

**Ertragswirksamkeit und Umsatz von apatitischen
Phosphatdüngemitteln im Vergleich zu vollaufgeschlossenen
Phosphatformen im Boden unter besonderer Berücksichtigung von
Standort- und pflanzenphysiologischen Faktoren**

**von
Dr. Diedrich Steffens
Institut für Pflanzenernährung der
Justus-Liebig-Universität Gießen**

**Habilitationsschrift
zur Erlangung der venia legendi**

**Eingereicht beim Fachbereich 17
- Agrarwissenschaften -
Justus-Liebig-Universität Gießen**

1992

1. Einleitung	1
1.1 Probleme der P-Düngung und der P-Form	1
1.2 Umsetzung von Rohphosphat im Boden	6
1.3 Ertragswirksamkeit	13
1.4 Problem- und Fragestellung	15
2. Material und Methoden	17
2.1 Feldversuche	17
2.2 Modell- und Gefäßversuche	20
2.2.1 Wirkung der Zeit auf die Löslichkeit von Hyper- und Superphosphat	20
2.2.2 Wirkung einer Erhaltungsdüngung mit Hyper- und Superphosphat auf das lösliche P-Niveau im Boden	21
2.2.3 Einfluß des pH-Werts und der wasserlös- lichen P-Konzentration im Boden auf die Löslichkeit von weicherdigem Rohphosphat	22
2.2.4 Einfluß des Bodengefüges auf das Wurzel- wachstum von Sommerweizen und die Verfüg- barkeit von Hyper- und Superphosphat	24
2.2.5 Einfluß der Bodenfeuchte auf das Wurzel- wachstum und die Verfügbarkeit von Hyper- und Superphosphat	25
2.2.6 Wirkung einer plazierten P-Düngung mit Hyper- und Superphosphat auf das Wurzel- wachstum und die P-Verfügbarkeit	27
2.2.7 Beziehung zwischen P-Konzentration und Wurzellänge (Wasserkulturversuch)	28
2.2.8 Wirkung langjähriger Anwendung von ver- schiedenen P-Düngemitteln im Feld (Nord- hessen) auf die P-Nachlieferung	31
2.2.8.1 Gefäßversuche zur Überprüfung der P-Nachlieferung	33

2.2.8.2 P-Kinetik (Flossmann und Richter)	34
2.2.8.3 P-Freisetzung mittels EUF und kinetische Modelle zur P-Dynamik im Boden	35
2.2.9 Rhizosphärenuntersuchungen	37
2.3 Analysen	38
2.3.1 Boden	38
2.3.2 Pflanzen	40
2.3.3 Umsatz von Rohphosphaten in der Schwer- mineralfraktion im Boden	41
3. Ergebnisse	44
3.1 Faktoren der Rohphosphatlöslichkeit im Boden	44
3.1.1 pH-Wert und P-Konzentration	44
3.1.2 Zeit (Inkubationsversuch)	46
3.1.3 Erhaltungsdüngung (Gefäßversuch)	51
3.2 Nachwirkung des im Boden durch verschiedene P-Formen angereicherten Phosphats	58
3.2.1 pH-Werte und die mit verschiedenen Methoden extrahierbaren P-Gehalte im Boden	58
3.2.2 P-Kinetik (Methode Flossmann und Richter)	63
3.2.3 Erträge und P-Aufnahme	69
3.3 Erfassung der P-Nachlieferung von langjährig durch verschiedene P-Formen angereicherten Phosphats mittels EUF-Mehrfachextraktion	75
3.3.1 Beziehung zwischen der P-Nachlieferung von langjährig durch verschiedene P-Formen angereicherten Phosphats und den Befunden der Bodenanalyse	88
3.4 Ergebnisse der Schwermineralanalyse	94
3.5 Bedeutung von Standortfaktoren für die Wirksam- keit von Rohphosphat unter besonderer Berück- sichtigung der Wurzelausbildung	104
3.5.1 Rhizosphäre	107
3.5.2 Plazierte P-Düngung	110
3.5.3 Bodengefüge	116
3.5.4 Bodenfeuchte	121

3.6 Feldversuche	130
3.6.1 Standort Ginsheim	130
3.6.2 Standort Gießen	141
4. Diskussion	151
4.1 Kinetik der P-Freisetzung des im Boden durch verschiedene P-Formen angereicherten Phosphats	151
4.2 Bedeutung von Standort- und pflanzenphysio- logischen Faktoren für die Ertragswirksamkeit von weicherdigem Rohphosphat	165
4.3 Abschließende Betrachtung	181
5. Zusammenfassung	184
6. Literatur	187
7. Anhang	200

Verzeichnis der Abbildungen

Seite

Abb. I:	Wirkung einer gestaffelten P-Düngung mit verschiedenen Rohphosphaten auf die Sproßmasse von Mais. Boden-pH: 4,8	5
Abb. II:	Relative Wirksamkeit von North Carolina Rohphosphat (300 mg P Gefäß ⁻¹) auf die Maiserträge in Abhängigkeit einer SrCO ₃ - und CaCO ₃ -Düngung (Superphosphat = 100%) (nach Khasawneh und Doll, 1978)	
Abb. 1:	Schematischer Versuchsaufbau zur Beschreibung der Versuchsvarianten des P-Aufnahmevermögens	29
Abb. 2:	Beziehung zwischen der von Maiswurzeln adsorbierten Tuschemenge und der gemessenen Wurzellänge	31
Abb. 3:	Einfluß des pH-Wertes auf die Wasserlöslichkeit des durch verschiedene P-Formen angereicherten Phosphats. Boden: Burguffeln	45
Abb. 4:	Einfluß gesteigerter Superphosphatgaben auf die Wasserlöslichkeit von Hyperphosphat (Boden "Pohlheim", pH 5,1)	46
Abb. 5:	Einfluß der Zeit und der P-Form auf die mit verschiedenen Methoden extrahierbaren P-Gehalte im Boden. Boden "Altenkirchen", pH 4,0	47
Abb. 6:	Einfluß der Zeit und der P-Form auf die mit verschiedenen Methoden extrahierbaren P-Gehalte im Boden. Boden "Buseck", pH 5,3	48
Abb. 7:	Einfluß der Zeit und der P-Form auf die mit verschiedenen Methoden extrahierbaren P-Gehalte im Boden. Boden "Lützellinden", pH 6,5	49
Abb. 8:	Einfluß der P-Düngung sowie einer Entzugsdüngung mit Hyper- und Superphosphat auf das CAL- und wasserlösliche Phosphat. Boden "Altenkirchen", pH 4,0	52
Abb. 9:	Einfluß der Düngung sowie einer Entzugsdüngung mit Hyper- und Superphosphat auf das CAL- und wasserlösliche Phosphat. Boden "Buseck", pH 5,3	53

Abb. 10:	Einfluß der P-Düngung sowie einer Entzugsdüngung mit Hyper- und Superphosphat auf das CAL- und wasserlösliche Phosphat. Boden "Lützellinden", pH 6,5	54
Abb. 11:	Einfluß einer P-Düngung (1984) sowie einer Entzugsdüngung (1985) mit Hyper- und Superphosphat auf die relative P-Aufnahme von L. perenne, Raps und Mais bei drei Böden (P-Aufnahme der P ₀ -Variante = 100%)	56
Abb. 12:	Einfluß einer P-Erhaltungsdüngung mit Hyper- und Superphosphat auf die relativen Trockenmassezuwächse von Raps und Mais (Erträge der P ₀ -Variante = 100%)	57
Abb. 13:	Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen im Feld auf die P-Konzentration bei wiederholter Wasserextraktion. Boden: Dissen	64
Abb. 14:	Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen im Feld auf die P-Konzentration bei wiederholter Wasserextraktion. Boden: Burguffeln	65
Abb. 15:	Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen im Feld auf die P-Konzentration bei wiederholter Wasserextraktion. Boden: Immenhausen "ohne Kalk"	66
Abb. 16:	Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen im Feld auf die P-Konzentration bei wiederholter Wasserextraktion. Boden: Immenhausen "mit Kalk"	67
Abb. 17:	Nachwirkung verschiedener im Feld gedüngter P-Formen auf die in vierjährigen Gefäßversuchen erzielten P-Entzüge. Boden: Dissen	72
Abb. 18:	Nachwirkung verschiedener P-Formen auf die in vierjährigen Gefäßversuchen erzielten P-Entzüge. Boden: Burguffeln	73
Abb. 19:	Nachwirkung verschiedener im Feld gedüngter P-Formen auf die in vierjährigen Gefäßversuchen erzielten P-Entzüge. Boden: Immenhausen	74
Abb. 20:	Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen im Feld auf die kumulative P-Freisetzung mittels EUP. Boden: Dissen	77

Abb. 21:	Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen im Feld auf die kumulative P-Freisetzung mittels EUF. Böden: Burguffeln	78
Abb. 22:	Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen im Feld auf die kumulative P-Freisetzung mittels EUF. Boden: Immenhausen "ohne Kalk"	79
Abb. 23:	Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen im Feld auf die kumulative P-Freisetzung mittels EUF. Boden: Immenhausen "mit Kalk"	80
Abb. 24:	Einfluß verschiedener im Feld gedüngter P-Formen auf die kumulative Ca^{2+} -Freisetzung mittels EUF. Boden: Dissen	81
Abb. 25:	Linearisierung der EUF-P Freisetzungskurven durch die Elovich-Funktion. Boden: Dissen	85
Abb. 26:	Linearisierung der EUF-P Freisetzungskurven mittels parabolischem Diffusionsgesetz. Boden: Dissen	86
Abb. 27:	Beziehung zwischen gemessener P-Nachlieferung im Gefäßversuch und der mit einer multiplen Regressionsanalyse geschätzten P-Nachlieferung	92
Abb. 28:	Röntgenbeugungsdiagramm von der Schwermineralfraktion von reinem Hyperphosphat (= blaue Linie) sowie das Spektrum eines Hydroxylapatits (= grüne Linie)	100
Abb. 29:	Röntgenbeugungsdiagramm von der Schwermineralfraktion des nicht mit Hyperphosphat gedüngten Bodens "Kleinlinden" (Pfeil kennzeichnet Apatit-Peak)	101
Abb. 30:	Röntgenbeugungsdiagramm von der Schwermineralfraktion des mit Hyperphosphat gedüngten Bodens "Kleinlinden"; $362,2 \text{ mg P kg}^{-1}$ (Pfeil kennzeichnet Apatit-Peak)	102
Abb. 31:	Röntgenbeugungsdiagramm von der Schwermineralfraktion des mit Hyperphosphat gedüngten Bodens "Kleinlinden"; 800 mg P kg^{-1} (Pfeil kennzeichnet Apatit-Peak)	103

Abb. 32:	Einfluß der Wurzellänge und der Zeit auf die Abnahme der P-Konzentration in einer Nährlösung bei Mais	106
Abb. 33:	Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen im Feld auf die wasserlösliche P-Konzentration in der Rhizosphäre von Raps (die waagerechten Linien entsprechen der P-Konzentration der jeweiligen Variante ohne Bewuchs). Boden: Burguffeln	108
Abb. 34:	Einfluß einer plazierten P-Düngung auf die Wurzelausbildung von Mais.	
	a) Kontrollvariante	113
	b) Hyperphosphatvariante	114
	c) Superphosphatvariante	115
Abb. 35:	Einfluß der P-Form und des Bodengefüges auf das CAL- und Wasser-lösliche Phosphat vor der Aussaat von Sommerweizen	117
Abb. 36:	Relative Ertragswirksamkeit von Hyper- und Superphosphat in Abhängigkeit des Bodengefüges auf die Kornerträge von Sommerweizen (P_0 = Feinaggregatgefüge = 100%)	120
Abb. 37:	Einfluß der Bodenfeuchte und der P-Form auf das CAL-lösliche Phosphat bei Sommergerste	122
Abb. 38:	Wirkung von P-Form und Bodenfeuchte auf den Kornertrag von Sommergerste (die absoluten Kornerträge sind in den Säulen als $g \text{ Gefäß}^{-1}$ angegeben)	126
Abb. 39:	Wirkung von P-Form und Bodenfeuchte auf den Kornertrag von Sommerweizen (die absoluten Kornerträge sind in den Säulen als $g \text{ Gefäß}^{-1}$ angegeben)	127
Abb. 40:	Einfluß der Bodenfeuchte auf die P-Diffusion aus Hyper- und Superphosphat während eines elftägigen Inkubationsversuches mit Anionenaustauscherharz. Boden "Gießen", pH 5,3	129
Abb. 41:	Wirkung gestaffelter P-Gaben mit Hyper- und Superphosphat auf den Zuckerrüben-ertrag (Zwischenernte vom 7.7.1987). Boden: Ginsheim	132

Abb. 42:	Einfluß von Hyper- und Superphosphat- düngung ($174,6 \text{ kg P ha}^{-1}$) auf die Wurzel- längendichte von Zuckerrüben. Unter- suchungstermin: 20.7.1987. Boden: Ginsheim	137
Abb. 43:	Pentaden-Niederschläge von Januar bis August in den Jahren 1986 und 1989 im Vergleich zum langjährigen Durchschnitt auf dem Standort Gießen	147
Abb. 44:	Verdunstung von Januar bis August in den Jahren 1986 bis 1989 im Vergleich zum langjährigen Durchschnitt auf dem Standort Gießen	148
Abb. 45:	Vorstellung über die P-Freisetzung aus Apatit in der EUF-Mittelzelle	156
Abb. 46:	Zwei Pflanzen mit gleicher potentieller Wachstumsrate mit kleiner (A) und großer (B) Wurzellänge	169
Abb. 47:	Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und der Kontaktfläche Wurzel - Bodenlösung	175

Verzeichnis der Tabellen

Seite

Tab. I:	Mögliche Substitutionen in der Struktur von Apatiten (nach Angaben von Nathan (1984))	3
Tab. II:	P-Aufnahme von Weidelgras (4 Aufwüchse) aus einem ^{33}P markierten Rohphosphat im Vergleich zu Superphosphat bei zwei P-armen Böden (P-Versorgung der Böden, $< 13 \text{ mg CAL-P kg}^{-1}$ Kleingefäßversuch mit $1,4 \text{ kg Boden}$, P-Düngung: $28,1 \text{ mg P kg}^{-1}$, nach Ressler und Werner, 1989)	8
Tab. 1:	Wichtige Kenndaten der Feldversuchstandorte vor Versuchsanlage	18
Tab. 2:	Versuchsvarianten der Feldversuche bei Versuchsbeginn	19
Tab. 3:	Kenndaten der in den Modell- und Gefäßversuchen verwendeten Versuchsböden	27
Tab. 4:	A) Versuchszeiträume, Varianten und P-Gaben der vergleichenden P-Formen-Versuche unter Feldbedingungen B) Boden- und Standorteigenschaften der vergleichenden P-Formen-Versuche vor Anlage der Feldversuche	32 32
Tab. 5:	Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen auf die pH-Werte, EUF-Ca und die mit verschiedenen Methoden extrahierbaren P-Mengen im Boden. Boden: Burguffeln	59
Tab. 6:	Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen auf die pH-Werte, EUF-Ca und die mit verschiedenen Methoden extrahierbaren P-Mengen im Boden. Boden: Dissen	60
Tab. 7:	Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen Formen auf die pH-Werte, EUF-Ca und die mit verschiedenen Methoden extrahierbaren P-Mengen im Boden. Boden: Immenhausen "ohne Kalk"	61
Tab. 8:	Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen auf die pH-Werte, EUF-Ca und die mit verschiedenen Methoden extrahierbaren P-Mengen im Boden. Boden: Immenhausen "mit Kalk"	62

Tab. 9:	Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen im Feld auf die Rate der P-Mobilität, berechnet nach Angaben von Flossmann und Richter (1982)	68
Tab. 10:	Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen auf die Kornerträge von Sommerroggen im vierten Jahr zur Überprüfung der P-Nachwirkung. Boden: Burguffeln	69
Tab. 11:	Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen auf die Kornerträge von Sommerroggen im vierten Jahr zur Überprüfung der P-Nachwirkung. Boden: Dissen	70
Tab. 12:	Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen auf die Kornerträge von Sommerroggen im vierten Jahr zur Überprüfung der P-Nachwirkung. Boden: Immenhausen	70
Tab. 13:	P-Freisetzungsrate b (mg P kg^{-1} Boden) und Bestimmtheitsmaße B (%) der mit verschiedenen Funktionen linearisierten EUF-Freisetzungskurven. Boden: Dissen	83
Tab. 14:	P-Freisetzungsrate b (mg P kg^{-1} Boden) und Bestimmtheitsmaße B (%) der mit verschiedenen Funktionen linearisierten EUF-Freisetzungskurven. Boden: Burguffeln	83
Tab. 15:	P-Freisetzungsrate b (mg P kg^{-1} Boden) und Bestimmtheitsmaße B (%) der mit verschiedenen Funktionen linearisierten EUF-Freisetzungskurven. Boden: Immenhausen "ohne Kalk"	84
Tab. 16:	P-Freisetzungsrate b (mg P kg^{-1} Boden) und Bestimmtheitsmaße B (%) der mit verschiedenen Funktionen linearisierten EUF-Freisetzungskurven. Boden: Immenhausen "mit Kalk"	84
Tab. 17:	Korrelationskoeffizienten zwischen den mit verschiedenen Funktionen berechneten P-Freisetzungsrate b und den P-Gehalten verschiedener Untersuchungsmethoden ($n = 15$)	87

Tab. 18:	Korrelationskoeffizienten (r) und Bestimmtheitsmaße (B) für die Beziehung zwischen den P-Entzügen (1984-1987) und den Befunden der Bodenuntersuchung (n = 15)	88
Tab. 19:	Korrelationskoeffizienten (r) und Bestimmtheitsmaße (B) für die Beziehung zwischen den P-Entzügen (1984-1987) und den Befunden der Bodenuntersuchung bezogen auf die Rohphosphatvarianten (Hyper- und Novaphosphat, n = 7)	90
Tab. 20:	Einfluß gesteigerter P-Gaben in Form von Hyperphosphat auf die Schwermineralmenge und die Wiederfindungsrate des zugeführten Hyperphosphat. Boden "Kleinsinden", pH 6,8	95
Tab. 21:	Einfluß gesteigerter P-Gaben in Form von Hyperphosphat auf die P-Konzentration und P-Menge in der Schwermineralfraktion. Boden: "Kleinsinden", pH 6,8	97
Tab. 22:	2-Theta-Werte und Intensitäten der Röntgendiagramme für den Bereich von Apatiten in der Schwermineralfraktion von Hyperphosphat und des mit Hyperphosphat gedüngten Bodens "Kleinsinden"	98
Tab. 23:	Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen auf die Schwermineralmenge, die P-Konzentration und die P-Menge der Schwermineralfraktion im Boden. Boden: Dissen	99
Tab. 24:	Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen auf die Abgabe von wasserlöslichem Phosphat in der Rhizosphäre von Raps. Boden: Burguffeln	109
Tab. 25:	Einfluß einer plazierten P-Düngung mit Hyper- und Superphosphat auf die Wurzellängendichte in den verschiedenen Bodenzonen (A: obere Schicht, ohne Düngung P ₀ ; B: mittlere Schicht, mit P-Düngung; C: untere Schicht, ohne P-Düngung) Boden: "Klein-Linden", pH (CaCl ₂): 6,1	111
Tab. 26:	Effekt einer plazierten P-Düngung mit Hyper- und Superphosphat auf die Sproßmasse, die P-Konzentration im Sproß, die P-Aufnahme und das Wurzel-Sproß-Verhältnis von Mais	112

Tab. 27:	Einfluß des Bodengefüges und der P-Form auf die Wurzelfrischmasse und Wurzellänge von Sommerweizen beim Schossen	118
Tab. 28:	Einfluß des Bodengefüges und der P-Form auf die N-, P- und K-Konzentration im Sommerweizen-Sproß beim Schossen	119
Tab. 29:	Einfluß des Bodengefüges und der P-Form auf die P-Aufnahme von Sommerweizen (Korn und Stroh)	121
Tab. 30:	Einfluß der Bodenfeuchte und der P-Form auf die Wurzelfrischmasse und Wurzellänge von Sommergerste zum Zeitpunkt des Schossens	123
Tab. 31:	Einfluß der Bodenfeuchte und der P-Form auf die P-Konzentration im oberirdischen Aufwuchs von Sommergerste zum Zeitpunkt des Schossens	124
Tab. 32:	Einfluß der Bodenfeuchte und der P-Form auf die P-Aufnahme (Korn und Stroh) von Sommerweizen	125
Tab. 33:	Einfluß der Bodenfeuchte und der P-Form auf die P-Aufnahme (Korn und Stroh) von Sommergerste	126
Tab. 34:	Mineralstoffkonzentrationen bei Zuckerrüben auf Boden 1 und Boden 2	133
Tab. 35:	CAL-P und P-Fraktionen auf dem Boden 1 im Vergleich zum Boden 2 im Jahr 1986	134
Tab. 36:	Wirkung einer gestaffelten Hyper- und Superphosphatdüngung auf das mit verschiedenen Methoden lösliche Phosphat im Frühjahr (Angaben in mg P kg ⁻¹ Boden). Boden: Ginsheim, pH 7,4	135
Tab. 37:	Ertragswirksamkeit einer gestaffelten Hyper- und Superphosphatdüngung im Feldversuch. Boden: Ginsheim, pH 7,4	136
Tab. 38:	Die mit Mykorrhiza infizierte Wurzellänge bei Sonnenblume im Stadium der Vollblüte	139
Tab. 39:	Einfluß einer gestaffelten Hyper- und Superphosphatdüngung auf die P-Entzüge im Feldversuch (Zuckerrübe, Blatt + Rübe, Sonnenblume, Samen; Winterweizen, Korn + Stroh). Boden: Ginsheim, pH 7,4	141

Tab. 40:	Wirkung einer gestaffelten Hyper- und Superphosphatdüngung auf das mit verschiedenen Methoden lösliche Phosphat im Frühjahr (Angaben in mg P kg ⁻¹ Boden). Boden: Gießen, pH 5,3	143
Tab. 41:	Ertragswirkung einer gestaffelten Hyper- und Superphosphatdüngung im Feldversuch (Boden Gießen, pH 5,3)	146
Tab. 42:	Einfluß einer gestaffelten Hyper- und Superphosphatdüngung auf die P-Entzüge im Feldversuch (Korn und Stroh). Boden: Gießen, pH 5,3	150

1 Einleitung

1.1 Probleme der P-Düngung und der P-Form

Phosphat zählt zu den Rohstoffen auf der Welt, dessen abbauwürdige Vorräte nach neueren Schätzungen und bei der heutigen Förderrate von $136 \cdot 10^6$ t Rohphosphat pro Jahr noch etwa 500 Jahre ausreichen würden (Sheldon, 1982). Fünfhundert Jahre sind nur ein kleiner Zeitraum in der Geschichte der Menschheit. Aus diesem Grunde ist es angebracht, den Rohstoff Phosphat in Industrie und dem Hauptabnehmer, Landwirtschaft, sehr effizient einzusetzen bzw. wiederzugewinnen.

Die Waschmittelindustrie hat deshalb, zwar mehr aus ökologischen Gründen zur Reinhaltung der Gewässer, bereits erste Schritte unternommen. Das Phosphat wurde durch andere Stoffe substituiert. In der Landwirtschaft ist es jedoch nicht möglich, Phosphat durch andere Stoffe oder Elemente zu ersetzen, da der Phosphor ein unentbehrlicher Pflanzennährstoff ist (Bergmann, 1988). Wenn Phosphat in der Pflanzenernährung nicht durch andere Stoffe zu ersetzen ist, so ist es aber möglich, diesen Nährstoff ökologisch orientiert zu düngen. Ökologisch orientiert heißt im Falle des Phosphats, daß die P-Düngung rohstoffsparend erfolgen sollte, also dem P-Bedarf der Pflanzen sowie der P-Versorgung und dem Kulturzustand der Böden entsprechend (Sturm und Isermann, 1978).

Trotz knapper werdender abbauwürdiger Phosphatvorkommen lag in vielen Fällen die durchschnittliche P-Gabe in den hochentwickelten Ländern der EG bei weitem über dem P-Bedarf unserer Kulturpflanzen (Schachtschabel und Köster, 1985). Diese bisherige Düngepraxis ließ die verfügbaren P-Mengen auf vielen Ackerstandorten ansteigen, so daß Phosphat nur in den seltensten Fällen ein ertragsbegrenzender Faktor ist. Nach Untersuchungen von Brüne und Heyn (1984) bestand auf hessischen Ackerböden erst bei einem CAL-löslichem P-Gehalt

von kleiner 15 mg $P_2O_5/100g$ Boden eine gesicherte Beziehung zwischen einer P-Düngung und dem Ertragszuwachs. Eine Auswertung von Versuchen auf 150 Standorten, in der Bundesrepublik Deutschland durchgeführt, ergab, daß erst ab ≤ 9 mg $P_2O_5/100g$ Boden (lactatlöslich) mit einer Ertragswirkung zu rechnen ist (Köster und Schachtschabel, 1983). Bei 9 bzw. 15 mg $P_2O_5/100g$ Boden werden aber nach wie vor Empfehlungen ausgesprochen, die über dem P-Bedarf der Pflanzen liegen (Baumgärtel, 1987). Daraus möge man erkennen, daß die bisherige P-Düngeempfehlung nicht unbedingt ökologisch, also rohstoffsparend, ausgerichtet ist. Dieses mag darin begründet sein, daß auch bei hoher P-Versorgung einiger Standorte immer wieder Ertragszuwächse durch eine P-Düngung beobachtet wurden (Munk, 1985). Derartige Effekte können in der Regel mit Standortfaktoren erklärt werden, wie von Keita und Steffens (1989) berichtet wird. Besonders das häufig im Ackerbau anzutreffende Grobaggregat-Gefüge oder ein verdichtetes Gefüge hemmen die Nährstoffanlieferung (Bohne, 1988) und besonders das Wurzelwachstum (Keita, 1986). Auf derartig gefügestabilen Böden können, trotz ausreichender P-Versorgung, immer wieder positive Wirkungen einer P-Düngung beobachtet werden.

Aus diesen kurzen Ausführungen mag man erkennen, daß die richtige Höhe der P-Düngung schwierig zu bemessen ist. Äußerst problematisch ist aber die in der Wissenschaft häufig aufgeworfene Frage, in welcher Form sollte das Phosphat appliziert werden? Diese Frage ist nicht einfach zu entscheiden. Bei der Produktwahl entscheidet verständlicherweise oft der Preis. Die Wirksamkeit der betreffenden Form ist dann von untergeordneter Bedeutung.

Die im Handel befindlichen anorganischen P-Formen lassen sich nach technologischen Kriterien in drei Gruppen einteilen:

- A nichtaufgeschlossene P-Formen
- B teilaufgeschlossene P-Formen
- C vollaufgeschlossene P-Formen

Die wichtigsten Vertreter der Gruppe A sind das Hyperphosphat, der Gruppe B das Nova- und das Carolonphosphat und der Gruppe C das Super-, Tripel-, Diammon- und das Thomasphosphat. Allen diesen im Handel erhältlichen P-Formen, mit Ausnahme des Thomasphosphats ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_2\text{SiO}_4$), ist gemeinsam, daß sie aus Rohphosphat hergestellt werden.

Die Rohphosphate sind entweder marinen oder magmatischen Ursprungs (Khasawneh und Doll, 1978). Das wichtigste Mineral der begehrten Rohphosphate ist der Apatit. Der Name Apatit stammt aus dem Griechischen $\alpha\pi\alpha\tau\epsilon\lambda\upsilon$ und bedeutet 'scheinen' oder 'täuschen', aufgrund der Ähnlichkeit mit den Mineralen Turmalin und Smaragd. Der Apatit zählt zur Gruppe der Schwerminerale mit einer Dichte von $2,89 \text{ g/cm}^3$. Diese Apatite sind mikrokristalline und farblose Körner, die eine prismatische oder abgerundete Form haben. Sie haben eine niedrige Licht- und Doppelbrechung (Boenigk, 1983).

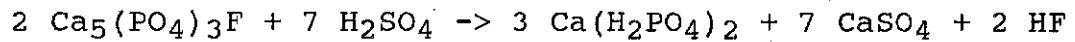
Chemisch und kristallographisch sind die Apatite aber sehr heterogen. Der Prototyp der Apatitfamilie ist der Fluorapatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3 \text{F}$). Interessanterweise können das Kation Ca^{2+} und die Anionen Phosphat und Fluorid in den Apatiten durch andere Ionen substituiert werden. Einige der gefundenen Substitutionen sind in der Tabelle I aufgeführt:

Tabelle I: Mögliche Substitutionen in der Struktur von Apatiten (nach Angaben von Nathan (1984))

Ca^{2+}	wird substituiert durch: Na^+ , K^+ , Ag^+ ; Sr^{2+} , Mn^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Ba^{2+} ; Sc^{3+} , Y^{3+} , Bi^{3+} ; U^{4+}
PO_4^{3-}	wird substituiert durch: CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , CrO_4^{2-} ; AsO_4^{3-} , VO_4^{3-} , $[\text{CO}_3 \text{F}]^-$, SiO_4^{4-}
F^-	wird substituiert durch: OH^- , Cl^- , Br^- ;

Aus den Angaben der Tabelle I möge man die Komplexität der chemischen und kristallographischen Strukturen der Apatite

erkennen. Die wichtigsten Vertreter der Apatitfamilie sind Fluor- $(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F})$, der Hydroxy- $(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH})$ und der Chlorapatit $(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl})$. Diesen Apatiten ist gemeinsam, daß sie relativ stark auskristallisiert sind. Man bezeichnet deshalb auch die Rohphosphate, in denen die drei genannten Minerale der P-Komponente dominieren, auch als "harterdige" Rohphosphate. Im Gegensatz dazu gibt es auch "weicherdige" Rohphosphate. Die Termini "hart-" bzw. "weicherdiges" Rohphosphat beziehen sich auf die Mineralzusammensetzung und deren Löslichkeit in 2%iger Ameisensäure (Hofmann et al., 1959; Gisiger und Pulver, 1959). Nach dem im Jahre 1977 erlassenen Düngemittelgesetz der Bundesrepublik Deutschland sollen mindestens 55% des Gesamt-P-Gehaltes in 2%iger Ameisensäure löslich sein, um als "weicherdiges" Rohphosphat eingestuft werden zu können. Vor 1977 mußte die Löslichkeit der "weicherdigen" Rohphosphate in 2%iger Ameisensäure noch 65% betragen (Werner und Scherer, 1985). "Harterdige" Rohphosphate haben dagegen eine Löslichkeit von 20-45%, bezogen auf den Gesamt-P-Gehalt, in 2%iger Ameisensäure (Mix, 1979). Die unterschiedliche Löslichkeit zwischen "hart-" und "weicherdigem" Rohphosphat in 2%iger Ameisensäure beruht auf der Kristallstruktur der Apatite. In den "weicherdigen" Rohphosphaten dominiert als Apatit der Frankolit mit einer Länge von 1 - 10 nm, also einer sehr feinkristallinen Struktur (Nathan, 1984). Frankolite sind "Defektapatite", in denen das Phosphatanion teils durch Karbonat substituiert ist (McClellan, 1980). Heute nimmt man an, daß anstelle des Phosphats ein $[\text{CO}_3\text{-F}(\text{OH})^{3-}]$ -Komplex eingebaut ist (Nathan, 1984). Rohphosphate, die reich an Frankoliten sind und eine hohe Löslichkeit in Ameisen- und Zitronensäure aufweisen, sind nach einer sehr feinen Vermahlung für eine direkte P-Düngung geeignet. "Harterdige" Rohphosphate eignen sich aber nicht für eine direkte Anwendung (Khasawneh und Doll, 1978). Die letztgenannten werden mit Säure, in der Regel mit Schwefelsäure, zum Superphosphat aufgeschlossen, dem weltweit wichtigsten P-Düngemittel (s. Formel Seite 5).



Der Aufschluß mit Säure zum wasserlöslichen und pflanzenverfügbaren Phosphat erfolgt bei den "weicherdigen" Rohphosphaten im Boden. Dabei hängt die Umsetzung und die Wirksamkeit dieser Rohphosphate von der Reaktivität (= Kristallstruktur und chemische Zusammensetzung) der betreffenden Vorkommen und den Bodeneigenschaften ab (Khasawneh und Doll, 1978; Werner und Scherer, 1985; Mengel, 1986; Bolland und Gilkes, 1990b).

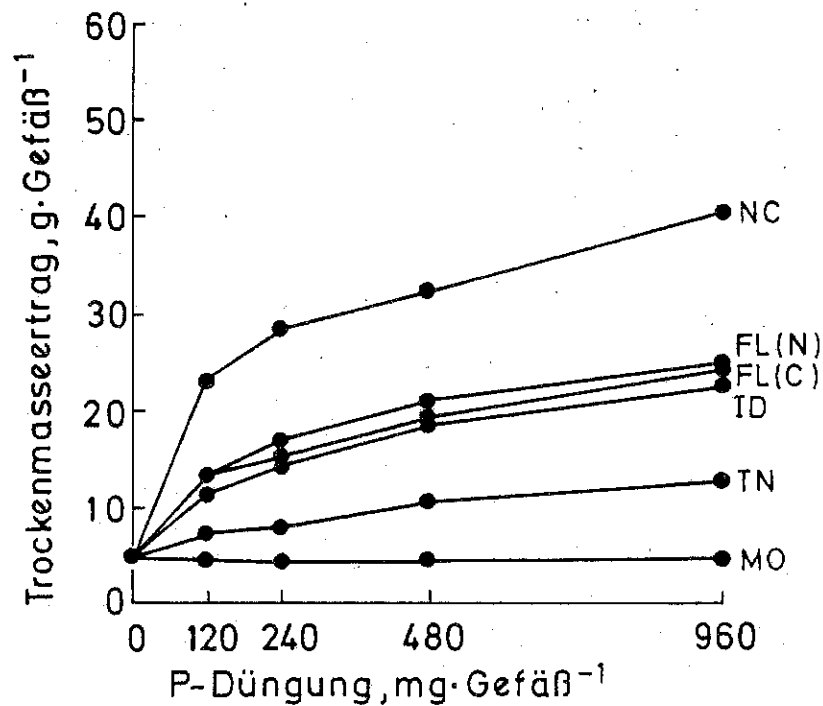
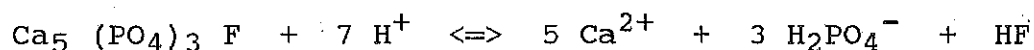


Abb. I: Wirkung einer gestaffelten P-Düngung mit verschiedenen Rohphosphaten auf die Sproßmasse von Mais. Boden-pH: 4,8.
 (NC = North Carolina; FL(N) = North Florida; FL(C) = Central Florida; ID = Idaho; TN = Tennessee; MO = Missouri)
 (nach Khasawneh und Doll, 1978)

In der Abbildung I ist beispielhaft die Bedeutung der Rohphosphatherkünfte für die Ertragswirksamkeit bei Mais auf einem sauren Boden dargestellt. Es zeigt sich, daß die Rohphosphate aus Missouri und Tennessee keine oder nur eine geringe Wirkung aufwiesen. Der Höchstertrag wurde in der Variante mit North-Carolina-Phosphat erzielt. Das North-Carolina-Phosphat unterscheidet sich von den anderen Herkunftten durch einen höheren Frankolitgehalt, also einem Apatit mit hoher Löslichkeit, bedingt durch dessen hohen Carbonatanteil (Khasawneh und Doll, 1978). Anderson et al. (1985) konnten ebenfalls zeigen, daß die Löslichkeit der Rohphosphate nicht allein mit Bodenfaktoren, sondern vor allem mit dem Carbonatgehalt erklärt werden kann. Dieses bedeutet, daß nur die Rohphosphate zur direkten Anwendung kommen sollten, die morphogenetisch eine hohe Reaktivität besitzen. Dazu zählen das bereits erwähnte North Carolina- und das Gafsa-Phosphat aus Tunesien. Das Gafsa-Phosphat wurde noch vor mehreren Jahren als Hyperphosphat vertrieben. Heute besteht das Hyperphosphat aber aus dem Arad-Phosphat, welches in der Negev Wüste abgebaut wird. Das Arad-Phosphat hat eine geringere Reaktivität als das Gafsa-Phosphat, und wie Werner und Scherer (1985) nachwiesen, hat Arad-Phosphat auch eine geringere Ertragswirksamkeit als Gafsa-Phosphat.

1.2 Umsetzung von Rohphosphat im Boden

Die Lösung von Rohphosphaten kann im Boden annähernd, nach einem Vorschlag von Mengel (1986), mit unten aufgeführter Reaktion beschrieben werden.



Die Gleichung besagt, daß die Lösung von Apatit durch Protonen gefördert, aber durch Ca^{2+} und H_2PO_4^- Ionen gehemmt wird.

Daß der Boden-pH-Wert ein entscheidender Parameter für die Löslichkeit von Rohphosphaten ist, wurde oft gefunden (Khasawneh und Doll, 1978; Amberger, 1978; Kanabo und Gilkes, 1987). Je niedriger der pH-Wert eines Bodens ist, um so besser ist auch die Löslichkeit der Rohphosphate (Reichard, 1969; Amberger, 1978; Kucey und Bole, 1984; Rajan, 1987). Diese Aussage wurde mit den kürzlich von Ressler und Werner (1989) publizierten Befunden im Gefäßversuch mit einem ^{33}P markierten Apatit dokumentiert. Die Eigenschaften des synthetisierten Apatits entsprachen fast denen eines Frankolits. Die Wirksamkeit des Synthese-Apatits wurde bei zwei Böden mit verschiedenen pH-Werten überprüft. In einer weiteren Variante wurde ein aus dem ^{33}P markierten Apatit hergestelltes Superphosphat gedüngt. Die wichtigsten Befunde dieser Arbeit sind in der Tabelle II aufgeführt. Sie zeigen, daß die Wirkung des Rohphosphats auf die P-Aufnahme der Pflanze mit steigendem pH-Wert nachläßt. Dieses wird besonders deutlich, wenn man die ^{33}P -Menge im Weidelgras bei beiden Böden betrachtet. Sie war auf dem sauren Boden fast doppelt so hoch wie auf dem schwach sauren Boden.

Tabelle II: P-Aufnahme von Weidelgras (4 Aufwüchse) aus einem ^{33}P markierten Rohphosphat im Vergleich zu Superphosphat bei zwei P armen Böden (P-Versorgung der Böden, $< 13 \text{ mg CAL-P kg}^{-1}$ Kleingefäßversuch mit $1,4 \text{ kg Boden}$, P-Düngung: $28,1 \text{ mg P kg}^{-1}$, nach Ressler und Werner, 1989)

	pH 5,0 in CaCl_2 mg P Gef. $^{-1} \text{ } ^{33}\text{P}$ (Bq $\times 10^5$)		pH 6,1 in CaCl_2 mg P Gef. $^{-1} \text{ } ^{33}\text{P}$ (Bq $\times 10^5$)	
P_0 (= Kontrolle)	9,5	-	15,8	-
^{33}P mark. Rohphosphat	16,6	1,42	18,4	0,88
Superphosphat	33,3	6,25	40,4	7,00
(GD 5%, Tuckey-Test)	3,9	0,38	3,9	0,38

Die Befunde zeigen ebenfalls sehr deutlich, daß das aus dem Rohphosphat aufgeschlossene Superphosphat auch auf dem sauren Boden besser von Weidelgras ausgenutzt wurde als das Rohphosphat.

Die Löslichkeit von Rohphosphat wird auch durch das H^+ -Puffervermögen eines Bodens bestimmt. Diese Eigenschaft erwies sich aus den Studien von Bolland und Gilkes (1990b) bedeutsam für die Auflösung von Rohphosphaten. Über den Einfluß des H^+ -Puffervermögens auf die Auflösung von Rohphosphaten wird auch von Kanabo und Gilkes (1988) berichtet. Eine hohe H^+ -Pufferung fördert die Auflösung der Rohphosphate in stärkerem Umfang als eine geringe H^+ -Pufferung, da Böden mit einer hohen H^+ -Pufferung mehr Protonen nachliefern als Böden mit einer niedrigen H^+ -Pufferung. Aus diesem Grund waren die Rohphosphate auch die P-Düngemittel für saure Moor- und Wiesenstandorte (Amberger, 1957), da hier gute Umsetzungsbedingungen und eine hohe H^+ -Pufferung vorliegen (Scheffer und Ulrich, 1958; Scheffer et al., 1957).

Die Umwandlung von Rohphosphaten im Boden in "pflanzenverfügbares" Phosphat wird oft mit der Relation zwischen DL- und CAL-löslichem Phosphat oder DL-extrahierbarem und Wasser- bzw. EUF-extrahierbarem Phosphat demonstriert (Schüller, 1969; Obigbesan und Mengel, 1981; Werner, 1969; Judel et al., 1982; Fritsch und Werner, 1985; Steffens und Mengel, 1985; Steffens, 1987).

Besonders die Relation zwischen DL- und CAL-löslichem Phosphat kennzeichnet den Grad der Umwandlung von Rohphosphat in verfügbares Phosphat (Gutser und Amberger, 1976). Falls nach einer Rohphosphatdüngung das DL-extrahierbare Phosphat stärker ansteigt als das CAL-lösliche, so wurde das Rohphosphat nicht in verfügbares Phosphat umgesetzt. Dieses ist darin begründet, daß mit der DL-Extraktion auch apatitisches Phosphat gelöst wird, wohingegen dieses bei der CAL-Methode nicht der Fall ist (Schüller, 1969; Werner, 1969). Falls aber die Böden mit einer aufgeschlossenen Form (Thomas- oder Superphosphat) gedüngt werden, so werden etwa die gleichen P-Mengen mit der CAL- und DL-Lösung extrahiert (Steffens und Mengel, 1985). Das unterschiedliche Lösungsvermögen der DL- und CAL-Lösungen für Apatite ist in den pH-Werten, den Ca^{2+} -Konzentrationen und den Boden/Lösungsverhältnissen der beiden Methoden begründet. Die DL-Lösung hat einen pH-Wert von 3,7, die CAL-Lösung 4,1. Des weiteren ist die Ca^{2+} -Konzentration im DL-Extrakt etwa 5mal kleiner als im CAL-Extrakt. Ferner ist das Boden/Lösungsverhältnis der DL-Methode 1:50, das der CAL-Methode 1:20. Alle drei genannten Parameter der beiden Extrakte begünstigen also die Auflösung, gemäß der Löslichkeitskriterien, von apatitischem Phosphat während einer DL-Extraktion. Sie lassen aber noch keine Rückschlüsse über die Pflanzenverfügbarkeit zu. Schüller (1969) sowie Werner (1969) konnten in ihren Untersuchungen feststellen, daß das DL-lösliche Phosphat nach langjähriger Rohphosphatdüngung im Boden anstieg und daß dieses DL-P nur eine lockere Beziehung zur P-Aufnahme der Pflanze hatte. Erheblich bessere Beziehungen fanden die Autoren aber zwischen P-Aufnahme und P-Gehalt im

Boden, wenn die Böden mit der CAL-Methode analysiert wurden. Über ähnliche Befunde berichten auch Amberger und Gutser (1976), sowie Steffens und Mengel (1985). Judel et al. (1982) stellten in ihren Gefäßversuchen mit verschiedenen P-Formen fest, daß zwischen der P-Aufnahme von Sommerweizen und dem DL-P-Gehalt im Boden eine schwächere Korrelation ($r=0,64^*$) bestand als zum EUF-extrahierbaren Phosphat ($r=0,95^{***}$). Die Diskrepanz zwischen DL- und CAL-löslichem Phosphat, besonders nach Düngung mit apatitischen Phosphaten, war der Grund für die Einführung der CAL-Methode nach Schüller (1969) als Verbandsmethode der VDLUFA zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphats.

Die Umsetzung der verschiedenen P-Formen im Boden kann auch mit einer P-Fraktionierung bestimmt werden. Dazu seien die Befunde von Wildhagen et al. (1983) zitiert. Die Autoren beobachteten bei langjährigen P-Formenversuchen auf Löß-Parabraunerden, daß besonders die Fraktion der Ca-Phosphate nach Rohphosphatdüngung anstieg. Dieses traf für die aufgeschlossenen Formen nicht zu. Die Anwendung von aufgeschlossenen P-Formen förderte im Vergleich zu apatitischen Formen die Fraktion des adsorbierten bzw. labilen Phosphats, welches die wichtigste anorganische Quelle für die P-Ernährung der Pflanzen ist (Mengel und Kirkby, 1987). Auch die Experimente von Fritsch und Werner (1985 und 1987) zeigen, daß Rohphosphate einen geringeren Beitrag als aufgeschlossene Formen zur Auffüllung des adsorbierten Phosphates lieferten.

Neben dem pH-Wert wird die Löslichkeit von Rohphosphaten auch durch die Ca^{2+} - und P-Konzentration im Boden beeinflusst. Besonders hohe Ca^{2+} -Konzentrationen verändern die Gleichgewichtsbeziehung zwischen der Ca^{2+} -Konzentration in der Bodenlösung und dem Ca^{2+} -Gehalt im Apatitkristallverband, so daß keine Ca^{2+} -Ionen aus dem Apatit diffundieren und die Lösung der Apatite gehemmt wird (Mackay et al., 1986). Dazu seien die Befunde von Khasawneh und Doll (1978) vorgestellt.

In der Untersuchung der zitierten Autoren wurde ein mit Rohphosphat gedüngter Boden mit steigenden Mengen an CaCO_3 oder SrCO_3 vermischt und die relative Wirksamkeit des Rohphosphats im Vergleich zu einer vollaufgeschlossenen P-Form (= 100%) gemessen, s. Abbildung II.

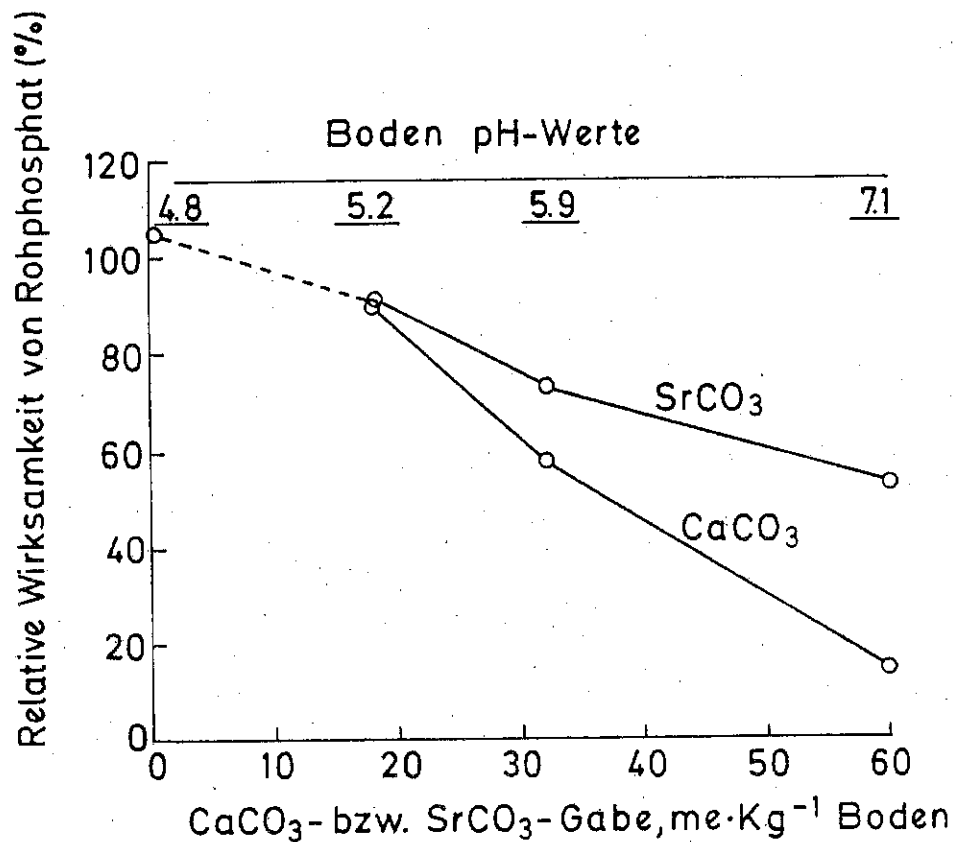


Abb. II: Relative Wirksamkeit von North Carolina Rohphosphat ($300 \text{ mg P Gefäß}^{-1}$) auf die Maiserträge in Abhängigkeit einer SrCO_3 - und CaCO_3 -Düngung (Superphosphat = 100%) (nach Khasawneh und Doll, 1978)

In beiden Karbonatvarianten stieg der pH-Wert des Bodens an. Dadurch nahm die relative Wirksamkeit des Rohphosphats in

beiden Karbonatvarianten ab. Der Abfall der Ertragswirksamkeit (= Hemmung der Rohphosphatlöslichkeit) war in der Variante mit CaCO_3 stärker ausgeprägt als mit SrCO_3 . Dieser Befund dokumentiert sehr anschaulich die Hemmung der Auflösung von Rohphosphat durch steigende pH-Werte, aber auch durch die Erhöhung der Ca^{2+} -Konzentration.

Andererseits können besonders symbiontisch ernährte Leguminosen durch eine Protonenabgabe ihrer Wurzel (Hauter und Steffens, 1985; Aguilar Santelises und van Diest, 1981; Maloth und Prasad, 1976) oder aber Pflanzen mit einem hohen Ca^{2+} -Aufnahmevermögen, wie z.B. Raps (Bekele et al., 1983), die Löslichkeit von Rohphosphat erhöhen. Neuere Untersuchungen von Hoffland et al. (1989) deuten darauf hin, daß die hohe Rohphosphat-Mobilisierung von Raps auf eine Malat- und Zitronensäure-Abgabe der Wurzeln zurückzuführen ist.

Die von Khasawneh und Doll (1978) vorgestellten Befunde zeigen, daß die Löslichkeit von Rohphosphaten nicht nur von einem Faktor abhängt, sondern eher polyfaktoriell ist. Einige dieser Faktoren wurden bereits genannt. Anderson et al. (1985) konnten für die Löslichkeit einiger Rohphosphate im Boden verschiedene Parameter mit Hilfe einer multiplen Regressionsanalyse selektieren. Diese verschiedenen Parameter waren der pH-Wert, die H^+ -Pufferkapazität, die P- und Ca^{2+} -Konzentration der Bodenlösung, die P-Pufferung und die Wasserkapazität. Dabei ergab die Faktorenanalyse der zitierten Autoren, daß zwar steigende pH-Werte sowie erhöhte P- und Ca^{2+} -Konzentrationen der Bodenlösung negativ auf die Auflösung von Rohphosphaten wirkten, daß aber keiner dieser Faktoren einen herausragenden Einfluß für die Bemessung der Rohphosphatlöslichkeit hatte.

1.3 Ertragswirksamkeit

In Mitteleuropa wurde die Ertragswirksamkeit der verschiedenen P-Formen in zahlreichen Grün- und Ackerlandversuchen überprüft. Wachtel et al. (1985) haben die Befunde dieser vergleichenden Feldversuche mit Hyper- und Thomasphosphat in Mitteleuropa auf Grün- und Ackerlandstandorten ausgewertet. Bei dieser Untersuchung wurden insgesamt 26 Grünland- und 60 Ackerversuche berücksichtigt, wobei die Standorte in Boden pH-Bereiche von kleiner 5,0; 5,0 - 5,9; 6,0 - 6,9 und größer 6,9 unterteilt wurden. Die Autoren stellten für Grünland fest: "Zwischen den einzelnen pH-Bereichen < 5,0; 5,0 bis 5,9 und 6,0 bis 6,5 unterscheiden sich die Differenzen der Mehrerträge durch Thomas- und Hyperphosphatdüngung voneinander nicht signifikant". Auch die Versuche von Gregg et al. (1988) auf Grünlandstandorten in Neuseeland (pH 5,2 - 5,4) zeigen die gleiche Wirkung von weicherdigem Rohphosphat wie Superphosphat auf die Erntemasse.

Werden jedoch alle pH-Bereiche der von Wachtel et al. (1985) ausgewählten Grünlandversuche zusammen verrechnet, so beträgt der mittlere Mehrertrag bei Hyperphosphat 14,94 dt GE ha⁻¹ und bei Thomasphosphat 16,14 dt GE ha⁻¹. Der Mehrertrag von 1,2 dt GE ha⁻¹ durch Thomasphosphatdüngung ist hoch signifikant (Wachtel et al., 1985).

Die breite Auswertung der Versuche auf Ackerland bis zu einem pH-Wert von kleiner 6,5 wies einen durchschnittlichen Mehrertrag bei Hyperphosphat von 5,98 dt GE ha⁻¹ und bei Thomasphosphat von 6,68 dt GE ha⁻¹ auf. Diese geringe Differenz war aber statistisch hoch signifikant (Wachtel et al., 1985). Ferner konnten die Autoren mit einer Faktorenberechnung zeigen, daß die Wirksamkeit von Rohphosphat auf Grünland bis zu einem pH-Wert von kleiner 6,5 mehr von der Niederschlagsmenge als vom pH-Wert der Standorte beeinflußt wurde. Dieses Ergebnis ist auch verständlich, da einerseits die hohe Niederschlagsmengen das Lösungsvolumen für Rohphosphate begünstigen, andererseits die

Mineralisierung der organischen Substanz fördern. Dabei werden auch chelatisierende Moleküle gebildet, die wiederum Ca^{2+} binden können, so daß die Auflösung der Rohphosphate forciert wird (Scheffer und Ulrich, 1958).

Bei den von Wachtel et al. (1985) verrechneten Ackerversuchen (pH kleiner 6,5) konnten die Mehrerträge durch Hyper- und Thomasphosphat hauptsächlich auf die Versuchsdauer zurückgeführt werden, nicht aber auf die pH-Werte der Standorte. Berücksichtigt man die Wirksamkeit von Hyperphosphat und aufgeschlossenen P-Formen auf Ackerböden, die nicht in die Auswertung von Wachtel et al. (1985) einbezogen waren, so werden oftmals widersprüchliche Befunde beobachtet. Vetter und Fruchtenicht (1970) zeigten in ihren Untersuchungen auf dem Standort Riepe (pH 7,0), daß das Hyperphosphat dem Thomasphosphat in der Mehrertragsleistung unterlegen war. Auch Judel et al. (1982) fanden, zwar im Gefäßversuch, bei einem Boden-pH-Wert von 6,5 eine geringere Wirkung von apatitischen P-Formen als von aufgeschlossenen Phosphaten. Auch Reichard (1969) sowie Dietz und Bucher (1980) stellten auf schwach alkalischen Böden eine schlechtere Wirkung von Rohphosphat als von aufgeschlossenen Formen fest. Im Gegensatz zu den zitierten Autoren fanden Amberger und Gutser (1976), Grass und Heyn (1980), Amberger (1957), Poletschny et al. (1968), sowie Schaeffler und Schmid (1958) wiederum auf schwach sauren bis schwach alkalischen Standorten (pH: 6,6 - 7,1) für Hyperphosphat die gleiche Ertragswirksamkeit wie für aufgeschlossene P-Formen. Auf der anderen Seite fanden Hoffmann (1975) sowie Patzke und Lachotzke (1985) auf moorigen Standorten mit pH-Werten < 6 , die im Prinzip für den Einsatz von Rohphosphaten prädestiniert sind, eine äußerst unbefriedigende Wirkung von Hyperphosphat im Vergleich zu aufgeschlossenen Formen. Die Ursachen für das widersprüchliche Abschneiden von Hyperphosphat auf derartigen Standorten sind bislang nicht restlos geklärt.

1.4 Problem- und Fragestellung

Die in den vorhergehenden Kapiteln vorgestellten Befunde über die Löslichkeit und Ertragswirksamkeit von weicherdigen Rohphosphaten bestätigen im Prinzip die Aussagen von Anderson et al. (1985), daß die Wirkung von Rohphosphat nicht nur mit dem Boden-pH-Wert zu erklären ist, sondern daß auch noch andere Faktoren zu berücksichtigen sind. Zu diesen Faktoren zählen die genannten Autoren vorrangig bodenchemische Parameter, wie die Ca^{2+} - und die P-Konzentration der Bodenlösung.

Bei der seitherigen Betrachtungsweise zur Wirksamkeit von Rohphosphat blieben aber einige Fragen offen, wie auch Scheffer et al. (1957) bemerkten: "Die günstigen Ergebnisse mit Hyperphos haben der Wissenschaft eine Reihe von Fragen vorgelegt, die nicht so leicht beantwortet werden können. Die Versuchsergebnisse bestätigen aber erneut die von uns immer wieder vertretene Ansicht, daß die Bewertung eines Düngemittels nach Laboratoriumsmethoden unter Umständen ein vollkommen falsches Bild über seine Wirksamkeit im Feld- oder Gefäßversuch gibt". Ferner äußerten Scheffer et al. (1957): "Die Wirksamkeit des Hyperphos ist - wie gesagt - vielen Faktoren des Bodens zu verdanken. Diese aber eingehend zu studieren wird eine wichtige Aufgabe der Forschung". Seit dieser Aussage sind zwar mehr als 30 Jahre vergangen, und neue Faktoren der Rohphosphatlöslichkeit wurden auch diskutiert, wie sie von Khasawneh und Doll (1978) und Mengel (1986) in ihren Übersichtsartikeln vorgestellt wurden.

In der hier vorliegenden Arbeit wurde erneut die Frage über die Wirksamkeit verschiedener P-Formen aufgegriffen, um die häufig beobachtete gleiche Ertragswirksamkeit von weicherdigen und aufgeschlossenen Phosphaten erklären zu können bzw. um weitere Faktoren für die Wirksamkeit von Rohphosphaten zu untersuchen. Dazu wurden zahlreiche Gefäß-, Modell- und Feldversuche durchgeführt, die auf nachstehende Fragestellungen ausgerichtet waren:

- > Bedeutung der P-Kinetik zur Charakterisierung der P-Nachlieferung des durch verschiedene P-Formen im Boden angereicherten Phosphats.
- > Warum weicherdiges Rohphosphat auf alkalischen Böden wirken kann?
- > Bedeutung von Wurzelwachstum und Bodenfeuchte für die Verfügbarkeit von weicherdigem Rohphosphat.
- > Einfluß der Rhizosphäre auf die Verfügbarkeit verschiedener P-Formen.
- Welchen Einfluß hat eine Erhaltungsdüngung mit Hyper- und Superphosphat auf die P-Verfügbarkeit?
- > Kann der Umsatz verschiedener P-Düngemittel eventuell in der Schwermineralfraktion der Böden beobachtet werden?

2 Material und Methoden

In dieser Arbeit erfolgte die Bemessung der P-Düngung mit den verschiedenen P-Formen auf der Basis des Gesamt-P-Gehaltes in den Düngemitteln. Das Hyperphosphat hatte einen Gesamt-P-Gehalt von 32% P_2O_5 . Die Löslichkeit in 2% Ameisensäure betrug bei Hyperphosphat 20,1% P_2O_5 . Des weiteren hatte Hyperphosphat einen Siebdurchgang von 90% bei einer lichten Maschenweite von kleiner 0,063 mm.

Superphosphat wurde für die Gefäß- und Modellversuche auf kleiner 1 mm gemahlen. Der Gesamt-P-Gehalt betrug beim Superphosphat 18% P_2O_5 (= neutral-ammonzitratlösliches Phosphat). Die Wasserlöslichkeit lag bei 17% P_2O_5 .

