

**Wann ist eine Grunddüngung mit Phosphor, Kalium und
Magnesium wirtschaftlich vertretbar?**

W. Köster und R. Nieder

Zehn Aspekte für die Düngung

- 1) Die derzeitige Düngepraxis beruht auf dem Gesetz vom Minimum (Liebig'sche Tonne) und ist einseitig auf Behebung etwaiger Mangelsituationen ausgerichtet. Daneben gibt es das Gesetz des Maximums. Dies besagt, ein Überangebot eines Nährstoffes aus Boden oder Düngung verändert die Verfügbarkeit der übrigen Nährstoffe und führt zu Luxuskonsum mit Auswirkungen auf Pflanzengesundheit und Ertrag (Seite 20).
- 2) Ziel der Düngung ist es, die Wirtschaftlichkeit der Produktion durch Optimierung der Mineralstoffernährung nachhaltig zu sichern.

Unter diesen Gesichtspunkten werden in der vorliegenden Arbeit Richtlinien für die Düngung von Phosphor, Kalium und Magnesium auf Grund von Bodenuntersuchungsergebnissen abgeleitet, die sich deutlich von Empfehlungen der Officialberatung und Düngerindustrie unterscheiden (Seite 10, 12 und 13).

- 3) Seit den 1950er Jahren sind die Auswertungsrichtlinien der Bodenuntersuchung in der Kritik, zu recht, wie die vorliegenden Versuchsergebnisse zeigen. Die Officialberatung hat die hierauf zu beruhenden Richtlinien nicht angepasst (Abbildungen A, B und C, Seite 29 - 31).

Spätestens seit Ende der 1950er Jahre hätte bei Phosphor und Kalium eine Ergänzung der Abfuhr durch das Erntegut für eine volle Versorgung ausgereicht. Die Kosten, der seit dieser Zeit im Überschuss zugeführten Mengen, sind nicht durch Mehrerträge gedeckt. Die von 1960 bis 2004 überhöhten Aufwendungen belaufen sich auf über 100 Mrd. € (Seite 22)

Hierin sind die durch Überdüngung entstandenen Auswirkungen auf Ertrags- und Qualitätsminderungen sowie Kosten für die Beseitigung der Umweltschäden nicht einbezogen.

- 4) Die im Boden angereicherten Überschüsse sind zum großen Teil langfristig pflanzenverfügbar und können ohne Verringerung des Betriebserfolges abgebaut werden. Für den gezielten Abbau der Überschüsse muss mit einem Zeitraum von vielen Fruchtfolgen gerechnet werden.
- 5) Bei Phosphor ergibt eine Auswertung vorliegender Versuchsergebnisse für Klasse C 3-5 mg P (7-12 mg P_2O_5) $100g^{-1}$.Boden nach CAL. Bei diesen Gehalten ist zurzeit bei Zuckerrüben eine Wirtschaftlichkeit bei A-Rüben gegeben. Bei Getreide und Raps liegt sie bei 3 mg P (7 mg P_2O_5) 100^{-1} g (Seite 14).
- 6) Bei Kalium werden für Sandböden (Tongehalt unter 5%) bei Klasse C 4-6 mg K (5-7 mg K_2O) und für mittlere Böden (Löss) 6-10 mg K (7-12 mg K_2O) $100 g^{-1}$ empfohlen (Seite 17).
- 7) Bei Magnesium werden für alle Böden 2,6 – 5,0 mg Mg $100 g^{-1}$ empfohlen. (Seite 18)
- 8) In den Gehaltsklassen A und B sollte die Düngung über der Abfuhr durch Erntegut liegen. Gehalte der Klassen D und E sollten in Hinblick auf Boden- und Pflanzengesundheit durch Unterlassen der Düngung bis zu Gehalten der Klasse C abgebaut werden.
- 9) Die unter den Punkten 6 - 8 ausgewiesenen Bereiche für die Klassen C liegen deutlich unter den Empfehlungen der Officialberatung. Die Unterschiede zwischen den Ländern sind z.T. erheblich. Sie lassen sich nicht durch Versuche erklären. (Abbildungen A, B und C).
- 10) In Zukunft werden ökologische Gesichtspunkte bei der Düngung mehr als bisher beachtet werden müssen. Die Hauptbelastungen der Gewässer durch die Landwirtschaft mit Phosphor und Kalium erfolgen durch Erosion infolge von Oberflächenabfluss. Einträge ins Grundwasser sind bei Phosphor in Moorböden sowie auf Standorten mit hohen Grundwasserständen und tieferen pH-Werten zu erwarten. Für Kalium besteht die Gefahr von Einträgen bei tiefgründigen Sandböden (Seite 19)

I n h a l t s v e r z e i c h n i s	Seite:
<i>Zehn Aspekte für die Düngung</i>	3
1. Einleitung	5
2. Nährstoffbilanzen	6
1. Berechnung	6
2. Ergebnisse	7
3. Verbleib der Überschüsse	9
3. Ableiten von Düngerichtlinien	10
1. Entwicklung von 1950 bis 2000	10
2. Kostendeckung der Düngung	13
3. Durch Düngung erzielbare Mehrerträge	14
a. Phosphor	14
b. Kalium	17
c. Magnesium	18
4. Umweltrelevanz der Überschüsse	18
1. Phosphor	18
2. Kalium	19
5. Auswirkung der Überschüsse auf Pflanzen	20
1. Phosphor	20
2. Kalium	21
3. Magnesium	21
6. Schlussfolgerungen	22
7. Auswertung von Bodenuntersuchungsdaten nach Verschiedenen Auswertungssystemen	24
8. Nährstofftabelle zur Berechnung der Abfuhren	26
9. Zusammenfassung	26
10. Literaturverzeichnis	27
11. <i>Übersicht der Einstufung der „C-Klassen“ im internationalen Vergleich</i>	29
Phosphor	29
Kalium	30
Magnesium	31
12. Anschriften der Verfasser	32

1. Einleitung

Die Düngepraxis in der Landwirtschaft Deutschlands wird seit den 1950er Jahren zunehmend wegen zu hoher, für den Betriebserfolg schädlicher Düngeraufwendungen und der dadurch bewirkten Auswirkungen auf die Umwelt kritisiert. Ausgehend von der Kritik hat die Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt der Landwirtschaftskammer Hannover in Hameln für die Alten Bundesländer (ABL) Bilanzen aus Ein- und Austrägen in der Landwirtschaft für den Zeitraum von 1950 bis 1986 erstellt (Köster et al., 1988), später auf die Neuen Bundesländer (NBL) ausgedehnt (Harenz et al., 1992) und bis 2003 weitergeführt. Die Bilanzen für P und K weisen hohe kumulative Überschüsse auf. Der folgende Beitrag soll zur Klärung der Fragen nach dem Verbleib der P- und K-Überschüsse, insbesondere nach der Speicherung und der Verfügbarkeit im Bodenvorrat beitragen. Ferner werden Möglichkeiten der Abreicherung zu hoher Gehalte an verfügbarem P und K erörtert. Schließlich werden die ökonomischen Folgen der Überdüngung abgeschätzt.

2. Nährstoffbilanzen

2.1. Berechnung

Grundlagen für die Berechnung der Bilanzen aus den ABL waren Veröffentlichungen des Statistischen Bundesamtes (Anonym 1; s. Köster et al., 1988). Die erforderlichen Unterlagen für die NBL stellte ein wissenschaftliches Institut zur Verfügung (Anonym 2; Harenz et al., 1992).

Für die Nährstoffabfuhr wurden Erträge und jeweiligen Nährstoffgehalte der vom Betrieb exportierten Marktfrüchte (Getreide, Ölfrüchte, Kartoffeln, Zuckerrüben) zu Grunde gelegt. Bei Grünlandaufwuchs, Feldfutter und Ernterückstände, deren Mineralstoffe im landwirtschaftlichen Kreislauf verbleiben, liegen keine Abfuhr von Nährstoffen vor.

Für die übrigen Nährstoffe (außer Stickstoff) konnten keine Bilanzen erstellt werden, da sie z. T. produktionsbedingte Nebenbestandteile von Einzel- und Mehrnährstoffdüngern sind, bzw. diesen gezielt zugesetzt werden. Für Anteil und Nährstoffgehalte der betreffenden Düngemittel fehlen sichere Unterlagen.

Grundlage für die Berechnung der Nährstoffzufuhr über Kraftfutter war eine leistungsgerechte Fütterung und die Annahme, das Futter für Hühner und Schweine sowie Kraftfutter für Rinder und Pferde aus dem Handel bezogen werden. Die Nährstoffabfuhr über tierische Produkte (Milch, Fleisch, Eider) wurden vom Kraftfutterbedarf abgezogen.

Die übrigen landwirtschaftlichen Früchte, Sonderkulturen und Nutztierhaltungen blieben unberücksichtigt, da sie nur unwesentlich am Gesamtumsatz beteiligt sind. Sie können regional bedeutsam sein.

2.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Berechnung sind in den Tabellen 1 (S.....) für P und Tab. 2 (S....) für K für die ABL (Alten-Bundes-Länder) und die NBL (Neuen-Bundes-Länder) aufgeführt. Sie stellen Mittelwerte dar, die in Abhängigkeit von der Intensität des Ackerbaues und des Viehbesatzes regional aber auch von Betrieb zu Betrieb erheblich streuen können.

Tabelle 1: P-Abfuhr mit Ackerfrüchten, P-Zufuhr mit Mineraldüngern und Kraftfutter, P-Bilanzüberschuss pro Zeiteinheit und kumulativer P-Bilanzüberschuss 1950-2000 in den Alten und Neuen Bundesländern

Zeitraum	Abfuhr	Zufuhr Mineraldünger	Zufuhr Kraftfutter	Bilanzüber- schuss	kumulativer Überschuss
	kg P ha ⁻¹ a ⁻¹				kg P ha ⁻¹
<i>Alte Bundesländer</i>					
1950-54	3	13	3	13	65
1955-59	4	17	4	7	150
1960-64	4	21	5	22	260
1965-69	4	25	6	27	395
1975-79	6	28	8	30	705
1980-84	7	28	9	30	855
1985-89	8	25	9	26	985
1990-94	7	17	9	19	1075
1995-99	10	12	9	11	1130
2000	10	12	9	11	1141
2001	11	10	10	9	1150
2002		10			
2003		10			
<i>Neue Bundesländer*</i>					
1950-54	4	7	3	6	30
1955-59	4	12	4	12	90
1960-64	4	16	4	16	170
1965-69	5	24	5	24	290
1970-74	5	30	6	31	445
1975-79	6	30	7	31	600
1980-84	6	25	8	27	735
1985-88	7	23	7	23	830
1991	11	5	1	-5	
1994	10	5	4	-1	
1995-99	12	7	4	-1	
2000	12	8	4	0	
2001	12	7	3	-2	
2002		5			
2003		5			

*Für die Neuen Bundesländer liegen die Daten von 1989, 1990 und 1992 bis 1993 nicht bzw. unvollständig vor.

