bestimmung abpipettiert und darin der P-Gehalt nach Murphy und Riley (1962) bestimmt.

### **pH-Wert Bestimmung**

Zur Bestimmung der pH-Werte wurde eine Bodensuspension aus 10 g luftgetrocknetem Boden und 25 ml 0,01 mol  $\text{CaCl}_2$  – Lösung hergestellt und mit einem Glasstab mehrmals umgerührt. Nach 30 Minuten erfolgte die pH-Wertmessung mit einer Einstabmesselektrode.

## **2.4.4 Ergebnisse des Inkubationsversuches zur Verfolgung der P- Verfügbarkeit über 12 Monate**

### **2.4.4.1 Orthophosphatkonzentrationen ( $\text{P}_i$ - Konzentration) in den Bodenlösungen**

Tabelle 14 und 15 zeigten die  $\text{P}_i$ -Werte der Bodenlösungen. Wie erwartet stiegen durch die  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ -Düngung die Werte nach einem Monat an, in den Schluffböden im Mittel im Vergleich zur Kontrolle auf 198 % (Tabelle 14) und in den Sandböden auf 232 % (Tabelle 15). Mit dem KS Sh wurden nur Werte von 124 bzw. 113 % erreicht, mit den KS Gö sanken die Werte im Mittel auf 82 bzw. 62 % ab. Auf den Böden Börry P-80, Dorstadt P-20, Düshorn P-22 und Hodenhagen P-22 sind die Absenkungen unter den Ausgangswert durch KS Gö statistisch signifikant. Das sind die Böden, die die höheren P- Ausgangswerte (vgl. Tabelle 9) besaßen. Dagegen stiegen auf den Böden mit den niedrigen P- Ausgangsgehalten (Elliehausen, Börry P-0, Dorstadt P-0, Rehburg-Loccum) die  $\text{P}_i$ - Werte an, bei den ersten drei sogar signifikant. Der Einfluß der selben P- Gabe als KS Gö auf die  $\text{P}_i$ - Konzentration hing also vom P- Gehalt des Bodens ab. Dieses Bild bestätigt sich prinzipiell auch nach 6 bzw. 12 Monaten. Wichtig erscheint, dass der Unterschied in der Wirkung der zwei Klärschlämme nach 12 Monaten noch immer klar zu erkennen ist. **Während KS Sh die  $\text{P}_i$ - Werte in allen neun Böden im Vergleich zur P 0 anhebt, besonders deutlich in den Lehmböden, wird die  $\text{P}_i$ - Konzentration durch KS Gö in den Böden Börry P-80, Dorstadt P-20, Düshorn P-22 und Hodenhagen P- 22 deutlich gesenkt.**

**Tabelle 14:** Orthophosphatkonzentration ( $P_i$ ) in der Bodenlösung ( $\mu\text{g l}^{-1}$ ) von 5 Schluffböden nach Inkubation von 1, 6 bzw. 12 Monaten, P-Zugabe:  $30\text{mg P kg}^{-1}$  Boden entsprechend  $187\text{ mg P / Gefäß}$

Standort	Ohne P	CaHPO <sub>4</sub>	KS Gö	KS Sh	GD <sub>0,05</sub> (Tukey)
-----P <sub>i</sub> ( $\mu\text{g l}^{-1}$ )-----					
Nach 1 Monat (ohne Filtration)					
Elliehausen	4	71	17	13	19
Börry P-0	56	202	79	81	21
Dorstadt P-0	60	231	98	147	20
Börry P-80	279	800	181	355	33
Dorstadt P-20	713	890	536	781	26
<b>Mittelwert (rel.)</b>	<b>222 (100)</b>	<b>438 (198)</b>	<b>182 (82)</b>	<b>275 (124)</b>	
Nach 6 Monaten (mit Filtration 0,45 $\mu\text{m}$ )					
Elliehausen	5	46	11	9	7
Börry P-0	58	176	95	119	16
Dorstadt P-0	71	313	120	207	38
Börry P-80	311	576	232	448	16
Dorstadt P-20	748	1016	643	938	38
<b>Mittelwert (rel.)</b>	<b>238 (100)</b>	<b>425 (179)</b>	<b>220 (92)</b>	<b>344 (144)</b>	
Nach 12 Monaten (mit Filtration 0,45 $\mu\text{m}$ )					
Elliehausen	4	45	14	10	2
Börry P-0	78	250	110	160	22
Dorstadt P-0	78	354	154	264	12
Börry P-80	385	692	273	615	28
Dorstadt P-20	728	1017	698	1012	<b>40</b>
<b>Mittelwert (rel.)</b>	<b>255 (100)</b>	<b>472 (185)</b>	<b>250 (98)</b>	<b>412 (162)</b>	



**Tabelle 15:** Orthophosphatkonzentration ( $P_i$ ) in der Bodenlösung ( $\mu\text{g l}^{-1}$ ) von 4 Sandböden nach Inkubation von 1, 6 bzw. 12 Monaten, P-Zugabe:  $30\text{mg P kg}^{-1}$  Boden entsprechend  $187\text{ mg P / Gefäß}$

Standort	Ohne P	CaHPO <sub>4</sub>	KS Gö	KS Sh	GD <sub>0,05</sub> (Tukey)
-----P <sub>i</sub> ( $\mu\text{g l}^{-1}$ )-----					
Nach 1 Monat (ohne Filtration)					
Rehburg-Loccum	11	52	20	38	26
Düshorn (Brache)	41	86	48	54	14
Düshorn P-22	276	677	131	293	70
Hodenhagen P-22	142	283	94	148	20
<b>Mittelwert (rel.)</b>	<b>118 (100)</b>	<b>275 (232)</b>	<b>73 (62)</b>	<b>133 (113)</b>	
Nach 6 Monaten (mit Filtration 0,45 $\mu\text{m}$ )					
Rehburg-Loccum	14	32	16	25	5
Düshorn (Brache)	21	43	21	43	9
Düshorn P-22	245	499	147	271	9
Hodenhagen P-22	111	183	77	123	15
<b>Mittelwert (rel.)</b>	<b>98 (100)</b>	<b>189 (193)</b>	<b>65 (66)</b>	<b>115 (117)</b>	
Nach 12 Monaten (mit Filtration 0,45 $\mu\text{m}$ )					
Rehburg-Loccum	13	28	10	26	5
Düshorn (Brache)	19	34	19	33	4
Düshorn P-22	280	477	177	299	19
Hodenhagen P-22	118	164	85	121	9
<b>Mittelwert (rel.)</b>	<b>108 (100)</b>	<b>176 (163)</b>	<b>73 (68)</b>	<b>120 (111)</b>	

#### 2.4.4.2 P-Sorption der Böden

Aus Tabelle 16 und 17 ergibt sich durch die Zufuhr von  $\text{CaHPO}_4$  nach 1 Monat wie erwartet eine Abnahme der P-Sorption bei den Schluffböden auf 81% (Tabelle 16), den Sandböden auf 91% (Tabelle 17). Durch die Zufuhr von KS Sh blieb die P-Sorption nahezu auf dem gleichen Niveau wie bei den Kontrollen (im Mittel 95% bzw. 103%). Von 8 Böden stieg nach Zugabe von KS Gö die P-Sorption in 7 Fällen (nach 1 Monat) signifikant an. Auf den Lehmböden waren es im Mittel ca. 16% und auf den Sandböden ca. 12%. Auch nach 6 bzw. 12 Monaten waren die Trends die gleichen.

In der Tabelle 18 kann neben der Wirkung der Zeit auf die P-Sorption auch die Wirkung der Klärschlammmenge auf die P-Sorption abgelesen werden, da neben der P-Menge von  $30 \text{ mg kg}^{-1}$  auch die doppelte bzw. dreifache KS-Menge in die Böden eingebracht worden war ( $60$  bzw.  $90 \text{ mg P kg}^{-1}$ ). Betrachtet man zunächst den Faktor Zeit und setzt die P-Sorption bei den drei P-Stufen nach 1 Monat jeweils gleich 100, so sieht man, dass die Werte innerhalb von 12 Monaten auf den Schluffböden bei KS Gö je nach KS-Zugabe auf 91, 88 bzw. 89% also im Mittel um ca. 10% absinken. Auf den Sandböden sind es im Mittel innerhalb von 12 Monaten 91, 83 bzw. 78%, also im Mittel ca. 16%. Nach KS Sh-Düngung ist ein ähnlicher Trend zu beobachten: Absenkung auf den Schluffböden im Mittel um ca. 10%, auf den Sandböden ca. 7%. Die Veränderungen in den einzelnen Böden sind in den Tabellen 8.4 und 8.5 im Anhang zu finden.

Als mögliche Ursache für diese Senkung der P-Sorption kommt eine Alterung der Eisenverbindungen in Frage. Das ist später zu diskutieren.

Betrachtet man den Effekt der angewendeten P-Mengen in Form der Klärschlämme, so zeigt sich Folgendes:

**Auf den Schluffböden** steigt zu allen drei Untersuchungszeitpunkten die P-Sorption nach KS Gö-Anwendung von der niedrigen P-Gabe bis zur höchsten P-Gabe ganz klar auf etwa 120% an (118 bis 123%). Bei den Varianten mit KS Sh liegen die Sorptionswerte stets unter 100% (87 – 94%), d.h. selbst eine

Verdreifachung der KS Sh- Menge erhöhte zu keiner Zeit die Relativwerte der P- Sorption.

**Auf den Sandböden** ist das Bild anders. Hier zeigten die Böden nur nach einem Monat einen klaren Trend zum Anstieg der P- Sorption nach erhöhter P- Zufuhr mit KS Gö: 100 < 114 < 127 %. Nach 12 Monaten war der Anstieg viel schwächer: 100 < 103 < 108 %. Die Einzelwerte in Tabelle 8.4 und 8.5 im Anhang belegen, dass sich die einzelnen Böden etwas differenzierter verhalten. Nach 12 Monaten zeigten die Böden Düshorn P-22 und Hodenhagen P-22 noch einen klaren Anstieg der P- Sorption mit der Klärschlammmenge, während bei Düshorn (Brache) und Rehburg-Loccum die Werte zwischen den P- Stufen sehr ähnlich waren (99 bis 105%).

Die P- Gabe in Form von KS Sh hatte zu keiner Zeit einen eindeutigen Einfluß auf die Werte der P- Sorption. Die Werte lagen zwischen 95 und 106% bezogen auf die niedrigste P-Stufe.

**Tabelle 16:** P-Sorption von 5 Schluffböden 1 Monat bzw. 6 Monate und 12 Monate nach der P-Düngung,

30 mg P / kg Boden entsprechend 187 mg P / Gefäß

Standort	Ohne P	CaHPO <sub>4</sub>	KS Gö	KS Sh	GD <sub>0,05</sub> (Tukey)
-----P-Sorption in mg kg <sup>-1</sup> Boden-----					
Nach 1 Monat					
Elliehausen	66	48	67	53	11,0
Börry P-0	43	38	51	44	1,9
Dorstadt P-0	49	41	54	46	1,4
Börry P-80	27	24	43	33	3,0
Dorstadt P-20	28	25	35	27	0,8
<b>Mittelwert (rel.)</b>	<b>43 (100)</b>	<b>35 (81)</b>	<b>50 (116)</b>	<b>41 (95)</b>	
Nach 6 Monaten					
Elliehausen	57	52	59	57	
Börry P-0	36	30	45	39	4,7
Dorstadt P-0	45	38	48	42	4,0
Börry P-80	27	22	41	25	2,3
Dorstadt P-20	30	25	36	29	6,0
<b>Mittelwert (rel.)</b>	<b>39 (100)</b>	<b>33 (85)</b>	<b>46 (118)</b>	<b>38 (97)</b>	
Nach 12 Monaten					
Elliehausen	58	53	60	58	1,6
Börry P-0	42	37	48	42	3,6
Dorstadt P-0	41	34	45	37	8,1
Börry P-80	30	23	41	28	3,2
Dorstadt P-20	27	24	30	26	5,6
<b>Mittelwert (rel.)</b>	<b>40 (100)</b>	<b>34 (85)</b>	<b>45 (113)</b>	<b>38 (95)</b>	

**Tabelle 17:** P-Sorption von 4 Sandböden 1 Monat bzw. 6 Monate und 12 Monate nach der P-Düngung,

30 mg P / kg Boden entsprechend 187 mg P / Gefäß

Standort	Ohne P	CaHPO <sub>4</sub>	KS Gö	KS Sh	GD <sub>0,05</sub> (Tukey)
-----P-Sorption in mg kg <sup>-1</sup> Boden-----					
Nach 1 Monat					
Rehburg-Loccum	82	78	83	81	2,6
Düshorn (Brache)	72	66	78	73	4,6
Düshorn P-22	27	23	38	31	4,4
Hodenhagen P-22	53	43	60	54	5,5
<b>Mittelwert (rel.)</b>	<b>58 (100)</b>	<b>53 (91)</b>	<b>65 (112)</b>	<b>60 (103)</b>	
Nach 6 Monaten					
Rehburg-Loccum	88	80	84	85	4,5
Düshorn (Brache)	83	78	82	82	2,6
Düshorn P-22	54	47	57	53	5,4
Hodenhagen P-22	61	54	82	69	3,7
<b>Mittelwert (rel.)</b>	<b>71 (100)</b>	<b>64 (90)</b>	<b>76 (107)</b>	<b>72 (101)</b>	
Nach 12 Monaten					
Rehburg-Loccum	85	83	87	85	9,1
Düshorn (Brache)	77	70	79	75	5,9
Düshorn P-22	33	27	38	33	5,9
Hodenhagen P-22	56	53	57	60	3,2
<b>Mittelwert (rel.)</b>	<b>63 (100)</b>	<b>58 (92)</b>	<b>65 (103)</b>	<b>63 (100)</b>	

**Tabelle 18:** Einfluss von Klärschlamm (Höhe der P-Gabe) und Inkubationszeit (1, 6 und 12 Monate) auf die relative P-Sorption der Böden (P-Sorption der Böden ohne P =100)

**Schluffböden:** Mittel aus Börry P - 0, P - 80; Dorstadt P-0, P-20

**Sandböden:** Mittel aus Düşhorn, Rehburg, Hodenhagen

P-Form	mg P/kg	Inkubationszeit in Monaten								
		1	6	12	1	6	12	1	6	12
		Relative P-Sorption								
<b>Schluffböden</b>										
ohne P	0	100	100	100						
CaHPO <sub>4</sub>	30	88	85	86				100	94	95
KS Gö	30	129	127	118	100	100	100	100	98	91
	60	148	136	130	115	107	110	100	92	88
	90	159	150	142	123	118	120	100	94	89
KS Sh	30	104	98	95	100	100	100	100	94	91
	60	98	92	91	94	94	96	100	94	93
	90	98	86	83	94	88	87	100	88	85
<b>Sandböden</b>										
ohne P	0	100	100	100						
CaHPO <sub>4</sub>	30	88	91	91				100	103	103
KS Gö	30	116	111	106	100	100	100	100	96	91
	60	132	104	109	114	94	103	100	79	83
	90	147	107	114	127	96	108	100	73	78
KS Sh	30	104	105	101	100	100	100	100	101	97
	60	106	100	98	102	95	97	100	94	92
	90	110	101	98	106	96	97	100	92	89

### 2.4.4.3 Beziehung zwischen den Bodengehalten an Fe<sub>ox</sub> und der P-Sorption

Die Abbildungen 7, 8 und 9 zeigen die Zusammenhänge zwischen den Gehalten der Böden an oxalatlöslichem Eisen (Fe<sub>ox</sub>) und der P-Sorption. Wiedergegeben sind stets die Messwerte, die einen Monat nach der Klärschlammapplikation in den Böden für (Fe<sub>ox</sub>) und die P-Sorption gefunden wurden. P-0 entspricht der Variante ohne P- Düngung. Gö1, Gö2 und Gö3 stehen für die gestaffelten P- Gaben (187, 374, 560 mg P / Gefäß bzw. 30, 60 und 90 mg P / kg Boden). Vom KS Sh wurde nur der Wert mit der höchsten P- Gabe eingezeichnet, da nur dort eine interessante Fe- Menge mit ausgebracht worden war. Diese lag in der Größenordnung der Gö1- Gabe. Ausnahmslos steigt die P- Sorption mit zunehmenden Fe<sub>ox</sub>-Werten an. Dabei liegen die Bestimmtheitsmaße für die Regressionsgeraden bei den Lehm Böden zwischen 0,87 und 0,58 aber bei den Sandböden (Abbildung 9) über 0,92. Das bedeutet, dass die Beziehung zwischen den Fe<sub>ox</sub>-Gehalten in den Böden und der P-Sorption eng ist.

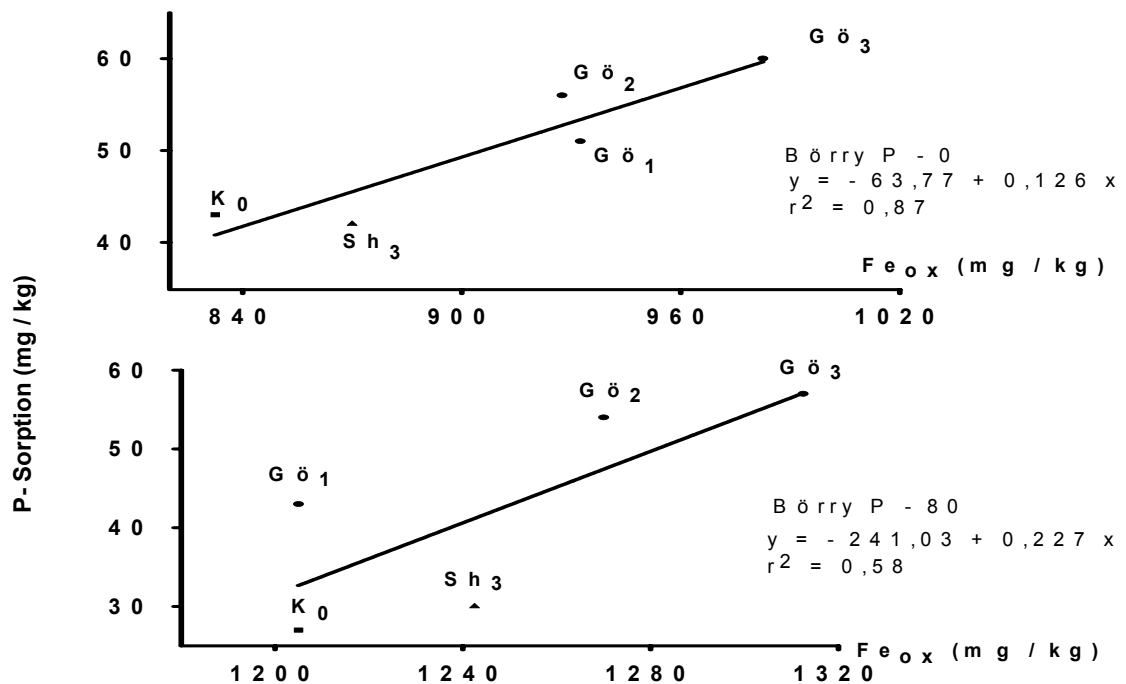
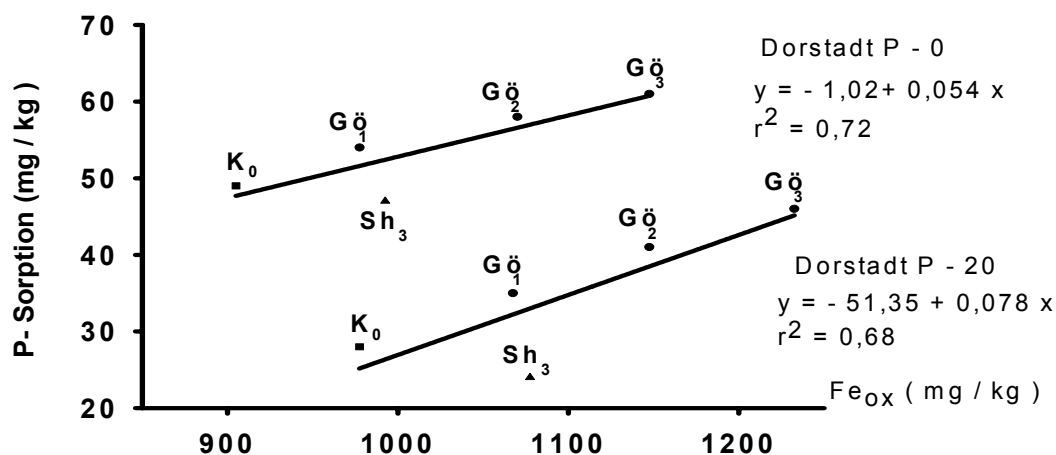
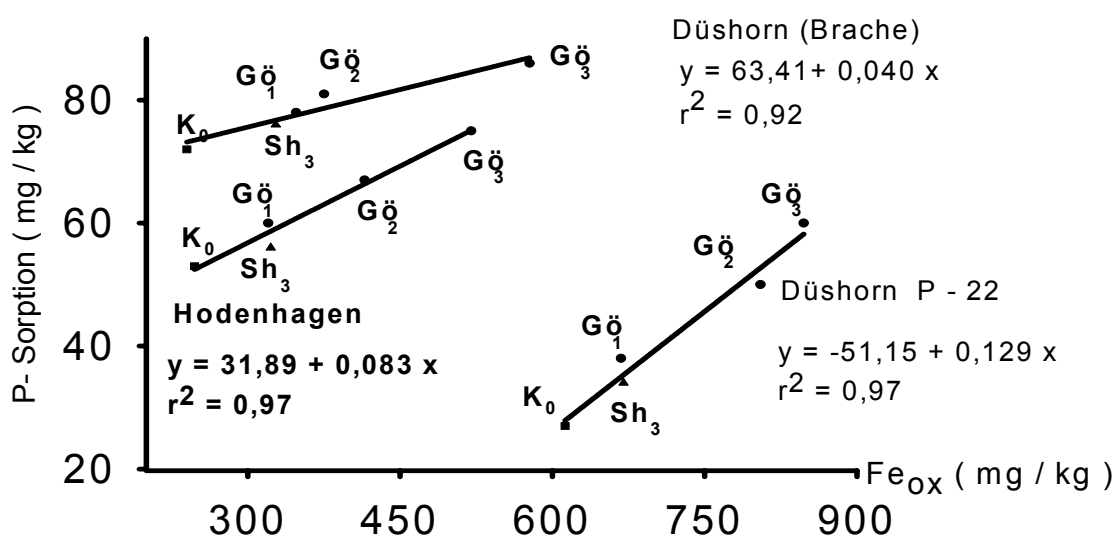


Abbildung 7: Beziehungen zwischen den Bodengehalten an oxalatlöslichem Eisen (Fe<sub>ox</sub>) und der P-Sorption in zwei P-Varianten eines Schluffbodens (Börry P-0, P-80) 1 Monat nach der KS-Applikation



**Abbildung 8:** Beziehungen zwischen den Bodengehalten an oxalatlöslichem Eisen ( $Fe_{ox}$ ) und der P- Sorption in zwei Varianten des Lehmbodens Dorstadt (P-0, P-20) 1 Monat nach der KS- Applikation



**Abbildung 9:** Beziehungen zwischen den Bodengehalten an oxalatlöslichem Eisen ( $Fe_{ox}$ ) und der P- Sorption in drei Sandböden Düşhorn (Brache), Düşhorn P-22, Hodenhagen P-22) 1 Monat nach der KS- Applikation



## 2.5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die zentrale Frage der Untersuchungen war, ob der hohe Fe-Gehalt des KS Gö bzw. dessen weites molares Fe: P - Verhältnis von 1:0,3 negative Auswirkungen auf die P-Aufnahme und damit das Wachstum der Pflanzen hat und welche Ursachen dafür verantwortlich sind. Als Zweites ergab sich die Frage, ob sich die P-Aufnahme der Pflanzen aus den mit verschiedenen P-Quellen gedüngten Böden längerfristig, hier im Laufe von 3 Jahren, zwischen den 3 P-Düngungsvarianten veränderte.

Berechnet man zur Beantwortung der ersten Frage zunächst die Mittelwerte der P-Aufnahmen des Maises für die Varianten mit 187 mg P / Gefäß ( ca. optimale P- Gabe), so konnte **der Mais** im Vergleich zur  $\text{CaHPO}_4$  –Variante aus den 5 Böden sowie dem Quarzsand, die mit KS Gö gedüngt waren, nur 76 % P aufnehmen, während aus den Böden mit KS Sh 92 % P aufgenommen werden konnten (Tabelle 8). Pauschal betrachtet lagen also beide Klärschlämme in ihrer P-Bereitstellung für die Pflanzen klar unter derjenigen der Orthophosphat-Variante, wobei der KS Gö durch die niedrigsten Werte besonders auffiel. Eine detailliertere Betrachtung der Resultate ergibt ein differenzierteres Bild von der Wirkung der zwei Schlämme. Die Resultate mit dem Substrat Quarzsand sind in erster Linie für die niedrigen Mittelwerte der P-Entzüge der Mais- Pflanzen verantwortlich (25 bzw. 37 %). Einerseits ist der P- freie Quarzsand ein ideales Substrat, um die Aufnehmbarkeit gelösten Phosphates zu prüfen, da er keine P-Sorptionsplätze besitzt und damit die P-Verfügbarkeit nicht negativ beeinflussen kann. Andererseits ist er ein inertes Material und kein Boden mit all seinen biologischen und biochemischen Eigenschaften. Die Ausklammerung der Quarzsandvarianten aus der Betrachtung erhöht die Werte der P-Aufnahmen gegenüber  $\text{CaHPO}_4$  bei KS Gö auf 86 % bzw. 102 % bei KS Sh (Tabelle 8). Das heißt, **bei Anwendung von KS Sh wurde im Mittel aller Ackerböden, bei geringen Unterschieden zwischen ihnen, die gleiche P-Aufnahme erreicht wie aus  $\text{CaHPO}_4$ .**

Bemerkenswert ist, dass sich die 86 %-ige P-Aufnahme aus den KS Gö-Varianten bei Trennung der Schluff- von den Sandböden weiter stark differenziert. Auf den Schluffböden wurde nur eine P-Aufnahme von 75 %

erreicht, bei den Sandböden aber im Mittel 104 %, also Gleichheit mit den  $\text{CaHPO}_4$ -Varianten erzielt. Auf dieses Resultat ist später zurückzukommen.

Beim gleichen P- Düngungsniveau verhält sich **Rotklee** ähnlich wie Mais. Auch er nahm im Mittel aller 5 Böden und Quarzsand aus KS Gö nur 81% P im Vergleich zur  $\text{CaHPO}_4$  – Variante auf, während aus den Böden mit KS Sh 103% aufgenommen wurden. Läßt man auch hier die Quarzsandvariante weg, so steigen die P- Entzüge bei KS Gö auf 87% bei KS Sh auf 106%. Eine Trennung in Schluff- und Sandböden brachte beim Rotklee keine so deutlichen Unterschiede wie beim Mais. Vom Boden Elliehausen abgesehen, war die P- Aufnahme des Rotklee aus KS Gö auf allen Böden der Variante mit  $\text{CaHPO}_4$  und der KS Sh- Variante deutlich unterlegen.

Das **Weidelgras** als dritte Kultur zeigte ein etwas anderes Verhalten als Mais und Rotklee. Im Mittel aller 5 Böden wurden aus KS Gö 100 % P im Vergleich zur Ca-P-Variante, also die gleiche P- Menge von Gras aufgenommen. Aus KS Sh waren es sogar 119 %. Interessant ist, dass das Gras auf dem Quarzsand aus beiden KS im 3. Jahr deutlich mehr P aufnehmen konnte (KS Gö 55 %, KS Sh 151 %) als aus  $\text{CaHPO}_4$ . Auch auf dem P- armen Substrat Elliehausen bestand die Tendenz einer höheren P- Aufnahme des Grases im Vergleich zur Ca-P-Variante. Das Weidelgras war also offenbar in der Lage, den Phosphor im 3. Anbaujahr in gleicher Weise zu nutzen wie aus dem  $\text{CaHPO}_4$ . Die Resultate der P- Entzüge des Weidelgrases, das erst nach einjähriger Inkubation in 8 Ackerböden angebaut worden war (Tabelle 12) verhielt sich ähnlich wie Mais bzw. Rotklee. Es hatte bei KS Gö- Düngung im Mittel der 8 Böden nur 85 % des P der  $\text{CaHPO}_4$ - Variante aufgenommen. Eine Trennung zwischen den Schluff- und Sandböden erbrachte zumindest bei der KS Gö- Anwendung keine klare Differenzierung zwischen den Böden. Die P- Entzüge lagen bei 84 bzw. 80 % bei den Böden mit mäßiger P- Versorgung. Bei KS Sh- Anwendung erreichten die Pflanzen auf den 3 P- armen Schluff- und den drei Sandböden P- Entzüge von 109 %.

**Aus diesen Resultaten leitet sich insgesamt der Schluss ab, dass die P- Aufnahme besonders aus dem KS Sh mit seinem engen Fe: P – Verhältnis (1:1,1), unabhängig von Bodenart und P-Gehalt der Böden, der aus**

**CaHPO<sub>4</sub> nahezu gleich war. Für Klärschlamm Gö traf das nicht zu. Unabhängig davon, ob die Pflanzen 1 Monat oder 13 Monate nach der P-Düngung angebaut worden waren, lagen die P- Entzüge der Pflanzen (Mais, Rotklee, Weidelgras) nur bei ca. 76 bis 87% bezogen auf die CaHPO<sub>4</sub>- Variante.** Ausnahmen davon waren Mais auf den Böden Rehburg-Loccum und Düshorn (Brache) (Tabelle 8), Rotklee auf Boden Elliehausen und Weidelgras im 3. Anbaujahr, wo mit KS Gö der gleiche P- Entzug wie mit CaHPO<sub>4</sub> erreicht wurde.