2.1 Feldversuche

Die Feldversuche zur Überprüfung von Umsatz im Boden und der Ertragswirksamkeit von Hyper- und Superphosphat wurden auf den Standorten "Gießen" und "Ginsheim" (Rhein/Main-Niederung) durchgeführt. In Gießen beträgt die Jahresdurchschnittstemperatur 8,7°C, in Ginsheim 9,3°C. Die langjährige durchschnittliche Niederschlagsmenge beträgt in Gießen 637 mm und in Ginsheim 600 mm. Die wichtigsten Kenndaten der Versuchsböden sind in der Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Wichtige Kenndaten der Feldversuchsstandorte vor Versuchsanlage

11724

Boden	Bodentyp	pH-Wert (CaCl ₂)	CaCO ₃ %	Ton %	Humus %	CAL-P mg kg ⁻¹ Boden	CAL-K
Gießen	Brauner Aueboden	5,1	-	29,6	4,5	21	54
Ginsheim	Braunerde (Fluß- sediment)	7,4	7,4	18,0	1,8	22	145

Die Düngungsversuche wurden in Gießen im Herbst 1984 und in Ginsheim im Frühjahr 1987 angelegt. Der Standort Ginsheim ist insofern für einen vergleichenden P-Düngemittelversuch von Interesse, da der Landwirt bis 1986 seine Flächen seit 28 Jahren ausschließlich mit weicherdigem Rohphosphat (Hyperphosphat) versorgt hatte. Diese Tatsache erklärt auch den sehr niedrigen CAL-P-Gehalt des betreffenden Standorts. Die geringe P-Konzentration und der hohe Humusgehalt des Bodens "Gießen" ist auf die vorhergehende Wiesenutzung zurückzuführen. Der Wiesenumbbruch erfolgte drei Jahre vor Versuchsbeginn. Auf beiden Standorten wurden fünf Varianten in einer Blockanlage angelegt - siehe Tab. 2 -, aus der auch die Höhe der P-Düngung ersichtlich wird. Jede Variante umfaßte vier biologische Wiederholungen pro Standort, wobei in Gießen die Parzellen 45 m² und in Ginsheim 100 m² groß waren. Das Superphosphat wurde auf beiden Standorten in granulierter Form gedüngt. Das Hyperphosphat wurde auf dem Standort Gießen feinvermahlen und in Ginsheim granuliert appliziert. Die Bemessung der P-Düngemittelaufwandmenge richtete sich nach den P-Gesamtgehalten von Hyper- und Superphosphat. In Gießen erfolgte die P-Düngung im Herbst und in Ginsheim im Frühjahr. Die N- und K-Düngung sowie die Pflanzenschutzmaßnahmen waren während der Durchführung der Feldversuche ortsüblich.

Tabelle 2: Versuchsvarianten der Feldversuche bei Versuchsbeginn

Variante	Boden Gießen ^{*1} Versuchsbeginn: 1984	Boden Ginsheim ^{*2} Versuchsbeginn: 1987
1	ohne P-Düngung	ohne P-Düngung
2	17,5 kg P ha ⁻¹ a ⁻¹ als Hyperphosphat	87,3 kg P ha ⁻¹ a ⁻¹ als Hyperphosphat
3	17,5 kg P ha ⁻¹ a ⁻¹ als Superphosphat	87,3 kg P ha ⁻¹ a ⁻¹ als Superphosphat
4	35 kg P ha ⁻¹ a ⁻¹ als Hyperphosphat	174,6 kg P ha ⁻¹ a ⁻¹ als Hyperphosphat
5	35 kg P ha ⁻¹ a ⁻¹ als Superphosphat	174,6 kg P ha ⁻¹ a ⁻¹ als Superphosphat

^{*1}ab 1988 wurde die P-Düngung verdoppelt

^{*2}1988 wurde kein Phosphat gedüngt, 1989 wurde die Höhe der P-Düngung um den Faktor 0,3 reduziert.

Anhand der jährlich im Frühjahr gezogenen Bodenproben wurde der P-Umsatz von Hyper- und Superphosphat mit verschiedenen Extraktionsmethoden beobachtet.

Jährlich wurden auf beiden Standorten die Erntemenge von jeder Parzelle ermittelt und die P-Konzentration in den oberirdischen Pflanzenteilen analysiert. Auf dem Standort Ginsheim wurden außerdem in zwei der drei Versuchsjahre Zwischenernten durchgeführt. Im Jahre 1988 erfolgte eine Untersuchung der Sonnenblumenwurzeln im Stadium der Blüte auf den Grad der Mykorrhizierung.

2.2 Modell- und Gefäßversuche

Die hier vorgestellten Versuche haben das Ziel, die Faktoren für die Löslichkeit und Verfügbarkeit von weicherdigem Rohphosphat (Hyperphosphat) im Vergleich zu voll aufgeschlossenen P-Düngemitteln (Superphosphat) zu erklären. Dazu wurden eine Reihe von Modell- und Gefäßversuchen mit verschiedenen Böden, deren Eigenschaften in Tabelle 3 dargestellt sind, durchgeführt.

2.2.1 Wirkung der Zeit auf die Löslichkeit von Hyper- und Superphosphat

In diesem zweijährigen Inkubationsversuch wurde die von interessierter Seite geäußerte Meinung überprüft, daß auch auf ausreichend mit Phosphat versorgten Böden die Löslichkeit der weicherdigen Apatite nach längerer Verweildauer im Boden erhöht wird. Dazu wurden drei Böden (Buseck, Altenkirchen, Lützellinden), deren Kenndaten der Tabelle 3 zu entnehmen sind, in einer Variante mit Hyperphosphat und in einer anderen Variante mit Superphosphat gedüngt. In einer weiteren Variante wurde dem Boden kein Phosphat zugegeben. Die Höhe der P-Düngung betrug 50 mg P kg^{-1} Boden. Der Versuch umfaßte drei Wiederholungen einer jeden Variante. Die Bodeneinwaage betrug 10 kg Boden pro Gefäß. Die Inkubationstemperatur lag in einem temperierten Raum bei 18°C , die Bodenfeuchte bei 60% der maximalen Wasserkapazität.

In den nach einer Woche bzw. nach zwei Jahren aus jedem Gefäß gezogenen Bodenproben (1 kg Gefäß^{-1}) wurde Phosphat mit der CAL-, DL-, Wasser- und einer von Mehlich (1982) beschriebenen

Methode (= Me^{III}) analysiert. Des weiteren wurde in den Bodenproben die P-Konzentration der Bodenlösung im Sättigungsextrakt mit einer von Magistad et al. (1945) vorgeschlagenen Methode gemessen.

2.2.2 Wirkung einer Erhaltungsdüngung mit Hyper- und Superphosphat auf das lösliche P-Niveau im Boden

Die Ziele dieser Untersuchung sind die Überprüfung der Ertragswirksamkeit von Hyper- und Superphosphat sowie die Auswirkungen einer Erhaltungsdüngung in Form der genannten Düngemittel auf die P-Verfügbarkeit. Dazu wurde mit den im Kapitel 2.2.1 vorgestellten Böden (Buseck, Altenkirchen, Lützellinden; s. Tab. 3) ein zweijähriges Experiment in kleinen Mitscherlichgefäßen durchgeführt. Die Bodeneinwaage betrug 6,5 kg pro Gefäß. Im ersten Versuchsjahr (1984) wurden die Böden sechs Monate vor der Aussaat von *Lolium perenne* (cv. Taptoe) mit Hyper- und Superphosphat in einer Höhe von 50 mg P kg^{-1} Boden gedüngt. In einer weiteren Variante wurde kein Phosphat gedüngt. Jede Variante hatte sechs Wiederholungen. Des weiteren erhielten die Böden eine Gabe von 120 mg N (NH_4NO_3), 150 mg K (KCl) und 50 mg Mg (MgSO_4) kg^{-1} Boden. Das Weidelgras wurde in der Vegetationsperiode 1984 sechsmal in ca. vierwöchigem Abstand geschnitten. Nach jeder Ernte erhielt das Weidelgras eine flüssige Düngergabe von 0,3 g N (NH_4NO_3) und 0,3 g K (KCl/ K_2SO_4) pro Gefäß. Von jedem Aufwuchs wurde die Trockenmasse und der P-Gehalt bestimmt, um die P-Aufnahme der Pflanzen zu erfassen. Nach dem sechsten Weidelgrasschnitt wurden die Böden, nach Variante und Boden getrennt, aus den Gefäßen geschüttet und getrocknet. Die

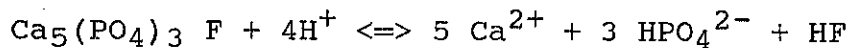
abgestorbenen Wurzeln und Stoppeln wurden per Hand vom Boden getrennt, gemahlen und wieder mit dem Boden vermischt.

Im zweiten Versuchsjahr (1985) wurden die Böden erneut mit Phosphat gedüngt, wobei die Höhe der P-Gabe nicht statisch bemessen wurde, sondern sich nach der von *Lolium perenne* in der Hyper- und Superphosphatvariante im Jahr 1984 aufgenommenen P-Menge richtete. Zusätzlich erhielten die Böden eine wie im Jahr 1984 veranschlagte N-, K- und Mg-Gabe, sowie 5 mg B (H_3BO_3) Gefäß^{-1} in flüssiger Form. Die Versuchspflanzen waren 1985 Grünraps (*Brassica napus* cv. Akela, 15 Pflanzen Gefäß^{-1}) und danach Grünmais (*Zea mays* cv. Badischer Landmais, sechs Pflanzen Gefäß^{-1}). Während des Wachstums von Grünmais wurden in flüssiger Form und auf drei Gaben verteilt 1,3 g N (NH_4NO_3), 2 g K ($\text{KCl}/\text{K}_2\text{SO}_4$) und 1 g Mg (MgSO_4) pro Gefäß gedüngt.

Die Rapspflanzen wurden 42 Tage nach der Aussaat und die Maispflanzen 101 Tage nach der Aussaat geerntet, getrocknet und gewogen. In den Raps- und Maissprossen wurde die P-Konzentration analysiert, um die P-Aufnahme zu berechnen. Die Wirkung der Hyper- und Superphosphatdüngung auf das CAL- und wasserlösliche Phosphat wurde 1984 in den vor der Weidelgras- und 1988 vor der Rapsaussaat gezogenen Bodenproben analysiert.

2.2.3 Einfluß des pH-Wert und der wasserlöslichen P-Konzentration im Boden auf die Löslichkeit von weicherdigem Rohphosphat

Die Freisetzung von Phosphat aus Apatit kann auf Vorschlag von Mengel (1986) annähernd mit nachstehender Gleichung beschrieben werden:



Die Gleichung besagt, daß die Löslichkeit von Apatit durch Protonen gefördert und durch Ca- und P-Ionen gehemmt wird. Die Gleichung beinhaltet aber auch, daß die Löslichkeit von Rohphosphaten durch Senkungen der Ca^{2+} -, aber auch der HPO_4^{2-} -Konzentration gefördert wird.

Um den Einfluß der Protonen und der P-Konzentration auf die Löslichkeit von weicherdigen Rohphosphaten zu überprüfen, wurden zwei Modellversuche durchgeführt. Der Effekt des pH-Wertes auf die Löslichkeit von Apatit wurde mit einer von Welp et al. (1983) beschriebenen Methode untersucht. Dazu wurden 50 g Boden aus den Varianten des P-Formenversuchs "Burguffeln" (siehe Kap. 2.2.8.1) mit 75 ml deionisiertem Wasser in 500 ml große PVC-Schüttelflaschen befeuchtet. In den Bodensuspensionen wurden täglich die pH-Werte 3, 4, 5, 6, 7 und 8 mit 2M HCl oder 2M NaOH bei pH-Kontrolle mittels Glaselektrode eingestellt. Nach sechs Tagen wurden die Bodensuspensionen mit Wasser auf 300 ml Volumen aufgefüllt, eine Stunde geschüttelt und filtriert. In den klaren Extrakten wurde die P-Konzentration analysiert.

Der Einfluß der wasserlöslichen P-Konzentration im Boden wurde mit nachstehender Versuchstechnik untersucht. Der Boden "Pohlheim", dessen Kenndaten in Tabelle 3 aufgelistet sind, wurde mit 50 mg P kg^{-1} in Form von feingemahlenem Hyperphosphat gedüngt und dazu steigende Mengen von löslichem Phosphat als Superphosphat gegeben. In weiteren Varianten wurde die Wirksamkeit steigender Mengen Superphosphat, aber ohne Zusatz von Hyperphosphat, untersucht, um den P-Anteil zu bestimmen, der aus dem Hyper- bzw. Superphosphat stammt. Nach sieben-tägiger Inkubation bei 20°C und einer Bodenfeuchte von 60% der maximalen Wasserkapazität wurde in den Bodenproben die P-Konzentration mit der P-Wasser-Methode analysiert. Pro

Variante wurden 1 kg Boden in dreifacher Wiederholung angesetzt.

2.2.4 Einfluß des Bodengefüges auf das Wurzelwachstum von Sommerweizen und die Verfügbarkeit von Hyper- und Superphosphat

Aus den Untersuchungen von Keita und Steffens (1989) geht hervor, daß die P-Verfügbarkeit in einem beachtlichen Maße vom Bodengefüge beeinflusst wird, in dem die verschiedenen Gefügeformen wie Grobaggregat- und verdichtetes Gefüge das Wurzelwachstum und die räumliche Zugänglichkeit des Phosphats beeinflussen.

In einem zweifaktoriellen Gefäßversuch wurde der Einfluß verschiedener Gefügeformen und einer P-Düngung mit Hyper- und Superphosphat auf das Wurzelwachstum und die P-Aufnahme von Sommerweizen (*Triticum aestivum*, cv. Kolibri) untersucht. Der Gefäßversuch wurde mit dem in Tabelle 3 vorgestellten Boden "Gießen" in Ahrgefäßen (24 cm Höhe) durchgeführt und umfaßte ein Feinaggregat- und ein Grobaggregat-Gefüge sowie bei jeder Gefügeform drei P-Varianten (P_0 , Hyperphosphat, Superphosphat). Die Höhe der P-Düngung betrug 100 mg P kg^{-1} Boden. Jede Variante wurde in zehnfacher Wiederholung angesetzt, wobei der Boden von drei Gefäßen bodenchemischen Untersuchungen diene und sieben Gefäße bepflanzt wurden. Vor dem Einfüllen in die Gefäße wurde der Boden auf einen Aggregatdurchmesser von kleiner 5 mm zerkleinert und entsprechend der Varianten mit Phosphat gedüngt, auf 70% der maximalen Wasserkapazität angefeuchtet, auf einer Betonplatte flach ausgebreitet und getrocknet. Danach wurden aus dem getrockneten Boden mit einem Beil fünf bis sieben Zentimeter große Aggre-

gate geschlagen. Der restliche Boden wurde nach Varianten getrennt wieder auf kleiner 5 mm zerkleinert. In der Feinaggregat-Variante wurden 11 kg Gefäß⁻¹ des auf kleiner 5 mm zerkleinerten Bodens gefüllt.

Die Bodeneinwaage der Gefäße der Grobaggregat-Variante bestand aus 5,5 kg Grobaggregaten und aus 5,5 kg des feinaggregierten Bodens, indem zuerst die Grobaggregate vorsichtig in die Gefäße gefüllt und anschließend der feine Boden zwischen die Klumpen geschüttet wurde.

Pro Gefäß wurden 3 g K (KCl/K₂SO₄) und 4 g N (NH₄NO₃) gedüngt. Die gedüngte N-Menge wurde auf drei Gaben verteilt, indem die erste als Salz und die anderen Gaben flüssig zum Bestocken und Schossen des Sommerweizens gegeben wurden. Erwähnt sei noch, daß die K- und die erste N-Gabe in der Feinaggregat-Variante mit 11 kg Boden und in der Grobaggregat-Variante mit 5,5 kg des feinaggregierten Bodens vermischt wurden.

Nach einer einwöchigen Ruhephase der Böden bei 60% der maximalen Wasserkapazität wurden aus drei Gefäßen einer jeden Variante Bodenproben entnommen und Sommerweizen (*Triticum aestivum*, cv. Kolibri) ausgesät; die Anzahl der Versuchspflanzen betrug 30 Gefäß⁻¹. Durch mehrmaliges Befeuchten der Böden auf 60% der maximalen Wasserkapazität am Tage trat während des Versuchs kein Wassermangel bei den Pflanzen auf. Zum Zeitpunkt des Schossens wurde die Entwicklung der Sproß- und Wurzelmasse sowie die P-Aufnahme von Sommerweizen untersucht. Diese Untersuchung wurde bei jeder Variante in dreifacher Wiederholung vorgenommen.

Bei der Abschlußernte (vier Wiederholungen Variante⁻¹) wurden die Körner und das Stroh getrennt geerntet.

2.2.5 Einfluß der Bodenfeuchte auf das Wurzelwachstum und die Verfügbarkeit von Hyper- und Superphosphat

Die Bedeutung der Bodenfeuchte für die Wirksamkeit von weicherdigen Rohphosphaten wurde in einem zweifaktoriellen Gefäßversuch überprüft. Die Versuchspflanzen waren Sommerweizen (*Triticum aestivum*, cv. Selpek) und Sommergerste (*Hordeum vulgare*, cv. Aura). Als Versuchsboden diente der Boden "Klein Linden", dessen Kenndaten in Tabelle 3 aufgeführt sind. Die Bodeneinwaage betrug $6,5 \text{ kg Gefäß}^{-1}$. Der Gefäßversuch umfaßte die 3 P-Düngungsvarianten P_0 (= Kontrolle), Hyperphosphat, Superphosphat und zwei Feuchtestufen. Phosphat wurde in den Versuchen mit Weizen und Gerste in einer Menge von 50 mg P kg^{-1} Boden gedüngt. Die Bodenfeuchte wurde nach dem Bestocken der Getreidepflanzen bei Sommergerste durch mehrmaliges Gießen auf 40% bzw. auf 60% der maximalen Wasserkapazität eingestellt. Bei Sommerweizen wurden die Feuchtestufen auf 30 bzw. 60% der maximalen Wasserkapazität reguliert. Die entsprechenden Wasserspannungen waren bei 60% der maximalen Wasserkapazität -10 k Pa ($p_f = 2,0$), bei 40% -20 k Pa und bei 30% -32 k Pa . Die Anzahl der Pflanzen betrug in beiden Versuchen 22 Gefäß^{-1} . In dem Experiment mit Sommerweizen wurden vier Wiederholungen pro Variante und Feuchtestufe angesetzt, so daß der Versuch 24 Gefäße umfaßte. Bei den Untersuchungen mit Sommergerste wurden sieben Gefäße pro Variante und Stufe angesetzt, wobei die Pflanzen von drei Gefäßen der Untersuchung des Wurzelwachstums dienten. Die Wurzelentwicklung wurde zum Zeitpunkt des Schossens bestimmt. Des weiteren wurde der Boden bei beiden Pflanzen mit $120 \text{ mg N(NH}_4\text{NO}_3)$, $200 \text{ mg K (KCl/K}_2\text{SO}_4)$ und $50 \text{ mg Mg (MgSO}_4)$ kg^{-1} in fester Form vermischt. Nach dem Bestocken und Schossen wurden die Pflanzen flüssig mit $0,3 \text{ g N(NH}_4\text{NO}_3)$ Gefäß^{-1} nachgedüngt. In den vor der Aussaat, vor der Zwischenernte sowie nach der Ernte gezogenen Bodenproben wurde das verfügbare Phosphat mit der CAL- und Wassermethode analysiert.

Tabelle 3: Kenndaten der in den Modell- und Gefäßversuchen verwendeten Versuchsböden

Boden	Bodentyp	Horizont	pH-Wert (CaCl ₂)	Ton %	Humus %	CAL-P mg kg ⁻¹	CAL-K
Gießen	Brauner Aueboden	Ap	5,3	32,8	4,8	26,0	57,3
Klein- Linden	Unterboden einer Braunerde	B	6,1	9,8	0,4	4,2	51,9
Pohlheim	Braunerde	Ap	5,1	32,1	2,2	10,0	39,0
Lützel- linden	Para- braunerde	Ap	6,5	16,5	2,6	104,0	326,3
Buseck	Para- braunerde	Ap	5,3	22,0	1,6	65,9	146,9
Alten- kirchen	Para- braunerde	Ap	4,0	23,6	2,4	41,9	168,5

2.2.6 Wirkung einer plazierten P-Düngung mit Hyper- und Superphosphat auf das Wurzelwachstum und die P-Verfügbarkeit

Der Effekt einer plazierten P-Düngung in Form von Hyper- und Superphosphat auf die Wurzelverteilung im Boden und die P-Aufnahme von Mais (*Zea mays*, cv. Blizzard) wurde in Mikrorhizotrongefäßen aus Kunststoff (30 cm Höhe, 25 cm Breite, 2,5 cm Dicke) in einer Klimakammer durchgeführt. Die äußeren Versuchsbedingungen der Klimakammern sind in Kapitel 2.2.7 angegeben. Eine Seitenwand der Rhizotrongefäße bestand aus Plexiglas, so daß das Wurzelwachstum durch Schrägstellen der Gefäße im Winkel von 45°C zu beobachten war. Während des Versuches war die Plexiglasscheibe mit Alu-Folie abgedeckt.

In die Rhizotrone wurde der mit 120 mg N (NH_4NO_3), 250 mg K (KCl) und 50 mg Mg (MgSO_4) vermischte Boden "Klein Linden" (Kenndaten siehe Tab. 3) in drei Portionen à 766,7 g gefüllt. Der Boden der oberen und unteren Schicht erhielt kein Phosphat. Die mittlere Schicht wurde mit 50 mg P kg^{-1} Boden entweder in Form von Hyper- oder Superphosphat bzw. zur Kontrolle ohne Phosphat vermischt. Die oberste Schicht erhielt zum Verdunstungs- und Verschlammungsschutz eine Deckschicht aus Quarzsand.

Es dauerte 14 Tage, bis der Boden gleichmäßig auf 50% der maximalen Wasserhaltekapazität durchfeuchtet war. Pro Gefäß wurde eine Maispflanze angebaut.

Nach 40 Tagen Versuchsdauer konnte die Wurzelverteilung von Mais in den verschiedenen Bodenschichten bestimmt werden, indem die an der Plexiglasscheibe wachsenden Wurzeln mit einem auf höchste Helligkeit eingestellten Fotokopierer abgeleitet wurden. Des weiteren wurden die Wurzelfrischmasse, die Wurzellänge sowie die Sproßmasse und die P-Aufnahme von Mais erfaßt.

2.2.7 Beziehung zwischen P-Konzentration und Wurzellänge (Wasserkulturversuch)

Diesem Versuch lag die Frage zugrunde, inwieweit Pflanzen mit verschieden großen Wurzelsystemen die P-Konzentration in einer Nährlösung (= Bodenlösung) absenken können.

Maiskörner (*Zea mays*, cv. Blizzard) wurden 24 Stunden in einer ständig belüfteten 0,01 M CaSO_4 -Lösung bei Zimmertemperatur vorgequollen und anschließend in mit Filterpapier ausgelegten großen Petrischalen vorgekeimt. Das Filterpapier wurde vorher mit 0,01 M CaSO_4 -Lösung befeuchtet. Die Maiskeimlinge wurden bei einer Sproßlänge von 1 cm vorsichtig in

eine zunächst $1/4$ konzentrierte Nährlösung gepflanzt, die in viertägigem Abstand auf $1/2$ - und dann auf die voll konzentrierte Nährlösung gesteigert wurde. Die Nährlösung hatte nachstehende Zusammensetzung:

6 mmol N (NH_4NO_3), 0,3 mmol P (NaH_2PO_4), 4 mmol Ca (CaCl_2), 4 mmol K (K_2SO_4), 1 mmol Mg (MgSO_4), 100 μmol Fe (FeEDTA), 2 μmol B (H_3BO_3), 0,1 μmol Cu (CuSO_4), 0,01 μmol Mo (NH_4 -Molybdat), 0,2 μmol Mn (MnSO_4), 0,1 μmol Zn (ZnSO_4).

Die Anzucht der Maispflanzen und die P-Aufnahme erfolgten in einer Klimakammer bei $20/10^\circ\text{C}$ Tag-/Nachttemperatur, $86 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Lichtintensität und 50-55% Luftfeuchtigkeit.

Im 5-Blatt-Stadium der Maispflanzen begann die eigentliche Studie über die Beziehung zwischen P-Konzentration und Wurzellänge. Die Wurzellänge wurde variiert, indem in einer Variante alle Wurzeln von zwei Maispflanzen in die P-Aufnahmelösung tauchten und in weiteren Varianten die Hälfte bzw. ein Viertel der Wurzeln zweier Pflanzen in der P-Aufnahmelösung wuchsen. Die Abbildung 1 zeigt den Versuchsaufbau schematisch.

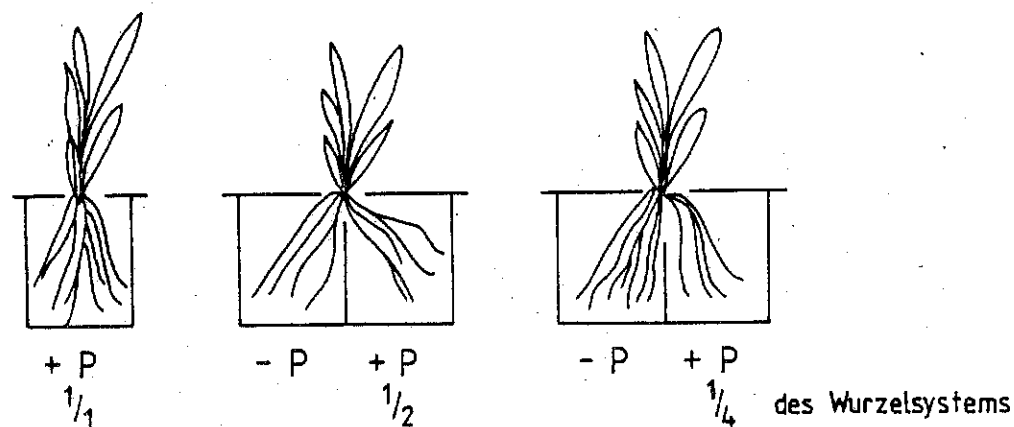


Abb. 1: Schematischer Versuchsaufbau zur Beschreibung der Versuchsvarianten des P-Aufnahmeversuches

Die P-Aufnahmelösung hatte ein Volumen von 1 l Gefäß^{-1} und eine Konzentration von $10 \mu\text{mol P L}^{-1}$. Die Veränderung der P-Konzentration in der Nährlösung in Abhängigkeit der Wurzel-

länge wurde nach Versuchsbeginn in zweistündigem Rhythmus mit der Blaumethode nach Murphy und Riley (1962) gemessen. Die Wurzellänge der intakten Maispflanzen wurde in Anlehnung an das Verfahren für Kartoffeln von Sattelmacher et al. (1983) bestimmt. Das Prinzip dieses Verfahrens beruht auf einer Inkubation der Wurzeln in einer Scribtol-Tusche-Lösung und anschließender Desorption der Tusche in Wasser. Die desorbierte Tuschemenge ist dabei ein Maß für die Wurzellänge bzw. Wurzeloberfläche.

Der Vorteil dieser Wurzellängenmessung besteht darin, daß die Wurzeln nicht in ihrer Aktivität, wie z.B. der Nährstoffaufnahme, beeinträchtigt werden (Sattelmacher et al., 1983).

In Vorversuchen wurde die Scribtol-Tusche-Methode für Mais der Sorte Blizzard geeicht. Dazu wurde das intakte Wurzelsystem von einer Maispflanze für eine Minute in einem Liter einer 1:100 mit Aqua dest. verdünnten Scribtol-Tusche-Lösung (Pelikan AG, Hannover, Scribtol Kunstschrifttusche, schwarz) getaucht. Danach wurde die von den Wurzeln adsorbierte Tusche für 2 Minuten in 500 ml Aqua dest. desorbiert und die Extinktion der Austauschergelösung bei 500 nm im Photometer gemessen. Zusätzlich wurde in der Vorversuchsphase die tatsächliche Wurzellänge der Maispflanzen mit der Linienüberkreuzungsmethode nach Tennant (1975) gemessen.

Die in Abb. 2 dargestellte Beziehung zwischen der gemessenen Wurzellänge und der adsorbierten Tuschelösung ist durch ein hohes Bestimmtheitsmaß von 93,31% gekennzeichnet. Dieser Befund belegt die Zuverlässigkeit der einfach zu praktizierenden Scribtol-Tusche-Methode zur Messung der Wurzellänge von intakten Maispflanzen der Sorte Blizzard.

Für die Beziehung zwischen gemessener Wurzeloberfläche und adsorbierter Tuschelösung konnte nur ein Bestimmtheitsmaß von 88,64% berechnet werden.

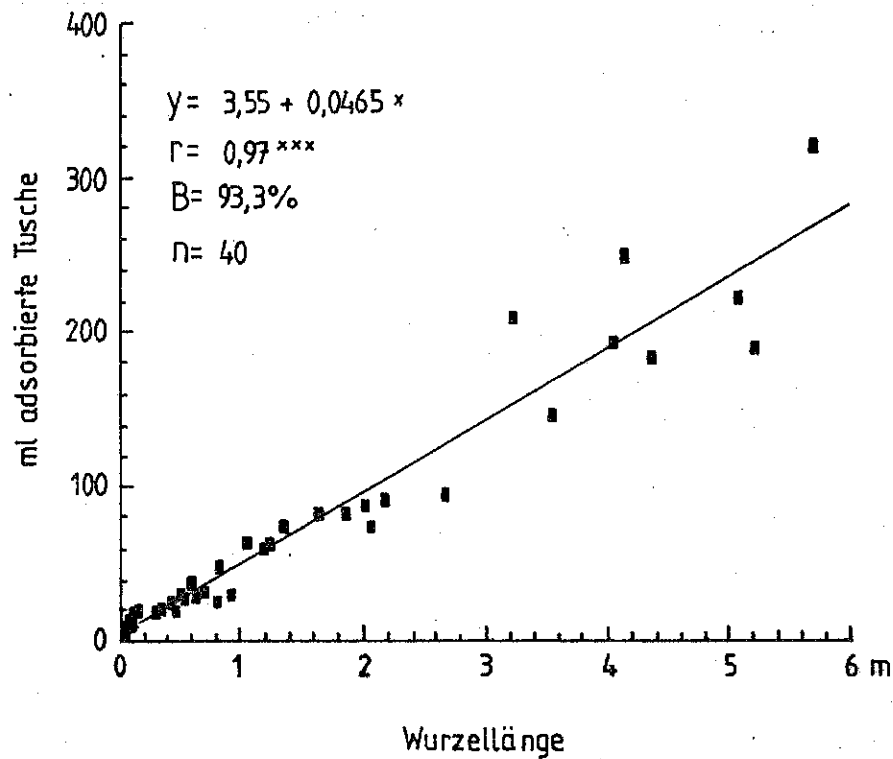


Abb. 2: Beziehung zwischen der von Maiswurzeln adsorbierten Tuschemenge und der gemessenen Wurzellänge

2.2.8 Wirkung langjähriger Anwendung von verschiedenen P-Düngemitteln im Feld (Nordhessen) auf die P-Nachlieferung

Für die Untersuchung der Nachlieferung von langjährig durch verschiedene P-Düngemittel angereicherten Bodenphosphats konnte auf Bodenproben aus langjährigen Feldversuchen zurückgegriffen werden. Im Spätsommer 1983 wurden nach Ablauf der Feldversuchsperiode aus einzelnen Varianten hessischer Düngungsversuche Bodenproben aus der Ackerkrume (0 - 25 cm) gezogen. Angaben über die Varianten, die P-Düngung sowie die Versuchszeiträume der einzelnen Standorte sind in Tabelle 4A zusammengestellt. In der Tabelle 4B sind einige Standort- und Bodeneigenschaften der Versuchsstandorte vor der Anlage der Feldversuche angeführt.

Tabelle 4A: Versuchszeiträume, Varianten und P-Gaben der vergleichenden P-Formen-Versuche unter Feldbedingungen

Standort	Durchschnittl. P-Gabe kg P ha ⁻¹ a ⁻¹	Stallmist	Versuchs- zeitraum	Varianten*				
				P _O	P _{HY}	P _{NO}	P _{Th}	P _{Su}
Burguffeln	48,4	nein	1974-1983	+	+	+	+	-
Dissen	33,2	ja	1964-1981	+	+	-	+	-
Immenhausen "ohne Kalkung"	53,7	ja	1973-1983	+	+	+	-	+
Immenhausen "mit Kalkung"	53,7	ja	1973-1983	+	+	+	-	+

*P_O = Kontrolle
 P_{HY} = Hyperphosphat
 P_{NO} = Novaphosphat
 P_{Th} = Thomasphosphat
 P_{Su} = Superphosphat

Tabelle 4B: Boden- und Standorteigenschaften der vergleichenden P-Formen-Versuche vor Anlage der Feldversuche

Standort	Bodentyp	Ackerzahl	Lage über NN m	pH (CaCl ₂)	Ton %	C _t %
Burguffeln	Löß- Parabraunerde	70	230	5,8	12,5	1,0
Dissen	pseudo- vergleyte Löß- Parabraunerde	65	215	5,8	28,5	1,16
Immenhausen	Löß- Parabraunerde	60	230	5,3	11,4	-

2.2.8.1 Gefäßversuche zur Überprüfung der P-Nachlieferung

Die Nachwirkung des durch verschiedene P-Düngemittel angereicherten Bodenphosphats wurde in einem vierjährigen Gefäßversuch überprüft.

Von den in Tabelle 4A aufgeführten Varianten wurden jeweils sechs kleine Mitscherlich-Gefäße mit Boden gefüllt. Die Tabelle 4B zeigt einige Kenndaten der Feldversuchsstandorte. Als Versuchspflanzen wurden 1984 Weidelgras (*Lolium perenne*, cv. Taptoe), 1985 Grünraps (*Brassica napus*, cv. Akela) und danach Grünmais (*Zea mays*, cv. Badischer Landmais), 1986 Sommerweizen (*Triticum aestivum*, cv. Selpek) und 1987 Sommerroggen (*Secale cereale*, cv. Sorom) angebaut.

Aufgrund eines Herbizidrückstandes in den Bodenproben aus Immenhausen wurden 1984 zweimal Grünraps (*Brassica napus*, cv. Akela) und einmal Weidelgras (*Lolium perenne*, cv. Taptoe) angezogen. Die im Herbst aus dem Boden abgesiebten Vorfruchtreste (Stoppeln und Wurzeln) von Weidelgras, Raps, Mais und Sommerroggen wurden fein vermahlen jeweils vor Aussaat der Pflanzen mit dem Boden einer jeden Variante vermischt.

Vor der Aussaat von Weidelgras, Raps, Mais, Sommerroggen und Sommerweizen wurden alle Böden mit 120 mg N (NH_4SO_4), 150 mg K (KCl) und 50 mg Mg (MgSO_4) kg^{-1} Boden gedüngt. Raps wurde zusätzlich mit 1 mg B (H_3BO_3) kg^{-1} Boden in flüssiger Form gedüngt.

Da das Weidelgras sechsmal in etwa vierwöchigem Rhythmus geschnitten wurde, erhielt es nach jedem Schnitt eine flüssige Nachdüngung von 0,3 g N (NH_4NO_3) und 0,3 g K (KCl) pro Gefäß. Des weiteren wurden Mais, Roggen und Weizen in mehreren flüssigen Gaben ausreichend mit N (NH_4NO_3), K (KCl) und Mg (MgSO_4) versorgt.

Von jeder der genannten Versuchspflanzen wurden der oberirdische Aufwuchs gewogen und in der getrockneten Sproßmasse die P-Konzentration analysiert, um die P-Aufnahme zu berechnen.

2.2.8.2 P-Kinetik (Flossman und Richter)

Die P-Kinetik des durch langjährige Düngung mit verschiedenen P-Formen angereicherten Bodenphosphats wurde mit einer Mehrfachextraktions-Methode nach Flossman und Richter (1982) analysiert. Sie wurde mit nachstehendem Verfahren durchgeführt.

Nach einer 60minütigen Extraktion der Bodenproben mit deionisiertem Wasser im Verhältnis 1:20 wurde die Bodensuspension zentrifugiert und im klaren Überstand die P-Konzentration gemessen (1. Wasserextraktion). Anschließend wurde der Bodensatz erneut mit Wasser im Verhältnis von 1:20 geschüttelt und nach 10, 30 und 120 min. wurden jeweils 30 ml aus der Suspension abpipettiert. Diese so gewonnenen Bodensuspensionen wurden filtriert und zum Filtrat 1 g festes NaCl zugegeben und nach 60 min. nochmals filtriert.

Für die Auflösung von P aus der festen Bodenphase ist festzuhalten, daß der Differentialquotient P_t/t der Abnahme der Ausgangskonzentration P_A proportional ist (Flossmann und Richter, 1982), s. Gleichung 1:

$$\frac{P_t}{t} = K_t \cdot (P_A - P_t) \quad (1)$$

t = Zeit

P_t = freigesetzte P-Menge zum Zeitpunkt t

P_A = Differenz zwischen Kapazitätsfaktor (in diesem Fall CAL-P) und der nach der 1. Wasserextraktion gemessenen P-Menge

K_t = Proportionalitätsfaktor

Der Proportionalitätsfaktor K_t errechnet sich nach Gleichung 2:

$$K_t = \frac{2,303}{t} \cdot \lg \frac{P_A}{P_A - P_t} \quad (2)$$

Dieser Faktor soll nach Flossmann und Ritter (1982) die P-Nachlieferungsgeschwindigkeit von der festen Bodenphase in die Bodenlösung zum Zeitpunkt t mit der Dimension pro min^{-1} charakterisieren.

Nach Multiplikation von K_t mit dem P-Kapazitätsfaktor (CAL-P) erhält man den Wert für die Geschwindigkeit der P-Nachlieferung v_t in $\text{mg P} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Boden} \cdot \text{min}^{-1}$ des CAL-löslichen Phosphats, s. Gleichung 3:

$$v_t = K_t \cdot \text{CAL-P} \quad (3)$$

2.2.8.3 P-Freisetzung mittels EUF und kinetische Modelle zur P-Dynamik im Boden

Uhlenbecker (1989) konnte in Untersuchungen über die Kinetik der Freisetzung von Zwischenschicht-Kalium der Tonminerale nachweisen, daß die erweiterte EUF-Methode eine geeignete Technik zur Simulierung von K-Freisetzungsraten ist. In der hier vorliegenden Arbeit sollte untersucht werden, ob die P-Freisetzung von langjährig durch verschiedene P-Formen angereicherten Bodenphosphats ebenfalls mit der erweiterten EUF-Analyse quantifiziert werden kann. Des weiteren wurde überprüft, ob sich die mit EUF gemessene P-Freisetzung mit kinetischen Diffusionsmodellen beschreiben läßt und ob die Freisetzungsraten eine Bedeutung für die Quantifizierung der

P-Nachlieferung des durch verschiedene P-Formen angereicherten Bodenphosphats haben.

Die Technik der erweiterten EUF-Analyse zur Bestimmung der P-Freisetzung besteht darin, daß 5 g feiner Boden in die EUF-Mittelzelle geschüttet werden und zunächst das normale EUF-Programm gefahren wird (1. Fraktion, 30 min., 20°C, 200V, 2. Fraktion 5 min., 80°C, 400 V). Anschließend wird der Boden nochmals neunmal in fünfminütigem Rhythmus bei 400 V und 80°C extrahiert. Neben der P-Konzentration wurde auch die Ca-Konzentration in den EUF-Extrakten analysiert.

Die Fülle der Gleichungen zur Beschreibung der P-Adsorptions- und P-Desorptionskinetik in Böden ist groß. Chien et al. (1980) versuchten, die Kinetik der P-Freisetzung aus Rohphosphat verschiedener Provenienzen (Florida, North Carolina, Tennessee) mit acht Gleichungen zu quantifizieren. Die Autoren konnten zeigen, daß sich die P-Freisetzungskinetik aus Apatiten am besten mit der Elovich-Funktion beschreiben ließ, s. Gleichung 4:

$$Y = a + b \ln t \quad (4)$$

Y = freigesetztes Phosphat

t = Zeit

a = Konstante

b = Freisetzungsrage

Bei der Elovich-Funktion geht man von einer exponentiellen Abnahme der im Zeitintervall t zu der Zeit t freigesetzten P-Menge (Y) aus. Dabei ist das vom Boden freigesetzte Phosphat abhängig von der bereits desorbierten P-Menge.

Andererseits kann die P-Freisetzung aus Mineralen und Böden auch mit dem parabolischen Diffusionsgesetz (s. Gleichung 5) mathematisch dargestellt werden (Chien und Clayton, 1980).

$$Y = a + b \sqrt{t} \quad (5)$$

Y = desorbierte P-Menge

a = Konstante

b = Freisetzungsrage

t = Zeit

Die Gleichung 5 besagt, daß die vom Boden freigesetzte P-Menge (Y) proportional zur Wurzel aus der Zeit (t) ist.

2.2.9 Rhizosphärenuntersuchungen

Die P-Konzentration in der Rhizosphäre von Raps (*Brassica napus*, cv. Elvira), nach langjähriger Anwendung von verschiedenen P-Düngemitteln im Feld, wurde mit den Bodenproben vom Standort Burguffeln durchgeführt (Angaben über den Standort Burguffeln siehe Kap. 2.2.8).

Dieser Untersuchung lag das von Kuchenbuch und Jungk (1982) entwickelte Verfahren für Rhizosphärenstudien zugrunde.

Die in 0,01 M CaSO_4 vorgekeimten Rapskörner ($1,5 \text{ g Gefäß}^{-1}$) wurden auf ein über dem Boden gespanntes Netz ausgebreitet. Das Kunststoffnetz war so fein, daß nur die Wurzelhaare in den Boden wuchsen. Der Zeitraum zwischen Aussaat und Ernte betrug neun Tage. Die Bestimmung der P-Konzentration in der Rapsrhizosphäre erfolgte in dreifacher Wiederholung pro Variante. Nach der Ernte der Rapskeimlinge wurde der Rhizoboden auf entsprechenden Bodenhaltern fixiert und in flüssigem Stickstoff schockgefroren.

Die gefrorenen Bodenblöcke wurden über Nacht in einem Gefriermikrotom bei -20°C aufbewahrt und am folgenden Tag mit einer Schichtdicke von 0,2 mm geschnitten. Die Bodenschnitte wurden in Petrischalen aufgefangen, bei 60°C getrocknet und

mit Aqua dest. im Verhältnis von 1:250 extrahiert. In den klaren Extrakten wurde die P-Konzentration mit der Methode von Murphy und Riley (1962) bestimmt.

2.3 Analysen

2.3.1 Boden

Für die Bodenanalysen wurden die Bodenproben luftgetrocknet, sofern nicht anders erwähnt, gemahlen und auf kleiner 1 mm abgesiebt.

- pH-Wert: 0,01 M CaCl_2 , Boden/Lösungsverhältnis 1:2,5
 - Humus: nach Leidenfrost (1973)
 - Korngrößenverteilung: Pipett-Methode (Köhn, 1929)
 - Kalium: CAL-Methode (Schüller 1969)
 - Magnesium: CaCl_2 -Extraktion nach Vorschlag von Schachtschabel, 1954)
 - Phosphat: EUF-Technik (Nemeth, 1979)
 - CAL-Methode (Schüller, 1969)
 - DL-Methode (Egner u. Riehm, 1955)
 - P-Wasser-Methode (van der Paauw et al., 1971)
 - Gesamt-P-Bestimmung im Perchlorsäureaufschluß
 - Bodenlösung (Magistad et al., 1945)
 - P-Fraktionierung (Kurmies, 1972)
 - P-Kinetik (Flossmann und Richter, 1982)
 - Mehlich-^{III}-Methode (Mehlich, 1982)
- Zusammensetzung der Me^{III} -Extraktionslösung: 0,2 M $\text{CH}_3\text{-COOH}$; 0,25 M NH_4NO_3 ; 0,015 M NH_4F ; 0,013 M HNO_3 ; 0,001 M EDTA, pH: 2,5; 2,5 cm^3 Boden werden 5 min. mit 25 ml Extraktionslösung

horizontal in 100 cm³ PVC-Weithalsflaschen geschüttelt. In den Filtraten können die Nährstoffe P, K, Ca, Mg, Na, Mn, Zn, Cu und Fe analysiert werden.

Die Konzentration wurde in den Me-^{III}-Extrakten nach der Vorschrift von Murphy und Riley (1962) gemessen.

- P-Bestimmung mit Anionenaustauscherharz-Technik:

Lufttrockener und auf kleiner 0,15 mm abgesiebter Boden (90 g) wurden mit 30 g mit NaOH beladenes Dowex 1x4 Anionenaustauscher-Harz (20 - 50 mesh. Gegenion: Cl⁻) vermischt und die entsprechenden Wassermengen hinzugegeben.

Das Austauscherharz wurde aktiviert, indem das Harz mit Wasser aufgeschlämmt, mit 2 M HCl gewaschen und anschließend mit Wasser neutral gewaschen wurde. Danach wurde das Harz mit 2 M NaOH beladen und wiederum mit Wasser neutral gewaschen und bei 60°C im Umlufttrockenschrank getrocknet.

Nach der gewünschten Inkubationsphase, in dieser Arbeit sieben Tage, wurde das Harz wieder vom Boden getrennt, indem das Boden/Harz-Gemisch über einem Sieb (kleiner 0,20 mm lichte Maschenweite) mit Wasser gewaschen wurde. Da der Boden auf kleiner 0,15 mm abgesiebt war, verblieb nur das Austauscherharz auf dem Sieb mit einer lichten Maschenweite von 0,20 mm. Dieses aus dem Boden zurückgewonnene Harz wurde vom Sieb mit 50 ml 10% NaCl-Lösung in ein 250 ml Becherglas überspült und in diesem für 45 Minuten bei 60°C erhitzt. Nach dem Abkühlen auf Zimmertemperatur wurde das in der 10% NaCl-Lösung befindliche Harz quantitativ über einen Blaubandfilter in einen 100 ml Kolben überspült, das Harz mit 10% NaCl-Lösung nachgewaschen und mit dieser Lösung bis zur Marke aufgefüllt.

In den klaren Anionenaustauscher-Eluaten erfolgte die Bestimmung der P-Konzentration mit der P-Blaumethode nach Murphy und Riley (1962).

2.3.2 Pflanzen

Zur Bestimmung der Trockenmasse wurden die Pflanzenproben generell bei 105°C getrocknet und fein gemahlen.

Die P- und K-Bestimmung erfolgte nach trockener Veraschung (500°C), Aufnehmen der Asche mit ca. 80°C heißer 5 M HNO₃, Filtration und P-Analyse mit der Ammoniummolybdat-Vanadat-Gelbmethode. Die Messung der K-Konzentration erfolgte mittels Flammenemission.

- Stickstoff: Kjeldahl-Methode
- Ca, Mg und Mikronährstoffe: Nasse Veraschung.

Wurzeluntersuchungen

Die Wurzeln wurden generell über einem 2 mm Sieb aus dem Boden gewaschen und von Vorfruchtresten gereinigt. Die Wurzelfrischmasse wurde nach vorsichtigem Abtupfen der Wurzeln mit Filterpapier gewogen.

Die Wurzellänge wurde mit der Linienüberkreuzungsmethode nach Tennant (1975) gemessen.

Untersuchung der Mykorrhizierung der Wurzeln

Nach dem Auswaschen wurden die gereinigten Wurzeln in einer Ethanol/Eisessig-Lösung (9 Teile 70%iges Äthanol und 1 Teil Eisessig) konserviert (Gerlach, 1984).

Die Infektionsrate der Wurzeln mit Mykorrhiza (% infizierte Wurzellänge) wurde an 100 gefärbten Wurzelstücken einer jeden Probe untersucht. Die Länge der Wurzelstücke betrug 1 cm. Das Prinzip dieser Bonitierung besteht darin, daß die Wurzelstückchen auf einen Objektträger ausgebreitet werden und die Rate der Mykorrhizierung unter einem Mikroskop bei einer 100- bis 125fachen Vergrößerung geschätzt wird (Schenck, 1982).

Weitere Angaben zum An- und Entfärben der Wurzeln für die Untersuchung der Mykorrhizierung sind bei Leopold (1990) detailliert beschrieben.

2.3.3 Umsatz von Rohphosphaten in der Schwermineralfraktion im Boden

Als Schwerminerale werden alle die Minerale bezeichnet, deren Dichte größer als $2,89 \text{ g/cm}^3$ ist. Aufgrund der Schwermineralzusammensetzung von Gesteinen können wichtige morphogenetische Aussagen über die Entwicklung der Erdkruste getroffen werden (Boenigk, 1983).

Bei der Schwermineralanalyse, z.B. von Gesteinen, werden die Schwerminerale durch eine Dichtezentrifugation im Na-Wolframat-Medium abgetrennt. Die Erfassung des Mineralspektrums der Schwermineralfraktion erfolgt dann röntgenographisch.

Wegen der Zugehörigkeit von Apatiten zur Gruppe der Schwerminerale (Boenigk, 1983) sollte überprüft werden, ob die in der Lithosphärenforschung gebräuchliche Schwermineralanalyse auch auf Böden übertragbar ist und ob mit dieser Technik der Umsatz von Apatit im Boden erfaßt werden kann. Dieser Versuchsansatz war Grundlage für die Überlegung, ob nach langjähriger Anwendung von Hyperphosphat eventuell die Fraktion der Schwerminerale durch Apatite im Boden angereichert wird. Seither wurde die Anreicherung von Apatiten nach Rohphosphatdüngung indirekt mit einer P-Fraktionierung nach Kurmies (1972), Scharafat (1970) oder nach Chang und Jackson (1957) untersucht. Bislang ist aber noch nicht geklärt, ob die z.B. von Wildhagen et al. (1983) oder von Werner und Wiechmann (1970) beobachtete Anreicherung der Ca-Phosphatfraktion nach Rohphosphatdüngung aus Apatiten besteht.

Um dieses zu untersuchen, wurden zwei Versuche durchgeführt. Ein Versuch diente zur Überprüfung der Schwermineralanalyse für die Wiederfindung von gedüngtem Hyperphosphat in der Schwermineralfraktion des Bodens "Kleinlinden". Dazu wurde der Versuchsboden im Inkubationsversuch mit steigenden P-Mengen als Hyperphosphat (32,09% Gesamt- P_2O_5 -Gehalt) gedüngt. Die Varianten waren P_0 (= Kontrolle), 362,2 und 800 mg P kg^{-1} .

Boden, wobei die Bodenmenge 200 g Gefäß⁻¹ betrug. Jede Variante wurde in dreifacher Wiederholung angesetzt. Nach einer siebentägigen Inkubationsdauer bei 60% der maximalen Wasserkapazität wurden die Bodenproben bei 40°C getrocknet, der Schwermineraltrennung und weiteren Analysen unterzogen. Des weiteren wurden auch aus dem Düngemittel Hyperphosphat (32,09% Gesamt-P₂O₅-Gehalt) die Schwerminerale abgetrennt. In einem weiteren Versuch wurde eine Schwermineralanalyse in den Bodenproben aus dem langjährigen vergleichenden P-Formen-Feldversuch "Dissen" durchgeführt.

Arbeitsanleitung für die Schwermineraltrennung und -analyse in Böden

Vor der eigentlichen Dichtentrennung wurde der Boden für 30 Stunden mit 30%iger H₂O₂-Lösung auf dem Wasserbad behandelt, um die organische Substanz zu zerstören. Diese Vorbehandlung war unbedingt erforderlich, da sonst die Ausbeute der Schwerminerale zu gering war. Danach wurde der Boden bei 105°C getrocknet, gemörsert und auf kleiner 1 mm abgesiebt. Anschließend erfolgte die Abtrennung der Schwerminerale aus dem Boden mit Natriummetawolframat-Lösung ($\rho = 2,90 \text{ g/cm}^3$) unter Zuhilfenahme einer Zentrifuge. Dazu wurden 2 g Boden in 90 cm³ große Zentrifugenbecher eingewogen und mit 60 ml der Natriummetawolframatlösung unterschichtet und für zwölf Stunden auf einem Rotationsschüttler geschüttelt. Danach wurden die Proben zehn Minuten bei 10.000 U/min. zentrifugiert. Der Überstand wurde vorsichtig dekantiert und der Bodensatz (= Schwerminerale) nochmals 1x mit Natriumwolframat ($\rho = 2,90 \text{ g/cm}^3$) sowie 3x mit deionisiertem Wasser für jeweils zehn Minuten bei 10.000 U/min. nachgewaschen.

Die auf diese Art und Weise gewonnene Schwermineralfraktion wurde bei 105°C getrocknet, auf eine Partikelgröße von kleiner 4 μm gemahlen und als Streupräparat geröntgt. Die Messungen erfolgten im Institut für Geowissenschaften und

Lithosphärenforschung der Justus-Liebig-Universität mit einem Siemens D-501 Diffraktometer. Ferner wurde in der Schwermineralfraktion der Gesamt-P-Gehalt analysiert.

3. Ergebnisse

3.1 Faktoren der Rohphosphatlöslichkeit im Boden

Zu den Faktoren der Löslichkeit von Rohphosphaten im Boden zählte bislang vor allem der pH-Wert (Mengel, 1986). In den nachstehenden Kapiteln werden die verschiedenen bodenchemischen Einflußgrößen auf die Umsetzung von Hyperphosphat im Boden vorgestellt. Zusätzlich wird über den Faktor Zeit auf die Löslichkeit von Hyperphosphat im Boden berichtet.

3.1.1 pH-Wert und P-Konzentration

In der Abbildung 3 ist der Einfluß verschiedener pH-Werte auf die Löslichkeit des durch verschiedene P-Formen angereicherten Bodenphosphats beispielhaft für den Standort Burguffeln dargestellt. Entsprechend dem Anteil an Rohphosphat der verschiedenen P-Formen wurden bei pH 5, 6, 7 und 8 nach Thomasphosphatdüngung jeweils die höchsten und bei Hyperphosphat die niedrigste P-Löslichkeit bestimmt. Erst bei einem pH-Wert von < 5.0 erhöhte sich besonders die P-Löslichkeit von langjährig durch Hyperphosphat angereichertem Phosphat. Dieser Befund zeigt, daß die chemische Löslichkeit von Hyperphosphat erst bei pH-Werten von < 5 in beachtlichem Umfang ansteigt.

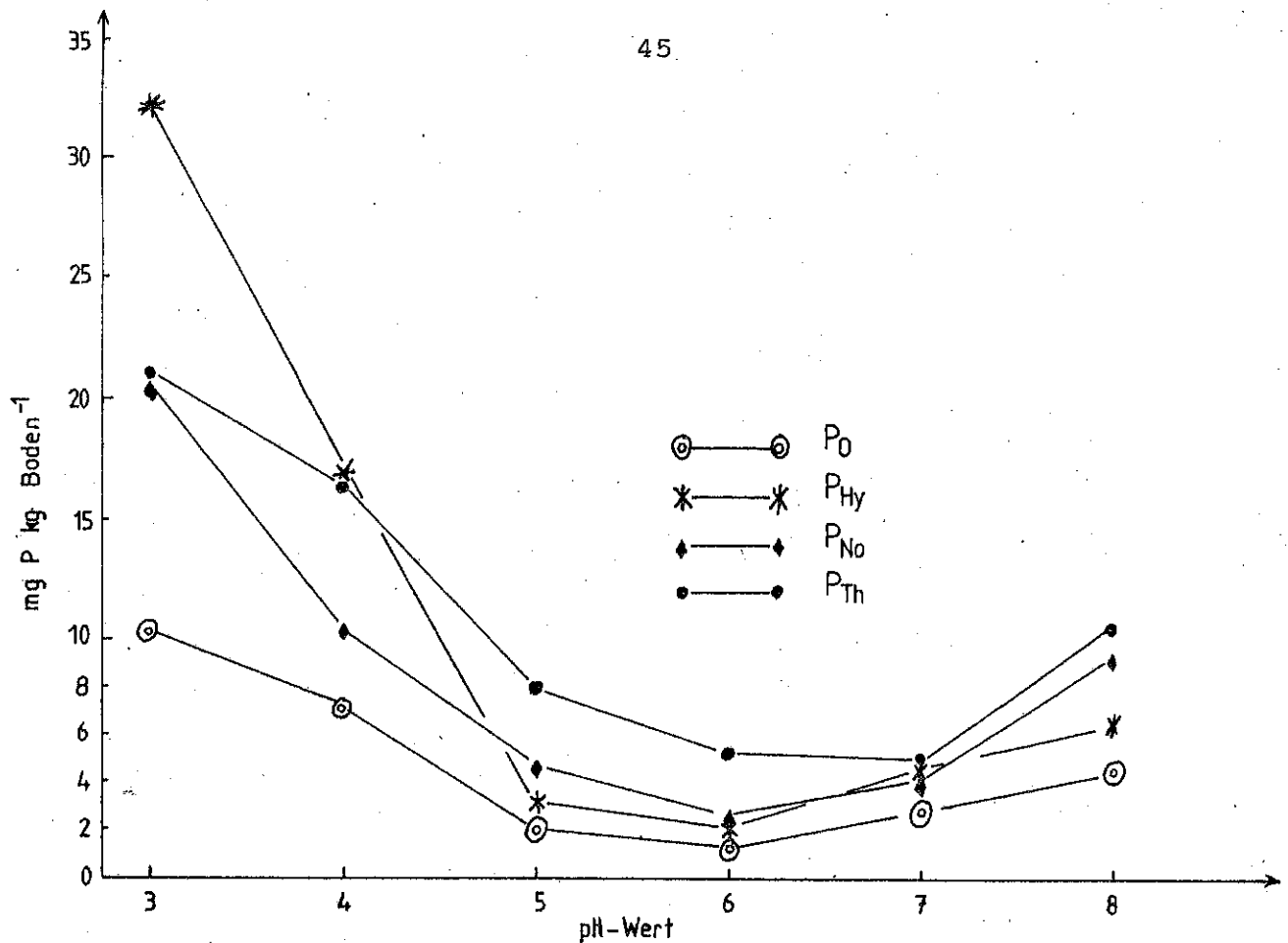


Abb. 3: Einfluß des pH-Wertes auf die Löslichkeit des durch verschiedene P-Formen angereicherten Phosphats. Standort: Burguffeln

Neben der H^+ -Konzentration wird die P-Freisetzung aus Rohphosphat auch durch die P-Konzentration im Boden beeinflusst. Dieses zeigt die Abbildung 4. Die P-Freisetzung aus dem Hyperphosphat wurde bereits durch die niedrigste Superphosphatgabe vermindert, wobei die Hemmung durch steigende P-Zugaben von Superphosphat noch gefördert wurde. Da mit dem Superphosphat auch Ca-Ionen, vor allem als $CaSO_4$, gedüngt werden, bleibt die Frage offen, ob die gesteigerte P-Menge oder die ebenfalls gesteigerte Ca-Zufuhr die P-Freisetzung aus dem Apatitmineral erniedrigte. Untersuchungen von Fritsch und Werner (1989) deuten darauf hin, daß die Löslichkeit von weicherdigem Rohphosphat im gleichen Umfang durch Ca^{2+} - und P-Ionen vermindert wird.

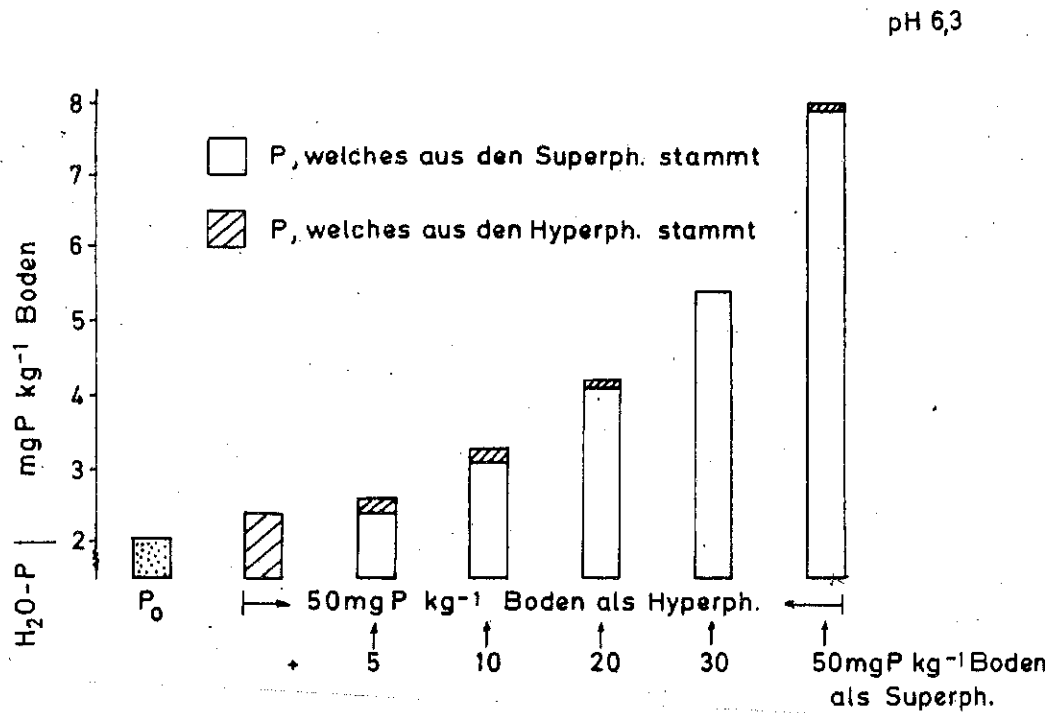


Abb. 4: Einfluß gesteigerter Superphosphatgaben auf die Löslichkeit von Hyperphosphat (Boden "Pohlheim", pH 5,1)

3.1.2 Zeit (Inkubationsversuch)

Die Abbildungen 5 - 7 zeigen den Einfluß von Hyper- und Superphosphat im Vergleich zur ungedüngten Variante auf die mit verschiedenen Methoden extrahierbaren P-Gehalte nach einer siebentägigen und zweijährigen Verweildauer in drei Böden. Hyperphosphat bewirkte nur in dem sehr sauren Boden "Altenkirchen" (pH: 4,0) in gleichem Umfang wie Superphosphat einen Anstieg der CAL-, Wasser- und Mehlich^{III}-Gehalte sowie eine Erhöhung der P-Konzentration der Bodenlösung (s. Abb. 5).