Tabelle 2: K-Abfuhrn mit Ackerfrüchten, K-Zufuhren mit Mineraldüngern und Kraftfutter, K-Bilanzüberschuss pro Zeiteinheit und kumulativer K-Bilanzüberschuss 1950-2000 in den Alten und Neuen Bundesländern

Zeitraum	Abfuhrn	Zufuhren		Bilanzüber- schuss	kumulativer Überschuss
		Mineraldünger	Kraftfutter		
		kg K ha ⁻¹ a ⁻¹			kg K ha ⁻¹
<i>Alte Bundesländer</i>					
1950-54	13	41	2	30	150
1955-59	14	53	3	42	360
1960-64	14	61	4	51	615
1965-69	14	66	6	58	905
1970-74	14	71	8	65	1230
1975-79	14	74	8	68	1570
1980-84	15	74	9	68	1910
1985-89	16	63	9	56	2190
1990-94	18	38	9	29	2335
1995-99	19	37	9	27	2470
2000	22	32	9	19	2489
2001	21	29	10	18	2507
2002		28			
2003		27			

*Neue Bundesländer**

1950-54	16	49	3	36	180
1955-59	16	60	3	47	415
1960-64	15	68	4	57	700
1965-69	16	78	5	67	1035
1970-74	16	82	6	72	1395
1975-79	16	76	7	66	1725
1980-84	17	68	8	59	2020
1985-88	20	76	8	64	2275
1991	18	5	2	-11	
1994	16	18	3	5	
1995-99	18	19	4	5	
2000	19	20	4	5	
2001	22	21	4	3	
2002		18			
2003		16			

*Für die Neuen Bundesländer liegen die Daten von 1989, 1990 und 1992 bis 1993 nicht bzw. unvollständig vor.

Die P- und K-Abfuhrn stiegen während des Untersuchungszeitraumes entsprechend der zunehmenden Erträge kontinuierlich an. Dies ist bei Kalium zunächst weniger ausgeprägt, da der Kartoffelanbau mit den höchsten Nährstoffabfuhrn zu Gunsten anderer Früchte eingeschränkt wurde. Die sprunghafte Zunahme speziell der P-Abfuhrn in den NBL nach der Wende (1989) ist bedingt durch Zusammenbruch der Viehhaltung und Ausweitung des Marktfruchtanbaues mit hohen Anteilen an Getreide und Raps.

Die P- und K-Zufuhren über Mineraldünger stiegen in den ABL bis Mitte der 1970er Jahre an, um danach bis 2003 auf den Ausgangswert (1950-54) zurückzugehen. Die P- und K-Zufuhren über Kraftfutter nahmen ebenfalls bis Anfang der 1970er Jahre zu, um seitdem auf etwa gleicher Höhe zu verbleiben. Die P- und K-Überschüsse erreichten in den 1970er Jahren mit dem Vier- bis Fünffachen der Abfuhren die Höchstwerte. Sie liegen zurzeit in Höhe der Abfuhren..

Für die NBL ist die Entwicklung bis zur Wende etwa gleichsinnig verlaufen. Nach der Wende ist die Versorgung mit Mineraldüngern und Kraftfutter zusammengebrochen. Die P- und K-Zufuhren lagen zunächst unter den Abfuhren. Sie stiegen bis zum Ende des Berichtszeitraumes an, so dass die P-Bilanz zurzeit annähernd ausgeglichen ist und die K-Bilanz einen nur geringen Überschuss aufweist.

2.3. Verbleib der Überschüsse

Über die P- und K-Bindung in Böden geben die Ergebnisse der Bodenuntersuchung Auskunft. Die Entwicklung lässt sich jedoch nur bis in die 1970er Jahre verfolgen, da die Änderungen in der Methodik (verschiedene Extraktionsverfahren und unterschiedliche Einteilung der Gehaltsklassen) sowie die seit den 1970er Jahren durchgeführte Krumenvertiefung keinen Vergleich jüngerer mit älteren, vor 1970 ermittelten Daten zulassen. Tabelle 3 (Seite 8) zeigt beispielhaft die durchschnittlichen jährlichen Anreicherungen an DL-löslichem P und K von 1958 bis 1972 für das Einzugsgebiet der Zuckerfabrik Schöppenstedt (südniedersächsisches Lössgebiet) sowie für die Einzugsgebiete des Zuckerrübenverbandes Bremervörde und der Stader Saatzucht (Stader Geest) mit jährlichem Aufkommen von je 3000 Proben (Köster et al. 1988).

Tabelle 3: Mittlere jährliche Zunahme der Gehalte an laktatlöslichem Phosphor und Kalium (DL-Methode) im Einzugsgebiet der Zuckerfabrik Schöppenstedt (südniedersächsisches Lössgebiet) und der Stader Geest (sandige Böden im niedersächsischen Altmoränengebiet) von 1958 bis 1972

Nährstoff	Zuckerfabrik Schöppenstedt		Stader Geest	
	Akkumulation mg 100 g ⁻¹	Bilanz-Überschuss kg ha ⁻¹	Akkumulation mg 100 g ⁻¹	Bilanz-Überschuss kg ha ⁻¹
Phosphor	0,44	24	0,22	29
Kalium	0,40	57	0,00	65

Die P-Gehalte stiegen auf den Lössböden bei durchschnittlichen Überschüssen von ca. 24 kg P ha⁻¹ jährlich um 0,44 mg 100 g⁻¹ und auf Sandböden (Bodenwertzahl <35) der Stader Geest bei Überschüssen von 29 kg P ha⁻¹ um nur 0,22 mg P 100 g⁻¹ Boden. Die Unterschiede beruhen darauf, dass Überschüsse an Düngephosphaten auf Lössböden mit pH-Werten um 6,5 vorwiegend als Ca-Phosphate gebunden und auf Sandböden mit pH-Werten um 5,5 an Al- und Fe-Oxiden sorbiert werden. Da Laktatmethoden bevorzugt Ca-Phosphate erfassen, wird die P-Versorgung von Sandböden unterbewertet.

Kalium wird vornehmlich in Tonmineralen gebunden. Bei den in Mitteleuropa vorherrschenden Illiten wird nur ein Teil an den Mineraloberflächen austauschbar gebunden und von der Bodenuntersuchung erfasst. Der überwiegende Anteil wird in Zwischenschichten der Tonminerale in „nicht austauschbarer“ oder „fixierter“ Form gebunden. Diese Fraktion wird nicht direkt von der Bodenuntersuchung erfasst, bleibt aber grundsätzlich pflanzenverfügbar. Da aber zwischen den o.g. Fraktionen Austauschgleichgewichte bestehen, wird der Vorrat an nicht austauschbarem Kalium über die Bodenuntersuchung indirekt miterfasst. Bei einer Pflugtiefe von rund 25 cm in den 1950er und 1960er Jahren wurden ca. 40 kg K ha⁻¹ benötigt, um 1 mg 100 g⁻¹ Boden anzureichern. Daraus ergibt sich für das Einzugsgebiet der Zuckerfabrik Schöppenstedt, dass ca. 70 % der K-Überschüsse in nicht austauschbarer Form gebunden wurden.

Auf den Sandböden der Stader Geest waren trotz jährlicher Überschüsse von ca. 65 kg K ha⁻¹ keine K-Anreicherungen nachweisbar. Das beruht darauf, dass die Bindung an die organische Bodensubstanz gering und die Bindungskapazität an Tonminerale aufgrund geringer Tongehalte (<5%) begrenzt ist. Bereits in den 1950er Jahren war hier das Anreicherungspotential erschöpft, so dass weitere Überschüsse in den Unterboden verlagert bzw. aus der Wurzelzone ausgewaschen wurden.

3. Ableitung von Düngerichtlinien.

3.1. Entwicklung von 1950 bis 2000

Pflanzen decken ihren Mineralstoffbedarf auch bei hohen Zufuhren von Mineraldüngern zu 80 bis >90% aus Bodenvorräten. Sind diese Vorräte zu niedrig, werden die standortbezogenen Höchstserträge nicht erzielt und Anreicherungen notwendig. Die Höhe der verfügbaren Gehalte lässt sich durch eine Bodenuntersuchungen ermitteln.

Die gängige Beratungspraxis der Officialberatung besagt:

Die Bodengehalte der Klasse A (sehr niedrige Gehalte) und B (niedrige Gehalte) reichen nicht aus, um das Ertragsniveau voll auszuschöpfen. Zur Anhebung der Gehalten werden für Makronährstoffe Düngeempfehlungen in Höhe des 2- bzw. 1,5-fachen der Abfuhr gegeben.

Die Klasse C (optimale Gehalte) sind Voraussetzung zum Erzielen von Höchstserträgen. Zur Erhaltung ist eine Düngung in Höhe der Abfuhr durchs Erntegut.

Die höheren Gehalte der Klassen D (hohe Gehalte) und E (sehr hohe Gehalte) sind nicht ertragswirksam und können ohne Gefährdung des Ertrages durch Reduzierung oder Unterlassen der Düngung abgebaut werden.