Eine **wesentliche Ursache** für die geringe P-Aufnahme, besonders auf den Schluffböden, ist auf die veränderte P-Dynamik in den Böden nach der Düngung mit den drei P-Quellen zurückzuführen. Durch eine CaHPO<sub>4</sub>-Düngung war auf allen Böden nach einem Monat die P- Sorption erwartungsgemäß gesunken. Aber nach der P-Applikation mit KS Gö war die P- Sorption z.B. auf den Böden Börry P-0 und P-80 auf 120 bzw. 160 % der Kontrolle (P 0) signifikant angestiegen und blieb 6 Monate lang auf dieser Höhe (Tabelle 16). Bei den Sandböden stieg die P- Sorption nach 1 Monat nur maximal um 8 % und war nach 6 Monaten gar nicht mehr nachweisbar (Tabelle 17). Dagegen trat auf den Sandböden infolge KS Sh- Anwendung kaum eine Anhebung der P- Sorption ein. Der Anstieg der P- Sorption auf den Schluffböden - insbesondere durch KS Gö – verursachte im Vergleich zur CaHPO<sub>4</sub>-Variante deutlich verminderte Konzentrationen an Orthophosphat (P<sub>i</sub>) in der Bodenlösung (Tabelle 14 und 15). Diese war in den meisten Fällen signifikant niedriger als in den KS Sh- Varianten. Die auf den Schluffböden gemessene geringere P-Aufnahme der Maispflanzen nach KS Gö- Düngung ist also offenbar auf die gesunkene P-Verfügbarkeit durch den eisenreichen KS Gö zurückzuführen. Interessanterweise fanden Zorn et al. (2001) auf einem Lösslehmboden, dass vier aufeinander folgende Kulturpflanzen nach Düngung mit Klärschlämmen, die bis 7 % Fe aus der P-Elimination enthielten, ebenfalls um bis zu 20 % geringere P-Aufnahmen als Pflanzen nach Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> – Düngung aufwiesen. Ferner konnten sie mit mehreren Methoden nachweisen, dass das Inlösungsgehen von Phosphat in Böden, die mit solchen Fe- reichen Schlämmen gedüngt waren, deutlich geringer war als nach Zufuhr von Schlämmen mit P-Fällung durch Kalk oder mit biologischer P-Elimination. Auf diese als negativ zu wertenden Effekte

von KS mit P-Elimination durch Eisensalze haben Fritsch und Werner (1989) bereits hingewiesen.

Während also auf den P- armen Schluffböden Börry P-0 und Elliehausen die Maispflanzen aus KS Gö weniger P als aus  $\text{CaHPO}_4$  aufnehmen konnten und auch weniger Trockenmasse bildeten (Abb. 5 und 6), bildeten die Pflanzen trotz ähnlich hoher P-Aufnahme aus KS Gö auf den Sandböden Rehburg und Düshorn teilweise sogar mehr Trockenmasse als Pflanzen mit  $\text{CaHPO}_4$ -Düngung. Hier muss es neben der P-Versorgung noch andere Wirkungen des KS Gö geben, die für das Wachstum wichtig sind. Tabelle 19 zeigt eine mögliche Erklärung. Der KS Gö erhöhte auf Grund seines hohen Kalkgehaltes in allen Böden den pH-Wert. Dieser pH- Anstieg war für das Pflanzenwachstum aber nur auf den Sandböden bedeutsam, da deren pH-Werte in den Kontrollgefäßen bzw. den Gefäßen der  $\text{CaHPO}_4$ - und KS Sh- Varianten nicht im Optimum lagen. Bei pH-Werten  $< 5$  ist mit Al-Toxizität und erhöhter Mn-Löslichkeit zu rechnen (Scheffer/Schachtschabel, 2002). Das heißt, dass für das bessere Wachstum des Maises auf den Sandböden nach KS Gö-Anwendung neben der P-Zufuhr vor allem die reduzierte Bodenacidität verantwortlich gewesen sein dürfte.

**Tabelle 19:** pH-Werte ( $\text{CaCl}_2$ ) der Böden 1 Monat nach der Düngung mit

*187 mg P pro Gefäß (Mittelwerte aus 4 Wiederholungen)*

Boden	Ohne P	$\text{CaHPO}_4$	KS Gö	KS Sh
Börry P-80	6,2	6,2	7,3	6,2
Börry P-0	7,2	7,3	7,6	7,2
Elliehausen	7,7	7,7	7,9	7,7
Rehburg	4,3	4,3	4,9	4,4
Düshorn (Brache)	4,9	4,9	5,6	4,9

Ähnliches traf für den Rotklee zu (Tabelle 4), der auch auf Böden mit pH-Werten  $< 5$  ebenfalls weniger gut wächst (Schilling, 2000, S. 165). Insgesamt gesehen ist also das vergleichsweise gute Wachstum des Maises und dessen

relativ hohe P-Aufnahme auf den Sandböden Rehburg und Düshorn nach KS Gö- Applikation sowohl auf die Kalkwirkung als auch auf die P-Zufuhr zurückzuführen. Ein indirekter Beweis für diesen Schluss ergibt sich aus dem Experiment des Kapitels 2.3 und von den Ergebnissen des Weidelgrases nach der 1-jährigen Inkubationszeit. Dort gab es zusätzlich für drei Böden Varianten in denen Kalk zum Boden ohne P- Düngung zugegeben wurde. Die Auswirkung auf Wachstum und P- Entzug ging aus Tabelle 13 hervor. Man erkennt dort, dass auf dem Schluff- Boden von Dorstadt die Kalkung keinen positiven Effekt auf Wachstum und P- Aufnahme des Grases hatte. Dagegen bildeten die Pflanzen auf dem Sandböden Düshorn (Brache) und Rehburg- Loccum deutlich mehr Sprossmasse, ohne aber ihre P- Aufnahme zu erhöhen. Das ist ein klarer Hinweis, dass auf diesen Böden die pH- Anhebung durch die Kalkung die P- Dynamik der Sandböden kaum beeinflusst, aber andere negative Wachstumsfaktoren (erhöhte  $Al^{3+}$ - Konzentrationen bei pH 4,3) positiv für die Pflanzen verändert hat. **Eine Nutzung von KS mit hohen Kalkgehalten ist für die Landwirtschaft dann interessant, wenn die Kosten für den KS sehr gering sind, da sonst Kalk zur Regulierung der Bodenreaktion eingesetzt werden müsste.**

Ein besonderes Phänomen trat auf dem Boden Börry P-0 auf (Abbildung 6). Während der geringere Ertrag in der Variante KS Gö mit der geringen P- Aufnahme korrespondierte, traf das bei KS Sh nicht zu. Dort war der P-Entzug ebenso groß wie bei  $CaHPO_4$ -Düngung, aber der Ertrag war signifikant um 19 % niedriger. Eine mögliche Erklärung lässt sich aus der Kornbildung des Mais ablesen. Zur Ernte waren folgende Kornerträge bei den einzelnen Varianten gefunden worden: Kontrolle: 9 g;  $CaHPO_4$ : 25 g; KS Gö: 17 g; KS Sh: 17 g (nicht in Tabellen dargestellt). Aus früheren Arbeiten (Römer und Schilling, 1986) ist bekannt, dass der P-Ernährungszustand der Jungpflanzen über die Anlage der generativen Organe entscheidet. Man erkennt, dass zwar mit der KS-Düngung (KS Gö und KS Sh) doppelt so viel Kornmasse gebildet wurde wie in der P-0-Variante, aber wesentlich weniger als bei  $CaHPO_4$ -Ernährung. Das heißt, das Phosphat, welches man in den Pflanzen zur Ernte in der Variante KS Sh gefunden hat, ist vermutlich erst in späten Abschnitten des Wachstums aufgenommen worden und ist deshalb zur Anlage der generativen Organe zu

spät gekommen. **Wenn diese Zusammenhänge tatsächlich zutreffen, dann liegt die Vermutung nahe, dass ein zeitlich begrenzter hoher P-Bedarf in frühen Entwicklungsstadien mancher Kulturpflanzen mit diesem Klärschlamm (KS Sh) nicht gedeckt werden kann, da sein Phosphat erst mit der Zeit verfügbar wird.**

**Es bleibt die Frage nach der längerfristigen P-Düngewirkung der Klärschlämme.** Was die P-Aufnahme der Rotkleepflanzen betrifft, so zeigen sie im Mittel für die 5 Ackerböden, bezogen auf die Ca-P-Variante, nahezu die gleichen relativen P-Entzüge wie der Mais (KS Gö 89 %, KS Sh 107 %, Tab. 5). Lässt man den extrem P- armen und carbonathaltigen Unterboden (= Löß) aus Elliehausen aus der Betrachtung heraus, so liegt die P-Aufnahme bei KS Gö in Bezug auf die Ca-P-Variante nur bei 82 %, die des KS Sh aber bei 100 %. Das heißt, der nachgebaute Rotklee war im Vergleich zu Mais bis auf das Substrat Löß (Elliehausen) nicht in der Lage, das P im KS Gö im 2. Nutzungsjahr gleich oder besser zu nutzen als den Phosphor aus  $\text{CaHPO}_4$ . Das überrascht, denn vom Rotklee ist bekannt, dass er bei P-Unterversorgung verstärkt organische Säureanionen (Citrat, Oxalacetat) exsudiert (Gerke, 1995). Für Mais trifft das viel weniger zu (Beißner, 1997). Solche Anionen erhöhen die P-Löslichkeit (Gerke, 1992; Keller, 2000) vermutlich im Wesentlichen über einen Ligandenaustausch des sorbierten Phosphates (Gerke, 1992). Offenbar ist aber das Phosphat im KS Gö wesentlich fester gebunden als im KS Sh bzw. als das Phosphat, das mit  $\text{CaHPO}_4$  (= Mineraldünger) in den Boden gelangt war.

Interessant ist, dass auch Weidelgras das P aus KS Gö nicht besser nutzen konnte als das P aus  $\text{CaHPO}_4$ , selbst wenn beide Dünger 1 Jahr im Boden umgesetzt worden waren. Weidelgras hat eine 10 mal höhere Wurzellängendichte als manche dikotyle Pflanze (Egle, pers. Mitteilung). Das könnte bedeuten, dass mehr Wurzeln zu Düngerpartikeln Kontakt haben als z.B. die Wurzeln von Rotklee. Aber offenbar ist auch Weidelgras nicht in der Lage, das P aus KS Gö besser zu nutzen als das aus KS Sh, weil dieses fest an Eisenoxidhydrate gebunden ist.

Insgesamt gesehen gibt es in Bezug auf die längerfristige Nutzung des P nur geringe Unterschiede zwischen den zwei KS. Während der P- Entzug aus KS

Sh auf den typischen Ackerböden (Börry, Rehburg, Düşhorn) in allen drei Versuchsjahren dem aus  $\text{CaHPO}_4$  stets nahezu gleich war (100 bis 104%), lag der P-Entzug aus KS Gö in den ersten zwei Versuchsjahren auf den schwereren Böden nur bei 78 – 82% und stieg erst im 3. Jahr auf 87 – 95% an. Auf diesen Böden war also die Phosphorfreisetzung aus KS Gö verzögert, so dass insgesamt nur 90% der P-Ausnutzung in Vergleich zur  $\text{CaHPO}_4$ -Düngung erreicht wurden. Auf den Sandböden trat diese Verzögerung nicht ein.

**Zum Schluss soll noch einmal auf die Frage eingegangen werden, warum die zwei Klärschlämme so verschiedene Eisengehalte besitzen** und was dies für die praktische Anwendung bedeutet. Wenn ein Klärschlamm wie der KS Gö 65 kg Fe / t TM enthält und alle drei Jahre 5 t TM / ha ausgebracht werden dürfen, so gelangen mit einer solchen Applikation 325 kg Fe in Form verschiedener Fe-Verbindungen zusätzlich zum Fe, das schon ohne Fe-Zugabe im Klärschlamm ist, in den Boden. Das ist eine Menge, die in der Mehrzahl der Fälle mit hoher Sicherheit den Gehalt des Oberbodens an oxalatlöslichem Eisen erhöht (vgl. Gö<sub>1</sub>-Varianten in der Abbildung 7). Gesteigerte Schlammengen führen zu einem weiteren linearen Anstieg der  $\text{Fe}_{\text{ox}}$ -Gehalte sowie der P-Sorption. D. h., dass tatsächlich dem applizierten Fe eine Schlüsselrolle bei der P-Sorption zukommt. Auf diesen Zusammenhang haben Fritsch und Werner (1989) hingewiesen. Von Seiten der Abwassertechnologie wird diskutiert, dass bei der P-Elimination durch Eisensalze Eisenphosphate (etwa Strengit) gebildet werden (Scheffer, 2000). Offenbar fehlen aber bisher eindeutige Identifizierungen der P-Fällungsprodukte. Wird  $\text{FeSO}_4$  wie im Fall des KS Gö vor dem Zulauf in das Belebungsbecken zugegeben, so dürfte  $\text{Fe}^{2+}$  durch den starken Luftstrom rasch oxidiert werden und als  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ausfallen, denn der pH-Wert liegt dort bei ca. 7. Die braune Farbe im Belebungsbecken spricht für diesen Prozess. Vermutlich wird das Phosphat gleichzeitig an diese Hydroxide gebunden. Im Klärwerk Salzhausen wird Phosphat mit  $\text{FeCl}_3$  im Belebungsbecken eliminiert. Auch hier dürften Fe-Hydroxide ausfallen, die das Phosphat binden. Damit wäre in beiden Klärwerken die P-Eliminierung beendet. Im Klärwerk Göttingen werden dann aber noch zur Konditionierung des Schlammes  $\text{FeCl}_3$  und  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  zugegeben. Beides als Lösung bzw. als Suspension. Damit fällt

weiteres Fe- Hydroxid aus. Im Filterkuchen hatte damit der KS Gö ein molares Fe : P-Verhältnis von 1:0,3. Daraus geht hervor, dass die Eisenhydroxide/ -oxide vermutlich noch eine hohe P- Sorptionskapazität haben, was für einen Schlamm mit einem molaren Fe : P-Verhältnis von 1:1,2 wie im Fall KS Sh nicht zutrifft. Damit ist das Absinken der  $P_i$ - Konzentration sowohl in den Böden, die in den Gefäßen mit KS Gö inkubiert waren, zu erklären. Die neu in die Böden eingebrachten Sorbenten haben viele freie Sorptionsplätze und sorbieren daher Orthophosphationen aus der Bodenlösung. Diese Absenkung der  $P_i$ - Konzentration war noch 12 Monate nach der KS-Applikation zu messen (Tabelle 15). D. h., mit einer kurzfristigen Wiederfreisetzung des spezifisch gebundenen Phosphates ist also nicht zu rechnen. Hier stellt sich die Frage, ob ein längeres Zwischenlagern der Schlämme vor der Ausbringung auf die Felder zu einer Umwandlung junger, schlecht geordneter Fe-Oxide (Ferrihydrit) in gealterte Fe-Oxide führt, die dann eine geringere P- Sorption hätten (Schwertmann, 1998). Allerdings müsste auch die Nutzbarkeit der Phosphate dieser Schlämme extra geprüft werden. Ein Hinweis, dass sich die P- Sorption tatsächlich nach längerer Lagerung verringert, geht aus Tabelle 18 hervor. Dort ist zu erkennen, dass sich die P- Sorption im Boden unabhängig von der Höhe der KS- Menge des KS Gö innerhalb von 12 Monaten um ca. 10% auf den Schluffböden und ca. 10 – 20% bei den Sandböden verringert.

Mit 5 t KS Gö werden außerdem fast 1000 kg Ca/ha vorrangig als basisch wirksamer Kalk, ausgebracht. Hier muss offen bleiben, wie viel von dem ursprünglichen  $Ca(OH)_2$  noch als solches vorlag oder bereits neutralisierter Kalk ( $CaCO_3$ ) war. Auch  $CaCO_3$  -Partikel adsorbieren Phosphat (Parfitt, 1978). Mit dem KS Gö wird im Boden auch örtlich eine hohe Ca-Ionenkonzentration bei hohem pH auftreten. Das fördert die P-Bindung im Boden (Schwertmann und Amann, 1998) vermutlich durch die Ca-Phosphatbildung und zusätzlich die P-Bindung an  $CaCO_3$  -Partikel. Die bei KS Gö gemessenen höheren P- Sorptionswerte werden vermutlich durch die Adsorption an Fe- Hydroxide/ -Oxide, eine P- Sorption an  $CaCO_3$  und die Ca-Phosphatfällung verursacht.

Kalkapplikationen zu den untersuchten Böden waren nicht erfolgt, so dass eine Gewichtung der Anteile der P- Sorptionsprozesse nicht möglich ist. Dass bei



den Sandböden die Regressionsgeraden viel höhere Bestimmtheitsmaße aufweisen (Abbildung 9), kann vielleicht damit erklärt werden, dass in den Sandböden mit ihren pH-Werten von 4,3 bzw. 4,9 (Tabelle 19) der applizierte Kalk teilweise neutralisiert worden ist. Die pH-Werte waren auf Werte um 5 bis 5,6 angestiegen (Tabelle 19). Damit trat zumindest auf den Sandböden keine P-Sorption an  $\text{CaCO}_3$  auf. Im Wesentlichen waren vermutlich nur die Fe-Verbindungen als P-Sorbenten wirksam.

**Insgesamt ergibt sich**, dass die Verringerung der  $\text{P}_i$ -Konzentration in vier Böden offenbar eine Folge der erhöhten P-Sorption der Böden nach KS Gö-Applikation ist. Diese Zusammenhänge gelten offenbar für Böden mit Gehalten an lactatlöslichem P von mehr als  $69 \text{ mg kg}^{-1}$  (Börry P-80, Dorstadt P-20, Düshorn P-22). Eine Ausnahme macht Hodenhagen. Bei diesem Boden und bei allen anderen (Börry P-0, Dorstadt P-0, Elliehausen, Rehbürg, Düshorn-Brache) stiegen auch nach KS Gö-Applikation die  $\text{P}_i$ -Werte etwas an oder blieben auf dem Niveau der Kontrolle (P 0). Angesichts obiger Argumente überrascht dieser Befund zunächst. Er wird vermutlich damit erklärbar, dass die P-Bindung in den genannten Böden, die alle eine sehr geringe bis mäßige P-Verfügbarkeit (Lactatwerte) aufweisen (Tabelle 9), fester ist, als die im KS Gö. Das wäre aber zu überprüfen.

### Schlussfolgerungen

- Mais, Rotklee und Weidelgras nacheinander angebaut oder Weidelgras als 1. Kultur können sowohl auf schluffigen Böden als auch Sandböden P aus einem KS mit P-Elimination ( $\text{FeCl}_3$  im Belebungsbecken) ohne Konditionierung und einem molaren Fe: P-Verhältnis von 1:1,16 bzw. 0,86:1 nahezu gleiche P-Mengen aufnehmen wie bei  $\text{CaHPO}_4$ -Düngung.

Die Ausbringung eines solchen Klärschlamm ist zu empfehlen.

- Nicht generell empfohlen werden kann der KS Gö mit seinem weiten molaren Fe: P-Verhältnis von 1:0,33 bzw. 3:1 das aus der P-Elimination im Belebungsbecken ( $\text{FeSO}_4$ ) sowie der Konditionierung mit  $\text{FeCl}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2$  resultiert. Dieser KS erlaubt P-Entzüge auf Schluffböden von nur

75% bei Mais, von 89% bei Rotklee und 99% bei Weidelgras im 3. Jahr. Auf Sandböden werden bei Mais und Weidelgras ca. 100%, bei Rotklee nur 85% der P- Entzüge von  $\text{CaHPO}_4$  erreicht. Diese befriedigende Wirkung auf Sandböden beruht weniger auf der P- Zufuhr als auf der Kalk- Zufuhr, die die pH-Werte der Sandböden an hob und damit "Säureschäden" minderte.

- Klärschlämme wie der KS Gö mit dem molaren Fe: P- Verhältnis von 1:0,3 und dem hohen Kalkanteil verursachen in Böden mit mittlerer und hoher P- Versorgung eine Erhöhung der P- Sorptionskapazität und eine Senkung der Orthophosphatkonzentration der Bodenlösung. Die Änderung dieser Parameter ist Ausdruck einer verminderten P- Verfügbarkeit in den Böden. Letztere reduziert die P- Aufnahme der Pflanzen. Diese als grundsätzlich zu betrachtenden Vorgänge wurden nur nach Anwendung von 2 KS mit hohem bzw. niedrigem Fe- Gehalt gefunden. Sie sollten an einem größeren Spektrum von eisenhaltigen KS überprüft werden. Sollten sich diese Resultate bestätigen, ist der Schluss zu ziehen, dass zumindest bei der Schlammkonditionierung keine Eisensalze eingesetzt werden sollten.

## Teil II

### 3 Einjährige Experimente zur P- Aufnahme von Kulturpflanzen und P- Verfügbarkeit im Boden nach Applikation von 13 Klärschlämmen und verschiedener P- Dünger in einen humosen Sandboden

#### 3.1 Vorbemerkungen und Versuchsziel

In den vorangegangenen Versuchsserien wurde die P- Düngewirkung von zwei eisenhaltigen Klärschlämmen auf 9 Böden bzw. Substraten längerfristig (2 bis 3 Jahre) geprüft. In den nun folgenden Experimenten sollte das Spektrum der Klärschlämme beträchtlich erweitert werden (von 2 auf 13). Die Absicht war, Klärschlämme mit einem möglichst weiten Fe: P-Verhältnis (Einsatz von Fe zur P- Elimination und Schlammkonditionierung) bis hin zu einem engen Verhältnis (KS ohne Fe- Zugabe) auf ihre P- Düngewirkung zu prüfen. **Das Ziel war, eine begründete Entscheidung über den zu tolerierenden Eisengehalt der Klärschlämme zu treffen.** Um eventuell eine Aussage über eine mögliche Auswirkung von frisch gefällten Eisenhydroxiden in den Klärschlämmen auf die P- Verfügbarkeit zu erhalten, wurden auch Gefäße mit frisch gefällten Fe- Hydroxiden angesetzt. Im Spektrum der 13 Klärschlämme gab es auch einige mit hohem Kalkgehalt. Da damit eine Beeinflussung der Boden- pH-Werte und der P- Löslichkeit in den Böden zu erwarten war, sind auch Gefäße ohne P aber mit Kalk gedüngt worden, um Aussagen über eine mögliche Kalkwirkung der KS machen zu können. Außerdem gab es kombinierte Applikationen von Fe- Hydroxiden plus Kalk. Alle Klärschlämme wurden gefriergetrocknet und als gemahlene Pulver eingesetzt. Auf Grund der großen Zahl der KS wurde nur ein einzelner Boden benutzt. Es war ein Sandboden (Tabelle 21), sehr ähnlich dem Boden Düshorn (Brache) wie er bereits im Teil I benutzt worden war (Tabelle 3). Es wurde Weidelgras als Kulturpflanze ausgewählt. Im Drahthaus wurde Weidelgras (3 Schnitte) in Mitscherlichgefäßen kultiviert. Die P- Düngewirkung der KS wurde in diesen Experimenten mit einem in der Praxis üblichen P- Dünger, dem Triplephosphat, also  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , verglichen. Des Weiteren kam auch Hyperphosphat (gemahlenes Rohphosphat) zur Anwendung, da der pH- Wert des Sandbodens Düshorn 5,4 war. Neben dem Hauptziel des Experimentes, die P- Düngewirkung der KS zu messen (TM- Bildung, P-

Entzug), sollte auch der Einfluss auf die P- Verfügbarkeit der KS bzw. der anderen Zusätze getestet werden. Deshalb sind 4 Wochen nach Düngerapplikation (direkt vor der Aussaat) die Böden auf folgende Eigenschaften geprüft worden:

$P_f$ - Konzentration in der Bodenlösung

P- Sorptionsvermögen

Gehalt an DL – löslichem P

Gehalt an oxalatlöslichem Fe

pH-Wert ( $CaCl_2$ , 0,01 M)

Nach der Ernte wurden die Boden- pH-Werte wieder gemessen. Zu den Methoden siehe Kapitel 2.3.3

### 3.1.1 Verwendete Klärschlämme

Die 13 benutzten Klärschlämme stammen aus 12 niedersächsischen Klärwerken und einer nordrhein-westfälischen Kläranlage (Gütersloh). Alle Klärschlammproben wurden als frisches Material im Juli 2000 gewonnen. Für die Analysen und Gefäßversuche wurden Unterproben gefriergetrocknet. Die wichtigen Kenndaten der 13 benutzten Klärschlämme sind in Tabelle 20 wiedergegeben. Weitere Angaben siehe Tabelle 8.14 im Anhang. Die Klärschlämme sind nach ihrem molaren Fe / P- Verhältnis geordnet worden.

Man erkennt, die absoluten P- Gehalte der Klärschlämme schwankten zwischen  $8777 \text{ mg kg}^{-1}$  (Dollbergen) und  $38690 \text{ mg kg}^{-1}$  (Uelzen). Große Differenzen gab es auch in den Eisengehalten. KS Schöppenstedt besaß nur  $7031 \text{ mg kg}^{-1}$  während Einbeck  $79018 \text{ mg kg}^{-1}$  enthielt. Die P- Düngewirkung wurde aber bei gleichen Werten der P- Applikation geprüft, so dass die absoluten P- und Fe- Gehalte für das Versuchsziel weniger wichtig sind als die molaren Fe : P Verhältnisse des jeweiligen Schlammes. Dieses Verhältnis ist im Klärschlamm Dollbergen am weitesten. Bei 1 Mol Fe enthält der Schlamm nur 0,24 Mol Phosphat bzw. auf 1 Mol P entfallen 4,2 Mole Fe. Das engste Verhältnis hat der

KS Schöppenstedt mit 1 : 7,94 bzw. 0,1 : 1. Aus den Werten der CaO- Gehalte und pH-Werte geht hervor, dass die KS aus Einbeck, Uelzen, Salzhausen und Schöppenstedt nicht mit Kalk konditioniert waren.

**Tabelle 20:** Wichtige Kenndaten der gefriergetrockneten Klärschlämme

(Daten der LUFA Hameln)

KS Nr:	Ort	P mg kg <sup>-1</sup>	Fe mg kg <sup>-1</sup>	Molar. Fe:P Verhältnis	CaO mg kg <sup>-1</sup>	pH CaCl <sub>2</sub>
1	Dollbergen	8777	65045	1 : 0,24 (4,2)	235000	10,8
2	Göttingen	11354	61810	1 : 0,33 (3,0)	271000	11,2
3	Gronau	12096	53118	1 : 0,40 (2,5)	320000	12,0
4	Hameln	19650	55783	1 : 0,63 (1,6)	249000	10,1
5	Einbeck	34236	79018	1 : 0,77 (1,3)	58600	7,5
6	Herzberg	24410	54325	1 : 0,80 (1,3)	222000	7,95
7	Gütersloh	13799	27493	1 : 0,89 (1,1)	338000	12,1
8	Northeim	13974	26434	1 : 0,94 (1,1)	314000	10,3
9	Uelzen	38690	54610	1 : 1,26 (0,8)	64700	7,4
10	Osterode	30087	42050	1 : 1,27 (0,8)	218000	12,0
11	Salzhausen	28602	37728	1 : 1,35 (0,7)	35300	7,0
12	Uetze	15197	10704	1 : 2,51 (0,4)	390000	12,3
13	Schöppenstedt	31485	7031	1 : 7,94 (0,1)	48200	7,4

### 3.1.2 Verwendeter Boden

Die Kenndaten des eingesetzten Bodens gibt Tabelle 21 wieder. Das Bodenmaterial wurde aus der Ackerkrume (0-30 cm) entnommen. Der Boden Düshorn (Kreis Soltau-Fallingb.ostel) ist ein anlehmiger Sandboden pleistozänen Ursprungs mit niedrigem Lactat-P- Gehalt, der sich an der Grenze zwischen Gehaltsklasse B und C befindet.

**Tabelle 21: Kenngrößen des Versuchsbodens**

Ort	Ton	Schluff	Sand	pH	Humus	DL-Extr.	Fe <sub>ox.</sub>
	%	%	%	CaCl <sub>2</sub>	%	mg P kg <sup>-1</sup>	mg Fe kg <sup>-1</sup>
Düshorn							
(Brache)	1	6	93	5,4	3,8	45	1445

### 3.1.3 Genereller Versuchsaufbau

Tabelle 22 gibt die Varianten des geplanten Gefäßversuches wieder. Dem Ziel entsprechend gab es eine Kontrolle (K0) ohne P- Düngung sowie die 13 Varianten mit den gefriergetrockneten Klärschlämmen (KS 1 bis KS 13). Verglichen werden sollten die KS- Varianten mit den P- Düngern Hyperphosphat (Hy) bzw. Triplesuperphosphat (TSP). Es wurde nur mit einer P- Menge pro Gefäß gearbeitet. Da sich die P- Applikation von 187 mg P je Mitscherlichgefäß in den Experimenten mit den zwei Klärschlämmen KS Gö und KS Sh bewährt hatte (vgl. dortige Resultate), wurde hier mit der gleichen P- Menge, also mit ca. 30 mg P kg<sup>-1</sup> Boden (187 mg / 6 kg Boden je Mitscherlichgefäß), gedüngt. Die entsprechenden KS- Mengen kg<sup>-1</sup> Boden finden sich in Tabelle 8.15 im Anhang. Da mit den KS auch gefälltes Eisenhydroxid und Kalk in die Böden eingebracht wurde und deren Wirkung auf die P- Verfügbarkeit unklar war, wurden in die Gefäße mehrerer Varianten gestaffelte Mengen an Fe (gefälltes Fe- Hydroxid) oder / und CaO eingebracht. Die angegebenen Eisenmengen wurden aus definierten FeCl<sub>3</sub>- Lösungen gewonnen, die mit NaOH versetzt wurden. Das gefällte Fe(OH)<sub>3</sub> wurde abfiltriert, luftgetrocknet, mit wenig Boden zerrieben und unter die Böden der Gefäße gemischt. CaO wurde als p.A. Chemikalie eingesetzt.