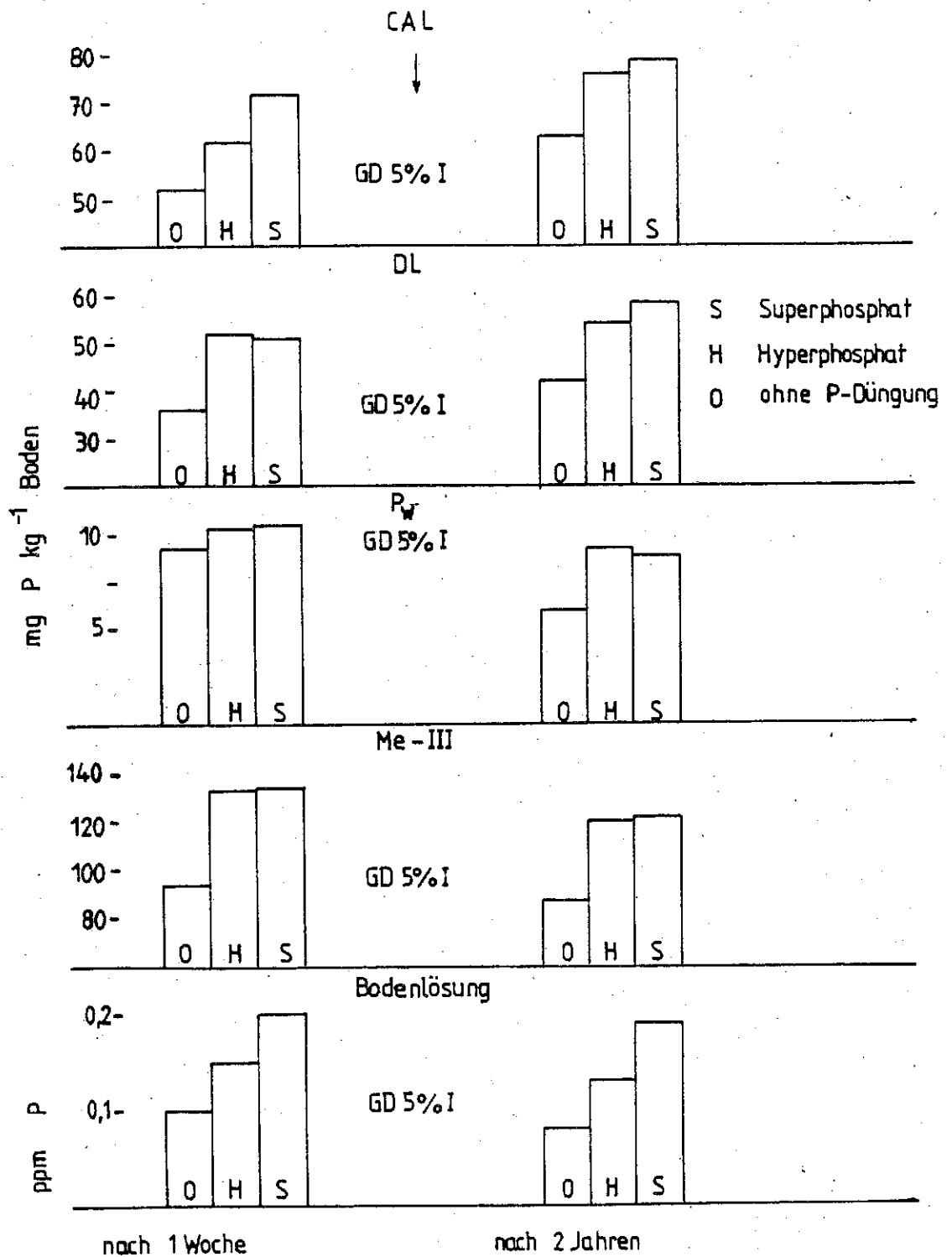


Abb. 5: Einfluß der Zeit und der P-Form auf die mit verschiedenen Methoden extrahierbaren P-Gehalte im Boden. Boden "Altenkirchen", pH 4,0

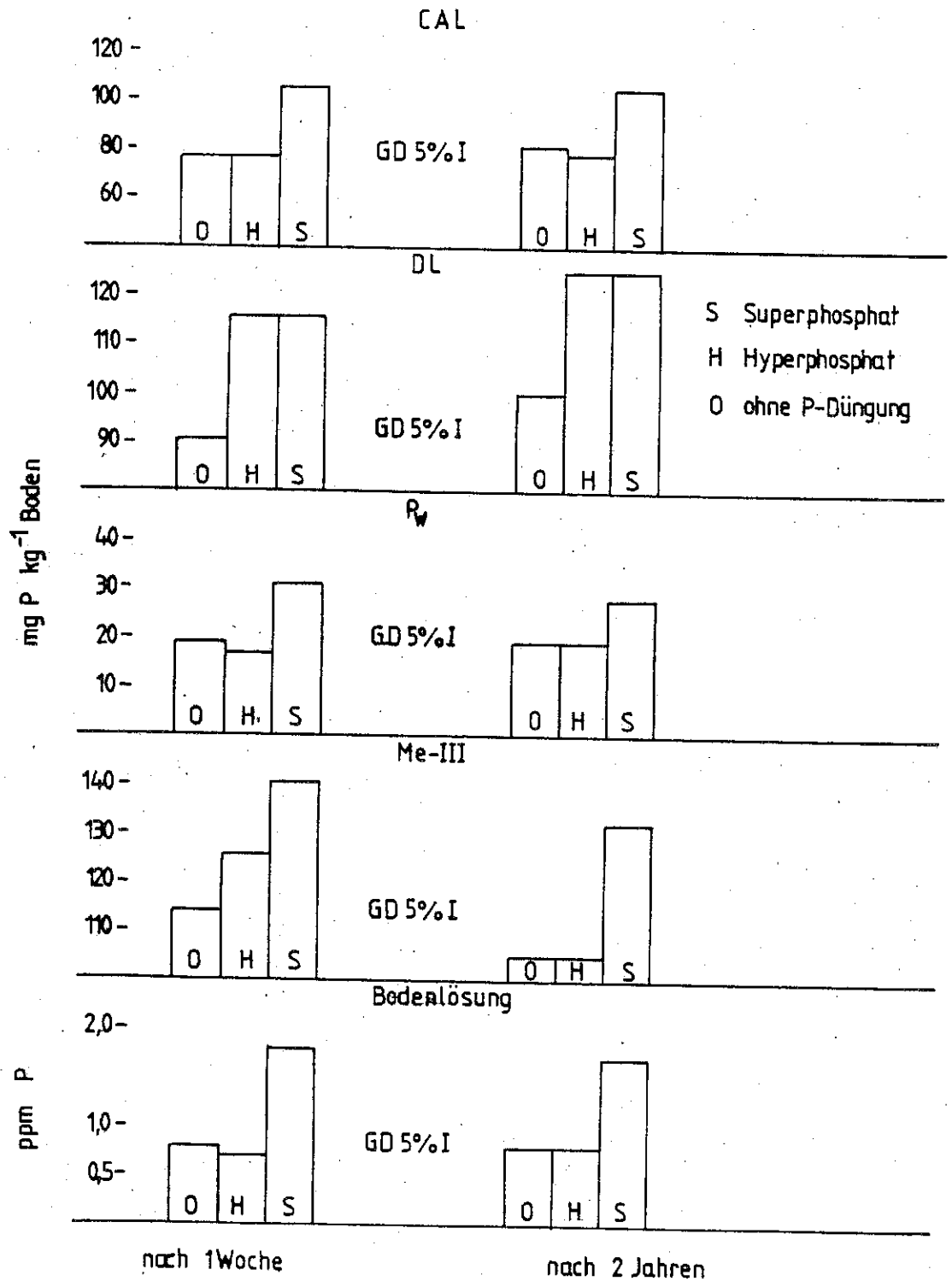


Abb. 6: Einfluß der Zeit und der P-Form auf die mit verschiedenen Methoden extrahierbaren P-Gehalte im Boden. Boden "Buseck", pH 5,3

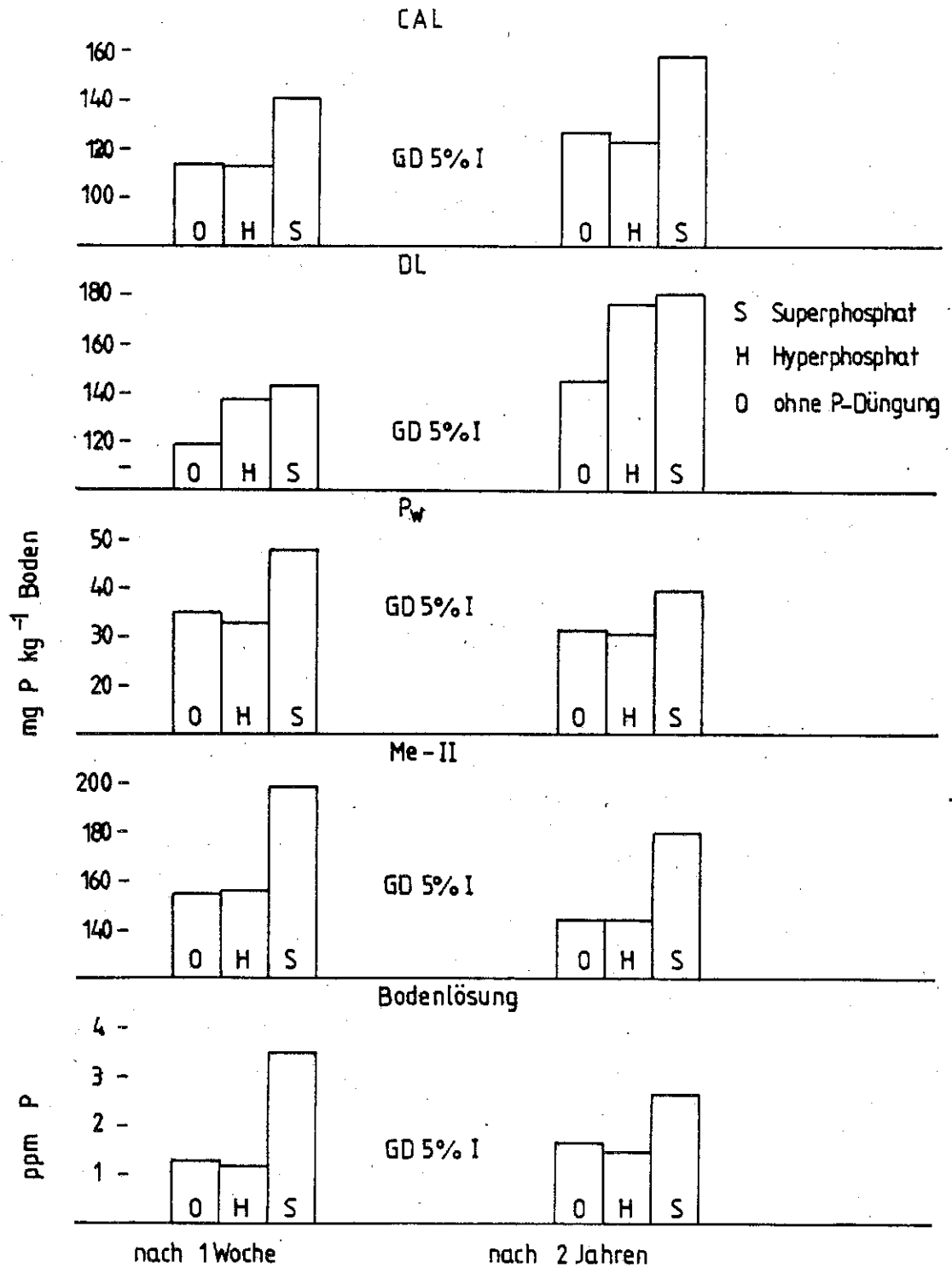


Abb. 7: Einfluß der Zeit und der P-Form auf die mit verschiedenen Methoden extrahierbaren P-Gehalte im Boden. Boden "Lützellinden", pH 6,5

Auf den Böden mit pH 5,3 bzw. 6,5 war weder nach sieben Tagen noch nach zwei Jahren eine Wirkung von Hyperphosphat auf die P-Konzentration der Bodenlösung sowie auf die CAL- und P-Wasser-Gehalte zu erkennen (s. Abb. 6 und 7). Die anfänglich gemessene Zunahme an Mehlich^{III}-extrahierbarem Phosphat in der Hyperphosphatvariante, im Vergleich zur Kontrollvariante des Bodens "Buseck", war nach zwei Jahren nicht mehr sichtbar (s. Abb. 6). Vergleicht man die Wirkung von Superphosphat mit der von Hyperphosphat auf allen drei Böden, so ist festzustellen, daß das Superphosphat in weit stärkerem Umfang als das Hyperphosphat in verfügbares Phosphat umgewandelt wurde. Die Ergebnisse der DL-Analyse bestätigen den bekannten Befund, daß nach Hyperphosphat-Anwendung fast die gleiche P-Menge gelöst wurde, wie nach einer Düngung mit einer voll aufgeschlossenen P-Form (s. Abb. 5 - 7). Vergleicht man aber die mit den verschiedenen Methoden extrahierten P-Mengen nach siebentägiger und zweijähriger Inkubation, so wird deutlich, daß die Behauptung, daß weicherddige Rohphosphate erst nach einer gewissen Zeit in lösliche P-Formen umgewandelt werden, zumindest für den zweijährigen Versuchszeitraum, nicht zutraf. Die Befunde dieses Versuches zeigen vielmehr, daß die Verfügbarkeit von gedüngtem Hyper- bzw. Superphosphat eher vermindert wurde, wie die Abnahme des Wasser- und Mehlich^{III}-löslichen Phosphats sowie die P-Konzentration in der Bodenlösung bei allen Varianten der drei Böden zeigte. Diese Abnahme dürfte mit dem Prozeß der P-Alterung (binukleare P-Adsorption) zu erklären sein (Barekzai und Mengel, 1985). Widersprüchlich sind dagegen die Befunde der Lactat-Methoden. Mit der DL- und CAL-Methode wurde nach zwei Jahren in allen Varianten der drei Böden mehr Phosphat gelöst als nach einer Woche Inkubationsdauer. Dieser Unterschied könnte auf die Mineralisation von höhermolekularen organischen P-Verbindungen zu niedermolekularen erklärt werden, wobei das niedermolekulare organische Phosphat während der Lactatextraktion in lösliches anorganisches Phosphat umgewandelt wurde.

3.1.3 Erhaltungsdüngung (Gefäßversuch)

In diesem zweijährigen Gefäßversuch wurde einerseits die Ertragswirksamkeit von Hyper- und Superphosphat bei drei verschiedenen Böden untersucht, andererseits sollte die Frage überprüft werden, ob durch eine Entzugsdüngung, entsprechend der P-Aufnahme der Pflanzen, mit Hyper- bzw. Superphosphat das Niveau an "verfügbarem" Bodenphosphat aufrecht erhalten werden kann.

Böden

Die Abbildungen 8 - 10 zeigen vergleichend die CAL-P- und P-Wasser-Gehalte nach der P-Düngung in Form von Hyper- und Superphosphat im Frühjahr 1984, sowie die P-Konzentrationen nach der P-Entzugsdüngung in Höhe des zuvor von Weidelgras in der Hyper- und Superphosphatvariante aufgenommenen Phosphats im Frühjahr 1985. In der Superphosphatvariante waren die CAL-P-Gehalte und P-Wasser-Gehalte bei allen drei Böden stärker angestiegen als in der Hyperphosphatvariante (s. Abb. 8, 9 und 10). Vergleicht man die CAL-P- und P-Wasser-Gehalte der drei Böden in der Variante ohne P-Düngung mit denen der Hyperphosphatvariante, so ist festzustellen, daß das Hyperphosphat nur beim Boden "Altenkirchen" (pH 4,0; Abb. 8) eine deutliche Zunahme an CAL- und wasserlöslichem Phosphat induzierte. Weiterhin zeigen die in den Abbildungen 8 - 10 dargestellten Befunde, daß das Niveau an CAL-P und P-Wasser von 1984 bei keinem der drei Böden mit Hyperphosphat im Jahre 1985 aufrecht erhalten wurde. Auch in der Superphosphatvariante der Böden "Altenkirchen" (Abb. 8) und "Buseck" (Abb. 9) wird deutlich, daß die P-Düngung in Höhe des P-Entzuges nicht ausreichte, um das Niveau an verfügbarem Phosphat konstant zu halten. Die genannten Böden haben pH-Werte von 4,0 bzw. 5,3. Beim Boden "Lützellinden" (Abb. 10), dessen pH-Wert 6,5 beträgt, fiel der Gehalt an CAL-P nach der Entzugsdüngung in der Superphosphatvariante nicht ab. Der beobach-

tete Rückgang der P-Gehalte nach einer Entzugsdüngung in Form von Superphosphat dürfte mit den nicht optimalen pH-Werten der Böden "Altenkirchen" und "Buseck" und der damit verbundenen P-Alterung bzw. P-Adsorption erklärt werden.

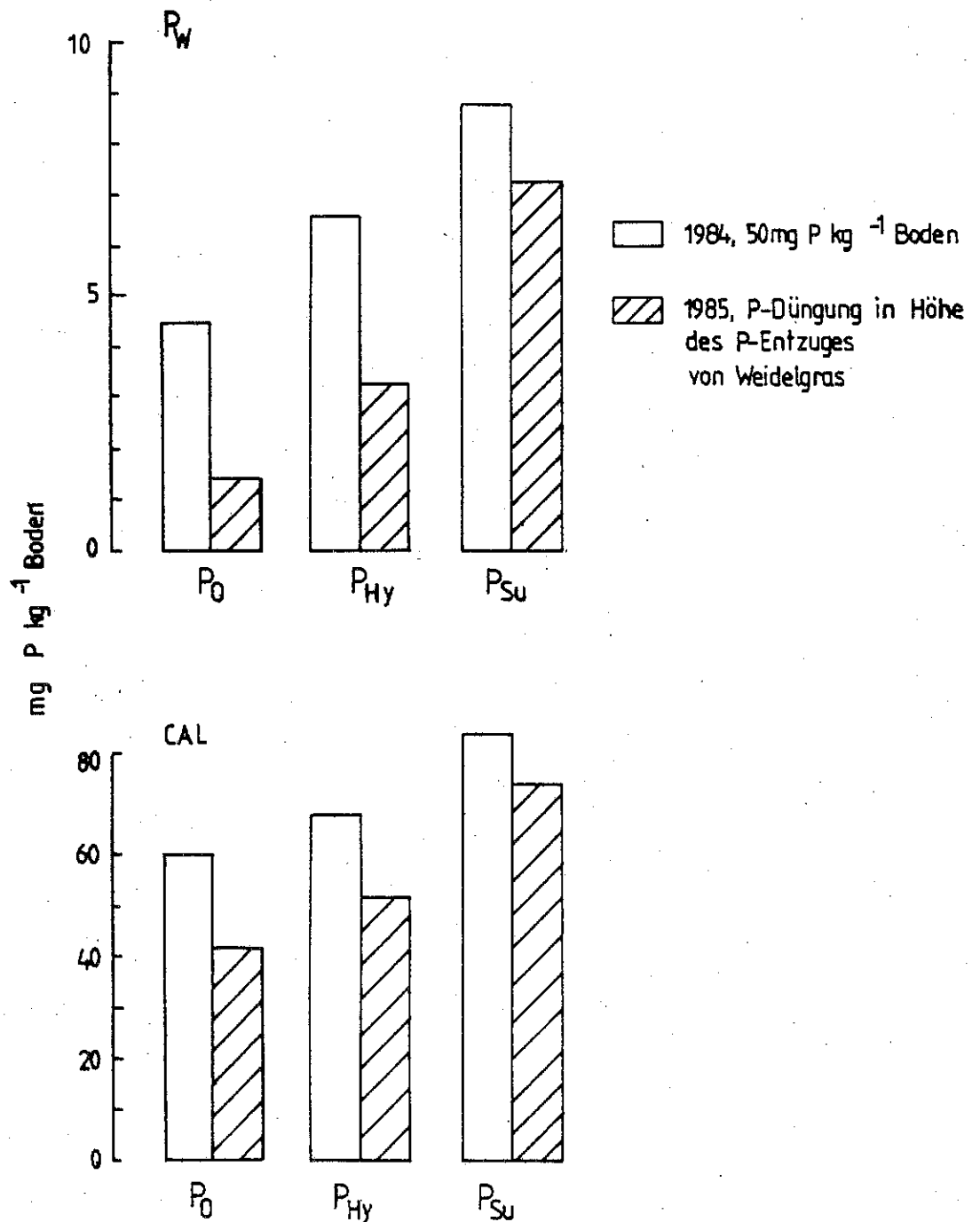


Abb. 8: Einfluß der P-Düngung sowie einer Entzugsdüngung mit Hyper- und Superphosphat auf das CAL- und Wasserlösliche Phosphat. Boden "Altenkirchen", pH 4,0

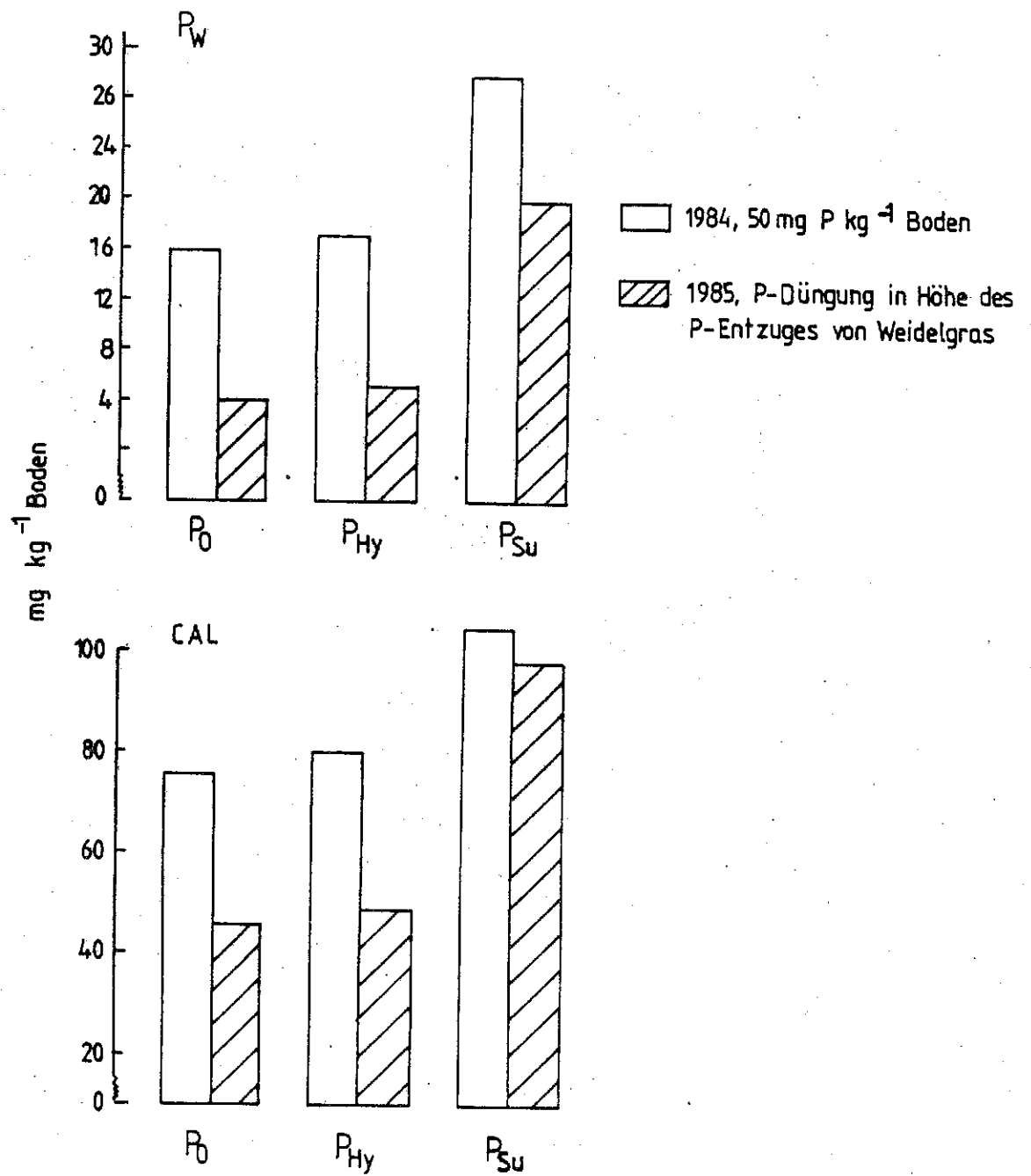


Abb. 9: Einfluß der Düngung sowie einer Entzugsdüngung mit Hyper- und Superphosphat auf das CAL- und Wasserlösliche Phosphat. Boden "Buseck", pH 5,3

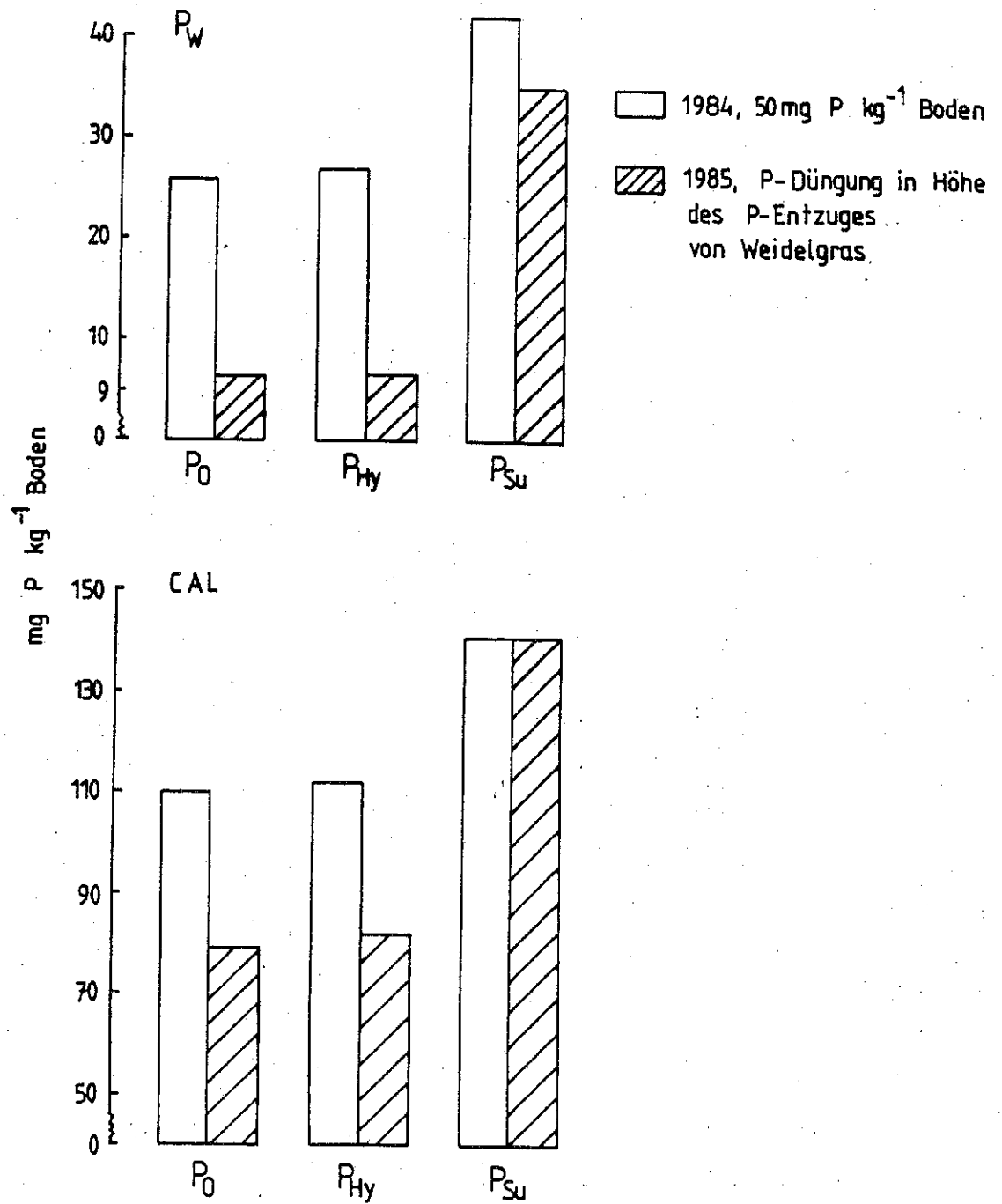


Abb. 10: Einfluß der P-Düngung sowie einer Entzugsdüngung mit Hyper- und Superphosphat auf das CAL- und Wasserlösliche Phosphat. Boden "Lützellinden", pH 6,5

Pflanzen

Im ersten Versuchsjahr hatte weder die Hyper- noch die Superphosphatdüngung bei keinem der drei Böden einen Einfluß auf die Weidelgraserträge (Ergebnisse nicht gezeigt). Die P-Entzüge des Weidelgrases spiegeln aber die Löslichkeit der beiden Düngemittel wider (Abb. 11). Auf allen drei Böden nahm das Weidelgras in der Superphosphatvariante mehr Phosphat auf als in der Hyperphosphatvariante.

Im darauffolgenden Versuchsjahr (1985), in dem die Höhe der P-Düngung auf den P-Entzügen von Weidelgras basierte, wird einerseits der Einfluß der P-Versorgung sowie des pH-Werts der Böden auf den Effekt der P-Düngung, andererseits aber auch der Einfluß von P-Versorgung und pH-Wert auf die Ertragswirksamkeit von Hyper- und Superphosphat sichtbar (s. Abb. 12). Auf dem Boden "Altenkirchen", der den niedrigsten pH-Wert und die geringste P-Versorgung aufweist, wurden durch die P-Düngung die höchsten Ertragszuwächse erzielt. Bei diesem Boden bestanden aufgrund des sehr niedrigen pH-Werts keine Ertragsunterschiede bei Raps zwischen der Hyper- und Superphosphatvariante. Der nach Raps angebaute Mais erzielte dagegen in der Superphosphatvariante einen signifikant höheren relativen Ertragszuwachs als in der Hyperphosphatvariante (Abb. 12). Offenbar reichte die P-Freisetzungsrates des Hyperphosphat nicht aus, trotz des pH-Werts von 4,0, um einen gleich hohen Maisertrag zu gewährleisten wie in der Superphosphatvariante.

Mit steigendem Boden-pH und besserer P-Versorgung der Böden ging die Wirkung der P-Düngung auf die relativen Ertragszuwächse zurück (Abb. 12). Dieses war besonders in den Hyperphosphatvarianten ausgeprägt. Hyperphosphat zeigte im Gegensatz zu Superphosphat auf dem Boden "Buseck" keine Wirkung auf den Raps-ertrag, da vermutlich die P-Freisetzung aus dem Apatit noch durch die zu hohe P-Konzentration im Boden gehemmt wurde. Erst durch das Absenken des löslichen Phosphats durch die P-Aufnahme von Raps zeigte Hyperphosphat eine positive Wirkung auf den Maisertrag, die aber durch Superphosphat signifikant übertroffen wurde.

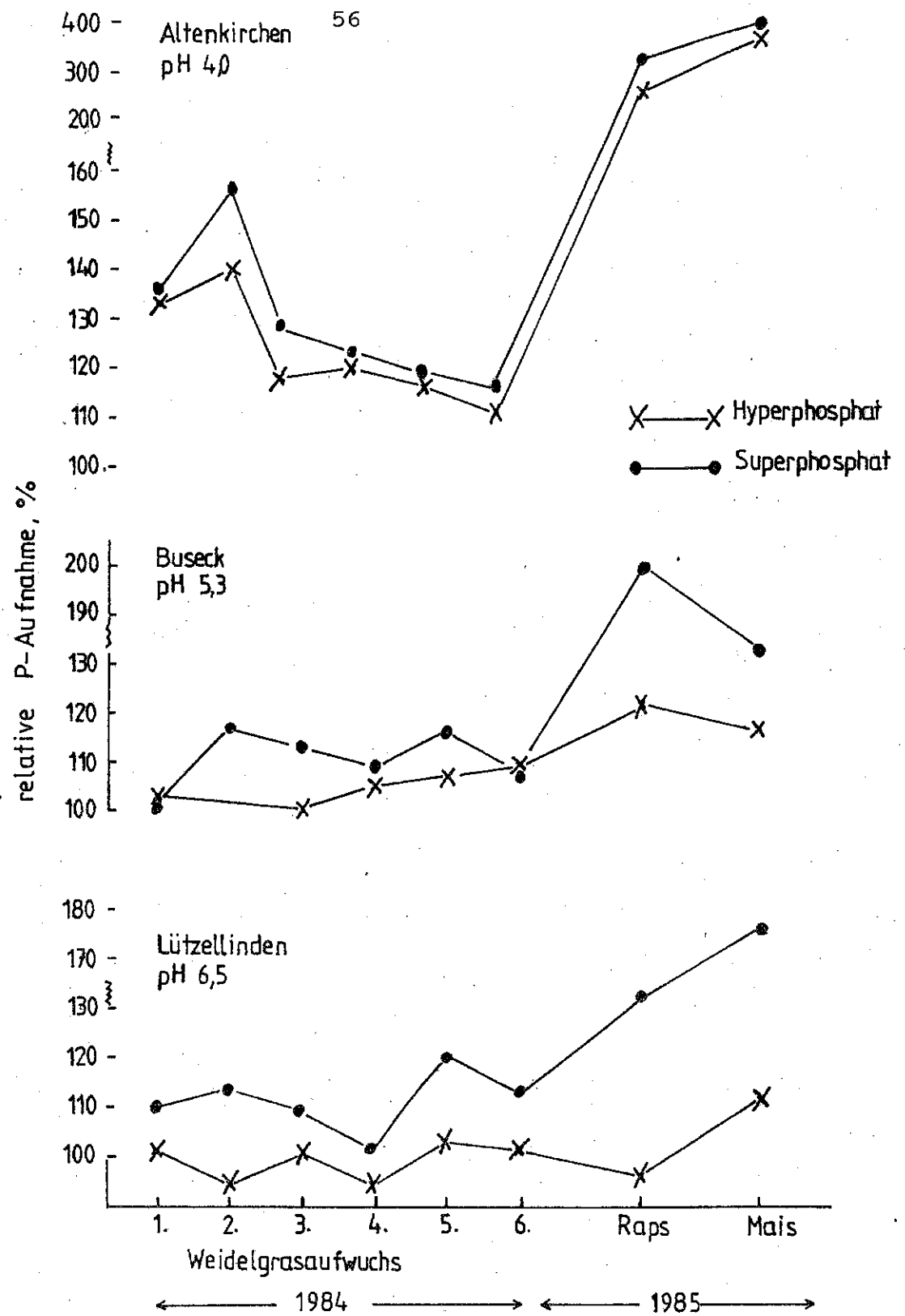


Abb. 11: Einfluß einer P-Düngung (1984) sowie einer Entzugsdüngung (1985) mit Hyper- und Superphosphat auf die relative P-Aufnahme von *L. perenne*, Raps und Mais bei drei Böden (P-Aufnahme der P_0 -Variante = 100%)

Bei dem Boden "Lützellinden" (pH 6,5) hatte die P-Düngung keinen Einfluß auf die Rapserträge, da auch nach der intensiven P-Aufnahme von Weidelgras noch genügend verfügbares Boden-Phosphat vorhanden war (Abb. 12). Im Gegensatz zu den Böden "Altenkirchen" und "Buseck" stieg beim Boden "Lützellinden" der Maisertrag nur in der Superphosphatvariante an. Das Hyperphosphat blieb ohne Wirkung auf die Sproßmasse von Mais, da bei dem Boden "Lützellinden" neben der relativ hohen P-Konzentration auch noch die niedrige H^+ -Konzentration negativ auf die Löslichkeit von Rohphosphat gewirkt haben dürfte (Abb. 12).

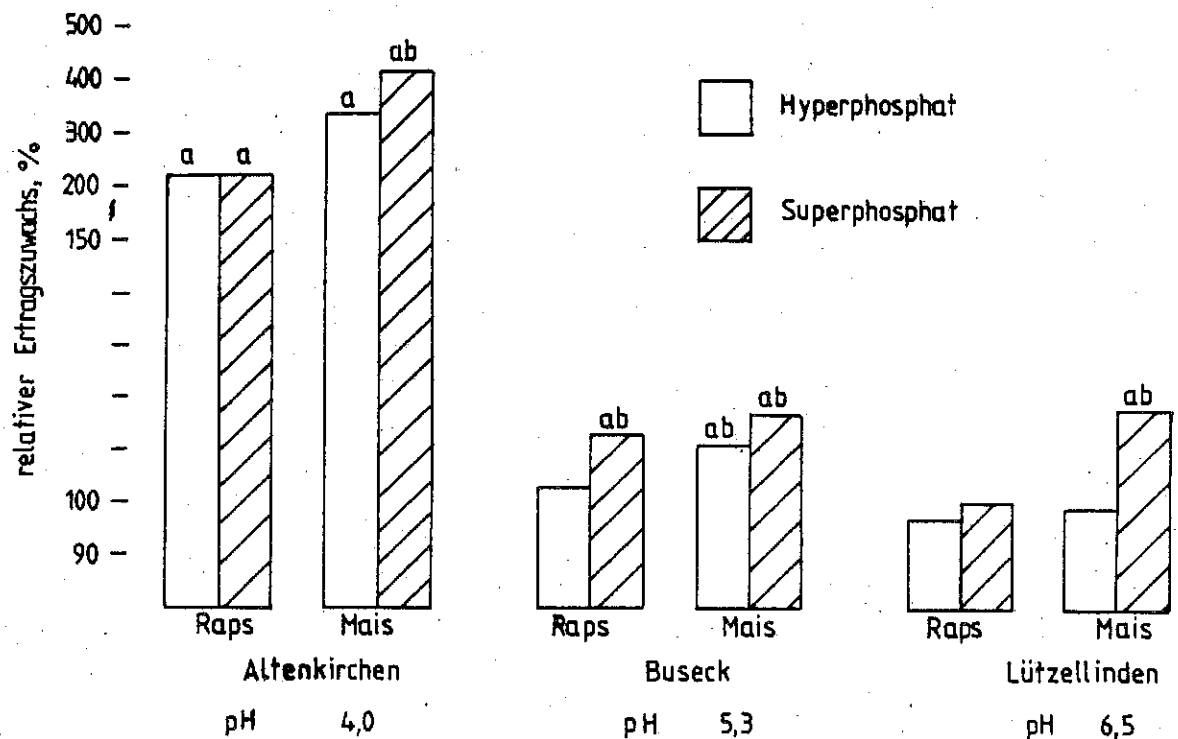


Abb. 12: Einfluß einer P-Erhaltungsdüngung mit Hyper- und Superphosphat auf die relativen Trockenmassezuwächse von Raps und Mais (Erträge der P_0 -Variante = 100%).

a: signifikanter Unterschied ($P < 5\%$) zur P_0 -Variante

b: signifikanter Unterschied ($P < 5\%$) zur Hyperphosphatvariante

3.2 Nachwirkung des im Boden durch verschiedene P-Formen angereicherten Phosphats

Für die Beurteilung der Effizienz von P-Formen ist nicht nur die Wirksamkeit im Anwendungsjahr wichtig, sondern es sollten auch die Umsetzungsprozesse der P-Formen in "verfügbares" Phosphat sowie die Nachwirkung des durch verschiedene Formen im Boden angereicherten Phosphats berücksichtigt werden.

3.2.1 pH-Werte und die mit verschiedenen Methoden extrahierbaren P-Gehalte im Boden

In den Tabellen 5 bis 8 sind die P-Konzentrationen, ermittelt mit den verschiedenen Extraktionsmethoden, die pH-Werte sowie das EUF-lösliche Ca nach langjähriger Düngung mit verschiedenen Formen auf drei Standorten aufgeführt.

Tab. 5: Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen auf die pH-Werte, EUF-Ca und die mit verschiedenen Methoden extrahierbaren P-Mengen im Boden. Boden: Burguffeln

	P ₀	P _{Hy}	P _{NO}	P _{Th}
pH-Wert	5,7	5,7	5,8 mg kg ⁻¹	6,2
EUF-Ca 1. Fr.214		210	240	250
EUF-Ca 2. Fr.114		129	116	130
DL-P	41	99	61	95
CAL-P	31	35	64	84
Me ^{III} -p	55	59	84	110
H ₂ O-P	9	11	17	24
EUF-P*	19	23	34	44

*Summe 1. + 2. EUF-Fraktion

Die chemische Verfügbarkeit der verschiedenen P-Formen wird auf allen Standorten durch die Ergebnisse der CAL-, Wasser-, EUF- und Me^{III}-Analyse widerspiegelt. Langjährige Düngung mit vollaufgeschlossenen P-Formen (Thomas- und Superphosphat) bzw. dem teilaufgeschlossenen Novaphosphat bewirkten einen deutlich stärkeren Anstieg von EUF-, CAL-, Wasser- und Me^{III}-extrahierbarem Phosphat im Boden als Hyperphosphat. Im Gegensatz hierzu zeigen die Befunde der DL-Methode auf allen Standorten ein anderes Bild.

Tab. 6: Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen auf die pH-Werte, EUF-Ca und die mit verschiedenen Methoden extrahierbaren P-Mengen im Boden. Boden: Dissen.

	P _O	P _{Hy}	P _{Th}
pH-Wert	6,4	6,5 mg kg ⁻¹	7,0
EUF-Ca 1.Fr.	250	276	320
EUF-Ca 2. Fr.	155	159	197
DL-P	51	173	171
CAL-P	44	56	155
Me ^{III} -P	44	63	144
H ₂ O-P	9	13	34
EUF-P*	16	30	54

*Summe 1. + 2. EUF-Fraktion

Auf den Standorten "Burguffeln" (Tab. 5) und "Immenhausen ohne Kalk" (Tab. 7) wurden in der Hyperphosphatvariante mit der DL-Methode mehr Phosphat extrahiert als in der Novaphosphatvariante und in den Varianten mit vollaufgeschlossenen P-Formen. Vergleicht man die CAL-P- und DL-P-Gehalte der einzelnen Varianten aller Standorte miteinander, so fällt auf, daß die Relation zwischen DL- und CAL-löslichem Phosphat besonders in der Hyperphosphatvariante angestiegen ist (Tab. 5-8).

Tab. 7: Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen auf die pH-Werte, EUF-Ca und die mit verschiedenen Methoden extrahierbaren P-Mengen im Boden. Boden: Immenhausen "ohne Kalk".

	P _O	P _{Hy}	P _{NO}	P _{Su}
pH-Wert	5,3	5,5	5,3	5,7
	mg kg ⁻¹			
EUF-Ca 1. Fr.	126	138	180	170
EUF-Ca 2. Fr.	94	100	105	129
DL-P	22	72	54	60
CAL-P	33	55	47	64
Me ^{III} -P	69	80	99	123
H ₂ O-P	9	12	14	19
EUF-P*	16	27	31	39

*Summe 1. + 2. EUF-Fraktion

Dieser Befund, der auch von anderen Autoren beobachtet wurde (Werner, 1969; Reichard, 1969; Amberger und Gutser, 1976) zeigt, daß das durch Hyperphosphat angereicherte Phosphat, im Gegensatz zur CAL-Methode, mit der DL-Lösung extrahiert wird. Betrachtet man die Befunde der CAL-, Wasser- und Me^{III}-Analyse auf dem Standort "Immenhausen" in der Variante ohne P-Düngung mit denen der Hyperphosphatvariante (Tab. 7 und 8), so fällt auf, daß die Aufkalkung eine ebenso gute Wirkung auf die P-Konzentration hatte wie die langjährige Düngung mit Hyperphosphat in der ungekalkten Variante.

Tab. 8: Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen auf die pH-Werte, EUF-Ca und die mit verschiedenen Methoden extrahierbaren P-Mengen im Boden. Boden: Immenhausen "mit Kalk".

	P _O	P _{Hy}	P _{NO}	P _{Su}
pH-Wert	6,8	6,6 mg kg ⁻¹	6,9	6,7
EUF-Ca 1. Fr.	202	228	216	250
EUF-Ca 2. Fr.	149	154	147	168
DL-P	57	91	84	119
CAL-P	57	57	68	99
Me ^{III} -P	74	76	100	127
H ₂ O-P	12	12	17	24
EUF-P*	26	33	40	48

*Summe 1. + 2. EUF-Fraktion

Dieser Vergleich zeigt auch sehr klar, daß die Umwandlung von Hyperphosphat in lösliches Phosphat durch die Aufkalkung gehemmt wurde. Aus ökonomischer Sicht wäre es sicherlich angebrachter gewesen, adsorbiertes Phosphat mit der Aufkalkung zu mobilisieren, als jahrelang weicherdiges Rohphosphat zu düngen.

Mit der P-Düngung, die in der Regel mit Ca-Phosphaten vorgenommen wird, werden auch Ca²⁺-Ionen gedüngt.

Interessanterweise waren durch die P-Düngung die EUF-Ca-Gehalte auf allen Standorten angestiegen (Tab. 5-8). Die Zunahme des EUF-extrahierbaren Ca durch die P-Düngung reflektiert aber auch die Löslichkeit der P-Formen. Der höchste Anstieg an EUF-löslichem Ca wurde auf den Standorten "Dissen" und "Immenhausen" (Tab. 7 und 8) in den Varianten mit vollaufgeschlossenen Düngemitteln beobachtet, gefolgt vom teilaufgeschlossenen Novaphosphat und dem nichtaufgeschlossenen Hyperphosphat.

3.2.2 P-Kinetik (Methode Flossmann und Richter)

Im vorhergehenden Kapitel wurden die P-Gehalte der statischen Extraktionsmethoden vorgestellt. Bei diesen Methoden stellt sich aber bereits nach kurzer Extraktionsdauer ein chemisches Gleichgewicht zwischen der festen und der gelösten Phase ein. Mit diesen Methoden können also die Prozesse der Nährstoffmobilisierung durch die Pflanzenwurzeln nicht erfaßt werden. Bedingt durch die P-Aufnahme der Pflanze wird in unmittelbarer Nähe der Wurzel ein Diffusionsgradient aufgebaut, so daß auch schwerlösliche Verbindungen, wie z.B. weicherdige Rohphosphate, Phosphat freisetzen können. Aufgrund dieser Überlegungen wurde eine Mehrfachextraktion mit Wasser durchgeführt, um die Mobilisierbarkeit des durch verschiedene P-Formen angereicherten Phosphats zu studieren. Die Befunde dieser Analyse sind in den Abbildungen 13-16 aufgeführt. Auf allen drei Standorten lassen die Befunde der ersten Wasserextraktion (in den Abb. 13-16 unter A) eine klare Unterscheidung zwischen einer vollaufgeschlossenen, teilaufgeschlossenen und nichtaufgeschlossenen P-Form erkennen; ihrem Anteil an nichtaufgeschlossenem Rohphosphat entsprechend wurden jeweils in den Thomas- bzw. Superphosphatvarianten die höchsten, bei den Novaphosphatvarianten die mittleren und bei den Hyperphosphatvarianten die geringsten P-Konzentrationen bestimmt. Der darauffolgende Anstieg der P-Gehalte (s. Abb. 13-16 von B nach D) veranschaulicht die Rate, mit der das aus den P-Formen stammende und im Boden umgesetzte Phosphat freigesetzt wird. Auf allen Standorten (Abb. 13-16) unterscheidet sich der Anstieg der Hyperphosphatvariante in erheblich geringerem Umfang von der Variante ohne Düngung als die Varianten mit Nova- und Thomas- oder Superphosphat.

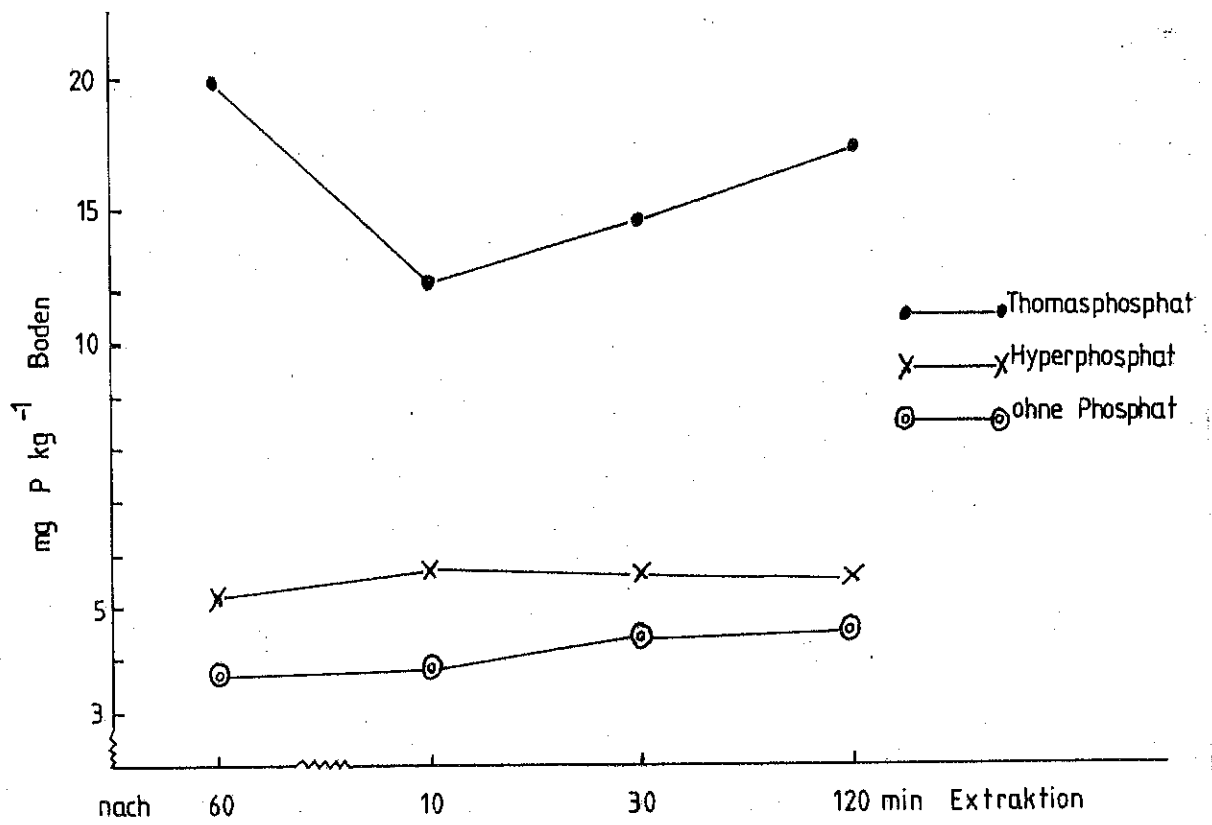


Abb. 13: Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen im Feld auf die P-Konzentration bei wiederholter Wasserextraktion. Boden: Dissen

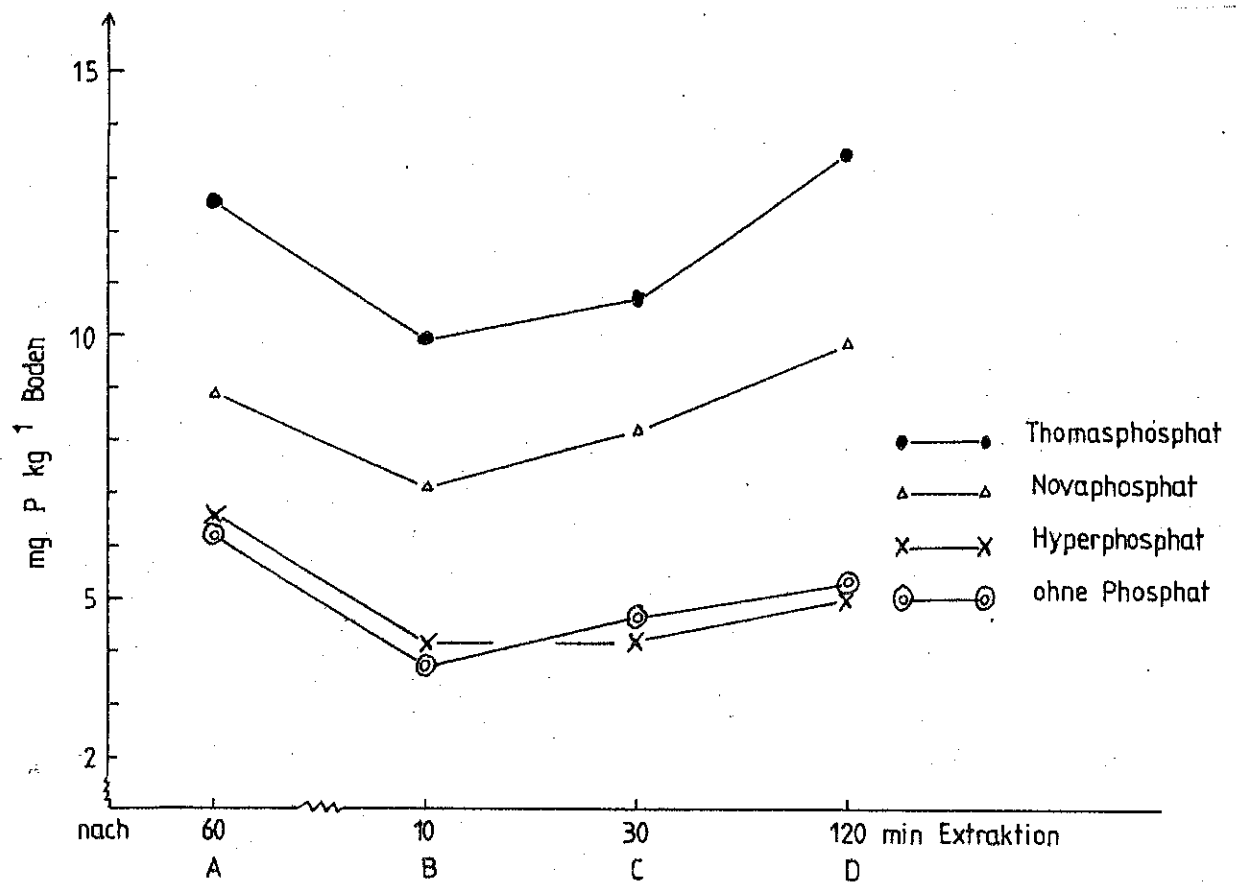


Abb. 14: Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen im Feld auf die P-Konzentration bei wiederholter Wasserextraktion. Boden: Burguffeln

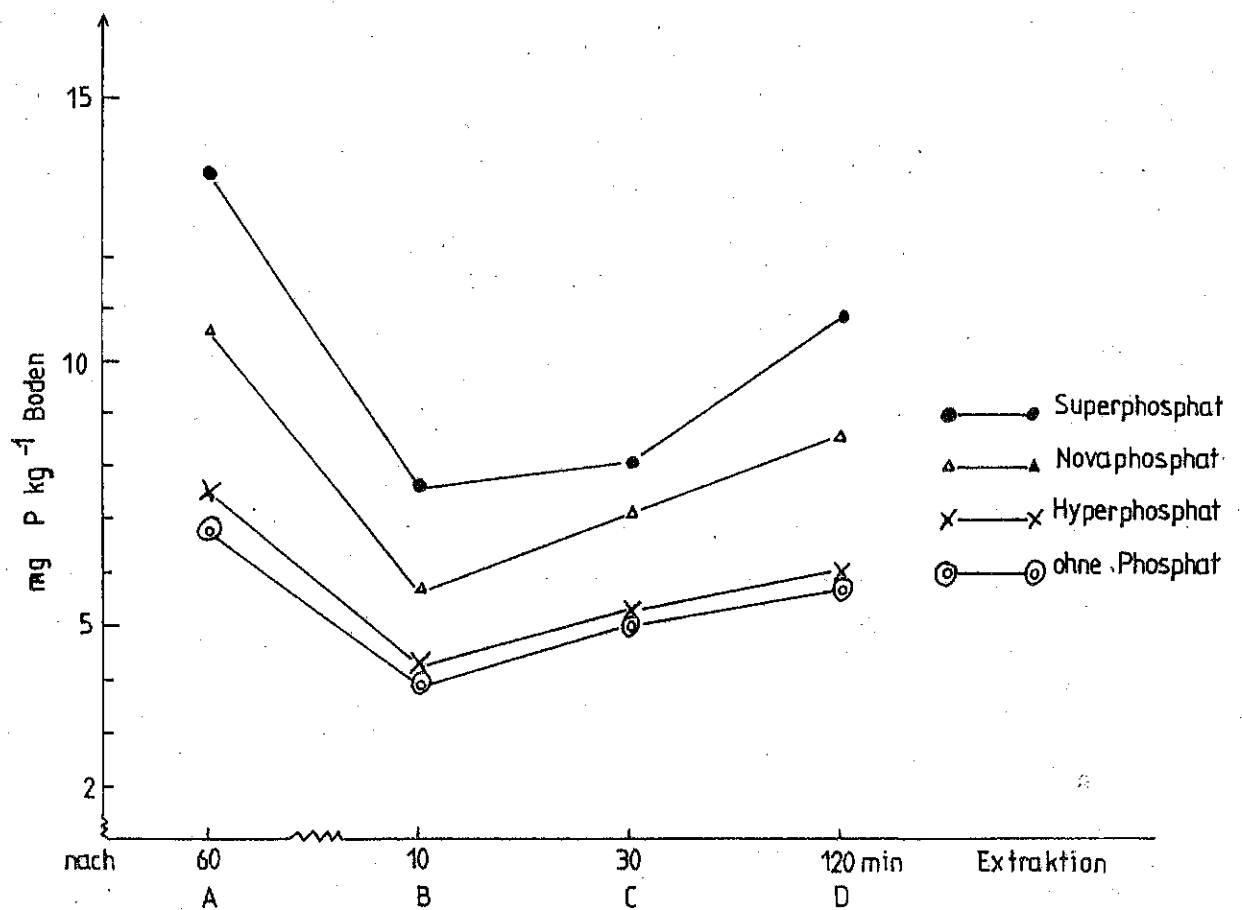


Abb. 15: Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen im Feld auf die P-Konzentration bei wiederholter Wasserextraktion. Boden: Immenhausen "ohne Kalk"

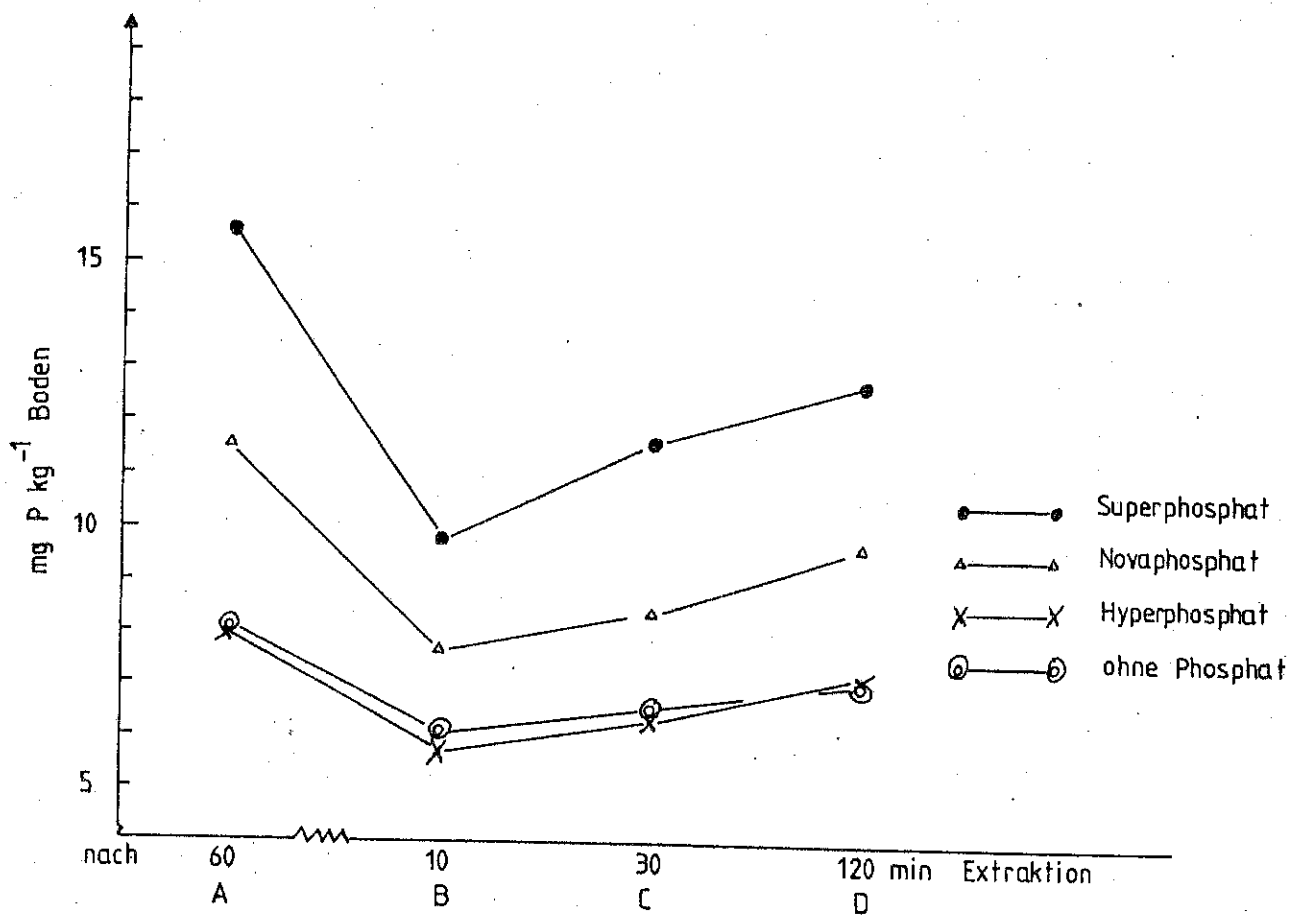


Abb. 16: Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen im Feld auf die P-Konzentration bei wiederholter Wasserextraktion. Boden: Immenhausen "mit Kalk"

Auf der Basis der in den Abbildungen 13-16 dargestellten Befunde der wiederholten Wasserextraktion und der in Kapitel 2.2.8.2 vorgestellten Angaben von Flossmann und Richter (1982) konnte die Rate der P-Desorption von der festen in die lösliche Phase in Abhängigkeit der P-Formen pro Zeiteinheit berechnet werden (s. Tabelle 9).