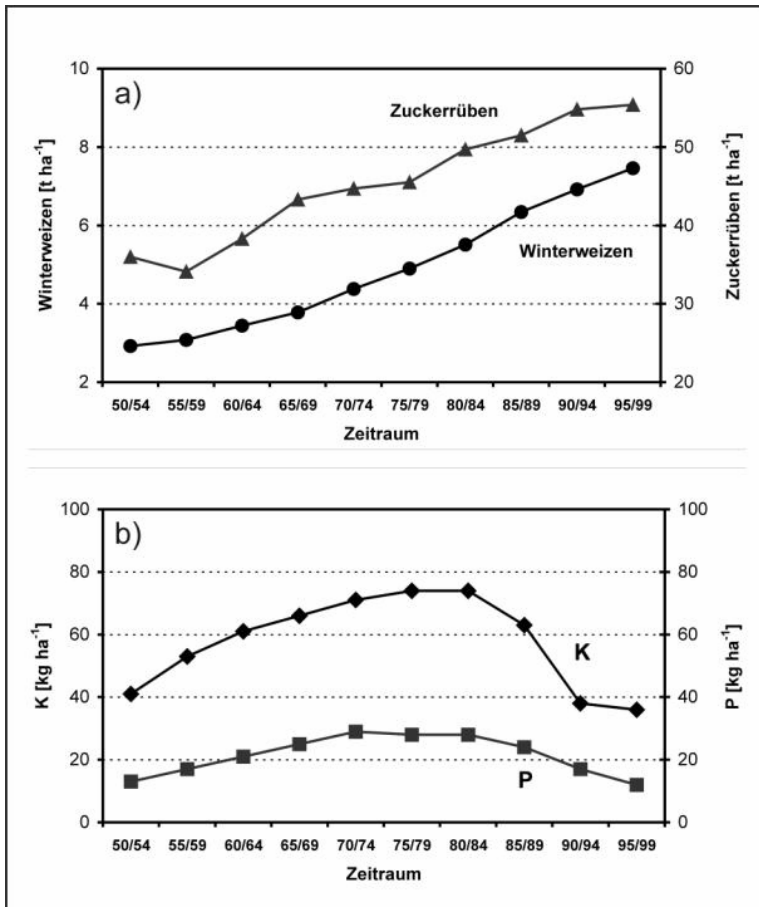
Die bis in die 60er Jahre praktizierte Auswertung von Bodenuntersuchungsergebnissen basiert nicht auf Ergebnissen von Feldversuchen. Bereits in den 1950er Jahren wurde darauf hingewiesen, dass die Versorgungsklassen zu hoch angesetzt wurden, die darauf aufgebauten Düngeempfehlungen

ebenfalls zu hoch sind und Pflanzenerträge bereits in der Klasse B (ehemals II) nicht mehr auf P- und K-Düngung ansprechen (Köhnlein, 1957). Eine Kommission aus Wissenschaft und Beratung hat Anfang der 1960er Jahre nach Auswertung vorliegender Feldversuche verbindliche Vorschläge erarbeitet (Tabellen A und B). Diese lagen zwar deutlich unter den bis dahin üblichen Werten, waren aber mehr auf Ausschöpfung der letzten Ertragsreserven als auf Wirtschaftlichkeit ausgerichtet (Schachtschabel, 1963). Bei Annahme dieser Grenzwerte, hätte für die P- und K-Düngung spätestens seit 1960 eine Ergänzung in Höhe der Abfuhrn ausgereicht. Diese Empfehlungen wurden nicht oder nur zögernd und unvollständig befolgt (siehe Tabellen 1 und 2; Abbildungen A und B). Mitte der 1970er Jahre wurden sie von den meisten westdeutschen LUFAs verworfen und drastische Anhebungen der Klasse C beschlossen. So wurden die Klassen C für P und K für mittlere Böden auf bis zu 25 bis 40 mg P₂O₅ bzw. K₂O angehoben. Dafür sind folgenden Gründe anzuführen.

- a. Bei den seinerzeit günstigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen bestand kein Anlass zur Senkung der Produktionskosten.
- b. Ökologische Bedenken wurden zu dieser Zeit noch nicht diskutiert. Es wurde im Gegenteil empfohlen, unter der günstigen finanziellen Situation so viel wie möglich zu düngen, um Vorräte für zukünftige, schlechtere Zeiten anzulegen. Hinweise auf negative Auswirkungen überhöhter Nährstoffangebote und -aufnahmen (Luxuskonsum) auf Ertrag, Qualität und andere Elemente wurden ignoriert.
- c. Die seit den 1960er Jahren vermehrt zu beobachtenden Ertragssteigerungen wurden mit der Höhe der Düngung in Zusammenhang gebracht. Steigende Düngung und zunehmende Boden-P- und -K-Gehalte galten als Voraussetzungen für Ertragssteigerungen (Fink, 1979, S. 31).

Wie die Abbildungen 1a) und 1b) zeigen, verliefen die Entwicklungen der W-Weizen- und Zuckerrüben-erträge und die Aufwendungen an Phosphor und Kalium bis in die 1970er Jahre gleichsinnig. Sodann setzte bis in die Gegenwart eine gegenläufige Entwicklung ein. Für den betrachteten Zeitraum kann von einem Zusammenhang zwischen der Entwicklung von Erträgen und der Aufwandmengen daher keine Rede sein.

Abbildung 1 Erträge von Zuckerrüben und Winterweizen (a) und Zufuhr von Phosphor und Kalium (b) von 1950 bis 1999 in den Alten Bundesländern



Ertragshebungen verschiedener Organisationen und Auswertungen von Versuchen haben fast übereinstimmend ergeben, dass zwischen Bodengehalten der Klasse B bis E und Erträgen keine Beziehungen bestehen. So werden bereits in Klasse B Erträge erzielt, die in den Klassen C bis E nicht weiter ansteigen. Kartoffeln können auf steigende K-Bodengehalte sogar negativ reagieren (siehe 5.2).

Eine erneute Auswertung älterer und neuerer sowie die Ergebnisse von Feldversuchen auf süd-niedersächsischen Lösstandorten führten zu Grenzwerten, die unter den Vorschlägen von 1963 lagen (Köster und Schachtschabel, 1985; Schachtschabel, 1987; Wehrmann et al., 1988)

Sie decken sich weitgehend mit den Klassen ausländischer Systeme, die ebenfalls aus Versuchen abgeleitet wurden. Die westdeutschen LUFAs haben Mitte der 1990er Jahre ihre Richtlinien z.T. reduziert, jedoch bei weitem nicht in dem Maße, wie es auf Grund vorliegender Versuche möglich und notwendig gewesen wäre (Abbildungen A und B).

Düngerichtlinien und –empfehlungen von Officialberatung und Industrien sind auch heute noch mehr auf die Ausschöpfung der letzten Ertragsreserven als auf Wirtschaftlichkeit ausgerichtet. Das eigentliche Ziel der Düngung ist jedoch, die Wirtschaftlichkeit der Produktion durch Optimierung der Mineralstoffernährung nachhaltig zu sichern.

Folgerichtig muss die Düngung nicht nur die Kosten der Mineraldünger zuzüglich der Nebenkosten wie Ausbringung und Verzinsung decken, sondern darüber hinaus noch einen Mehrertrag erbringen. Wie in der gewerblichen Wirtschaft muss auch bei Düngeempfehlungen von der Wirtschaftlichkeit ausgegangen werden, die sich aus der Differenz zwischen

- den Gesamtkosten der Düngemaßnahme und
- den zu erwartenden Mehrerträgen ergibt.

3.2. Kostendeckung der Düngung

Tabelle 3 zeigt die zur Kostendeckung erforderlichen Mehrerträge von Weizen, Futtergetreide, Raps und Zuckerrüben für Phosphor, Kalium und Magnesium bei Aufwendungen vom 1,5-, 1,0- und 0,5-fachen der Abfahren, entsprechend den Empfehlungen in den Klassen B., C und D nach Bodenuntersuchungsergebnissen. Folgende Preise wurden zu Grunde gelegt:

Früchte zuzüglich Mehrwertsteuer z. Z. der Ernte: Weizen 10 € dt⁻¹; Futtergetreide 9 € dt⁻¹, Raps 20 € dt⁻¹, Zuckerrüben 1,5 € dt⁻¹ (Für Rüben wurde der C-Rübenpreis eingesetzt, da die geringen erzielbaren Mehrerträge kaum eine Änderung der Anbauflächen bewirken und als C-Rüben anfallen werden.).

Düngemittel zuzüglich MwSt: Phosphor 0,40 € kg⁻¹ P₂O₅; Kalium 0,25 € kg⁻¹ K₂O; Magnesium 0,40 € kg⁻¹ Mg O.

Für die Ausbringung wurden 7,5 € ha⁻¹ angesetzt in der Annahme, dass jeweils zwei Nährstoffe ausgebracht werden.

Alle Aufwendungen wurden für ein Jahr mit 5% verzinst .

Tabelle 4: Erforderliche Mehrerträge zur Deckung der Düngekosten in % des Ertrages

Frucht	Ertrag dt/ha	erforderlicher Mehrerträge in % des Ertrages		
		1,5 E	1,0 E	0,5 E
Phosphor				
W-Weizen	90	6,23	4,43	2,62
Futtergetreide	80	7,09	5,07	3,05
Raps	40	7,18	5,09	3,01
Zuckerrüben	600	5,35	3,84	2,33
Kalium				
W-Weizen	90	3,38	2,53	1,67
Futtergetreide	80	3,87	2,92	1,97
Raps	40	3,05	2,34	1,63
Zuckerrüben	600	7,62	5,35	3,08
Magnesium				
W-Weizen	90	2,51	1,95	1,38
Futtergetreide	80	2,90	2,28	1,65
Raps	40	2,61	2,05	1,48
Zuckerrüben	600	4,42	3,22	2,02

Wie aus Tabelle 4 ersichtlich, sind für eine Ersatzdüngung, d.h. Ergänzung der entzogenen Mengen an Phosphor, Kalium und Magnesium in Klasse C für Getreide-Rapsfruchtfolgen annähernd 10% Mehrerträge zur Kostendeckung erforderlich. Soll darüber hinaus noch ein Gewinn erzielt werden, sind noch höhere Mehrerträge notwendig. Nicht berücksichtigt wurde, dass die Düngeempfehlungen der Officialberatungen z. T. höher angesetzt wurden, weil höhere Mineralstoffabfuhr zu Grunde gelegt und Ernterückstände nicht oder nur unvollständig berücksichtigt wurden. Die sich daraus ergebenden, zur Kostendeckung erforderlichen Mehrerträge können bis zu 2% über den Werten in Tabelle 3 liegen.

3.3. Durch Düngung erzielbare Mehrerträge.

Aussagen über erzielbare Mehrerträge lassen sich nur aus Feldversuchen ableiten. Hypothesen führen nicht zum Ziel!