**Tabelle 22:** *Versuchsvarianten der Gefäßversuche zur Prüfung von 13 Klärschlämmen auf ihre P- Düngewirksamkeit (P-Applikation: 30 mg P kg<sup>-1</sup> Boden)*

P- Varianten	P 0	Kontrolle, Versuchsboden ohne P
	Fe 1	Gefälltes Eisenhydroxid, 735 mg Fe kg <sup>-1</sup> Boden, ohne P
	Fe 2	Gefälltes Eisenhydroxid, 235 mg Fe kg <sup>-1</sup> Boden, ohne P
	Ca 1	Kalk als CaO, 484 mg CaO kg <sup>-1</sup> Boden, ohne P
	Ca 2	Kalk als CaO, 161 mg CaO kg <sup>-1</sup> Boden, ohne P
	Fe 1 / Ca 1	Gefälltes Eisenhydroxid, 735 mg Fe plus 484 mg CaO kg <sup>-1</sup> Boden, ohne P
	Hy	Hyperphosphat 13,5% P
	TSP	Triple superphosphat 20 % P
	KS 1	Klärschlamm Dollbergen
	KS 2	Klärschlamm Göttingen
	KS 3	Klärschlamm Gronau
	KS 4	Klärschlamm Hameln
	KS 5	Klärschlamm Einbeck
	KS 6	Klärschlamm Herzberg
	KS 7	Klärschlamm Gütersloh
	KS 8	Klärschlamm Northeim
	KS 9	Klärschlamm Uelzen
	KS 10	Klärschlamm Osterode
	KS 11	Klärschlamm Salzhausen
	KS 12	Klärschlamm Uetze
	KS 13	Klärschlamm Schöppenstedt

### **3.1.3.1 Durchführung des Gefäßversuches mit Weidelgras unter Freilandbedingungen (Drahthaus)**

In diesem Experiment wurden Mitscherlich-Gefäße benutzt. Die P- Gabe betrug 30 mg kg<sup>-1</sup> Boden (187 mg P je Gefäß bzw. je 6 kg Boden). Am 18.01.2001

wurde der Versuch angesetzt und die folgenden Nährstoffmengen je Gefäß eingearbeitet:

187 mg P	als Klärschlamm bzw. als Triplesuper- oder Hyperphosphat
1,0 g N	als Calciumnitrat $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
1,0 g K	als Kaliumsulfat $\text{K}_2\text{SO}_4$
0,2 g Mg	als Magnesiumsulfat $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

Die Gefäße wurden im feuchten Zustand (ca. 50% der maximalen Wasserkapazität) 30 Tage ruhen gelassen. Dann wurden vor der Aussaat Bodenproben genommen, um die Orthophosphatkonzentrationen der Bodenlösungen, das P- Sorptionsvermögen, das DL- Phosphat, die pH-Werte und die  $\text{Fe}_{\text{ox}}$ - Gehalte zu analysieren. Am 29.03.2001 wurden die Weidelgrassamen, Sorte LIRASAND (3g / Gefäß, entspricht ca. 100 Samen) ausgesät. Die Pflanzen wurden im Drahthaus kultiviert. Gegossen wurde auf ca. 65% der maximalen Wasserkapazität. Es wurden 3 Schnitte geerntet. Nach dem ersten und zweiten Schnitt wurden jeweils 0,6 g N in Form von Ammoniumnitrat nachgedüngt. Das Weidelgras wurde am 29.05, am 30.06 und am 04.08.2001 geschnitten. Die Trockenmassen der Schnitte wurden ermittelt und das Erntegut zur P- Analyse aufbereitet.

### 3.1.4 Ergebnisse

#### 3.1.4.1 Erträge und P- Entzüge des Grases

Tabelle 23 gibt die Erträge und P- Entzüge nur der Kontrollgefäße (ohne P) und der Gefäße mit den zwei P- Düngern TSP und Hyperphosphat wieder, um zu sehen, ob auf dem Boden P ertragsbegrenzend und damit die Versuchsanstellung zur Prüfung der P- Düngewirkung der 13 KS geeignet ist.

Man erkennt, dass bereits mit Hyperphosphat signifikant 10% Mehrertrag erzielt und 11% mehr P aufgenommen wurden als in der Kontrollvariante. Mit Triplephosphat betrug die Ertragssteigerung sogar 39% und die Erhöhung der



P- Aufnahme 49%. Bei allen 3 Grasschnitten gab es signifikant erhöhte P-Aufnahmen.

Damit ist die Versuchsanstellung gut geeignet, die P- Düngewirkung der KS im Vergleich zum Triplephosphat zu prüfen.

**Tabelle 23:** *Trockenmasseertrag und P-Entzug des Weidelgrases in Abhängigkeit von der mineralischen P-Quelle (1. bis 3. Schnitt) sowie die Relativwerte bezogen auf die Kontrolle (P 0) ohne P-Düngung*

Variante	TM-Ertrag g/Gefäß				Relativ %			
	Ernte				Ernte			
	1.	2.	3.	Gesamt	1.	2.	3.	Gesamt
Kontrolle	9,11	20,14	17,83	47,09	100	100	100	100
Hyper-P	9,77	23,36	18,92	52,04	107	113	106	110
Triple-P	26,03	23,77	16,30	66,10	286	115	91	139
GD <sub>5%</sub>								
Tukey	4,25				9			
Variante	P-Entzug mg/Gefäß				Relativ %			
	P-Entzug mg/Gefäß				Relativ %			
	1.	2.	3.	Gesamt	1.	2.	3.	Gesamt
Kontrolle	16,2	41,3	35,0	92,6	100	100	100	100
Hyper-P	17,2	46,1	39,8	103,1	106	112	114	111
Triple-P	48,8	47,1	42,4	138,4	301	114	121	149
GD <sub>5%</sub>								
Tukey	9,92				11			

Die 13 KS hatten folgende Wirkung auf die Graserträge (Tabelle 24): Bezogen auf die Kontrollvariante (P 0) wurden im Mittel aller KS 23 % mehr Sprossmasse gebildet. Mit KS 1 und 2 gab es keine signifikanten Ertragssteigerungen, alle anderen KS bewirkten signifikante Ertragserhöhungen. Auf Basis der statistischen Analyse (GD 5%) und ausgehend von der TSP- Variante ergaben sich folgende 2 Gruppen:

(1) 0 - 15% Mehrertrag: KS 1 und 2 (nicht signifikant verschieden von P 0)

(2) > 15% Mehrertrag: KS 3 bis 13

**Die Gruppe aus KS 3, 6, 8, 9, 11, 12 und 13 war nicht signifikant verschieden von der Triplesuperphosphatvariante. Mit den betreffenden KS wurde also statistisch gesehen die gleiche Biomasse wie mit Triplesuperphosphat produziert.**

Die P- Entzüge gehen aus Tabelle 25 hervor. Aus allen mit KS gedüngten Gefäßen, außer KS1, wurde signifikant mehr P aufgenommen im Vergleich zur Kontrolle. Die insgesamt 7% mehr P- Entzug der Variante KS 1 resultierten vorzugsweise aus dem P- Entzug des 1. Schnittes (+ 108%). Aber mit dem 3. Schnitt wurden nur 56 % im Vergleich zu P 0 aufgenommen.

In Bezug auf die P- Entzüge ergab sich für die KS entsprechend der Grenzdifferenz von 11 % und bei Bezug auf die TSP- Variante folgende Gruppierung:

(1) 0 – 11% mehr P- Entzug: KS 1 (nicht signifikant verschieden von P 0)

(2) > 11% mehr P- Entzug erreichten die KS 2 bis 13

**Die Gruppe aus KS 6, 8, 9, 10, 11, 12 und 13 unterschied sich in Bezug auf den P- Entzug des Grases nicht signifikant von dem aus Triplesuperphosphat, d.h. ihr Phosphat war für die Pflanzen gleich verfügbar wie aus TSP.**

Man erkennt, dass mit den KS 6, 8, 9, 11, 12 und 13 sowohl die höchsten P- Entzüge als auch die größten Mehrerträge erzielt wurden. Ihre Werte waren von denen des Triplesuperphosphat statistisch nicht verschieden. Die völlige Gleichheit im P- Entzug wurde nur mit den KS 12 und 13 erreicht (Tabelle 25).

Setzt man die P- Menge, die das Gras aus dem Triplesuperphosphat aufgenommen hat (138 mg – 93 mg aus der Kontrollvariante = 45 mg) gleich 100%, so ergeben sich die Relativwerte der P- Entzüge für die 13 KS in Tabelle 26.

**Tabelle 24:** Trockenmasseerträge des Weidelgrases in Abhängigkeit von der P-Quelle (1. bis 3. Schnitt) sowie die Relativerträge bezogen auf die Kontrolle (P 0) ohne P-Düngung

Variante	TM-Ertrag g/Gefäß				Relativ %			
	Ernte				Ernte			
	1.	2.	3.	Gesamt	1.	2.	3.	Gesamt
P 0	9,1	20,1	17,8	47,1	100	100	100	100
TSP	26,0	23,8	16,3	66,1	286	115	91	139
KS 1	19,0	20,9	6,8	46,7	209	101	38	98
KS 2	21,3	21,2	10,2	52,7	233	103	57	111
KS 3	25,2	23,7	11,5	60,4	276	115	65	127
KS 4	22,4	24,0	8,9	55,3	246	116	50	116
KS 5	19,7	25,2	11,4	56,3	216	122	64	118
KS 6	25,0	26,1	11,0	62,1	274	126	62	130
KS 7	23,0	21,6	11,5	56,0	252	104	64	118
KS 8	24,3	25,0	10,1	59,3	266	121	57	125
KS 9	20,2	26,3	14,1	60,5	221	127	79	127
KS 10	22,4	23,5	10,9	56,8	246	114	61	119
KS 11	27,4	24,7	12,1	64,1	300	120	68	135
KS 12	28,5	26,8	12,8	68,0	313	130	72	143
KS 13	25,9	22,9	12,1	61,0	284	111	68	128
<b>KS Ø</b>	<b>23,4</b>	<b>24,0</b>	<b>11,0</b>	<b>58,4</b>	<b>257</b>	<b>116</b>	<b>62</b>	<b>123</b>
GD <sub>5%</sub> Tukey				7,16				15

**Tabelle 25:** P-Entzüge des Weidelgrases in Abhängigkeit von den P-Quellen (1. bis 3. Schnitt) sowie die Relativwerte bezogen auf die Kontrolle (P 0) ohne P-Düngung

Variante	P-Entzug mg/Gefäß				Relativ %			
	Ernte				Ernte			
	1.	2.	3.	Gesamt	1.	2.	3.	Gesamt
P 0	16,2	41,3	35,0	92,6	100	100	100	100
TSP	48,8	47,1	42,4	138,4	301	114	121	149
KS 1	33,8	45,4	19,5	98,6	208	110	56	107
KS 2	44,3	45,5	28,9	118,7	273	110	83	128
KS 3	40,6	49,7	33,7	124,0	250	120	96	134
KS 4	45,3	50,3	26,1	121,6	279	122	74	131
KS 5	40,0	52,3	33,7	126,0	247	127	96	136
KS 6	48,0	53,3	32,2	133,4	296	129	92	144
KS 7	48,6	45,3	31,1	125,0	300	110	89	135
KS 8	45,2	52,9	29,7	127,8	278	158	85	138
KS 9	36,8	55,3	38,1	130,2	227	134	109	141
KS 10	42,9	54,1	34,0	130,9	264	131	97	141
KS 11	44,8	54,0	36,5	135,3	276	131	104	146
KS 12	55,4	48,3	34,8	138,4	341	117	99	149
KS 13	53,8	48,2	35,2	137,2	332	117	100	148
<b>KS Ø</b>	<b>44,0</b>	<b>50,3</b>	<b>31,6</b>	<b>126,0</b>	<b>271</b>	<b>122</b>	<b>90</b>	<b>136</b>
GD <sub>5%</sub> Tukey				9,77				11

**Tabelle 26:** Relative P-Entzüge aus den 13 Klärschlämmen bezogen auf die P-Entzüge aus TSP (3 Gruppen) (P-Entzug aus Triplesuperphosphat = 100 %)

Variante	Gruppe 1 0 – 62 %	Gruppe 2 63-81 %	Gruppe 3 82-100 %
KS 1	13		
KS 2	57		
KS 3		69	
KS 4		63	
KS 5		73	
KS 6			89
KS 7		71	
KS 8		77	
KS 9			82
KS 10			84
KS 11			93
KS 12			100
KS 13			97
TSP			100

GD<sub>5%</sub> ( Tukey ) = 18 %

**Man erkennt:**

82 – 100% der P- Aufnahme aus TSP (Gruppe 3) erreichten die KS 6, 9, 10, 11, 12, 13. Ihre Werte des P- Entzuges waren statistisch von dem aus TSP nicht zu trennen. Also waren sie statistisch gesehen dem TSP gleichwertig.

Weniger als 82% der P- Aufnahme aus TSP (Gruppe 2) erreichten die KS 1, 2, 3, 4, 5, 7 und 8. Ihre Werte lagen signifikant unter dem aus TSP und weniger als 62% der P- Aufnahme aus TSP (Gruppe 1)erreichten der KS 1 und KS 2. Ihre Werte lagen signifikant unter den P- Aufnahmewerten der Gruppe 3. Ihre P- Verwertung war am geringsten.

Tabelle 27 zeigt den Einfluss gestaffelter Fe- Hydroxid-, Ca- Hydroxid – bzw. Fe / Ca- Hydroxidmengen im Versuchsboden ohne P- Düngung.

**Tabelle 27:** TM-Ertrag und P-Entzug von Weidelgras nach Applikation von  $Fe(OH)_3$  (Variante Fe 1, Fe 2),  $Ca(OH)_2$  (Ca 1, Ca 2) bzw.  $Fe(OH)_3/Ca(OH)_2$  (Variante Fe/Ca); Kontrolle (P 0) = 100 %

Variante	TM-Ertrag g/Gefäß				Relativ %			
	Ernte				Ernte			
	1.	2.	3.	Gesamt	1.	2.	3.	Gesamt
Kontrolle	9,1	20,6	17,8	47,6	100	100	100	100
Fe 1	11,8	23,3	17,9	53,0	130	113	100	111
Fe 2	12,3	23,8	16,2	52,3	135	115	91	110
Ca 1	16,9	26,0	15,6	58,5	186	126	88	123
Ca 2	16,0	27,0	14,6	57,7	176	131	82	121
Fe/Ca	16,5	23,0	15,0	54,5	181	111	84	115
GD <sub>5%</sub> Tuk.				4,83				10
	P-Entzug mg/Gefäß				Relativ %			
Kontrolle	16,2	41,3	35,0	92,6	100	100	100	100
Fe 1	19,4	47,6	39,8	106,8	120	115	114	115
Fe 2	21,0	46,3	38,0	105,4	130	112	109	114
Ca 1	26,51	48,2	38,8	113,5	163	117	111	123
Ca 2	26,3	51,0	35,6	112,8	162	123	102	122
Fe/Ca	27,7	44,7	39,0	111,4	171	108	111	120
GD <sub>5%</sub> Tuk.				9,67				10

Was die Trockenmasseerträge betrifft, so wurden sie durch die Fe-Hydroxidzugaben im 1. Schnitt um ca. 30%, im 2. Schnitt um 14% und im 3. Schnitt nicht erhöht, so dass im Mittel die TM- Erträge um ca. 10% anstiegen. Dieser Wert liegt auf der Sicherungsgrenze, ist also wenig sicher. Die  $Ca(OH)_2$  – Zufuhr erhöhte die Erträge des 1. und 2. Schnittes deutlich, senkte aber die des 3. Schnittes. Insgesamt stieg der TM- Ertrag aber signifikant um ca. 22%.

Prinzipiell gleich verhielt sich das Gemisch Eisen- / Calciumhydroxid. Nach ihm stieg der TM- Ertrag im Mittel um 15%.

Interessant ist, dass nicht wie erwartet die P- Entzüge durch eine  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  – Zufuhr abfielen, sondern sogar etwas anstiegen. Es waren im Mittel der 3 Schnitte 14 – 15%. War  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  gedüngt worden, stiegen die P- Entzüge um signifikant 20 bis 23% an.

Damit ergab sich insgesamt, dass die  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - Zugabe Wachstum und P- Aufnahme eindeutig positiv beeinflusste, die  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ - Zugabe aber keinen gesicherten Einfluss auf diese Parameter ausübte.

### **3.1.4.2 Bodenkenngrößen**

Die Tabellen 28 und 29 geben die Werte der Bodenkenngrößen wieder, die 30 Tage nach der Düngerapplikation in die Böden bestimmt wurden.

Die DL- Werte (Tabelle 28) wurden durch die Mineraldüngeranwendung (30 mg P / kg) von 38 auf 54 mg P / kg Boden, also um 42 %, angehoben. Die Düngung mit den 13 KS bewirkte ebenfalls Anstiege um 40 bis 66 %. Damit bewirkte kein KS einen geringeren Anstieg der DL- Werte als die Mineraldünger. Die DL- Werte von KS 3, 7, 8 und 12 erreichten sogar Werte von über 160% bezogen auf die Kontrolle ohne P. Eine Kalkapplikation (Varianten Ca 1, Ca 2, Fe / Ca) ohne P- Zufuhr ließ die DL- Werte um 8 – 13 % ansteigen.

Die Orthophosphatkonzentration ( $\text{P}_i$ - Konz.) in den Bodenlösungen verhielten sich dagegen anders (Tabelle 28). Triplephosphat erhöhte die  $\text{P}_i$ - Werte signifikant auf 211%, während Hyperphosphat keinen Effekt hatte. Die KS hatten sehr differenzierte Wirkungen. Die KS 1 und 2 senkten die  $\text{P}_i$ - Werte stark ab (32 bzw. 61 %), während die KS 9, 11 und 13 die  $\text{P}_i$ - Werte auf über 120 % anhoben. Die Werte der anderen Behandlungen lagen zwischen diesen zwei Gruppen. Die Applikation von Fe- Hydroxid bzw. Ca- Hydroxid senkte die  $\text{P}_i$ - Werte ab, wobei die Kalkapplikation deutlichere Veränderungen bewirkte und die Kombination Eisen/Calcium- Hydroxid die  $\text{P}_i$ - Werte besonders stark reduzierte.

Die pH-Werte (Tabelle 28) wurden durch die zwei Mineraldünger nicht beeinflusst. Durch die KS gab es Anstiege um bis zu 20 %, d.h. einen Anstieg um ca. eine ganze Einheit von 5,4 auf 6,5. Während die Applikation von Fe-Hydroxid keine pH-Änderung bewirkte, stiegen nach Kalkapplikation die pH-Werte wie erwartet an.

**Tabelle 28:** Einfluss der P- Mineral- und Klärschlammdüngung (KS) auf den DL-Phosphatgehalt, die  $P_i$ -Konzentration der Bodenlösung und die pH-Werte des humosen Sandbodens 30 Tage nach der Düngerapplikation

P-Form	DL-Phosphat		$P_i$ -Konzentration		pH (CaCl <sub>2</sub> )	
	mg P kg <sup>-1</sup>	relativ	µg P L <sup>-1</sup>	relativ	absolut	relativ
ohne	38	100	28	100	5,4	100
TSP	54	142	59	211	5,4	100
Hyper-P	54	142	27	96	5,5	102
KS 1 Dollbergen	56	147	9	32	6,3	117
KS 2 Göttingen	56	147	17	61	6,3	117
KS 3 Gronau	63	166	29	104	6,4	119
KS 4 Hameln	57	150	31	111	6,0	111
KS 5 Einbeck	53	140	23	82	5,5	102
KS 6 Herzberg	54	142	30	107	6,0	111
KS 7 Gütersloh	61	161	26	93	6,2	115
KS 8 Northeim	62	163	21	75	6,3	117
KS 9 Uelzen	53	140	34	121	5,4	100
KS 10 Osterode	56	147	27	96	5,9	109
KS 11 Salzhausen	57	150	34	121	5,6	104
KS 12 Uetze	63	166	28	100	6,5	120
KS 13 Schöppenst.	57	150	38	136	5,5	108
KS ∅	58	152	27	95	6,0	111
Fe 1	41	106	24	86	5,5	102
Fe 2	41	106	25	89	5,5	102
Ca 1	43	113	21	75	6,1	113
Ca 2	42	108	23	82	5,7	106
Fe/Ca	43	113	8	29	6,1	113
GD 5%, Tukey	3,6	9,5	3,2	11	0,1	2



**Tabelle 29:** Einfluss der P- Mineral- und Klärschlammdüngung (KS) auf die P-Sorption, die Bodengehalte an oxalatlöslichem Fe (  $Fe_{ox}$  ) und Phosphor (  $P_{ox}$  ) des humosen Sandbodens 30 Tage nach der Düngerapplikation

P-Form	P-Sorption		$Fe_{ox}$		$P_{ox}$		
	mg/kg	relativ	mg/kg	relativ	mg/kg	relativ	
ohne	66	100	1706	100	319	100	
TSP	62	94	1489	87	301	94	
Hyper-P	69	105	1543	91	294	92	
KS 1	Dollbergen	81	123	1749	103	308	97
KS 2	Göttingen	82	124	1699	100	320	100
KS 3	Gronau	80	121	1538	90	292	91
KS 4	Hamel	74	112	1629	96	329	103
KS 5	Einbeck	68	103	1560	92	293	92
KS 6	Herzberg	72	109	1650	97	340	107
KS 7	Gütersloh	80	121	1559	92	316	98
KS 8	Northeim	76	115	1533	90	307	95
KS 9	Uelzen	70	106	1637	96	316	98
KS 10	Osterode	69	105	1520	89	299	94
KS 11	Salzhäusen	71	108	1627	95	316	98
KS 12	Uetze	76	115	1441	85	288	91
KS 13	Schöppenst.	73	111	1568	92	323	102
KS $\emptyset$		75	113	1587	93	311	97
Fe 1		71	108	1734	102	292	91
Fe 2		71	108	1878	110	333	105
Ca 1		77	117	1558	91	289	91
Ca 2		72	109	1568	92	304	95
Fe/Ca		83	126	1707	100	290	91
GD 5%, Tukey		3,8	6	259	15	46	14

Tabelle 29 gibt die Werte der P- Sorption wieder. Wie erwartet, reduzierte eine Triplephosphatgabe die P- Sorption und zwar auf 94 %. Durch die KS stieg die P- Sorption an. In Mittel waren es 13 %. Die Höchstwerte zeigten die KS 1, 2, 3 und 7 mit Werten von größer 120 %. Eine Eisenhydroxidzugabe erhöhte die P- Sorption um ca. 8 %, die mit Kalk um bis zu 17 % und die Kombination um 26 %, was nach einem additiven Effekt aussieht.

Die Werte der Oxalatextraktion für Fe und P (Tabelle 29) ergaben nur wenige signifikante Differenzen zwischen den Gehalten der Böden an  $Fe_{ox}$  und  $P_{ox}$ . TSP reduzierte  $Fe_{ox}$  um 13 %, eine Kalkung um ca. 8 – 9 % (Ca 1, Ca 2). Beide Differenzen waren aber im Vergleich zur Kontrolle nicht signifikant. Die KS 1 und 2 bewirkten signifikant höhere  $Fe_{ox}$ - Werte als KS 12.

### **3.1.4.3 Beziehungen zwischen den P- Entzügen und Bodenkenngrößen bzw. zwischen verschiedenen Bodenkenngrößen (Regressionsanalysen)**

Um zu erkennen, welche durch die variierte Düngung veränderten Kenngrößen des Versuchsbodens Einfluss auf die P- Entzüge der Pflanzen nehmen, wenn sie mit KS gedüngt werden, wurden Regressionsanalysen durchgeführt. Die folgenden Abbildungen (Abbildung 10, 11, 12, 13, 14 und 15) zeigen die Resultate.

Abbildung 10 zeigt die Abhängigkeit des P- Entzuges vom DL- P- Gehalt des Bodens nach KS- Düngung. Man erkennt, dass die DL- P- Werte nur zwischen etwa 53 und 63 mg P / kg liegen. Diese Differenz von 10 mg P / kg hatte keinen Einfluss auf die P- Entzüge.

Aus Abbildung 11 geht eindeutig hervor, die Anwendung der 13 KS hatte zu stark differenzierten  $P_i$ - Werten (ca. 8 – 38  $\mu\text{g P / l}$ ) geführt. Der P- Entzug der Pflanzen hing stark  $r^2 = 0,67$  ( $r = 0,82$ ) von den  $P_i$ - Werten ab, das heißt, mit dem Steigen der Orthophosphatkonzentration in der Bodenlösung nahm die P- Aufnahme der Pflanzen zu.

Abbildung 12 zeigt die Abhängigkeit des P- Entzuges vom P- Sorptionsverhalten der Böden. Der Zusammenhang ist negativ, denn mit steigender P- Sorption sinkt die P- Aufnahme ab. Der Zusammenhang ist aber mit  $r^2 = 0,33$  ( $r = 0,57$ ) lockerer als mit den  $P_i$ - Werten.

Interessant in diesen Zusammenhang ist, dass der P- Entzug auch negativ vom  $Fe_{ox}$ - Gehalt des Bodens beeinflusst wird (Abbildung 13). Hier war  $r^2 = 0,44$  ( $r = 0,66$ ) für den Zusammenhang sogar größer als bei dem Parameter P- Sorption.

Der Zusammenhang zwischen P- Entzug und Boden- pH-Werten (Abbildung 14) war im Bereich 5,5 bis 6,5 sehr locker  $r^2 = 0,14$ . Ohne den niedrigsten Wert für den P- Entzug (KS 1) wäre kein Trend zu erkennen.

Die Abbildung 15 zeigt die Abhängigkeit des P- Entzuges vom Fe : P- Verhältnis der eingesetzten Klärschlämme. Das Bestimmtheitsmaß mit  $r^2 = 0,86$  ist hoch ( $r = 0,93$ ). Damit erhält diese Eigenschaft der KS eine große Bedeutung für die P- Verfügbarkeit der KS, zumindest für den benutzten Sandboden.

Die Tabelle 30 zeigt zusammenfassend die Bestimmtheitsmaße für die linearen Regressionen zwischen P- Entzug und den geprüften Kenngrößen.

**Tabelle 30: Bestimmtheitsmaße für 6 lineare Regressionen**

Y	X	Zusammenhang	$r^2$	r
P- Entzug	DL-P	positiv	0,02	0,14 <sup>ns</sup>
	$P_i$	positiv	0,67	0,82 <sup>***</sup>
	P-Sorp.	negativ	0,33	0,58 <sup>*</sup>
	$Fe_{ox}$	negativ	0,44	0,66 <sup>**</sup>
	pH	negativ	0,14	0,37 <sup>ns</sup>
	Fe : P-Verh. der KS	negativ	0,86	0,92 <sup>***</sup>

Statistische Sicherungen: nach E. Weber, 1972

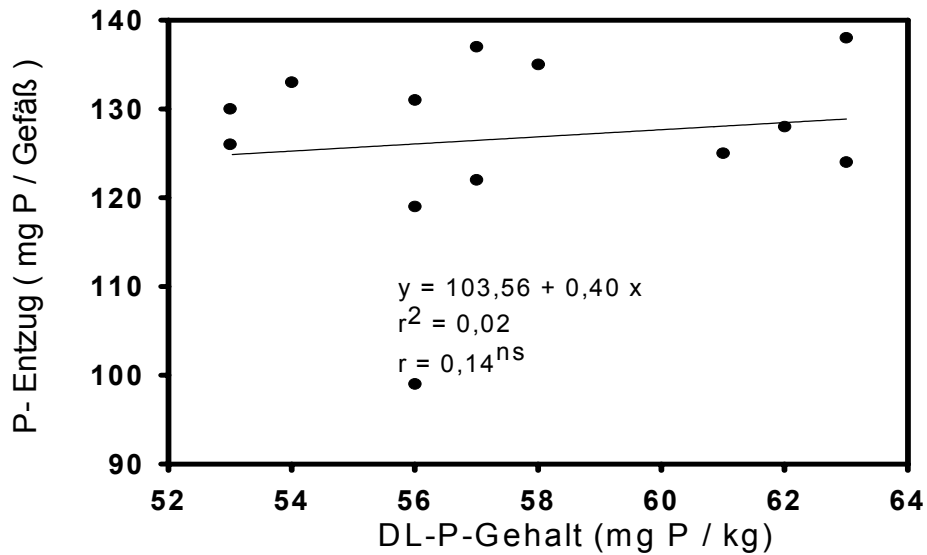
ns = nicht signifikant

\* = signifikant bei  $p = 5\%$

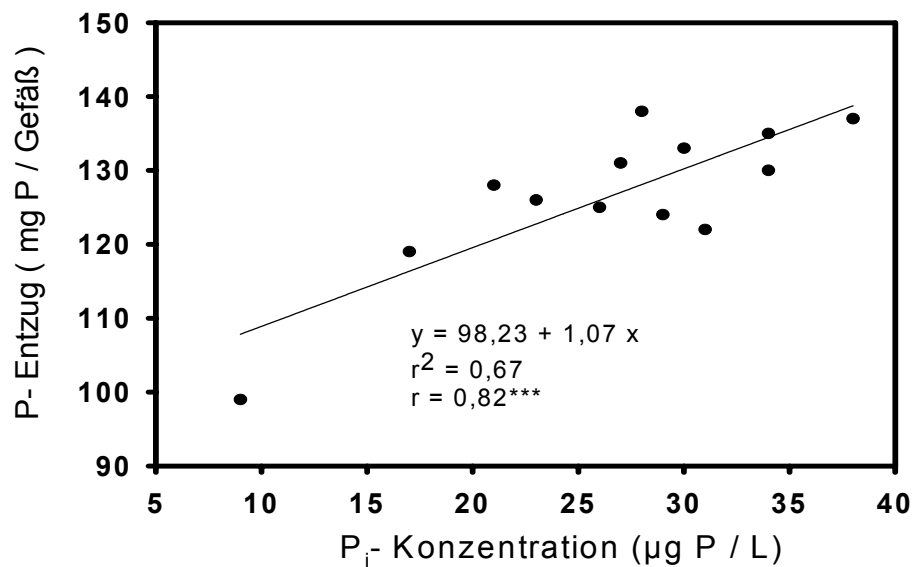
\*\* = signifikant bei  $p = 1\%$

\*\*\* = signifikant bei  $p = 0,1\%$

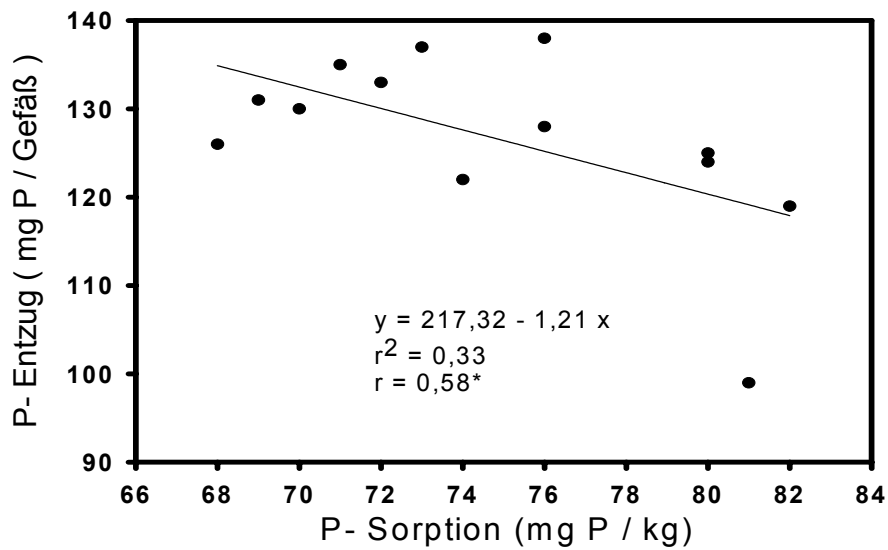
Die engsten positiven Beziehungen bestehen zur  $P_i$ -Konzentration der Bodenlösung ( $r^2=0,67$ ) und die engsten negativen zum Fe : P- Verhältnis des KS ( $r^2 = 0,86$ ).