Tab. 9: Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen im Feld auf die Rate der P-Mobilität, berechnet nach Angaben von Flossmann und Richter (1982)

Boden	P_O mg P kg ⁻¹	P_{Hy} min ⁻¹	P_{No}	P_{Th}	P_{Su}
Burguffeln	0,49	0,54	0,89	1,25	-
Immenhausen ohne Kalk	0,53	0,52	0,79	-	1,05
Immenhausen mit Kalk	0,76	0,71	1,00	-	1,24
Dissen	0,44	0,67	-	1,48	-

Nach langjähriger Düngung und Umsetzungsprozessen im Boden liefern die Böden aller Standorte in den Varianten mit vollaufgeschlossenen P-Formen deutlich mehr Phosphat nach als die der Hyperphosphat- und Novaphosphatvarianten. Dieser Befund zeigt, daß Hyperphosphat in weit geringerem Umfang in verfügbares Phosphat umgewandelt wurde als teil- oder vollaufgeschlossene P-Formen.

3.2.3 Erträge und P-Aufnahme

Die Nachwirkung des durch die verschiedenen P-Formen angereicherten Phosphats wurde in vierjährigen Gefäßversuchen überprüft. Im ersten Versuchsjahr konnten beim Weidelgras keine größeren Unterschiede im Ertrag zwischen den einzelnen Varianten der Standorte "Burguffeln" und "Dissen" beobachtet werden (s. Tab. 1 und 2 im Anhang). Das Weidelgras hatte den Boden sehr dicht durchwurzelt, was besonders die Aneignung von Bodenphosphat fördert. Hierfür spricht auch der Befund, daß in den P_0 -Varianten die gleichen Erträge erzielt wurden wie in den übrigen Varianten. Im Gegensatz zu Weidelgras war die Nachwirkung der P-Formen auf die Rapserträge (1. Anbau 1984) beim Standort "Immenhausen" deutlich zu erkennen (s. Tab. 3 und 4 im Anhang). Die Erträge waren in der Superphosphatvariante deutlich höher als bei Hyperphosphat. In der aufgekalkten Variante bestand keine Nachwirkung von Hyperphosphat.

In den darauffolgenden Jahren entsprach die P-Nachwirkung der Löslichkeit der Phosphatformen. Die Erträge waren auf allen Standorten bei Super- und Thomasphosphat am höchsten, am geringsten bei Hyperphosphat. Die Ertragswirksamkeit von Novaphosphat lag zwischen den vollaufgeschlossenen P-Formen und dem Hyperphosphat (s. Tab. 1-4 im Anhang).

Tab. 10: Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen auf die Kornerträge von Sommerroggen im vierten Jahr zur Überprüfung der P-Nachwirkung. Boden: Burguffeln.

P_0	P_{Hy} g Korn Gefäß ⁻¹	P_{NO}	P_{Th}
22,3 ^a	22,1 ^a	24,1 ^a	26,0 ^b

Verschiedene Buchstaben kennzeichnen den signifikanten Unterschied zwischen den Varianten ($P \leq 5\%$)

Selbst im vierten Jahr zur Überprüfung der Nachwirkung wird die Löslichkeit der P-Formen noch sehr drastisch widerspiegelt (s. Tabelle 10-12).

Tab. 11: Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen auf die Kornerträge von Sommerroggen im vierten Jahr zur Überprüfung der P-Nachwirkung. Boden: Dissen.

P_0	P_{Hy}	P_{Th}
g Korn Gefäß ⁻¹		
14,9 ^a	28,5 ^b	51,8 ^c

Verschiedene Buchstaben kennzeichnen den signifikanten Unterschied zwischen den Varianten ($P \leq 5\%$)

Hier wurden auf allen Standorten die höchsten Kornerträge bei Thomas- und Superphosphat erzielt, bei Hyperphosphat die geringsten im Vergleich zur P_0 -Variante. Die Erträge von Novaphosphat liegen zwischen denen von Hyperphosphat und den vollaufgeschlossenen P-Formen, da Novaphosphat eine teilaufgeschlossene P-Form ist.

Tab. 12: Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen auf die Kornerträge von Sommerroggen im vierten Jahr zur Überprüfung der P-Nachwirkung. Boden: Immenhausen

	P_0	P_{Hy}	P_{NO}	P_{Su}
	g Korn Gefäß ⁻¹			
ohne Kalk	32,9 ^a	38,6 ^b	41,0 ^c	45,6 ^d
mit Kalk	33,7 ^a	43,3 ^c	45,8 ^d	48,9 ^c

Verschiedene Buchstaben kennzeichnen in horizontaler und vertikaler Richtung den signifikanten Unterschied zwischen den Varianten ($P < 5\%$)

Die Abbildungen 17 bis 19 zeigen die Nachwirkungen der P-Formen der verschiedenen Standorte auf die in vier Jahren erzielten P-Entzüge. Auf allen drei Standorten wurde in den Varianten mit Thomas- und Superphosphat signifikant mehr Phosphat nachgeliefert, gefolgt von Novaphosphat, als in der Hyperphosphatvariante. Auf dem Standort "Immenhausen" (s. Abb. 19) förderte die Aufkalkung die P-Aufnahme bei Superphosphat, wogegen sie bei Hyper- und Novaphosphat gehemmt wurde.

Die hier vorgestellten Befunde über die Ertragswirksamkeit und P-Nachlieferung der verschiedenen P-Formen legen sehr deutlich dar, daß die Nachwirkung von apatithaltigen Phosphatformen erheblich niedriger zu veranschlagen ist als die der vollaufgeschlossenen.

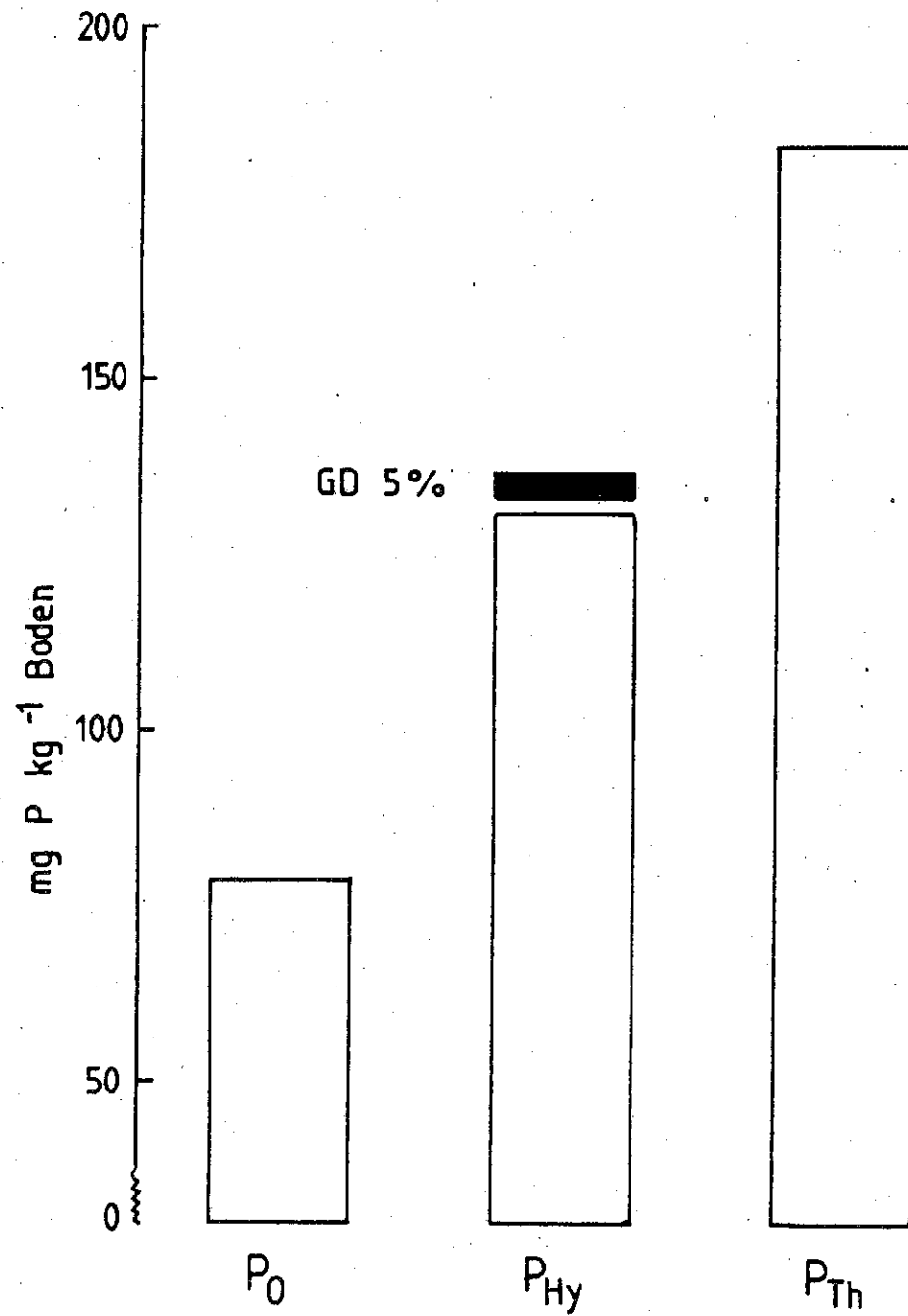


Abb. 17: Nachwirkung verschiedener im Feld gedüngter P-Formen auf die in vierjährigen Gefäßversuchen erzielten P-Entzüge. Boden: Dissen

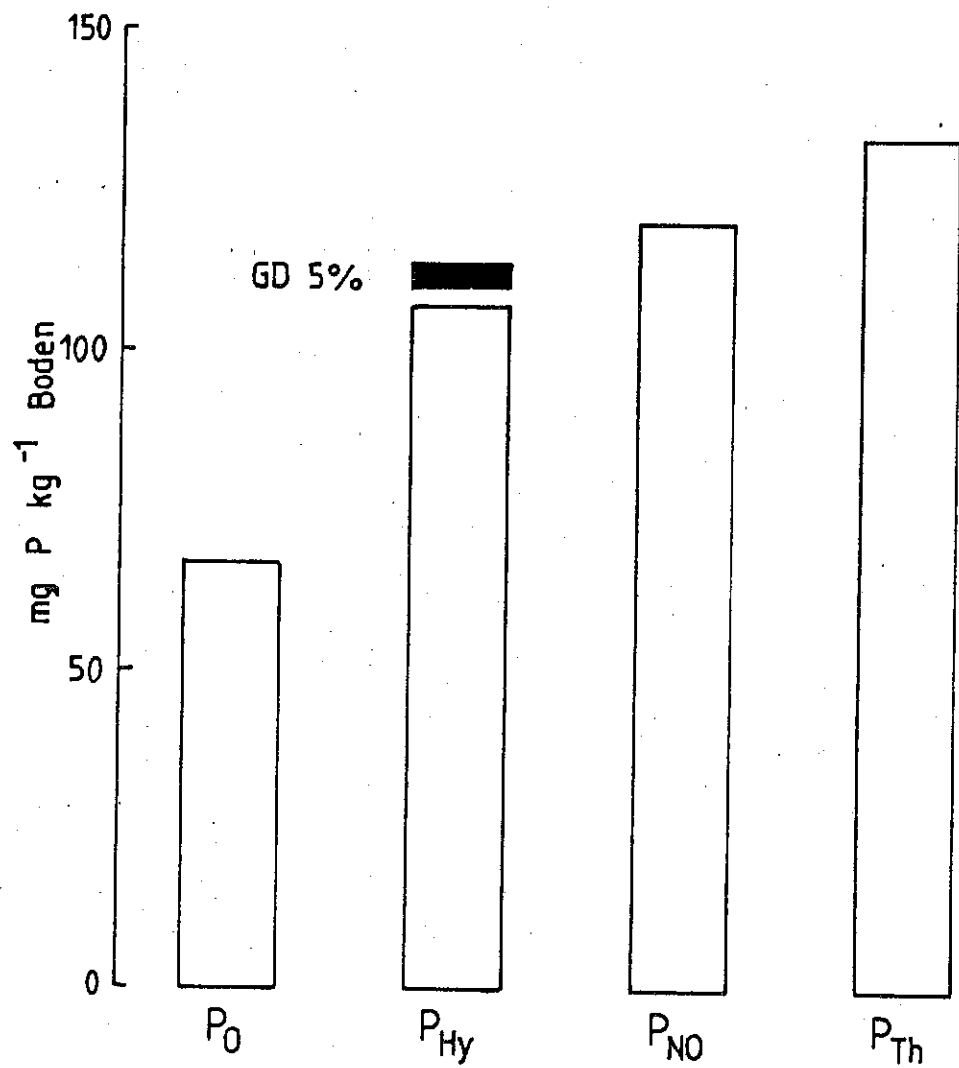


Abb. 18: Nachwirkung verschiedener P-Formen auf die in vier-jährigen Gefäßversuchen erzielten P-Entzüge.
Boden: Burguffeln

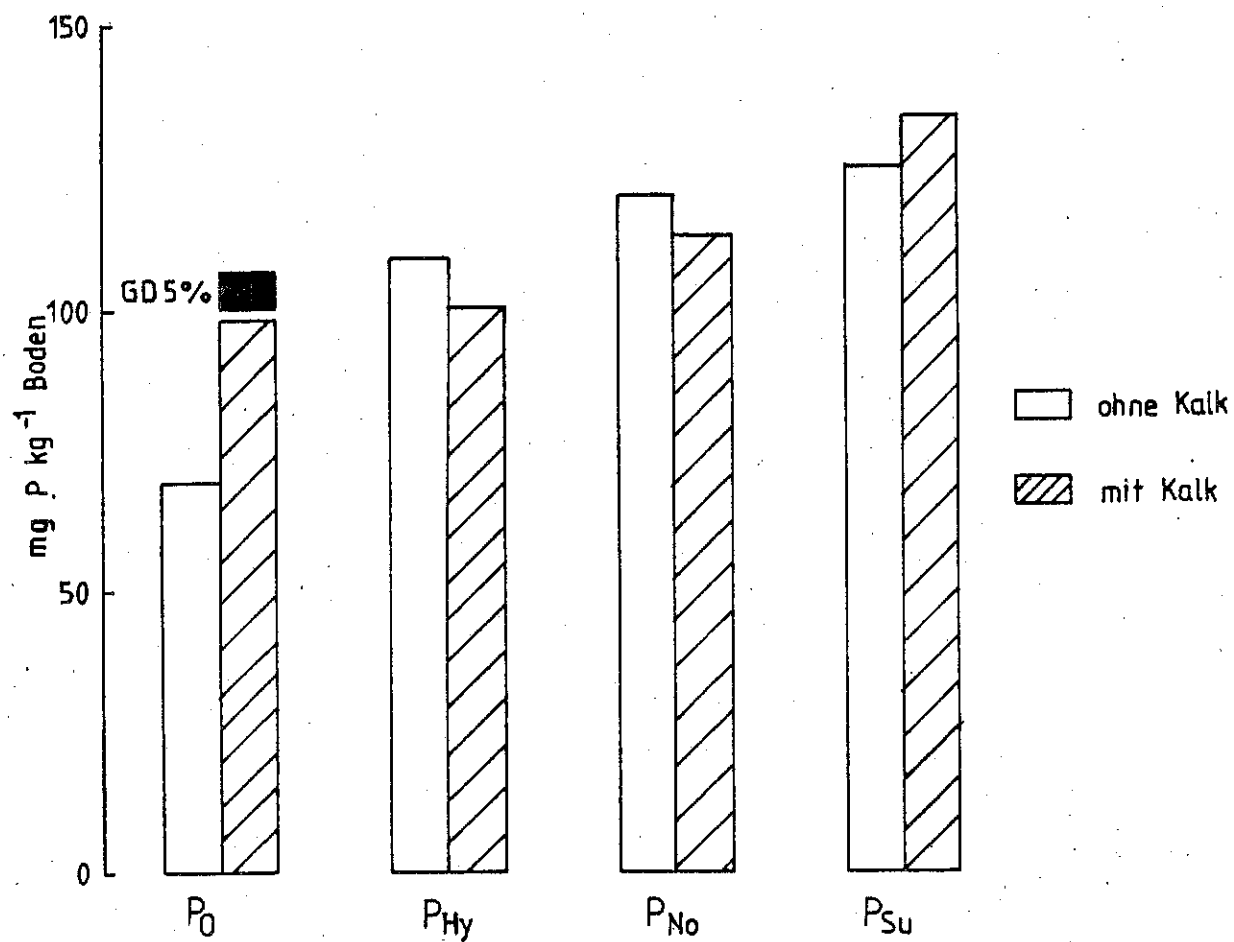


Abb. 19: Nachwirkung verschiedener im Feld gedüngter P-Formen auf die in vierjährigen Gefäßversuchen erzielten P-Entzüge. Boden: Immenhausen

3.3 Erfassung der P-Nachlieferung von langjährig durch verschiedene P-Formen angereicherten Phosphats mittels EUF-Mehrfachextraktion

Neben der wiederholten Wasserextraktion (s. Kapitel 3.2.2) wurde die P-Freisetzung auch mit einer modifizierten und neu entwickelten EUF-Extraktion überprüft, weil das EUF-Verfahren die Nährstoffaneignung der Pflanzenwurzel relativ gut simuliert. Vergleichbar mit einer Wurzel, die dem Boden Nährstoffe entzieht und dadurch einen Diffusionsgradienten aufbaut, werden auch im elektrischen Feld der EUF-Technik die Nährstoffe extrahiert. Zudem gewährleistet die EUF-Technik den Vorteil, daß neben Phosphat- auch Ca^{2+} -Ionen extrahiert werden. Die gleichzeitige Extraktion von Phosphat und Kalzium dürfte besonders die Löslichkeit und Verfügbarkeit von verschiedenen P-Formen im Boden charakterisieren. In den nachstehenden Abbildungen sind die extrahierten P-Mengen bei variierter Spannung und Temperatur gegenüber der Extraktionszeit als Summenkurven für die einzelnen Standorte dargestellt. Im Vergleich zur mehrfachen Wasserextraktion, die kaum Unterschiede zwischen der Hyperphosphatvariante und der ungedüngten Variante der drei Standorte erkennen ließ, konnten mit der modifizierten EUF-Technik deutliche Unterschiede in der P-Freisetzung zwischen den Hyperphosphatvarianten und den Varianten ohne P-Düngung beobachtet werden (s. Abbildungen 20-23). Dieser Befund dürfte vornehmlich auf die neben der P-Freisetzung im elektrischen Feld erfolgten Ca^{2+} -Extraktion erklärt werden. Der Verlauf der Ca-Extraktion in Abhängigkeit der P-Form mittels EUF ist in Abbildung 24 für den Standort "Dissen", stellvertretend für die anderen Standorte, dargestellt. Die Ca^{2+} -Extraktionskurven zeigen, daß in der Thomasphosphatvariante zwar mehr Ca^{2+} -Ionen extrahiert wurden als in der Hyperphosphatvariante, daß aber die freigesetzte Ca^{2+} -Menge der Hyperphosphatvariante deutlich größer war als die der Kontrollvariante. Dieser Befund verdeutlicht, daß die Löslichkeit von weicherdigen Rohphosphaten

im elektrischen Feld durch die gleichzeitige P- und Ca-Extraktion forciert wird.

Allerdings charakterisieren die in den Abbildungen 20-23 vorgestellten P-Freisetzungskurven die Löslichkeit der P-Formen; ihrem Anteil an Rohphosphat entsprechend wurden auf allen Standorten die höchsten P-Mengen in den Varianten mit vollaufgeschlossenen Formen bestimmt, gefolgt von den Varianten mit Nova- und Hyperphosphat.

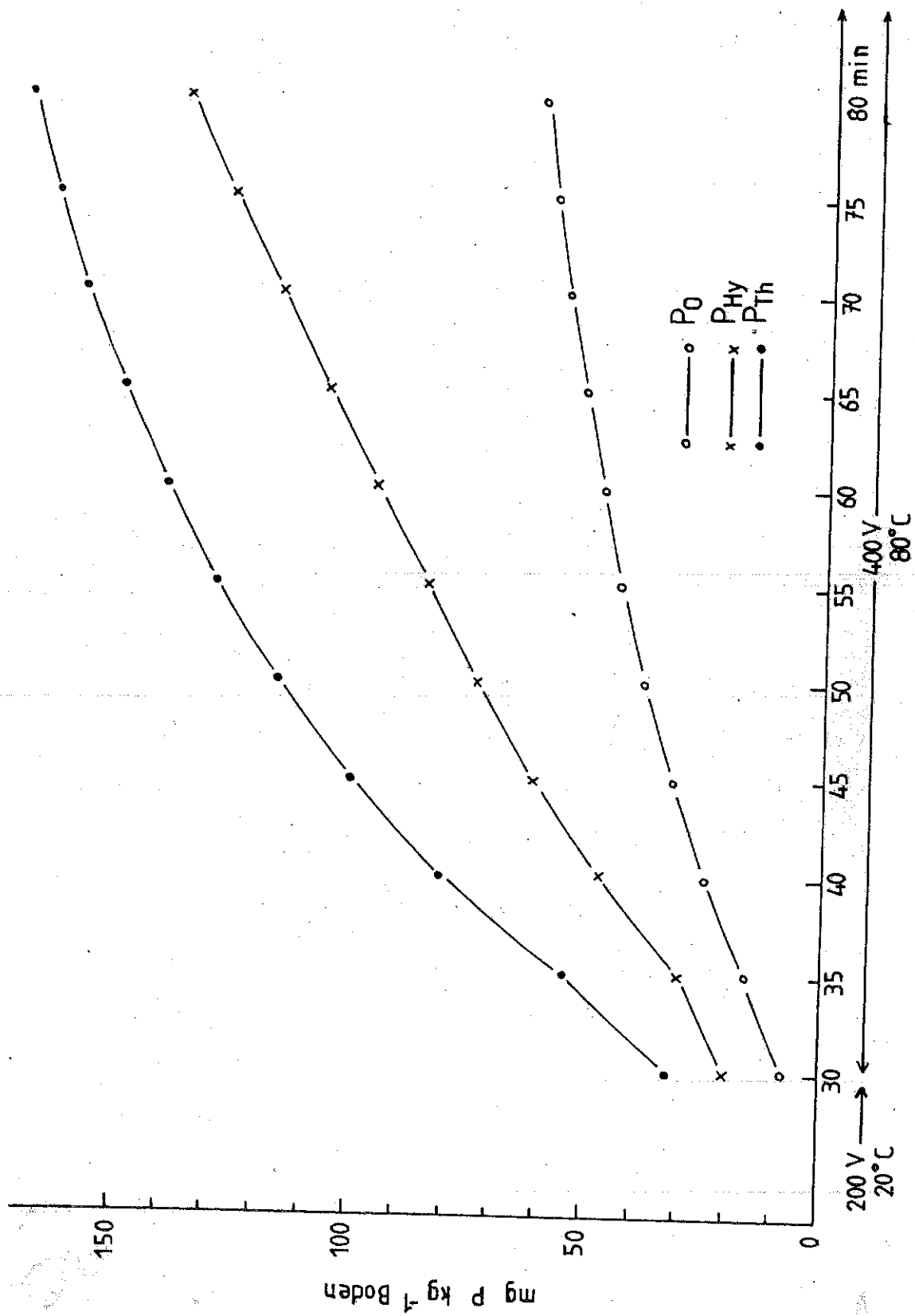


Abb. 20: Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen im Feld auf die kumulative P-Freisetzung mittels EUF. Boden: Dissen.

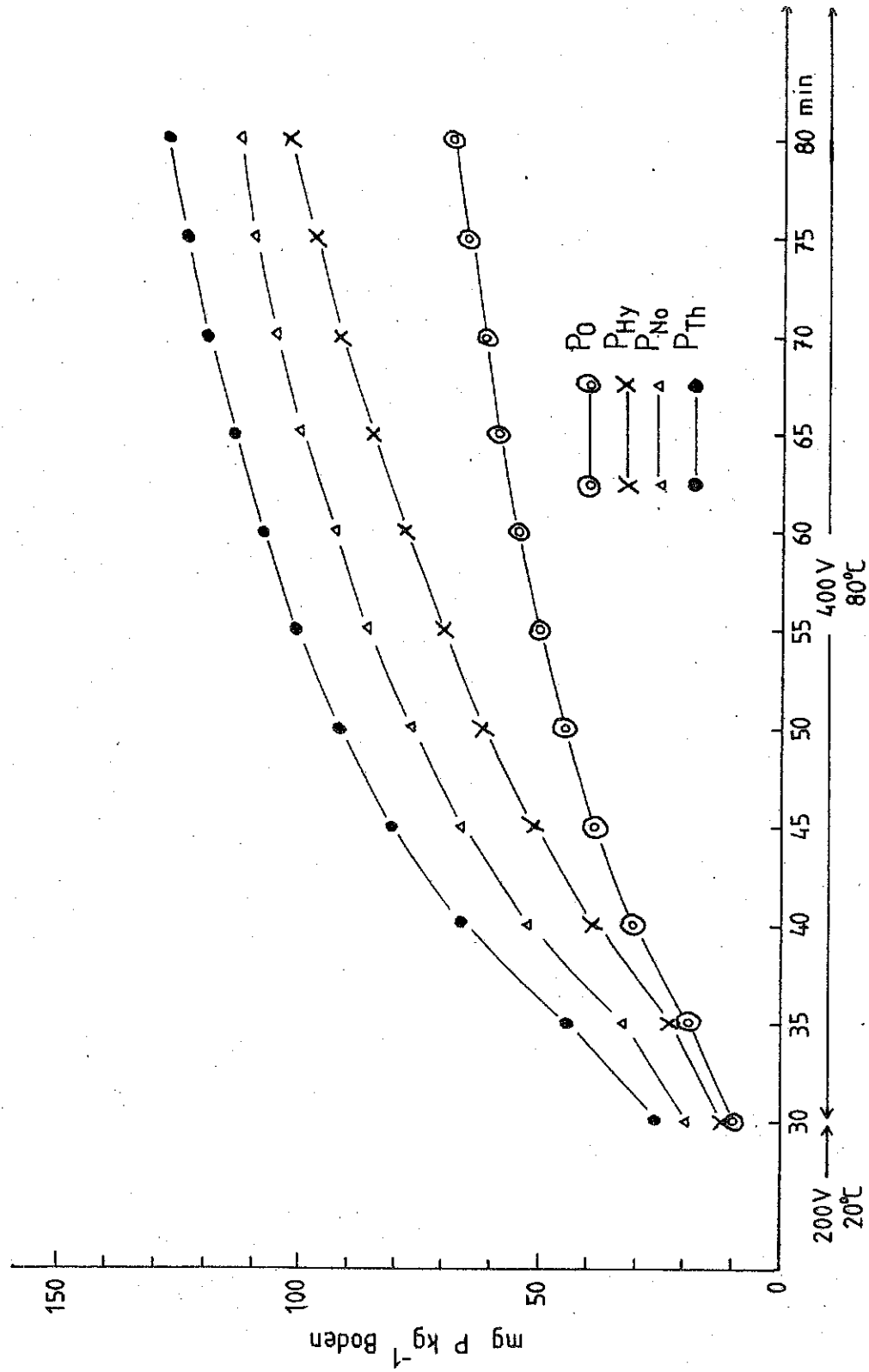


Abb. 21: Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen im Feld auf die kumulative P-Freisetzung mittels EUF. Boden: Burguffeln.

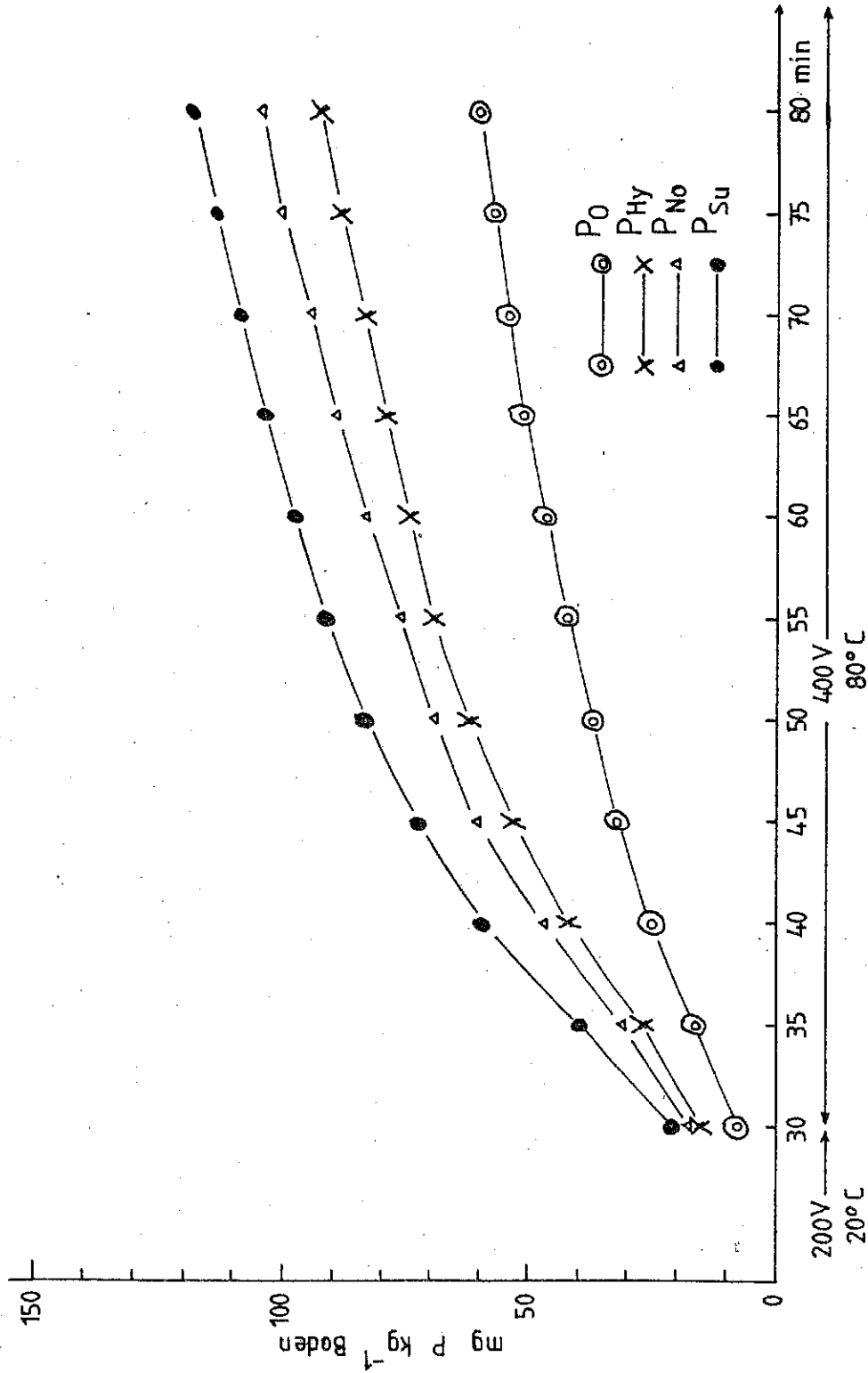


Abb. 22: Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen im Feld auf die kumulative P-Freisetzung mittels EUF. Boden: Immenhausen "ohne Kalk".

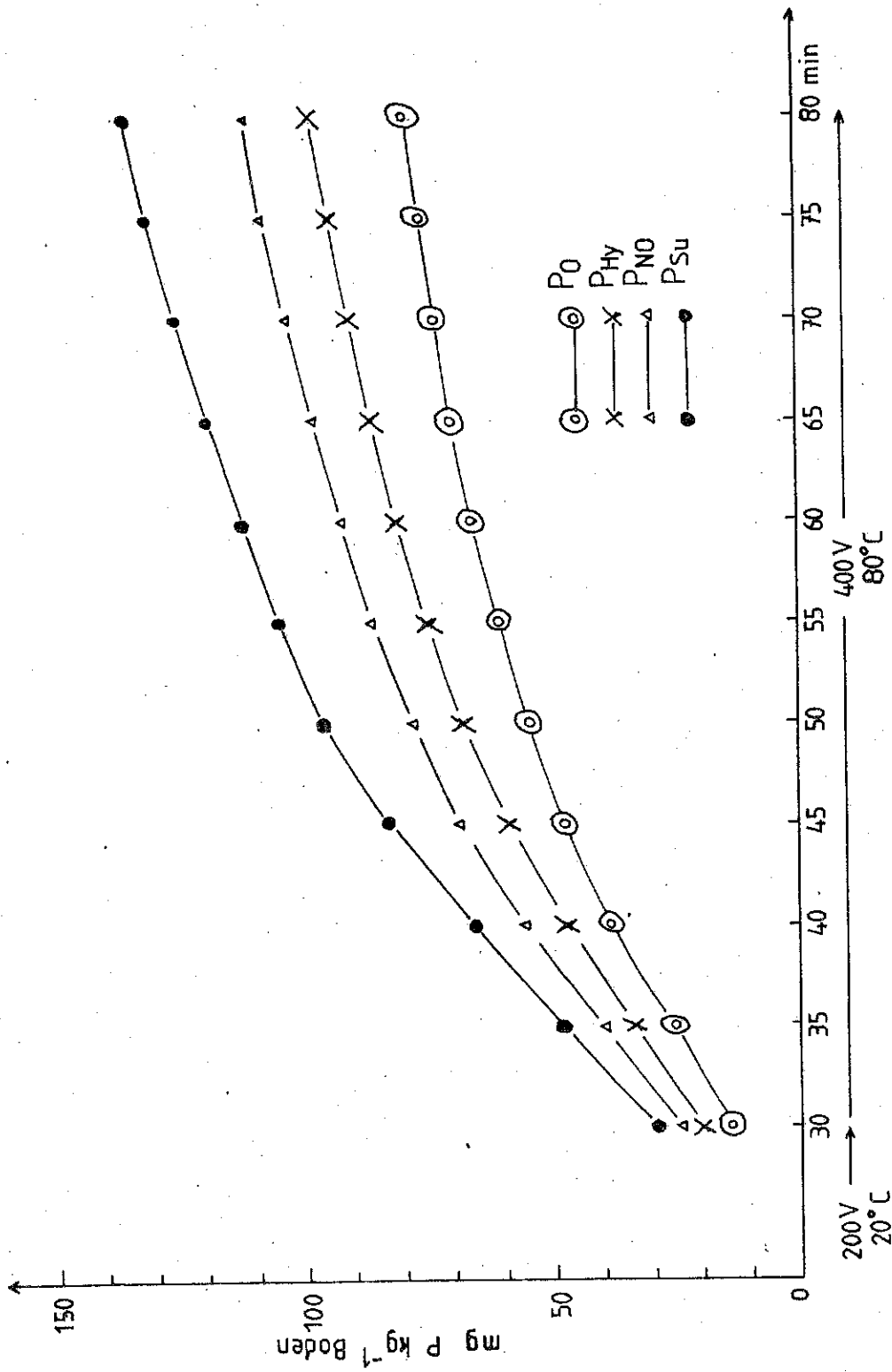


Abb. 23: Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen im Feld auf die kumulative P-Freisetzung mittels EUF. Boden: Immenhausen "mit Kalk".

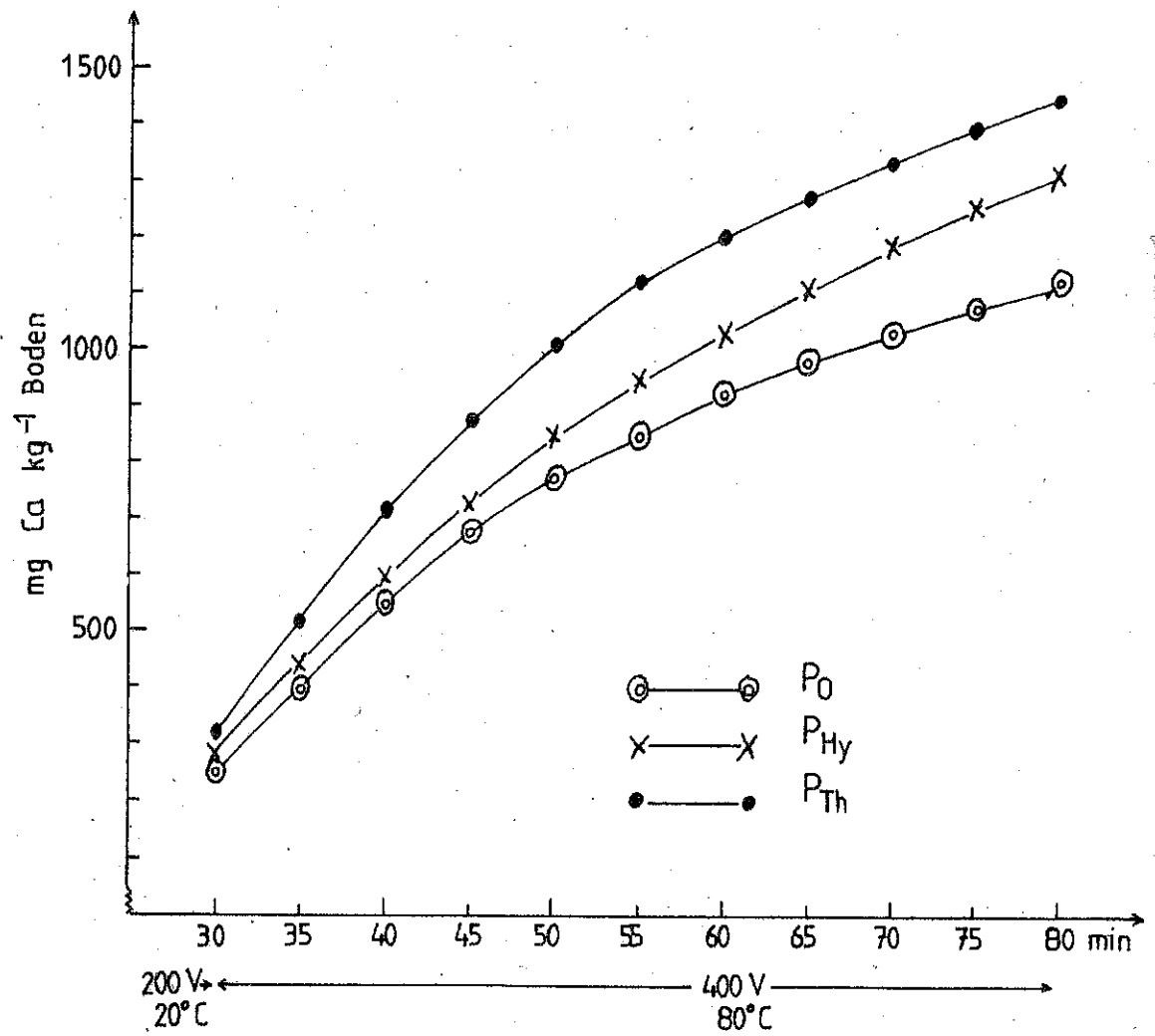


Abb. 24: Einfluß verschiedener im Feld gedüngter P-Formen auf die kumulative Ca^{2+} -Freisetzung mittels EUF. Boden: Dissen

Für die P-Ernährung ist nicht allein die extrahierte P-Menge wichtig, sondern mit welcher Rate das durch verschiedene P-Formen angereicherte Phosphat freigesetzt wird. Um die P-Freisetzungsraten berechnen zu können, wurden die in Abb. 20-23 dargestellten Extraktionskurven mit der Elovich-Funktion und dem parabolischen Diffusionsgesetz linear transformiert. Das Resultat der Transformierung der P-Extraktionskurven nach der Elovich-Gleichung ist exemplarisch für alle Standorte für den Boden "Dissen" in Abb. 25 gezeigt.

Die Transformierung der P-Freisetzung mit dem parabolischen Diffusionsgesetz dokumentieren die Geraden der Abbildung 26. Mit beiden Funktionen konnte die P-Freisetzung in gleicher Güte linear transformiert werden, wobei sich die P-Extraktionskurve der Thomasphosphatvariante etwas besser mit der Elovich-Funktion als mit dem parabolischen Diffusionsgesetz linearisieren ließ.

In den nachstehenden Tabellen (13-16) sind die P-Freisetzungsraten (b) sowie die Bestimmtheitsmaße der mit verschiedenen Funktionen linearisierten EUF-Extraktionskurven für die Böden und die jeweiligen Varianten aufgelistet. Die Linearisierung der EUF-P-Freisetzungskurven erfolgte mit der Elovich-Funktion sowie dem parabolischen Diffusionsgesetz in weit besserem Umfang als mit einer normalen linearen Gleichung ($y = a + bx$).

Tab. 13: P-Freisetzungsrate b (mg P kg^{-1} Boden) und Bestimmtheitsmaße B (%) der mit verschiedenen Funktionen linearisierten EUF-Freisetzungscurven. Boden: Dissen

Funktion		P_O	P_{Hy}	P_{Th}
$y = a + b \cdot t$ linear	b	1,04	2,3	2,65
	B	96,7	99,4	94,2
$y = a + b \ln t$ Elovich	b	54,4	119,09	140,0
	B	99,7	99,5	98,8
$y = a + b \sqrt{t}$ parabolisch	b	15,2	33,5	38,9
	B	98,6	99,9	96,8

Tab. 14: P-Freisetzungsrate b (mg P kg^{-1} Boden) und Bestimmtheitsmaße B (%) der mit verschiedenen Funktionen linearisierten EUF-Freisetzungscurven. Boden: Burguffeln

Funktion		P_O	P_{Hy}	P_{No}	P_{Th}
$y = a + b \cdot t$ linear	b	1,13	1,80	1,86	1,95
	B	94,8	97,2	93,9	92,3
$y = a + b \ln t$ Elovich	b	59,58	94,37	98,34	103,51
	B	99,0	99,8	98,6	97,8
$y = a + b \sqrt{t}$ parabolisch	b	16,59	26,40	27,35	28,72
	B	97,3	99,0	96,7	95,4

Tab. 15: P-Freisetzungsrate b (mg P kg^{-1} Boden) und Bestimmtheitsmaße B (%) der mit verschiedenen Funktionen linearisierten EUF-Freisetzungscurven.
Boden: Immenhausen "ohne Kalk"

Funktion		P_O	P_{Hy}	P_{No}	P_{Su}
$y = a + b \cdot t$ linear	b	1,02	1,48	1,68	1,83
	B	96,6	94,6	95,4	92,6
$y = a + b \ln t$ Elovich	b	53,45	78,18	88,70	96,98
	B	99,7	98,9	99,3	98,0
$y = a + b \sqrt{t}$ parabolisch	b	14,93	21,76	24,72	26,92
	B	98,6	97,2	97,7	95,7

Tab. 16: P-Freisetzungsrate b (mg P kg^{-1} Boden) und Bestimmtheitsmaße B (%) der mit verschiedenen Funktionen linearisierten EUF-Freisetzungscurven.
Boden: Immenhausen "mit Kalk".

Funktion		P_O	P_{Hy}	P_{No}	P_{Su}
$y = a + b \cdot t$ linear	b	1,25	1,51	1,67	2,04
	B	93,1	94,5	93,6	93,4
$y = a + b \ln t$ Elovich	b	66,37	79,55	88,73	107,91
	B	98,3	99,0	98,6	98,4
$y = a + b \sqrt{t}$ parabolisch	b	18,43	22,14	24,66	29,98
	B	96,1	97,2	96,5	96,3

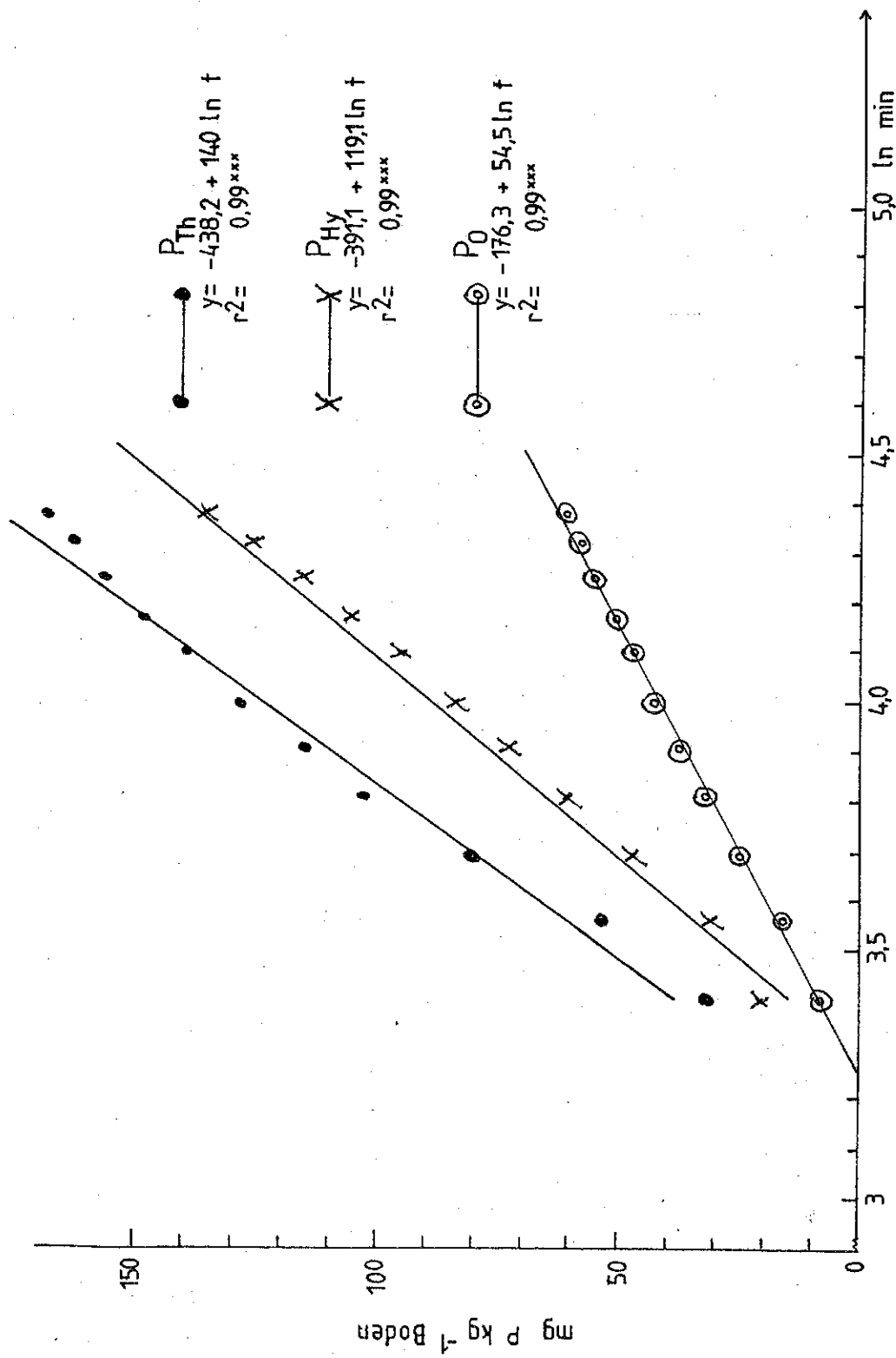


Abb. 25: Linearisierung der EUF-P Freisetzungskurven durch die Elovich-Funktion. Boden: Dissen.

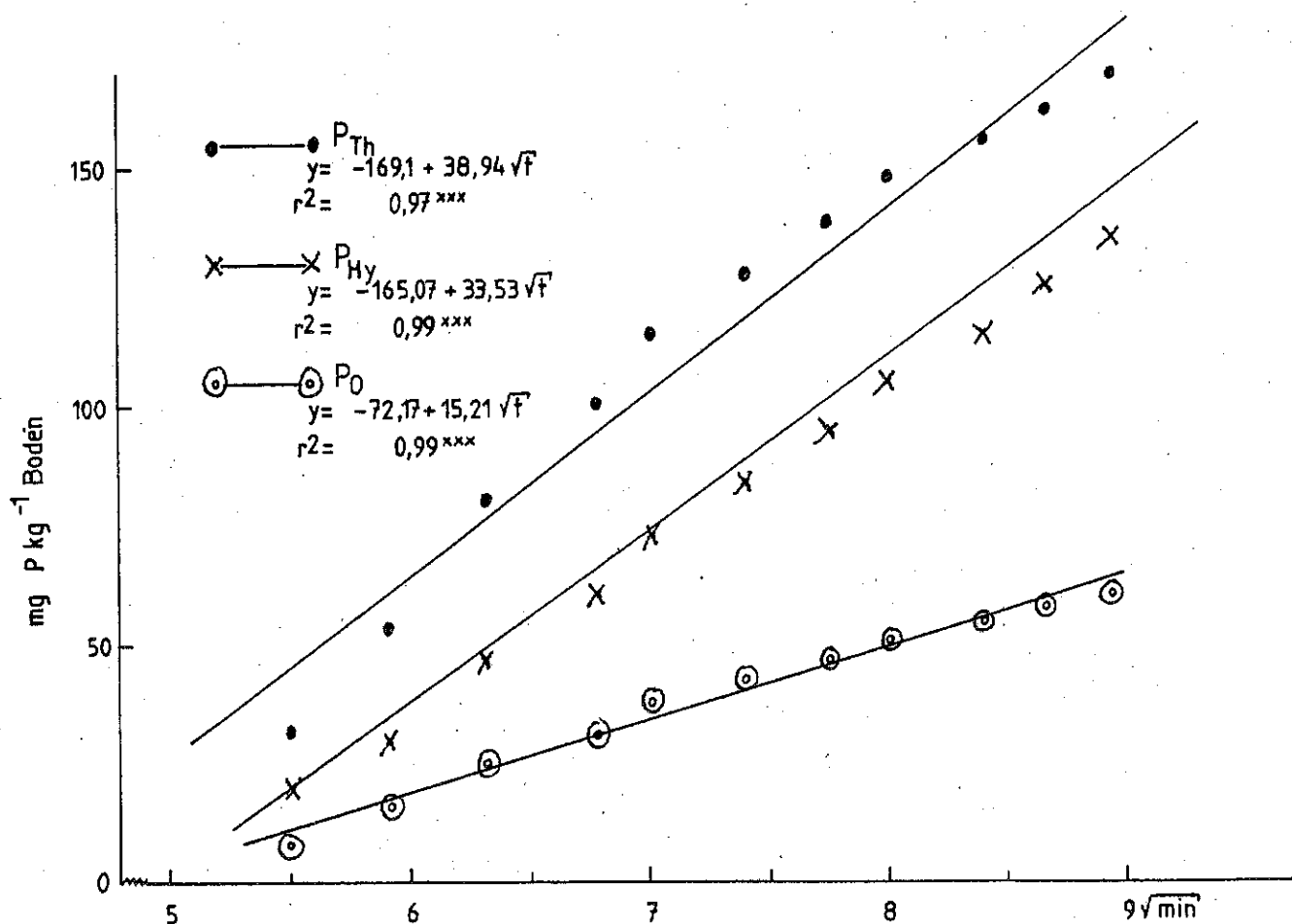


Abb. 26: Linearisierung der EUF-P Freisetzungskurven mittels parabolischem Diffusionsgesetz. Boden: Dissen

Auf allen Standorten spiegelt die P-Freisetzungsrates den Einfluß der P-Düngung deutlich wider, wobei die b-Werte der verschiedenen Funktionen eine Differenzierung zwischen den P-Formen erkennen lassen. In den Varianten mit vollaufgeschlossenen Düngemitteln (Thomas- und Superphosphat) sind die b-Werte größer als in den Nova- oder Hyperphosphatvarianten (s. Tabellen 13-16).

Bemerkenswert ist, daß die Kalkung die P-Extraktionsraten (b-Werte) in den Varianten ohne Rohphosphat deutlich erhöhte (vgl. Tab. 15 mit 16), während für Hyper- und Novaphosphat fast identische b-Werte für die Variante mit und ohne Kalk gefunden wurden. Dieser Befund spricht dafür, daß sich das extrahierte P in der Variante "P₀" und "P_{Su}" vornehmlich aus

adsorbiertem, in der Variante "P_{Hy}" und "P_{NO}" aus Ca-Phosphaten rekrutierte.

Die b-Werte der verschiedenen Modelle korrelieren signifikant untereinander und weisen zu den P-Gehalten der hier angewandten Extraktionsmethoden jeweils signifikante Beziehungen auf (Tab. 17).

Tab. 17: Korrelationskoeffizienten zwischen den mit verschiedenen Funktionen berechneten P-Freisetzungs-raten (b) und den P-Gehalten verschiedener Untersuchungsmethoden (n = 15)

	b-linear $y = a + b \cdot t$	b-Elovich $y = a + b \ln t$	b-parab. $y = a + b \sqrt{t}$
DL-P	0,87***	0,87***	0,87***
CAL-P	0,76***	0,78***	0,77***
Pw	0,81***	0,82***	0,81***
MeIII	0,68**	0,70**	0,69**
EUf-P 1.Fr.	0,84***	0,85***	0,85***
EUf-P 2.Fr.	0,75***	0,77***	0,76***
EUf-P 1.+2.Fr.	0,82***	0,84***	0,83***
EUf-P 1./2.Fr.	0,62**	0,61**	0,62**
V _t	0,75***	0,76***	0,75***
b-linear	-	0,99***	0,99***
b-Elovich	-	-	0,99***

*** $P \leq 0,1\%$

** $P \leq 5\%$

3.3.1 Beziehung zwischen der P-Nachlieferung von langjährig durch verschiedene P-Formen angereicherten Phosphats und den Befunden der Bodenanalyse

Aus agrikulturchemischer Perspektive ist es von Interesse zu wissen, inwieweit die Resultate der verschiedenen Bodenextraktionsmittel mit der Nachwirkung (= P-Aufnahme der Pflanzen) des durch verschiedene P-Formen angereicherten Phosphats übereinstimmen.

Tab. 18: Korrelationskoeffizienten (r) und Bestimmtheitsmaße (B) für die Beziehung zwischen den P-Entzügen (1984-1987) und den Befunden der Bodenuntersuchung (n = 15)

	r	B (%)
b Elovich	0,96***	91
b parab.	0,95***	91
b linear	0,95***	90
Pw	0,90***	81
EUf-P 1.+2. Fr.	0,89***	80
EUf-P 1. Fr.	0,89***	79
CAL	0,88***	77
EUf-P 2. Fr.	0,86***	74
V _t	0,84***	71
Me ^{III}	0,81***	65
DL	0,79***	62
EUf Ca 1. Fr.	0,60*	36
EUf Ca 2. Fr.	0,59*	34
EUf-P Quotient 1./2. Fr.	0,50	25
pH-Wert	0,43	18

*** P ≤ 0,1%

* P ≤ 5%

In der Tabelle 18 sind die Korrelationskoeffizienten und die Bestimmtheitsmaße für die Beziehungen zwischen den in vier Jahren erzielten P-Entzügen und den Ergebnissen der Bodenanalysen wiedergegeben.

Alle aus den EUF-Extraktionskurven berechneten Freisetzungsraten (b-Werte) der verschiedenen Funktionen weisen die höchsten Korrelationskoeffizienten zur P-Aufnahme auf, gefolgt von der P-Wasser-Methode, der EUF-Methode, der CAL-Methode, der DL-Methode und der Extraktion nach Mehlich^{III}. Hiermit dürfte deutlich werden, daß die P-Verfügbarkeit nach Düngung mit verschiedenen P-Formen besser mit der Rate der P-Freisetzung charakterisiert werden kann als mit den herkömmlichen statischen Extraktionsverfahren. Der im Vergleich zu den b-Werten niedrigere Korrelationskoeffizient zwischen dem Kinetikparameter V_t (Flossmann und Richter, 1982) und der P-Aufnahme zeigt, daß die P-Nachlieferung besser mit dem modifizierten EUF-Verfahren quantifiziert wird als mit einer mehrfachen Wasserextraktion. Die Beziehung zwischen dem EUF-Quotienten (EUF-P 1. Fraktion / EUF-P 2. Fraktion) und der P-Aufnahme ist nicht signifikant (s. Tabelle 18).