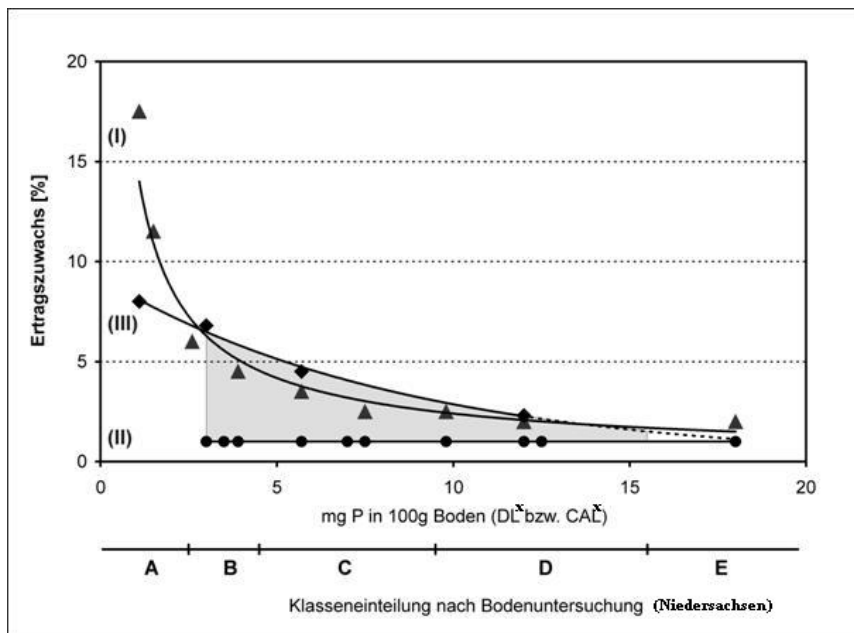
3.3.a. Phosphor

Abbildung 2 zeigt die Beziehungen vom Ertragszuwachs durch P-Versuche in Abhängigkeit von Bodengehalten und Klasseneinteilung nach Richtlinien der Bodenuntersuchung in Niedersachsen. Es handelt sich um Versuche, die von Mitte der 1950er bis Mitte der 1990er Jahre durchgeführt wurden und überwiegend aus den ABL stammen. Die NBL sind lediglich durch Versuche vor dem Mauerbau (1961) vertreten.

Kurve I gibt die Ertragssteigerungen von 380 einjährigen, mehrjährigen und langjährigen Versuchen mit ca. 1.200 Erntejahren wieder, die vor 1980 abgeschlossen und nach der DL-Methode untersucht wurden (Köster und Schachtschabel, 1983, Brüne und Heyn, 1984). Die durchschnittlichen P-Gaben

betragen ca. 45 kg ha^{-1} , was dem Drei- bis Vierfachen der P-Abfuhr entsprach. Die Kurve fällt bis $3,5 \text{ mg DL-löslichem P}$ stark ab und geht unterhalb von 6 mg P in einen fast waagerechten Verlauf über. DL-lösliche P-Gehalte, bei denen sichere und kostendeckende Mehrerträge zu erwarten sind und das volle Ertragsniveau evtl. nicht erreicht wird, sind mit $<3 \text{ mg P}$ anzusetzen.

Abbildung 2: Beziehung zwischen Mehrerträgen (I und II) sowie den zur Düngerkostendeckung erforderlichen Mehrerträgen (III) in Abhängigkeit von den Gehalten an verfügbarem Phosphor in Böden bzw. von Versorgungsklassen nach Bodenuntersuchung (I: Versuche bis 1980; II: Versuche nach 1980; III: erforderliche Mehrerträge für die Kostendeckung)



Kurve II gibt die Ergebnisse von 90 Versuchen mit 570 Ernten und P-Gaben in Höhe der einfachen und doppelten Entzüge wieder, die nach 1980 veröffentlicht und nach der CAL-Methode* untersucht wurden. Die durchschnittlichen Ertragssteigerungen betragen im erfassten Bereich $<1\%$. Ein Bereich mit deutlich höheren Ertragswirkungen wurde nicht ausgewiesen. Nach *VDLUF A Schriftenreihe* 42/1996 (Mokry, 1996; Schaumberg und Heyn, 1996; Spielhaus, 1996; Hege und Offenberger, 1996; Baumgärtel, 1996; von Fischer, 1996) und Wehrmann et al. (1988) liegt ein solcher Bereich bei Gehalten $<3 \text{ mg P } 100 \text{ g}^{-1}$ Boden.

Kurve III zeigt die Mehrerträge für Winterweizen, die nach den Richtlinien der LUF A-Nord (Niedersachsen) zur Kostendeckung nach Tabelle 3 erforderlich sind (Siehe Tabelle 4).

* Die CAL-Methode ist eine modifizierte DL-Methode, die in Zukunft in allen Bundesländern angewendet wird. Sie extrahiert ca. 20% weniger Phosphor als die DL-Methode. Bei Kalium bestehen keine Unterschiede zwischen den Methoden.

Die Differenz zwischen den Kurven II und III zeigt, dass selbst bei Versorgung in Klasse B (leichter Mangel) die zur Kostendeckung erforderlichen Mehrerträge nicht erzielt werden. Im Durchschnitt werden in den derzeitigen Klassen B, C und D 6,2, 4,3 und 2,6% des Ertrages benötigt, um das Defizit zu decken.

Langzeitversuche, die zum Abbau hoher Bodengehalte angelegt wurden, ergaben, dass ein Abreichern in Zuckerrübenfruchtfolgen auf 3,5-4,5 mg CAL-lösliches P 100 g⁻¹ Boden und bei Getreide ohne Ertragseinbußen sogar noch weitgehender möglich ist (*Hege und Offenburger, 1996; Jungk et al., 1993; Römer und Claassen, 1998*). Zuckerrüben sprachen in einem Langzeitversuch der LK Hannover erst im 24. und 27. Jahr auf eine P-Düngung von 26 kg P ha⁻¹ (entspricht etwa den Abfuhrten) an; bei Getreide zeigte sich bis zum 27. Erntejahr keine Wirkung (*Baumgärtel, 2003*). Insgesamt wurden bis zum 24. Jahr ca. 650 kg P ha⁻¹ mit den Ernteprodukten abgefahren und der P-Gehalt von 11 auf 4 mg P 100 g⁻¹ Boden (von Klasse D nach B) abgereichert. Das entspricht bei dem derzeitigen Preisniveau und einer Verzinsung von 5% einem Aufwand von 1.100 € ha⁻¹ gegenüber der ungedüngten Variante.

In diesem Versuch wurden bei Zuckerrüben im 24. und 27. Erntejahr mit 26 und 52 kg P ha⁻¹ (60 und 120 kg P₂O₅ ha⁻¹) im Durchschnitt 8% Mehrerträge erzielt. Dabei ist für die 26-kg-Variante nach Abzug der Düngekosten (Tab. 4) ein Gewinn bei C-Rüben von 4% auszuweisen. Da aber zur Erhaltung des Bodenvorrates auch die Entzüge von zwei Getreideernten (im durchschnitt ca.60 kg P₂O₅ ha⁻¹) einbezogen werden müssen, ist bei Bezahlung nach C-Rüben für die gesamte Fruchtfolge keine Kostendeckung gegeben. Ein Gewinn ist nur zu erwarten, wenn die Mehrerträge auf die A- oder B-Quote entfallen (4,50 bzw. 3,50 € dt⁻¹). Wenn nach Novellierung der Zuckermarktordnung der Rübenpreis entsprechend den derzeitigen Vorschlägen um 37% gesenkt wird, ist auch das nicht mehr gegeben.

Während der Laufzeit des Versuches, in der die Bodengehalte von Klasse D nach B abgebaut wurden, wird zur Erhaltung von Ertragsfähigkeit und Bodenfruchtbarkeit eine Düngung empfohlen, um einem „Auspowern“ des Bodens zu verhindern. Diese Aufwendungen, die im vorliegenden Fall mit 1.100 € ha⁻¹ anzusetzen sind, müssen sich durch nachfolgende Mehrerträge bezahlt machen. Das bedeutet, dass zu den jährlichen Düngekosten Abzahlungsraten hinzukommen. **Auf dem Standort hätte ein Aussetzen der P-Düngung während des gesamten Beobachtungszeitraumes, in welchem die Bodenvorräte von Klasse D nach B abgebaut wurden, den höchsten wirtschaftlichen Gewinn gebracht! Gleiche Schussfolgerungen lassen sich aus drei Langzeitversuchen der LWK auf Sandböden in Nordhannover ziehen** (*Baumgärtel, 2004*).

Diese Versuche geben keinen Hinweis, wie weit Bodengehalte für Getreide abgereichert werden können, bis eine P-Düngung mit wirtschaftlichen Mehrerträgen anspricht. Wahrscheinlich liegen sie im Grenzbereich der Klassen A/B nach den derzeitigen Richtlinien von Niedersachsen.

Aus diesen Versuchen ergibt sich nach der CAL-Methode (unter Berücksichtigung eines methodisch bedingten Sicherheitszuschlages) in Übereinstimmung mit *Köster und Schachtschabel* (1983)

sowie Wehrmann et al. (1988) ein Bereich von **3-5 mg P 100 g⁻¹ Boden (CAL) (7-12 mg P₂O₅) für die Klasse C**, in dem eine Düngung in Höhe der Abfuhr zu empfehlen ist, um einem Absinken in den Mangelbereich vorzubeugen. Bei höheren Gehalten ist ein Abreichern durch Unterlassen der Düngung ohne Gefährdung der Wirtschaftlichkeit möglich.

Vielfach werden die höheren P-Düngeempfehlungen mit Versuchsergebnissen begründet, die noch bei Gehalten >5 mg P 100 g⁻¹, d.h. in Klasse D auf eine P-Düngung ansprechen. Diese Standorte zeigen bei Untersuchung nach der Wassermethode Mangel an. Sie werden durch Laktatmethoden falsch beurteilt. Dies betrifft im Gebiet der LWK Hannover <3% der Sandbödenflächen. Ein Ausrichten nach diesen Versuchsergebnis bedeutet, dass >97 % der Böden eine zu hohe Düngeempfehlung erhalten.

Auf carbonathaltigen Böden (Mergelböden) kann die Extraktion von Phosphor durch Laktatmethoden unvollständig sein. Dies betrifft bei der DL-Methode Standorte mit Gehalten > 0,2% CaCO₃ und bei der CAL-Methode Standorte mit CaCO₃-Gehalten >5%. Diese Standorte weisen immer niedrige, unzureichende Bodengehalte auf. Die Fehlbeurteilungen können nur durch Methodenwechsel behoben werden. Bewährt hat sich auch hier die Wassermethode.

3.3.b. Kalium.

Für Sandböden (Bodenwertzahl <35) liegt der Bereich, in dem durch K-Düngung sichere Mehrerträge zu erwarten sind (Klassen A und B) bei <4 mg K 100 g⁻¹ Boden und bei Lössböden <6 mg K 100 g⁻¹ Boden (Schachtschabel, 1985; Wehrmann et al., 1988; Wulff et al. 1998: *VDLUFA 42/1998:Baumgürtel*, 1998; von Fischer und Apel, 1998; Hege und Offenberger, 1998; Mokry, 1998; Schaumberg und Heyn, 1998). Für die Klasse C werden hier für Sandböden 4-6 und für mittlere Böden (Lössböden) 6-10 mg K 100 g⁻¹ Boden (7-12 mg K₂O) vorgeschlagen. .