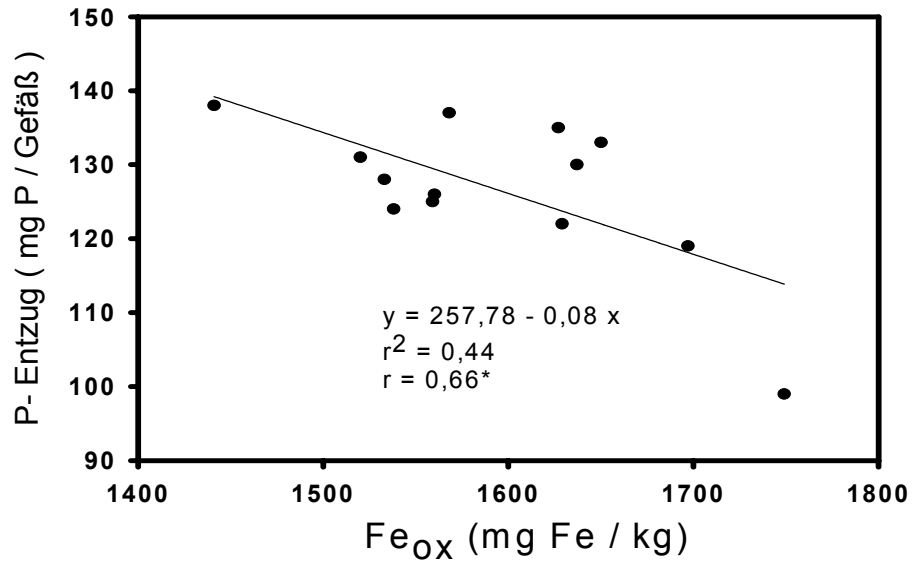
**Abbildung 10:** Abhängigkeit des P-Entzuges des Weidelgrases vom DL-P-Gehalt des Bodens, 30 Tage nach KS-Applikation  
ns = nicht signifikant



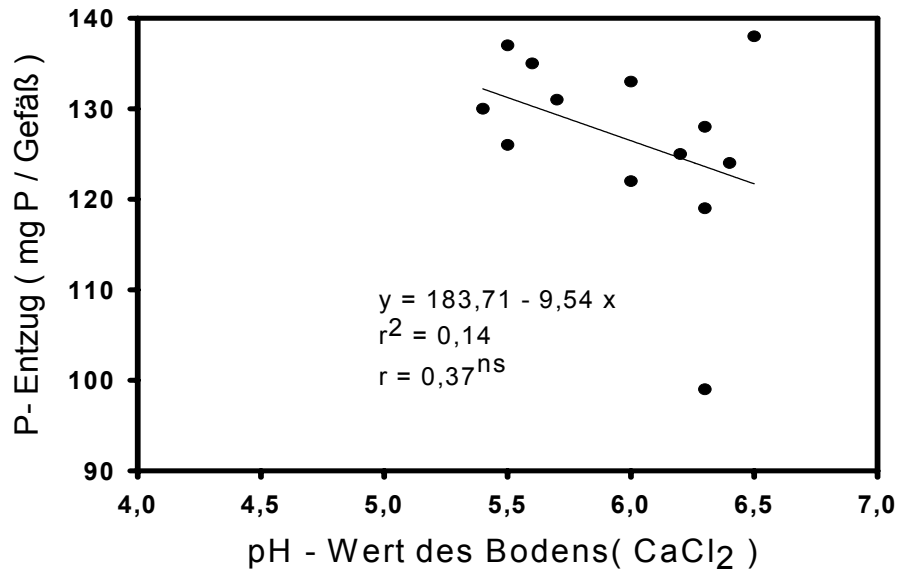
**Abbildung 11:** Abhängigkeit des P-Entzuges des Weidelgrases von der  $P_i$ -Konzentration der Bodenlösung, 30 Tage nach KS- Applikation  
\*\*\* signifikant bei  $p = 0,1\%$



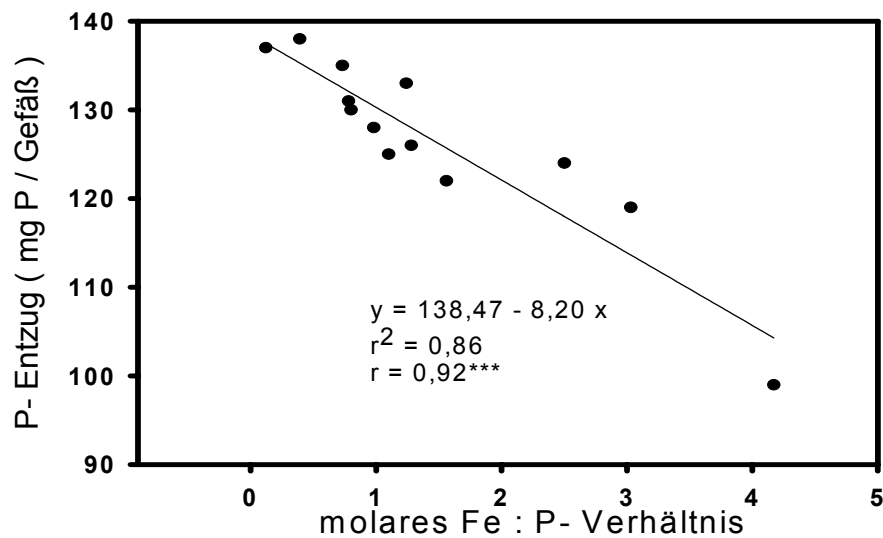
**Abbildung 12:** Abhängigkeit des P- Entzuges des Weidelgrasses von der P- Sorption des Bodens, 30 Tage nach KS- Applikation  
\* = signifikant bei  $p = 5\%$



**Abbildung 13:** Abhängigkeit des P- Entzuges des Weidelgrasses vom  $Fe_{Ox}$ - Gehalt des Bodens, 30 Tage nach KS- Applikation  
\* = signifikant bei  $p = 5\%$



**Abbildung 14:** Abhängigkeit des P-Entzuges des Weidelgrases vom pH des Bodens, 30 Tage nach KS- Applikation  
ns = nicht signifikant



**Abbildung 15:** Abhängigkeit des P-Entzuges des Weidelgrases vom molaren Fe : P- Verhältnis der Klärschlämme

\*\*\* = signifikant bei  $p = 0,1\%$

Die folgenden Abbildungen (Abbildung 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, und 23) zeigen die Ergebnisse von Regressionsanalysen zwischen den verschiedenen Bodenkenngrößen, um eventuelle Zusammenhänge zwischen ihnen zu erkennen. Sie könnten bedeutsam sein für die P- Aufnahme der Pflanzen.

Abbildung 16 zeigt den Zusammenhang zwischen zwei Kenngrößen des Bodens, die für die Beurteilung der P- Verfügbarkeit genutzt werden. Man erkennt, dass bei DL-P- Gehalten zwischen ca. 53 und 63 mg P / kg Boden die  $P_i$ - Werte keine Tendenz einer Abhängigkeit zeigen.

Anders ist das Verhältnis zwischen  $P_i$ - Werten und P- Sorption (Abbildung 17). Hier ist ein klarer Trend zu erkennen. Mit steigender P- Sorption sinken die  $P_i$ - Werte ab.

Die Abbildungen 18 und 19 zeigen die Abhängigkeit der  $P_i$ - Konzentration vom  $Fe_{ox}$ - Gehalt des Bodens bzw. vom Boden- pH. Beide Größen führen bei ansteigenden Werten zu einem Absinken der  $P_i$ - Konzentration. Dabei ist der Zusammenhang mit den pH-Werten offenbar enger ( $r^2 = 0,29$ ) als mit den  $Fe_{ox}$ - Werten ( $r^2 = 0,15$ ).

Abbildung 20 zeigt, inwieweit die  $P_i$ - Konzentration direkt vom Fe : P- Verhältnis der KS abhängig ist. Dieser Zusammenhang ist relativ eng ( $r^2 = 0,58$ ). Das heißt, mit weiten molaren Fe: P- Verhältnissen sinken die  $P_i$ - Werte stark ab. Also ist z.B. im Boden mit KS 1 (Dollbergen) mit dem weitesten Fe: P- Verhältnis von 4,2 (ca. 1 : 0,24) (vgl. Tabelle 20) der  $P_i$ - Wert am geringsten.

Die Orthophosphatkonzentration ( $P_i$ - Konz.) hängt, wie zu sehen ist, von den Größen wie  $Fe_{ox}$  und pH bzw. direkt vom Fe : P- Verhältnis der KS ab. Diese Größen regulieren aber auch die P- Sorption, die letztlich über die P- Pufferung die Höhe der  $P_i$ - Werte mitbestimmt. Deshalb wurden auch die Beziehungen der P- Sorption zu einigen Bodenkenngrößen untersucht.

Aus Abbildung 21 geht hervor, dass die  $Fe_{ox}$ - Werte von ca. 1450 bis 1750 mg  $kg^{-1}$  durch die KS angestiegen sind, dass aber die Beziehung zur P- Sorption sehr locker ist ( $r^2 = 0,06$ ). Dagegen hatte der pH- Anstieg von ca. 5,5 auf 6,5 eine eindeutig positive Wirkung auf den Anstieg der P- Sorption ( $r^2 = 0,68$ ).

Bemerkenswert ist ferner, dass mit einem weiteren Fe: P- Verhältnis in den KS ein deutlicher Anstieg der P- Sorption erfolgt (Abbildung 23).

Die Tabelle 31 zeigt zusammenfassend die Bestimmtheitsmaße für die linearen Regressionen zwischen den ausgewählten Kenngrößen.

**Tabelle 31:** Bestimmtheitsmaße zwischen verschiedenen Kenngrößen des Bodens bzw. der KS

Y	X	Zusammenhang	r <sup>2</sup>	r
P <sub>i</sub> - Konz.	DL-P	Kein	0,00	0,00 <sup>ns</sup>
	P-Sorp.	negativ	0,31	0,56 <sup>ns</sup>
	Fe <sub>ox</sub>	negativ	0,15	0,39 <sup>ns</sup>
	pH des Bodens	negativ	0,29	0,54 <sup>ns</sup>
	Fe : P-Verh. des KS	negativ	0,58	0,76 <sup>**</sup>
P-Sorp.	Fe <sub>ox</sub>	positiv	0,06	0,25 <sup>ns</sup>
	pH des Bodens	positiv	0,68	0,83 <sup>***</sup>
	Fe : P-Verh. des KS	positiv	0,44	0,66 <sup>*</sup>

Statistisch: (nach E. Weber 1972)

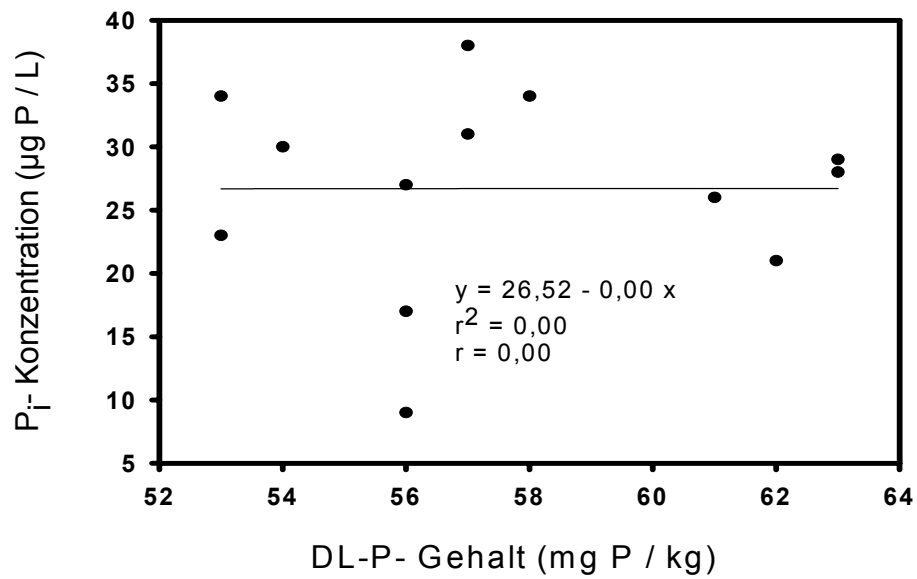
ns = nicht signifikant

\* = signifikant bei p = 5%

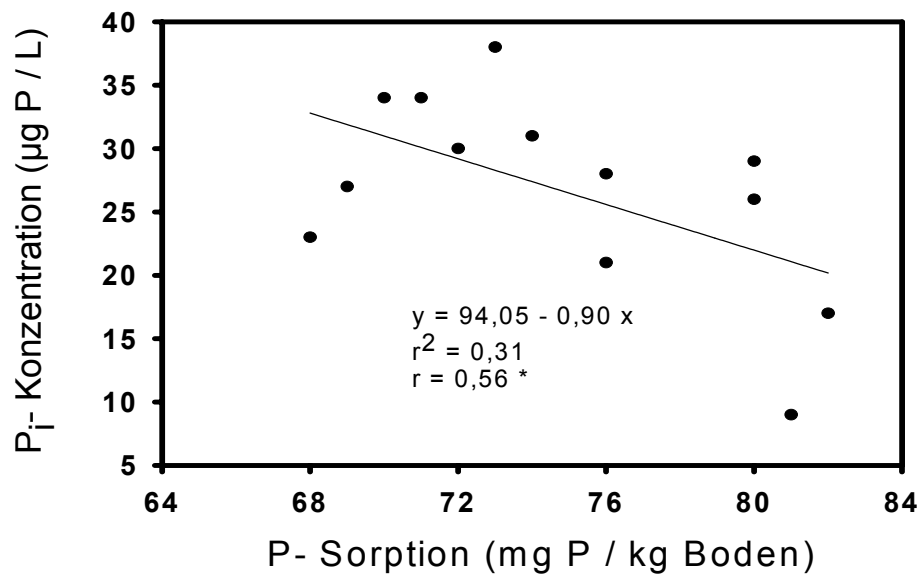
\*\* = signifikant bei p = 1%

\*\*\* = signifikant bei p = 0,1%

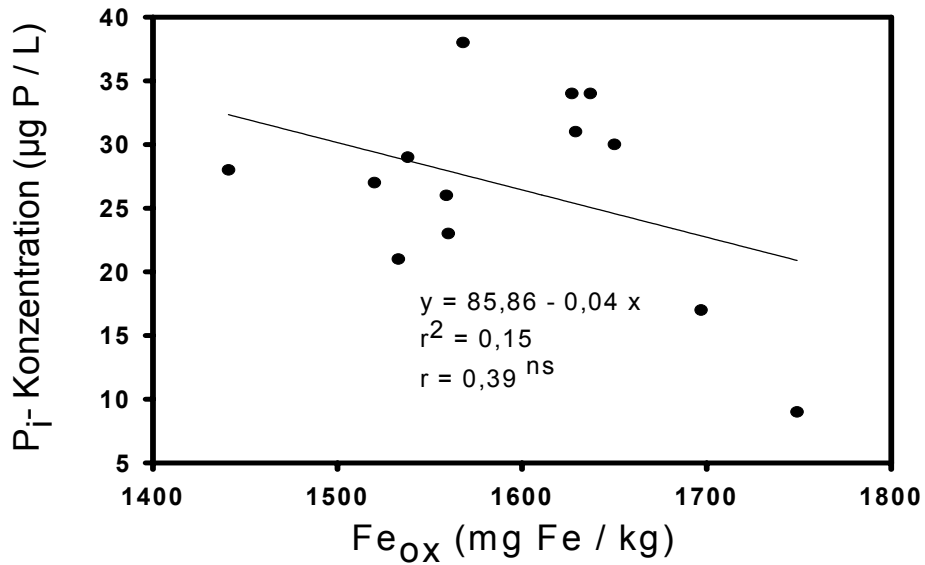




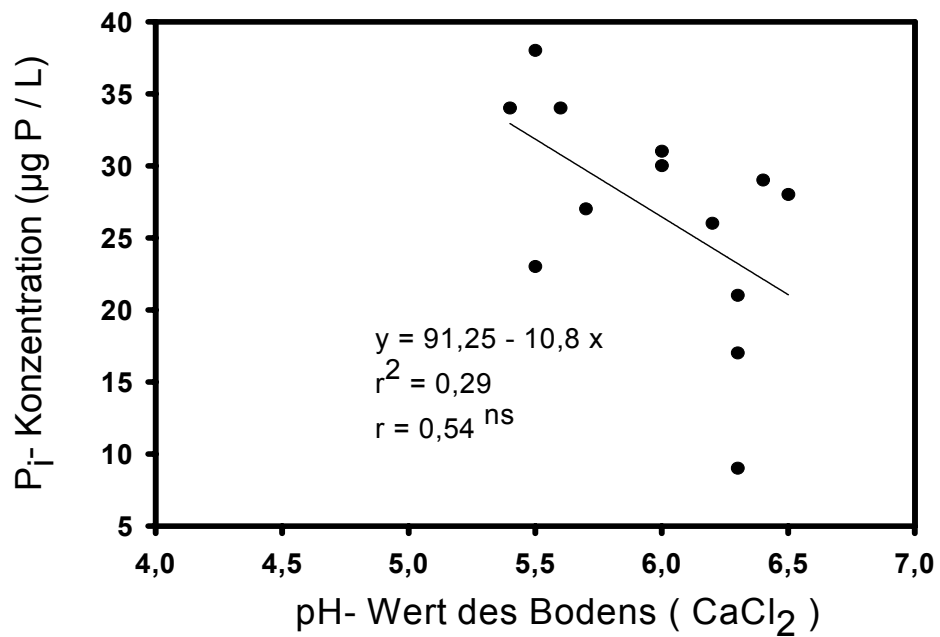
**Abbildung 16:** Abhängigkeit der  $P_i$ - Konzentration vom DL-P- Gehalt des Bodens, 30 Tage nach KS-Applikation



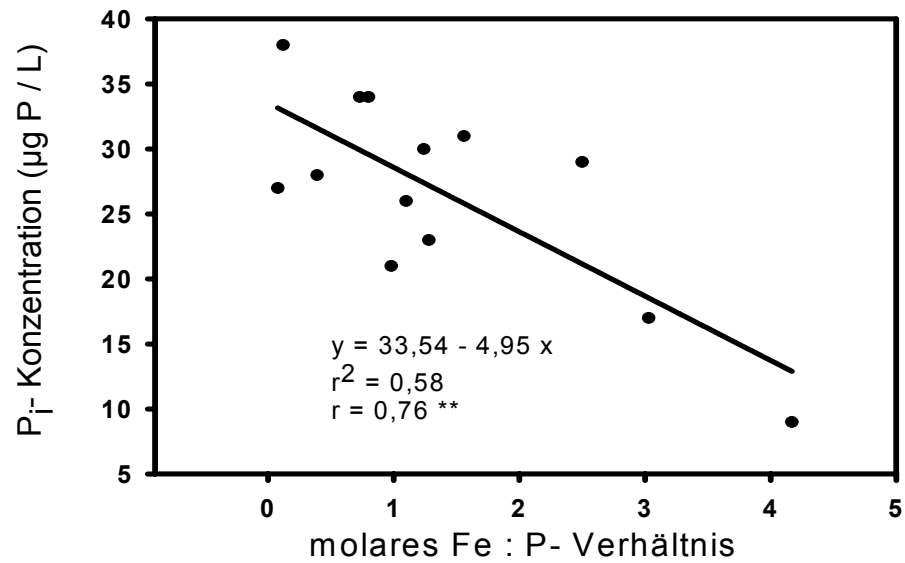
**Abbildung 17:** Abhängigkeit der  $P_i$ - Konzentration von der P- Sorption des Bodens nach KS- Applikation  
\* = signifikant bei  $p = 5\%$



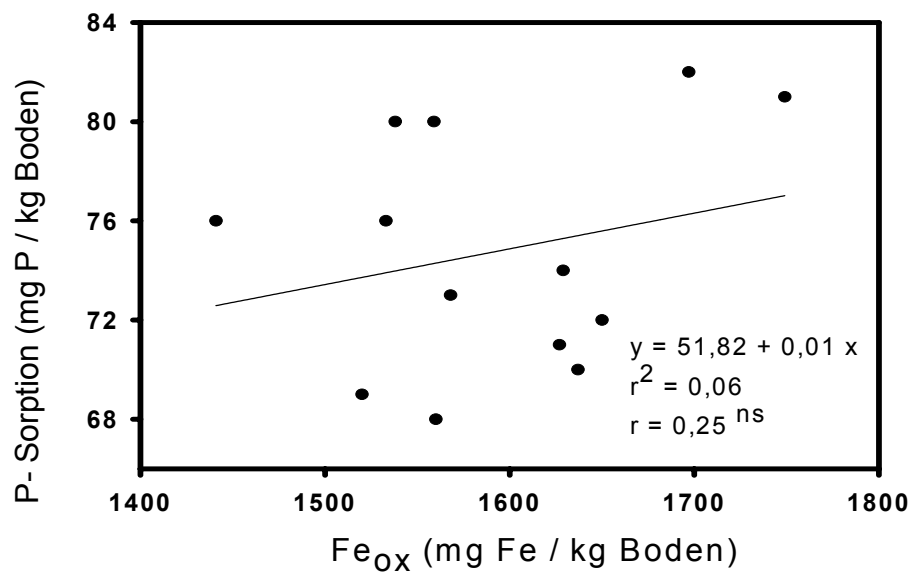
**Abbildung 18:** Abhängigkeit der  $P_i$ -Konzentration vom Bodengehalt an  $\text{Fe}_{\text{Ox}}$ , 30 Tage nach KS-Applikation  
*ns = nicht signifikant*



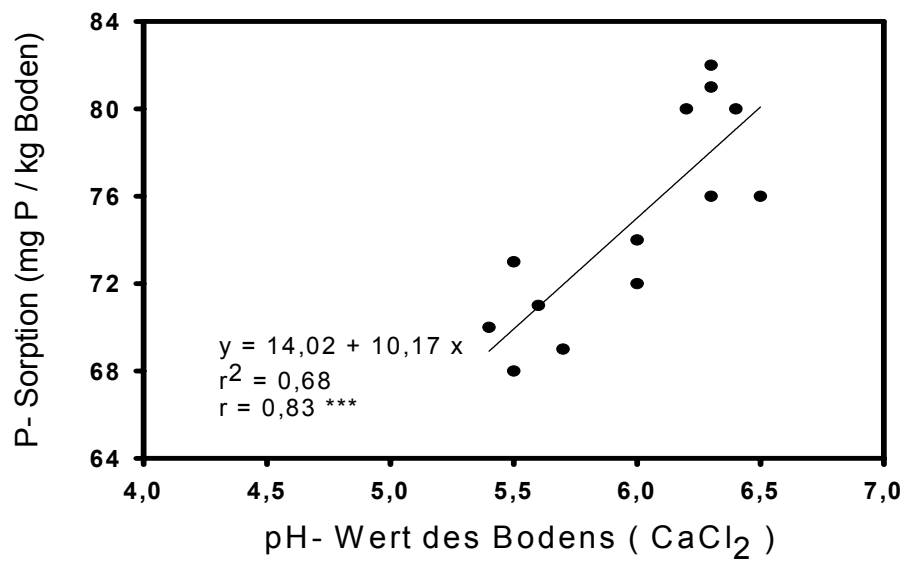
**Abbildung 19:** Abhängigkeit der  $P_i$ -Konzentration in der Bodenlösung vom Boden- pH, 30 Tage nach KS-Applikation  
*ns = nicht signifikant*



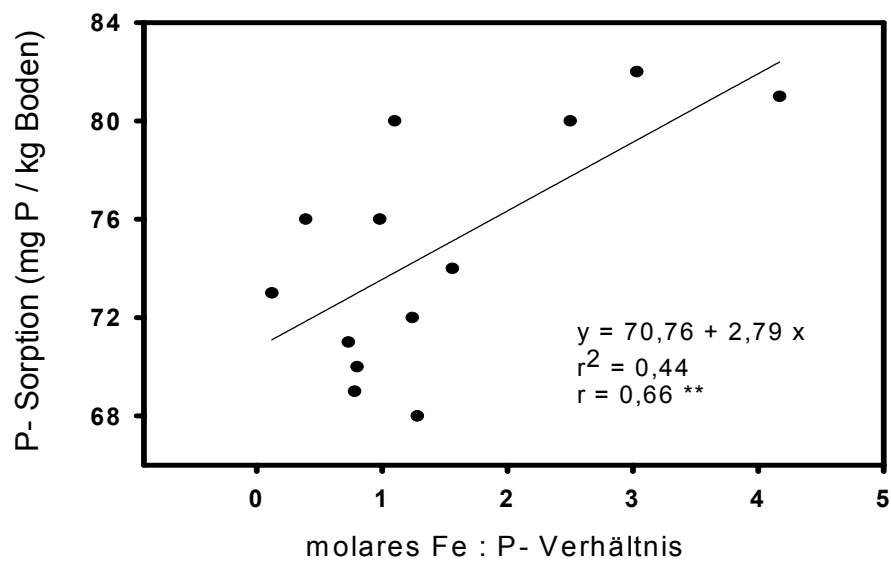
**Abbildung 20:** Abhängigkeit der  $P_i$ -Konzentration vom molaren Fe : P- Verhältnis der Klärschlämme  
 \*\* = signifikant bei  $p = 1\%$



**Abbildung 21:** Abhängigkeit der P-Sorption vom  $Fe_{Ox}$ -Gehalt des Bodens, 30 Tage nach KS-Applikation  
 ns = nicht signifikant



**Abbildung 22:** Abhängigkeit der P- Sorption vom Boden-pH nach der KS- Applikation  
\*\*\* = signifikant bei  $p = 0,1\%$



**Abbildung 23:** Abhängigkeit der P-Sorption vom molaren Fe : P-Verhältnis der Klärschlämme  
\*\* = signifikant bei  $p = 1\%$

### 3.1.5 Diskussion

Der P-Entzug des Weidelgrases aus den 13 Klärschlämmen war sehr differenziert. Bezogen auf das aus TSP aufnehmbare P wurden von 6 Klärschlämmen (KS) 82 bis 100 %, von 5 KS nur 63 bis 81 % und von 2 KS nur weniger als 62 % des applizierten P aufgenommen. Dieses differenzierte Verhalten der KS dürfte, da nur ein Boden benutzt wurde, im Wesentlichen auf die Eigenschaften der KS zurückzuführen sein. Sie beeinflussen mit ihren Phosphaten, ihren Eisenverbindungen, aber auch ihren basischen Bestandteilen die P-Löslichkeit in der Bodenlösung und die P- Sorption. Beide Größen sind für die P-Aufnahme der Pflanzen verantwortlich. Mit steigendem  $Fe_{ox^-}$  Gehalt und steigender Kalkzufuhr sank die  $P_i$ -Konzentration ab (Abbildung 18), am besten demonstriert durch die Abhängigkeit vom Fe:P-Verhältnis der KS selbst (Abbildung 20). Für die P- Sorption gilt die umgekehrte Aussage: Mit steigenden  $Fe_{ox^-}$  Gehalten und steigender Kalkzufuhr stieg die P- Sorption an, besonders infolge der Kalkzufuhr (Abbildung 21). Sie stieg aber auch mit dem Weiterwerden des Fe: P- Verhältnisses (Abbildung 23).

Es ist bemerkenswert, dass diese Resultate bereits mit einer einzigen KS-Gabe in Höhe von nur  $5 \text{ t TM ha}^{-1}$  (bezogen auf den KS 2 (Göttingen)) erfolgte, also einer Gabe wie sie in der Praxis angewendet wird. In Teil I der Arbeit waren KS-Gaben auch in doppelter (10 t) bzw. in 3-facher Höhe (15 t) appliziert worden. Die P- Sorption war dort linear mit dem  $Fe_{ox^-}$  Gehalt angestiegen. Auf dem sehr ähnlichen Boden Düshorn (Brache) betrug dort (Abb. 9)  $r^2$  für die Beziehung zwischen diesen zwei Kenngrößen 0,92. Die Beziehung zwischen P- Sorption und oxalatlöslichem Eisen war also eng. Wenn infolge steigender P- Sorption, die  $P_i$ - Konzentration niedriger wird, so wird verständlich, dass damit die P- Aufnahme der Pflanzen ebenfalls erniedrigt wird. Damit werden folgende Literaturbefunde bestätigt bzw. plausibel:

Mit eisenhaltigem KS stieg die P- Sorption im Boden an (Fritsch und Werner, 1989). Die P- Ausnutzung von eisenhaltigem KS im Vergleich zu  $Ca(H_2PO_4)_2$  lag nur bei 62 % (Frossard, E., et al., 1996). Suntheim und Dittrich (1996) fanden beim Vergleich von Superphosphat mit 3 KS verschieden starker P- Eliminierung eine deutlich geringere P- Aufnahme von Mais, wenn Fe- Salze

zur P- Eliminierung verwendet worden waren. Auch Weidelgras, Raps und Buchweizen konnten aus KS mit P- Eliminierung durch Eisensalze bzw. Eisensalze mit CaO soviel P aufnehmen wie aus Superphosphat (Baran, 1985). Das In-Lösung-gehen von P aus KS mit 7 % Fe war deutlich geringer als aus Fällungsprodukten mit Kalk. Außerdem war die P-Aufnahme aus den Fe-haltigen KS gegenüber anderen deutlich geringer (Zorn, et al., 2001).

**Wenn also der Eisengehalt der KS eine Rolle für die P-Verfügbarkeit im Boden spielt, so stellt sich die Frage, welcher Fe- Gehalt toleriert werden kann, wenn die P-Ausnutzung möglichst der von Triplephosphat entsprechen sollte.** Aus Tabelle 26 geht hervor, dass die P- Entzugswerte (82 – 100 %) aus den Klärschlämmen 9 bis 13 nicht signifikant von der aus TSP verschieden sind. KS 6 bildet einen Sonderfall, dessen relativ hohe P-Ausnutzung (89 %) die sonst klare Einteilung der KS (entsprechend ihrer Fe: P-Verhältnisse in die 3 Gruppen) etwas stört. Die Ursache ist unklar. KS 6 wird nicht weiter berücksichtigt.