Betrachtet man die Befunde in Tab. 19, in der die Korrelationskoeffizienten und die Bestimmtheitsmaße für die Beziehungen zwischen den Befunden der Bodenanalysen und der P-Aufnahme nur der Rohphosphatvarianten dargestellt sind, so zeigt sich, daß von den P-Untersuchungsmethoden nur die Freisetzungsraten (b-Werte) gesicherte Beziehungen zur P-Aufnahme aufweisen.

Tab. 19: Korrelationskoeffizienten (r) und Bestimmtheitsmaße (B) für die Beziehung zwischen den P-Entzügen (1984-1987) und den Befunden der Bodenuntersuchung bezogen auf die Rohphosphatvarianten (Hyper- und Novaphosphat, n = 7)

	r	B (%)
b Elovich	0,92**	85
b parab.	0,92**	85
b linear	0,92**	85
EUF-Ca-Quotient 1./2.Fr. -	0,75*	60
DL	0,50	25
EUF-P 1./2. Fr.	0,48	23
Pw	0,23	05
V _t	0,04	17
CAL	- 0,02	05

** P ≤ 1%

* P ≤ 5%

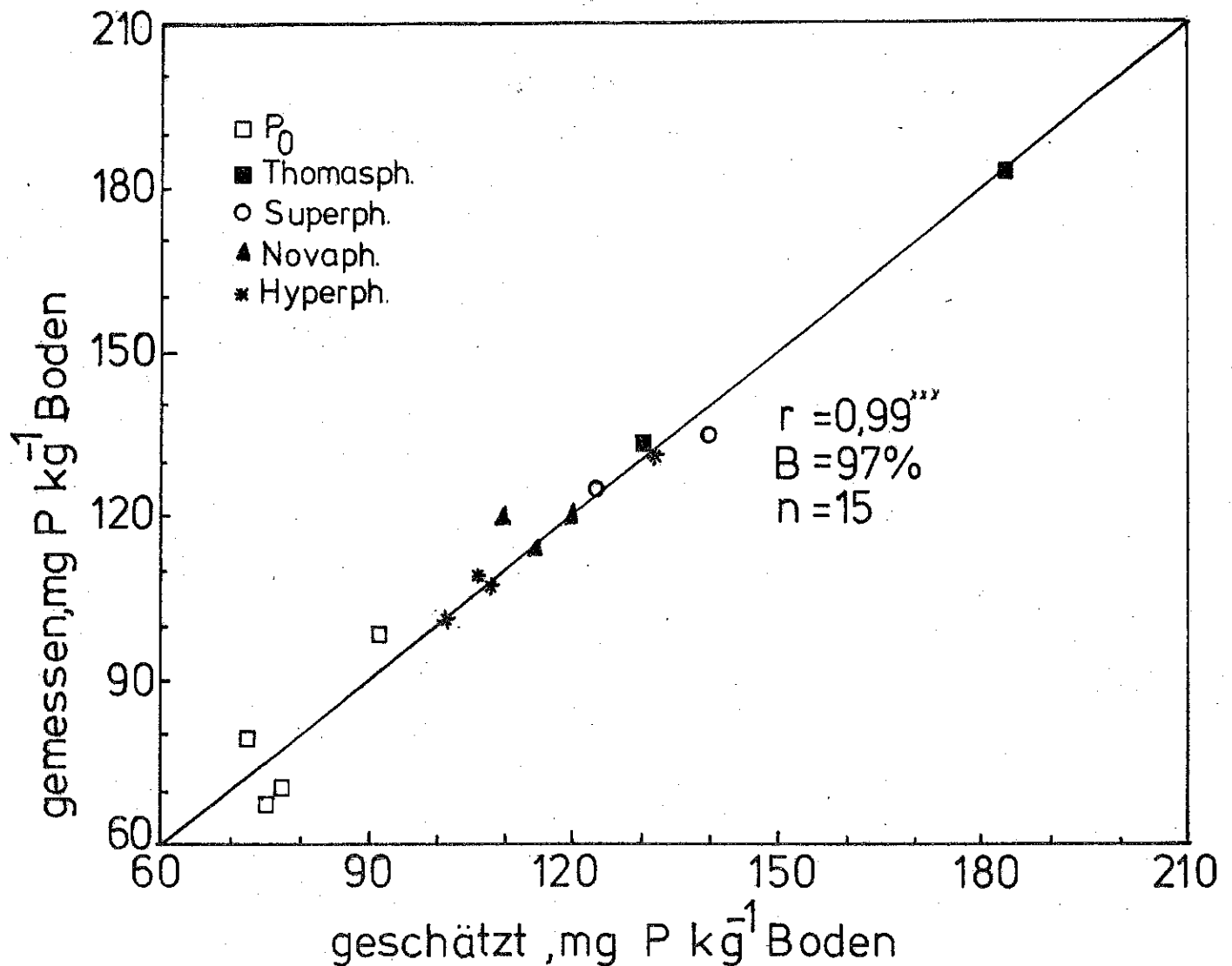
Dieser Befund verdeutlicht, daß mit der P-Freisetzungsrates in erheblich besserem Umfang die P-Verfügbarkeit nach langjähriger Rohphosphatdüngung charakterisiert werden kann als mit den statischen Extraktionsmethoden. Überraschend dürfte auch der Befund sein, daß zwischen den Ergebnissen der DL-Methode und der P-Nachlieferung der Rohphosphatvarianten keine statistisch gesicherte Korrelation besteht (s. Tab. 19). Dieses bestätigt die bereits von Werner (1969) und Reichard (1969) gemachte Aussage, daß mit der DL-Methode nur eine unzureichende Bewertung der P-Verfügbarkeit nach Rohphosphatdüngung getroffen werden kann. Auffallend ist die positive und signifikante Beziehung zwischen den EUF-löslichen Ca-Fractionen und der P-Aufnahme aller Varianten (s. Tab. 18). Bei alleiniger Verrechnung der Rohphosphatvarianten konnte zwischen dem EUF-Ca-Quotienten und der P-Aufnahme - im Gegensatz zu den P-Bestimmungsmethoden - eine gesicherte negative

Beziehung ($r = -0,75$) berechnet werden. Dieser Befund besagt, daß bei einem großen EUF-Ca 1./2. Fr. Quotienten weniger Phosphat aus dem Rohphosphat nachgeliefert wird. Dieses entspricht der Vorstellung zur Interpretation der Löslichkeit von Rohphosphaten. Untersuchungen von Anderson et al. (1985) zeigen, daß eine hohe Ca-Konzentration die P-Freisetzung aus Rohphosphaten hemmt.

In einer weiteren Auswertung sollte mit einer multiplen Regressionsanalyse eine Gewichtung der einzelnen Faktoren zur Untersuchung der Nachlieferung des im Boden durch verschiedene P-Formen angereicherten Phosphats vorgenommen werden.

In dieser Regressionsanalyse wurden verschiedene Regressoren, wie CAL-P, DL-P, P-Wasser, Me^{III} -P, EUF-P (1. + 2. Fraktion, EUF-P-Quotient), EUF-Ca, pH-Wert und die mit den verschiedenen Funktionen berechneten b-Werte der EUF-P-Extraktionskurven verrechnet.

Das Ergebnis dieser Regressionsanalyse ist in Abb. 27 dargestellt. Von den verschiedensten überprüften Parametern zeigte der b-Wert nach der Elovich-Funktion die höchste Signifikanz ($< 0,01\%$). Für diese Vorgehensweise zur Berechnung der P-Nachlieferung, bei einer Gewichtung von verschiedenen Einflußgrößen, wurde ein Bestimmtheitsmaß von 97% ermittelt, also ein höheres Bestimmtheitsmaß, als wenn nur ein Parameter mit der P-Aufnahme (= Nachlieferung) verrechnet wurde (s. Tabelle 18 und 19).



FUNKTIONSGLEICHUNG :

$$y = 27,83 + (0,36^* \times \text{CAL-P}) + (0,83^{***} \times b)$$

b = P-Freisetzungsrate, ber. nach Elovich-Funktion

* $P \leq 5\%$, *** $P \leq 0,1\%$

Abb. 27: Beziehung zwischen gemessener P-Nachlieferung im Gefäßversuch und der mit einer multiplen Regressionsanalyse geschätzten P-Nachlieferung.

Daraus resultiert, daß die P-Nachlieferung besser geschätzt werden kann, wenn verschiedene Parameter in die Berechnung einbezogen werden. Zu diesen Parametern zählen das CAL-P- und die EUF-Freisetzungsrates b , ermittelt mit der Elovich-Funktion (s. Abb. 27). Alle anderen Faktoren waren bei dieser multiplen Regressionsanalyse nicht signifikant.

Interessanterweise wurde die EUF-P-Freisetzungsrates b , berechnet mit der Elovich-Funktion, am stärksten gewichtet.

Für diesen Faktor wurde ein standardisierter Regressionskoeffizient von 0,89 berechnet, also im Vergleich zu den anderen Faktoren hat dieser Parameter den größten Einfluß für die Bemessung der P-Nachlieferung.

Daran möge man erkennen, daß mit der in dieser Arbeit entwickelten EUF-Mehrfachextraktionstechnik die P-Freisetzung bzw. Nachlieferung des durch verschiedene P-Formen angereicherten Phosphats am genauesten abgeschätzt werden konnte.

3.4 Ergebnisse der Schwermineralanalyse

Die Befunde der in dieser Arbeit durchgeführten Schwermineralanalyse, in Böden und im Düngemittel Hyperphosphat, sind in den folgenden Tabellen und Abbildungen dargestellt.

Die Schwermineralbestimmung des reinen Düngemittels ergab, daß das hier überprüfte Hyperphosphat zu 91,82% aus Schwermineralen bestand (s. Tab. 20). Die weitere Röntgenanalyse der Schwermineralfraktion von Hyperphosphat deutet darauf hin, daß es sich hierbei in der Hauptsache um Apatit handelt (vgl. die beiden Röntgendiagramme in Abb. 28).

Tabelle 20: Einfluß gesteigerter P-Gaben in Form von Hyperphosphat auf die Schwermineralmenge und die Wiederfindungsrate des zugeführten Hyperphosphat. Boden: "Kleinlinden", pH 6,8

Variante	Schwerminerale g kg ⁻¹ Boden	Differenz zu P ₀	theor. Wieder- findungsrate von Hyperphosphat g kg ⁻¹ *	tatsächl. Wieder- findungsrate von Hyperphosphat in der Schwermineral- fraktion im Boden** %
P ₀	15,14a	-	-	-
362,2 mg P kg ⁻¹	16,86b	1,72	2,3774	72,3
800,0 mg P kg ⁻¹	18,58c	3,44	5,2506	65,5 x = 68,9

Hyperphosphat g kg⁻¹ Düngemittel
918,20

* = $\frac{\text{P-Düngung} \times \text{Schwermineralmenge von Hyperphosphat}}{100} = 918,29$

** = $\frac{\text{Schwerminerale} (= \text{Differenz zu P}_0) / x}{100} \times 100$
theoretische Wiederfindungsrate von Hyperphosphat

Nicht identische Buchstaben kennzeichnen einen signifikanten Unterschied zwischen den Varianten (P < 5%)

Der Einfluß von Hyperphosphat auf die Veränderung der Schwermineralfraktion im Boden ist der Tabelle 20 zu entnehmen. Dabei zeigt sich, daß die Menge der Schwerminerale durch die Hyperphosphatdüngung anstieg. Vergleicht man aber die in der 2. Spalte von Tabelle 20 aufgelisteten Differenzen der Schwermineralmenge zur ungedüngten Variante mit der theoretischen Wiederfindungsrate des gedüngten Hyperphosphats, so wird deutlich, daß bei der niedrigen P-Stufe 72,3% und bei der hohen P-Stufe 65,6% des zugeführten Hyperphosphats in der Schwermineralfraktion wiedergefunden wurden. Im Schnitt der beiden Varianten betrug die Wiederfindung von Hyperphosphat 68,9%.

Infolge der P-Düngung mit Hyperphosphat stieg sowohl die P-Konzentration als auch die P-Menge in der Schwermineralfraktion an (s. Tab. 21). Der Anstieg der P-Menge in der Schwermineralfraktion war aber nicht mit der Höhe der P-Düngung identisch.

Die Frage, ob die P-Anreicherung oder die Zunahme der Schwerminerale im Boden tatsächlich auf apatitisch gebundenem Phosphat beruht, kann aus den in den Abbildungen 29 bis 31 dargestellten Röntgendiagrammen der Schwermineralfraktion sowie aus den in Tabelle 22 aufgeführten 2-Theta-Werten und den dazugehörigen Intensitätsangaben entnommen werden.

Der charakteristische "Apatit-Peak" wird am deutlichsten bei einem 2-Theta-Wert von 32,21, wie das Röntgendiagramm der Abbildung 28 dokumentiert. In diesem Bereich war bei der niedrigen P-Stufe eine geringe Veränderung der Intensitäten zu erkennen, die aber bei der hohen P-Stufe sehr deutlich verstärkt wurde (vgl. dazu die Abbildungen 29, 30 und 31).

Diese Befunde zeigen, daß eine Apatitanreicherung im Boden mittels Schwermineraltrennung und Röntgenanalyse erst bei sehr hohen Rohphosphatgaben im Modellversuch sichtbar wird. Diese relativ hohe und vor allem langjährige Rohphosphatdüngung traf für den langjährigen P-Formen-Versuch Dissen zu.

Die Befunde der Schwermineralanalyse zur Charakterisierung des Apatitumsatzes des Standortes Dissen sind in Tabelle 23

dargestellt. Im Vergleich zum Modellversuch wurde die Menge der Schwermineralfraktion weder durch Hyper- noch durch Thomasphosphat beeinflusst. Deutliche Unterschiede traten aber bei der P-Konzentration und bei der P-Menge in der Schwermineralfraktion der verschiedenen Varianten auf. In der Variante mit Hyperphosphatdüngung wurde die P-Konzentration um 81% und die P-Menge der Schwermineralfraktion um 78% im Vergleich zur Variante ohne Düngung erhöht. Bei Thomasphosphat betrug der Anstieg in den untersuchten Parametern der Schwermineralfraktion 38 bzw. 40%. Obwohl die Unterschiede in der P-Menge der Schwermineralfraktion zwischen den Varianten relativ groß waren, ergaben die mineralogischen Untersuchungen mittels Röntgenbeugungsanalyse keine Hinweise für Apatitkristalle in der Schwermineralfraktion bei der Hyperphosphatvariante (Röntgendiagramme hier nicht gezeigt). Dieser Befund würde bedeuten, daß die verstärkte P-Anreicherung in der Schwermineralfraktion bei Hyperphosphat nicht auf apatitischem Phosphat beruht, sondern daß die mit dem Hyperphosphat gedüngten Apatitkristalle in andere P-Verbindungen umgewandelt wurden. Es könnten dabei eventuell andere schwerlösliche Ca-Phosphate entstanden sein, die aber nicht identifiziert werden konnten.

Tabelle 21: Einfluß gesteigerter P-Gaben in Form von Hyperphosphat auf die P-Konzentration und P-Menge in der Schwermineralfraktion. Boden: "Kleinslinden", pH: 6,8

	mg P g ⁻¹ Schwer- minerale	mg P kg ⁻¹ Boden in der Schwermineral- fraktion
P ₀	4,76 ^a	72,1 ^a
362,2 mg P kg ⁻¹	17,17 ^b	289,5 ^b
800 mg P kg ⁻¹	32,54 ^c	604,6 ^c

Nicht identische Buchstaben kennzeichnen einen signifikanten Unterschied zwischen den Varianten (P < 5%)

Tabelle 22: 2-Theta-Werte und Intensitäten der Röntgen-
diagramme für den Bereich von Apatiten in der
Schwermineralfraktion von Hyperphosphat und
des mit Hyperphosphat gedüngten Bodens
"Kleinsindern".

Variante	2-Theta-Wert	Intensität Impulse sec ⁻¹
Hyperphosphat	32,21	6954,3
P ₀	32,85	32,5
P ₃₆₂ mg kg ⁻¹	32,21	97,4
P ₈₀₀ mg kg ⁻¹	32,34	503,0

2-Theta-Wert: Doppelter Beugungswinkel der entsprechenden
Netzebenenabstände für die Wellenlänge = 1,5405 Å, Cu-Strah-
lung.

Tabelle 23: Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen auf die Schwermineralmenge, die P-Konzentration und die P-Menge der Schwermineralfraktion im Boden. Boden: Dissen

	Schwerminerale g kg ⁻¹ Boden	P-Konzentration mg P g ⁻¹ Schwerminerale	P-Menge in der Schwermineralfraktion mg P kg ⁻¹ Boden
P ₀	24,17a	3,20a = 100%	77,34a = 100%
P _{Hy}	23,82a	5,78b = 181%	137,68b = 178%
P _{Th}	24,82a	4,44c = 138%	108,51c = 140%

Nicht identische Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (P = 5%)

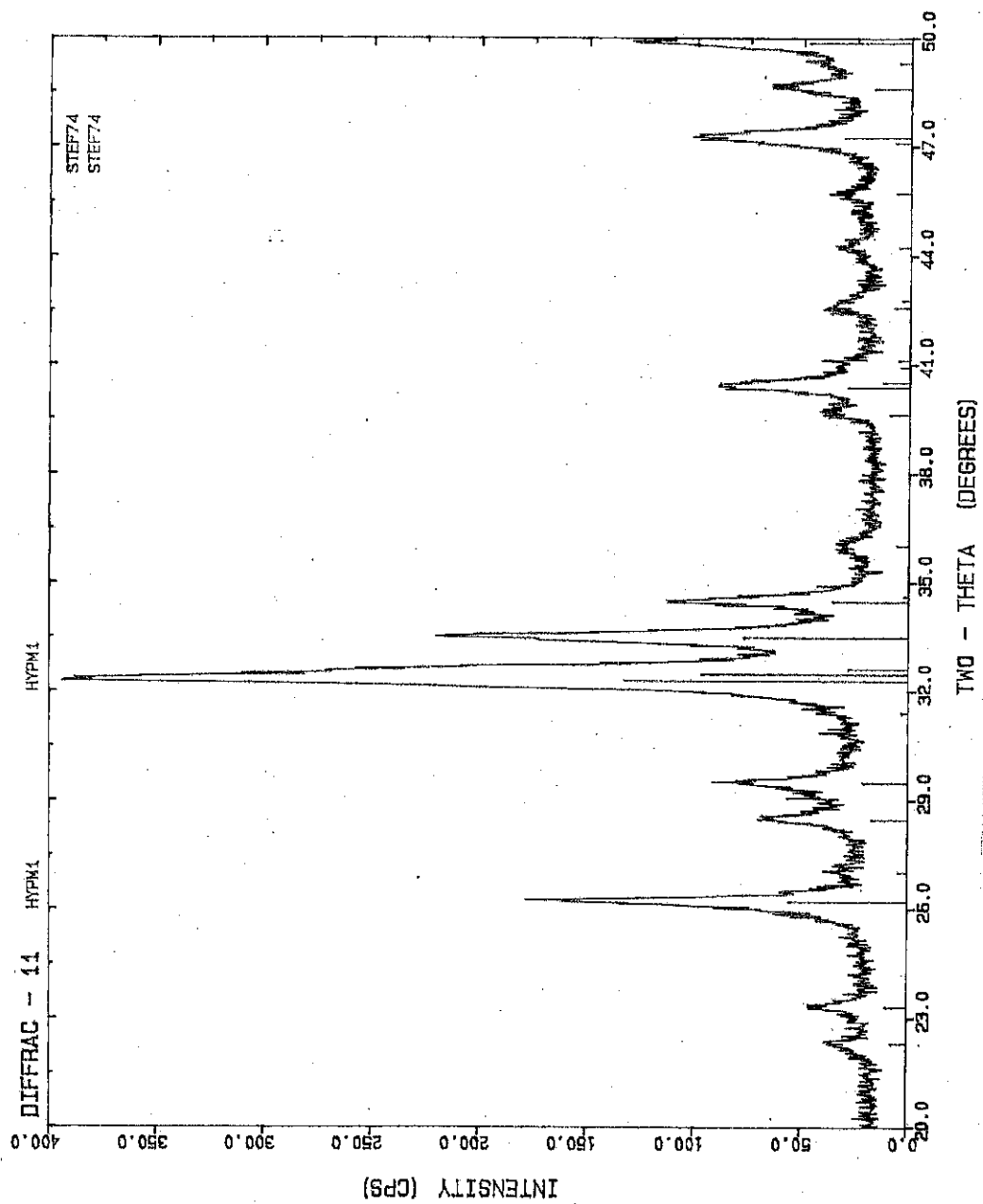


Abb. 28: Röntgenbeugungsdiagramm von der Schwermineralfraktion von reinem Hyperphosphat (= blaue Linie= sowie das Spektrum eines Hydroxylapatits (= grüne Linie).

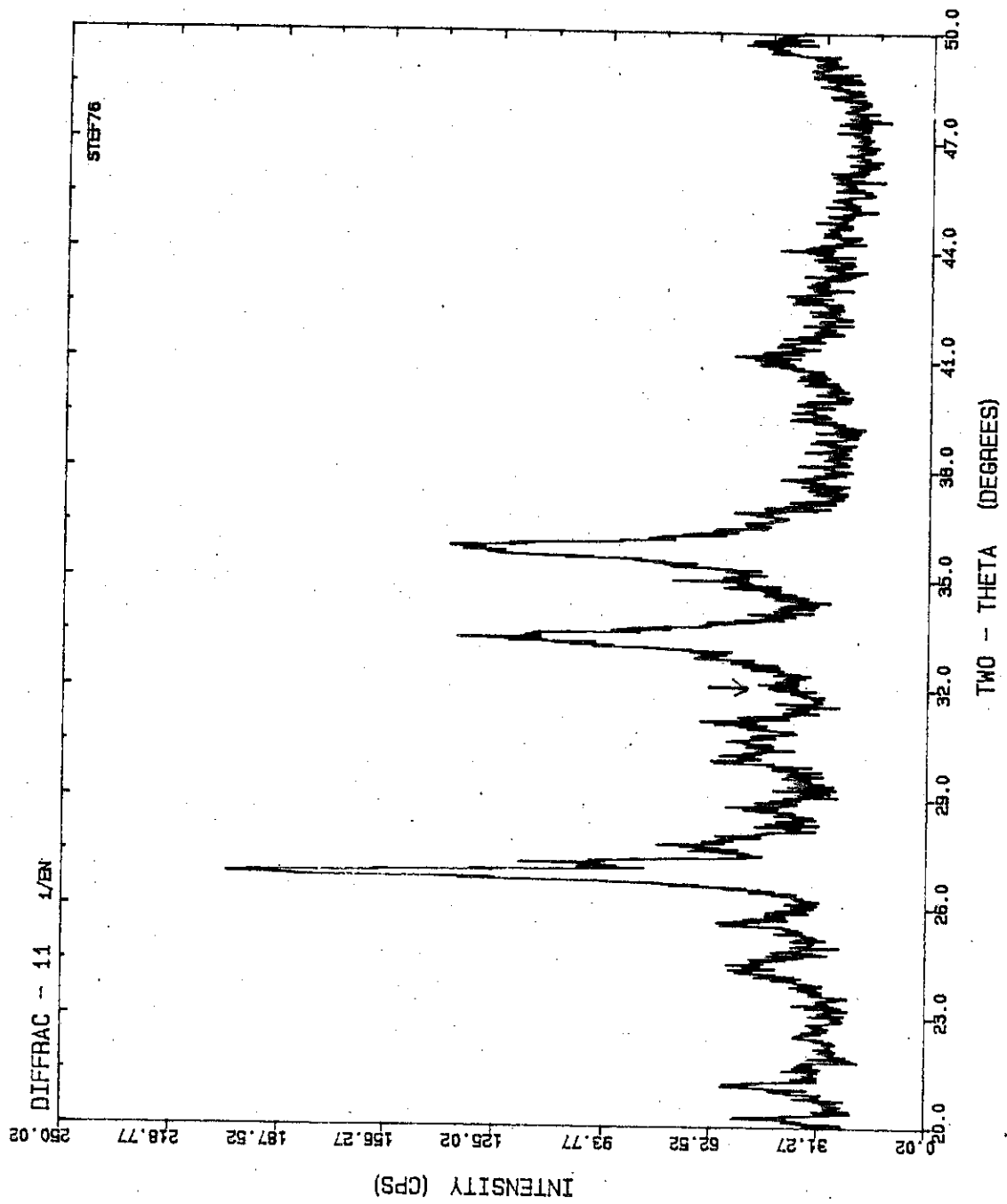


Abb. 29: Röntgenbeugungsdiagramm von der Schwermineralfraktion des nicht mit Hyperphosphat gedüngten Bodens "Kleinlinden" (Pfeil kennzeichnet Apatit-Peak).

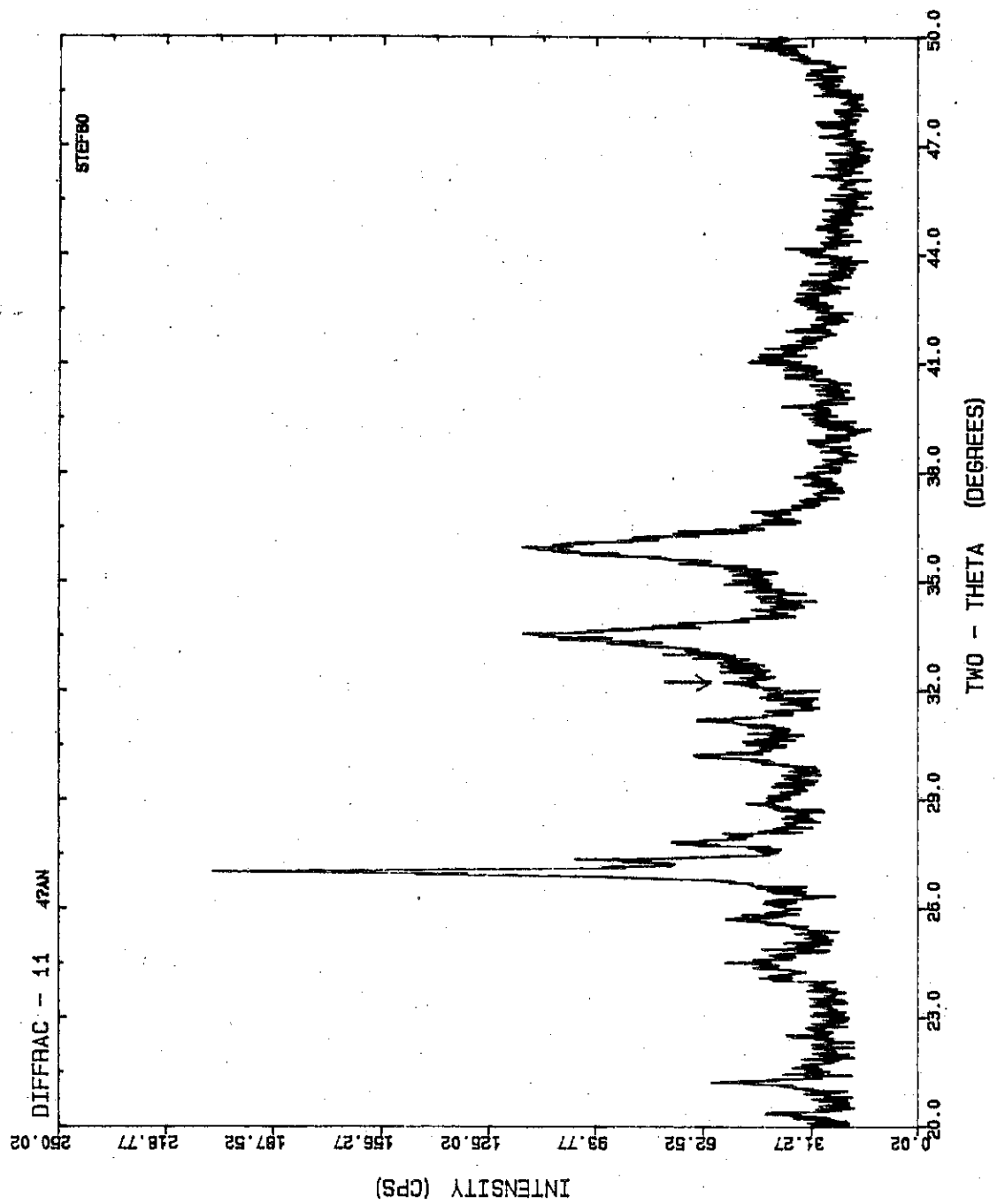


Abb. 30: Röntgenbeugungsdiagramm von der Schwermineralfraktion des mit Hyperphosphat gedüngten Bodens "Kleinlinden" ($362,2 \text{ mg P kg}^{-1}$; Pfeil kennzeichnet Apatit-Peak).

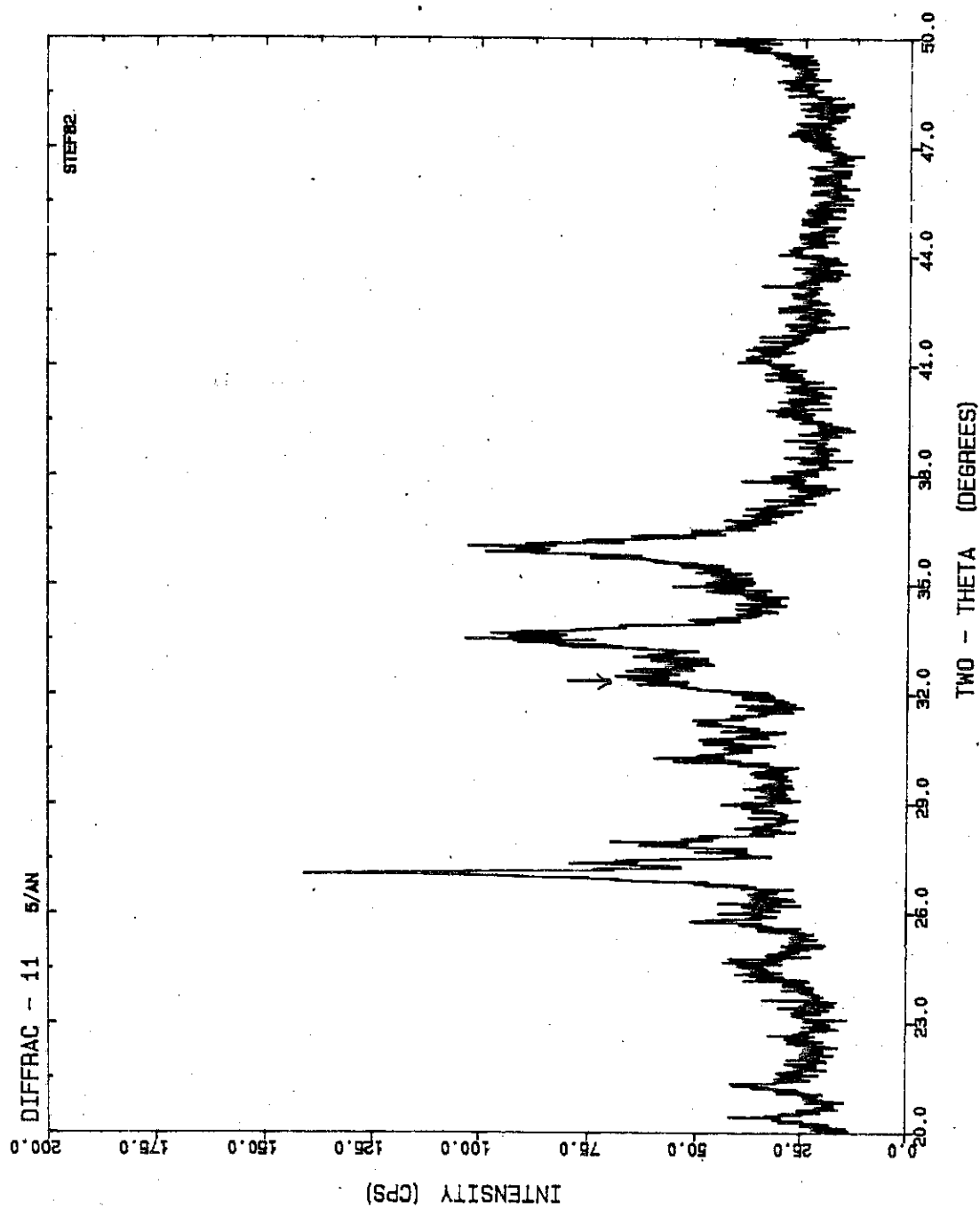


Abb. 31: Röntgenbeugungsdiagramm von der Schwermineralfraktion des mit Hyperphosphat gedüngten Bodens "Kleinlinden", 800 mg P kg⁻¹ (Pfeil kennzeichnet Apatit-Peak).

3.5 Bedeutung von Standortfaktoren für die Wirksamkeit von Rohphosphat unter besonderer Berücksichtigung der Wurzel- zelausbildung

Die bislang vorgestellten Befunde der Gefäßversuche lassen eine bessere Ertragswirksamkeit und einen stärkeren Umsatz im Boden von vollaufgeschlossenen P-Formen als von apatitischen Düngemitteln erkennen. Rohphosphat hatte in diesen Versuchen erst bei pH-Werten $<5,0$ die gleiche Wirkung wie vollaufgeschlossenes Phosphat, wobei die Löslichkeit von Rohphosphat von bodenchemischen Faktoren, wie dem pH-Wert sowie der P- und Ca^{2+} -Konzentration, abhängt. Diese genannten bodenchemischen Parameter sind aber nicht ausreichend, um die in manchen Feldversuchen (pH-Werte $>5,0$) beobachtete ebenbürtige Ertragswirksamkeit von Hyperphosphat im Vergleich zu vollaufgeschlossenen P-Formen zu erklären (Wachtel et al. 1985; Amberger und Gutser, 1976). Demnach dürfte die Wirksamkeit von rohphosphathaltigen Düngemitteln auch noch von anderen Faktoren abhängen, wie z.B. den Standortfaktoren Bodenfeuchte und Bodengefüge und der daraus resultierenden Wurzel-
zelausbildung der Kulturpflanzen. Diese Faktoren wurden seither bei der Interpretation von vergleichenden P-Formen-Versuchen nur kaum berücksichtigt.

Prinzipiell gilt, daß bei Pflanzen mit einem sehr dichten Wurzelsystem im Boden das Niveau an verfügbarem Phosphat niedriger sein kann als bei Pflanzen mit einem weniger dichten Wurzelsystem, um ausreichend mit Phosphat ernährt zu werden (Steffens, 1984). Die Abb. 32 zeigt exemplarisch die Beziehung zwischen der Wurzellänge und der Abnahme der P-Konzentration in einer Nährlösung (= Bodenlösung). In der Variante mit 23,2 m Wurzellänge pro Gefäß senkte Mais die P-Konzentration schneller ab als in den Varianten mit 12,9 bzw. 8,3 m Wurzellänge pro Gefäß. Die P-Konzentrationen bei Versuchsende spiegeln den Einfluß der Wurzellänge wider; in der Variante mit der größten Wurzellänge wurde die P-Konzen-

tration der Nährlösung erheblich stärker erniedrigt als in der Variante mit 12,9 m Wurzellänge, gefolgt von der Variante mit 8.3 m Wurzellänge pro Gefäß. Über die Bedeutung der Wurzellänge für die P-Aufnahme berichten auch Jungk und Barber (1974). Diese Autoren konnten ebenfalls zeigen, daß die Pflanzen die P-Konzentration einer Nährlösung um so stärker absenken und um so mehr Phosphat aufnehmen, je größer die Wurzellänge ist. Für die Verfügbarkeit von Rohphosphat würde dies bedeuten, daß Pflanzen mit einer großen Wurzellänge pro Einheit Bodenvolumen auch dann noch genügend Phosphat aufnehmen können, wenn die P-Konzentration der Bodenlösung sehr niedrig ist, was in der Regel nach Anwendung von Rohphosphat der Fall ist, und daß die durch die P-Aufnahme induzierte Abnahme der P-Konzentration der Bodenlösung noch zusätzlich Phosphat aus den Apatiten löst. In den folgenden Kapiteln soll besonders über die Einflüsse von Standortfaktoren auf die Wurzelausbildung und deren Bedeutung für die Verfügbarkeit von Rohphosphat berichtet werden. Zusätzlich wird der Einfluß der Rhizosphäre für die Verfügbarkeit von verschiedenen P-Formen sowie die Bedeutung einer plazierten P-Düngung mit Hyper- und Superphosphat auf das Wurzelwachstum vorgestellt.

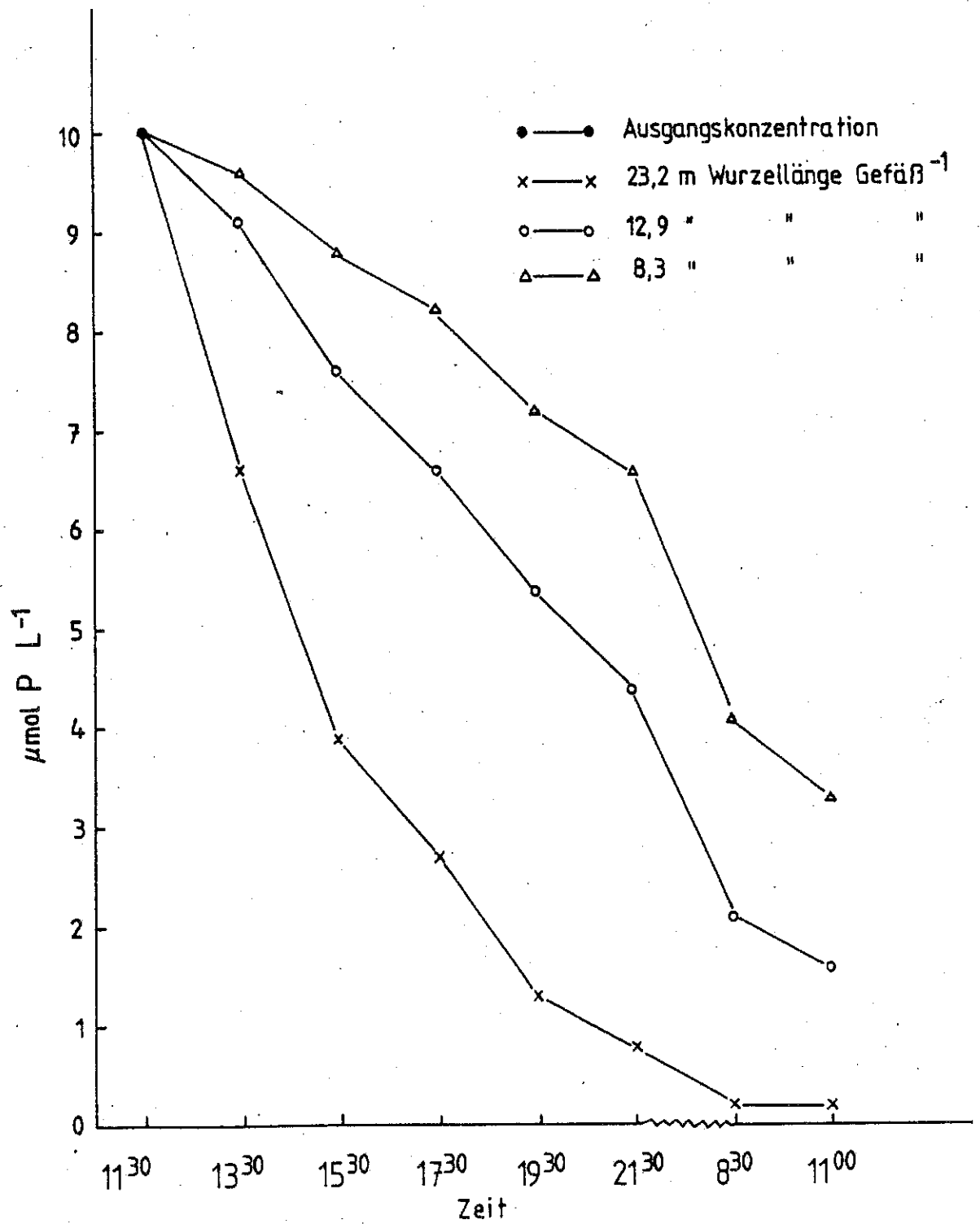


Abb. 32: Einfluß der Wurzellänge und der Zeit auf die Abnahme der P-Konzentration in einer Nährlösung bei Mais.

3.5.1 Rhizosphäre

Der Einfluß der Rhizosphäre auf den P-Umsatz von verschiedenen P-Formen wurde mit Bodenproben des langjährigen vergleichenden Feldversuchs "Burguffeln" durchgeführt (s. Kapitel 2.2.8).

Die Abb. 33 zeigt die P-Konzentration in der Rhizosphäre von Raps für die ungedüngte Variante und der drei P-Formen. Die dargestellten Verarmungsprofile der verschiedenen Varianten weisen große Unterschiede auf. Ihrem Anteil an nichtaufgeschlossenem Phosphat entsprechend wurde in der Thomasphosphatvariante der größte und in der Hyperphosphatvariante der kleinste Konzentrationsgradient für Phosphat im Vergleich zur Variante ohne P-Düngung gefunden. Interessanterweise ist das an der Wurzeloberfläche gemessene Niveau an wasserlöslichem Phosphat in der Thomasphosphat- und Novaphosphatvariante höher als in der Hyperphosphatvariante und in der Variante ohne P-Düngung.

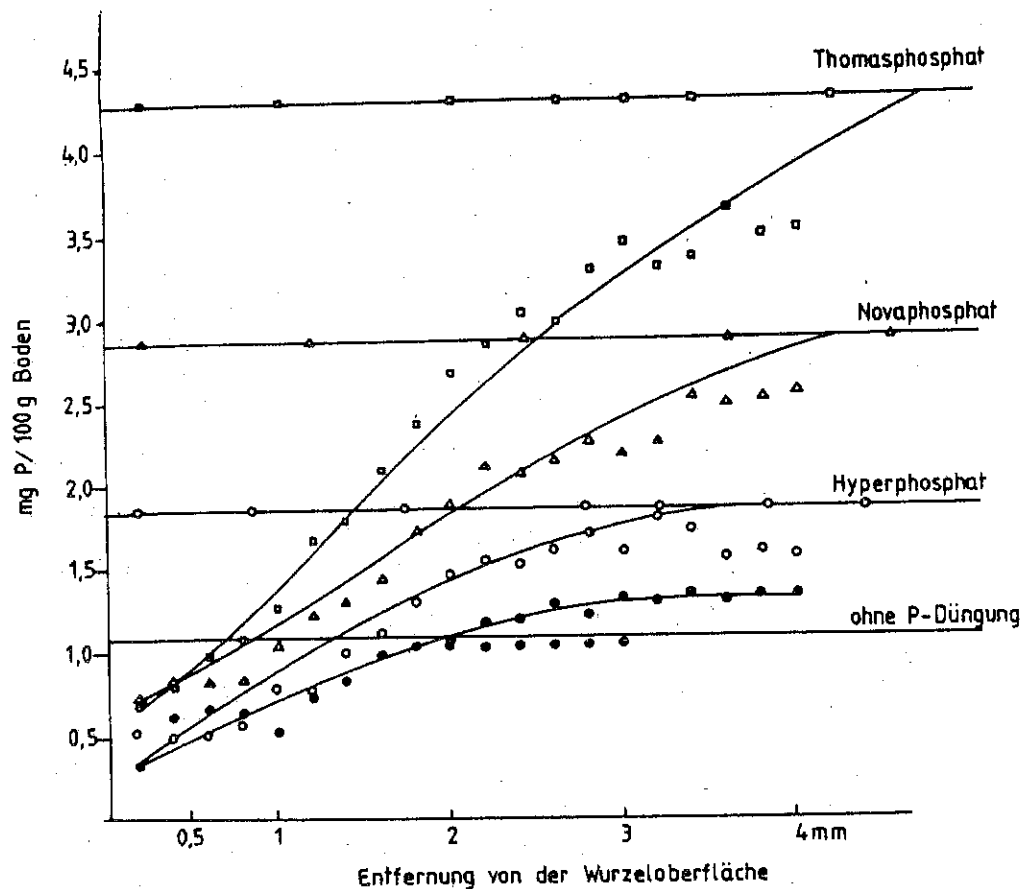


Abb. 33: Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen im Feld auf die wasserlösliche P-Konzentration in der Rhizosphäre von Raps (die waagerechten Linien entsprechen der P-Konzentration der jeweiligen Variante ohne Bewuchs). Standort: Burguffeln.

Auf der Basis der in Abb. 33 gezeigten Verarmungsprofile konnte durch die Differenz zwischen der wasserlöslichen P-Konzentration des unbewachsenen und des bewachsenen Bodens die P-Abgabe an die Wurzel berechnet werden (s. Tab. 24).

Tab. 24: Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen auf die Abgabe von wasserlöslichem Phosphat in der Rhizosphäre von Raps.
Standort: Burguffeln

Variante	$\mu\text{g P Gefäß}^{-1}$
P _O	16,3
P _{Hyper}	55,0
P _{Nova}	99,2
P _{Thomas}	168,3

Diese Berechnung zeigt, daß der wurzelnahe Boden der Hyperphosphatvariante deutlich mehr Phosphat freisetzte als der der ungedüngten Variante. In der Novaphosphatvariante, bedingt durch den wasserlöslichen Anteil, wurden aber deutlich mehr und in der Thomasphosphatvariante das Dreifache von der Menge abgegeben, die in der Hyperphosphatvariante analysiert wurde.

3.5.2 Plazierte P-Düngung

Mit diesem Versuch sollte der Einfluß einer plazierten P-Düngung in Form von Hyper- und Superphosphat auf die Wurzelausbildung untersucht werden. Die Ergebnisse dieses Experiments auf die Wurzelausbildung von Mais sind in der Abbildung 34 dargestellt. Nur in der mit Superphosphat gedüngten Zone kam es zu einer Förderung des Wurzelwachstums (Abb. 34). Das plazierte ausgebrachte Hyperphosphat induzierte im Vergleich zur ungedüngten Variante kein verstärktes Wurzelwachstum (Abb. 34). Die Wurzellängendichte (cm/cm^3)

nahm nur bei Superphosphat im Vergleich zur P_0 - und Hyperphosphatvariante zu (s. Tab. 25).

Durch Hyperphosphat wurde die Wurzellängendichte nicht gefördert. Dieser Befund dokumentiert, daß das Wurzelwachstum auf einem sehr P-armen Boden nicht durch Rohphosphat, sondern durch wasserlösliches Phosphat stimuliert wurde. Des weiteren war in der Superphosphatvariante das Wurzel/Sproßverhältnis kleiner als in der P_0 - und Hyperphosphatvariante (Tab. 26).

Tab. 25: Einfluß einer placierten P-Düngung mit Hyper- und Superphosphat auf die Wurzellängendichte in den verschiedenen Bodenzonen (A: obere Schicht, ohne Düngung P_O; B: mittlere Schicht, mit P-Düngung; C: untere Schicht, ohne P-Düngung)
Boden: "Klein-Linden", pH (CaCl₂): 6,1

	Bodenschicht	A	B cm/cm ³	C	GD 5%
P _O		1,66	0,78	0,86	0,20
P _{Hy}		1,54	0,80	1,17	0,67
P _{Su}		2,60	5,37	3,77	2,52
	GD 5%	1,86	0,57	1,74	

Tab. 26: Effekt einer placierten P-Düngung mit Hyper- und Superphosphat auf die Sproßmasse, die P-Konzentration im Sproß, die P-Aufnahme und das Wurzel-Sproß-Verhältnis von Mais

	Sproßmasse g TS Gefäß ⁻¹	P-Konzentration mg g ⁻¹ TS	P-Aufnahme mg Gefäß ⁻¹	Wurzel/Sproß-Verhältnis Wurzelfrischmasse/ Sproßfrischmasse
P _O	0,65 a	0,87 a	0,57 a	1,27 a
P _{HY}	0,91 b	0,86 a	0,78 b	1,10 b
P _{Su}	2,70 c	1,40 b	3,78 c	0,87 c

Verschiedene Buchstaben kennzeichnen den signifikanten Unterschied zwischen den Varianten ($P \leq 5\%$)

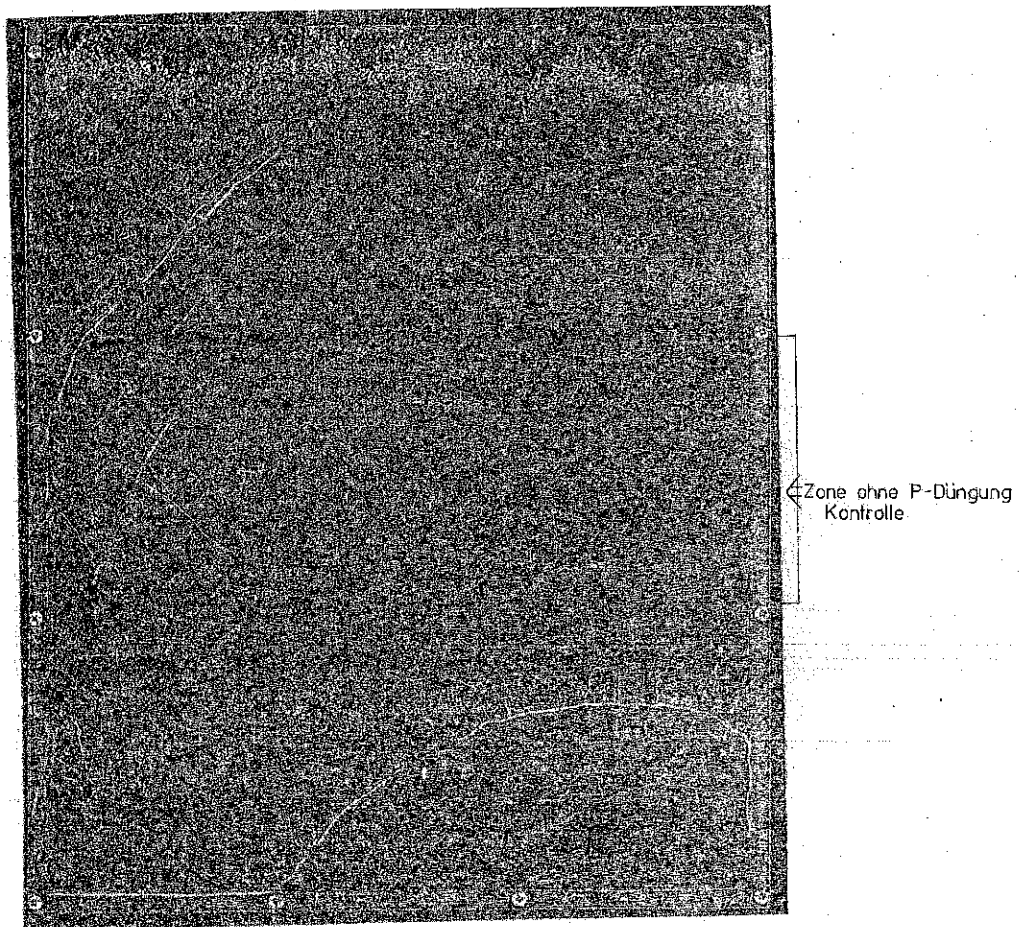
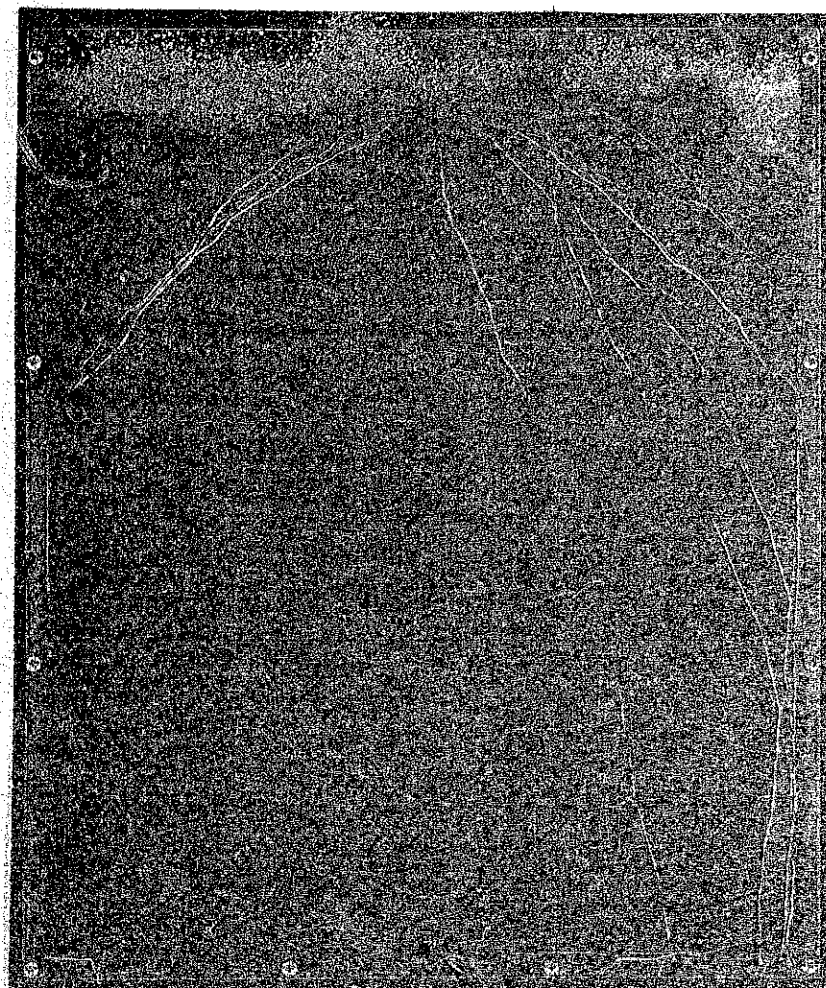
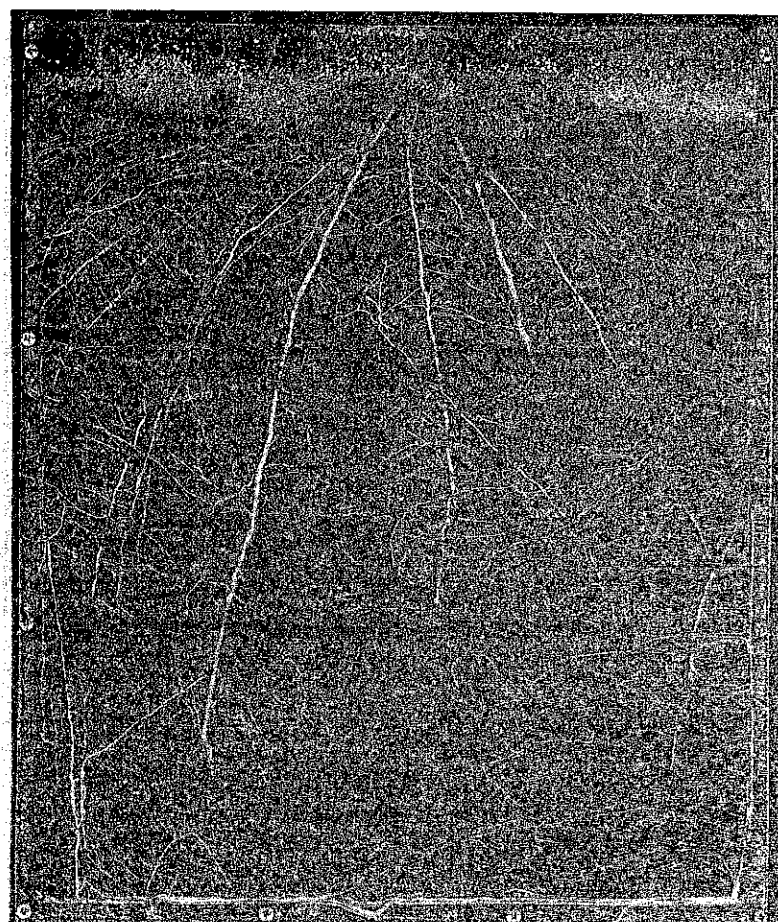


Abb. 34: Einfluß einer placierten P-Düngung auf die Wur-
zelausbildung von Mais.
Kontrollvariante



← Zone mit 50 mg P kg^{-1} Boden
Hyperphosphat

Abb. 34: Hyperphosphatvariante



← Zone mit 50 mg P kg^{-1} Boden
Superphosphat

Abb. 34: Superphosphatvariante

Die Produktion von 1 g Sproßmasse erforderte also in der Superphosphatvariante erheblich weniger Wurzelmasse als in den beiden anderen Varianten.

Infolge der besseren Löslichkeit von Superphosphat erzielte Mais mehr oberirdische Trockenmasse und eine höhere P-Konzentration im Sproß als in der Hyperphosphatvariante (Tab. 26).

3.5.3 Bodengefüge

Infolge der Gefügeveränderung wurde das CAL- und wasserlösliche Phosphat nicht verändert (s. Abb. 35). Die Düngung von Superphosphat ließ das CAL- und wasserextrahierbare Phosphat deutlich stärker ansteigen als bei Rohphosphat, obwohl der Versuchsboden einen pH-Wert von 5,3 aufwies.

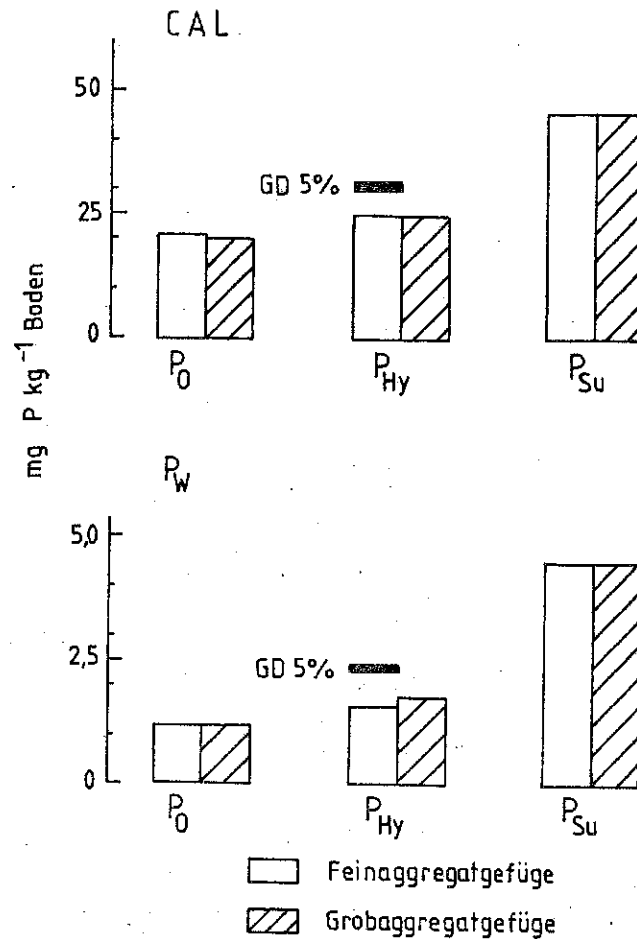


Abb. 35: Einfluß der P-Form und des Bodengefüges auf das CAL- und Wasser-lösliche Phosphat vor der Aussaat von Sommerweizen

Die Bedeutung des Bodengefüges und der P-Düngung mit verschiedenen P-Formen auf das Wurzelwachstum ist der Tabelle 27 zu entnehmen.

Die Wurzelfrischmasse und die Wurzellänge wurden durch das Grobagggregatgefüge bei allen P-Stufen im Vergleich zur Feinaggregatvariante deutlich vermindert. Durch die P-Düngung stieg die Wurzelfrischmasse in beiden Gefügevarianten gegenüber der P₀-Variante signifikant an, wobei der Anstieg in der Superphosphatvariante stärker ausgeprägt war als in der Hyperphosphatvariante. Bei der Wurzellänge ist das Umgekehrte zu beobachten. In der P₀-Variante war die Wurzellänge deutlich größer als in den gedüngten Varianten, wobei bei Hyper-

phosphat die Wurzellänge noch größer war als bei Superphosphat (Tab. 27). Dieser Befund demonstriert sehr anschaulich, daß die Pflanzen ein niedriges P-Niveau bzw. die geringe Löslichkeit von Hyperphosphat versuchen zu kompensieren, indem die Wurzellänge gegenüber der Superphosphatvariante vergrößert wurde.