Nach den Ergebnissen niedersächsischer Versuchsansteller (Wehrmann et al., 1988; Schachtschabel, 1985) sprechen Zuckerrüben unabhängig von Bodengehalten bei einer K-Düngung entsprechend dem 1,5-fachen der Abfuhr mit wirtschaftlichen Mehrerträgen an. Abbildung 3 zeigt die Wirkung von 200 kg K ha⁻¹ auf den Ertrag von Zuckerrüben aus 65 Versuchen, die in der Zeit von 1961 bis 1983 auf südniedersächsischen Lössstandorten durchgeführt wurden. Im Durchschnitt wurden Mehrerträge von 17,5 dt ha⁻¹ (ca. 3,5%) erzielt. Aus den Versuchen wurde seinerzeit abgeleitet, dass K-Gaben in Höhe der 1,5-fachen Abfuhr unabhängig von Bodengehalten die höchste Wirtschaftlichkeit bringen. Dies ist bei der derzeitigen Preisrelation nur gegeben, wenn die Mehrerträge als A-Rüben (4,60 € dt⁻¹) anfallen. In der Regel fallen sie jedoch als C-Rüben (1,5 € dt⁻¹, Tab.4) an, bei denen eine Kostendeckung nicht gegeben ist. Bei B-Rüben (3,5 € dt⁻¹) ist bestenfalls eine Kostendeckung zu erzielen. Wenn, wie zur Zeit diskutiert wird, im Zuge der Zuckermarktänderung der A-Rübenpreis um 37% (<3 €) gesenkt werden soll, ist eine Kostendeckung der K-Düngung nicht mehr gegeben.

Die oben vorgeschlagenen Bereiche von P und K für die Klasse C liegen unter denen der derzeitigen deutschen Auswertungs- und Düngerichtlinien. Sie entsprechen weitgehend den Klassen B, die als nicht ausreichend definiert wird und durch Düngung über den Abfuhrhoben angehoben werden soll. Es besteht jedoch gute Übereinstimmungen mit vergleichbaren Auswertungssystemen von Dänemark, Großbritannien, den Niederlanden (z.B. Köster, 1993; van Dijk, 1999) sowie den USA (Kinsey, 1986: Tabellen A und B).

3.3.c. Magnesium

Für Magnesium wurden von Schachtschabel für **Klasse C (ehemals II) von Sandböden 2,6 bis 5,0 mg Mg 100 g⁻¹ Boden** vorgeschlagen. Diese Grenzwerte wurden aus Erhebungen über Auftreten vom Magnesiummangelsymptomen an Kartoffeln und nicht aus Versuchen abgeleitet. In der Annahme, dass die Gehalte für tonreiche Böden höher liegen müssen, wurden für Lössböden 3,6 bis 7,0 mg 100⁻¹ vorgeschlagen (Schachtschabel 1956). Letzteres konnte durch Erhebungen an Kartoffeln und Zuckerrüben nicht bestätigt werden.

Magnesiumversuche im Gebiet der LK-Hannover sprachen auf Sand- wie auf Lössböden in den vorgeschlagenen Bereichen für Klasse C nicht auf Mg- Düngung an. Mehrfach bewirkte die Mg-Düngung lediglich eine Behebung der Mangelsymptome. In Versuchen des Institutes für Pflanzenernährung der Universität Hannover zeigte die Mg-Düngung keine Wirkung in Zuckerrübenfruchtfolgen (Wehrmann et al. 1988). In der Literatur wird von Mg-Wirkungen an Hackfrüchten bei Gehalten unter 5 mg berichtet (Scheffer-Schachtschabel 1982).

Abbildung C (Übersicht der Auswertungsrichtlinien... im Anfang der Publikation) zeigt die derzeitigen Auswertungsrichtlinien der Offizialberatungen. Sie liegen ausnahmslos über den vorgeschlagenen Werten. Auffallend sind die z.T. erheblichen Unterschiede zwischen den Ländern, für die es keine sachliche Begründung gibt.

4. Umweltrelevanz der Überschüsse

Im Überschuss applizierter Phosphor wird in Ackerkrumen oder Grünlandnarben zum großen Teil in mittel- und langfristig pflanzenverfügbaren Formen gebunden. Eine P-Verlagerung erfolgt durch die Tätigkeit der Bodenfauna (in partikulärer Form) sowie in gelöster Form durch Sickerwasser. Auf Tonböden, die bei Austrocknung Schrumpfungsrisse bilden, können bei einsetzendem Niederschlag P und K in partikulärer Form mit Krumenmaterial in tiefere Bodenzonen eingespült werden.

4.1. Phosphor

Die P-Verlagerung durch Sickerwasser ist abhängig von der Durchlässigkeit des Bodens sowie der P-Konzentration in der Bodenlösung, die mit zunehmenden Boden-P-Gehalten und abnehmendem pH steigt. In leichten Böden (Sandböden) sind infolge vergleichsweise niedriger pH-Werte und hoher Dränraten P-Verlagerungen stärker ausgeprägt als in mittelschweren (Schluff- und Lehm Böden) und

schweren (Tonböden) Böden. Die P-Verlagerung führt zu entsprechenden P-Anreicherungen im durchwurzelbaren Unterboden (30-90 cm). Diese Vorräte können weiterhin den Pflanzen zur Verfügung stehen. Bei tiefgründigen Standorten und weitem Grundwasser-Flurabstand sind P-Durchbrüche ins Grundwasser weitgehend auszuschließen.

Auf grundwassernahen Standorten (Gleye, Marschen) und Hochmoorböden mit geringem Anteil an anorganischen Sorbenten treten Durchbrüche bis ins Grundwasser auf und führen über Grund- und Dränwässer zu verstärkten Einträgen in Oberflächengewässer (Nieder, 2000). Nach Berechnungen des Umweltbundesamtes (zit. bei Auerswald, 1996) erfolgten 1995 in Deutschland 2 bis 3% der gesamten P-Einträge in Oberflächengewässer (57.500 t P) über Grund- und Dränwässer. Die größte Belastung aus der Landwirtschaft erfolgte jedoch über partikulär gebundenes P durch Oberflächenabfluss, der zur Zeit mit ca. 36% (20.700 t P, entspr. 1,25 kg P ha⁻¹) zur Gewässerbelastung beiträgt (Auerswald, 1996).

Um die P- und K-Anreicherung zu begrenzen, wurden in der bisherigen Düngeverordnung Obergrenzen (Klasse E) festgelegt. Diese stellen keine pflanzenbauliche sondern im Sinne der Verordnung eine ordnungsrechtliche Obergrenze dar. Bei einem Überschreiten kann eine die Abfahren übertreffende Zufuhr mit Wirtschaftsdüngern als Ordnungswidrigkeit geahndet werden.

Nach Novellierung der Düngeverordnung wird ein jährlicher Bilanzüberschuss von 20 kg P₂O₅ ha⁻¹ ohne Berücksichtigung der Bodenvorräte begrenzt. Dadurch wird der tolerierbare P-Überschuss für viehhaltende Betriebe erheblich gesenkt, langfristig werden die Bodengehalte aber weiter ansteigen.

4.2. Kalium

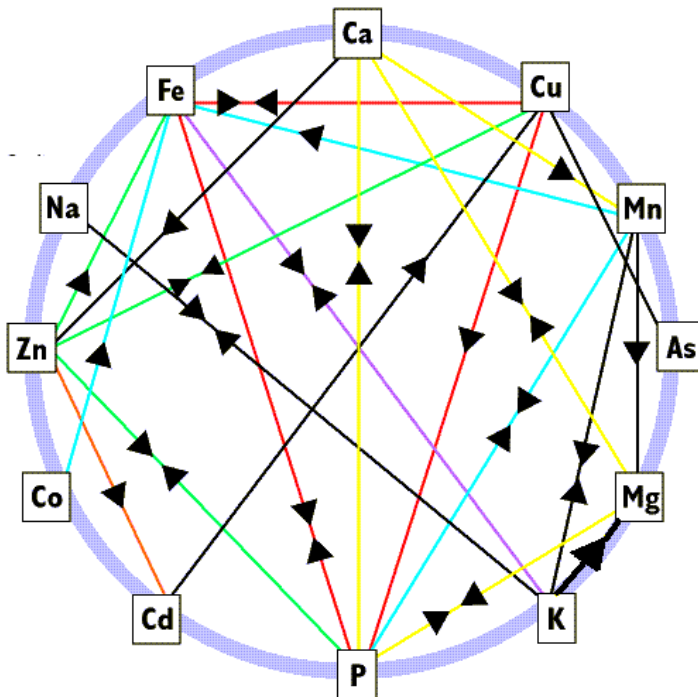
Kalium wird im durchwurzelbaren Bereich mittelschwerer (Schluff, Lehm) und schwerer (Ton) Böden in austauschbarer Form und als nicht austauschbares K gebunden. Beide Fraktionen tragen zur Versorgung der Pflanzen bei. Auf diesen Böden treten nennenswerte Austräge ins Grundwasser in der Regel nicht auf.

Anders zu beurteilen sind tonarme Sandböden, deren Bindungskapazität für Kalium oft schon bei 3-4 mg K 100 g⁻¹ Boden erschöpft ist. Hier wird über die Abfahren hinaus appliziertes K ausgetragen und im Unterboden an Tonminerale gebunden. Wenn hier der Ton ebenfalls K-gesättigt ist, wird Kalium auch ins Grundwasser ausgewaschen. Untersuchungen von Beregnungswässern an 100 Standorten in Ostniedersachsen ergaben in 18% der Fälle Überschreitungen des K-Richtwertes für Trinkwasser von 12 mg K l⁻¹ Wasser.

5. Auswirkungen überhöhter Mineralstoffangebote auf Pflanzen

Auswirkungen zu hoher Angeboten und Aufnahme von Mineralstoffen (Luxuskonsum).

Die Düngeempfehlungen sind bisher allein auf Behebung etwaiger Mineralstoffmängel ausgerichtet, wobei hohe Sicherheitszuschläge empfohlen werden. Nicht berücksichtigt wird, dass überhöhte Mineralstoffangebote und –aufnahmen aus Düngung und Bodenvorräten Ertrags- und Qualitätsminderungen bewirken können. Zwischen den einzelnen Mineralstoffen bestehen Wechselbeziehungen. Mangel oder Überschuss eines Elementes wirken sich auf Verhalten und Aufnahme anderer Elemente aus. Welche Wechselbeziehungen bestehen zeigt, Abbildung 3. Um negative Auswirkungen zu vermeiden, sollten alle Düngemaßnahmen so ausgerichtet werden, dass das Mineralstoffangebot für das ökonomische Optimum nachhaltig gewährleistet ist, jede Überversorgung aber vermieden wird. Dies sollte auch in Hinblick auf Mineralstoffgehalte in Futter- und Nahrungsmitteln mehr beachtet werden.