Die Schlämme 9 bis 13 haben molare Fe: P- Verhältnisse von weiter als 1:1,26, sind also zu Gunsten des P verschoben. D.h. in den KS 9 bis 11 sind die Fe-Verbindungen stöchiometrisch betrachtet mehr als 1-fach, im KS 12 fast vollständig und im KS 13 mehr als vollständig mit Phosphat gesättigt. Interessant ist, dass mit den KS 12 und 13 die absolut gleichen P-Entzüge wie mit TSP erreicht werden (Tabelle 25). Dieser Befund spricht sehr dafür, die Fe-Gehalte so niedrig wie möglich zu halten. **Der umgekehrte Schluss ist, die KS 1 bis 8 enthalten zu viele Eisenverbindungen mit geringer P-Sättigung.**

Ein Problem ist noch anzusprechen. Die Kalkgehalte der KS sind sehr verschieden (Tabelle 20) und nehmen somit differenzierenden Einfluss auf die P-Dynamik im Boden und auf das Wachstum der Pflanzen. Für das Wachstum (Sprossmasse) konnte allerdings keine Abhängigkeit von der pH-Wert-Änderung infolge der KS-Zufuhr festgestellt werden. Das Bestimmtheitsmaß für diese Beziehung betrug  $r^2 = 0,05$  ! In den Gefäßen der Varianten ohne Kalkzufuhr P 0, TSP, KS 5, 9, 11 und 13 werden pH-Werte von 5,4 bis 5,6 gemessen (Tabelle 28). Für einen Sandboden mit 1 % Ton plus 7 % Schluff ist dieser Wert nahe dem Optimum. Also ist durch eine Kalkzufuhr nur ein relativ

geringer Ertragszuwachs zu erwarten. In den Varianten mit Klärschlamm, die hohe Kalkmengen enthielten, waren die pH-Werte durch diese eine KS-Applikation in gesetzlich zulässiger Höhe von ca. 5 t TM ha<sup>-1</sup> auf Werte von 6,3 bis 6,5 angestiegen! Im Jahr 2002, in dem der Versuch fortgeführt wurde, hier aber nicht betrachtet wird, trat in einigen KS- Varianten mit hohen CaO-Begleitgaben (KS Göttingen, Dollbergen u.a.) die Dörrfleckenkrankheit bei Hafer auf. Das ist ein Hinweis auf Mn- Mangel. Dieser pH-Wert von 6,5 ist vermutlich für diesen Boden schon zu hoch, denn die durch eine Kalkdüngung erzielten höheren Trockenmassenerträge von 15 – 23% (Tabelle 27) wurden bei pH-Werten von 5,7 bis 6,1 erzielt (Tabelle 28). **Für Sandböden ist also die Kalkzufuhr durch Klärschlämme strikt zu kontrollieren, denn höhere pH-Werte können dort zu Mikronährstoffmangel (z.B. Mangan) führen.**

In Bezug auf die P-Dynamik hat sich gezeigt (Abbildung 19), dass die P<sub>i</sub>-Konzentration mit steigendem pH (steigende Kalkzufuhr) sinkt und die P-Sorption steigt (Abbildung 17). Offenbar geht hier das Phosphat Bindungen mit den Ca- Ionen ein bzw. wird an CaCO<sub>3</sub>- Partikel adsorbiert. Diese Prozesse geschehen bei der KS- Herstellung und im Boden. Die Konsequenzen für die P-Aufnahme der Pflanzen sind aber offenbar gering, denn das Bestimmtheitsmaß für die Beziehung zwischen P- Entzug und pH ist mit  $r^2 = 0,14$  gering, aber mit Fe<sub>ox</sub> ( $r^2 = 0,44$ ) deutlich höher. Das kann bedeuten, dass das an Ca-Verbindungen gebundene Phosphat besser pflanzenverfügbar ist als das an Fe-Verbindungen gebundene.

### Schlussfolgerungen

- Enthalten Klärschlämme (KS) je 1 mol Fe (56 g) weniger als 1,3 mol P (40 g), so sinkt ihre P- Ausnutzung signifikant unter die von Triplesuperphosphat ab.
- Solche Klärschlämme sind in der Landwirtschaft unerwünscht. Klärschlämme sollten so wenig Fe enthalten wie das Verfahren erlaubt. Auf jeden Fall sollten bei der Schlammkonditionierung über die vorher erfolgte P-Fällung hinaus keine weiteren Eisensalze eingesetzt werden.

- Den Landwirten sind neben den Nährstoffgehalten, Schwermetallgehalten, basischen Bestandteilen auch die Eisengehalte und damit die Fe : P-Verhältnisse in Absolutzahlen oder im molarem Verhältnis mitzuteilen.
- Bei Sandböden ist die Kalkzufuhr mit dem KS für die Einhaltung optimaler pH-Werte unbedingt zu beachten.



### Teil III

#### 4 Kleingefäßversuch zur Prüfung der P- Aufnahme aus drei Klärschlämmen mit unterschiedlichen Werten des molaren Fe: P- Verhältnisses auf zwei deutlich verschiedenen ägyptischen Böden

##### 4.1 Vorbemerkungen und Versuchsziele

Zur Prüfung der P- Wirksamkeit von drei eisenhaltigen Klärschlämmen (Tabelle 32) wurden zwei ägyptische Böden (Tabelle 33) in einem Kleingefäßversuch (1kg Boden) benutzt. Die Versuchspflanze war Mais. Der Versuch erfolgte in der Klimakammer.

Als Bezugsbasis wurde eine mineralische P- Düngung mit Triplesuperphosphat benutzt. Die drei Klärschlämme wurden so ausgewählt, dass das molekulare Fe: P Verhältnis möglichst einen hohen, mittleren bzw. einen niedrigen Wert haben sollte, um die Wirksamkeit dieses Verhältnisses auf die P- Aufnahme von Pflanzen prüfen zu können. Die drei benutzten Klärschlämme (KS- Göttingen, KS- Dollbergen, KS- Osterode) stammen aus niedersächsischen Kläranlagen. Wichtige Kenndaten stehen in Tabelle 32.

**Tabelle 32:** *Kenndatenanalysen der gefriergetrockneten, applizierten Klärschlämme*

Ort	P mg kg <sup>-1</sup>	Fe mg kg <sup>-1</sup>	Fe / P direkt	Mol. Fe : P	CaO mg kg <sup>-1</sup>
Dollbergen	8777	65045	7,4 : 1	1 : 0,24 (4,2)	235000
Göttingen	11354	61810	5,4 : 1	1 : 0,33 (3,0)	271000
Osterode	30087	42050	1,4 : 1	1 : 1,27 (0,79)	218000

##### 4.2 Versuchsanlage und Durchführung

Die verwendeten Böden aus Ägypten (Moschtohor und Meetkenana) entstammen landwirtschaftlich genutzten Ackerflächen aus 0-30 cm Tiefe. Der Boden aus Moschtohor ist ein lehmiger Tonboden, der aus Meetkenan ist ein

toniger Sandboden. Wichtige Kenndaten der eingesetzten Böden gibt Tabelle 33 wieder. Die pH – Werte beider Böden liegen im basischen Bereich. Die CAL-P- Gehalte sind als hoch (Gehaltsklasse D des VDLUFA) zu bezeichnen.

**Tabelle 33:** Kenngrößen der ägyptischen Versuchsböden

Ort	Ton %	Schluff %	Sand %	CaCO <sub>3</sub> %	pH (CaCl <sub>2</sub> )	Humus %	CAL - P mg P kg <sup>-1</sup>
Moschtohor	56	19	25	1,4	8,0	2,20	158
Meetkenana	14	8	78	0,6	7,7	1.98	106

In die Böden wurden die gefriergetrockneten und fein gemahlene Klärschlämme eingemischt. Zusätzlich wurden die Kontrollvarianten ohne P-Düngung (P 0) angelegt. Eine Variante wurde mit Triplesuperphosphat (TSP) gedüngt. Vor dem Befüllen der Kleingefäße wurden in die jeweils 1 kg Boden die folgenden Nährstoffmengen eingearbeitet:

- 31mg P als Triplesuperphosphat oder Klärschlamm in fester Form,
- 0,15 g N als NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>,
- 0,15 g K als K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> und
- 0,03 g Mg als MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O in gelöster Form.

Die Varianten wurden in vierfacher Wiederholung angesetzt. Den Versuchsaufbau und das Versuchsdesign gibt Tabelle 34 wieder. Bei der Vorbereitung des Versuchs wurde der Boden in den Gefäßen auf ca. 50% der max. Wasserkapazität eingestellt und abgedeckt. Nach 4 Wochen wurden sie mit Mais der frühreifen Sorte „BIRKO“ bepflanzt. Zunächst wurde das verwendete Saatgut in Fließpapier vorgekeimt. Nach drei Tagen wurden drei einheitlich große Keimlinge pro Gefäß eingesetzt und nach 5 Tagen auf zwei Pflanzen pro Gefäß reduziert. Eine Woche und 3 Wochen nach der Aussaat wurden die Pflanzen mit jeweils 0,15 g N in Form von Ammoniumnitrat nachgedüngt. Die Pflanzen wurden in der Klimakammer 50 Tage kultiviert. Gegossen wurde auf 65% der maximalen Wasserkapazität. Die Wasserversorgung erfolgte täglich auf der Waage mit entmineralisierten

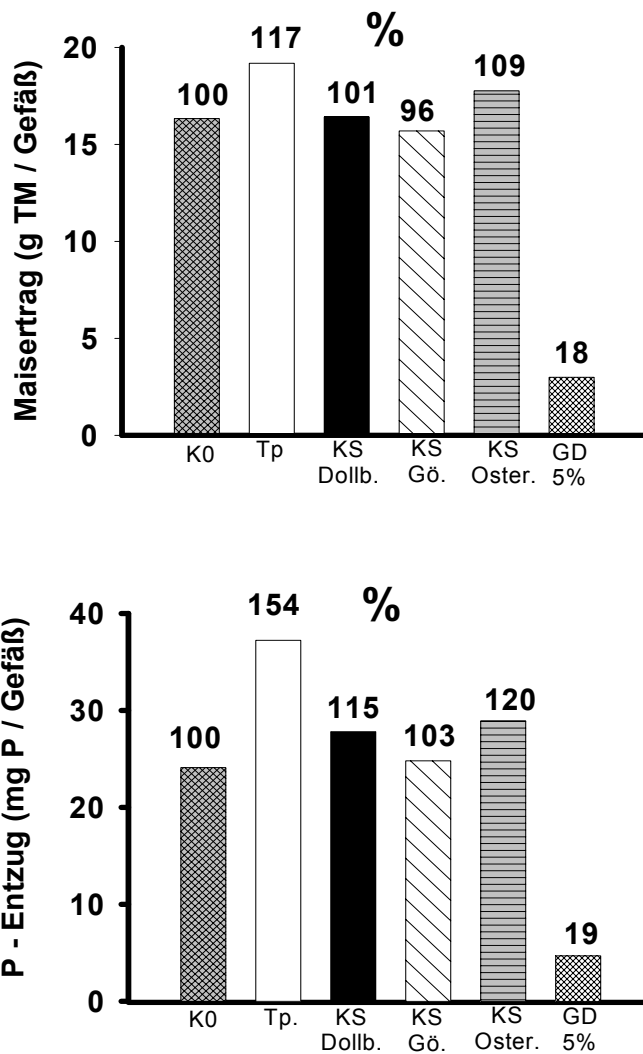
Wasser. Die Kultivierung der Pflanzen fand unter kontrollierten Bedingungen in der Klimakammer statt. Die Temperatur lag zwischen 26°C am Tage und 21°C in der Nacht. Die Luftfeuchtigkeit war tagsüber 70% und in der Nacht 60%. Die Gefäße wurden, unabhängig von der Variante, zufällig in der Klimakammer aufgestellt und innerhalb eine Woche dreimal umgesetzt, um der Randeffect zu minimieren. Nach 50 Tagen wurden die Sprosse abgeschnitten und im Trockenschrank bei 105<sup>0</sup> C getrocknet. Danach wurden die Trockenmasseerträge und die P- Konzentration in der Pflanzen bestimmt (Scheffer und Pajenkamp, 1952), so dass der P- Entzug berechnet werden konnte.

**Tabelle 34:** Versuchsaufbau und Design des Gefäßversuches in der Klimakammer

Versuchsaufbau	2 ägyptische Böden, 5 Versuchsglieder, 4 Wiederholungen	
Kulturpflanze	Mais, Sorte BIRKO, 2 Pflanzen Gefäß <sup>-1</sup>	
P- Düngung	Alle P- Varianten erhielten 31 mg P Gefäß <sup>-1</sup>	
P- Varianten	(1) Kontrolle, Versuchsboden ohne P	P 0
	(2) Klärschlamm- Dollbergen	5,87 g KS
	(3) Klärschlamm- Göttingen	4,54 g KS
	(4) Klärschlamm- Osterode	1,71 g KS
	(5) Triplephosphat 20 % P	155 mg
Düngung	Stickstoff 450 mg N als NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	0,429g Gefäß <sup>-1</sup>
	Kalium 150 mg K als K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,334g Gefäß <sup>-1</sup>
	Magnesium 30 mg Mg als MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0,304g Gefäß <sup>-1</sup>
Bewässerung	täglich auf ca. 65 % der max. Wasserkapazität	
Inkubationszeit	4 Wochen bei ca. 20°C vor der Saat	

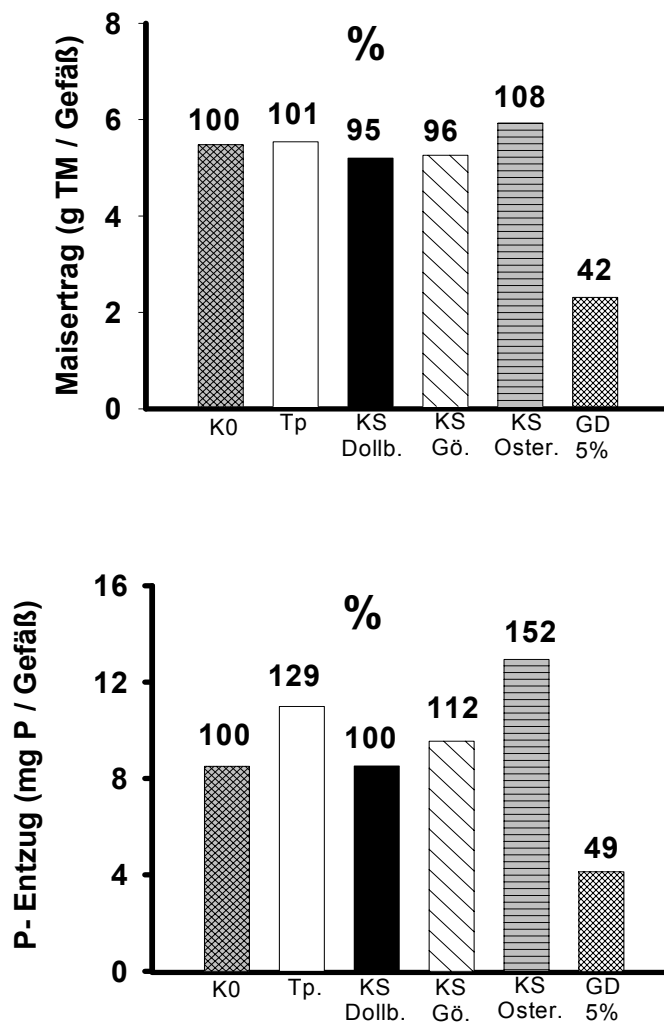
### 4.3 Ergebnisse

Abbildung 24 gibt die Erträge und P- Entzüge des Maises auf dem lehmigen Tonboden Moschtohor wieder. Weder mit TSP noch mit den drei Klärschlämmen gab es signifikante Mehrerträge. Aber die P- Aufnahme aus TSP war auf 154 % angestiegen. Ein signifikanter Anstieg des P- Entzuges bei den KS gab es nur bei dem KS von Osterode (20 %).



**Abbildung 24:** Abhängigkeit des Maisertrages und des P - Entzuges von der P - Applikation zum Lehm Boden Moschtohor (K0 = Kontrolle ohne P, Tp = TSP)

Abbildung 25 gibt die Erträge und P- Entzüge des Maises auf dem tonigen Sandboden Meetkenana wieder. Das absolute Ertragsniveau lag deutlich niedriger als auf dem Boden Moschtohor. Auch hier gab es durch Düngung in keinem Fall signifikante Mehrerträge. Die statistische Analyse der P- Entzüge zeigt ein überraschendes Ergebnis, denn die P- Aufnahme aus der Variante KS- Osterode (152 %) war höher als die aus TSP (129 %).



**Abbildung 25:** Abhängigkeit des Maisertrages und des P - Entzuges von der P - Applikation zum Sandboden Meetkenana (K0 = Kontrolle ohne P, Tp = TSP)

Das wesentlichste Resultat aus beiden Versuchen ist, dass die Maispflanzen von allen drei Klärschlämmen nur aus dem KS Osterode stets die höchsten P-Mengen aufnahmen. Die P- Aufnahmen aus den Klärschlämmen Dollbergen und Göttingen blieben stets unter der Signifikanzschwelle. Damit bestätigen diese Experimente die Einordnung der 3 KS wie sie auch für den Sandboden Düshorn getroffen wurden. KS Dollbergen und Göttingen vertreten dort die Nr. 1 und 2 und KS Osterode die Nr. 10. Die KS Nr.1 und 2 verursachten auf dem Sandboden die geringsten P- Entzüge der 13 KS (Tabelle 25) während sich der P- Entzug des KS Nr.10 (Osterode) mit 84% nicht von P- Entzug der TSP-Variante unterschied (Tabelle 26).

## 5 Abschließende Bemerkungen

Versucht man alle Resultate im Zusammenhang zu betrachten, so ergibt sich, dass die P- Eliminierung aus dem Abwasser durch Eisensalze und besonders die Schlammkonditionierung mit Fe-Salzen zwar die P- Konzentration der geklärten Abwässer drastisch reduziert (Umweltbundsamt, 1997) und damit der Eutrophierung der Gewässer entgegenwirkt, aber den Landwirten, die den Klärschlamm verwerten wollen, ein Problem bereitet. Es konnte in beiden Teilen (Teil I, II) der Arbeit nachgewiesen werden, dass Klärschlämme mit einem Fe : P- Verhältnis, das stark zu Gunsten des Fe verschoben ist und damit eine geringe P- Sättigung aufweist, wichtige Parameter der P- Verfügbarkeit im Boden (P- Sorption, Orthophosphatkonzentration in der Bodenlösung) negativ beeinflusst.

Solche Veränderungen sind für den Pflanzenbau als ungünstig zu beurteilen. Deshalb sind solche KS als Sekundärrohstoffdünger abzulehnen. Der Landwirt hat einen Anspruch auf KS mit hoher P- Verfügbarkeit. Da es Verfahren zur P- Eliminierung ohne solche Eisensalze gibt (Klaus und Schönborn, 1999), ist seitens des Bodenschutzes daraufhin zu wirken, dass Klärschlämme erzeugt werden, die sowohl das Phosphat der Abwässer eliminieren (Vermeidung der Gewässereutrophierung) als auch das Phosphat in gut aufnehmbar Form enthalten. Denn die P- Vorräte der Welt sind begrenzt und das P- Recycling mit den KS kann helfen, die P- Vorräte zu schonen. Dass dies möglich ist, wurde mit einigen eisenarmen KS sehr gut demonstriert.

## 6 Zusammenfassung

In deutschen Kläranlagen werden 500 000 t Eisensalze zur P- Eliminierung eingesetzt. Von den insgesamt 2,4 Mill. t TM Klärschlamm (KS) werden 38% in der Landwirtschaft eingesetzt. Damit dürften beträchtliche Eisenmengen in Ackerböden gelangen. Da Eisenhydroxide /- oxide eine hohe Affinität zum Phosphat besitzen, bleibt zweifelhaft, ob das Phosphat derartiger Eisen-Phosphat- Verbindungen gut für Pflanzen verfügbar ist. Ferner ist unklar, ob derartige Eisenverbindungen im Boden vorkommendes Phosphat, z.B. aus der Bodenlösung adsorbieren, also die P- Verfügbarkeit im Boden senken, was nicht erwünscht wäre. Aus Sicht der Pflanzenernährung und des Phosphatrecyclings erschien es deshalb sinnvoll, diesen Problemen experimentell nachzugehen. Die Untersuchungen (Gefäßversuch mit Mitscherlichgefäßen) gliedern sich in drei Teile: I, II und III.

### Teil I

#### Ziel und Vorgehensweise

Dieser Teil hatte zwei Ziele:

1. Zeitliche Verfolgung der Änderung der P- Sorption und der Konzentration an Orthophosphat ( $P_i$ ) in der Bodenlösung von Sand- und Schluffböden mit unterschiedlichem P- Gehalt, wenn zwei KS unterschiedlichen Eisengehaltes in die Böden eingebracht werden.
2. Ermittlung des Biomasseertrages und P- Aufnahme von Kulturpflanzen, die auf solch gedüngten Böden wachsen.

$CaHPO_4$  diente als P- Mineraldünger zum Vergleich.

#### Lösungsweg:

In diesen Versuchen kamen stets zwei Klärschlämme mit folgenden Parametern zur Anwendung:



	KS Göttingen (KS Gö)	KS Salzhausen (KS Sh)
	kg t <sup>-1</sup> TM	
➤ P-Gehalt	12	25
➤ Fe-Gehalt	65	39
➤ Ca-Gehalt	197	21
➤ Fe : P	1 : 0,18	1 : 0,64
➤ mol Fe : mol P	1 : 0,3	1 : 1,2

Die P-Düngung basierte auf der Applikation von 5 t TM ha<sup>-1</sup> als KS Gö mit 60 kg P ha<sup>-1</sup> bzw. 30 mg P kg<sup>-1</sup> Boden im Gefäßversuch. Gleiche P-Mengen wurden als KS Sh bzw. als CaHPO<sub>4</sub> (stellvertretend für P-Mineraldünger) zugegeben.

#### **(A) Gefäßversuche zur Verfolgung der P- Verfügbarkeit im Boden**

Die Inkubation der Böden mit KS bzw. die Düngung mit CaHPO<sub>4</sub> erfolgte in 8 niedersächsischen Lössböden (Parabraunerden) bzw. Sandböden und Quarzsand, z.T. in gestaffelten Mengen in einer Klimakammer für 12 Monate. In definierten Abständen (1 Monat, 6 bzw. 12 Monate) erfolgte die Bestimmung der P-Sorption, der Orthophosphatkonzentration in den Bodenlösungen, der pH-Werte und der Gehalte an oxalatlöslichem (amorphen) Eisen. Nach 12 Monaten erfolgte in dem auf kleinere Gefäße verteilten Boden ein Anbau von Weidelgras in der Drahthalle des Gewächshauses und eine 3-malige Ernte des Grases und Bestimmung seiner P-Aufnahme.

#### **Ergebnisse**

Das P-Sorptionsvermögen blieb in allen Böden nach Applikation von KS Sh (Fe : P = 1:0,64) annähernd auf gleichem Niveau wie im Boden ohne KS, aber nach KS Gö (Fe : P = 1:0,18) stieg es im Mittel um 16 % (0-59 %) an. Die P<sub>i</sub>-Konzentration stieg bei KS Sh-Gabe im Mittel der Lehmböden um 34 %, die der Sandböden um 15 % an, sank aber nach KS Gö-Gabe um 13 bzw. 36 % im

Vergleich zur Kontrolle ab. Mit steigenden Applikationen von KS Gö (5, 10, 15 t TM ha<sup>-1</sup>) stiegen nach 1 Monat die Konzentration des Bodens an oxalatlöslichem Fe und dazu die P-Sorption linear an ( $r^2 = 0,6$  bis  $0,97$ ). Das Weidelgras nahm nach KS Gö Anwendung weniger P auf als nach KS Sh-Düngung und viel weniger als aus CaHPO<sub>4</sub> auf. Die geringe P-Aufnahme der Pflanzen nach KS Gö-Düngung korrespondierte mit der in den Böden verringerten P-Verfügbarkeit (erhöhte P-Sorption, verringerte P<sub>i</sub>-Konzentration). KS mit einem Fe : P-Verhältnis von 1:0,18 kann dem Pflanzenbau nicht als Sekundärrohstoffdünger empfohlen werden.

### **(B) Gefäßversuch zur Prüfung der P-Aufnahme von drei Kulturpflanzen**

Das Ziel war, Wachstum (Trockenmassebildung) und P-Aufnahme von den drei aufeinander folgenden Kulturpflanzen Mais, Rotklee und Weidelgras in Abhängigkeit von der P-Düngung mit den zwei eisenhaltigen Klärschlämmen (KS) im Vergleich zum "P-Mineraldünger" CaHPO<sub>4</sub> in den Jahren 1999, 2000 und 2001 zu prüfen. Dazu wurden die zwei KS bzw. CaHPO<sub>4</sub> (30 mg P / kg Boden) in 4 Ackerböden (2 Schluffböden mit pH 6,3 bzw. 7,2; 2 Sandböden mit pH 4,3 bzw. 4,9), in Löß (C – Horizont einer Parabraunerde) und in Quarzsand (Mitscherlich - Gefäße) eingebracht. Die Böden bzw. Substrate besaßen unterschiedliche Ausgangsgehalte an Lactat-P. Die Versuchsglieder wurden vierfach wiederholt.

### **Ergebnisse**

Im Vergleich zu CaHPO<sub>4</sub> konnten die Kulturpflanzen nach Anwendung von KS Sh auf allen Ackerböden die gleichen P-Mengen aufnehmen. Der KS Gö wirkte anders: Aus den schluffreichen Ackerböden nahm Mais nur 64-82 % und Rotklee 77-82 % P im Vergleich zur CaHPO<sub>4</sub>-Variante auf. Dieses aus Sicht der P-Ausnutzbarkeit ungünstige Resultat für den KS Gö ist auf eine erhöhte P-Sorption im Boden und eine verringerte Orthophosphatkonzentration in der Bodenlösung zurückzuführen. Auf den sauren Sandböden hingegen erreichte der Mais 96-106 % und der Rotklee 83-87 % der P-Aufnahme im Vergleich zur CaHPO<sub>4</sub> - Anwendung. Diese relativ günstige Wirkung des KS Gö (kalkkonditioniert) auf die P-Aufnahme und die TM-Bildung des Maises auf den

Sandböden resultierte sowohl aus der Anhebung des Boden-pH von 4,3 auf 4,9 bzw. 4,9 auf 5,6 als auch aus der P-Aufnahme.

Insgesamt ergab sich aus den Gefäßversuchen mit den Kulturpflanzen, dass sie insbesondere auf den schweren Böden bei KS Gö- Düngung deutlich in ihrer P- Aufnahme hinter der aus  $\text{CaHPO}_4$ - und KS Sh- Düngung zurückblieben. Das steht in Übereinstimmung mit den Veränderungen der Kenngrößen der P- Verfügbarkeit nach KS Gö- Anwendung.

## Teil II

### Ziel und Vorgehensweise

In Teil I war deutlich geworden, dass ein KS mit weitem Fe : P- Verhältnis (1 : 0,18) wie KS Gö nicht als direkter Ersatz für den P- Minereraldünger  $\text{CaHPO}_4$  geeignet ist. Es ergab sich die Frage, bis zu welchem Fe : P- Verhältnis der KS- P genau die gleiche P- Düngewirkung wie der Minereraldünger hat. Ein solches Fe : P- Verhältnis wäre tolerierbar. Zu diesem Zweck wurden aus 13 Klärwerken (12 Niedersachsen, 1 NRW) KS mit weit gestaffelten molaren Fe : P- Verhältnissen von 1 : 0,24 bis 1 : 7,94 beschafft, gefriergetrocknet und im Vergleich zu Tripelsuperphosphat ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ) in einen mäßig mit P versorgten Sandboden (4,5 mg DL- P / 100g), (pH ( $\text{CaCl}_2$ ): 5,5) mit 30 mg P / kg Boden eingebracht. Als Versuchspflanze diente Weidelgras (Drahtalle des Gewächshaus). Die P- Entzüge wurden mit mehreren Bodenkenngrößen korreliert

### Ergebnisse

TSP steigerte die Sprossmasse auf 139 %, den P-Entzug auf 149 %. Bezogen auf die Kontrolle bewirkten die KS Sprosserträge von 98 bis 143 %, im Mittel 123 %, P-Entzüge von 107 bis 149 %, im Mittel 136 %.

Der P-Entzug der Pflanzen stieg in den Varianten mit KS linear mit der Orthophosphat-(Pi)-Konzentration der Bodenlösung an ( $r^2 = 0,67$ ) und sank ab:

1. mit steigender P-Sorption ( $r^2 = 0,33$ ), 2. mit steigendem Gehalt an oxalatlöslichem Fe im Boden ( $r^2 = 0,44$ ) und 3. mit weiter werdendem Fe:P-Verhältnis der KS ( $r^2 = 0,86$ ).

Die Nutzbarkeit des P aus den KS sinkt signifikant unter die von TSP ab, wenn Klärschlamm pro 1 mol Fe (56 g) weniger als 1,3 mol P (40 g) enthält. Bei Sandböden sind die Kalkgehalte der KS für die Bodenreaktion unbedingt zu berücksichtigen.

### Teil III

#### Ziel und Vorgehensweise

In Erweiterung der Problematik auf nicht deutsche Böden, sollte die P-Düngewirkung von KS in zwei ägyptischen Böden mit Mais in einem Kurzzeitversuch getestet werden.

Drei ausgewählte KS mit deutlich variierten Fe : P- Verhältnissen (1:7,4; 1:5,4; 1:1,4) wurden in zwei ägyptische Böden (lehmgiger Tonboden und toniger Sandboden mit pH – Werten über 7,7) eingebracht. Die Kleingefäße mit 1kg Boden standen in der Klimakammer. Zum Vergleich diente Triplesuperphosphat (TSP). Die P-Gabe betrug 31 mg P kg<sup>-1</sup> Boden. Die Pflanzen wuchsen 50 Tage und wurden danach auf TM und P- Entzug analysiert.