Tab. 27: Einfluß des Bodengefüges und der P-Form auf die Wurzelfrischmasse und Wurzellänge von Sommerweizen beim Schossen

	P ₀	P _{Hy}	P _{SU}
	Wurzelfrischmasse (g Gefäß ⁻¹)		
Feinaggregatgefüge	82,2	156,8 ^a	171,9 ^b
Grobaggregatgefüge	67,3 ^a	116,8 ^b	156,7 ^c
	P ₀	P _{HY}	P _{SU}
	Wurzellänge (m Gefäß ⁻¹)		
Feinaggregatgefüge	1255	1023 ^a	904 ^a
Grobaggregatgefüge	904 ^b	789 ^b	596 ^b

Nicht identische Buchstaben in horizontaler und vertikaler Richtung kennzeichnen signifikanten Unterschied ($P \leq 5\%$)

Aufgrund der größeren Wurzellänge in der P₀- und Hyperphosphatvariante im Vergleich zur Superphosphatvariante waren auch keine Unterschiede in der P-Konzentration zum Zeitpunkt des Schossens zwischen den Varianten des Feinaggregatgefüges zu erkennen (s. Tab. 28). Durch das Grobaggregat-Gefüge fiel die P-Konzentration der Pflanzen in der P₀-Variante und bei Hyperphosphat im Vergleich zum Feinaggregatgefüge signifikant ab. In der Superphosphatvariante war die P-Konzentration in beiden Gefügeformen vergleichbar.

Die N- und K-Gehalte der Pflanzen wurden durch die Gefügeveränderung nicht beeinflusst (Tab. 28).

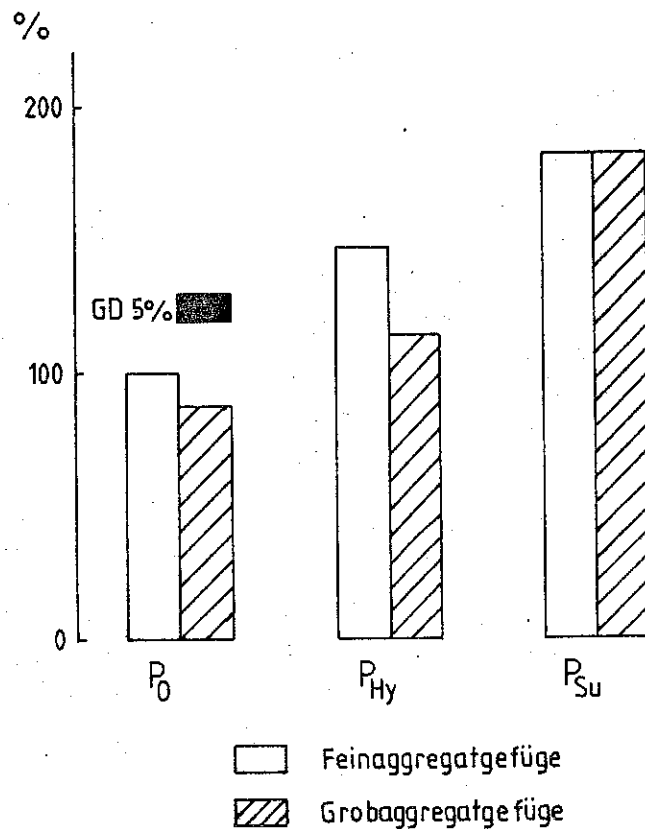


Abb. 36: Relative Ertragswirksamkeit von Hyper- und Superphosphat in Abhängigkeit des Bodengefüges auf die Kornerträge von Sommerweizen (P₀-Feinaggregatgefüge = 100%)

In der Abb. 36 sind die Kornerträge der drei P-Varianten des Feinaggregat- und Grobagggregat-Gefüges als Relativerträge dargestellt. Durch die P-Düngung stiegen die relativen Kornerträge in beiden Gefügeformen im Vergleich zur ungedüngten Variante an, wobei bei Superphosphat der Höchstertrag erreicht wurde. Die relative Ertragswirksamkeit von Hyperphosphat wurde durch das Grobagggregat-Gefüge um 32% reduziert. Dieser drastische Ertragsabfall war bei Superphosphat in der Grobagggregat-Variante nicht zu verzeichnen. Gleiches traf auch für die P-Aufnahme der Pflanzen zu (Tab. 29). Der Rückgang der P-Aufnahme durch die Veränderung des Bodengefü-

Tab. 28: Einfluß des Bodengefüges und der P-Form auf die N-, P- und K-Konzentration im Sommerweizen-Sproß beim Schossen

	P _O			P _{HY}			P _{SU}		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
				mg g ⁻¹ TS					
Feinaggregatgefüge	34,2	2,5 ^a	47,5	32,4	2,5 ^a	44,3	35,0	2,5 ^a	47,4
Grobaggregatgefüge	33,2	2,0 ^b	46,2	34,3	1,9 ^b	45,4	34,1	2,7 ^a	45,0

Nicht identische Buchstaben in horizontaler und vertikaler Richtung kennzeichnen signifikante Unterschiede ($P \leq 5\%$)

ges wurde besonders in der ungedüngten und der Hyperphosphatvariante beobachtet.

Tab. 29: Einfluß des Bodengefüges und der P-Form auf die P-Aufnahme von Sommerweizen (Korn und Stroh)

	P _O	P _{Hy}	P _{Su}
	mg Gefäß ⁻¹		
Feinaggregat- gefüge	121,5 (=100%)	211,6 ^a (174)	286,2 ^{bc} (235)
Grobaggregat- gefüge	107,8 ^a (89)	133,6 ^b (110)	277,8 ^c (229)

Nicht identische Buchstaben in horizontaler und vertikaler Richtung kennzeichnen signifikanten Unterschied ($P \leq 5\%$)

Die hier vorgestellten Zusammenhänge zwischen Wurzelwachstum und Bodengefüge sowie der P-Form zeigen sehr deutlich, daß besonders die Wirksamkeit von Hyperphosphat reduziert wird, wenn die räumliche Zugänglichkeit der Wurzeln zum Phosphat durch ein Grobaggregat-Gefüge verringert wird. Dieser Effekt war bei Superphosphat nicht ausgeprägt, weil die hohe Löslichkeit dieser P-Form den negativen Einfluß des Grobaggregat-Gefüges auf das Wurzelwachstum kompensieren konnte.

3.5.4 Bodenfeuchte

Zu den wichtigen ertragsbestimmenden Standortfaktoren zählt, neben der Gefügeform und der Nährstoffversorgung, auch die nutzbare Wasserkapazität der Böden (Harrach, 1978; Steffens und Mengel, 1983).

ges wurde besonders in der ungedüngten und der Hyperphosphatvariante beobachtet.

Tab. 29: Einfluß des Bodengefüges und der P-Form auf die P-Aufnahme von Sommerweizen (Korn und Stroh)

	P _O	P _{Hy}	P _{Su}
	mg Gefäß ⁻¹		
Feinaggregat- gefüge	121,5 (=100%)	211,6 ^a (174)	286,2 ^{bc} (235)
Grobaggregat- gefüge	107,8 ^a (89)	133,6 ^b (110)	277,8 ^c (229)

Nicht identische Buchstaben in horizontaler und vertikaler Richtung kennzeichnen signifikanten Unterschied ($P \leq 5\%$)

Die hier vorgestellten Zusammenhänge zwischen Wurzelwachstum und Bodengefüge sowie der P-Form zeigen sehr deutlich, daß besonders die Wirksamkeit von Hyperphosphat reduziert wird, wenn die räumliche Zugänglichkeit der Wurzeln zum Phosphat durch ein Grobaggregat-Gefüge verringert wird. Dieser Effekt war bei Superphosphat nicht ausgeprägt, weil die hohe Löslichkeit dieser P-Form den negativen Einfluß des Grobaggregat-Gefüges auf das Wurzelwachstum kompensieren konnte.

3.5.4 Bodenfeuchte

Zu den wichtigen ertragsbestimmenden Standortfaktoren zählt, neben der Gefügeform und der Nährstoffversorgung, auch die nutzbare Wasserkapazität der Böden (Harrach, 1978; Steffens und Mengel, 1983).

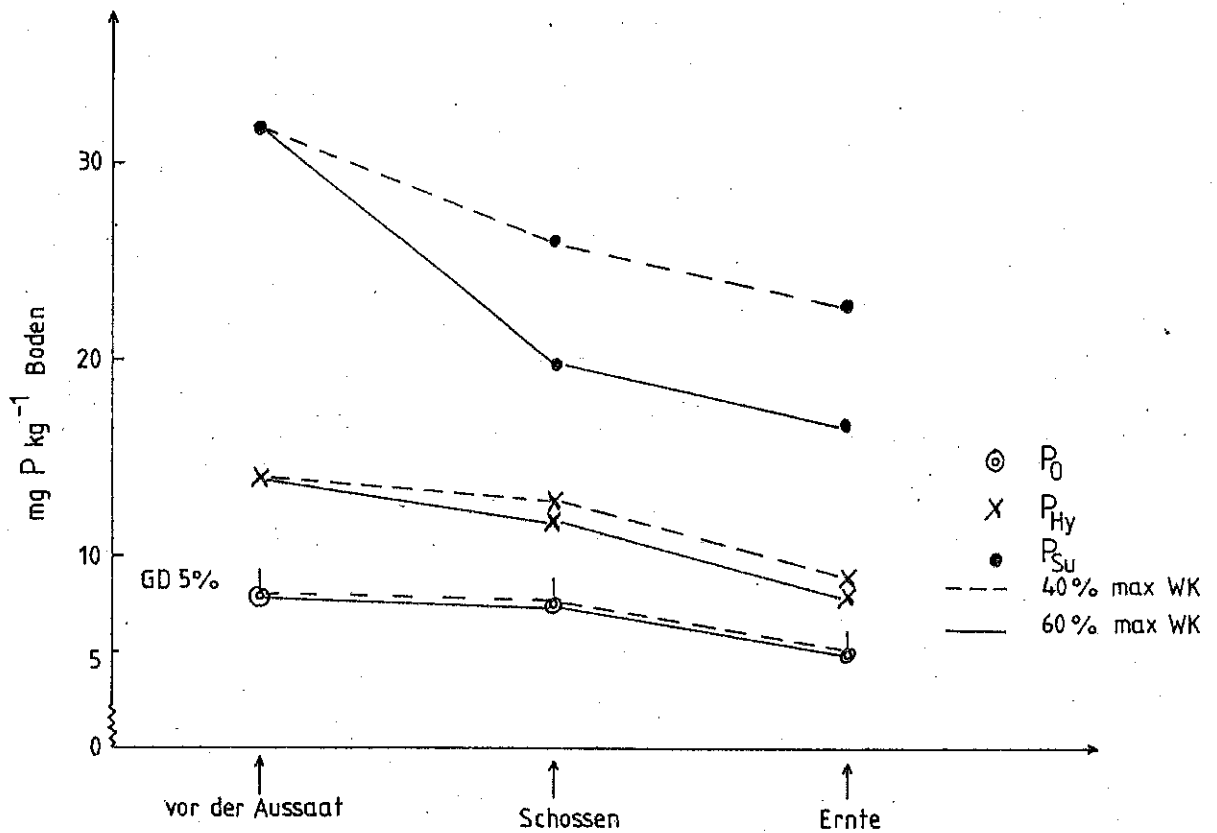


Abb. 37: Einfluß der Bodenfeuchte und der P-Form auf das CAL-lösliche Phosphat bei Sommergerste

Die Abb. 37 zeigt die CAL-P-Gehalte im Boden in Abhängigkeit der P-Düngung und der Bodenfeuchte bei Sommergerste. Durch die P-Düngung stieg das CAL-lösliche Phosphat an, wobei Superphosphat in weit stärkerem Umfang als Hyperphosphat in CAL-lösliches Phosphat umgesetzt wurde. Die nach dem Bestocken von Sommergerste differenzierte Wasserversorgung der Böden bewirkte, daß die Abnahme des CAL-löslichen Phosphats bei allen P-Varianten in der "feuchten" Stufe stärker als in der "trockenen" Stufe ausgeprägt war. Dieses gilt besonders für Superphosphat der Variante mit 60% maximaler Wasserkapazität (Abb. 37).

Tab. 30: Einfluß der Bodenfeuchte und der P-Form auf die Wurzelfrischmasse und Wurzellänge von Sommergerste zum Zeitpunkt des Schossens

	Wurzelfrischmasse (g Gefäß ⁻¹)		
	P _O	P _{Hy}	P _{Su}
60% max. WK	94,0 ^a	101,3 ^b	120,9 ^c
40% max. WK	80,6 ^a	74,9 ^a	74,5 ^{ac}

	Wurzellänge (m Gefäß ⁻¹)		
	P _O	P _{Hy}	P _{Su}
60% max. WK	931 ^a	876 ^a	1021 ^b
40% max. WK	544 ^b	633 ^b	638 ^c

Nicht identische Buchstaben in horizontaler und vertikaler Richtung kennzeichnen signifikanten Unterschied ($P \leq 5\%$)

In der Tab. 30 ist die Wirkung der Bodenfeuchte und der P-Form auf das Wurzelwachstum von Sommergerste dargestellt. In der Variante mit günstiger Wasserversorgung (60% max. Wasserkapazität) nahm die Wurzelfrischmasse durch die P-Düngung gegenüber der ungedüngten Variante zu, wobei bei Superphosphat mehr Wurzelfrischmasse als bei Hyperphosphat produziert wurde. Infolge von "Wasserstreß" nahm die Wurzelfrischmasse in allen drei P-Varianten gegenüber den Varianten mit ausreichender Wasserversorgung (60% max. Wasserkapazität) ab. Die Wurzellänge von Sommergerste wurde im Gegensatz zu den Befunden des Kapitels 3.5.3 nicht durch die P-Düngung reduziert, sondern vor allem durch die Superphosphatgabe gefördert. Vergleichbar mit der Gefügeveränderung wurde die Wurzellänge in der niedrig mit Wasser versorgten P-Variante

sehr deutlich reduziert (Tab. 30). Bei einer Bodenfeuchte von 60% der maximalen Wasserkapazität war die P-Konzentration im Sproß bei allen Varianten signifikant höher als bei einer Wasserversorgung von 40% der max. Wasserkapazität (Tab. 31).

Tab. 31: Einfluß der Bodenfeuchte und der P-Form auf die P-Konzentration im oberirdischen Aufwuchs von Sommergerste zum Zeitpunkt des Schossens

	P _O	P _{Hy}	P _{Su}
	mg P g ⁻¹ TS		
60% max. WK	0,97 ^a	1,04 ^a	1,25 ^b
40% max. WK	0,79 ^b	0,87 ^b	1,02 ^c

Nicht identische Buchstaben in horizontaler und vertikaler Richtung kennzeichnen signifikanten Unterschied ($P \leq 5\%$)

Die Ertragswirksamkeit von Super- und Hyperphosphat im Vergleich zur ungedüngten Variante in Abhängigkeit der Bodenfeuchte auf die Kornerträge von Sommergerste und Sommerweizen ist in den Abbildungen 38 und 39 dargestellt. Die Kornerträge der Varianten in der Stufe mit 60% maximaler Wasserkapazität zeigen, daß die Erträge in der Superphosphatvariante stärker ansteigen als bei Hyperphosphat. Dies gilt besonders für Sommerweizen (Abb. 39).

Betrachtet man aber die relativen Kornerträge der P-Formen bei reduzierter Wasserversorgung, so fällt auf, daß in der Hyperphosphatvariante eine größere Ertragsdepression zu verzeichnen ist als in der Superphosphatvariante (Abb. 38 und 39). Dieser Befund wird noch drastischer dokumentiert, wenn die durch die verminderte Bodenfeuchte induzierte Ertragsdepression von Sommerweizen in der Super- und Hyperphosphatvariante betrachtet wird (Abb. 39). In diesem Versuch betrug

die Wasserversorgung der "trockenen" Bodenfeuchtestufe nur 30% der maximalen Wasserkapazität. Hier zeigte sich, daß der relative Ertragsabfall in der "trockenen" Bodenfeuchtestufe gegenüber der "feuchten" Stufe bei Hyperphosphat stärker ausgeprägt ist als in der Variante mit Superphosphat. In der "trockenen" Bodenfeuchtestufe ist in der Superphosphatvariante noch eine absolute Ertragsleistung bei Gerste und Weizen zu erkennen, die der von Hyperphosphat bei ausreichender Wasserversorgung entsprach. Für die P-Aufnahme der Pflanzen trifft die gleiche Aussage zu wie für die Kornerträge (s. Tab. 32 und 33).

Tab. 32: Einfluß der Bodenfeuchte und der P-Form auf die P-Aufnahme (Korn und Stroh) von Sommerweizen

	P _O	P _{Hy}	P _{Su}
	mg P Gefäß ⁻¹		
60% max. WK	43,0 ^a	70,1 ^b	122,1 ^c
30% max. WK	9,6 ^b	14,1 ^c	70,1 ^d

Nicht identische Buchstaben in horizontaler und vertikaler Richtung kennzeichnen signifikanten Unterschied ($P \leq 5\%$)

Tab. 33: Einfluß der Bodenfeuchte und der P-Form auf die P-Aufnahme (Korn und Stroh) von Sommergerste

	P_O	P_{Hy}	P_{Su}
	mg P Gefäß ⁻¹		
60% max. WK	52,2 ^a	70,9 ^b	117,8 ^c
40% max. WK	32,8 ^b	42,2 ^c	66,0 ^d

Nicht identische Buchstaben in horizontaler und vertikaler Richtung kennzeichnen signifikanten Unterschied ($P \leq 5\%$)

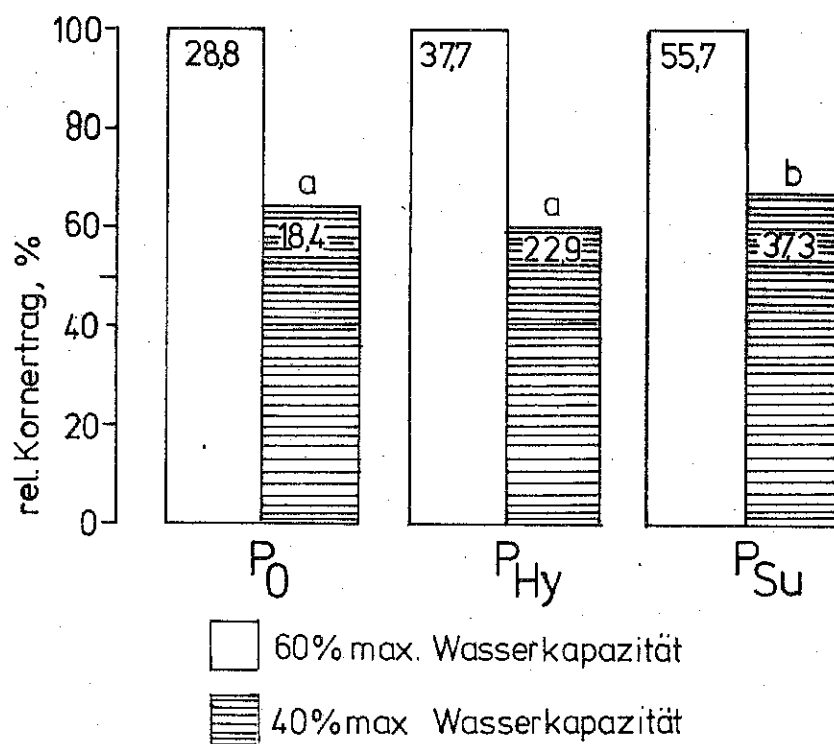


Abb. 38: Wirkung von P-Form und Bodenfeuchte auf den Kornertrag von Sommergerste (die absoluten Kornerträge sind in den Säulen als g Gefäß⁻¹ angegeben).

- Grenzdifferenz für die absoluten Kornerträge:
 $P \leq 5\% = 3,5$
- Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikanten Unterschied ($P \leq 5\%$) zwischen den Varianten der Stufe "40% max. Wasserkapazität".

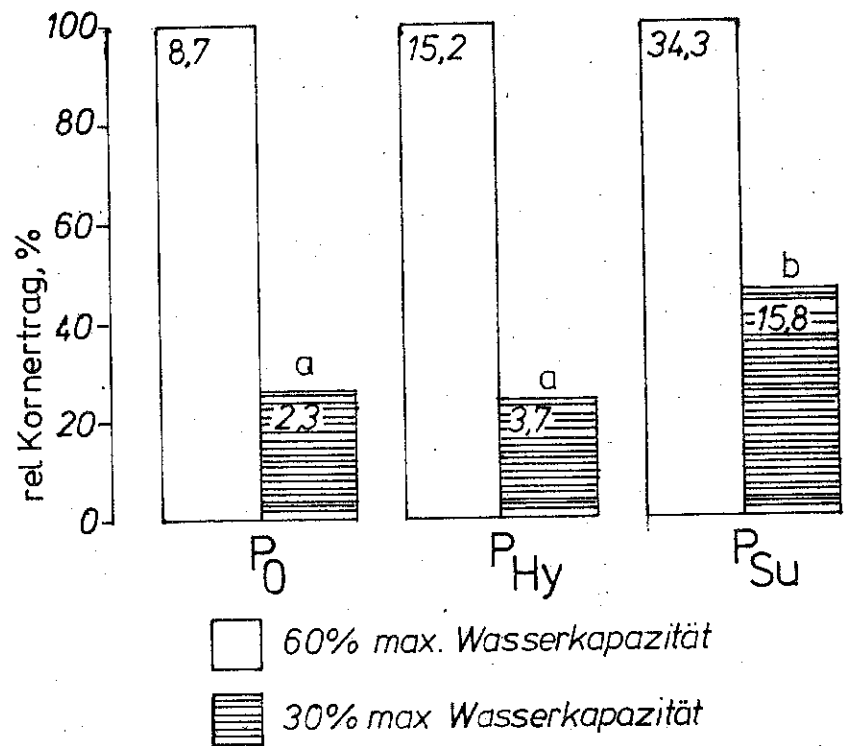


Abb. 39: Wirkung von P-Form und Bodenfeuchte auf den Kornertrag von Sommerweizen (die absoluten Kornerträge sind in den Säulen als g Gefäß⁻¹ angegeben).

- Grenzdifferenz für die absoluten Kornerträge:
 $P \leq 5\% = 3,3$
- Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikanten Unterschied ($P \leq 5\%$) zwischen den Varianten der Stufe "30% max. Wasserkapazität".

Bei diesen hier vorgestellten Befunden zur Problematik der Bodenfeuchte und der Wirksamkeit verschiedener P-Formen blieb die Frage offen, ob allein das verminderte Wurzelwachstum bei trockenen Bodenbedingungen die geringe Ertragswirksamkeit von Hyperphosphat erklärt oder ob nicht auch die Bodenfeuchte die Löslichkeit von Hyper- und Superphosphat direkt beeinflusst. Um den letzten Teil der Vermutungen für die Wirkung der beiden P-Formen zu überprüfen, wurde in einem weiteren Experiment der Einfluß verschiedener Bodenfeuchten auf die P-Freisetzung von Hyper- und Superphosphat getestet. Das Prinzip dieses Versuchs bestand darin, daß Anionenaus-

tauscherharz mit zuvor mit Phosphat in Form von Hyper- und Superphosphat gedüngtem Boden vermischt und der Boden für elf Tage bei 30% und 80% der maximalen Wasserversorgung inkubiert wurde. Die Befunde dieser Untersuchung sind in Abb. 40 dargestellt und zeigen sehr überzeugend, daß die P-Freisetzung aus dem Hyperphosphat bei 30% der max. Wasserkapazität sich nicht von der ungedüngten Variante unterscheidet, obwohl der pH-Wert des Versuchsbodens bei 5,3 lag. Dies traf aber nicht für Superphosphat zu. Unter den sehr trockenen Bodenbedingungen war noch eine sehr deutliche Wirkung von Superphosphat auf das an das Austauschharz angelieferte Phosphat zu erkennen. Der Abb. 40 kann weiterhin entnommen werden, daß bei einer Bodenfeuchte von 80% der maximalen Wasserkapazität die P-Freisetzung in allen Varianten gegenüber der trockenen Feuchtestufe signifikant anstieg. Dieser Befund verdeutlicht, daß die P-Diffusion vom Boden zum Austauscherharz in sehr starkem Maße vom Wassergehalt im Boden beeinflußt wird. In der feuchten Bodenvariante (80% max. Wasserkapazität) wurde im Vergleich zur trockenen Bodenvariante (30% max. Wasserkapazität) die Wirkung von Hyperphosphat gegenüber der P_0 -Variante gefördert. Dieser Befund zeigt, daß die Löslichkeit von Apatit stärker als die von Superphosphat vom Wassergehalt eines Bodens abhängt und daß bei trockenen Bodenbedingungen die P-Freisetzung aus Rohphosphat stark gehemmt wird.

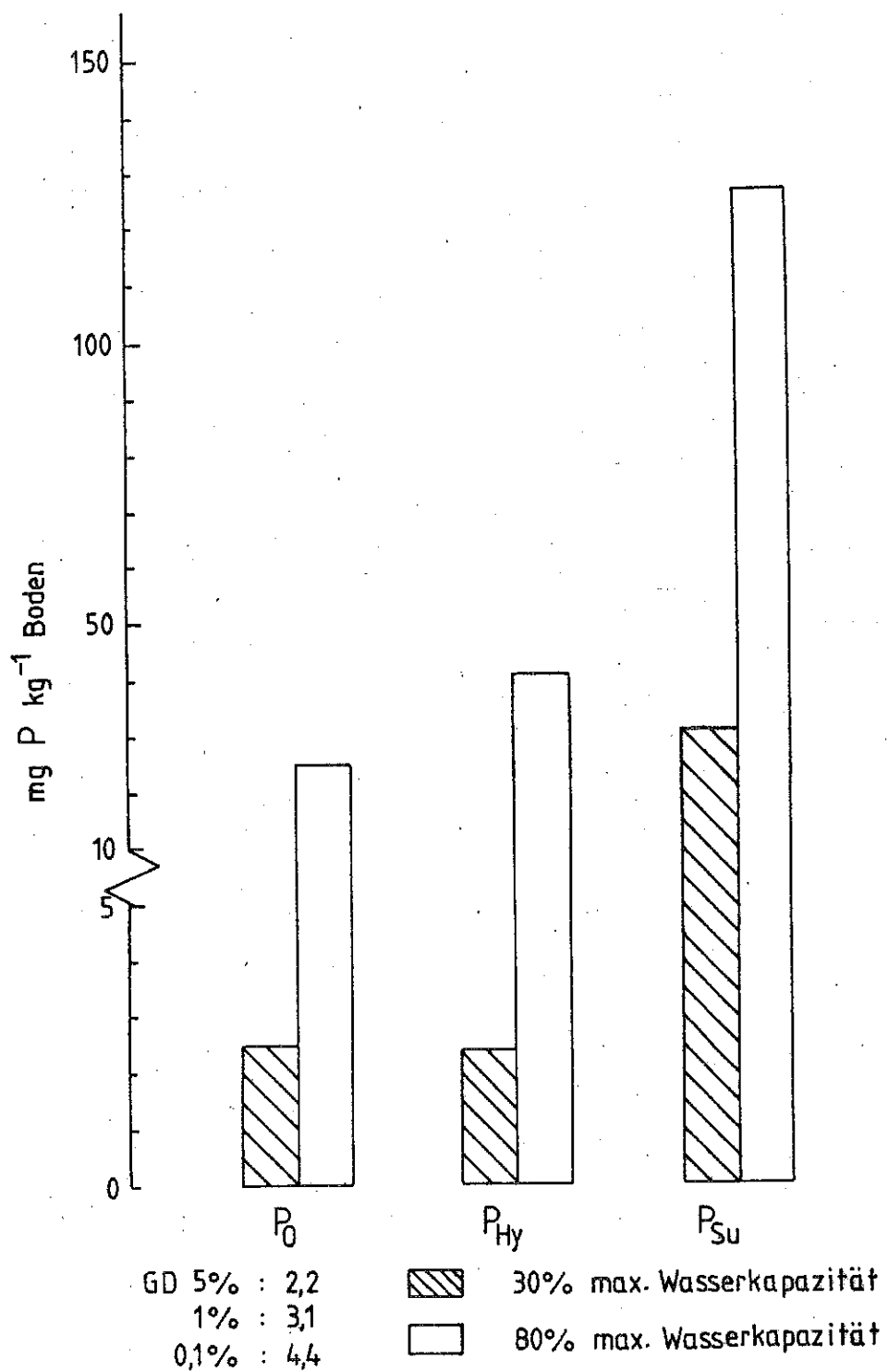


Abb. 40: Einfluß der Bodenfeuchte auf die P-Löslichkeit von Hyper- und Superphosphat während eines elftägigen Inkubationsversuches mit Anionenaustauscherharz. Boden: "Gießen", pH 5,3. (Beachte die unterschiedliche Skalierung der Ordinate!)

3.6 Feldversuche

3.6.1 Standort Ginsheim

Wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt, wurde der P-Formen-Versuch in Ginsheim angelegt, um die Ursachen des absoluten Ertragsausfalls bei Zuckerrüben im Jahre 1986 zu ergründen. Die Befunde der Schadensursachenforschung auf dem Standort "Ginsheim" sind in den nachstehenden Tabellen aufgeführt. Die Befunde der Pflanzenanalysen zeigen (Tab. 34), daß die Pflanzen auf Standort 1 eine niedrigere P-Konzentration in den Blättern und Rübenteilen aufwiesen als auf Standort 2. Die übrigen Nährstoffe (N, K, Ca, Mg und die Mikronährstoffe) waren bei den geschädigten Rüben (Boden 1) deutlich höher als bei den gesunden (Boden 2; s. Tab. 34).

Die phytopathologischen Untersuchungen auf einen Nematoden¹⁾- und Rizomaniabefall¹⁾ waren negativ.

Die Ergebnisse der Bodenanalysen sind der Tabelle 35 zu entnehmen. Diese zeigen, daß bei gleichen pH-Werten der langjährig mit Hyperphosphat gedüngte Boden deutlich weniger CAL-P sowie Fe/Al-Phosphat hatte als der mit einer vollaufgeschlossenen P-Form gedüngte Boden.

Für die Fraktion der Ca-Phosphate wurde ein anderes Bild beobachtet. Hier lag die Konzentration der Ca-Phosphate des Bodens 1 deutlich über der des Bodens 2 mit gesundem Rübenwachstum. Dieser Befund dürfte ein Indiz dafür sein, daß das langjährig gedüngte Hyperphosphat im Boden nicht in verfügbares CAL-P oder Fe/Al-Phosphat umgewandelt wurde, sondern daß es als H_2SO_4 -lösliches Phosphat (Ca-Phosphate) im Boden angereichert wurde.

Ob der im Jahre 1986 aufgetretene Ertragsausfall tatsächlich auf einem durch die langjährige Hyperphosphatanwendung

¹⁾Herrn Prof. Schlösser und Herrn Dr. Rössner sei an dieser Stelle für die phytopathologischen Untersuchungen gedankt.

induzierten P-Mangel beruht, konnte erst nach Abschluß eines vergleichenden P-Formen-Feldversuchs getroffen werden.

Der Tabelle 36 kann entnommen werden, daß im ersten Versuchsjahr (1987) nur nach Superphosphatanwendung im Vergleich zur Variante ohne P-Düngung das CAL-, DL- und wasserlösliche Phosphat im Boden anstieg. In den Hyperphosphatvarianten war erstaunlicherweise weder ein Effekt auf das DL- noch auf das CAL- oder wasserextrahierbare Phosphat zu beobachten. Innerhalb der drei Jahre nahmen die P-Gehalte, ermittelt mit den verschiedenen Methoden, in allen Varianten ab, besonders aber in den Superphosphatvarianten. Dieser Rückgang der P-Verfügbarkeit dürfte zum einen mit der P-Aufnahme der Pflanzen und besonders mit der binuklearen P-Adsorption (Alterung) im Boden erklärt werden. Die Verbesserung der P-Verfügbarkeit im Boden nach Superphosphatdüngung hatte in der P_1 - und P_2 -Stufe einen enormen Effekt auf das Wachstum der Zuckerrüben (Abb. 41 und Tab. 37). Bei Hyperphosphat war keine Ertragswirksamkeit zu Zuckerrüben zu beobachten, weder bei der Zwischenernte (Abb. 41), noch bei der Abschlussernte (Tab. 37). Die Erträge der Hyperphosphatvarianten unterschieden sich nicht von denen der Variante ohne P-Düngung (Abb. 41 und Tab. 37).

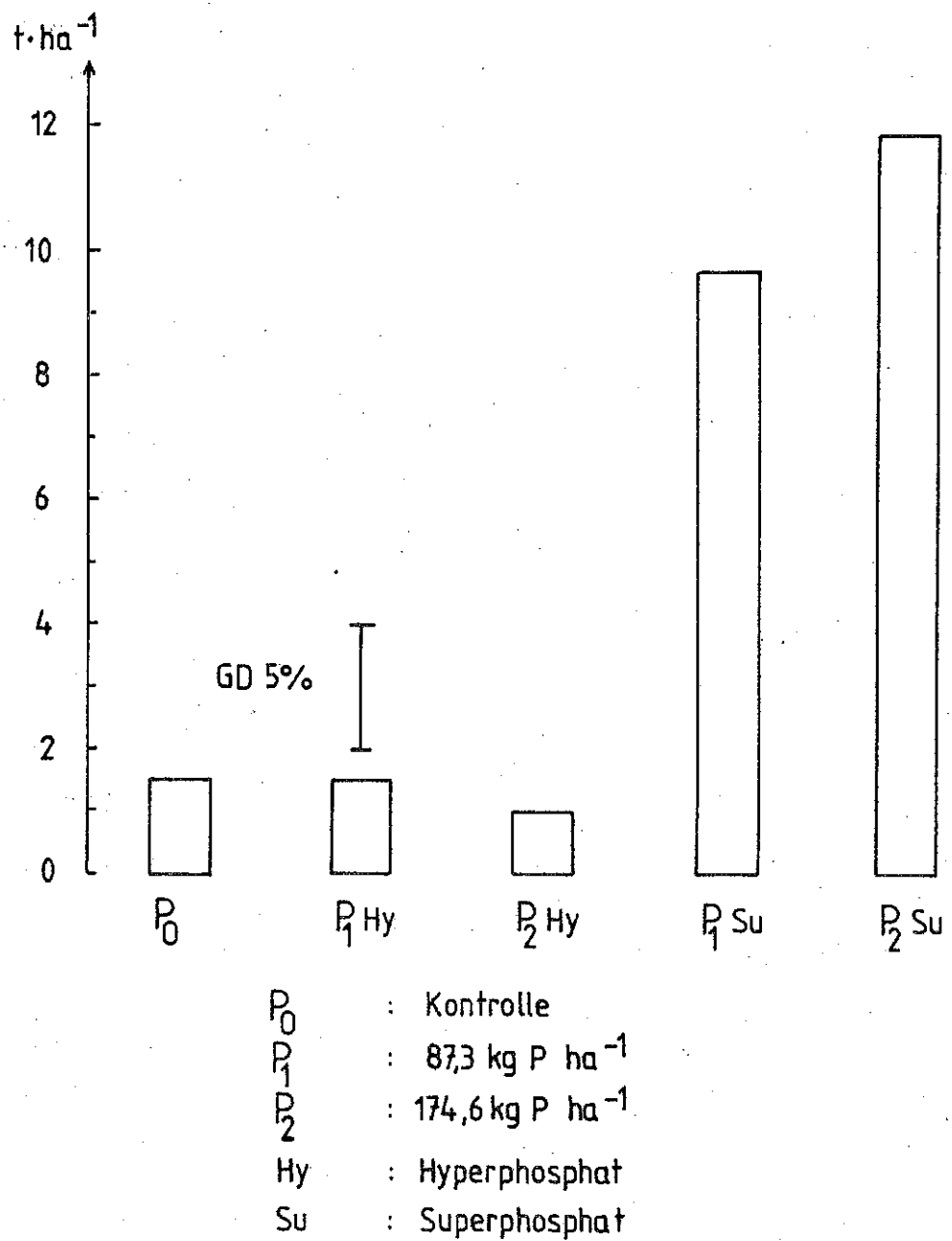


Abb. 41: Wirkung gestaffelter P-Gaben mit Hyper- und Superphosphat auf den Zuckerrübenenertrag (Zwischenernte vom 7.7.1987). Boden: Ginsheim

Tab. 34: Mineralstoffkonzentrationen bei Zuckerrüben auf Boden 1 und Boden 2

Boden		N	P	K	mg g ⁻¹ TS		Mg	Fe	$\mu\text{g g}^{-1}$ TS			Bor
					Na	Ca			Zn	Mn	Cu	
1	alte Blätter	31,0	0,85	29,4	18,0	19,2	4,8	134	34	75	8	34
2	alte Blätter	18,6	1,55	35,3	46,5	10,0	3,9	69	16	29	5	32
1	junge Blätter	38,5	1,82	38,6	12,5	10,0	4,2	78	38	58	9	33
2	junge Blätter	25,3	2,36	39,6	27,5	5,6	2,9	61	17	18	7	32
1	Rübenkörper	9,0	0,42	22,7	9,1	8,4	3,8	137	16	22	5	19
2	Rübenkörper	4,9	1,08	18,1	0,3	1,5	1,4	97	10	18	5	11
1	Rübenköpfe	20,2	1,05	23,8	9,1	17,5	2,4	343	29	34	9	24
2	Rübenköpfe	14,8	2,03	19,6	9,1	4,7	1,8	209	16	21	9	20

Anmerkung:

Boden 1: 28 Jahre Hyperphosphatdüngung, im Schnitt der letzten 11 Jahre 50 kg P ha⁻¹ a⁻¹

Boden 2: Anwendung von Volldünger

Tab. 35: pH-Wert, CAL-P und P-Fraktionen auf dem Boden 1 im Vergleich zum Boden 2 im Jahr 1986

	pH (CaCl ₂)	CAL	Fe/Al- mg P kg ⁻¹	Ca-	org.Phosphat
Boden 1	7,5	24,8	68,1	768,9	73,8
Boden 2	7,5	94,7	253,1	535,9	75,1

Boden 1: 28 Jahre Hyperphosphatdüngung, in den letzten 11 Jahren 50 kg P ha⁻¹ a⁻¹

Boden 2: Anwendung von Volldünger

Tab. 36: Wirkung einer gestaffelten Hyper- und Superphosphatdüngung auf das mit verschiedenen Methoden lösliche Phosphat im Frühjahr (Angaben in mg P kg^{-1} Boden). Boden: Ginsheim, pH: 7,4

Variante	DL-P		CAL-P		P _{Wasser}	
	1987	1989	1987	1989	1987	1989
P ₀	3,5	1,9	22,3	17,0	2,3	1,3
P _{1Hy}	3,1	2,1	19,6	17,2	2,0	1,1
P _{1Su}	8,0	6,5	33,9	30,7	6,4	5,1
P _{2Hy}	3,0	2,6	19,2	18,8	1,9	1,3
P _{2Su}	22,4	6,8	65,0	27,0	20,6	6,5
GD 5%	3,7		9,4		3,8	

1987
 P₀ = Kontrolle
 P₁ = 87,3 kg P ha⁻¹
 P₂ = 174,6 kg P ha⁻¹

1989
 P₀ = Kontrolle
 P₁ = 26,2 kg P ha⁻¹
 P₂ = 52,4 kg P ha⁻¹

Tab. 37: Ertragswirksamkeit einer gestaffelten Hyper- und Superphosphatdüngung im Feldversuch. Boden: Ginsheim, pH: 7,4

Erträge dt ha⁻¹
Körner 14% H₂O, Rüben frisch

Variante*	1987 Zuckerrüben	1988 Sonnenblumen	1989 Winterweizen
P0	328	37,7	65,9
P1Hy	323	43,5	68,1
P1Su	465	41,9	73,3
P2Hy	323	41,8	75,5
P2Su	500	43,9	75,1
GD 5%	79	3,1	5,1

* siehe Tabelle 36

Dieser Befund erklärt auch den im Vorjahr beobachteten Ertragsausfall bei Zuckerrüben und bestätigt die Vermutung, daß das auf diesem Standort seit 28 Jahren gedüngte Hyperphosphat nicht in verfügbares Phosphat umgewandelt wurde. Erstaunlich ist aber nach wie vor, warum das Hyperphosphat auf diesem Standort gar keine Wirkung auf das Rübenwachstum hatte.

Aus diesem Grunde wurde die Wurzellängendichte der Zuckerrüben mit der Bohrkernmethode untersucht, um die Ursachen der unbefriedigenden Wirkung von Hyperphosphat zu untersuchen. Die Befunde der Wurzeluntersuchung aus der Hyper- und Superphosphatvariante der P_2 -Stufe sind in Abb. 42 dargestellt.

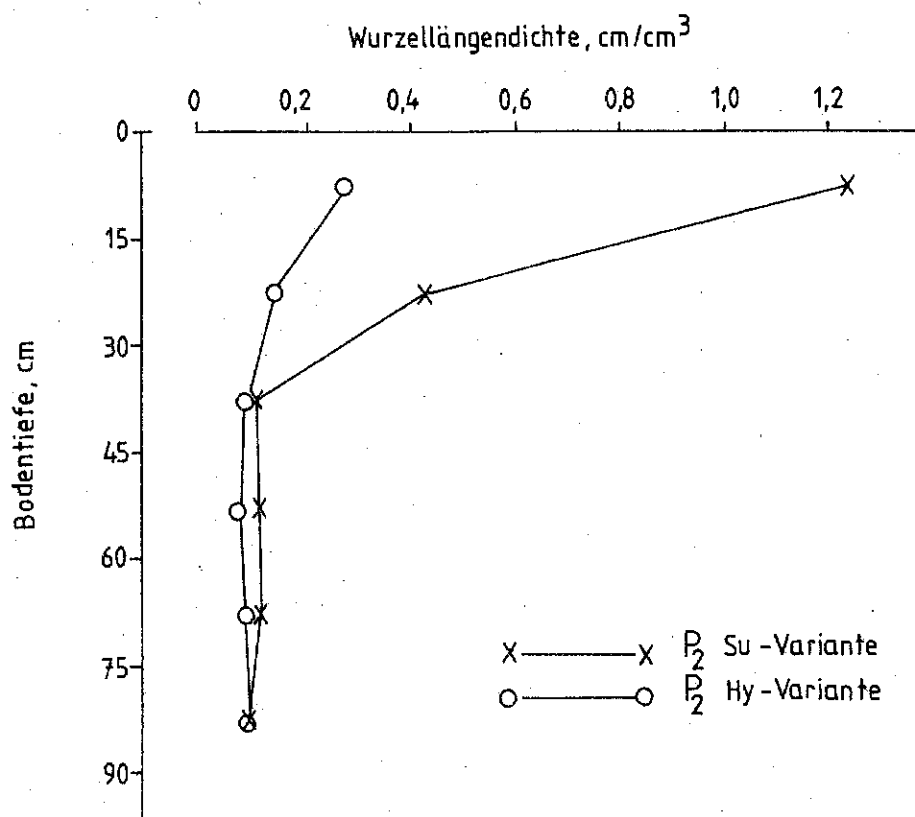


Abb. 42: Einfluß von Hyper- und Superphosphatdüngung ($174,6 \text{ kg P ha}^{-1}$) auf die Wurzellängendichte von Zuckerrüben. Untersuchungstermin: 20.7.1987. Boden: Ginsheim

Im Oberboden (0-30 cm) war die Wurzellängendichte in der Superphosphatvariante erheblich größer als in der Hyperphosphatvariante. Einen positiven Effekt von Superphosphat auf das Wurzelwachstum konnte auch in dem Modellversuch, in dem die P-Düngung in einer bestimmten Zone plaziert wurde, mit Mais beobachtet werden (s. Abb. 34). Die Wurzellängendichten verdeutlichen aber auch, daß die Durchwurzelung in der Superphosphatvariante noch relativ gering war. Nach Angaben von Müller (1988) sowie von Westing und Söchtig (1985) beträgt die Wurzellängendichte von Zuckerrüben Ende Juli auf Löß-Parabraunerden und bei ausreichender P-Versorgung (= Stufe C) 2-5 cm/cm³ Boden in der oberen Bodenschicht. In dieser Untersuchung betrug die Wurzellängendichte nur 1,2 cm/cm³ Boden. Berücksichtigt man die sehr geringe Wurzellängendichte der Zuckerrüben sowie die geringe Löslichkeit von Hyperphosphat aufgrund der relativ hohen CaCO₃-Konzentration und des pH-Wertes von 7,4, so wird verständlich, daß der 1986 beobachtete absolute Ertragsausfall der Zuckerrüben auf einem durch Hyperphosphat induzierten P-Mangel beruhte.

Tab. 38: Die mit Mykorrhiza infizierte Wurzellänge bei Sonnenblume im Stadium der Vollblüte

Variante*	mykorrhizierte Wurzellänge
	%
P ₀	38
P ₁ Hy	44
P ₁ Su	42
P ₂ Hy	42
P ₂ Su	44

*siehe Tabelle 36

In den darauffolgenden Jahren wurden Sonnenblumen und Winterweizen angebaut. Hier zeigte sich, im Gegensatz zu Zuckerrüben, daß Hyperphosphat im gleichen Umfang wie Superphosphat auf die Kornerträge von Sonnenblumen wirkte (Tab. 37). Dieser Befund war zunächst sehr überraschend. Betrachtet man aber die mykorrhizierte Wurzellänge der Sonnenblumenwurzeln (Tab. 38), so fällt auf, daß die Sonnenblumen mit Ausnahme der ungedüngten Variante, in hohem Maß in den Hyper- und Superphosphatvarianten mit Mykorrhiza infiziert waren. Die Besiedlung der Wurzeln mit Mykorrhiza begünstigt vor allem die Aneignung von Rohphosphat, indem durch die Vergrößerung der Wurzeloberfläche mit den Mykorrhizahyphen ein größeres Bodenvolumen an Phosphat ausgeschöpft werden kann. Folglich konnte die geringe Löslichkeit von Hyperphosphat, trotz des hohen CaCO₃-Gehalts und des pH-Wertes von 7,4, durch die Vergrößerung der Wurzeloberfläche mit Mykorrhiza kompensiert werden, so daß keine Ertragsunterschiede zwischen den P-Formen auftraten.

Interessanterweise hatte Hyperphosphat auf dem Standort "Ginsheim" trotz der schlechten bodenchemischen Löslichkeitsbedingungen für Rohphosphate auch eine positive Wirkung auf die Kornerträge von Winterweizen (Tab. 37). Allerdings wurden in der niedrigen Superphosphatvariante der gleiche Ertrag produziert wie in den Varianten mit hoher Hyper- bzw. Superphosphatgabe. Die relativ gute Wirkung von Hyperphosphat der P_2 -Stufe wird verständlich, wenn die durchschnittliche Wurzellängendichte von Winterweizen berücksichtigt wird. Sie beträgt bei Winterweizen im Stadium des Ährenschiebens ca. $10-11 \text{ cm/cm}^3$ in der oberen Bodenschicht (0-10 m) (Westing und Söchtig, 1985). Zusätzlich dürften die Wurzeln von Winterweizen mit Mykorrhizapilzen infiziert gewesen sein. Diese beiden physiologischen Faktoren der Nährstoffverfügbarkeit werden als Grund angesehen, warum Rohphosphat auf diesem Standort eine Ertragswirksamkeit bei Sonnenblumen und bei Winterweizen erzielte. Bei Zuckerrüben hatte Hyperphosphat keine Wirkung, da die Wurzellängendichte extrem niedrig war und weil Zuckerrübenwurzeln, wie überhaupt die Chenopodiaceen, nicht mykorrhiziert werden.

In der Tabelle 39 sind die P-Entzüge der Pflanzen dargestellt. Sie zeigen, daß das mit Hyperphosphat zugeführte Phosphat nicht von den Zuckerrüben aufgenommen wurde. Bei Sonnenblumen und Winterweizen war die P-Aufnahme in den Hyperphosphatvarianten größer als in der ungedüngten Variante. Die höchsten P-Entzüge lagen aber in allen drei Jahren in den Superphosphatvarianten vor.

Im ersten Versuchsjahr stieg das CAL- und wasserlösliche Phosphat im Vergleich zur ungedüngten Variante durch die P-Düngung nur in der P₂-Superphosphatvariante an. Die Befunde der DL-Analyse des ersten Jahres zeigen, daß die P-Konzentration in den Hyperphosphatvarianten und in der P₂-Superphosphatvariante im Vergleich zur P₀-Variante zunahm. Gegenüber 1985 stieg bis 1989 das DL lösliche Phosphat in allen Düngungsvarianten an. Der Vergleich zwischen dem CAL-P der Jahre 1985 und 1989 zeigt einen Rückgang der P-Gehalte in allen Varianten, was darauf hindeutet, daß auf diesem P-armen Standort gedüngtes Phosphat sehr rasch binuklear adsorbiert wurde. Anders verhalten sich dagegen die P-Wassergehalte. Gegenüber 1985 nahm 1989 das wasserlösliche Phosphat in der P₀- sowie in der P₁-Hyperphosphatvariante signifikant ab. In der P₁- und P₂-Superphosphat- sowie der P₂-Hyperphosphatvariante blieb die Konzentration des mit Wasser extrahierbaren Phosphats konstant, wobei die höchste Konzentration in der P₂-Superphosphatvariante vorlag (s. Tab. 40).

Tab. 40: Wirkung einer gestaffelten Hyper- und Superphosphatdüngung auf das mit verschiedenen Methoden lösliche Phosphat im Frühjahr (Angaben in mg P kg^{-1} Boden). Boden: Gießen, pH: 5,3

Variante	DL-P		CAL-P		P _{Wasser}	
	1985	1989	1985	1989	1985	1989
P ₀	9,0	8,0	29,2	13,7	2,6	1,5
P _{1Hy}	14,4	19,8	27,4	16,5	2,4	1,9
P _{1Su}	9,7	13,2	26,7	18,1	2,1	2,1
P _{2Hy}	16,7	27,4	27,8	16,2	2,3	2,1
P _{2Su}	21,9	26,3	35,5	27,3	3,6	4,0
GD 5%	4,4		4,6		0,7	

1984-1987: 1988:

P₀ = Kontrolle
P₁ = 17,5 kg P ha⁻¹
P₂ = 35,0 kg P ha⁻¹

P₀ = Kontrolle⁻¹
P₁ = 35 kg P ha⁻¹
P₂ = 70 kg P ha⁻¹

Pflanzen

Auf dem sehr P-armen Boden Gießen zeigte die P-Düngung eine Ertragswirksamkeit, so daß die beiden P-Formen in ihrer Wirkung auf die Ertragszuwächse auch miteinander verglichen werden können (Tab. 41). Im ersten Versuchsjahr 1985 wurde der Höchstertrag in der P_2 -Superphosphatvariante erzielt. Im Gegensatz zu 1985 war 1986 kein Effekt einer Hyperphosphatdüngung auf die Hafererträge zu erkennen. Der Höchstertrag wurde in der P_2 -Superphosphatvariante beobachtet. Im Vergleich zu 1988, wo das Hyperphosphat fast die gleiche Wirkung auf die Erträge hatte wie Superphosphat, gingen 1989 die durch Hyperphosphat erzielten Ertragszuwächse zurück. Vergleichbar mit dem Jahr 1986 wurde der Höchstertrag 1989 mit Superphosphat erreicht. Dieser Befund dokumentiert, daß die Verfügbarkeit auch noch von anderen Faktoren beeinflußt wird. Zu diesen Faktoren dürfte die Bodenfeuchte gerechnet werden. In den Abbildungen 43 und 44 sind die Niederschläge und die Verdunstung der Jahre 1986 und 1989 im Vergleich zum langjährigen Mittel des Standortes Gießen dargestellt. Bis Anfang Juli war 1986 die Niederschlagsmenge pro Pentade höher als das langjährige Mittel. Die Zeit der Haferernte, die am 2.8.1986 erfolgte, war durch eine ungünstige Niederschlagsverteilung geprägt, da im Juli 1986 nur ein Regenereignis von 40 mm Niederschlag pro Pentade vorlag. Eine ähnliche Situation konnte im Jahr 1989 auf dem Standort Gießen beobachtet werden. Die Gerste wurde 1989 am 7. Juli geerntet. In der Zeit von Mitte Mai bis Anfang Juli lag 1989 nur ein über dem langjährigen Mittel liegendes Regenereignis vor. Auch diese Niederschlagsverteilung vor der Ernte ist ungünstig einzuschätzen. Zusätzlich dürfte die höhere Verdunstung der Monate Juni, Juli und August dazu beigetragen haben, daß die Bodenfeuchte in den Wochen vor der Ernte der Jahre 1986 und 1989 niedriger gewesen sein dürfte als in den anderen Jahren. Die im Vergleich zu den anderen Jahren verringerte Bodenfeuchte in den Wochen vor der Ernte der Jahre 1986 und 1989 werden

als Grund für die reduzierte Ertragswirksamkeit von Hyperphosphat bei Hafer und Wintergerste angesehen.

Im Jahr 1987 wurde im Vergleich zu den anderen Versuchsjahren bei Ackerbohne der Höchstertrag in der P_2 -Hyperphosphatvariante erreicht (Tab. 41). Die bessere Ertragswirksamkeit bei Ackerbohne kann einerseits mit einer hohen Netto- H^+ -Abgabe der Wurzeln von symbiontisch ernährten Leguminosen (Hauter und Steffens, 1985), andererseits aber auch mit einer verstärkten Ca^{2+} -Aufnahme von dikotylen Pflanzen erklärt werden (Bekele et al., 1983). Vermutlich dürften beide physiologischen Prozesse der Nährstoffaneignung die Verfügbarkeit des Rohphosphats erhöht haben. Vielleicht profitierte die Ackerbohne noch von den Rohphosphatresten der beiden vorhergehenden Jahre.

Tab. 41: Ertragswirkung einer gestaffelten Hyper- und Superphosphatdüngung im Feldversuch
(Boden Gießen, pH: 5,3)

Kornerträge dt ha⁻¹
Körner 14% H₂O

Variante*	1985 So-Weizen	1986 Hafer	1987 Ackerbohne	1988 Winterweizen	1989 Wi-Gerste
P0	52,0	41,0	36,7	53,6	31,7
P1HY	55,4	40,8	40,5	57,2	39,5
P1Su	54,7	43,7	39,9	58,9	51,5
P2HY	55,5	42,4	46,4	61,9	42,5
P2Su	60,3	46,6	42,6	62,3	49,7
GD 5%	3,1	2,4	4,3	3,2	6,6

* siehe Tabelle 40

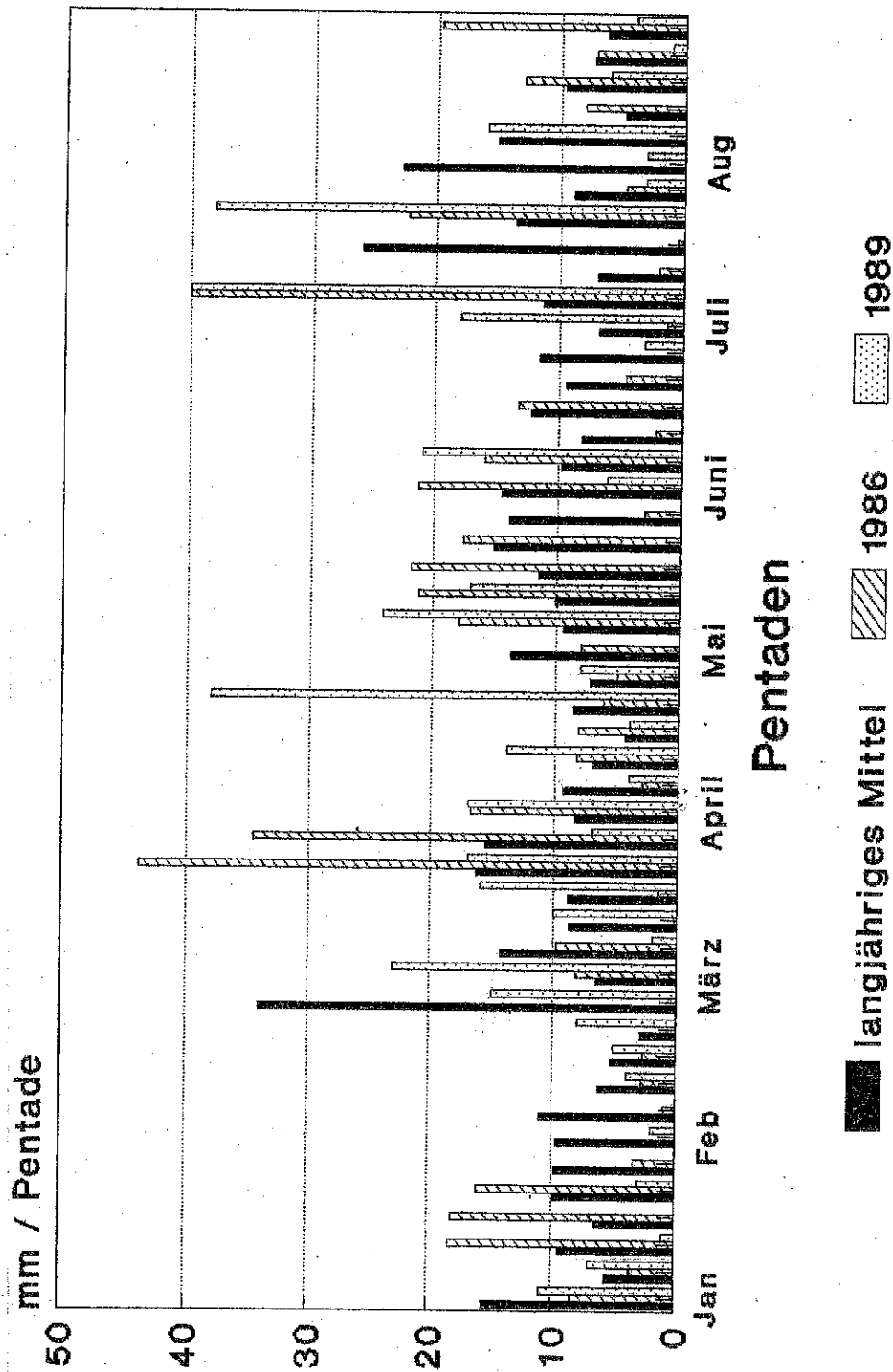


Abb. 43: Pentaden-Niederschläge von Januar bis August in den Jahren 1986 und 1989 im Vergleich zum langjährigen Durchschnitt auf dem Boden Gießen.