Author:: Harvey Ashmead, Ph.D., Albion Lab, Clearfield, Utah & Dr. W. Köster
Farbe: Vitaryal

5.1. Phosphor

Phosphor kann bei überhöhtem Angebot Mangel an Calcium und Spurenelementen fördern oder induzieren (Bergmann, 1983, S. 101). Schäden durch überhöhte P-Angebote sind bei Gehalten >33 (CAL)

mg P 100 g⁻¹ Boden (Klasse F) nicht auszuschließen (Baumgärtel und Severin, 1998). Besonders gefährdet sind Sandböden, deren Ca- und Mg-Konzentrationen in der Bodenlösung wegen niedriger pH-Werte und Sorptionskapazität gering sind.

5.2. Kalium

Auswirkungen von Kalium auf Ertrag und Qualität gehen weniger von der aktuellen Düngung als vielmehr vom bodenbürtigen K aus und sind schon bei relativ niedrigen Bodengehalten nachweisbar.

Steigende K-Aufnahme von Pflanzen führt zu verminderter Aufnahme von Magnesium und Calcium. Das häufige Auftreten von Mg-Mangelsymptomen, die sich bei geringer Ausprägung nicht auf den Ertrag auswirken, ist zumeist die Folge zu hohen K-Angebotes. Durch zu hohe K-Aufnahme verminderte Mg-Gehalte im Aufwuchs können auf Weideflächen zu Weidetetanie führen. Qualitätsmängel an Obst und Gemüse, die auf Ca- Mangel beruhen, werden teilweise mit überhöhten K-Angeboten in Verbindung gebracht (Bergmann, 1983, S. 122)

Die Hauptfunktion von Kalium in der Pflanze besteht in der Erhaltung des osmotischen Druckes. Da Pflanzen im Gegensatz zu tierischen Organismen überschüssiges Kalium nicht ausscheiden können, führt überschüssig aufgenommenes Kalium zwangsläufig zu erhöhten Wassergehalten. Damit einher gehen Verringerungen der Konzentrationen anderer, ebenfalls osmotisch wirksamer Substanzen, wie z. B. Zucker.

Untersuchungen von Wirtschaftsfutter für Rindvieh ergaben im Durchschnitt überhöhte, für den Ertrag nicht notwendige K- Gehalte. Um die mit dem Futter aufgenommenen überhöhten K-Mengen auszuschleiden, müssen die Tiere 10 – 15% mehr Wasser aufnehmen, was zu einem um 10 – 15% höheren Gülle- bzw. Jaucheanfall führt.

Widersprüchlich sind die Berichte über K-Ernährung und Anfälligkeit für Schädlinge. Zweifellos sind gut mit K versorgte Pflanzen weniger anfällig als schlecht versorgte. Über das Verhalten bei Überversorgung liegen Beobachtungen aus Praxis und Beratung vor. Ob, wie aus Beobachtungen von Praktikern und Beratern vermutet wird, ein überhöhter K-Gehalt die Anfälligkeit für Schädlinge(z.B. Mehltau) fördert, bedarf noch der Klärung.

In einem Gefäßversuch mit Raps auf unterschiedlich gedüngten Böden, die in ein Rapsfeld exponiert wurden, stiegen die Schäden durch Schneckenfraß mit steigendem K-Gehalt. Gleiche Beobachtungen liegen aus der Praxis vor (unveröffentlichter Versuch der LUFH Hameln).

Zweijährige Ertragshebungen bei Kartoffeln von je 100 Sandstandorten ergaben im Bereich von <5 bis >13 mg K 100g⁻¹ Boden signifikante Abhängigkeiten vom K-Gehalt in Kartoffelknollen: Die K-Gehalte in Knollen stiegen von 2,16 auf 2,69% an. Dabei nahmen die Stärkegehalte um 13%, die Knollenerträge um 7%, die Stärkeerträge um 19% und die Rohrerträge (€ ha⁻¹) um 22% ab (Köster, 1992). **Kalium hat sich hier negativ auf die Biomasseproduktion ausgewirkt!**

5.3. Magnesium

Magnesiummangelsymptome geringer Ausprägung sind häufig Folge überhöhter K-Aufnahme. Wie Feldversuche vielfach zeigten, haben sie keinen Einfluss auf Ertrag und Qualität. Sie weisen jedoch auf ein gestörtes K/Mg-Verhältnis in Boden hin. Überhöhte Mg-Bodengehalte führen zu Verringerung der Ca-Aufnahme. Sie wird in Verbindung mit ebenfalls überhöhter K-Aufnahme zu den oben beschriebenen Qualitätsminderungen bei Obst und Gemüse in Verbindung gebracht. Um dem zu begegnen, sollte durch K-Überschuss induzierter Mg-Mangel nicht durch Mg-Düngung sondern durch Abbau zu hoher K-Bodengehalte behoben werden. Extrem hohe Mg-Bodengehalte durch Anwendung Mg-reicher Sekundärrohstoffe führte durch absoluten Ca-Mangel zu Keimhemmungen und Absterben des Aufwuchses (Köster 1980).

Sehr hohe Mg-Gehalte von Böden mit engem Verhältnis der austauschbaren Fraktionen von Ca. und Mg ($CA/Mg < 3$) neigen zu Verdichtungen und Verschlammungen.

6. Schussfolgerungen

In der Landwirtschaft Deutschlands wurden den Böden seit Mitte des 20. Jahrhunderts deutlich höhere Mengen an Phosphor und Kalium zugeführt als mit den Ernteprodukten abgefahren. Spätestens seit Ende der 1950er Jahre hätte eine Ergänzung der mit dem Erntegut abgefahrenen Anteile für eine volle Versorgung ausgereicht. Insbesondere die nach den 1960er Jahren noch weiter angestiegenen P- und K-Überschüsse wirkten sich nicht nur ökonomisch sondern auch ökologisch schädlich aus. „*Rechnet man eine jährlichen Verzinsung von 5% zusätzlich zu den Kosten für die Mineraldünger mit ein, so summieren sich die Kosten der P-Überschüsse seit 1960 auf rund 45 Mrd. €, welche die Landwirte in Deutschland aufgebracht haben, ohne dass daraus Einkommensvorteile durch Mehrerträge erwachsen sind*“ (Zitat Auerswald, 1996). Berücksichtigt man den K-Überhang mit $\frac{2}{3}$ des monetären Wertes, ergibt die Kalkulation bei einer Hochrechnung bis 2004 überflüssige Aufwendungen für P und K in Höhe von >100 Mrd. €. Hierin sind die durch Überdüngung entstandenen Auswirkungen auf Ertrags- und Qualitätsminderungen sowie Kosten für die Beseitigung der Umweltschäden nicht einbezogen.

Die Überschüsse sind mit Einschränkung für Kalium auf Sandböden und abgesehen von P- und K-Exporten durch Oberflächenabfluss in Krume und Unterboden angereichert worden. Das in Unterböden akkumulierte P und K ist teilweise pflanzenverfügbar.

Die in Krume und Unterboden angereicherten und weiterhin verfügbaren P- und K-Überschüsse stellen totes Kapital dar und sollten aus ökonomischer wie ökologischer Sicht gezielt abgereichert werden. Grundlage hierzu bieten die in der vorliegenden Arbeit aus Feldversuchen abgeleiteten und vorgeschlagenen Grenzwerte zur Bewertung von Bodenuntersuchungsergebnissen, die in Tabelle 5

zusammengestellt wurden (System I, Köster-Nieder). Sie liegen deutlich unter den entsprechenden Werten der Offizialberatungen (Vergl. Abb. A – C).

In viehlos wirtschaften Betrieben ist bei Phosphor in Zuckerrüben- und Getreide-Raps-Fruchtfolgen ein Abreichern bis 5 mg P und 10 mg K für mittlere Böden bzw. 6mg für Sandböden ohne Gefährdung des Ertrages zu empfehlen(Klasse C nach System I) In Klasse C sollte für alle Früchte eine Düngung entsprechend den Abfuhr gegeben werden, um einem Absinken in den Mangelbereich vorzubeugen, selbst wenn bei Getreide und Raps keine kostendeckenden Mehrerträge zu erwarten sind. **Darüber müssen die Betriebsleiter orientiert werden, denn nur sie können entscheiden, ob sie bereit und in der Lage sind, diese „Restrisikoversicherung“ zu tragen.**

Anders zu beurteilen ist die Situation in Veredelungsbetrieben. In Abhängigkeit von Ertragsniveau und Intensität der Viehhaltung sind die P-, K- und Mg-Bilanzen bei einer Viehbesatzdichte <1 bis maximal 1,5 GV ha⁻¹ ausgeglichen . Die derzeit durch die Düngeverordnung gestattete P-Ausbringung mit Wirtschaftsdüngern von 1,75 GV ha⁻¹ wird vor allem bei zusätzlicher Anwendung von Mineraldüngern zwangsläufig zu weiteren P- und K-Anreicherungen führen.

In Niedersachsen wurden Veredelungsbetriebe im Rahmen des Strukturwandels der 1970er und 1980er Jahre vorwiegend auf Sandböden mit oft hoch anstehendem Grundwasser etabliert. Die flächenintensive Tierhaltung wurde insbesondere im Bereich Süddoldenburg konzentriert. Da Sandböden nur eine begrenzte Bindungskapazität für Kalium aufweisen, werden K-Überschüsse zum großen Teil ins Grundwasser ausgewaschen.

Noch weitaus schwerwiegender ist die Situation beim Phosphor. Die Flächen von Veredlungsbetrieben weisen weit überdurchschnittliche P-Gehalte auf. So liegen die mittleren P-Gehalte der Kreise Cloppenburg und Vechta (Zentrum der Veredlungswirtschaft in Süddoldenburg) im Mittel bei 31 mg DL-löslichem P 100 g⁻¹ Boden (Klasse E; *Nieder*, 2000). Hier werden Einschränkungen für das Ausbringen von Wirtschaftsdüngern gemäß Düngeverordnung zwingend vorgeschrieben. Ein hoher Anteil von Betrieben weist bereits Anreicherungen gemäß Klasse F mit P-Gehalten >43 mg (DL) auf. Hier sind Schädigungen von Pflanzen nicht auszuschließen (*Leinweber et al.* 1993). Bei der zurzeit zulässigen P-Aufbringungsmenge werden sich die -Anreicherungen bis in Klasse E fortsetzen und zu P-Anreicherungen im Bereich der Klasse F führen, wenn die gesetzlichen Vorlagen nicht befolgt werden. Damit werden zwangsläufig auch die negativen Auswirkungen auf die Gewässer zunehmen.