#### Ergebnisse

Die TM- Erträge des Maises auf dem sehr P- reichen lehmigen Tonboden wurden wie erwartet durch die P- Zugabe nicht beeinflusst. Die P- Aufnahme aus TSP war aber auf 154 % im Vergleich zur Kontrolle (P 0) angestiegen. Ein signifikanter Anstieg des P- Entzuges bei den drei KS gab es nur mit dem KS Osterode (Fe : P- Verhältnissen 1:1,4), aber die P- Entzüge aus allen drei KS blieben signifikant unter denen aus TSP.

Die TM- Erträge des Maises auf dem tonigen Sandboden wurden ebenfalls durch die P- Zugabe nicht beeinflusst; denn nach VDLUFA- Vorgaben lag der

Boden an der Grenze von Gehaltsklasse C/D. Die statistische Analyse der P-Entzüge zeigt ein überraschendes Ergebnis, denn die P- Aufnahme aus der Variante KS Osterode mit dem Fe : P- Verhältnissen 1:1,4 war höher (152%) als die aus TSP (129 %).

Im Prinzip bestätigte sich aber auch an den ägyptischen Böden, dass die P- Aufnahme aus KS mit molaren Fe : P- Verhältnissen größer als 0,79 (Tab. 32) gegenüber TSP deutlich geringer wird.

### **Schlussfolgerungen:**

- Aus Sicht der Pflanzenernährung dürfte ein wiederholtes Ausbringen von KS mit weitem Fe : P-Verhältnis die P-Dynamik im Boden in unerwünschter Richtung (zunehmende P-Sorption, Senkung der Orthophosphatkonzentration in der Bodenlösung) beeinflussen- ein Phänomen, das längerfristig verfolgt werden muss, denn eine Verringerung der P- Verfügbarkeit im Boden durch KS ist unerwünscht.
- Aus Rücksicht auf die mögliche Erhöhung der P-Sorption und damit Reduzierung der Phosphatverfügbarkeit in den Böden wäre eine P-Eliminierung im Abwasser ohne Eisensalze als Fällungsmittel zu empfehlen. Auf alle Fälle sollte bei der Schlammkonditionierung auf eine weitere Eisensalzzugabe verzichtet werden.
- Damit die Landwirtschaftskammern eine bessere Beurteilung der P-Verfügbarkeit der Klärschlämme vornehmen können, sollten in Zukunft die Fe-Gehalte generell mitanalysiert werden. Das ist bisher nicht der Fall. So könnten die Fe : P-Verhältnisse stets errechnet und Hinweise für die P- Verfügbarkeit gegeben werden.
- Enthalten Klärschlämme je Mol Fe (56 g) weniger als 1,3 Mol P (40 g), so unterscheiden sie sich in Bezug auf die P- Aufnahme der Pflanzen auf einem Sandboden signifikant negativ von der Triplesuperphosphat-Wirkung. Solche Klärschlämme sollten nicht auf Ackerböden gelangen.
- Insbesondere auf Sandböden sind die Kalkmengen in den Klärschlämmen zu berücksichtigen, da es bei einer Überkalkung solcher Böden zu Manganmangel kommen kann (eigene Beobachtungen).

## 7 Literaturverzeichnis

Abwassertechnische Vereinigung (ATV, Hrsg.), 1996: Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung. ATV-Information, 1-30.

Adams, F. (1974): Soil solution. In: The plant root and its environment. E.W. Carson (ed.), University Press of Virginia, Charlottesville, 441-481.

Bannick, C. und Hahn, J., (2001): Klärschlammverwertung aus Sicht des Bodenschutzes unter Berücksichtigung der Harmonisierung von Schadstoffeinträgen. Umweltbundesamt Berlin. ATV-DVWK-Schriftenreihe 27, Klärschlamm aktuell 1, 38-57.

Bannick, C.G. (2001): Grundsätze und Maßnahmen für eine vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in landwirtschaftlich genutzte Böden. Zeitschrift: Bodenschutz 3, 101-103.

Bannick, C.G., Bergs, C.G. & Lindner, K. –H. (2002): Verwertung von Bioabfällen und Klärschlämmen. Einführung- Verordnung- Vollzugshilfen- Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd. 123. Erich Schmidt Verlag. ISBN 3-503-06093-6.

Baran, E. (1985): Zusammensetzung und Düngewirkung von Phosphat-Fällungsprodukten aus der dritten Abwasserreinigungsstufe. Dissertation, Fachbereich Agrarwissenschaften, Universität Göttingen.

Beißner, L. (1997): Mobilisierung von Phosphor aus organischen und anorganischen P-Verbindungen durch Zuckerrübenwurzeln. Cuvillier Verlag Göttingen.

Bergs, C.G. (1998): Rechtliche Regelungen für die Verwertung von Klärschlämmen und sonstigen Sekundärrohstoffdüngern. Vortrag zur 9. Klärschlammberatertagung der LK Hannover am 1.12.1998 in Nienburg.

Egner, H., Riehm, H., u. Domingo, W.R. (1960): Untersuchungen über die chemische Bodenanalyse als Grundlage für die Beurteilung des

Nährstoffzustandes der Böden. Kungl. Lantbrukshögskolans Annalen 26: 199-215

Fritsch, F. und Werner, W. (1989): Einfluss langjähriger Klärschlammdüngung auf Löslichkeitskriterien der Bodenphosphate. Landwirtschaftliche Forschung 41, 305-311.

Frossard, E., Sinaj, S., Zhang, L.-M. and Morel, J.L. (1996): The fate of phosphorus in soil – plant systems. Soil Sci. Soc. Am. J. 60, 1248-1253.

Gerke, J. (1992): Phosphate, aluminium and iron in the soil solution of three different soils in relation to varying concentrations of citric acid. Z. Pflanzenern. Bodenk. 155, 339-343.

Gerke, J. (1995): Chemische Prozesse der Nährstoffmobilisierung in der Rhizosphäre und ihre Bedeutung für den Übergang vom Boden in die Pflanze. Cuvillier Verlag, Göttingen.

Gunreben, M. (2000): Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung in Niedersachsen (Hrsg. Nieders. Landesamt für Ökologie). 1 - 164

Hahn, J. (2000): Ausstieg aus der "landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung" – eine notwendige Harmonisierung im vorsorgenden Umweltschutz. Bodenschutz 3, 72-73.

Hahn, J. (2001): Vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in Böden am Beispiel der Klärschlammverwertung. Zeitschrift: Wasser, Luft und Boden 9, 60-67.

Keller, H. (2000): Einfluss wurzelbürtiger organischer Säuren auf das Cu-, Zn- und Cd-Aneignungsvermögen von Spinatgenotypen. Dissertation, Fachbereich Chemie, Universität Kaiserslautern.

Klaus, I. und Schönborn, Ch. (1999): Phosphatelimination – Mechanismen und Einflussfaktoren. Wasserwirtschaft Wassertechnik, 4; 22-26.

- Murphy, J., Riley, J. (1962): A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, 27, 31-36.
- Parfitt, R.L. (1978): Anionenadsorption. *Adv. Agronomy*, 30, 1-50.
- Römer, W. und Gerke, J. (1998): Phosphat- und Eisenmobilisierung durch Wurzelexsudate bei *Lupinus albus* L. ;In: *Lupinen in Forschung und Praxis* (Hrsg. M. Wink), 1, 15 - 25
- Römer, W. und Schilling, G. (1986): Phosphorus requirements of the wheat plant in various stages of its life cycle. *Plant and Soil* 91, 221-229.
- Schaaf, H. und Janßen, E. (2000): Schwermetallgehalte von Wirtschafts- und Sekundärrohstoffdüngern und Schwermetallfrachten bei Anwendung nach den anerkannten Regeln der guten fachlichen Praxis. 112. VDLUFA-Kongress, Stuttgart-Hohenheim, im Druck.
- Scheffer, F. und Pajenkamp, H. (1952): Phosphatbestimmung in Pflanzenaschen nach der Molybdän-Vanadin-Methode. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 56, 2-8.
- Scheffer, F. und Schachtschabel, P. (2002): *Lehrbuch der Bodenkunde*, 15. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. Berlin.
- Scheffer, W. (2000): Abwasserbehandlung in der Kläranlage, Fällungs- und Flockungsmittel zur chemischen P-Elimination. Tagung der VDLUFA-Fachgruppen I, II und X in Dresden, 15.3.2000
- Schilling, G. (2000): *Pflanzenernährung und Düngung*, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Schüller, H. (1969): Die CAL- Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphates in Böden. *Z. Pflanzenernährung und Bodenkunde* 123, 48-63
- Schwertmann und Amann (1998): zitiert in Scheffer und Schachtschabel: *Lehrbuch der Bodenkunde*, 14. Auflage, Enke-Verlag, Stuttgart, S. 265.



Schwertmann, U. (1964): Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammonium-Oxalatlösung. Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 105, 194-202.

Schwertmann, U. (1998): in Scheffer und Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde, 14. Auflage, Enke-Verlag, Stuttgart, Kapitel 2, 6.2.5.

Suntheim, L. und Dittrich, B. (1996): Klärschlamm – (k)ein wertvoller P-Dünger. VDLUFA-Schriftenreihe 44, Kongressband 1996, 313-316.

Umweltbundesamt (Hrsg.) (1997): Daten zur Umwelt, Erich Schmidt-Verlag, Berlin.

Wachtel, H. (1976): Die Phosphatvorkommen und die Versorgung der Landwirtschaft. Z. Die Bodenkultur. 27, 318 – 325

Weber, E. (1967): Grundriß der biologischen Statistik. 6. Auflage. Verlag Gustav- Fischer Stuttgart.

Werner, W., (1976): Untersuchungen zur Phosphatwirkung von Klärschlämmen aus der chemischen Abwasserreinigung. Landwirtschaftliche Forschung, Sonderheft 32/I, 177-185.

Zorn, W., Krause, O. und Kießling, G. (2001): Wirkung unterschiedlicher Abwasserbehandlungsverfahren auf die P-Verfügbarkeit von Klärschlamm im Gefäßversuch. 113. VDLUFA - Kongress am 20.9.2001 in Berlin (im Druck).

## 8 Anhang

**Tabelle 8.1:** EU-Grenzwertvorschläge für organische Schadstoffe im Klärschlamm bei landwirtschaftlicher Verwertung <sup>a)</sup>

Schadstoff	Grenzwertvorschlag	
	(mg/kg TS)	
AOX	500	
LAS	2600	
DEHP	100	
Nonylphenol <sup>1)</sup>	50	
PAK (9)	6	
PCB (7) <sup>2)</sup>	0,8	
PCDD/-F (TE)	100 ng	

<sup>a)</sup> Stand: Arbeitspapier der EU vom 27.04.2000

<sup>1)</sup> 90 % der Schlämme, die landwirtschaftlich verwertet werden, sollen mittel- bzw. langfristig die „Zielwerte“ unterschreiten.

In Klammern: Auf den Phosphorgehalt bezogene Grenzwerte

<sup>2)</sup> Summe der PCB-Kongeneren 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180

**Tabelle 8.2:** EU-Grenzwertvorschläge für Schwermetalle im Klärschlamm zur landwirtschaftlichen Verwertung <sup>a)</sup> (Grenzwerte können alternativ auf Trockenrückstand oder auf Phosphorgehalt bezogen werden)

Schwermetall	Grenzwerte		Zielwerte <sup>1)</sup>	
	(mg/kg TS)		(mg/kg TS)	
	Richtlinie		Mittelfristig	Langfristig
	86/278/EWG	Vorschlag	(ca. 2015)	(ca. 2025)
Cadmium	20-40	10 (250)	5	2
Kupfer	1000-1750	1000 (25000)	800	600
Quecksilber	16-25	10 (250)	5	2
Nickel	300-400	300 (7500)	200	100
Blei	750-1200	750 (18750)	500	200
Zink	2500-4000	2500 (62500)	2000	1500
Chrom	---	1000 (25000)	800	600

<sup>a)</sup> Stand: Arbeitspapier der EU vom 27.04.2000

<sup>1)</sup> 90 % der Schlämme, die landwirtschaftlich verwertet werden, sollen mittel- bzw. langfristig die „Zielwerte“ unterschreiten.

In Klammern: Auf den Phosphorgehalt bezogene Grenzwerte

**Tabelle 8.3:** Analysendaten zu den zwei gefriergetrockneten, applizierten Klärschlämme

	<b>KS Göttingen (Gö)</b>	<b>KS Salzhausen (SH)</b>
TS	2,4 %	3,55 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	27,3 kg t <sup>-1</sup> TM	57,6 kg t <sup>-1</sup> TM
CaO		30 kg t <sup>-1</sup> TM
pH		6,98 (direkt)
Fe+		39158 mg kg <sup>-1</sup> TM
Al		12817 mg kg <sup>-1</sup> TM
Org. Substanz		70% in d. TM
Gesamt- N		33 kg t <sup>-1</sup> TM
NH <sub>4</sub> - N		2 kg t <sup>-1</sup> TM
➤	FeSO <sub>4</sub> zum aeroben Prozess	FeCl <sub>3</sub> zum aeroben Prozeß
➤	FeCl <sub>3</sub> zum Dickschlamm	
➤	Ca (OH) <sub>2</sub> zum Dickschlamm	



**Tabelle 8.5:** P-Sorption von 4 Sandböden (absolut und relativ) 1,6 und 12 Monate nach der P-Düngung

P-Form	mg P/Gefäß	Boden 1			Boden 2			Boden 3			Boden 4		
		Düshorn (Brache)			Düshorn P-22			Rehburg			Hodenhagen P-22		
		Monate			Monate			Monate			Monate		
		1	6	12	1	6	12	1	6	12	1	6	12
ohne P	0	mg P kg <sup>-1</sup>			mg P kg <sup>-1</sup>			mg P kg <sup>-1</sup>			mg P kg <sup>-1</sup>		
		72	83	77	27	--	33	82	88	85	53	61	56
<b>ohne P</b>	<b>0</b>	<b>Relativ (%)</b>			<b>Relativ (%)</b>			<b>Relativ (%)</b>			<b>Relativ (%)</b>		
		<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>--</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
CaHPO <sub>4</sub>	187	92	94	91	85	--	82	95	91	97	82	89	95
KS Gö	187	108	99	103	140	--	115	102	95	102	113	139	102
	674	113	100	99	185	--	127	105	95	102	126	118	109
	560	119	101	105	222	--	130	106	97	100	142	125	121
KS Sh	187	102	99	97	115	--	100	99	97	100	102	119	107
	374	104	99	99	119	--	94	100	100	100	102	100	100
	560	106	100	97	126	--	94	102	100	100	105	102	100
		Mittelwerte (mg P kg <sup>-1</sup> ) Böden 1-4			Relativwerte (%) Böden 1-4			Relativwerte (%) Böden 1-4					
CaHPO <sub>4</sub>	187	91	90	91	<b>100</b>	100	100	--	--	--	--	--	--
KS Gö	187	112	107	106	<b>100</b>	96	91	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
	674	132	104	109	<b>100</b>	79	83	114	94	103	114	94	103
	560	147	107	114	<b>100</b>	73	78	127	96	108	127	96	108
KS Sh	187	102	105	101	<b>100</b>	102	97	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
	374	106	100	98	<b>100</b>	94	92	102	95	97	102	95	97
	560	110	101	98	<b>100</b>	92	89	106	96	97	106	96	97

**Tabelle 8.6:** P- Konzentration ( $\text{mg L}^{-1}$ ) in der Bodenlösung 1 Monat, 6 und 12 Monate nach der P- Applikation zu den Lehmböden

P Gabe mg P/Gefäß	P - Form	Lehmböden														
		Börry P-0			Börry P-80			Dorstadt P-0			Dorstadt P-20			Elliehausen		
		1	6	12	1	6	12	1	6	12	1	6	12	1	6	12
<b>0</b>	<b>Ohne</b>	0,056	0,058	0,078	0,279	0,311	0,385	0,060	0,071	0,078	0,713	0,748	0,728	0,004	0,005	0,004
<b>187</b>	<b>CaHPO<sub>4</sub></b>	0,202	0,176	0,250	0,800	0,576	0,692	0,231	0,313	0,354	0,890	1,016	1,017	0,071	0,046	0,045
	<b>KS GÖ</b>	0,079	0,095	0,110	0,181	0,232	0,273	0,098	0,120	0,154	0,536	0,643	0,698	0,017	0,011	0,014
	<b>KS SH</b>	0,081	0,115	0,160	0,355	0,448	0,615	0,147	0,207	0,264	0,781	0,938	1,012	0,002	0,009	0,010
<b>374</b>	<b>CaHPO<sub>4</sub></b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<b>KS GÖ</b>	0,091	0,087	0,113	0,169	0,211	0,269	0,103	0,137	0,163	0,430	0,532	0,610	0,026	0,023	0,022
	<b>KS SH</b>	0,129	0,139	0,245	0,411	0,625	0,831	0,232	0,350	0,439	0,887	1,082	1,182	0,032	0,032	0,038
<b>560</b>	<b>CaHPO<sub>4</sub></b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<b>KS GÖ</b>	0,100	0,090	0,125	0,169	0,206	0,265	0,111	0,145	0,202	0,376	0,460	0,521	0,031	0,028	0,029
	<b>KS SH</b>	0,168	0,248	0,420	0,478	0,938	1,138	0,262	0,394	0,500	1,04	1,316	1,443	0,077	0,100	0,085

**Tabelle 8.7:**  $P_f$ -Konzentration ( $\text{mg L}^{-1}$ ) in der Bodenlösung 1 Monat, 6 und 12 Monate nach der P- Applikation zu den Sandböden

P Gabe $\text{mg P Gefäß}^{-1}$	P - Form	Sandböden											
		Düshorn (Brache)			Düshorn (P – 22)			Rehburg Loccum			Hodenhagen ( P – 22)		
		1	6	12	1	6	12	1	6	12	1	6	12
<b>0</b>	<b>Ohne</b>	0,041	0,021	0,019	0,276	0,245	0,280	0,011	0,014	0,013	0,142	0,111	0,118
<b>187</b>	<b>CaHPO<sub>4</sub></b>	0,086	0,043	0,034	0,677	0,499	0,477	0,052	0,032	0,028	0,283	0,183	0,164
	<b>KS GÖ</b>	0,048	0,021	0,019	0,131	0,147	0,177	0,020	0,016	0,010	0,094	0,077	0,085
	<b>KS SH</b>	0,054	0,043	0,033	0,293	0,271	0,299	0,038	0,025	0,026	0,148	0,123	0,121
<b>374</b>	<b>CaHPO<sub>4</sub></b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<b>KS GÖ</b>	0,049	0,061	0,019	0,191	0,105	0,116	0,025	0,019	0,012	0,089	0,057	0,064
	<b>KS SH</b>	0,081	0,058	0,048	0,378	0,388	0,446	0,059	0,037	0,035	0,174	0,160	0,172
<b>560</b>	<b>CaHPO<sub>4</sub></b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<b>KS GÖ</b>	0,083	0,020	0,020	0,238	0,116	0,136	0,036	0,023	0,018	0,145	0,048	0,062
	<b>KS SH</b>	0,111	0,073	0,064	0,418	0,541	0,624	0,051	0,044	0,057	0,211	0,0194	0,231

**Tabelle 8.8:** pH- Werte der Lehm Böden 1 Monat, 6 und 12 Monate nach der P- Applikation (CaCl<sub>2</sub> 0,01 M)

P Gabe mg P/Gefäß	P - Form	Lehm Böden														
		Börry P-0			Börry P-80			Dorstadt P-0			Dorstadt P-20			Elliehausen		
		1	6	12	1	6	12	1	6	12	1	6	12	1	6	12
<b>0</b>	<b>Ohne</b>	7,20	7,20	7,40	6,22	6,24	6,25	7,17	7,15	7,20	7,07	7,10	7,20	7,70	7,65	7,65
<b>187</b>	<b>CaHPO<sub>4</sub></b>	7,26	7,3	7,45	6,23	6,24	6,20	7,12	7,00	7,30	7,05	7,10	7,20	7,70	7,70	7,70
	<b>KS GÖ</b>	7,64	7,55	7,65	7,29	7,15	7,15	7,53	7,40	7,50	7,38	7,30	7,45	7,9	7,80	7,80
	<b>KS SH</b>	7,21	7,25	7,4	6,17	6,15	6,10	7,08	7,15	7,25	7,03	7,10	7,20	7,70	7,70	7,70
<b>374</b>	<b>CaHPO<sub>4</sub></b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<b>KS GÖ</b>	7,69	7,6	7,75	7,47	7,37	7,55	7,59	7,45	7,60	7,47	7,40	7,50	7,90	7,85	7,80
	<b>KS SH</b>	7,06	7,15	7,3	5,97	5,90	5,85	7,06	7,05	7,20	7,03	7,00	7,05	7,70	7,70	7,70
560	CaHPO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KS GÖ	7,73	6,65	7,8	7,53	7,47	7,60	7,62	7,50	7,65	7,51	7,45	7,60	7,88	7,85	7,80
	KS SH	7,01	7,10	7,20	5,95	5,70	5,65	6,96	7,00	7,10	6,92	6,90	7,00	7,65	7,65	7,60



**Tabelle 8. 9:** pH- Werte der Sandböden 1 Monat, 6 und 12 Monate nach der P- Applikation ( $\text{CaCl}_2$  0,01 M)

P Gabe mg P/Gefäß	P - Form	Sandböden											
		Düshorn (Brache)			Düshorn ( P – 22)			Rehburg-Loccum			Hodenhagen (P – 22)		
		1	6	12	1	6	12	1	6	12	1	6	12
<b>0</b>	<b>Ohne</b>	4,88	4,88	4,80	4,87	4,85	4,80	4,31	4,30	4,25	4,74	4,74	4,75
<b>187</b>	<b>CaHPO<sub>4</sub></b>	4,90	4,90	4,8	4,88	4,88	4,80	4,34	4,30	4,25	4,75	4,75	4,75
	<b>KS GÖ</b>	5,55	5,50	5,35	6,03	5,80	5,70	4,91	4,85	4,70	5,41	5,30	5,25
	<b>KS SH</b>	4,87	4,75	4,75	4,82	4,80	4,80	4,40	4,30	4,25	4,72	4,75	4,75
<b>374</b>	<b>CaHPO<sub>4</sub></b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<b>KS GÖ</b>	6,10	5,95	5,80	6,83	6,55	6,40	5,43	5,30	5,20	5,95	5,80	5,70
	<b>KS SH</b>	4,79	4,70	4,60	4,72	4,60	4,50	4,33	4,30	4,20	4,64	4,65	4,55
<b>560</b>	<b>CaHPO<sub>4</sub></b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<b>KS GÖ</b>	6,56	6,30	6,20	7,21	7,15	7,00	5,81	5,65	5,50	6,40	6,25	6,10
	<b>KS SH</b>	4,74	4,65	4,55	4,60	4,45	4,35	4,30	4,20	4,10	4,60	4,55	4,45

**Tabelle 8.10:** P - Gehalte der Lehm Böden (CAL- Extraktion) 1 Monat, 6 und 12 Monate nach der P- Applikation (mg P 100g<sup>-1</sup>)

P Gabe mg P/Gefäß	P - Form	Lehmböden														
		Börry P- 0			Börry P- 80			Dorstadt P- 0			Dorstadt P- 20			Elliehausen		
		1	6	12	1	6	12	1	6	12	1	6	12	1	6	12
0	Ohne	7,9	8,12	8	16,3	15,59	15,55	9,5	9,04	9,33	26,3	24,84	24,45	1,7	1,67	1,62
187	CaHPO <sub>4</sub>	16,5	11,00	7,15	20,2	19,23	18,5	13,6	13,32	13,22	32,1	30,63	29	4,9	3,4	2,52
	KS GÖ	11,2	11,91	12,27	20,8	19,78	18,82	12,8	11,73	10,64	28,9	26,63	23,99	3,6	2,6	1,9
	KS SH	11,3	11,62	11,8	20,0	20,10	20,15	13,6	12,57	11,38	31,4	29,36	27,3	3,4	2,51	1,79
374	CaHPO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KS GÖ	15,2	12,46	10,21	23,7	21,85	19,7	15,5	13,77	12,42	32,2	28,01	26,65	3,5	2,8	2,1
	KS SH	13,8	15,15	17,3	24,3	23,01	21,92	18,3	17,59	16,54	33,2	32,89	31,9	6,2	4,85	3,52
560	CaHPO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KS GÖ	19,3	14,06	9,8	26,1	23,82	21,5	18,1	16,10	13,73	35,3	31,00	26,5	7,8	7,49	6,75
	KS SH	17,7	19,34	20,25	28,5	24,69	21,00	23,3	22,47	21,52	41,1	37,04	33,75	8,4	6,72	5,05

**Tabelle 8.11:** P - Gehalte der Sandböden (DL- Extraktion) 1 Monat, 6 und 12 Monaten nach der P- Applikation (mg P 100g<sup>-1</sup> )

P Gabe mg P /Gefäß	P - Form	Sandböden											
		Düshorn (Brache)			Düshorn (P – 22)			Rehburg-Loccum			Hodenhagen (P – 22)		
		1	6	12	1	6	12	1	6	12	1	6	12
0	Ohne	12,9	12,06	12,42	16,3	12,47	12,63	7,9	6,93	7,35	22,6	17,56	18,2
187	CaHPO <sub>4</sub>	17,5	13,50	10,15	22,6	14,85	12,63	10,4	10,13	9,65	26,6	20,88	15,65
	KS GÖ	14,63	11,48	9,0	24,7	14,63	13,49	10,1	7,88	5,95	25,3	18,09	12,66
	KS SH	16,96	14,40	13,5	17,7	14,72	12,6	11,9	9,90	7,98	25,3	17,73	12,55
374	CaHPO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KS GÖ	19,1	13,68	9,6	27,9	21,15	22,09	11,3	8,64	6,42	27,7	20,43	14,78
	KS SH	20,5	18,23	16,95	21,6	16,92	13,65	16,3	12,69	9,56	26,5	21,78	17,4
560	CaHPO <sub>4</sub>	-	-	-	-	--	-	-	-	-	-	-	-
	KS GÖ	21,4	16,20	12,5	29,4	25,74	28,5	14,0	10,13	7,31	29,9	23,04	17,38
	KS SH	22,8	19,26	16,49	28,6	18,81	15,2	19,9	15,30	12,4	29,9	22,86	17,74

**Tabelle 8.12:** Relativerträge an Maistrockenmasse je Gefäß

Böden	P- Düngungsvarianten (mg P kg <sup>-1</sup> Boden)											
	Kontrolle		CaHPO <sub>4</sub>			KS Gö			KS Sh			GD 5%
	0		44	87	187	44	87	187	44	87	187	
	g TM	rel.	rel.	rel.	rel.	rel.	rel.	rel.	rel.	rel.	rel.	
Quarzsand	-	-	100	100	100	30	28	26	15	25	37	18
Elliehausen	29,9	100	217	300	471	137	186	276	171	250	450	45
Rehburg-Loccum	90,5	100	134	149	157	125	152	171	112	148	149	60
Düshorn (Brache)	116,6	100	-	-	117	-	-	138	-	-	130	15
Börry P- 0	149,6	100	-	-	141	-	-	121	-	-	122	13
Börry P- 80	231,3	100	-	-	110	-	-	112	-	-	107	15

**Tabelle 8.13:** Relative P- Entzüge des Mais je Gefäß

Böden	P- Düngungsvarianten (mg P kg <sup>-1</sup> Boden)											
	Kontrolle		CaHPO <sub>4</sub>			KS Gö			KS Sh			GD 5%
	0		44	87	187	44	87	187	44	87	187	
	g TM	rel.	rel.	rel.	rel.	rel.	rel.	rel.	rel.	rel.	rel.	
Quarzsand	-	-	100	100	100	30	32	25	20	36	37	36
Elliehausen	21,6	100	181	220	375	140	167	239	160	230	380	48
Rehburg-Loccum	100,5	100	114	107	119	110	121	131	111	111	131	27
Düshorn (Brache)	116,5	100	-	-	114	-	-	111	-	-	123	22
Börry P- 0	105,1	100	-	-	163	-	-	133	-	-	168	21
Börry P- 80	240,8	100	-	-	127	-	-	99	-	-	111	18

**Tabelle 8.14:** Analysendaten zu den 13 Klärschlämmen (Gehalte in der TM), nach LUFA-Hameln

Parameter		KS 1	KS 2	KS 3	KS 4	KS 5	KS 6	KS 7	KS 8	KS 9	KS 10	KS 11	KS 12	KS 13
Org.	%	45,3	38,2	35,3	38,4	50,8	38,3	27,3	30,6	62	44,8	71,1	27,7	67,8
Substanz														
N <sub>ges.</sub>	kg/t	26,3	22,2	22,1	18,2	34,8	17,2	23,1	14,8	34,7	23,9	51,6	24	53,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	kg/t	20,1	26	27,7	45	78,4	55,9	31,6	32	88,6	68,9	65,5	34,8	72,1
K <sub>2</sub> O	kg/t	1,12	1,95	2,41	1,49	1,90	2,66	2,12	3,46	2,27	1,75	10,3	3,39	16,5
CaO	kg/t	235	271	320	249	58,6	222	338	314	64,7	218	35,3	390	48,2
MgO	kg/t	3,59	6,78	8,44	9,87	5,11	9,28	4,44	10,4	6,2	8	6,31	6	10,7
Bas. wirk.	kg/t	195	242	284	207	51,5	201	319	272	34,1	180	19	343	24,8
CaO														
Fe	kg/t	65,1	61,8	53,1	55,8	79	54,3	27,5	26,4	54,6	42,1	37,7	10,7	7,0
Al	kg/t	68,1	7,9	12,4	11,8	18,6	17,6	11,9	16,7	15,7	15,7	19	7,8	21,5

KS = Klärschlämme, siehe Tab. 20 Seite 59

**Tabelle 8.15:** Mengen an gefriergetrocknetem Klärschlamm, die bei einer Applikation von ca. 30 mg P kg<sup>-1</sup> Boden in die Gefäße eingearbeitet wurden sowie die je kg Boden eingesetzten Fe- und CaO- Mengen