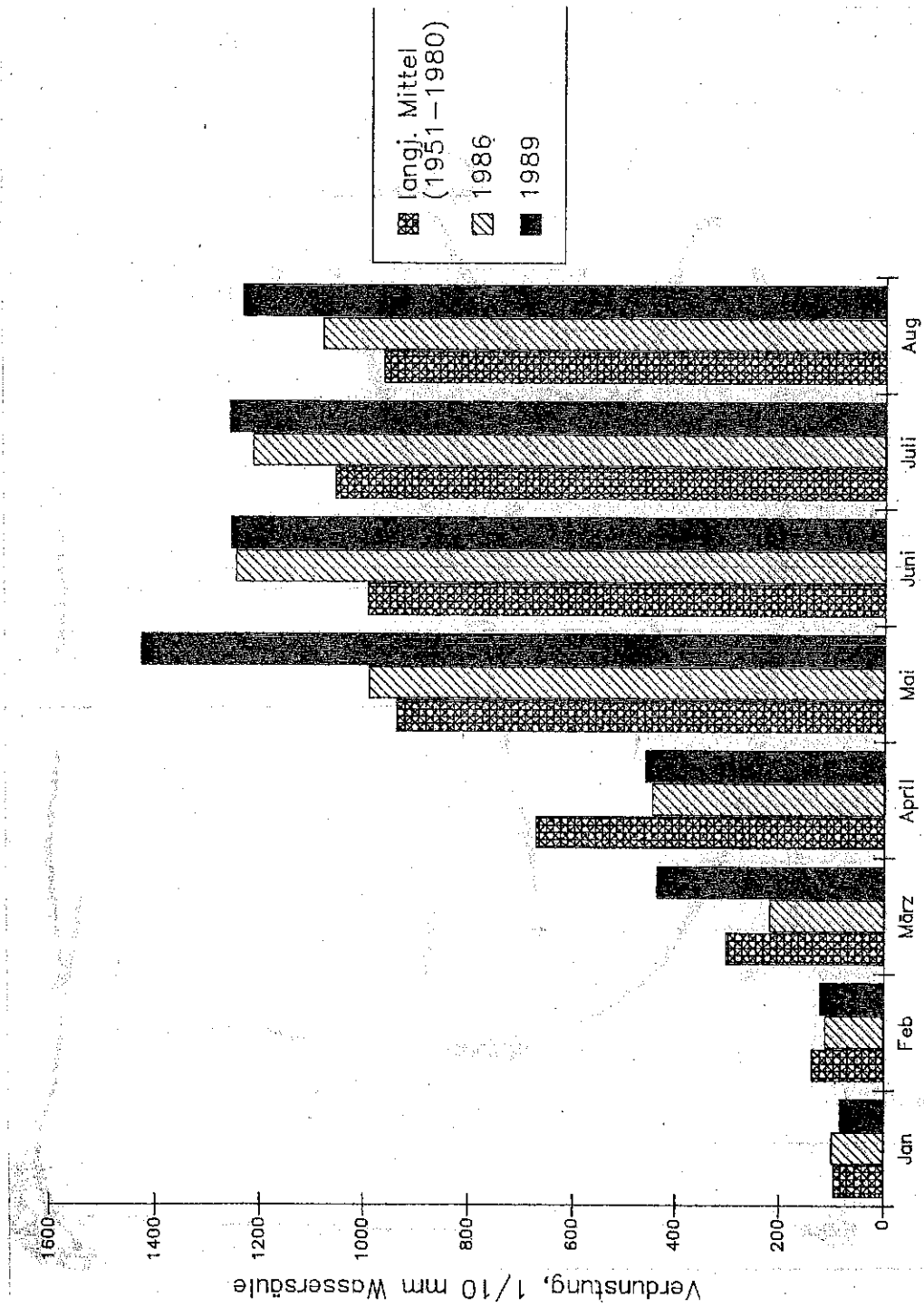


Abb. 44: Verdunstung von Januar bis August in den Jahren 1986 und 1989 im Vergleich zum langjährigen Durchschnitt auf dem Boden Gießen.

Der Einfluß der P-Düngung, in verschiedenen P-Formen appliziert, auf die P-Entzüge ist der Tabelle 42 zu entnehmen. Die Befunde der P-Aufnahme bestätigen im Prinzip die Ausführungen über die Ertragswirkung von Hyper- und Superphosphat.

4 Diskussion

Die in dieser Arbeit vorgestellten Befunde über die Wirksamkeit von weicherdigem Rohphosphat (= Hyperphosphat) im Vergleich zu aufgeschlossenen P-Formen sind vielschichtig. Die Interpretation der Befunde soll aber dazu beitragen, Kriterien für die zukünftig zu düngenden P-Formen darzulegen, zu quantifizieren und zu bewerten. Dieses Ziel mag zwar hochgegriffen sein; es soll aber dazu beitragen, die P-Düngung über den heutigen Erkenntnisstand hinaus rohstoffsparender und besonders effizient zu gestalten.

Im folgenden Kapitel werden die Befunde über die P-Kinetik und deren mathematische Berechnung des im Boden durch langjährige Düngung mit verschiedenen P-Formen angereicherten Phosphats diskutiert. In einem weiteren Kapitel wird die Bedeutung der Interaktionen von Bodenfaktoren, P-Düngemittel und Pflanzen für die P-Verfügbarkeit besprochen.

4.1 Kinetik der P-Freisetzung des im Boden durch verschiedene P-Formen angereicherten Phosphats

Die qualitative Quantifizierung der P-Verfügbarkeit des im Boden durch verschiedene P-Düngemittel angereicherten Phosphats ist schon immer ein gravierender Aspekt in der agrikulturchemischen Forschung gewesen (Hofmann und Amberger, 1953; van der Paauw, 1965; Werner, 1969; Schüller et al., 1975; Amberger und Gutser, 1976; Schiller et al., 1978; Wildhagen et al., 1983; Steffens und Mengel, 1985; Fritsch und Werner, 1985; Steffens, 1987; Bolland und Gilkes, 1990a). Prinzipiell kann die Bemessung der P-Nachlieferung auf zwei Wegen erfolgen. Sie kann in einem Pflanzenexperiment oder mit

Bodenuntersuchungsmethoden erfaßt werden. Das Pflanzenexperiment ist arbeitsaufwendig und beansprucht einen langen Versuchszeitraum - in dieser Arbeit vier Jahre -, bis die P-Nachlieferung des im Boden durch verschiedene P-Formen angereicherten Phosphats genau abgeschätzt werden kann. Um die aufwendigen und mit hohen Kosten verbundenen Versuche mit Pflanzen zu umgehen, werden die Böden mit verschiedenen chemischen oder physikalischen Extraktionstechniken auf ihre P-Gehalte analysiert. Der Befund einer solchen Analyse soll dann die P-Verfügbarkeit im Boden dokumentieren. Eigene Untersuchungen haben jedoch ergeben, daß die Verfügbarkeit des im Boden durch verschiedene P-Formen angereicherten Phosphats nur annähernd mit den herkömmlichen Extraktionsverfahren erfaßt wird (s. Tab. 18). Ungeeignet sind offenbar die konventionellen Extraktionstechniken für die Bestimmung der P-Nachlieferung bei Böden, die langjährig mit rohphosphathaltigen P-Formen gedüngt wurden (s. Tab. 19). Hier ergab die Regressionsanalyse, daß keine gesicherten Beziehungen zwischen den P-Gehalten der herkömmlichen Extraktionsverfahren (DL-, CAL-, Wasser-, EUF- und Me^{III} -Methode) und der P-Aufnahme der Pflanzen bestanden. Auf Grund dieses Befundes wurde nach Techniken der Bodenuntersuchung gesucht, mit denen sich die P-Freisetzung von langjährig mit Rohphosphat gedüngten Böden relativ genau bestimmen läßt. Zu derartigen Methoden zählen insbesondere die Techniken, die die Kinetik der P-Anlieferung aus den Umsetzungsprodukten der verschiedenen P-Formen zur Pflanzenwurzel simulieren. Zur Anwendung kamen die wiederholte Wasserextraktion nach Flossmann und Richter (1982) sowie die in dieser Arbeit neu entwickelte EUF-Mehrfachextraktion. Die wiederholte Wasserextraktion wurde auch von Fritsch (1986) benutzt, um die Mobilität des im Boden durch verschiedene P-Formen angereicherten Phosphats zu studieren. Die eigenen mit der wiederholten Wasserextraktion erzielten Ergebnisse zeigen, wie auch die von Fritsch (1986), daß die relative Löslichkeit der P-Formen und der Einfluß der P-Düngung auf die P-Mobilität recht gut widerspiegelt wird.

(s. Abb. 13 bis 16). Der aus den 4 Fraktionen berechnete P-Kinetikparameter (v_t -Wert) soll nach den Vorstellungen von Flossmann und Richter (1982) die Rate der P-Freisetzung von der festen Phase des Bodens an die Wurzeloberfläche beschreiben. Diese These trifft sicherlich zu, wenn nur die P-Freisetzung des adsorbierten Phosphats erfaßt werden soll. Für die Bestimmung der P-Nachlieferung der langjährig mit Rohphosphat gedüngten Böden ist die Methode von Flossmann und Richter (1982) aber ungeeignet. Denn aus dem Verlauf der P-Konzentration in den wiederholten Wasserextrakten hätte man schlußfolgern können, daß die P-Aufnahme der Pflanzen in den Hyperphosphat-Varianten nur geringfügig über der der ungedüngten Varianten läge (s. Abb. 13 bis 16). Tatsächlich nahmen die Pflanzen der Hyperphosphat-Variante aber deutlich mehr Phosphat auf als in der ungedüngten Variante (s. Abb. 17 bis 19). Daraus läßt sich schließen, daß ein auf einer Wasserextraktion basierendes kinetisches Modell nicht genau genug die Auflösungsprozesse der im Boden durch Rohphosphatdüngung angereicherten Ca-Phosphate erfaßt.

Um diese Auflösungsprozesse der Umwandlungsprodukte von Rohphosphaten im Boden zu analysieren, wurde das EUF-Verfahren von Nemeth (1979) in Anlehnung an Köttgen (1939) erweitert. Köttgen bestimmte schon 1939 die Auflösung verschiedener P-Düngemittel (Thomasphosphat, Rohphosphate aus Florida und Estland) mit Hilfe einer 80 Minuten dauernden und fraktionierten EUF-Technik. In dieser zitierten Untersuchung handelte es sich um eine direkte Extraktion der Düngemittel und nicht um eine P-Extraktion von im Boden umgesetzten Düngemitteln. Dabei zeigte sich, daß mit dem EUF-Verfahren aus dem Thomasphosphat erheblich mehr Phosphat extrahiert wurde als aus den Rohphosphaten. Der Ansatz, die Löslichkeit verschiedener P-Düngemittel mit kinetischen Methoden zu erfassen, wurde erneut von Mackay et al. (1987) aufgegriffen. Sie extrahierten ebenso wie Köttgen (1939) unterschiedliche P-Formen mittels EUF. Die Extraktionsdauer betrug 50 Minuten bei steigender Spannung bis zu 400 Volt. Die extrahierten P-

Mengen entsprachen in etwa der Löslichkeit der P-Formen. Die Wirksamkeit der einzelnen P-Düngemittel wurde im Gefäßversuch mit *Lolium perenne* überprüft und in Beziehung zu den P-Mengen der EUF-Extrakte, den Extrakten der P-Formen mit 2% Ameisensäure, 2% Zitronensäure und neutraler Ammoncitratlösung gesetzt. Hierbei zeigten sich für die Extraktion mit 2% Ameisensäure ($r = 0,912$) und 2% Zitronensäure ($r = 0,839$) enge Korrelationen zur Ertragsbildung. Für die neutrale Ammoncitratlösung betrug der Korrelationskoeffizient $r = -0,228$ und für EUF $r = 0,654$. Einen ähnlichen Ansatz zur Bestimmung der Löslichkeit von verschiedenen P-Formen gebrauchten auch Scheffer et al. (1957). Sie untersuchten die Löslichkeit von Thomas-, Rhenania- und Superphosphat im Vergleich zu verschiedenen Rohphosphaten mit Austauschharzen. Mit einem Kationen/Anionenaustauscherharz-Gemisch wurde den P-Düngemitteln deutlich mehr Phosphat entzogen als mit einem reinen Anionenaustauscherharz. Die Unterschiede in der extrahierten P-Menge waren zwischen den vollaufgeschlossenen P-Formen und den Rohphosphaten in dem Kationen/Anionenaustauscherharz-System geringer als in dem reinen Anionenaustauscherharz-System. Diese Beobachtung ist ein wichtiger Punkt bei Betrachtung der Löslichkeit der verschiedenen P-Formen, insbesondere aber bei den Rohphosphaten, da der eigentliche Auflösungsprozeß von schwerlöslichen Ca-Phosphaten berücksichtigt wird.

Ulrich (1961) sowie Faßbender et al. (1966) leiteten die Auflösung von Rohphosphaten aus einer Funktion ab, die in Abhängigkeit vom pH-Wert die in einer Gleichgewichtslösung erreichbare Phosphat- und Ca^{2+} -Konzentration beschreibt. Die aus den Untersuchungen von Ulrich (1961) sowie Faßbender et al. (1966) entwickelte Funktion zur Bestimmung von Lösungsisothermen von Rohphosphaten zeigt, daß der pH-Wert der Gleichgewichtslösung ein wichtiger Faktor für die Löslichkeit von Rohphosphat ist. Dabei sollen die aus den Gleichgewichtskonzentrationen der Modelllösungen berechneten Lösungsisothermen die Düngewirksamkeit der verschiedenen Rohphosphate kenn-

zeichnen (Faßbender et al., 1966). Diese Aussage wurde jedoch nicht in Pflanzenexperimenten überprüft.

Auch Chien (1977) sowie Chien und Black (1975) untersuchten die Auflösung von Rohphosphaten in verschiedenen Lösungen. Dabei wurde z.B. mit verdünnter HCl die Rate der P-Freisetzung aus den Rohphosphaten bestimmt (Chien, 1975). Die höchste P-Freisetzungsrates hatte das North-Carolina Rohphosphat, gefolgt von Florida- und Tennessee-Rohphosphat. Sie entsprach damit dem Grad des isomorphen Ersatzes mit Karbonat in den einzelnen Rohphosphaten. Zu ähnlichen Aussagen kommen auch Olsen (1975), wenn die Rohphosphate mit EDTA-Lösung ausgeschüttelt werden, oder Smith et al. (1977), die verschiedene Rohphosphate in verdünnten Säuren analysierten. In diesen Experimenten wurde der Wirksamkeit der Rohphosphate für die P-Verfügbarkeit der Pflanzen nur wenig Beachtung gewidmet. Es läßt sich also festhalten, daß mit kinetischen Methoden, sei es durch Extraktion mit Austauschharzen, der EUF-Technik oder in wiederholten sauren Extraktionen, die Rate der P-Freisetzung in Abhängigkeit der Kristallstruktur der verschiedenen Rohphosphate erfaßt werden kann. Dieses bietet weitere Möglichkeiten, außer der Löslichkeitsbestimmung in 2% Ameisensäure, die Reaktivität von Rohphosphaten zu charakterisieren.

Bei den aus der Literatur vorgestellten Befunden zur P-Löslichkeit blieben die Umwandlungsprozesse der einzelnen P-Formen im Boden, vor allem aber die P-Anlieferung an die Pflanzenwurzel außer Acht. Dieses stellte Köttgen bereits 1935 fest, wenn er sagt: "Über den Wert eines Phosphorsäuredüngemittels entscheidet allein der Umsatz dieses Düngemittels im Boden selbst. Nur ein Umsatzversuch des Düngers mit dem Boden in Verbindung mit einer richtigen Grunddüngung ist letzten Endes entscheidend für die Wahl eines Phosphorsäuredüngers". Obgleich mit dieser Aussage schon recht klare Vorstellungen über die Wirksamkeit eines P-Düngemittels im Boden geäußert werden, ist es der agrikulturchemischen Forschung

nur bedingt gelungen, den Umsatz der einzelnen P-Düngemittel im Boden methodisch quantitativ und vor allem qualitativ abzuschätzen. Dieses trifft besonders für die Wirksamkeit der rohphosphathaltigen Düngemittel zu. Aus diesem Grunde wurde in dieser Arbeit die von Nemeth (1976) konzipierte EUF-Methode weiterentwickelt. Dieser Versuchsansatz basiert auf der Annahme, daß die Auflösung der Umwandlungsprodukte von Rohphosphaten dadurch gegeben ist, daß während der EUF-Extraktion immer wieder die Komponenten der Gleichgewichtslösung wie Phosphat- und Ca^{2+} -Ionen durch den anionischen und kathodischen Sog entzogen werden. Dieser Auflösungsprozeß von Apatit während der EUF-Extraktion ist in Abbildung 45 schematisch dargestellt.

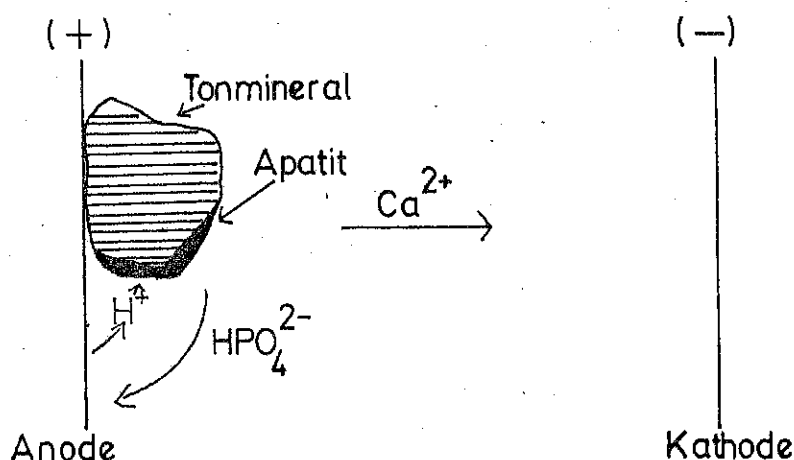
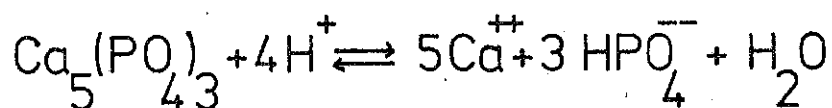


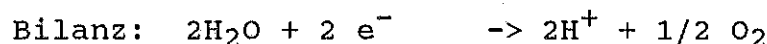
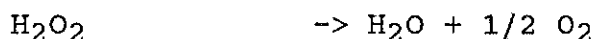
Abb. 45: Vorstellung über die P-Freisetzung aus Apatit in der EUF-Mittelzelle

Während der Elektrolyse der Bodensuspension wandern positiv geladene Ionen zur Kathode. Von der Anode werden Anionen und die negativ geladenen Tonminerale und andere Bodenkolloide angezogen. Geht man davon aus, daß die Apatitkristalle mit

den Tonteilchen verkittet sind, so setzen sich die Apatitkristalle an der vor der Anode befindlichen Membran ab.

Durch den ständigen Abtransport von Ca^{2+} - und Phosphat-Ionen zur Kathode bzw. Anode wird das Lösungsgleichgewicht zwischen dem Apatitkristallverband und der Bodensuspension in der EUF-Mittelzelle gemäß der Gleichung in Abb. 45 nach rechts verschoben. Die Folge dieses Ungleichgewichtes ist eine weiter fortschreitende Lockerung im Kristallverband der Apatitminerale, und Phosphat wird gemäß der Auflösungsgleichung für Apatit in Abb. 45 freigesetzt. Zusätzlich gilt noch zu berücksichtigen, daß der pH-Wert an der Anode niedriger sein dürfte als in der Mitte der EUF-Extraktionskammer bzw. an der Kathode, wie nachstehende Reaktion zeigt.

Reaktion an der Anode:



Dieser Prozeß dürfte, wie in Abb. 45 angedeutet ist, die Auflösung von Apatit ebenfalls fördern.

Die Überprüfung dieser genannten Hypothese zur Bedeutung von Protonen an der Anode zur Förderung der Auflösung von Apatit während der EUF-Extraktion bedarf einer Messung der pH-Werte mittels Mikroelektroden an der EUF-Anoden-Elektrode.

Die mit der erweiterten und fraktionierten EUF-Analyse (80 Minuten) gewonnenen P-Freisetzungskurven spiegeln klar den Einfluß der P-Düngung und die Löslichkeit der gedüngten P-Formen wider (s. Abb. 20 bis 23). Für die P-Ernährung der Pflanzen ist jedoch nicht so sehr der absolute Gehalt an chemisch extrahierbarem Phosphat entscheidend, sondern die

Rate, mit der ein Boden Phosphat an die Wurzeloberfläche freisetzt. Die aus den EUF-Freisetzungskurven mittels verschiedener kinetischer Modelle berechneten P-Freisetzungsraten (b-Werte) korrelierten hoch signifikant mit der P-Aufnahme der Pflanzen (s. Tab. 18). Die Korrelationskoeffizienten waren für die Beziehungen zwischen P-Aufnahme der Pflanze und den b-Werten der EUF-Freisetzungskurven deutlich größer als bei den herkömmlichen statischen Extraktionsverfahren. Dieser Befund kann darauf zurückgeführt werden, daß sich bei den statischen Extraktionsverfahren sehr rasch ein Lösungsgleichgewicht zwischen der festen und bereits gelösten Phase einstellt. Mit derartigen Methoden können die diffusionskontrollierten Auflösungsprozesse von schwerverfügbaren P-Fraktionen im Boden, wie okkludierte Phosphate, P-Niederschläge oder schwerlösliche Ca-Phosphate, nicht erfaßt werden. Diese P-Formen können aber in erheblichem Maße zur P-Ernährung der Pflanze beitragen (Marschner, 1986). Durch die statischen Bodenuntersuchungsmethoden werden diese P-Fraktionen dann in ihrer Verfügbarkeit unterbewertet oder - wie am Beispiel der DL-Methode nach Rohphosphatdüngung - überbewertet (s. Tab. 5 bis 8).

Die große Bedeutung der P-Freisetzungsrates (b-Werte) für die Bestimmung der P-Nachlieferung wird besonders sichtbar, wenn die Befunde der verschiedenen Bodenuntersuchungsmethoden und die P-Aufnahme der Pflanzen in den Rohphosphat-Varianten korreliert werden. Hier zeigte sich, daß nur signifikante Beziehungen zwischen den b-Werten (= P-Freisetzungsrates) und der P-Aufnahme bestanden. Zwischen den Befunden der anderen herkömmlichen Methoden, inklusive der EUF-Routineanalyse (zwei Fraktionen), bestanden keine signifikante Beziehungen zur P-Aufnahme der Pflanzen (s. Tab. 19).

In Tabelle 19 ist interessanterweise eine schwach signifikante, negative Beziehung ($r = -0,77^x$) zwischen der P-Nachlieferung der Rohphosphatvarianten und dem EUF- Ca^{2+} -Quotienten (1./2. Fraktion) gegeben. Bei der Verrechnung der P-Nachlieferung aller Varianten und dem EUF- Ca^{2+} -Gehalt der 1. Frak-

tion bzw. dem EUF- Ca^{2+} -Gehalt der 2. Fraktion besteht eine schwach signifikante, positive Korrelation (s. Tab. 18). Mit der 1. EUF-Fraktion dürfte das Ca^{2+} der Bodenlösung und das leicht austauschbare Ca^{2+} extrahiert werden, während mit der 2. EUF-Fraktion (80°C und 400 V) Ca^{2+} von Carbonat, Sulfat und den Ca-Phosphatdüngemitteln gelöst wird. Infolge der P-Düngung mit Ca-Phosphaten stieg das EUF-extrahierbare Ca^{2+} in beiden Fraktionen gegenüber der ungedüngten Variante an, wobei die höchsten EUF- Ca^{2+} -Gehalte der 1. und 2. Fraktion in den Varianten mit vollaufgeschlossenen P-Düngemitteln analysiert wurden (Tab. 5 bis 8). Dieser Befund deutet darauf hin, daß die verschiedenen löslichen P-Düngemittel nicht nur das pflanzenverfügbare Phosphat beeinflussen, sondern auch die Ca^{2+} -Konzentration der Bodenlösung (1. EUF-Fraktion) und den Ca^{2+} -Gehalt der 2. EUF-Fraktion. Dieser Effekt der verschiedenen P-Düngemittel auf das EUF-extrahierbare Ca^{2+} beruht auf der unterschiedlichen Löslichkeit der Ca-Phosphate und den Begleitstoffen der P-Düngemittel im Boden.

Superphosphat enthält neben ca. 45% $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ noch etwa 50% CaSO_4 , Thomasphosphat setzt sich aus $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}_2\text{SiO}_4$ zusammen. Nova- und Hyperphosphat enthalten Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$), wobei Novaphosphat noch ca. 50% seines Phosphats als $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ enthält. Demzufolge wird in dieser Arbeit die positive Beziehung zwischen den EUF- Ca^{2+} -Fraktionen und der P-Nachlieferung des im Boden durch verschiedene P-Formen angereicherten Phosphats verständlich, da sich die im Vergleich zu teil- oder nichtaufgeschlossenen höhere Löslichkeit der vollaufgeschlossenen P-Formen nicht nur in einer höheren P-Verfügbarkeit für die Pflanzen, sondern auch in höheren EUF- Ca^{2+} -Gehalten widerspiegelt.

Anders ist dagegen die negative Korrelation zwischen der P-Nachlieferung des durch rohphosphathaltige P-Formen angereicherten Phosphats und dem EUF- Ca^{2+} -Quotienten zu interpretieren. Die negative Beziehung zwischen dem EUF- Ca^{2+} -Quotienten und der P-Nachlieferung der rohphosphathaltigen P-Formen bestätigt die Tatsache, daß mit steigender Ca^{2+} -Konzentration

im Boden die Freisetzung von Phosphat aus Rohphosphat gehemmt wird (Kasawneh und Doll, 1978). In dieser Arbeit kommt der Zusammenhang zwischen der Nachlieferung von apatitischem Phosphat und der Ca^{2+} -Konzentration aber nicht durch die 1. oder 2. EUF-Ca^{2+} -Konzentration zum Ausdruck, sondern durch den Quotienten aus der 1. und 2. EUF-Ca^{2+} -Konzentration. Der EUF-Ca^{2+} -Quotient beschreibt die Beziehung zwischen der Ca^{2+} -Intensität (= Konzentration der Bodenlösung) und der Ca^{2+} -Quantität (2. Fraktion) und steht für die Ca^{2+} -Pufferung. Je größer die Ca^{2+} -Pufferung des Bodens ist, um so geringer war die in dieser Arbeit gemessene Nachlieferung des im Boden durch rohphosphathaltige Düngemittel angereicherten Phosphats.

Obgleich Brüne und Heyn (1984) annehmen, daß mit einer DL-Analyse die P-Verfügbarkeit nach Rohphosphatdüngung ausreichend bestimmt wird, bestand in der eigenen Untersuchung überraschenderweise keine Beziehung zwischen der P-Nachlieferung der Rohphosphatvarianten und dem DL-löslichen P-Gehalt im Boden. Aber auch hier zeigt sich wieder das Problem, daß sich während der DL-Extraktion sehr rasch ein Lösungsgleichgewicht zwischen der gelösten und festen Phase einstellt. Der diffusionskontrollierte Prozeß der P-Freisetzung aus den schwerverfügbaren Ca-Phosphaten wird dabei nicht erfaßt.

Es gilt also festzuhalten, daß die Nährstofffreisetzung aus schwerverfügbaren Nährstoffvorräten ein diffusionskontrollierter Prozeß ist, d.h. die Freisetzung setzt eine sehr niedrige P-Konzentration voraus, wie sie an der Anode der EUF-Zelle, aber auch in der Rhizosphäre vorliegen dürfte (siehe Abb. 33).

Zu den schwerverfügbaren Nährstoffvorräten zählt auch das nichtaustauschbare Kalium der Tonminerale. Hier ist es ebenfalls nicht möglich, die Verfügbarkeit mit statischen Methoden der Bodenuntersuchung zu erfassen, obwohl sich die Pflanzen auf manchen Böden bis zu 80% aus der Fraktion des nichtaustauschbaren Kaliums ernähren können (Mengel und Wiechens, 1979). Neuere Untersuchungen von Uhlenbecker (1989)

sowie von Sparks (1987) zeigen, daß die Freisetzung von Zwischenschicht-Kalium ein diffusionsgesteuerter Prozeß ist, und daß die mit kinetischen Methoden gemessene und mit kinetischen Gleichungen modellierte Rate der K-Freisetzung die entscheidende Größe für die K-Ernährung der Pflanze ist. Uhlenbecker (1989) analysierte die K-Freisetzung der Böden mit einer speziellen Kationenaustauscherharz-Technik sowie einer modifizierten EUF-Extraktion. Die Rate der K-Freisetzung wurde von Uhlenbecker (1989) mit der Elovich-Funktion, einer Power-Funktion und dem Parabolischen Diffusionsgesetz berechnet.

Von Chien et al. (1980) wurden verschiedene Gleichungen, unter anderem die Elovich-Funktion und das Parabolische Diffusionsgesetz, angewendet, um die Kinetik der Auflösung von verschiedenen Rohphosphaten mathematisch zu formulieren. Dabei wurden drei Böden mit Rohphosphat gedüngt. In zeitlichen Abständen, bis zu 168 Stunden, erfolgte die Messung der wasserlöslichen P-Konzentration im Boden. Die Rate der Umwandlung der Rohphosphate in Wasser extrahierbares Phosphat in Abhängigkeit der Zeit ließ sich am besten mit der Elovich-Funktion beschreiben, gefolgt vom Parabolischen Diffusionsgesetz. Dieses war der Grund, die eigenen EUF-P-Freisetzungskurven mit den oben genannten Funktionen mathematisch zu transformieren und die Rate der P-Freisetzung zu errechnen. Die Rate der P-Freisetzung entsprach für die einzelnen Varianten: Thomasphosphat = Superphosphat > Novaphosphat > Hyperphosphat > ohne P-Düngung (vgl. Tab. 13 bis 16). Diese Reihenfolge wurde von allen drei angewendeten Modellgleichungen dokumentiert, wobei die Differenzierung zwischen den P-Formen etwas schlechter durch die einfache lineare Gleichung ($y = a + bx$) angezeigt wird, als durch die Elovich-Funktion oder durch das Parabolische Diffusionsgesetz.

Für die Güte der mathematischen Beschreibung der EUF-P-Freisetzungskurven kann auch das Ausmaß der linearen Transformation herangezogen werden. Dafür ist das Bestimmtheitsmaß

ein Indikator. Das durchschnittliche Bestimmtheitsmaß der Linearisierung aller EUF-P-Freisetzungskurven betrug bei der Elovich-Funktion 98,9%, beim Parabolischen Diffusionsgesetz 97,3% und bei der einfachen linearen Gleichung 94,4% (vgl. Tab. 13 bis 16). Der Unterschied zwischen dem durchschnittlichen Bestimmtheitsmaß der Elovich-Funktion und dem Parabolischen Diffusionsgesetz ist nur gering. Der Korrelationskoeffizient für die Beziehung zwischen P-Aufnahme der Pflanze und dem b-Wert ($P = \text{Freisetzungsrates}$) betrug für die Elovich-Funktion $r = 0,96^{***}$ und für das Parabolische Diffusionsgesetz $r = 0,95^{***}$. Bei der Korrelationsrechnung zwischen den P-Freisetzungsrates und der P-Aufnahme nur der Rohphosphat-Varianten ergab sich kein Unterschied im Hinblick auf die Korrelationskoeffizienten zwischen den kinetischen Modellgleichungen. Betrachtet man auch hier die Bestimmtheitsmaße als Parameter für die Güte der linearen Transformierung der EUF-P-Freisetzungskurven (vgl. B in Tab. 13 bis 16, Hyper- und Novavarianten), so ergibt sich ein durchschnittliches Bestimmtheitsmaß für die lineare Gleichung von 95,5%, für das Parabolische Diffusionsgesetz 97,7% und für die Elovich-Funktion 99,1%.

Um zu erfahren, mit welcher der nach den verschiedenen kinetischen Modellen berechneten P-Freisetzungsrates die P-Nachlieferung am genauesten erfaßt werden kann, wurde eine multiple Regressionsanalyse durchgeführt. Gleichzeitig sollten mit dieser multivarianten Auswertung auch noch andere Parameter der P-Nachlieferung gewichtet werden. Dazu wurden nach Vorschlag von Backhaus et al. (1989) für multiple Regressionsanalysen die für die P-Nachlieferung wichtigen, aber auch logischen Bodenfaktoren in ein Rechenprogramm eingegeben. Zu den logischen Faktoren zählt die P-Intensität (Rate der P-Freisetzung der drei kinetischen Modelle), die P-Quantität (P-Gehalte der verschiedenen statischen Extraktionsverfahren), die Ca-Konzentration und der pH-Wert der verschiedenen Böden. Dabei können diese Faktoren durchaus voneinander abhängig sein (Backhaus et al., 1989), wie z. B.

die P-Intensität und die P-Quantität oder der pH-Wert und die Ca-Konzentration. Mit Hilfe einer solchen multivarianten Regressionsanalyse können die genannten Faktoren im Hinblick auf die P-Nachlieferung gewichtet werden. Über die Bedeutung eines Faktors entscheidet die Größe des standardisierten Regressionskoeffizienten. Der Umfang der P-Nachlieferung des durch die verschiedenen P-Formen angereicherten Phosphats konnte mit einem Bestimmtheitsmaß von 97% auf zwei Faktoren zurückgeführt werden (s. Abb. 27). Die Gleichung zur Prognose der P-Nachlieferung (y) lautet:

$$y = 27,83 + 0,36^* \cdot \text{CAL-P} + 0,89^{***} \cdot b$$

(EUF-Freisetzungsrates, ber. nach Elovich-Funktion)

Sie besagt, daß die Höhe der P-Aufnahme vom Gehalt an CAL-löslichem Phosphat und besonders von der Rate der P-Freisetzung abhängt. Mit dem CAL-extrahierbaren Phosphat dürfte die P-Konzentration der Bodenlösung sowie das leicht desorbierbare Fe/Al- und Ca-Phosphat analysiert werden. Es dürfte damit die verfügbare P-Quantität im Boden darstellen. Die Intensität der Nachlieferung aus dem P-Vorrat eines Bodens wird durch die in dieser Arbeit gemessene und berechnete Rate der Freisetzung bestimmt. Dieser Befund möge die Bedeutung der P-Freisetzungsrates für die Schätzung der P-Nachlieferung (= P-Aufnahme der Pflanze) des durch verschiedene P-Formen angereicherten Bodenphosphats untermauern, denn infolge der P-Aufnahme der Wurzel wird ein zur Wurzeloberfläche gerichteter Diffusionsgradient aufgebaut (Jungk und Claassen, 1986), so daß Phosphat zur Wurzeloberfläche nachdiffundieren kann. Dadurch wird Phosphat aus der festen Phase des Bodens freigesetzt. Entscheidend für die P-Nachlieferung ist, mit welcher Rate das Phosphat freigesetzt wird. Dieses Konzept der Beziehung zwischen Nährstoffvorrat und der Intensität der Nährstofffreisetzung bestätigt die Bedeutung der Nährstoffpufferung für die P-Ernährung der Pflanze, wie auch die Befunde von Nair und Mengel (1984) belegen. Diese Autoren verbesserten die Beziehung zwischen dem löslichen P-Vorrat (CAL- bzw.

EUF-P) und der P-Aufnahme von Roggen, indem die P-Pufferung (Intensität/Quantität) der Böden berücksichtigt wurde.

Die in dieser Arbeit entwickelte Gleichung zur Berechnung der P-Nachlieferung nach Düngung mit verschiedenen P-Formen dürfte auch eine praktische Bedeutung für die Landwirtschaft besitzen, vor allem für die Routinebodenuntersuchung auf pflanzenverfügbares Phosphat, um eine Düngeempfehlung auszusprechen. Dieses könnte in der Weise geschehen, daß die Werte der CAL-Methode mit der P-Freisetzungsrate korrigiert werden, um mehr Informationen über die chemische P-Nachlieferung der Böden zu erhalten. Dieses sollte, nachdem die theoretischen Grundlagen in Labor- und Gefäßversuchen erarbeitet wurden, an Hand von Feldversuchen überprüft werden, da unter natürlichen Bedingungen die Standortfaktoren Bodenfeuchte und vor allem die Wurzel Ausbildung der Pflanzen eine große Bedeutung für das Niveau an verfügbarem Phosphat und die P-Nachlieferung haben.

Insgesamt haben die Versuche über die P-Nachlieferung des durch verschiedene P-Formen angereicherten Phosphats gezeigt, daß die Nachwirkung der vollaufgeschlossenen P-Düngemittel größer ist als die der apatitischen P-Düngemittelformen. Dieses dokumentiert sich in der höheren EUF-P-Freisetzungsrate und in der größeren P-Aufnahme der Pflanzen in den Varianten mit vollaufgeschlossenen P-Düngemitteln im Vergleich zu apatithaltigen P-Formen (s. Abb. 17 bis 19). Kick und Minhas (1972) sowie Fritsch (1986) beobachteten ebenfalls eine höhere P-Nachlieferung im Gefäßversuch nach langjähriger P-Düngung im Feld mit vollaufgeschlossenen P-Formen als mit nichtaufgeschlossenen Düngemitteln.

Besonders deutlich wird die höher zu veranschlagende Nachwirkung der vollaufgeschlossenen P-Formen, wenn man die Erträge der Versuchspflanzen im vierten Jahr zur Überprüfung der P-Nachlieferung der verschiedenen P-Formen betrachtet (s. Tab. 10 bis 12). Hier zeigte sich eine deutlich bessere Ertrags-

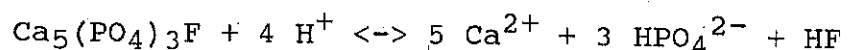
wirksamkeit bei den vollaufgeschlossenen P-Düngemitteln als bei Nova- oder Hyperphosphat. In manchen Feldversuchen war die Nachwirkung von Rohphosphat jedoch höher als die der aufgeschlossenen P-Formen. Dieses trifft besonders für relativ saure Standorte zu (Bolland und Gilkes, 1990), da bei niedrigen pH-Werten wasserlösliches Phosphat in größerem Umfang der binuklearen P-Adsorption unterliegt als Rohphosphat (Renno und Steffens, 1985).

4.2 Bedeutung von Standort- und pflanzenphysiologischen Faktoren für die Ertragswirksamkeit von weicherdigem Rohphosphat

Im vorhergehenden Kapitel wurde die Bedeutung der P-Freisetzung für die P-Aufnahme der Pflanzen diskutiert und gezeigt, daß die P-Freisetzung der mit rohphosphathaltigen P-Düngemittelformen gedüngten Böden kleiner ist als die der vollaufgeschlossenen P-Formen.

Die Befunde der eigenen Feldversuche deuten jedoch darauf hin, daß die Wirkung von Hyperphosphat von weiteren Faktoren abhängen kann. Dieses wird besonders deutlich auf dem Standort "Ginsheim", der von seinen Bodenkenndaten, hoher pH-Wert und Karbonatgehalt, nicht unbedingt für den Einsatz von weicherdigen Rohphosphaten prädestiniert ist. Sowohl der relativ hohe pH-Wert (7,4) als auch die hohe Ca^{2+} -Konzentration hemmten die chemische Umwandlung von Hyperphosphat in Wasser- oder CAL-lösliches Phosphat. Eine Förderung der chemischen Verfügbarkeit wurde nur nach Düngung mit Superphosphat beobachtet (s. Tab. 36). Aufgrund der höheren löslichen P-Gehalte im Boden wurde der Rübenhöchsttertrag in der Variante mit $400 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ erzielt. Bei Hyperphosphat war weder eine Ertragswirksamkeit auf das Wachstum noch auf die

P-Aufnahme der Zuckerrübe zu erkennen (s. Abb. 41 u. Tab. 37 u. 39). In den darauffolgenden Versuchsjahren zeigte Hyperphosphat zu Sonnenblume und auch zu Winterweizen eine ebenso gute Wirkung auf die Kornerträge wie Superphosphat (s. Tab. 37). Dieser Befund dokumentiert, wie auch Marschner et al. (1986) bemerken, daß die Nährstoffverfügbarkeit nicht allein vom chemisch extrahierbaren Nährstoffgehalt beeinflußt wird, sondern daß die Pflanzen über ihren Wurzelstoffwechsel oder über ihre Wurzelmorphologie die Verfügbarkeit von schwerlöslichen Nährstoffvorräten wie P-Düngemittel in beachtlichem Maße erhöhen kann. Diesem Gesichtspunkt wurde bei der Interpretation von vergleichenden P-Düngemittelformenversuchen bislang nur wenig Aufmerksamkeit gewidmet. Es stellt sich also die Frage, warum wirkte Hyperphosphat nicht bei Zuckerrübe und warum konnten Sonnenblume und Winterweizen apatitisches Phosphat mobilisieren? Nach Angaben von Graw et al. (1979) soll Sonnenblume über ein gutes P-Aneignungsvermögen verfügen, während Weizen nach Beobachtungen von Horst und Waschkies (1987) ein relativ ineffizientes P-Aneignungsvermögen aufweist. Um die verschiedenen P-Mobilisierungsmechanismen der Pflanzen aus weicherdigem Rohphosphat zu verstehen, sei noch einmal die Gleichgewichtsbeziehung für die Auflösung von Apatit nach einem Vorschlag von Mengel (1986) aufgeführt:



Diese Gleichung beinhaltet die wichtige Information, daß hohe Protonenkonzentrationen die Auflösung von Apatit fördern, während niedrige Ca^{2+} - und Phosphatkonzentrationen in der Bodenlösung ebenfalls die P-Freisetzung aus Rohphosphat begünstigen. Umgekehrt wird durch hohe wasserlösliche P-Konzentrationen die Auflösung von Hyperphosphat vermindert (s. Abb. 4). Niedrige P-Konzentrationen sind besonders in der Rhizosphäre als Folge der P-Aufnahme der Wurzel anzutreffen (s. Abb. 33). Durch Wurzelausscheidungen der Pflanzen könnte z.B. durch Chelatisieren die Ca^{2+} -Konzentration an der

Wurzeloberfläche erniedrigt werden (Uren und Reisenauer, 1988; Hale und Moore, 1979). Beide genannten Prozesse fördern die Auflösung von Rohphosphat. Aus diesem Grunde wurde in dieser Arbeit der Umsatz verschiedener P-Düngemittel in der Rhizosphäre von Raps untersucht. Diese Pflanze wurde gewählt, da Rapswurzeln aufgrund ihrer langen Wurzelhaare (Hendriks et al., 1981) sowie der relativ starken Protonenabgabe (Grinsted et al., 1982), der erhöhten Ca^{2+} -Aufnahmekapazität und Abgabe von Malat und Citrat (Hoftland et al., 1989) relativ viel Phosphat aus weicherdigem Rohphosphat mobilisieren müßten. Die eigene Studie ergab, daß die P-Abgabe des Rhizosphärenbodens an die Wurzeloberfläche in der Hyperphosphatvariante durch die "Rhizosphäreneffekte" gegenüber der ungeüngten Variante anstieg (s. Tab. 24). Die Freisetzung des wasserlöslichen Phosphats in der Rhizosphäre war allerdings bei den Varianten mit einer voll- oder teilaufgeschlossenen P-Form deutlich größer als bei Hyperphosphat. Es ist also relativ unwahrscheinlich, daß die auf dem Standort "Ginsheim" beobachtete unterschiedliche Ertragswirksamkeit von Hyperphosphat bei Zuckerrübe, Sonnenblume oder Winterweizen nur mit "Rhizosphäreneffekten" zu erklären ist. Da die Ca^{2+} -Konzentration in der Bodenlösung auf dem Standort "Ginsheim" (ca. 7% CaCO_3) relativ hoch ist, dürfte die Erniedrigung der Ca^{2+} -Konzentration an der Wurzeloberfläche durch Aufnahme oder durch Chelatisierung kaum eine Rolle für die Rohphosphat-Mobilisierung bei Sonnenblume oder Winterweizen gespielt haben. Hinzu kommt noch, daß Ca^{2+} durch Massenfluß in hoher Rate zur Wurzeloberfläche transportiert wird, so daß Ca^{2+} in der Rhizosphäre angereichert wird (Barber und Ozanne, 1970). Diese Akkumulation hemmt verständlicherweise die Löslichkeit von Apatit.

Eine weitere Möglichkeit der Rohphosphat-Mobilisierung in der Rhizosphäre ist die H^+ -Abscheidung der Wurzeln (Nye und Kirk, 1987). Dieser Mechanismus der Nährstoffaneignung (Schubert und Mengel, 1989; Haynes, 1990) kann in beträchtlichem Umfang, gemäß der Auflösungsgleichung, Rohphosphat auflösen.

So berichtet Prjjanischnikov (1934) über ein gutes Aufschließungsvermögen von Gelber Lupine für Rohphosphate durch eine physiologische Bodenversauerung. Besonders die symbiontisch ernährten Leguminosen haben eine hohe Netto-Abscheidung an Protonen (Mengel und Steffens, 1982; Schaller und Fischer, 1985) und wie auch hier gezeigt wurde, erklärt dieses Vermögen der Leguminosen die positive Ertragswirksamkeit von Hyperphosphat bei *Vicia faba* auf dem Standort "Gießen" (s. Tab. 41). Ob die der Ionenaufnahme vorangehende H^+ -Abgabe der Wurzeln (Mengel und Schubert, 1985) auf dem carbonatreichen Standort "Ginsheim" die Löslichkeit von Apatit erhöht hat, ist zweifelhaft, da die Protonen sehr rasch durch Carbonat neutralisiert werden, wie pH-Wert-Messungen von Hauter und Mengel (1988) in der Rhizosphäre von symbiontisch ernährtem Rotklee auf einem carbonatreichen bzw. auf einem carbonatfreien Boden zeigten. Auf dem schwach gepufferten Boden betrug die pH-Absenkung in der Rhizosphäre etwa 1,3 Einheiten, während auf dem Carbonat-Boden keine pH-Veränderungen gemessen wurden. Schaller und Fischer (1985) konnten jedoch mit einer Elektrodenmatrix auf einem $CaCO_3$ -reichen Boden (40%) an der Wurzelspitze von Erdnuß eine pH-Erniedrigung von 1,2 Einheiten messen.

Ferner ist zu berücksichtigen, daß die Ca^{2+} -Aufnahme über die Wurzelspitze erfolgt (Clarkson und Sanderson, 1978). Niedriger pH-Wert und geringe Ca^{2+} -Konzentration erhöhen die Rohphosphatlöslichkeit an der Wurzelspitze. Geht man davon aus, daß die Wurzelspitzendichte im Oberboden bei Weizen und Sonnenblume größer ist als bei Zuckerrübe, so könnte dieses eventuell das bessere Phosphataneignungsvermögen aus Rohphosphat von Sonnenblume und Weizen im Vergleich zu Zuckerrübe erklären.

Eine andere Erklärung für die unterschiedliche Wirkung von Hyperphosphat bei Zuckerrübe im Vergleich zu Sonnenblume und Winterweizen bietet die Wurzel Ausbildung der genannten Pflanzen. Nach Kutschera (1960) haben Weizen und Sonnenblume ein dichteres Wurzelsystem als Zuckerrübe. Untersuchungen von

Müller (1987) sowie Westing und Söchtig (1985) zeigen, daß die Wurzeldichte von Zuckerrübe im Oberboden $2-5 \text{ cm/cm}^{-3}$ Boden beträgt. Winterweizen hat eine Wurzeldichte von $8-10 \text{ cm/cm}^{-3}$ Boden. Diese Untersuchungen wurden auf Löß-Parabraunerden durchgeführt.

Der Zusammenhang zwischen Wurzellänge und der P-Aneignung von Rohphosphat dürfte sich wie folgt darstellen. In der Abbildung 46 sind zwei Pflanzen mit gleicher potentieller Wachstumsrate, aber einer unterschiedlichen Wurzellänge dargestellt.

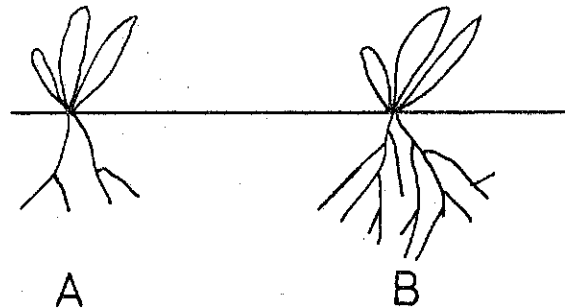


Abb. 46: Zwei Pflanzen mit gleicher potentieller Wachstumsrate mit kleiner (A) und großer (B) Wurzellänge.

Die Nährstoffaufnahme einer Pflanze kann mit nachstehender Formel beschrieben werden:

$$U_t = 2 \pi r C t l \quad (\text{Mengel, 1985})$$

U_t = Nährstoffaufnahme zur Zeit t

r = Wurzelradius

C = Nährstoffkonzentration an der Wurzeloberfläche

t = Zeit

l = Wurzellänge

Aus dieser Formel geht hervor, daß die Wurzellänge der Pflanze (l) die Nährstoffkonzentration (C) und umgekehrt die Nährstoffkonzentration die Wurzellänge kompensieren kann,

damit eine Pflanze die gleiche Nährstoffaufnahme hat. Es gilt aber zu berücksichtigen, daß auf dem Standort "Ginsheim" nur durch die Superphosphatdüngung das CAL- bzw. wasserlösliche Phosphat im Boden angehoben wurde. Bei Hyperphosphatdüngung war kein Anstieg zu verzeichnen (s. Tab. 36). Da die Zuckerrübe auf dem Standort "Ginsheim" eine sehr geringe Wurzel-dichte ausgebildet hat (s. Abb. 42) und die wasserlösliche P-Konzentration im Boden nach Hyperphosphatanwendung gering war, konnte die Zuckerrübe auf diesem Standort kein apatitisches Phosphat aufnehmen, da gemäß der Formel zur Beschreibung der Nährstoffaufnahme die Faktoren Konzentration (C) und Wurzellänge (l) gering waren. Es fand also auf diesem Standort bei der Zuckerrübe keine gegenseitige Substitution der genannten Faktoren in der Hyperphosphatvariante statt.

In der Superphosphatvariante konnte die geringe Wurzellänge der Zuckerrübe durch die relativ hohe lösliche P-Konzentration im Boden kompensiert werden, so daß die Rübe ausreichend Phosphat aufnehmen konnte und der Höchstertrag in der P₂-Variante mit Superphosphat erzielt wurde. Bei Winterweizen und Sonnenblume dürfte dagegen die geringe P-Konzentration (C) durch die relativ große Wurzellänge (l) pro m³ Boden kompensiert worden sein, so daß eine ausreichende Rate der P-Aufnahme pro Pflanze garantiert war. Hinzu kommt noch, daß die Sonnenblumenwurzeln, wie auch Hunter und Kochman (1985) beobachteten, relativ stark mit VA-Mykorrhiza infiziert werden (s. Tab. 38). Auf dem Standort "Ginsheim" lag die mit Mykorrhiza infizierte Wurzellänge im Durchschnitt aller Varianten bei 42%. Zwischen den Varianten bestand kein signifikanter Unterschied im Grad der Mykorrhizierung. Für Weizenwurzeln dürfte dieser Mykorrhizierungsgrad ebenfalls zutreffen. Besonders die hier beobachtete Besiedlung der Wurzeln mit VA-Mykorrhiza dürfte, wie Hayman (1980), Achtnich und Moawad (1986) sowie Weritz (1987) berichten, die P-Aufnahme aus apatitischem Phosphat fördern. Von der Mykorrhiza können die schwerlöslichen anorganischen Bodenphosphate oder P-Düngerformen nicht in ihrer Verfügbarkeit durch Ausschei-

dungen der Hyphen erhöht werden (Barcea und Azcon-Aguilar, 1983). Aber, und das ist ein wichtiger Prozeß für die Mobilisierung von Rohphosphat, die VA-Mykorrhiza bewirkt eine vergrößerte Kontaktfläche zwischen Boden und Wurzel der Wirtspflanze (Hayman, 1980). Nach Angaben von Kothari et al. (1990) kann die Hyphenlänge 4 bis 5 m g⁻¹ Boden in der Rhizosphäre von Mais betragen. Darüber hinaus haben die Hyphen der Mykorrhiza einen Durchmesser von 2-4 µm (Schlechte, 1976). Der Durchmesser von Wurzelhaaren ist ca. fünfmal und der der Wurzeln ca. 100 Mal größer als der von Mykorrhizahyphen. Die Hyphen können damit also noch in Bodenporen eindringen, die für Wurzeln nicht zugänglich sind und mehr Phosphat räumlich erschließen. Hinzu kommt noch, daß die Mykorrhizahyphen Phosphat mit einer höheren Rate aufnehmen als die Pflanzenwurzeln (Cress et al., 1979).

Verständlicherweise wird durch die Besiedlung der Wurzeln mit Mykorrhiza der Faktor Wurzellänge (l) in der Gleichung zur Beschreibung der Nährstoffaufnahme um ein Vielfaches erhöht, so daß die niedrige P-Konzentration im Boden (C) nach Rohphosphatdüngung kompensiert wird. Die Folge der Substitution der Konzentration (C) durch die Wurzellänge (l) plus Mykorrhizahyphen könnte der gravierende Grund für die etwa gleiche Ertragswirksamkeit von Rohphosphat im Vergleich zu Superphosphat bei Sonnenblume und Winterweizen im P-Formen-Versuch "Ginsheim" sein, obwohl dieser Standort aufgrund seines hohen pH-Wertes (7,4) und hohen Karbonatgehaltes nicht für den Einsatz von Hyperphosphat prädestiniert ist.

Die Ausführungen zur Interpretation der Wirksamkeit von Rohphosphat zu Zuckerrübe, Sonnenblume und Winterweizen auf einen schwach alkalischen Boden untermauern die Bedeutung von Wurzellänge und Mykorrhizainfizierung für die Ausnutzung von Rohphosphat. Die Zuckerrübe ist, da sie keine Wirtspflanze für Mykorrhiza ist (Hayman, 1980) und eine kleine Wurzellänge pro m³ Boden ausbildet, demnach im Vergleich zu Sonnenblume und Winterweizen als rohphosphatineffizient einzustufen.

In diesem Zusammenhang sind die Befunde von Silberbush und Barber (1983) zur Untersuchung und Simulierung der P-Aufnahme von Sojabohnen unter Feldbedingungen interessant. Nach den Befunden der genannten Autoren hat die Wurzellänge der Pflanze, gefolgt von der P-Konzentration in der Bodenlösung, den größten Einfluß auf die gemessene P-Aufnahme. Auch Steffens (1984) beobachtete in Feldversuchen eine positive Beziehung zwischen der Wurzellänge und der P-Aufnahme von Rotklee und Weidelgras.

Die Bedeutung der Wurzellänge für die P-Aufnahme aus Rohphosphat kommt auch in der Untersuchung über den Einfluß verschiedener Bodengefügeformen auf das Wurzelwachstum und die P-Verfügbarkeit verschiedener P-Formen zum Ausdruck.

Infolge des Grobaggregatgefüges wurde das Wurzelwachstum von Sommerweizen, besonders aber die Wurzellänge, wie auch Keita und Steffens (1989) feststellten, im Vergleich zur Variante mit Feinaggregatgefüge in beachtlichem Maße reduziert. Diese Reduktion traf für alle drei P-Varianten zu (s. Tab. 27). Der Kornertrag nahm aber bei Superphosphat durch das Grobaggregatgefüge nicht ab, währenddessen in der P_0 - und Hyperphosphatvariante eine deutliche Ertragsdepression zu verzeichnen ist (Abb. 36). In der Grobaggregat-Variante reichte die hohe Löslichkeit von Superphosphat bzw. die daraus resultierende Größe C der Gleichung auf S. 169 aus, trotz verminderter Wurzellänge und reduzierter räumlicher Zugänglichkeit der Wurzeln zum Phosphat, um den gleichen Kornertrag zu erzielen wie in der Feinaggregatvariante. Anders ist dagegen die P-Verfügbarkeit bei Hyperphosphat in der Variante mit Grobaggregatgefüge zu beurteilen. Aufgrund des durch das Grobaggregatgefüge gehemmten Wurzelwachstums war die Kontaktfläche zwischen Wurzeloberfläche und Boden sehr stark verringert. Die Folge dieses eingeschränkten Wurzelwachstums, also eine Abnahme des Faktors Wurzellänge (l) in der Gleichung auf Seite 169, ist, daß die Rate der P-Aufnahme pro m Wurzellänge ansteigt und der Boden vermehrt Phosphat freisetzen muß, um die Pflanze ausreichend mit Phosphat zu versorgen. In diesem

Fall wurde die niedrige P-Konzentration (C) nicht durch die Wurzellänge kompensiert. Da aber die Rate der P-Freisetzung eines mit Hyperphosphat gedüngten Bodens im Vergleich zu aufgeschlossenen P-Formen kleiner ist (s. Tab. 13 bis 16) und das Wurzelwachstum gehemmt war, kam es bei Hyperphosphat zu einer größeren Ertragsdepression als bei Superphosphat in der Grobaggregat-Variante. Erschwerend für die P-Aufnahme ist auch noch, daß bei einem Grobaggregatgefüge die Wurzelhaare verkürzt werden (Keita, 1986), so daß der um die Wurzel befindliche Boden nicht so stark an Phosphat verarmt und damit auch weniger Phosphat aus Rohphosphat freigesetzt wird. Die bisher diskutierten Befunde der vorliegenden Arbeit zeigen, daß die sich im Boden nach Hyperphosphatdüngung einstellende niedrige P-Konzentration der Gleichgewichtslösung durch ein umfangreiches Wurzelsystem mit Mykorrhiza-Symbiose der Pflanzen kompensiert werden kann, so daß im Fall von Sonnenblume und Winterweizen in Ginsheim die gleiche Ertragswirksamkeit erzielt wurde wie bei Superphosphatdüngung. Wenn aber die Wurzelausbildung gehemmt wird, wie z.B. durch ein Grobaggregatgefüge, dann konnte bei Hyperphosphat eine stärkere Ertragsdepression beobachtet werden als bei Superphosphat.

Müller (1987) beobachtete in seinen Wurzelstudien unter Feldbedingungen in P-Steigerungsversuchen eine deutliche Zunahme der Wurzellänge bei Zuckerrübe, Gerste und Weizen in der P_0 -Variante im Vergleich zu Varianten mit ausreichender P-Versorgung (Gehaltsklasse C). Auch die Befunde von Föhse (1985) weisen darauf hin, daß die Wurzelhaare bei niedrigem Niveau an verfügbarem Phosphat im Boden länger sind als bei einem hohen Gehalt an verfügbarem Phosphat. Daß die Wurzellänge der Pflanzen bei niedrigem verfügbarem P-Niveau im Boden größer ist als bei einem hohen P-Gehalt, wurde nur in einem Experiment mit Sommerweizen bestätigt (s. Tab. 27). Auf der anderen Seite zeigen die Untersuchungen mit Sommergerste auf einem P-armen Boden die größte Wurzellänge in der Variante mit 50 mg P kg^{-1} Boden in Form von Superphosphat (Tab. 30). Auch die

Befunde des Versuches der plazierten P-Düngung lassen erkennen, daß Mais die größte Wurzeldichte in der mit Superphosphat gedüngten Zone ausgebildet hat (Tab. 25, Abb. 34). Die Versuche mit Sommergerste und Mais wurden mit einem P-armen Unterboden durchgeführt, wo auch keine autochthone Mykorrhiza vorliegen dürfte. Die Bedeutung der Mykorrhiza für die P-Ernährung wurde bereits diskutiert. Die niedrige P-Verfügbarkeit nach Rohphosphatdüngung auf dem P-armen Unterboden (s. Abb. 37) reicht also nicht aus, um eine ausreichend hohe P-Aufnahmerate im Vergleich zu Superphosphat sicherzustellen. Nach Untersuchungen von Mengel und Barber (1974a; 1974b) ist diese Rate besonders im Jugendstadium der Pflanzen sehr hoch, da die Pflanzen in dieser Entwicklungsphase ein relativ kleines Wurzelsystem aufweisen, also im Prinzip noch keine Substitution gemäß der Formel auf Seite 169 von C (Konzentration) durch l (Wurzellänge) stattfinden kann. Die Folge der geringen P-Verfügbarkeit im Boden und der kleinen Wurzellänge ist ein physiologischer P-Mangel, wobei besonders die primären Prozesse des Stoffwechsels, wie die Nukleinsäuresynthese, gehemmt werden (Mengel, 1989). Dementsprechend ist die Zellteilung stark eingeschränkt und damit das Sproß- und Wurzelwachstum gehemmt. Aus diesem Grund können dann auch nicht die häufig beobachteten Kompensationsmechanismen der Pflanzen bei geringer P-Versorgung des Bodens induziert werden, weil die Nukleinsäuresynthese gestört ist. Zu diesen Mechanismen zählt insbesondere die Vergrößerung der Wurzellänge oder die Verlängerung der Wurzelhaare (Müller, 1987; Föhse, 1985).

Obgleich Wintergerste und besonders Hafer eine vergleichbare Wurzellängendichte haben wie Winterweizen, hatte das Hyperphosphat auf dem Standort "Gießen" eine niedrigere Ertragswirksamkeit in den Jahren 1986 und 1989 als Superphosphat. Aufgrund der ungünstigen Niederschlagsverteilung sowie der erhöhten Verdunstung der Jahre 1986 und 1989 in den Wochen vor der Hafer- bzw. Gerstenernte (s. Abb. 43 und 44) wird

angenommen, daß die geringe Bodenfeuchte die Verfügbarkeit von Rohphosphat in einem stärkeren Umfang beeinträchtigt als die von Superphosphat. In Modellversuchen wurde die Bedeutung des Standortfaktors Bodenfeuchte für die Wirksamkeit von Hyper- und Superphosphat untersucht. Dabei zeigte sich, daß bei niedriger Bodenfeuchte (40% der max. WK) die Pflanzen in der Hyperphosphatvariante mit einer stärkeren Ertragsdepression reagierten als in der Superphosphatvariante (Abb. 38). Die Ertragsdepression der mit Hyperphosphat gedüngten Pflanzen war besonders ausgeprägt, wenn die Bodenfeuchte 30% der maximalen Wasserkapazität betrug (Abb. 39).