In diese Überlegungen muss die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm und anderen Sekundärrohstoffen einbezogen werden. Die in der Klärschlammverordnung zulässige Aufbringungsmenge von 5 t Trockenmasse ha⁻¹ in Abständen von drei Jahren wird mit 1 GV ha⁻¹ bewertet. Wenn in Zukunft Wirtschaftsdünger großflächiger ausgebracht werden müssen, fallen Gebiete mit einem durchschnittlichen Viehbesatz >1 GV ha⁻¹ für die Ausbringung von Klärschlamm und vergleichbarer Sekundärrohstoffe aus. Das sind in Niedersachsen die Gebiete nördlich der Autobahn Hamburg-Bremen und westlich der Weser.

7. Auswertung von Bodenuntersuchungsdaten nach verschiedenen Auswertungssystemen

Die in Krume und Unterboden angereicherten und weiterhin verfügbaren P- und K-Überschüsse stellen totes Kapital dar und sollten aus ökonomischer wie ökologischer Sicht gezielt abgereichert werden. Grundlage hierzu bieten die in der vorliegenden Arbeit aus Feldversuchen abgeleiteten und vorgeschlagenen Grenzwerte zur Bewertung von Bodenuntersuchungsergebnissen, die in Tabelle 5 zusammengestellt wurden (Köster-Nieder, System I).

Tabelle 5 Grenzwerte für Phosphor, Kalium und Magnesium von Bodenuntersuchungsergebnissen in mg/100 g P, K und Mg (bzw. P₂O₅ und K₂O) nach Köster-Nieder (System II)

Nährstoff mg/100g Boden	Boden	Klassen				
		A	B	C	D	E
Phosphor (CAL)						
mg P (P ₂ O ₅)	alle Böden	<1 (<3)	2 (3 - 6)	3 - 5 (7 - 12)	6 - 9 (8 - 12)	>9 (> 20)
Kalium (CAL)						
mg K (K ₂ O)	Sand	< 2 (< 2)	2 - 3 (2 - 4)	4 - 6 (5 - 7) 6 - 10 (7 - 12)	6 - 10 (8 - 12)	> 10 (> 12)
	Löss	< 3 (<4)	3 - 5 (4-6)	12	11 - 15 (13 - 18)	> 15 (>18)
Magnesium (CaCl₂)						
mg Mg	alle Böden		< 2,6	2,6 - 5,0	> 5,0	

Sie liegen deutlich unter den entsprechenden Werten der Untersuchungsstationen (Abbildungen A, B, C – siehe Seiten - und Tabelle 6).

Tabelle 6: Auswertung von 142 Bodenproben von Lössstandorten nach Richtlinien der LUFA Nord-West (System I) und Vorschlägen von Köster-Nieder (System II)

System	Köster-Nieder System I		Lufa Nord-West System II		Ausrichtung der Düngerempfehlungen
Klasse	mg 100 g ⁻¹ Boden	Anteil %	mg 100 g ⁻¹ Boden	Anteil %	
Phosphor (CAL)					
A	sehr niedrig	<1	<2	1	Anheben niedriger Bodengehalte Ergänzung der Ab- fuhr Abbau überhöhter Bodengehalte
B	niedrig	<2	3 – 4	30	
C	anzustreben	3 – 5	5 – 9	55	
D	hoch	6 – 8	10 – 15	8	
E	sehr hoch	<8	>15	6	
Kalium (CAL)					
A	sehr niedrig	<2	<5	4	Anheben niedriger Bodengehalte Ergänzung der Ab- fuhr Abbau überhöhter Bodengehalte
B	niedrig	3 – 5	6 – 10	36	
C	anzustreben	6 – 10	11 – 16	42	
D	hoch	11 – 15	17 - 29	15	
E	sehr hoch	>15	>29	3	
Magnesium (CaCl₂)					
A	sehr niedrig		<3	6	Anheben niedriger Bodengehalte Ergänzung der Ab- fuhr Abbau überhöhter Bodengehalte
B	niedrig	<2,5	<4	7	
C	anzustreben	2,6 - 5,0	5 – 7	32	
D	hoch	>5,0	8 – 12	38	
E	sehr hoch		>12	17	

Ein Vergleich der Auswertungen von Bodenuntersuchungsergebnissen auf Phosphor, Kalium und Magnesium von Lössböden aus Südniedersachsen nach Systemen von Köster-Nieder (System I) und der LUFA Nord-West (System II) zeigt Tabelle 6. Daraus ist ersichtlich, dass die Klassen C für Phosphor und Kalium im System I identisch sind mit Klassen B in System II. Daraus ergibt sich, dass es im System I praktisch keine Böden mit Empfehlungen zur Anreicherung gibt und Standorte mit Empfehlungen zur Abreicherung 54 bzw.60% der untersuchten Proben ausmachen. Bei Magnesium sind die Differenzen etwas geringer.

8. Mineralstofftabelle zur Berechnung der Entzüge

In der vorliegenden Arbeit wurde als Grundlage der Düngeempfehlung für die Klasse C Entzug gewählt. Als Entzug wird hier die Abfuhr der Mineralstoffe durch Erntegut verstanden. Diese lassen sich aus Ertrag und den Mineralstoffgehalten der Tabelle errechnen.

Frucht	Erntemenge	Abfuhr in KG		
		kg P ₂ O ₅	Kg K ₂ O	kg MgO
	dt			
Zuckerrübe	100	10	24	8
Kartoffeln	100	14	60	6
Raps	10	18	10	5
Getreide (Korn)	10	8	6	3
Stroh	10 dt ⁻¹ Korn	2	15	3

9. Zusammenfassung

Die deutsche Landwirtschaft hat seit mindestens fünf Jahrzehnten größere Mengen an Phosphor und Kalium zugeführt, als mit Ernteprodukten abgefahren wurden. Die kumulativen Überschüsse von 1950 bis 2000 betragen für die Alten Bundesländer (ABL) ca. 1400 kg P ha⁻¹ und 2500 kg K ha⁻¹ und für die Neuen Bundesländer (NBL) 800 kg P ha⁻¹ und 2400 kg K ha⁻¹. Die Überschüsse wurden ausgenommen K auf leichten Sandböden weitgehend in den Krumen bzw. Narben von Grünlandangereichert. Spätestens seit Ende der 50er Jahre hätten P- und K-Zufuhren in Höhe der Abfuhr für die Versorgung der Kulturen ausgereicht.

Die im Boden angereicherten P- und K-Mengen sind weitgehend pflanzenverfügbar und sollten aus ökonomischen wie ökologischen Gründen gezielt abgereichert werden. Aus vorliegenden Versuchen werden die Möglichkeiten und Grenzen abgeschätzt und unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Gesichtspunkte Grenzwerte zu Bewertung von Bodenuntersuchungsergebnisse abgeleitet. Diese liegen erheblich unter den derzeitigen Werten der Offizialberatung. – Die ökologischen Folgen überhöhter Bodengehalte werden diskutiert.

10. Literatur

- Auerswald, K., 1997: Emission von N und P aus der Pflanzen- und Tierproduktion in die Gewässer. Rundgespräche der Kommission Ökologie-Ökonomie 127-135, Verl. Dr. F. Pfeil, München.
- Baumgärtel, G., 1996: Ergebnisse langjähriger statischer Phosphatdüngungsversuche auf ackerbaulich genutzten Flächen. VDLUFA-Schriftenreihe **42**, 94-109.
- Baumgärtel, G., 1998: Ergebnisse langjähriger statischer Kaliumdüngungsversuche auf ackerbaulich genutzten Flächen im Gebiet der Landwirtschaftskammer Hannover. VDLUFA-Schriftenreihe **47**, 19-31.
- Baumgärtel, G., 2000: Kein Wachstum ohne Kalium. Land und Forst **12**, 26-30.
- Baumgärtel, G., 2003: P und K: Lange genug gespart. Land und Forst **32**, 21-23.
- Baumgärtel, G. und K. Severin, 1998: Welche Mengen sollen gedüngt werden? Land und Forst **30**, 24-26.
- Baumgärtel, G., 2004 Bodenuntersuchung zeigt den Mangel. Land und Forst **5**, 16 – 18.
- Bergmann, W., 1983: Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen, Fischer-Verlag, Jena.
- Brüne, H. und J. Heyn, 1984: Die Wirkung verschiedener Phosphat-Düngerformen in mehrjährigen Feldversuchen. DLG-Mitteilungen **2**, 80-83.
- van Dijk, W., 1999: Adviesbasis voor de bemesting van Akkerbouw- en Vollegrondsgroentegewassen. Publicatie Nr. **95**, Lelystad.
- Fink, A., 1979: Dünger und Düngung: Grundlagen, Anleitung zur Düngung d. Kulturpflanzen, Verlag Chemie.
- von Fischer, D., 1996: Phosphatbedarfsprüfungen. VDLUFA-Schriftenreihe **42**, 110-122.
- von Fischer, D. und B. Apel, 1998: Kaliumbedarfsprüfung auf Acker und Grünland. VDLUFA-Schriftenreihe **47**, 33-48.
- Harenz, H., Köster, W. und D. Merkel, 1992: Phosphor-, Kalium- und Stickstoffbilanzender Landwirtschaft der Bundesrepublik Deutschland und der ehemaligen DDR von 1950 bis 1986, Agribiological Research **45,4**, 285-293.
- Hege, U. und K. Offenberger, 1996: Ertragswirkung einer P-Düngung in Abhängigkeit von der P-Versorgung des Bodens. VDLUFA-Schriftenreihe **42**, 65-79.
- Hege, U. und K. Offenberger, 1998: Ergebnisse von Kaliumdüngungsversuchen in Bayern. VDLUFA-Schriftenreihe **47**, 65-82.
- Jungk, A., Claassen, N., Schulz, V. und J. Wendt, 1993: Pflanzenverfügbarkeit der Phosphorvorräte ackerbaulich genutzter Böden. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. **156**, 397-406.
- Kinsey, N., 1986: Persönliche Mitteilung.
- Köhnlein, J., 1957: Ertragssteigerung, Nährstoffbilanz und Bodenuntersuchungsergebnisse in statischen Feldversuchen mit steigenden P₂O₅- und K₂O-Gaben. Z. Acker und Pflanzenbau **104**, 229-256.