Klärwerk /Boden	Nr.	g KS / kg Boden	mg Fe / kg Boden	g CaO / kg Boden
Dollbergen	1	3,4	221,2	0,80
Göttingen	2	2,64	163,2	0,72
Gronau	3	2,48	131,7	0,80
Hameln	4	1,52	84,8	0,38
Einbeck	5	0,87	68,8	0,05
Herzberg	6	1,22	66,3	0,27
Gütersloh	7	2,17	59,7	0,73
Northeim	8	2,13	56,3	0,67
Uelzen	9	0,78	42,6	0,05
Osterode	10	1,00	42,1	0,22
Salzhausen	11	1,05	39,6	0,04
Ütze	12	1,97	21,1	0,77
Schöppenstedt	13	0,95	6,7	0,05
hohe Fe- Gabe			735	---
niedrige Fe- Gabe			235	---
hohe CaO- Gabe			---	484
niedrige CaO- Gabe			---	161
hohe Fe + hohe CaO- Gabe			735	484

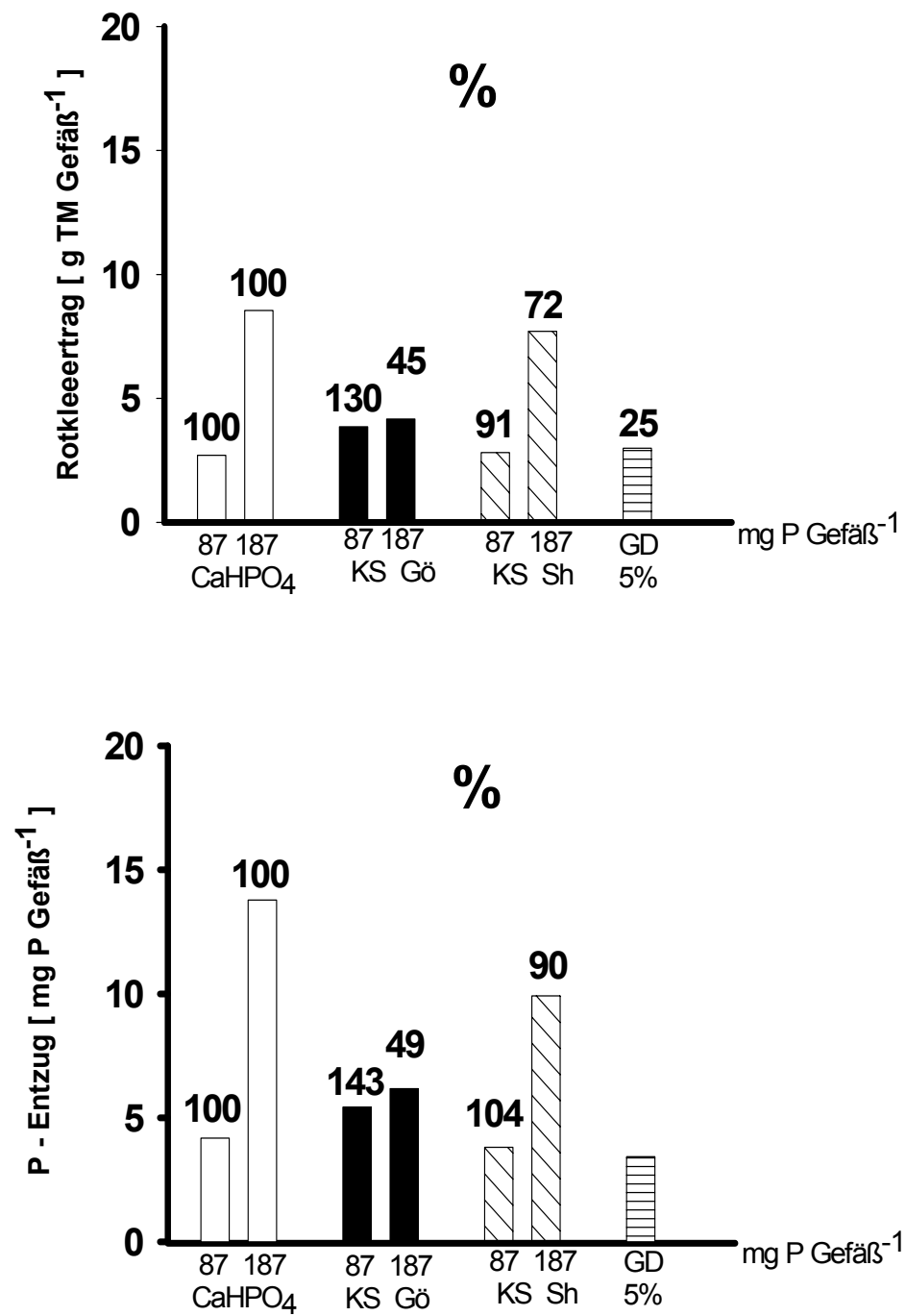
**Tabelle 8.16:** Absolute und relative Trockenmasseerträge und P- Entzüge von Mais in Abhängigkeit von der P-Quelle auf dem Leimboden (Moschtohor)

Variante	TM- Ertrag g / Gefäß	rel. %	P- Entzug mg / Gefäß	rel. %
K 0	16,34	100	24,12	100
Triple-P	19,19	117	37,25	154
KS- Dollbergen	16,43	101	27,83	115
KS- Göttingen	15,71	96	24,81	103
KS- Osterode	17,78	109	28,95	120
<b>KS Ø</b>	<b>16,64</b>	<b>102</b>	<b>27,20</b>	<b>113</b>
GD <sub>5%</sub> (Tukey)	3,01	18,4	4,69	19,44

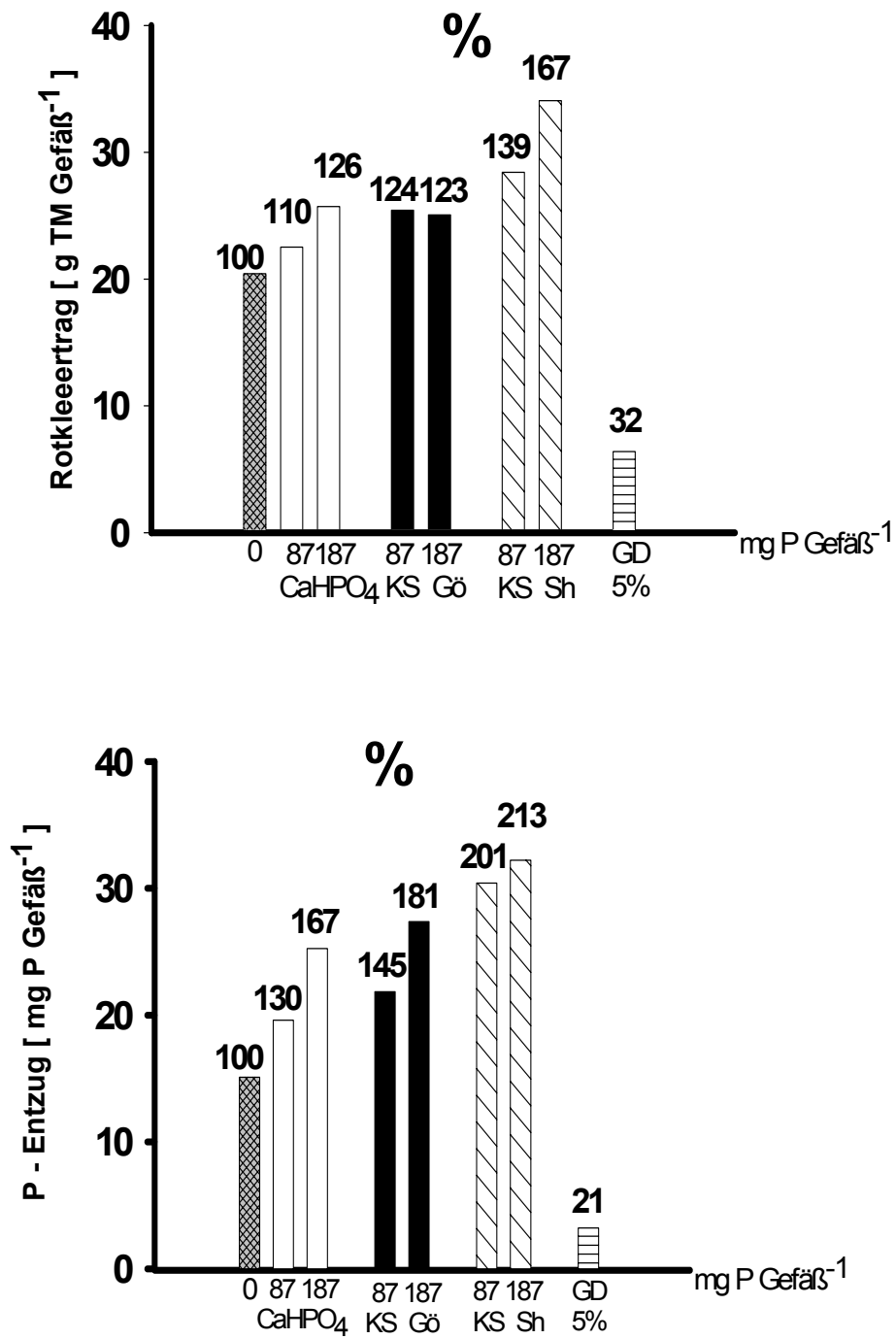
**Tabelle 8.17:** Absolute und relative Trockenmasseerträge und P- Entzüge von Mais in Abhängigkeit von der P-Quelle auf dem Sandboden (Meetkenana)

Variante	TM- Ertrag g / Gefäß	rel. %	P- Entzug mg / Gefäß	rel. %
K 0	5,48	100	8,51	100
Triple-P	5,54	101	10,99	129
KS- Dollbergen	5,20	95	8,52	100
KS- Göttingen	5,26	96	9,55	112
KS- Osterode	5,93	108	12,94	152
<b>KS Ø</b>	<b>5,46</b>	<b>100</b>	<b>10,34</b>	<b>121</b>
GD <sub>5%</sub> (Tukey)	2,31	42,15	4,13	48,53

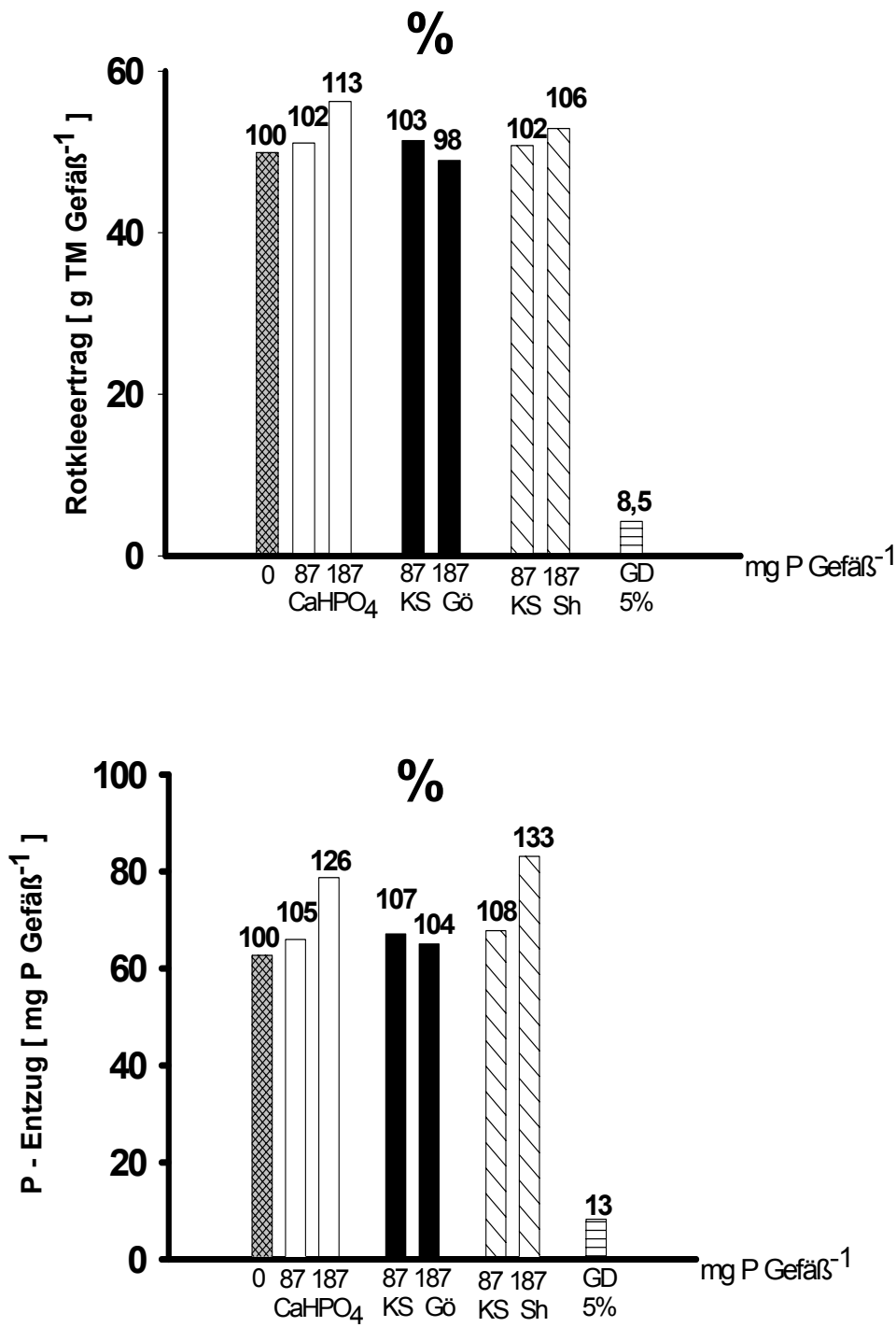




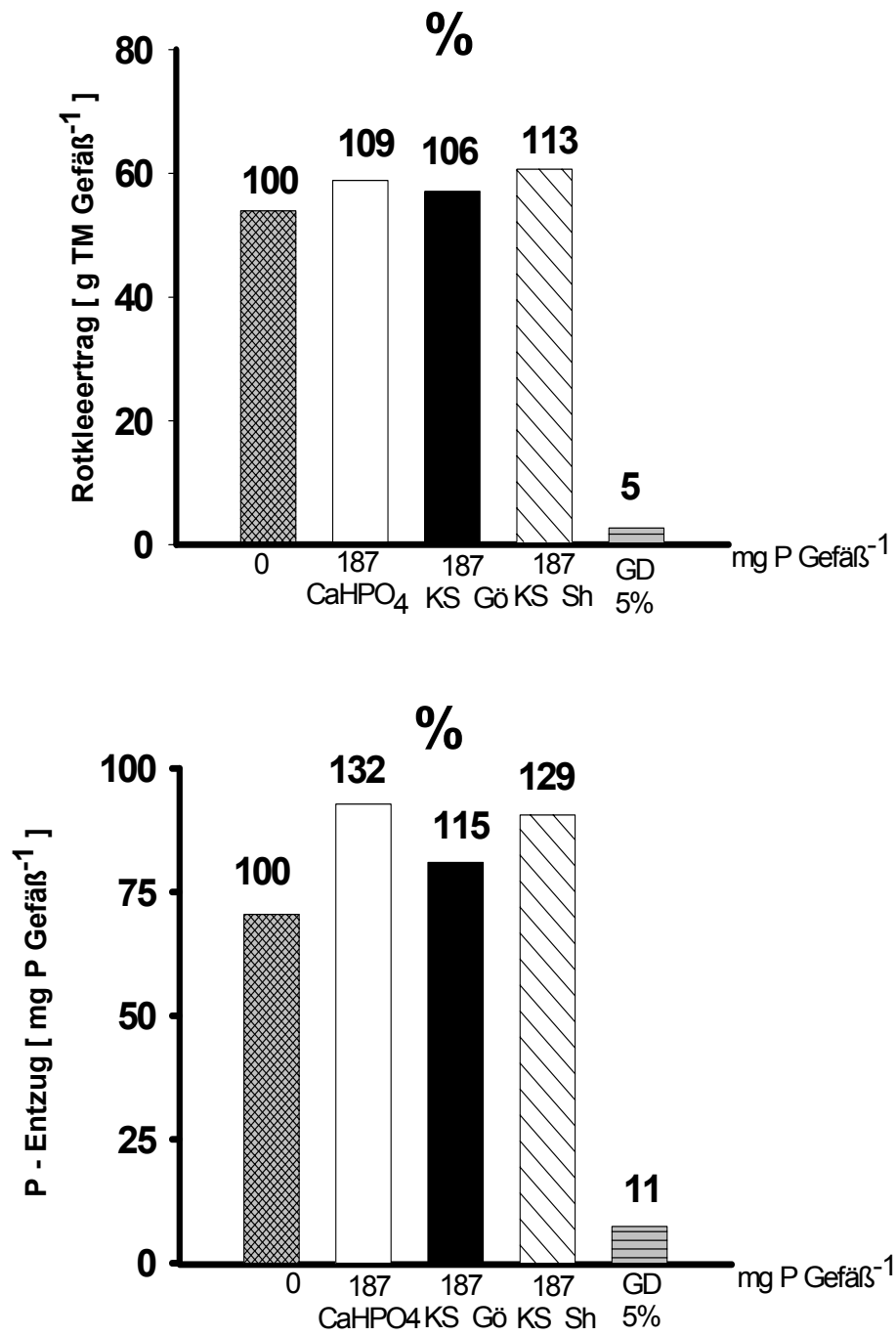
**Abb.8.1:** Abhängigkeit des Rotkleeertrages und des P - Entzuges von der P - Applikation zum Quarzsand



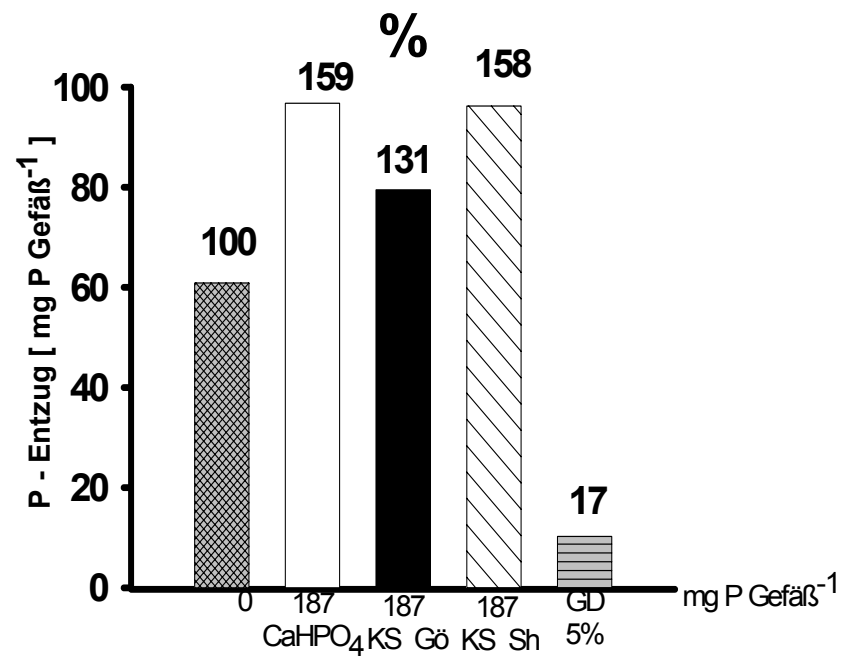
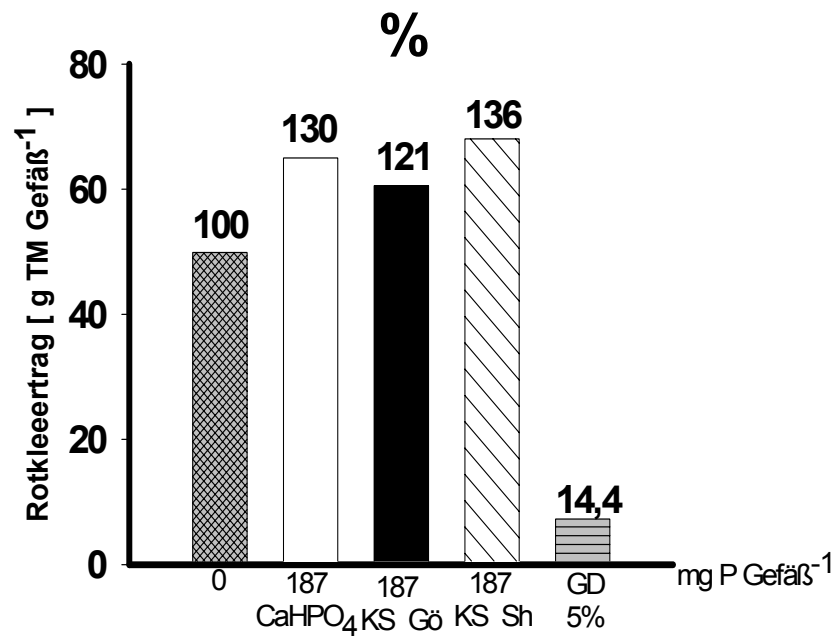
**Abbildung 8.2:** Abhängigkeit des Rotkleeertrages und des P-Entzuges von der P-Applikation zum Boden Elliehausen



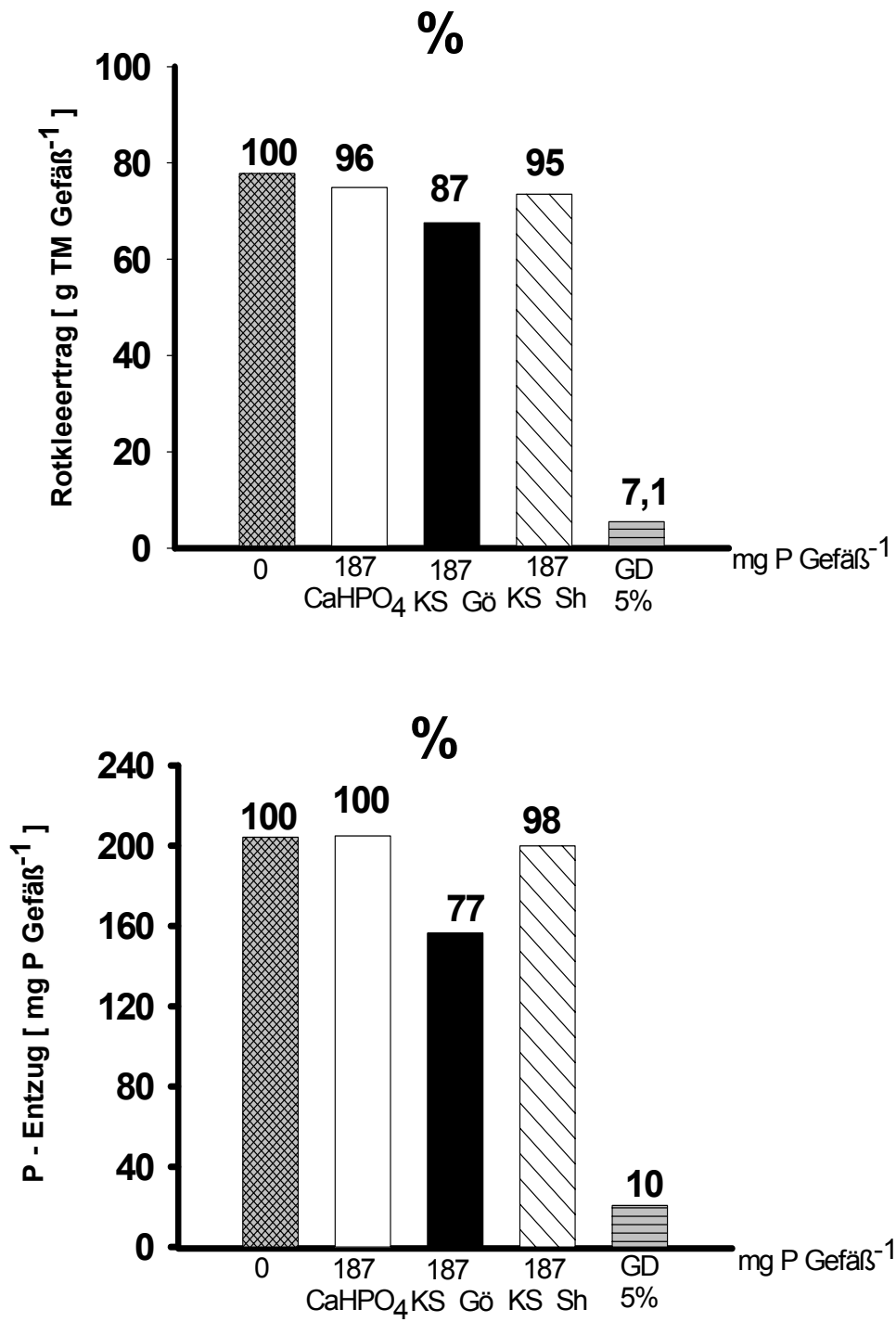
**Abbildung 8.3:** Abhängigkeit des Rotkleeertrages und des P - Entzuges von der P - Applikation zum Boden Rehburg - Loccum



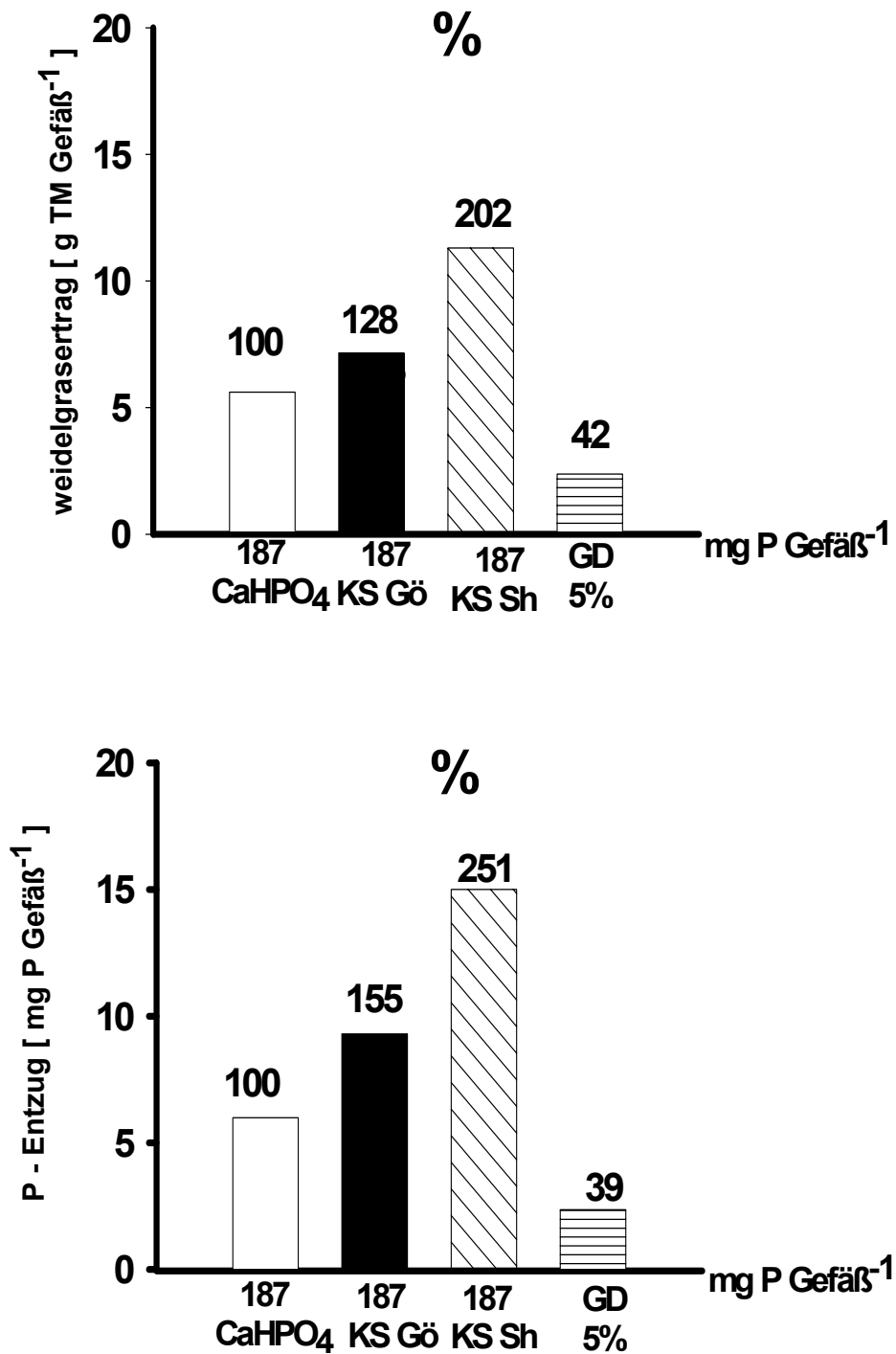
**Abb.8.4:** Abhängigkeit des Rotkleeertrages und des P - Entzuges von der P - Applikation zum Boden Düshorn (Brache)