Unter Gleichgewichtsbedingungen (Löslichkeitsprodukt) ist die P-Konzentration der Bodenlösung bei hoher und niedriger Bodenfeuchte gleich. Die Kontaktfläche zwischen Bodenlösung (gefüllte Bodenporen) und der Wurzeloberfläche ist jedoch, wie in Abb. 47 schematisch dargestellt, bei niedriger Bodenfeuchte wesentlich geringer als bei ausreichender Bodenfeuchte.

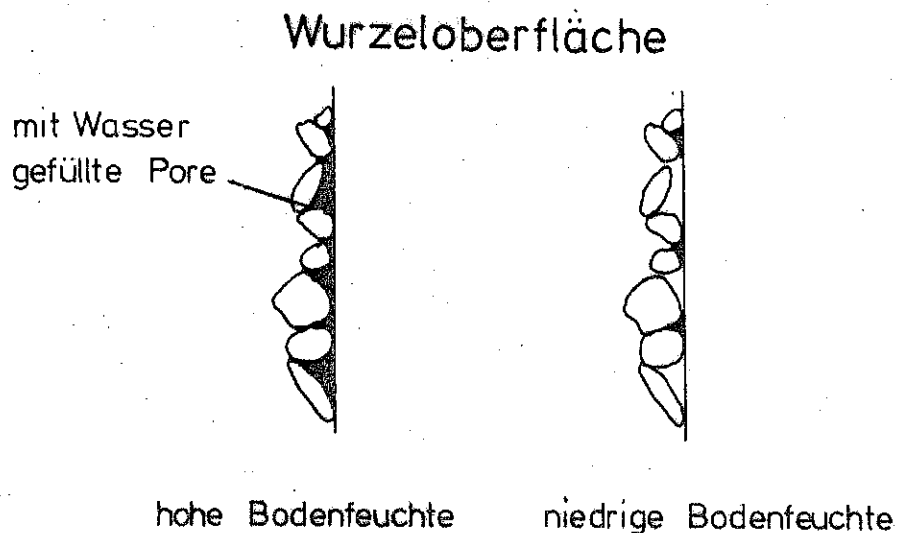


Abb. 47: Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und der Kontaktfläche Wurzel - Bodenlösung.

Die unterschiedliche Bodenfeuchte verändert die Diffusivität des Bodens. Diese kann nach Nye (1979) wie folgt beschrieben werden:

$$D = D_e \theta f_e (dC_e/dC) + D_E$$

D: Diffusionskoeffizient der gesamten Bodenmatrix

D_e : Diffusionskoeffizient in freiem Wasser

θ : Fraktion der mit Wasser gefüllten Poren

f_e : Impedanz-Faktor (Tortuosität)

C_e : Konzentration in der Bodenlösung

C: Konzentration im gesamten Boden

D_E : Oberflächendiffusion

Besonders die Terme θ und f_e nehmen mit dem Rückgang der Bodenfeuchte ab. Selbst bei gleichem dC_e/dC ist der Diffusionsfluß bei einem trockenen Boden aufgrund des geringen Diffusionskoeffizienten von Phosphat beachtlich reduziert. Die Bedeutung der Bodenfeuchte auf den P-Diffusionsfluß ist aus der Bestimmung der P-Anlieferung an einen Anionenaustauscher im Boden bei 80 und 30% der maximalen Wasserkapazität zu erkennen. In der Variante ohne P-Düngung sank die P-Anlieferung von 25 mg P kg⁻¹ Boden im feuchten Boden auf 2,5 mg P kg⁻¹ Boden im trockenen Boden ab (s. Abb. 40). Aufgrund der großen Löslichkeit haben vollaufgeschlossene P-Düngemittelformen ein wesentlich höheres " dC_e/dC " als Rohphosphat, so daß die vollaufgeschlossenen P-Formen auch noch unter trockenen Bodenbedingungen relativ gut verfügbar sind. Dieses erklärt auch die im Vergleich zur Rohphosphatvariante hohe P-Anlieferung an das Anionenaustauscherharz der Superphosphatvariante bei geringer Bodenfeuchte. Demzufolge ist die durch eine geringe Bodenfeuchte induzierte Ertragsdepression bei Sommergerste und Sommerweizen im Gefäßversuch bei der Variante mit Superphosphat geringer als bei Hyperphosphat (s. Abb. 38 und 39). Darüber hinaus gilt es zu berücksichtigen, daß bei geringer Bodenfeuchte das Wurzelwachstum im Gefäßversuch reduziert wurde (s. Tab. 30). Unter Freilandbedingungen ist bei Trockenheit die Wurzeldichte im Oberboden im Vergleich zu einer ausreichenden Bodenfeuchte vermindert (Wesseolek und Gäth, 1990; Barraclough et al., 1989). Die

Abnahme der Wurzellängendichte im Oberboden bei Trockenheit versucht die Pflanze durch eine Zunahme der Wurzeldichte im Unterboden zu kompensieren (Wessolek und Gäth, 1990). Bedenkt man aber, daß sich das gedüngte Phosphat im Oberboden befindet und die Unterböden in der Regel wenig verfügbares Phosphat aufweisen, so wird verständlich, daß das Hyperphosphat besonders bei niedriger Bodenfeuchte eine weitaus geringere Ertragswirksamkeit aufweist als Superphosphat. Die verminderte Diffusivität des Bodens sowie die geringere Wurzellichte bei Trockenheit sind als Gründe für die geringere Ertragswirksamkeit von Hyperphosphat anzusehen. Auch Diez und Bucher (1980) beobachteten in einem vergleichenden P-Formen-Versuch im sehr trockenen Jahr 1976 bei Hyperphosphat eine erheblich stärkere Ertragsdepression bei Gerste als bei den vollaufgeschlossenen P-Formen.

Es läßt sich also festhalten, daß die Ertragswirksamkeit von weicherdigem Rohphosphat in erheblich größerem Umfang von Standortfaktoren (Bodenfeuchte und Bodengefüge) und der aus diesen Parametern resultierenden Größe des Wurzelsystems einer Pflanze beeinflußt wird als bei Superphosphat.

Auch die Vorstellung, weicherdige Rohphosphate nur auf sauren Standorten zu düngen, ist im Prinzip nicht ganz logisch. Die Auflösung von Rohphosphat wird zwar durch niedrige pH-Werte forciert (s. Abb. 3), gleichzeitig sollte man aber berücksichtigen, daß bei pH-Werten < 5 vermehrt phytotoxische Al- oder Mn-Verbindungen im Boden gebildet werden. Phytotoxische Al- und Mn-Formen hemmen das Wurzelwachstum (Mühling et al., 1988), so daß in manchen Fällen die Wirkung von Rohphosphat auch auf sauren Böden unbefriedigend sein kann. Dieser Erklärungsansatz sowie die inhomogene Wurzelverteilung bei Tiefpflugflächen könnte die von Hoffmann (1975) sowie von Patzke und Lachotzke (1985) beobachtete schlechte Ertragswirksamkeit von Hyperphosphat auf den Tiefpflugflächen in Nord-Deutschland plausibel machen. Auf solchen extremen und für das

Wurzelwachstum ungünstigen Standorten empfiehlt Hoffmann (1975), die P-Düngung besser mit einer vollaufgeschlossenen Form durchzuführen, da die relativ hohe Löslichkeit von Super- oder Thomasphosphat die verminderte Wurzelausdehnung kompensieren kann. Andererseits zeigen aber wiederum Untersuchungen von Gichuru et al. (1988), daß in dreijährigen Versuchen die Wirkung von Rohphosphat bei "Low-Input"-Landbau in Peru auf einem sehr sauren Boden (pH: 4,5) genauso hoch war wie die von Superphosphat, wenn Al-tolerante Reis- und Cowpea Genotypen angebaut werden. Außerdem war das Lösungsvolumen des Bodens für Apatit mit einer Niederschlagsmenge von 2100 mm a⁻¹ hoch (Gichuru et al., 1988).

Die von einigen Autoren (Ulrich, 1963; Gras, 1982; Finck, 1985) geäußerte Ansicht, daß die P-Form bei ausreichender P-Versorgung der Böden keine Bedeutung für die Effizienz einer P-Düngung hat und daß weicherdiges Rohphosphat im Laufe der Zeit in verfügbares Phosphat umgewandelt wird, steht im Widerspruch zu den hier erzielten Befunden über den Umsatz von Hyper- und Superphosphat. Das Experiment über den Einfluß der Zeit für die Löslichkeit von Hyperphosphat und Superphosphat ergab, daß die Auflösung von apatitischem Phosphat innerhalb von zwei Jahren nicht erhöht wurde. Es zeigte sich vielmehr, daß bei niedrigen pH-Werten eher mit einer Abnahme der P-Verfügbarkeit zu rechnen ist, da das aus den Düngemitteln freigesetzte Phosphat binuklear adsorbiert wird (s. Abb. 5 bis 7). Auch nach mehreren Jahren intensiver Umsetzungsprozesse im Feld war die P-Verfügbarkeit nach Düngung mit rohphosphathaltigen P-Formen geringer als bei den vollaufgeschlossenen P-Düngemitteln, wie die P-Nachlieferung im Pflanzenexperiment (s. Abb. 17, 18 u. 19), die EUF-P-Freisetzungsrates (s. Tab. 13, 14, 15 u. 16) und die CAL-, P_w-, Me^{III} und EUF-P-Gehalte im Boden dokumentieren (s. Tab. 5 bis 8). Auch die eigenen im Gefäßversuch erzielten Befunde über die Wirksamkeit einer P-Düngung in Form von Hyper- und Superphosphat und über das verfügbare P-Niveau im Boden nach Düngung

auf P-Entzug der Pflanzen zeigen die gleichen Resultate, allerdings im Zeitraffer-Verfahren, wie die langjährigen vergleichenden P-Düngemittelformen-Versuche in Nord-Hessen unter Feldbedingungen. Mit apatitischem Phosphat ist das Niveau an Wasser- oder CAL-löslichem Phosphat weder auf einem sauren noch auf einem schwach sauren Boden aufrechtzuhalten (s. Abb. 8 bis 10), so daß die Erträge der Pflanzen abfielen (s. Abb. 12). Aber, und das sei deutlich betont, eine Entzugsdüngung mit Superphosphat auf einem sauren Boden ($\text{pH} < 6$) reicht ebenfalls nicht aus, um den Gehalt an löslichem Phosphat im Boden konstant zuhalten, da wasserlösliches Phosphat sehr rasch bei niedrigen pH-Werten fixiert wird (Barekzai und Mengel, 1985). Um die Effizienz der P-Düngung zu erhöhen, sollten die sauren mineralischen Böden auf pH-Werte > 6 aufgekalkt werden, so daß, wie auch hier gezeigt wurde, mit einer Superphosphatdüngung oder in einer anderen vollaufgeschlossenen P-Form in Höhe des Entzuges das Niveau an verfügbarem Phosphat im Boden aufrecht gehalten wird.

Ob die geringere P-Verfügbarkeit nach Rohphosphatdüngung im Vergleich zu einer Thomas- oder Superphosphatdüngung auf dem nicht im Boden umgesetzten Apatitanteil beruht, bleibt vorerst noch nicht ganz geklärt. Aufgrund der chemischen P-Fraktionierung wird zwar immer behauptet, daß ein Anstieg der Ca-Phosphate nach Rohphosphatdüngung auf dem nicht umgesetzten apatitischen Phosphat beruht (Wildhagen et al., 1983). Es ist aber fraglich, ob dieses tatsächlich zutrifft. Eigene Befunde über die Schwermineralzusammensetzung eines mit Hyper- und Thomasphosphat gedüngten Bodens (Dissen) zeigen, daß nach Hyperphosphatdüngung kein Apatit vorlag, denn sonst hätte, so wie es im Modellversuch beobachtet wurde, ein Indiz für ein Apatitvorkommen bei der Röntgen-Beugungsanalyse sichtbar sein müssen (vergl. Abb. 29 bis 31) oder eine Veränderung im Gehalt an Schwermineralen nach Hyperphosphatdüngung zu bestimmen gewesen sein (s. Tab. 23). Auffällig ist aber, daß der P-Gehalt in der Schwermineralfraktion von der P-Düngung

und der P-Form bei dem Boden "Dissen" beeinflusst wurde (s. Tab. 23). In der Hyperphosphatvariante war beim Boden "Dissen" die P-Menge der Schwermineralfraktion größer als bei Thomasphosphat, gefolgt von der Variante ohne Düngung. Dieser Befund und die Beobachtung, daß kein Apatit in der Schwermineralfraktion mit der hier angewandten Röntgenbeugungsanalyse nachgewiesen wurde, könnte ein Indiz für die Umwandlung von Apatit in höher molekulare Ca-Phosphate sein. Diese neu im Boden gebildete Ca-Phosphat-Verbindung dürfte aber für die Pflanze eine geringere P-Verfügbarkeit aufweisen als der Apatit.

Obgleich eine stärkere P-Anreicherung in der Schwermineralfraktion beim Boden "Dissen" in der Hyper- als in der Thomasphosphatvariante analysiert wurde, aber kein apatitisches Phosphat mit der Röntgen-Beugungsanalyse nachgewiesen wurde, stellt sich die Frage nach der Eignung der Schwermineralanalyse für die hier aufgeworfene Problematik. Obwohl die organische Substanz mit H_2O_2 von den Mineralen entfernt wurde, bleibt offen, ob durch die nicht Zerstörung von Fe-Überzügen der Minerale sich nicht auch die Dichte von Apatitkristallen verändert hat, so daß eventuell die Apatite gar nicht exakt durch die Schwermineraltrennung mit Na-Polywolframat erfaßt wurden. Die Fe-Überzüge konnten nicht, wie z.B. in der Tonmineralanalyse üblich, mit Zitrat entfernt werden, da sonst der Apatit aufgelöst worden wäre. Dieses zu untersuchen ist eine interessante Forschungsaufgabe, wobei auch noch andere Analysen zur Bestimmung von Mineralen in der Schwermineralfraktion, wie etwa die Infrarot-Analysen Technik, angewendet werden sollten.

4.3 Abschließende Betrachtung

Für die kommenden Jahre drängt sich, aufgrund der knappen Rohphosphatvorkommen, die ökologisch relevante Frage auf: In welcher Höhe und vor allem in welcher Form sollte die P-Düngung erfolgen? Zur Höhe der P-Düngung sei bemerkt, daß diese bei ausreichender P-Versorgung des Bodens, nach Schachtschabel und Köster (1985) sollte diese bei etwa 45 mg P Kg^{-1} CAL löslichem Phosphat liegen, in Höhe des P-Entzuges der Pflanzen erfolgen kann (Baumgärtel, 1989). Dabei sind die P-Gehalte in den organischen Düngemitteln mit einzubeziehen, und es ist darauf zu achten, daß der pH-Wert des Bodens bei > 6 liegen sollte (Sturm und Isermann, 1978), da sonst das gedüngte Phosphat, sei es wasserlösliches oder weicherdiges Rohphosphat, einer verstärkten binuklearen P-Adsorption unterworfen und für die Pflanzen nur bedingt verfügbar ist (Barekzai und Mengel, 1985; Renno und Steffens, 1985).

Zur P-Form sei gesagt, daß die Ertragswirksamkeit von weicherdigem Rohphosphat in erheblich stärkerem Umfang von Standortfaktoren, wie Bodenfeuchte und einer für das Wurzelwachstum günstigen Gefügestruktur beeinflusst wird als die Wirksamkeit eines vollaufgeschlossenen P-Düngemittels. Sowohl die Bodenfeuchte als auch die Gefügestruktur der Böden werden vor allem durch den Verlauf der Witterung und durch die Bodenart bestimmt. Alle diese drei Standortparameter haben einen beachtlichen Einfluß auf die Wurzelbildung der Pflanzen. Untersuchungen von Meuser et al. (1985) zeigen, daß die maximale Gesamtwurzellänge von Winterweizen von 17,6 bis $40,7 \text{ km/m}^2$ schwanken kann. Diese Varianz hat verständlicherweise, und das haben auch die eigenen Modellversuche über die Wirkung von Standortfaktoren auf das Wurzelwachstum ergeben, einen beachtlichen Einfluß auf die Verfügbarkeit der verschiedenen P-Düngemittelformen, insbesondere aber für weicherdige Rohphosphate. Dieses liegt darin begründet, daß die Rate der P-Freisetzung eines mit Apatit gedüngten Bodens

kleiner ist als z.B. nach Superphosphatanwendung. Folglich muß die Pflanze bei dieser niedrigen P-Freisetzung ein großes und feines Wurzelsystem ausbilden, um genügend Phosphat aus dem Rohphosphat aufzunehmen, oder die Pflanzen müssen, wie etwa die Lupinen oder der Raps, ein sehr effizientes P-Aneignungsvermögen aufweisen. Damit das Rohphosphat die gleiche Ertragswirksamkeit wie ein vollaufgeschlossenes Düngemittel erzielt, sollte die Wurzellängendichte bei Getreidepflanzen mindestens 8 cm Wurzellänge pro cm^{-3} im Oberboden betragen. Zu Zuckerrüben sollte aber in Zukunft, aufgrund der niedrigen Wurzellänge und der nicht Mykorrhizierung der Wurzeln, kein apatitisches Phosphat gedüngt werden. Bei Getreidepflanzen kann die Wurzellängendichte (WLD) mit Hilfe eines Schätzmodells von Meuser et al. (1987) relativ genau errechnet werden. Die Gleichung lautet: $\text{WLD} = -9,287 \log \text{Tiefe} + 0,045 \text{ NFK/dm} + 16,71$, wobei $\log \text{Tiefe}$ der Logarithmus aus der Bodentiefe in cm und NFK/dm die nutzbare Feldkapazität pro dm bedeuten. Falls aber, und dieses wurde in Modellversuchen sehr deutlich aufgezeigt, die wichtigen Standortparameter, Bodenfeuchte und Bodengefüge ungünstig für die P-Diffusivität und die Wurzelbildung sind, so wird die Ertragswirksamkeit von weicherdigem Rohphosphat deutlich schlechter sein als bei vollaufgeschlossenen P-Düngemittelformen.

Aus den in dieser Arbeit vorgestellten Befunden läßt sich die Schlußfolgerung ziehen, daß in West-Europa die P-Düngung auf Ackerstandorten, aufgrund der höheren P-Freisetzungsrates, der besseren P-Verfügbarkeit in der Rhizosphäre, der höher zu veranschlagenden P-Nachlieferung sowie der größeren Ertragsicherheit von aufgeschlossenen P-Düngemittelformen, nur noch bedingt mit weicherdigen Rohphosphaten erfolgen sollte. Nur diese etwas rigorose Düngemittelstrategie wird dazu beitragen, daß die weltweiten P-Vorkommen nicht so schnell erschöpft werden.

Zu den teilaufgeschlossenen P-Formen sei bemerkt, daß der lösliche P-Anteil in diesen Düngemitteln wie eine vollaufgeschlossenen Form wirkt (Hagin, 1985), daß aber das nichtaufgeschlossene Phosphat aufgrund einer anderen Kristallstruktur eine geringere Verfügbarkeit aufweist als weicherdiges Rohphosphat (Ressler und Werner, 1987).

5. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde die Ertragswirksamkeit von weicherdigem Rohphosphat (= Hyperphosphat) im Vergleich zu einer vollaufgeschlossenen P-Form (= Superphosphat) in Abhängigkeit von Standortparametern (Bodengefüge, Bodenfeuchte), bodenchemischen und pflanzenphysiologischen Parametern unter Feld- und Modellbedingungen untersucht. Folgende Befunde wurden erzielt:

Die P-Nachlieferung des durch verschiedene P-Formen im Feld angereicherten Bodenphosphats wurde im Gefäßversuch und mit einer erweiterten EUF-Bodenextraktionstechnik (30 min. 200 V, 20°C, 10 x 5 min., 400 V, 80°C) analysiert. Die Nachlieferung (y) des durch verschiedene P-Formen angereicherten Bodenphosphats konnte bei einem Bestimmtheitsmaß von 97% mit nachstehender Gleichung beschrieben werden:

$$y = 27,83 + 0,36^* \cdot \text{CAL-P} + 0,89^{***}. \quad b$$

Der Faktor b hat die größte Bedeutung für die P-Nachlieferung. Der b-Wert ist die P-Freisetzungsrates der Böden und wurde mit der Elovich-Funktion ($y = a + b \ln t$) aus den P-Freisetzungskurven einer erweiterten EUF-Extraktionstechnik berechnet. Die "b-Werte" der mit vollaufgeschlossenen P-Formen gedüngten Böden waren größer als die der teil- oder nichtaufgeschlossenen P-Düngemittel.

Bei alleiniger Verrechnung der P-Nachlieferung der Rohphosphatvarianten (n = 7) bestand zwischen dem "b-Wert" und der P-Aufnahme der Pflanze eine signifikante Beziehung ($r = 0,92^{**}$). Zwischen dem P-Gehalt der herkömmlichen Extraktionstechniken (DL-, CAL-, P_w -, EUF-Methode) und der P-Nachlieferung der mit apatitischen Phosphat gedüngten Böden konnte keine signifikante Beziehung berechnet werden, da mit diesen Methoden eine Menge und keine Rate der P-Freisetzung bestimmt wurde.

Dieser Befund dokumentiert, daß die P-Verfügbarkeit nach Rohphosphatdüngung durch die Berücksichtigung der P-Freisetzungskinetik besser bestimmt werden kann als mit den statischen Bodenuntersuchungsmethoden.

In der Rhizosphäre von Raps war die Verfügbarkeit von Rohphosphat erhöht. Der Konzentrationsgradient des wasserlöslichen Phosphats war in der Variante mit vollaufgeschlossenem Phosphat größer als bei teil- oder nichtaufgeschlossenem Phosphat.

Weicherdige Rohphosphate können unabhängig vom pH-Wert eines Standortes eine den vollaufgeschlossenen P-Formen vergleichbare Ertragswirksamkeit erzielen, wenn die Pflanzen eine große Wurzellänge in Kombination mit VA-Mykorrhiza aufweisen, da die geringe verfügbare P-Konzentration nach Rohphosphatdüngung durch die Wurzellänge substituiert wird.

Bei Pflanzen mit einer geringen Wurzellänge und die nicht Wirtspflanze für Mykorrhiza sind (Zuckerrübe), sowie auf Standorten, bei denen das Wurzelwachstum infolge eines ungünstigen Bodengefüges gehemmt ist, hat das Hyperphosphat eine geringere Wirkung als die vollaufgeschlossenen P-Formen, da keine Substitution der niedrigen P-Konzentration durch das reduzierte Wurzelwachstum erfolgen kann.

Bei geringer Bodenfeuchte war die Ertragsdepression bei Rohphosphat größer als bei vollaufgeschlossenem Phosphat. Dieser Befund wird damit erklärt, daß vollaufgeschlossene P-Formen einen größeren Diffusionsgradienten (dC/dx) im Boden haben, so daß die vollaufgeschlossenen P-Formen, trotz verminderter Diffusivität eines trockenen Bodens, noch relativ gut verfügbar sind.

Innerhalb von zwei Jahren nahm die Verfügbarkeit von Hyperphosphat im Boden nicht zu. Mit weicherdigem Rohphosphat ist es nicht möglich, mit einer P-Düngung auf Entzug das Niveau an CAL- bzw. wasserlöslichem Phosphat aufrecht zu halten. Das Niveau an CAL- bzw. wasserlöslichem Phosphat konnte bei P-

Düngung auf Entzug mit Superphosphat erst bei einem pH-Wert größer 6 konstant gehalten werden.

Die Befunde von mineralogischen Untersuchungen bei einem langjährigen P-Formen-Feldversuch deuten darauf hin, daß weicherdiges Rohphosphat nicht als Apatit, sondern eventuell in höhermolekulares Ca-Phosphat umgewandelt wird.

6. Literaturverzeichnis

- Achtnich, W. und A.M. Moawad (1986): Effizienz der VA-Mykorrhiza bei Rohphosphat als P-Quelle im Öko-Landbau - eine weltweite Notwendigkeit. Hrsg.: H. Vogtmann, E. Boehncke, J. Fricke, S. 67-80, Verlag C.F. Müller, Karlsruhe
- Aguilar Santelises, A. und A. van Diest (1981): Rock-phosphate mobilization induced by the alkaline pattern of legumes utilizing symbiotically fixed nitrogen. *Plant and Soil* 61, 27-42.
- Amberger, A. (1957): Erfahrungen mit weicherdigen Rohphosphaten auf Ackerland. DLG-Mitteilungen Nr. 4.
- Amberger, A. (1978): Experiences of soft rock phosphates for direct application. In: Seminar on phosphate rock for direct application, 20-23.3.1978, Haifa, Israel. Int. Fertilizer Development Center, P.O. Box 2040, Muscle Shoals, Alabama, USA, p. 349-363.
- Amberger, A. und R. Gutser (1976): Aussagekraft von Bodenuntersuchungsmethoden in langjährigen Feldversuchen mit verschiedenen P-Formen. *Landw. Forsch.* SH 33/I, 18-38.
- Anderson, D.L., W.R. Kussow und R.B. Corey (1985): Phosphate rock dissolution in soil: Indications from plant growth studies. *Soil Sci. Am. J.* 45, 918-925.
- Backhaus, K., B. Erichson, W. Plinke, C. Schuchard-Fischer und R. Weiber (1989): Multivariate Analysenmethoden, eine anwendungsorientierte Einführung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo.
- Barber, S.A. und P.G. Ozanne (1970): Autoradiographic evidence for the differential effect of four plant species in altering the Ca content of the rhizosphere soil. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 34, 635-637.
- Barea, J.M. und C. Azcon-Aguilar (1983): Mycorrhiza and their significance in modulating nitrogen-fixing plants. *Adv. Agron.* 36, 1-54.
- Barekzai, A. und K. Mengel (1985): Alterung von wasserlöslichem Düngerphosphat bei verschiedenen Bodentypen. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 148, 365-378.
- Barracclough, P.B., H. Kuhlmann und A.H. Weir (1989): The effects of prolonged drought and nitrogen fertilizer on root and shoot growth and water uptake by winter wheat. *J. Agronomy & Crop Science* 163, 352-360.

- Baumgärtel, G. (1987): Beurteilung der P-Versorgung von Lößböden in Südniedersachsen durch Düngungsversuche, Boden- und Pflanzenanalyse. Dissertation Hannover.
- Baumgärtel, G. (1989): Phosphat-Düngerbedarf von Getreide und Zuckerrüben im südniedersächsischen Lößgebiet. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 152, 447-452.
- Bekele, T., B.J. Cino, P.A.J. Ehlert, A.A. van der Maas und A. van Diestl (1983): An evaluation of plant-borne factors promoting the solubilization of alkaline rock phosphates. Plant and Soil 75, 361-378.
- Bergmann, W. (1988): Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Entstehung, visuelle und analytische Diagnose. Fischer Verlag, Stuttgart, New York.
- Boenigk, W. (1983): Schwermineralanalyse. Enke-Verlag, Stuttgart.
- Bohne, H. (1988): Neue Aspekte der Bedeutung des Bodengefüges für die Durchwurzelung des Bodens und die Ausnutzung von Wasser und Nährstoffen durch die Wurzel. Kali-Briefe (Büntehof) 19 (5), 325-334.
- Bolland, M.D.A. und R.J. Gilkes (1990a): Cultivation reduces fertilizer residual effectiveness and affects soil testing for available phosphores. Fert. Res. 24, 33-46.
- Bolland, M.D.A. und R.J. Gilkes (1990b): Rock phosphates are not effective fertilizers in Western Australian soils: A review of one hundred years of research. Fert. Res. 22, Vol. 2, 79-96.
- Brüne, H. und J. Jey (1984): P-Düngeempfehlung für die Praxis. Die Wirkung verschiedener Phosphat-Dünger-Formen in mehrjährigen Feldversuchen. DLG-Mitteilungen 2, 80-83.
- Chang, S.C. und M.L. Jackson (1957): Fractionation of soil phosphorus. Soil Sci. 84, 133-144.
- Chien, S.H. (1977): Dissolution rates of phosphate rocks. Soil Sci. Am. J. 41, 656-657.
- Chien, S.H. und C.A. Black (1975): The activity concept of phosphate-rock solubility. Soil Sci. Am. Proc. 39, 856-858.
- Chien, S.H. und W.R. Clayton (1980): Application of Elovich equation to the kinetics of phosphate release and sorption in soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 265-268.
- Chien, S.H., W.R. Clayton und G.H. McClellan (1980): Kinetics of dissolution of phosphate rocks in soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 260-264.

- Clarkson, D.T. und J.B. Hanson (1980): The mineral nutrition of higher plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 31, 239-298.
- Cress, W.A., G.O. Throneberry und D.L. Lindsey (1979): Kinetics of phosphorus absorption by mycorrhizal and nonmycorrhizal tomato roots. *Plant Physiol.* 64, 484-487.
- Diez, Th. und R. Bucher (1980): Zur Düngewirkung verschiedener P-Düngerformen. *Bay. Landw. Jahrb.* 57, 7, 785-793.
- Egner, H. und H. Riehm (1955): Doppellaktatmethode, beschrieben in Thun, R., Hermann, R. und Knickmann, E.: *Methodenbuch, Bd. I: Die Untersuchung von Böden*. 3. Auflage, Neumann Verlag, Radebeul, Berlin.
- Faßbender, H.W., H.C. Lin und B. Ulrich (1966): Löslichkeit und Löslichkeitsprodukt von Hydroxylapatit und Rohphosphaten. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 112, 101-113.
- Finck, A. (1985): Rohphosphatdüngung: Reflexionen zur Bewertung und Anwendung. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 43/II, 637-642.
- Flossmann, R. und D. Richter (1982): Extraktionsmethode zur Charakterisierung der Kinetik der Freisetzung von P aus der festen Phase des Bodens. *Arch. Acker- u. Pflanzenbau und Bodenk.* 26, 703-709.
- Föhse, D. (1985): Die Bedeutung von Wurzeleigenschaften für das Phosphataneignungsvermögen verschiedener Pflanzenarten. *Dissertation Göttingen*.
- Fritsch, F. und W. Werner (1985): Charakterisierung der Mobilität des langjährig mit verschiedenen Phosphatformen angereicherten anorganischen Bodenphosphates. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 43/I, 49-56.
- Fritsch, F. und W. Werner (1987): Bindungsformen und Löslichkeitskriterien der aus langjähriger Düngung mit verschiedenen P-Formen angereicherten Bodenphosphate. *Landwirtsch. Forschung* 40, 153-158.
- Fritsch, W. (1986): Charakterisierung der Mobilität von durch langjährige Düngung mit verschiedenen Phosphatformen angereicherten anorganischen Bodenphosphaten. *Diss. Landw. Fakultät, Universität Bonn*.
- Gerlach, D. (1984): *Botanische Mikrotechnik*. Thieme Verlag, Stuttgart, New York.
- Gerthsen, C., H.O. Kneser und H. Vogel (1974): *Physik. Ein Lehrbuch zum Gebrauch neben Vorlesungen*. 12. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

- Gichuru, M.P. und P.A. Sanchez (1988): Phosphate rock fertilization in tilled and no-till low-input systems in the humid tropics. *Agron. J.* 80, 943-947.
- Gisiger, L. und H. Pulver (1959): Zur Untersuchungsfrage der harten und weicherden Rohphosphate. *Landw. Jahrb. Schweiz* 65, 75.
- Graß, K. (1982): Mit welcher Phosphatform düngen? *Der Hessenbauer*, Nr. 35, S. 191.
- Graß, K. und J. Heyn (1980): Ergebnisse von Feldversuchen mit Phosphatformen und Kalkdüngung. *Landwirtsch. Forschung* 33, 152-165.
- Graw, D., M. Moawad und S. Rehm (1979): Untersuchungen zur Wirts- und Wirkungsspezifität der VA-Mykorrhiza. *Z. Acker- und Pflanzenbau* 148, 85-98.
- Gregg, P.E.H., A.D. Mackay, L.D. Currie und J.K. Syers (1988): Application strategies for sechura phosphate rock use on permanent pasture. *Fert. Res.* 17, 219-234.
- Grinsted, M.J., M.J. Hedley, R.E. White und P.H. Neye (1982): Plant induced changes in the rhizosphere of rape (*Brassica napus* var. Emerald) seedlings. I. pH change and the increase in P concentration in the soil solution. *New Phytol.* 91, 19-29.
- Gutser, R. und A. Amberger (1976): Aussagekraft einiger Bodenuntersuchungsmethoden für Phosphat in ein- und mehrjährigen Gefäßversuchen. *Landw. Forsch. SH* 33/I, 39-51.
- Hagin, J. (1985): Teilaufgeschlossenes Rohphosphat, eine Übersicht. Wasser- und Bodenforschungsinstitut, Landwirtschaftliche Fakultät. Technion-Israel-Institute of Technology, Haifa.
- Hale, M.G. und L.D. Moore (1979): Factors affecting root exudation II: 1970-1978. *Adv. Agron.* 31, 93-124.
- Harrach, T. (1978): Die Durchwurzelbarkeit von Böden als wichtiges Kriterium des Ertragspotentials. *Kali-Briefe (Büntehof)* 14 (2), 115-122.
- Hauter, R. und D. Steffens (1985): Einfluß einer mineralischen und symbiontischen Stickstoffernährung auf Protonenabgabe der Wurzeln, Phosphat-Aufnahme und Wurzelentwicklung von Rotklee. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 148, 633-646.
- Hauter, R. und K. Mengel (1988): Measurement of pH at the root surface of red clover (*Trifolium pratense*) grown in soils differing in proton buffer capacity. *Biol. Fertil. Soils* 5, 295-298.

- Hayman, D.S. (1980): Mycorrhiza and crop production. *Nature* 287, 487-488.
- Haynes, R.Y. (1990): Active ion uptake and maintenance of cation-anion balance: A critical examination of their role in regulating rhizosphere pH. *Plant and Soil* 126, 247-264.
- Hendriks, L., N. Claassen und A. Jungk (1981): Phosphatverarmung des wurzelnahen Bodens und Phosphataufnahme von Mais und Raps. *Z. Pflanzenernähr. und Bodenk.* 144, 486-499.
- Hoffland, E., G.R. Findenegg und J.A. Nelemans (1989): Solubilization of rock phosphate by rape. II. Local root exudation of organic acids as a response to P-starvation. *Plant and Soil* 113, 161-165.
- Hoffmann, H. (1975): Auf Tiefpflugflächen ist Phosphat nicht gleich Phosphat. SD "Landwirtschaftsblatt Weser-Ems", Nr. 40, 3.10.
- Hofmann, E. und A. Amberger (1953): Über einen fünfjährigen Gefäßversuch mit weicherdigen Rohphosphaten auf Mineralböden zu Gras. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 62, 210-214.
- Hofmann, E., A. Amberger und D. Mager (1959): Löslichkeit und Wirkung der Phosphorsäure verschiedener Phosphate. *Landw. Forsch.* 12, 270-275.
- Horst, W.J. und C. Waschkies (1987): Phosphatversorgung von Sommerweizen (*Triticum aestivum* L.) in Mischkultur mit Weißer Lupine (*Lupinus albus* L.). *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 150, 1-8.
- Hunter, M.N. und J.K. Kochmann (1985): Serve phosphorus deficiency in sunflower - the cause of foliar symptoms similar to those produced by some fungal pathogens. *Helia* 8, 57-62.
- Judel, G.K., W.G. Gebauer und K. Mengel (1982): Einfluß der Löslichkeit verschiedener Phosphatdüngemittel auf die Phosphataufnahme und den Ertrag von Sommerweizen. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 145, 296-303.
- Jungk, A. und N. Claassen (1986): Availability of phosphate and potassium as the result of interaction between root and soil in the rhizosphere. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 149, 411-427.
- Jungk, A. und S.A. Barber (1974): Phosphate uptake rate of corn roots as related to the proportion of the roots exposed to phosphate. *Agron. J.* 66, 554-557.

- Kanabo, I.A.K. und J.R. Gilkes (1988): The effect of moisture regime and incubation period on the dissolution of North Carolina phosphate rock in soil. *Aust. J. Soil Res.* 26, 153-163.
- Kanabo, I.A.K. und R.J. Gilkes (1987): The role of soil pH in the dissolution of phosphate rock fertilizers. *Fert. Res.* 12, 165-174.
- Keita, S. (1986): Der Einfluß der Bodenstruktur auf die Wurzelmorphologie und die Phosphataufnahme von Sommerweizen. Dissertation, Fachbereich 19, Universität Gießen.
- Keita, S. und D. Steffens (1989): Einfluß des Bodengefüges auf Wurzelwachstum und Phosphataufnahme von Sommerweizen. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 152, 345-351.
- Khawawneh, F.E. und E.C. Doll (1978): The use of phosphate rock for direct application to soils. *Adv. Agron.* 30, 159-206.
- Kick, H. und R.S. Minhas (1972): Die Verfügbarkeit der durch Düngung im Boden angereicherten Phosphate. *Landw. Forsch. SH* 27/I, 184-191.
- Kothari, S.K., H. Marschner und E. George (1990): Effect of VA mycorrhizal fungi and rhizosphere microorganisms on root and shoot morphology, growth and water relations in maize. *New Phytol.* 116, 303-311.
- Köhn, M. (1929): Korngrößenbestimmung vermittels Pipettanalyse. *Tonindustrie-Zeitung* 55, 729-731.
- Köster, W. und P. Schachtschabel (1983): Beziehung zwischen dem durch Phosphatdüngung erzielbaren Mehrertrag und dem Phosphatgehalt im Boden. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 146, 539-542.
- Köttgen, P. (1935): Über Umsetzungsversuche mit Düngerphosphaten. *Die Phosphorsäure* 5, 551-557.
- Köttgen, P. (1939): Untersuchungen über die Zersetzlichkeit von Phosphaten nach der Methode der E.U.-Filtration. *Die Phosphorsäure* 8, 113-125.
- Kucey, R.M.N. und J.B. Bole (1984): Availability of phosphorus from 17 rock phosphates in moderately and weakly acidic soils determined by ^{32}P dilution, A-value and total P-uptake methods. *Soil Sci.* 138, 180-188.
- Kuchenbuch, R. und A. Jungk (1982): A method for determining concentration profiles at the soil-root interface by thin slicing rhizospheric soil. *Plant and Soil* 68, 391-395.

- Kurmies, B. (1972): Zur Fraktionierung der Bodenphosphate. Die Phosphorsäure 29, 118-151.
- Kutschera, L. (1960): Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen. DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt/Main.
- Leidenforst, E. (1973): Eine Verbesserung der kolorimetrischen Humusbestimmung in Boden nach Westerhoff für große Bodeneinwaagen. Landw. Forsch. SH 28/1, 156-160.
- Leopold, H.J. (1990): Beimpfung von Klee mit VA-Mykorrhiza und Rhizobium zur Ertrags- und Qualitätssteigerung. Dissertation, Fachbereich 19, Universität Gießen.
- Mackay, A.D., J.K. Syers, R.W. Tillman und P.E.H. Gregg (1986): A simple model to describe the dissolution of phosphate rock in soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 50, 291-296.
- Mackay, A.D., R.W. Tillman, J.K. Syers und P.E.H. Gregg (1987): Characterizing the dissolution of phosphate rock materials by electroultrafiltration. Fert. Res. 14, 161-171.
- Magistad, O.C., R.F. Reitemeier und L.V. Wilcox (1945): Determination of soluble salts in soils. Soil Sci. 59, 69-75.
- Maloth, S. und R. Prasad (1976): Relative efficiency rock phosphate and superphosphate for cowpwa (*Vigna sinensis* Savi) fodder. Plant and Soil 45, 295-300.
- Marais, J.N. und D. Wiersma (1975): Phosphorus uptake by soybeans as influenced by moisture stress in the fertilized zone. Agron. J. 67, 777-781.
- Marschner, H. (1986): Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. London, New York, Tokyo, Toronto.
- Marschner, H., V. Römheld, W.J. Horst und P. Martin (1986): Root-induced changes in the rhizosphere: Importance for the mineral nutrition of plants. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 149, 441-456.
- McClellan, G.H. (1980): Mineralogy of carbonate fluorapatites. J. Geol. Soc. (London) 137, 657-681.
- Mehlich, A. (1982): Comprehensive methods in soil testing and computer programmed needs of crops for lime and fertilizer. Mimeo 1-82, Agronomic Division, N.C.D.A., November 1982. Presented before Council on Soil Testing and Plant Analysis Seminar, December 1, 1982, Anaheim, California.
- Mengel, D.B. und S.A. Barber (1974a): Rate of nutrition uptake per unit of corn root under field conditions. Agron. J. 66, 399-402.

- Mengel, D.B. und S.A. Barber (1974b): Development and distribution of the corn root system under field conditions. Agron. J. 66, 341-344.
- Mengel, K. (1985): Dynamics and availability of major nutrients in soils. Adv. Soil Science 2, 65-131.
- Mengel, K. (1986): Umsatz im Boden und Ertragswirkung rophosphathaltiger Düngemittel. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 149, 674-690.
- Mengel, K. und B. Wiechens (1979): Die Bedeutung der nicht austauschbaren Kaliumfraktion des Bodens für die Ertragsbildung von Weidelgras. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 142, 836-847.
- Mengel, K. und D. Steffens (1982): Beziehung zwischen Kationen/Anionen-Aufnahme von Rotklee und Protonenabscheidung der Wurzeln. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 145, 229-236.
- Mengel, K. und E.A. Kirkby (1987): Principles of plant nutrition. International Potash Institute, Bern/Schweiz.
- Mengel, K. und S. Schubert (1985): Active extrusion of protons into deionized water by roots of intact maize plants. Plant Physiol. 79, 344-348.
- Mengel, S. (1989). Die unterschiedliche Sensibilität verschiedener Stoffwechselabschnitte in ihrer Reaktion auf Phosphatmangel - untersucht am Beispiel des Spinats (*Spinacia oleracea* L.). Dissertation, Fachbereich Ernährungs- und Haushaltswissenschaften, Universität Gießen.
- Meuser, H., G. Wessolek und M. Renger (1987): Ein Verfahren zur Abschätzung der Wurzellängendichte von Getreide. Mitteiln. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 55/II, 637-642.
- Meuser, H., N. Litz, M. Renger und H. Fleige (1985): Untersuchungen zur Wurzellänge und -oberfläche von Winterweizen auf unterschiedlichen Standorten. Mitteiln. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 43/II, 661-666.
- Mix, P. (1979): Hyperphos; in: Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie. 4. Neubearb. und erw. Auflage, Bd. 18. Verlag Chemie, Weinheim.
- Munk, H. (1985): Ermittlung wirtschaftlich optimaler Phosphatgaben auf Löß- und Geschiebelehm Böden auf Basis der CAL-Methode. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 148, 193-213.
- Murphy, J. und J.P. Riley (1962): A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal. Chim. Acta 27, 31-36.

- Mühling, K.H., D. Steffens und K. Mengel (1988): Determination of phytotoxic soil aluminium by electroultrafiltration. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 151, 267-271.
- Müller, R. (1988): Bedeutung des Wurzelwachstums und der Phosphatmobilität im Boden für die Phosphaternährung von Winterweizen, Wintergerste und Zuckerrüben. Dissertation, Universität Göttingen.
- Nair, K.P.P. und K. Mengel (1984): Importance of phosphate buffer power for phosphate uptake by rye. Soil Sci. Am. J. 48, 92-95.
- Nathan, Y. (1984): The mineralogy and geochemistry of phosphorites; in: Phosphate Minerals, eds. J.O. Nriagoe und P.B. Moore, S. 275-291. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.
- Nemeth, K. (1976): Die effektive und potentielle Nährstoffverfügbarkeit im Boden und ihre Bestimmung mit Elektro-Ultrafiltration (EUF). Habilitationsarbeit, Fachbereich 16, Universität Gießen.
- Nemeth, K. (1979): The availability of nutrients in the soil as determined by electroultrafiltration (EUF). Adv. Agron. 31, 155-188.
- Neye, P.H. (1979): Diffusion of ions and uncharged solutes in soils and soil clays. Adv. Agron. 31, 225-272.
- Neye, P.H. und G.J.D. Kirk (1987): The mechanisms of rock phosphate, solubilization in the rhizosphere. Plant and Soil 100, 126-134.
- Obigbesan, G.O. und K. Mengel (1981): Use of electroultrafiltration (EUF) method for investigating the behaviour of phosphate fertilizer in tropical soils. Fert. Res. 2, 169-176.
- Olsen, R.a. (1975): Rate of dissolution of phosphate from minerals and soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 39, 634-639.
- Paauw, F. van der (1965): Factors controlling the efficiency of rock phosphates for potatoes and rye on humic sandy soils. Plant and Soil 22, 81-98.
- Paauw, F. van der, H.A. Sissingh, J. Ris (1971): An improved method of water extraction for the assessment of soil phosphate supply: $-P_w$ value. Verslag, Landbouwk, Onderzoek 749.
- Patzke, W. und A. Lachotzke (1985): Phosphat- und Kalkversuche 1967-1984; in: Aktuelles aus Acker- und Pflanzenbau, Heft 10, S. 17-26. Schrift der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein, Abt. Pflanzliche Produktion.

- Poletschny, H., H. Kick und H.K. Würtele (1968): Ertragsbildung und P-Entzug bei einem Dauerversuch mit vier Düngerphosphaten. Landw. Forsch. 21, 213-221.
- Prjjanischnikov, D. (1934): Über das Aufschließen der Rohphosphate durch Wurzelausscheidungen von Lupinen. Die Phosphorsäure 4, 1-22.
- Rajan, S.S.S. (1987): Phosphate rock and phosphate rock sulphur granules as phosphate fertilizers and their dissolution in soil. Fert. Res. 11, 43-60.
- Reichard, T. (1969): Ein langjähriger Phosphatformenversuch. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 123, 22-32.
- Renno, J.M. und D. Steffens (1985): Einfluß von Düngungszeitpunkt und Phosphat-Form auf Alterung und Verfügbarkeit von Phosphat. VDLUFA-Schriftenr. 16, 171-178, Kongreßband.
- Ressler, H. und W. Werner (1987): Der Beitrag unterschiedlicher P-Fraktionen an der Düngewirkung teilaufgeschlossener Rohphosphate. VDLUFA-Schriftenr. 23, 203-214, Kongreßband.
- Ressler, H. und W. Werner (1989): Properties of untreated rock residues in partially acidulated phosphate rocks affecting their reactivity. Fert. Res. 20, 135-142.
- Sattelmacher, B., F. Klotz und H. Marschner (1983): Vergleich von zwei nicht destruktiven Methoden zur Bestimmung von Wurzeloberflächen. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 146, 449-459.
- Schachtschabel, P. (1954): Das pflanzenverfügbare Magnesium des Bodens und seine Bestimmung. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 67, 9-23.
- Schachtschabel, P. und W. Köster (1985): Beziehung zwischen dem Phosphatgehalt im Boden und der optimalen Phosphatdüngung in langjährigen Feldversuchen. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 148, 459-464.
- Schaeffler, H. und G. Schmid (1958): Beiträge zur Düngewirkung von Hyperphos. Praktische Blätter für Pflanzenbau und Pflanzenschutz, Heft 1, SD.
- Schaller, G. und W.R. Fischer (1985): pH-Änderungen in der Rhizosphäre von Mais- und Erdnußwurzeln. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 148, 306-320.
- Scharafat, I. (1970): Vorschlag einer verbesserten Methode zur Fraktionierung der Bodenphosphate. Die Phosphatsäure 28, 272-286.

- Scheffer, F. und B. Ulrich (1958): Rohphosphatwirkung in Abhängigkeit von der Humusdynamik. III. Internationaler Kongreß (Rohphosphate) vom 21. - 24.10.1958 in Biarritz, Frankreich.
- Scheffer, F., A. Kloeke und G. Wittkopp (1957): Untersuchungen zur Bestimmung der wirksamen Phosphorsäure in Rohphosphaten unter Verwendung von Ionenaustauschern. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 79, 232-246.
- Scheffer, F., W. Jesser und K. Schwerdt (1957): Über die Wirkung von Hyperphos. Landw. Forsch. 10, 17-22.
- Schenk, N.C. (1982): Methods and principles of mycorrhizal research. St. Paul, Minnesota/USA: The American Phytopathological Society.
- Schiller, H., J. Gusenleitner und V. Janik (1978): Die Pflanzenaufnehmbarkeit von leichtlöslichen Boden- und zusätzlich verabreichten Düngerphosphaten aus Böden der Traun-Enns-Platte. Die Bodenkultur 29, 111-131.
- Schlechte, G. (1976): Nährstoffaufnahme von Pflanzen und Mykorrhiza. I. Elektrotrophe Mykorrhiza. Kali-Briefe (Büntehof), Fachgeb. 2, 6. Folge.
- Schubert, S. und K. Mengel (1989): Important factors in nutrient availability: root morphology and physiology. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 152, 169-174.
- Schüller, H. (1969): Die CAL-Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphors in Böden. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 123, 48-63.
- Schüller, H., T. Reichard und K. Nemeth (1975): Beziehungen zwischen P-Düngung, Ertrag, P-Entzug und Methoden der Bodenuntersuchung. Landw. Forsch. 28, 174.
- Sheldon, R.P. (1982): Phosphat - der unentbehrliche Rohstoff. Spektrum der Wissenschaft 8, 16-23.
- Silverbush, M. und S.A. Barber (1983): Sensitivity of simulated phosphorus uptake to parameters used by mechanistic-mathematical model. Plant and Soil 74, 93-100.
- Smith, A.N., A.M. Posner und J.P. Quirk (1977): A model describing the kinetics of dissolution of hydroxyapatite. J. Colloid Interface Sci. 62, 475-494.
- Sparks, D.L. (1987): Potassium dynamics in soils. Adv. Soil Sci. 6, 1-63.
- Steffens, D. (1984): Wurzelstudien und Phosphat-Aufnahme von Weidelgras und Rotklee unter Feldbedingungen. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 147, 85-97.

Steffens, D. (1987): Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen Phosphatdüngerformen auf die Phosphatverfügbarkeit in der Rhizosphäre von Raps. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 150, 75-80.

Steffens, D. und K. Mengel (1984): Einfluß von Düngungsmaßnahmen; in: "Bodenfruchtbarkeit in Gefahr". Arbeiten der DLG, Bd. 179, S. 63-67. DLG-Verlag, Frankfurt/Main.

Steffens, D. und K. Mengel (1985): Umsatzrate und Verfügbarkeit verschiedener Phosphatformen aus langjährigen Feldversuchen. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 43/I, 71-78.

Sturm, H. und K. Isermann (1978): Überlegungen zur langfristigen Ausnutzung von Mineraldünger - Phosphat auf Ackerböden. Landw. Forsch. SH 35, 180-192.

Tennant, D. (1975): Test of a modified line intersect method of estimating root length. J. Ecology 63B, 995-1001.

Uhlenbecker, K. (1989): Die Kinetik der Freisetzung von Zwischenschicht-Kalium landwirtschaftlicher Böden, ermittelt mit Modelluntersuchungen, Elektro-Ultrafiltration (EUF) und einem Gefäßversuch mit *Lolium perenne*. Dissertation, Fachbereich 19, Universität Gießen.

Ulrich, B. (1961): Die Wechselbeziehung von Boden und Pflanze in physikalisch-chemischer Betrachtung. Enke-Verlag, Stuttgart.

Ulrich, B. (1963): Möglichkeiten und Grenzen einer Phosphat-Vorratsdüngung. Landw. Forsch. SH 17, 126-131.

Uren, N.C. und H.M. Reisenauer (1988): The role of root exudates in nutrient acquisition. Adv. Plant Nutrition 3, 79-114.

Vetter, H. und K. Fruchtenicht (1970): Ergebnisse von Feldversuchen mit Hyperphos im Vergleich zu aufgeschlossenen Phosphatdüngern. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 127, 218-233.

Wachtel, H., W. Vital und K. Ehrendorfer (1985): Die Düngewirkung von Hyperphosphat unter besonderer Berücksichtigung des Boden-pH-Wertes - Auswertung von Publikationen über Feldversuche mit Phosphatformen. Die Bodenkultur 36, 193-202.

Welp, G. U. Herms und G. Brümmer (1983): Einfluß von Bodenreaktion, Redoxbedingungen und organischer Substanz auf die Phosphatgehalte der Bodenlösung. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 146, 38-52.

- Weritz, J. (1987): Einfluß von Phosphatdüngern auf die VA-Mykorrhiza hinsichtlich ihrer Infektion und Wirkung auf das Wachstum von *Trifolium pratense*. Diplomarbeit, Institut für Pflanzenernährung, Universität Gießen.
- Werner, W. (1969): Kennzeichnung des pflanzenverfügbaren Phosphats nach mehrjähriger Düngung mit verschiedenen Phosphaten. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 122, 19-32.
- Werner, W. und F. Fritsch (1989): pH-Wert, Phosphat- und Calcium-Versorgung als Einflußparameter der Rohphosphatumsatzung im Boden. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 59/I, 495-500.
- Werner, W. und H.W. Scherer (1985): Einfluß der Rohphosphatqualität auf die Wirksamkeit des Düngemitteltyps "weicherdiges Rohphosphat". Landw. Forsch. 38, 340-349.
- Werner, W. und W. Wiechmann (1970): Verteilung des anorganischen Bodenphosphats nach Düngung mit verschiedenen Phosphatdüngern. Kali-Briefe (Hannover), 1. Folge, Fachgebiet 8.
- Wessolek, G. und S. Gäth (1990): Estimation of root density in modelling nutrient requirements. 22nd Colloq. of the International Potash Institute, Soligorsk, 18.- 23.6.1990, Bern/Schweiz. S. 181-206.
- Westing, A. und H. Söchtig (1985): Bestimmung der Wurzeldichte in Böden unterschiedlicher Profiltiefe unter Weizen, Gerste und Zuckerrüben. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 43/II, 697-701.
- Wildhagen, H., P. Styperek und B. Meyer (1983): P-Bilanzen und P-Fraktionierung an Böden aus vieljährigen Phosphat-Düngungsversuchen auf Löß-Parabraunerden. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 38, 423-428.

7. ANHANG

Tabelle 1A: Einfluß verschiedener im Feld gedüngter P-
Formen auf die im Gefäßversuch ermittelte
Nachwirkung. Boden: "Dissen".

	P ₀	P _{Hy} g TS Gefäß ⁻¹	P _{Th}
1984 Weidelgras			
1. Ernte	27,0	26,9	27,5
2. Ernte	19,5	19,7	20,1
3. Ernte	17,6	18,4	18,4
4. Ernte	25,1	25,7	26,3
5. Ernte	12,1	11,9	12,5
6. Ernte	10,7	10,6	11,3
1985 Raps	17,5 ^a	26,9 ^b	30,9 ^c
Mais	37,7 ^a	84,7 ^b	106,2 ^c
1986 So-Weizen*	34,2 ^a	60,3 ^b	60,8 ^b
1987 So-Roggen*	14,9 ^a	28,5 ^b	51,8 ^c

* = Kornertrag

Nicht identische Buchstaben kennzeichnen signifikanten
Unterschied (P < 5%)

Tabelle 2A: Einfluß verschiedener im Feld gedüngter P-Formen auf die im Gefäßversuch ermittelte Nachwirkung. Boden: "Burguffeln".

	P ₀	P _{Hy}	P _{No}	P _{Th}
1984 Weidelgras		g TS Gefäß ⁻¹		
1. Ernte	25,4	25,3	26,7	26,5
2. Ernte	18,8	19,7	19,4	20,1
3. Ernte	17,5	17,7	18,6	17,8
4. Ernte	25,0	24,3	25,1	25,1
5. Ernte	10,2	11,5	10,9	11,2
6. Ernte	9,5	10,4	9,8	10,1
1985 Raps	17,6 ^a	25,6 ^b	27,8 ^c	29,2 ^d
Mais	23,3 ^a	57,9 ^b	62,0 ^b	72,2 ^c
1986 So-Weizen*	24,5 ^a	51,3 ^b	50,0 ^b	55,1 ^c
1987 So-Roggen*	22,3 ^a	22,1 ^a	24,1 ^a	26,0 ^b

* = Kornertrag

Nicht identische Buchstaben kennzeichnen signifikanten Unterschied (P < 5%)

Tabelle 3A: Einfluß verschiedener im Feld gedüngter P-
Formen auf die im Gefäßversuch ermittelte
Nachwirkung. Boden: Immenhausen "ohne Kalk".

	P ₀	P _{Hy}	P _{No}	P _{Th}
1984 Raps	42,8 ^a	48,1 ^b	50,5 ^c	52,6 ^d
Raps	16,4 ^a	19,1 ^b	19,5 ^b	18,6 ^b
Weidelgras	9,6 ^a	12,1 ^a	12,3 ^a	13,2 ^b
1985 Raps	22,7 ^a	30,5 ^b	29,8 ^b	31,1 ^c
Mais	20,4 ^a	80,6 ^b	75,5 ^b	92,7 ^c
1986 So-Weizen*	37,8 ^a	53,5 ^b	50,1 ^b	55,4 ^c
1987 So-Roggen*	32,9 ^a	38,6 ^b	41,0 ^c	45,6 ^d

* = Kornertrag

Nicht identische Buchstaben kennzeichnen signifikanten
Unterschied (P < 5%)

Tabelle 4A: Einfluß verschiedener im Feld gedüngter P-
Formen auf die im Gefäßversuch ermittelte
Nachwirkung. Boden: "Immenhausen mit Kalk".

	P ₀	P _{Hy}	P _{No}	P _{Su}
	g TS Gefäß ⁻¹			
1984 Raps	46,1 ^a	47,8 ^a	49,7 ^b	54,4 ^c
Raps	19,2 ^a	18,2 ^a	19,4 ^a	19,1 ^a
Weidelgras	12,5 ^a	12,8 ^a	13,4 ^a	13,2 ^a
1985 Raps	20,0 ^a	23,4 ^b	26,2 ^c	30,8 ^d
Mais	61,1 ^a	66,6 ^a	88,7 ^b	105,8 ^c
1986 So-Weizen*	59,9 ^a	59,9 ^a	63,2 ^b	60,1 ^b
1987 So-Roggen*	33,7 ^a	43,3 ^b	45,8 ^c	48,9 ^d

* = Kornertrag

Nicht identische Buchstaben kennzeichnen signifikanten
Unterschied ($P \leq 5\%$)

Danksagung

Meinem akademischen Lehrer, Herrn Professor Dr. K. Mengel, sei an dieser Stelle für die wissenschaftliche Förderung und die Unterstützung bei der Anfertigung der vorliegenden Arbeit ganz herzlich gedankt.

Bedanken möchte ich mich auch bei Frau R. Knauf, Herrn R. Pfanschilling und Frau E. Kienholz für ihre Hilfe im Labor.

Dank gebührt Herrn H. Alffen und Herrn L. Wilming für die Hilfe und Mühen bei den Gefäß- und Feldversuchen, sowie Herrn Lindenstruth und Herrn Ittner für die Versuchsflächen.

Bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. Jörn Lauterjung, Institut für Geowissenschaften und Lithosphärenforschung, für die Messung und Auswertung der Schwermineralanalyse.

Herrn Dr. B. Pauler sei für die Ratschläge bei der statistischen Auswertung gedankt.

Ferner möchte ich mich bei Frau E.M. Peter für das Tippen des Manuskripts, bei Frau Hutzfeld für das Zeichnen sowie bei Frau Dr. Ch. Natt und bei Frau B. Schneider für das Korrekturlesen bedanken.

Nicht zuletzt gilt mein Dank meiner Ehefrau und meinen Kindern für Geduld, Nerven und besonders für die Hilfe beim Feldversuch in Ginsheim.