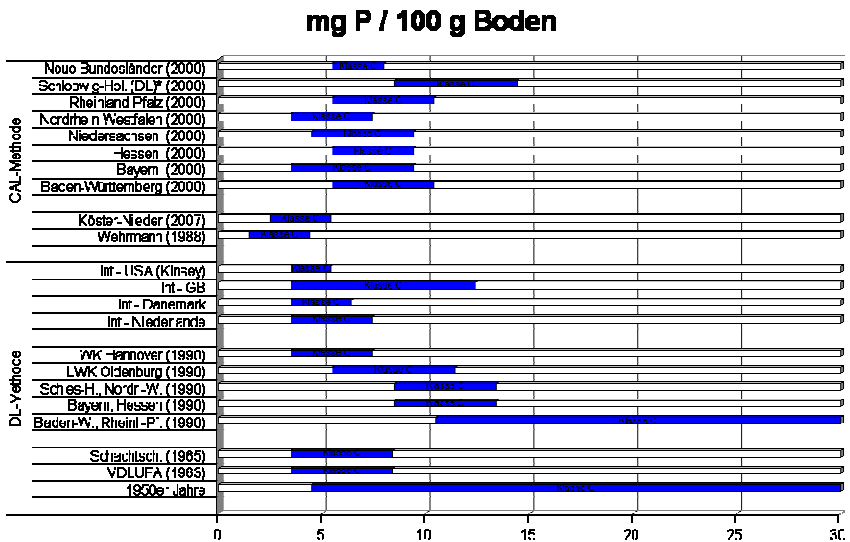
- Köster, W. 1980: Pflanzenschäden durch hohe Gaben von Abwasser bzw. Klärschlamm. Landw.Forsch. Kongressband 1980, 564 – 569.
- Köster, W. und P. Schachtschabel, 1983: Beziehung zwischen dem durch Phosphatdüngung erzielbaren Mehrertrag und dem Phosphatgehalt im Boden. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. **146**, 539-542.
- Köster, W., Möhring, D., Severin, K. und H.-D. Ziebell, 1988: Stickstoff-, Phosphor- und Kaliumbilanzen landwirtschaftlich genutzter Böden der Bundesrepublik Deutschland von 1950 bis 1986. Schriftenreihe der Landwirtschaftskammer Hannover, 162 S.
- Köster, W., Severin, K. und F. Suthoff, 1990: Kaliumbelastung von Beregnungswasser, Kongressband 1989, VDLUFA Schriftenreihe **30**, 579-603.
- Köster, W., 1992: Düngungsempfehlungen der Landwirtschaftskammer Hannover. 14. Kartoffeltagung, Granum-Verlag, Detmold.
- Köster, W., 1993: Wie weit kann man die Nährstoffgehalte im Boden absinken lassen? Vortrag RKL-Tagung 1993.
- Leinweber, P., Geyer-Wedell, K. und E. Jordan, 1993: Phosphorversorgung der Böden im agrarischen Intensivgebiet Süddoldenburg. Vehtaer Druckerei und Verlag, 67 S.
- Mokry, M., 1996: P-Düngungsversuche - Baden-Württemberg. VDLUFA-Schriftenreihe **42**, 4-10.
- Mokry, M., 1998: K-Düngungsversuche in Baden-Württemberg. VDLUFA-Schriftenreihe **47**, 99-104.
- Nieder, R., 2000: Nährstoffanreicherung in Ackerkrumen vor dem Hintergrund des Boden-, Klima- und Gewässerschutz. Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung **41**, 1-8.
- Römer, W. und N. Claassen, 1998: Reaktion der Zuckerrübe auf P und K. Land und Forst **21**, 10-13.
- Scheffer, F. und Schachtschabel, P.: Lehrbuch der Bodenkunde, 11. Auflage S.212.
- Schachtschabel, P.: Der Magnesiumversorgungsgrad nordwestdeutscher Böden und seine Beziehungen zum Auftreten von Mangelsymptomen an Kartoffeln. Z. apflanzenernähr., Düng., Bodenk. **74**, 202-219 1956.
- Schachtschabel, P., 1963: Der anzustrebende pH-Wert, Phosphor- und Kaliumgehalt von Ackerböden. Landwirtschaftliche Forschung **17**, Sonderheft 60-82.
- Schachtschabel, P., 1985: Beziehungen zwischen den durch K-Düngung erzielbaren Mehrerträgen und dem K-Gehalt der Böden nach Feldversuchen in der Bundesrepublik Deutschland. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. **148**, 439-458.
- Schaumberg, G. und J. Heyn, 1996: Prüfung optimaler Phosphatversorgungsbereiche/Hessen. VDLUFA-Schriftenreihe **42**, 11-19.
- Schaumberg, G. und J. Heyn, 1998: Ergebnisse hessischer K-Steigerungsversuche. VDLUFA-Schriftenreihe **47**, 105-111.
- Spielhaus, G., 1996: Phosphatdüngungsversuche in Westfalen-Lippe. VDLUFA-Schriftenreihe **42**, 36-44
- Wehrmann, J., Kuhlmann, H. und G. Baumgärtl, 1988: P-, K- und Mg-Düngeversuche für das Lössgebiet Südniedersachsens auf sicherer Grundlage. DLG-Mitteilungen **103**, 337-348, 1988.

Wulff, F., Schulz, V., Jungk, A. und N. Claassen, 1998: Potassium fertilization on sandy soils in relation to soil test, crop yield and K-leaching. Z. Pflanzenernährung. Bodenkunde. **161**, 591-599.

11. Übersicht der Einstufung der „C-Klassen“ im Internationalen Vergleich.

Abbildung A: Übersicht über die Auswertungsrichtlinien für Bodenuntersuchungen auf Phosphor in Deutschland seit 1950 und ausländische Systeme für mittlere Böden.

Die Klasse C (optimaler Bereich) wurde fett gedruckt

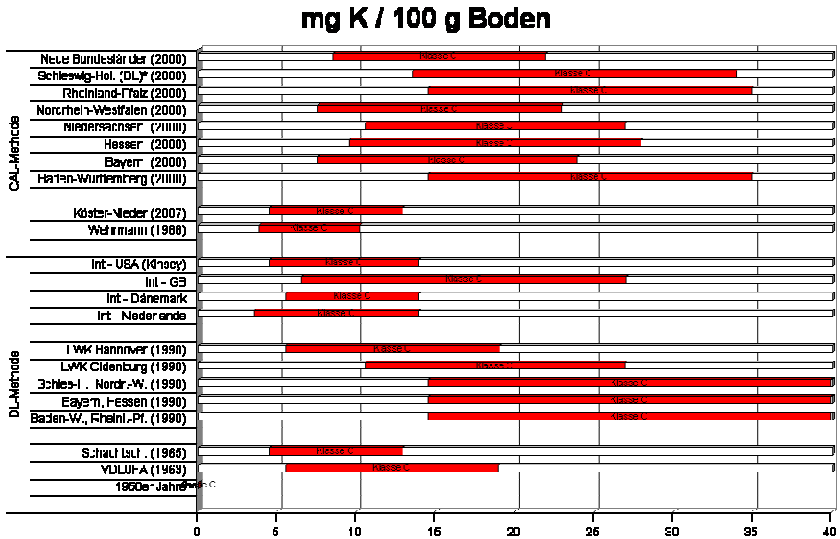


Umrechnungsfaktoren: P in $P_2O_5 = 2,29$; P_2O_5 in P = 0,55; DL in CAL = 0,8; CAL in DL = 1,25

* DL = CAL

Abbildung B: Übersicht über die Auswertungsrichtlinien für Bodenuntersuchungen auf Phosphor in Deutschland seit 1950 und ausländische Systeme für mittlere Böden. (CAL = DL)

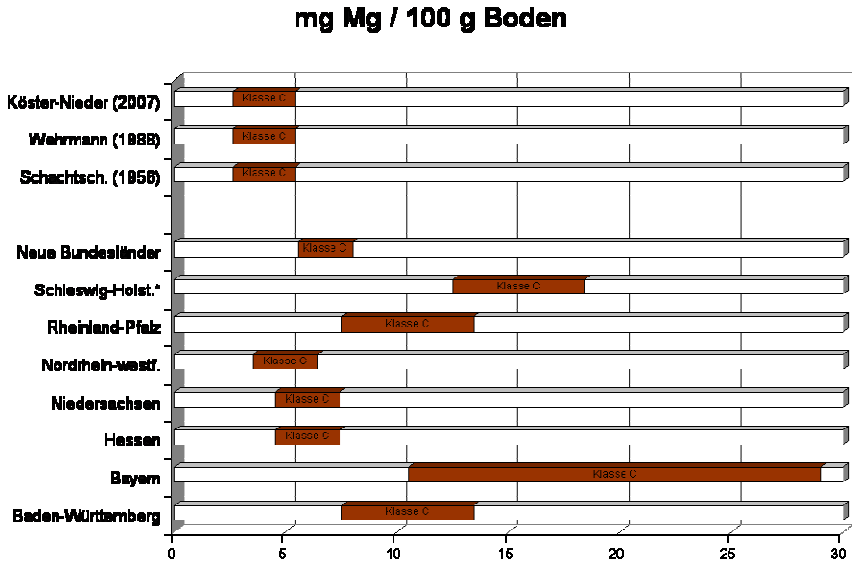
Die Klasse C (optimaler Bereich) wurde fett gedruckt



Umrechnungsfaktoren: K in $K_2O = 1,20$; K_2O in K = $0,83$

Abbildung C: Übersicht über die Auswertungsrichtlinien für Bodenuntersuchungen auf Magnesium für mittlere Böden. (CaCl_2)

Die Klasse C (optimaler Bereich) wurde fett gedruckt



* Bestimmung im DL-Extrakt. Dabei werden Mg-Verbindungen erfasst, die nicht verfügbar sind.

12. Anschriften der Verfasser:

Ltd. LD Dr. Werner Köster

Reuterkamp 15
D-31840 Hessisch-Oldendorf
Fax: 05158-990882
e-mail: koester-w@t-online.de

Prof. Dr. Rolf Nieder

Institut für Geoökologie
Technische Universität Braunschweig
Langer Kamp 19 c
D-38106 Braunschweig
e-mail: r.nieder@tu-bs.de

Hinweis:

Alle Abbildungen, Tabellen und sonstige Darstellungen sind in hoher Auflösung in digitaler Form erhältlich. Bitte setzen Sie sich mit den Autoren in Verbindung oder kontaktieren Sie den Publizisten über www.beratung-mal-anders.de