**Abbildung 8.5:** Abhängigkeit des Rotkleeertrages und des P - Entzuges von der P - Applikation zum Boden Börry P - 0



**Abbildung 8.6:** Abhängigkeit des Rotkleeertrages und des P - Entzuges von der P - Applikation zum Boden Börry P - 80



**Abb.8. 7:** Abhängigkeit des Weidelgrasertrages und des P - Entzuges von der P - Applikation zum Quarzsand

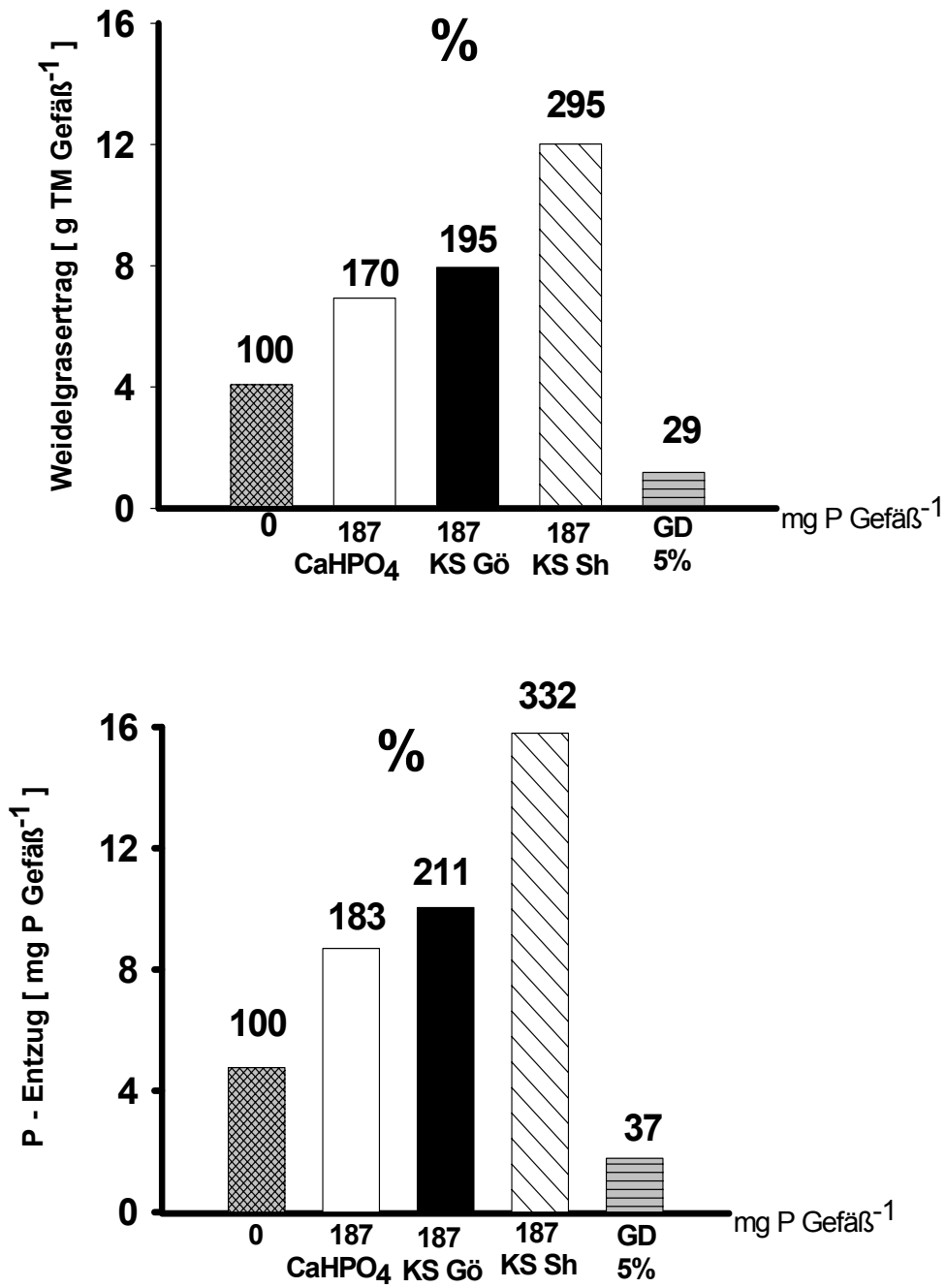


Abbildung 8.8: Abhängigkeit des Weidelgrasertrages und des P-Entzuges von der P-Applikation zum Boden Elliehausen



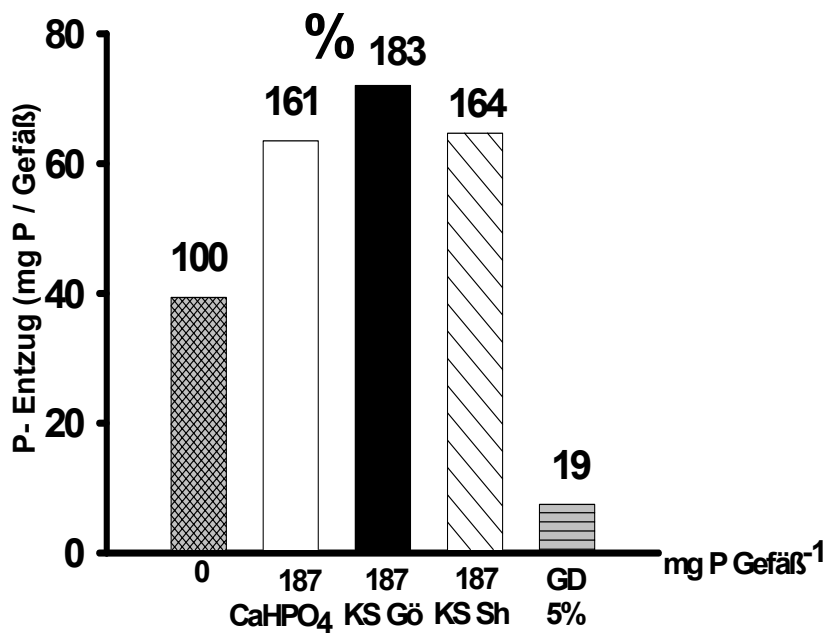
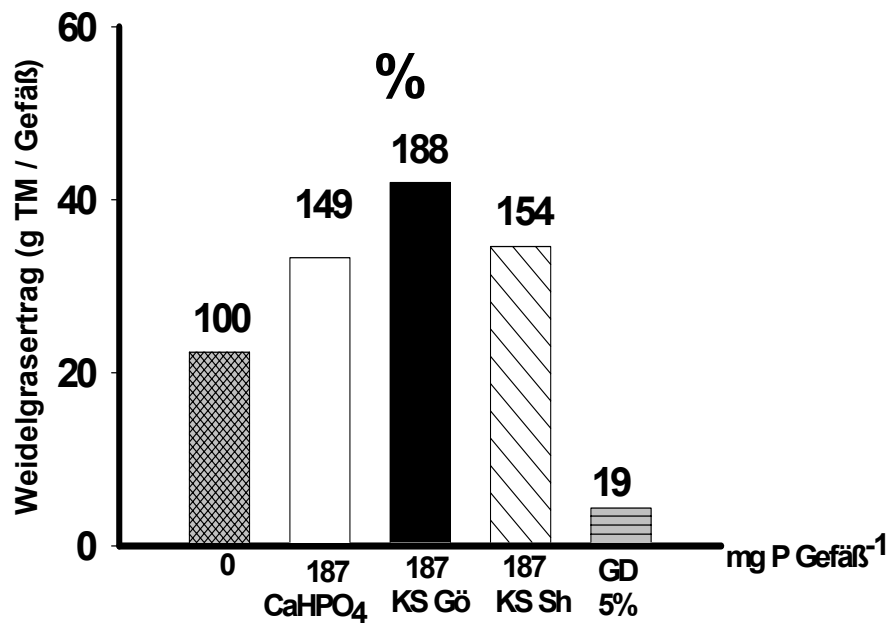
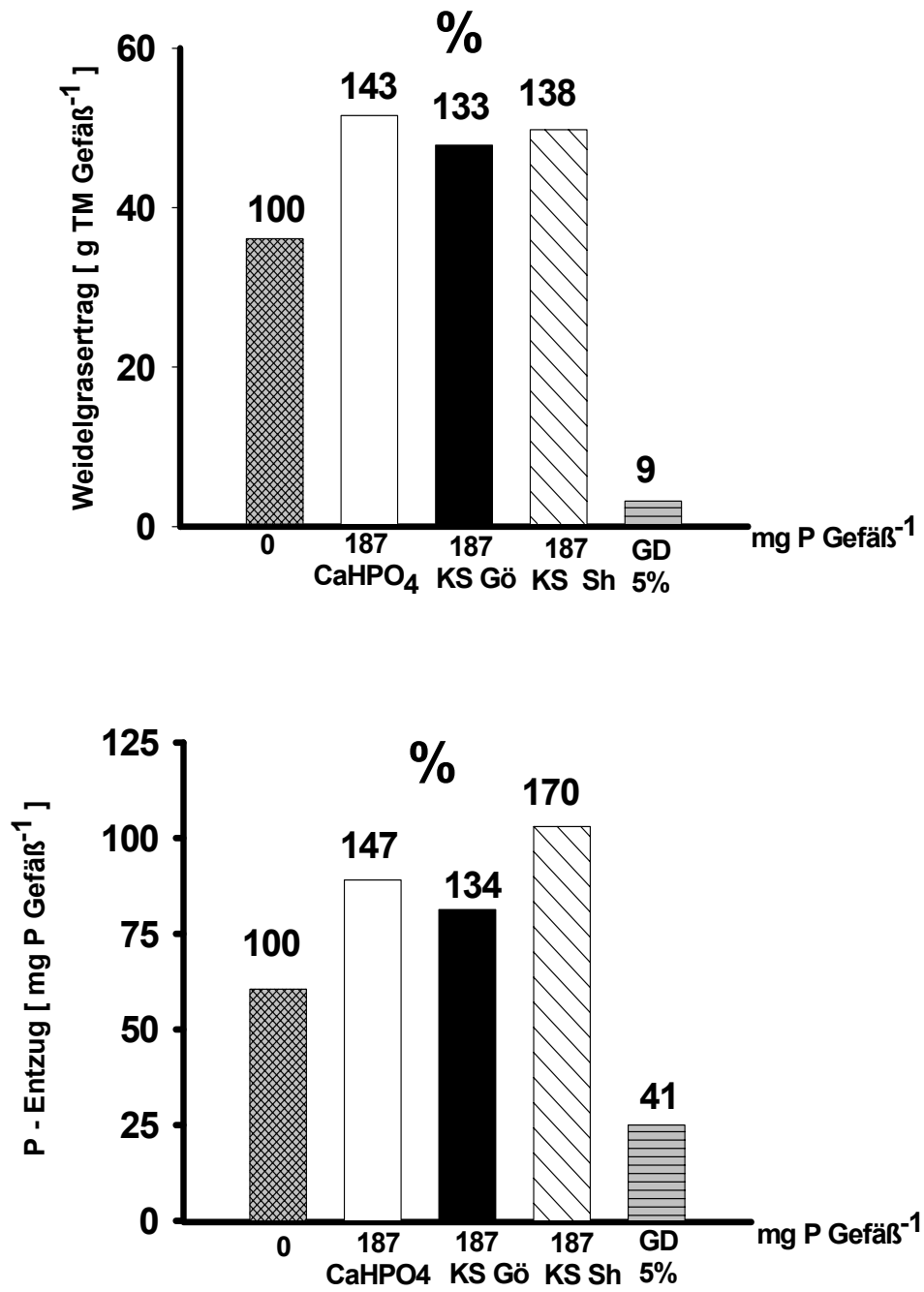
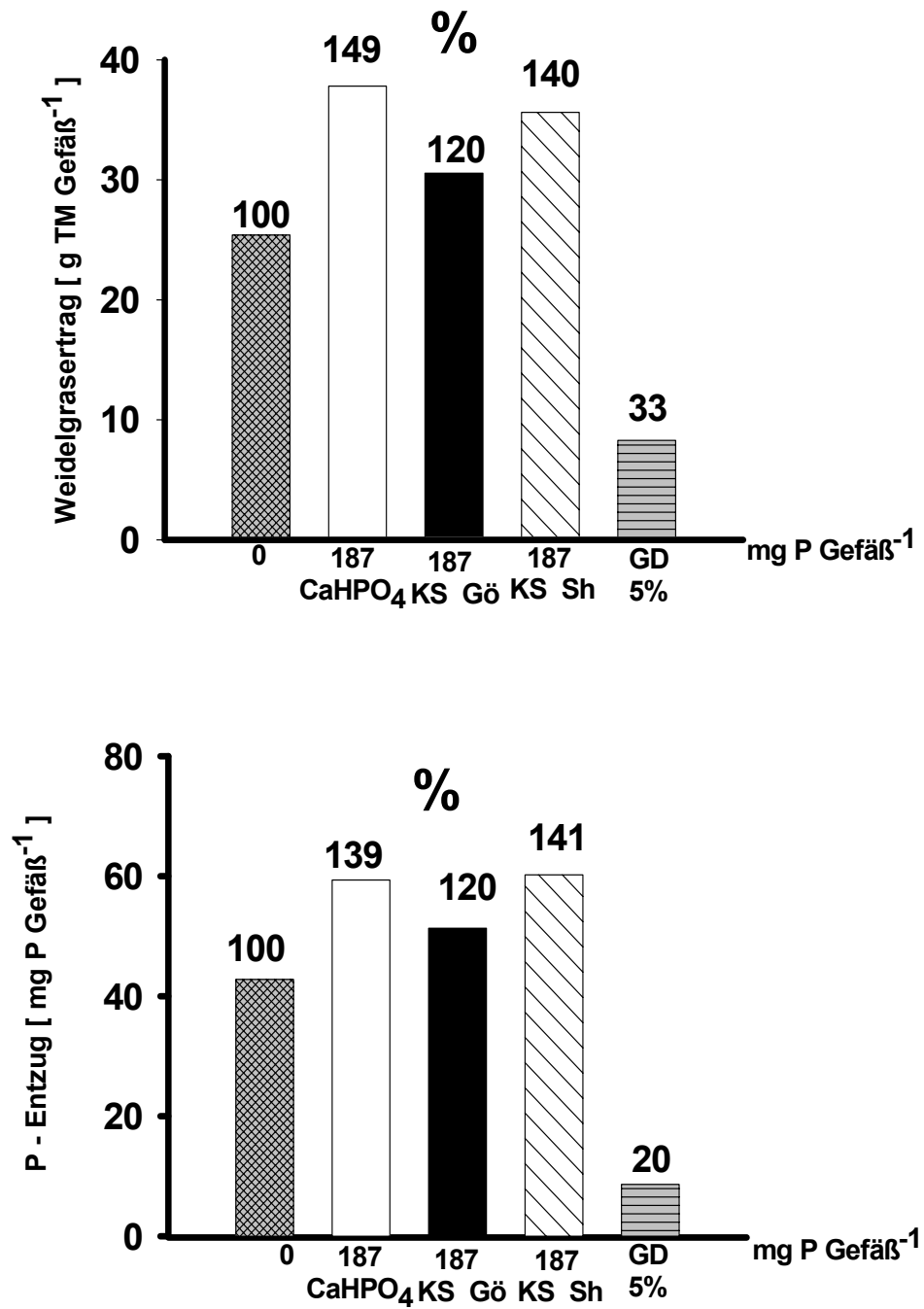


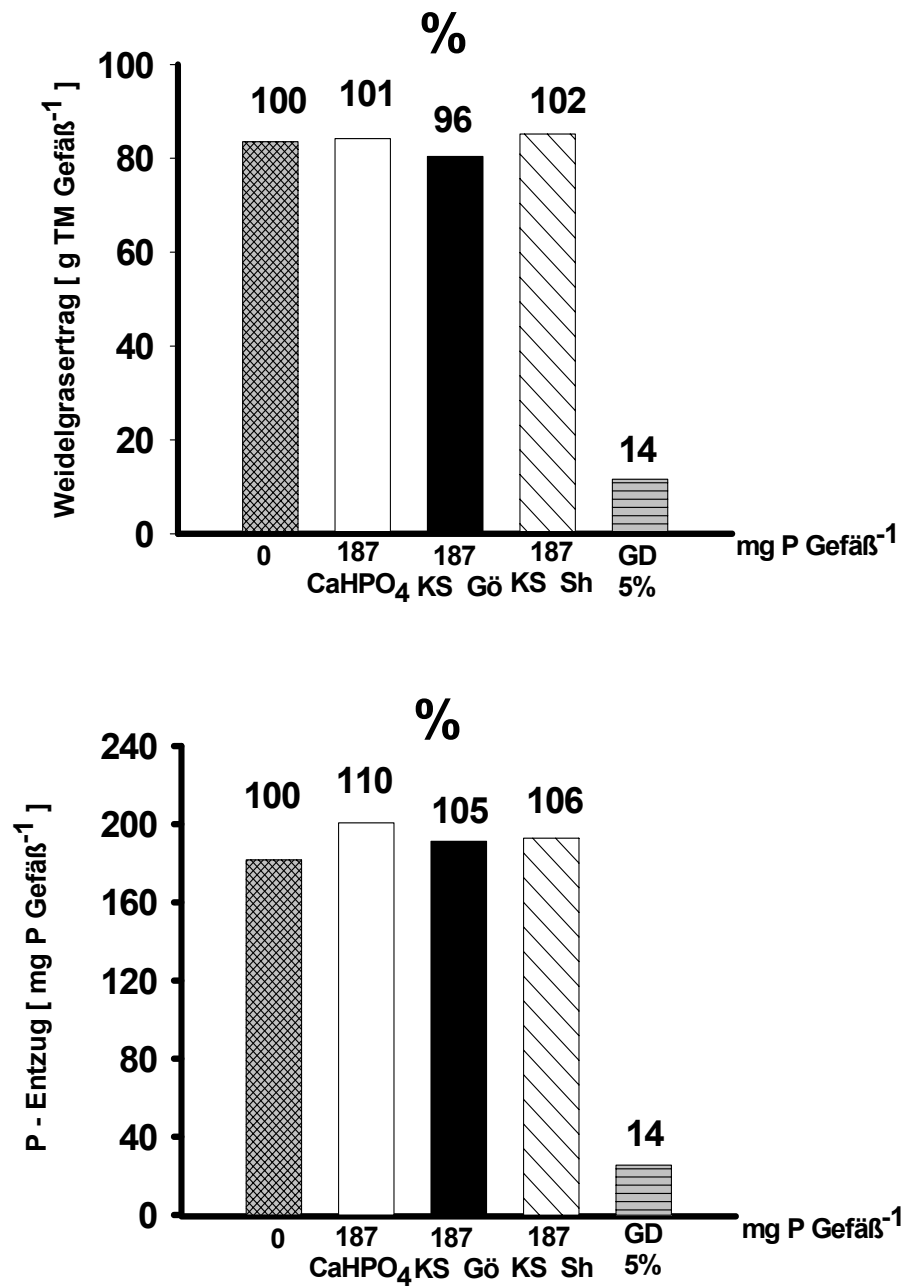
Abbildung 8.9: Abhängigkeit des Weidelgrasertrages und des P-Entzuges von der P-Applikation zum Boden Rehburg-Loccum



**Abbildung 8.10:** Abhängigkeit des Weidelgrasertrages und des P - Entzuges von der P - Applikation zum Boden Düshorn (Brache)



**Abbildung 8.11:** Abhängigkeit des Weidelgrasertrages und des P - Entzuges von der P - Applikation zum Boden Börry P - 0



**Abbildung 8.12:** Abhängigkeit des Weidelgrasertrages und des P - Entzuges von der P - Applikation zum Boden Börry P - 80

## Danksagung

Mein Dank gilt vor allem Herrn Prof. Dr. W. Römer, der sich als eine nie versiegende Quelle an nützlichen Informationen erwiesen und immer viel Geduld für mich aufgebracht hat. Mein herzlicher Dank gilt dem entgegengebrachten Vertrauen und der Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit. Ohne seine väterliche Betreuung wäre diese Arbeit erfolglos geblieben.

Ferner danke ich Herrn Prof. Dr. B. Meyer für die Abnahme der mündlichen Prüfung (Februar 2000) und die freundliche Übernahme des Korreferates.

Insbesondere Frau B. Eichenberg und Frau S. Koch sowie Frau M. Niebuhr und den Technikern Herrn E. Schreiber, H. Schröder, J. Kobbe, H.-D. Vohrmann und Herrn R. Hilmer möchte ich für die tatkräftige Mitarbeit bei zahlreichen Versuchen, vom Ansetzen von Gefäßen bis hin zur Durchführung von Analysen und Anfertigung von Postern, ganz herzlich danken.

Unserer Sekretärin Frau M. Noltkämper möchte ich für ihre Hilfe im Laufe meiner Promotion ganz herzlich danken.

Bei allen Professorinnen und Professoren, Mitarbeitern und Kollegen des Institutes für Agrikulturchemie möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit in den letzten Jahren ganz herzlich bedanken.

Die Arbeiten wurden durch die Niedersächsische Umweltstiftung und durch das Niedersächsische Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten gefördert.

Für die finanzielle Unterstützung danke ich der ägyptische Regierung im Laufe meiner Promotion in Deutschland aufrichtig.

Bei allen Professorinnen und Professoren, Kollegen und Mitarbeitern an der Landwirtschaftlichen Fakultät in Moschtohor der Universität Zagazig / Banha, besonders der Abteilung Bodenkunde, möchte ich mich für das entgegengebrachte Vertrauen und die Unterstützung während meines Studiums an der Fakultät bedanken.

Viel mehr als sich mit Worten sagen lässt, gilt letztlich mein herzlicher Dank meiner lieben Frau Hanan Fadlalla und meiner lieben Tochter Jasmine. Sie haben mich mit viel Liebe und Geduld durch alle Motivationstiefs begleitet und mir während meines Forschungsstudiums viel Freude geschenkt.

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name: Abd El - Samie  
Vorname: Ihab Mohamed Farid  
Geburtsdatum: 17.05.1968  
Geburtsort: Kairo, Ägypten  
Familienstand: Verheiratet, 3 Kinder  
Staatsangehörigkeit: Arabische Republik Ägypten

## Schulbildung

1974 – 1979 Grundschule in Kairo, Ägypten  
1979 – 1982 Mittelschule in Kairo, Ägypten  
1982 – 1985 Gymnasium in Kairo, Abschluß mit Abitur, Kairo, Ägypten

## Hochschulausbildung

1985 – 1987 Studium am Institut für Technische Chemie, Kairo, Ägypten  
1987 – 1990 Studium an der Landwirtschaftlichen Fakultät in Moschtohor der Universität Zagazig / Banha, Abschluß: B.Sc. im Fachbereich Bodenkunde  
1991 – 1995 Magister an der Landwirtschaftlichen Fakultät in Moschtohor der Universität Zagazig / Banha, Abschluß: M.Sc. im Fachbereich Bodenkunde und Pflanzenernährung  
1995 – 1997 Doktorand an der Landwirtschaftlichen Fakultät in Moschtohor der Universität Zagazig / Banha  
1998 – 2002 Stipendiat der ägyptischen Regierung und Doktorand mit dem Ziel der Promotion am Institut für Agrikulturchemie der Georg-August-Universität Göttingen

## Bisherige Tätigkeiten

1990 – 1994 Forschungsstudent an der Landwirtschaftlichen Fakultät in Moschtohor der Universität Zagazig / Banha, in der Abteilung Bodenkunde.  
1994 – 1995 Assistent an der Landwirtschaftlichen Fakultät in Moschtohor der Universität Zagazig / Banha, in der Abteilung Bodenkunde.  
ab 1995 Assistentslehrer an der Landwirtschaftlichen Fakultät in Moschtohor der Universität Zagazig / Banha, in der Abteilung Bodenkunde.  
1998 – 2002 Doktorand am Institut für Agrikulturchemie der Georg-August-Universität Göttingen

## PUBLIKATIONEN

### Geleistete Öffentlichkeitsarbeit

1. W. Römer und I. F. Samie (2000): „Einfluss eisenhaltiger Klärschlämme auf Kenngrößen der P-Verfügbarkeit von Lehm- und Sandböden“. 112. VDLUFA-Kongress in Stuttgart-Hohenheim, 2000, 219-226.
2. Wilhelm Römer und Ihab F. Samie (2001): Einfluss eisenhaltiger Klärschlämme auf Kenngrößen der P-Verfügbarkeit in Ackerböden Zeitschrift „Bodenkunde und Pflanzenernährung. 164, 321-328.
3. Ihab F. Samie und Wilhelm Römer (2001): Poster „Phosphorus availability to maize plants from sewage sludge treated with Fe compounds“ auf dem Greidinger Symposium in Lissabon, organisiert von 'The International Fertiliser Society', März 2001, 531- 534.
4. Ihab F. Samie und Wilhelm Römer (2001):Poster „Phosphorus availability to maize plants from sewage sludge treated with Fe compounds“ auf dem XIV. International Plant Nutrition Colloquium in Hannover, 2001 (vgl.; In :W. J. Horst et al.: Plant Nutrition – Food security and sustainability of agro-ecosystems, 846-847, 2001).
5. Vortrag auf der Tagung am 3. International Symposium – cum – Workshop in Kairo zum Thema „Phosphorus availability to maize plants from sewage sludge treated with Fe compounds“.Kairo, Ägypten im Sept. 2001.
6. Wilhelm Römer und Ihab F. Samie (2002): „Phosphordüngewirkung eisenhaltiger Klärschlämme“ Zeitschrift „Bodenkunde und Pflanzenernährung. 165, 83-91.
7. Wilhelm Römer und Ihab F. Samie (2002): „Eisenreiche Klärschlämme sind für das P-Recycling im Ackerbau ungeeignet“ Zeitschrift „Wasser und Boden. 54/6, 28-32.
8. Wilhelm Römer, Ihab F. Samie, Matthias Neubert und Detlef Merkel (2003): „P-Düngewirkung von 13 Klärschlämmen mit unterschiedlichen Eisengehalten.“ KA Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall; angenommen Dez. 2002.
9. W. Römer, I. F. Samie, M. Neubert und D. Merkel (2002): Poster „P-Düngewirkung von 13 eisenhaltigen Klärschlämmen“ 114. VDLUFA-Kongress in Leipzig, (Sept. 2002), Text auf CD.

### **Three Abstracts**

#### **Influence of iron content in sewage sludges on parameters of phosphate availability in arable soils**

Wilhelm Römer und Ihab F. Samie

(J. Plant Nutr. Soil Sci. (2001), 164, 321-328)

#### **Abstract**

The use of iron salts for the P elimination in purification plants is widely used. But it is not clear whether the P availability in arable soils is negatively influenced by iron compounds or not. Therefore the aim of the investigations was to study the influence of two sewage sludges with a high and a low Fe content respectively on P sorption and phosphate concentration ( $P_i$ ) in the soil solution after application of  $\text{CaHPO}_4$  or sewage sludge to 5 loamy and 4 sandy soils (pot experiments and 1 silty loam (field experiment)). Soils were analysed 1, 6 and 13 months after P application. Sludge Gö contained 12 kg P and 65 kg  $\text{Fe t}^{-1}$  DM (P : Fe = 1 : 5,4) and sludge Sh 25 kg P and 39 kg  $\text{Fe t}^{-1}$  DM (P : Fe = 1 : 1,5). The basic P application was 60 kg P  $\text{ha}^{-1}$  (= 30 mg P  $\text{kg}^{-1}$  soil in the pot experiment, as sludge or as  $\text{CaHPO}_4$ ). P uptake by maize was determined in a separate pot experiment with a loamy soil and the same P application rate.

The P sorption capacity remained similar in all soils after application of sludge Sh (P : Fe = 1:1,5) compared with soils without sludge, however, after application of sludge Gö the P sorption increased to 16 % (0-59 %). After application of sludge Sh the mean  $P_i$  concentration increased in loamy soils to 34 % and in sandy soils to 15 %. On the other hand the  $P_i$  concentration decreased after applying sludge Gö to 13 % and 36 % as compared to the controls of the respective soils. In the field experiment the  $P_i$  concentration of plots with a high P level (50 mg lactate soluble P  $\text{kg}^{-1}$  soil) was also significantly decreased after application of 10 t sludge Gö (126 kg P  $\text{ha}^{-1}$ ) in comparison with triple phosphate. One month after the application of increasing amounts of sludge Gö (5, 10, 15 t DM  $\text{ha}^{-1}$ ) both the concentration of oxalate-soluble Fe in the soil and the P sorption were increased. The elevated relationship between these two parameters was highly significant ( $r^2 = 0.6 - 0.97$ ). Plant uptake of P was less after application of sludge Gö than after application of sludge Sh and much less than P uptake from  $\text{CaHPO}_4$ . Sewage sludges with a P : Fe ratio of 1 : 5 should not be recommended for agricultural use, as the P availability is significantly reduced. Iron salts should not be used for conditioning of sludges.



## **Phosphorus fertilization effects of sewage sludges treated with iron compounds.**

Wilhelm Römer und Ihab F. Samie

(J. Plant Nutr. Soil Sci. (2002), 165, 83-91)

### **Abstract**

The result of waste water treatment with iron salts are sewage sludges with higher P but also Fe contents. The effect of such sludges on P availability in soils is not clear and was, therefore, compared with  $\text{CaHPO}_4$  as a P mineral fertilizer. In experiments (Mitscherlich pots, 6 kg soil) two sandy soils (pH 4.3 and 4.9), two luvisols (pH 6.3 and 7.2), a loess (13 %  $\text{CaCO}_3$ ) and quartz sand all differing in their P status were treated with two sewage sludges which differed in their molar Fe:P ratios (sludge Gö: 1:0.3, sludge Sh: 1:1.2). For sludge Gö the P elimination had been carried out with  $\text{FeSO}_4$  and the sludge was stabilized with  $\text{FeCl}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2$  (filter press). For sludge Sh P was eliminated by  $\text{FeCl}_3$  in the aerobic basin.

The first crop was maize (total shoot dry matter), the second red clover. In case of sludge Sh both crops took up in comparison to  $\text{CaHPO}_4$  the same amount of P from all substrates with the exception of quartz sand. The effect of sludge Gö was quite different: from the neutral luvisol soils maize was able to take up only 64-82 % P and red clover 77-82 % P only as compared to  $\text{CaHPO}_4$ . On the sandy soils maize and red clover grew after sludge Gö as good or better than after  $\text{CaHPO}_4$  application and P uptake was quite similar (83-106 %). This result was concomitant to an increase of pH values (from 4.3 to 4.9, 4.9 to 5.6, respectively). The negative efficiency of P uptake in heavy soils after sludge Gö application resulted from an increase of P sorption and decrease of orthophosphate concentration in soil solution. This sludge contains high proportion of iron hydroxides / oxides with free sorption sites for P. In future P elimination from waste water should be done without iron salts. At least during the process of conditioning no Fe salts should be used.

## **Phosphate fertilization effects of 13 sewage sludges from purification plants with P precipitation by iron salts**

W. Römer, I.F. Samie, M. Neubert, D. Merkel

(KA, Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall, accepted for printing, 2003)

### **Abstract**

In Germany, 500.000 t of iron salts are annually used to precipitate P in purification plants. The sewage sludge (SS) is used as a fertilizer. However, it can be assumed that the iron compounds of the SS may negatively influence the P availability in soils. Therefore, the P fertilization effect of 13 SS with different Fe : P ratios (from 7.4 : 1 to 0.2 : 1) was tested in comparison to triple superphosphate (TSP) in an experiment with rye grass grown on a humic sandy soil moderate in P supply. TSP increased P removal by plants to 149% of the unfertilized control, whereas the removal in the SS treatments ranged from 107 to 149% (average 136%). Phosphate uptake of the grass was negatively correlated with P sorption in the soil ( $r = -0.57^*$ ) and oxalate soluble Fe of soil ( $r = -0.66^{**}$ ), but positively correlated with orthophosphate concentration in soil solution ( $r = 0.82^{***}$ ). The P uptake was also negatively correlated with the Fe : P ratio of the SS ( $r = -0.93^{***}$ ) and was significantly lower than in the TSP treatment at Fe : P ratios higher than 1.4 : 1. These SS are not recommendable as P fertilizer.