

Der Einfluß von Düngemitteln auf den Kalkzustand des Bodens

Von C. M. J. Sluijsmans^{*)}

(Eingegangen: 27. 10. 1969)

Die Charakterisierung der Eigenschaften von Düngemitteln erfordert auch eine möglichst genaue Kenntnis über ihren Einfluß auf den Kalkzustand des Bodens. Der Kalkzustand zeigt im allgemeinen ein Verhältnis zwischen basischen und Wasserstoff- bzw. Aluminium-Ionen an und ist in der Bodenkunde in verschiedener Weise definiert worden. In der landwirtschaftlichen Forschung ist die vom Kalkzustand abhängige pH-Zahl ein wichtiger Faktor. Bei hoher Düngungsintensität gewinnt die Frage nach der Menge an Kalk, die den versauernden Einfluß eines Düngemittels kompensieren kann, bzw. die Menge an Basen, die durch ein Düngemittel dem Boden zugeführt wird, zunehmend an Bedeutung.

Quantitative Aussagen hierüber können sicher aus langjährigen, komplizierten und dementsprechend kostspieligen Feldversuchen gewonnen werden. Aus den grundlegenden Arbeiten von *Pierre* (1928, 1933) und unter Berücksichtigung der bisherigen Kenntnisse und vorliegenden Versuchsergebnisse läßt sich jedoch eine Formel ableiten (*Sluijsmans*, 1961), mit deren Hilfe der Einfluß der verschiedensten Düngemittel auf den Kalkzustand des Bodens verhältnismäßig einfach zu berechnen ist.

Voraussetzung für diese Berechnung ist jedoch die Kenntnis über den Einfluß der verschiedenen Komponenten, aus denen das Düngemittel zusammengesetzt ist. Die Gesamtwirkung ergibt sich dann aus der Summe der Einflüsse der Einzelkomponenten. Dem Boden zugeführte basische Kationen (Basen) verbessern den Kalkzustand des Bodens und die Anionen veranlassen mehr oder weniger eine Versauerung. Die beiden Einflüsse werden in dieser Arbeit, berechnet auf kg CaO, beziehungsweise positiv und negativ in eine Formel eingetragen. Zum Beispiel eliminieren die basischen und sauren Komponenten der Neutralsalze starker Säuren einander zunächst in Hinsicht auf ihren Einfluß auf den Kalkzustand. Es handelt sich schließlich um einen Basenüberschuß oder ein Defizit.

Verschiedene Prozesse, wie Auswaschung und Fixierung, die Nährstoffaufnahme durch die Pflanzen sowie mikrobielle Vorgänge können zu Verlusten von Nährstoff-Kationen oder -Anionen führen. Für die Beeinflussung des Kalk-

^{*)} Dir. Ir. C. M. J. Sluijsmans, Institut für Bodenfruchtbarkeit, Haren (Gr.)/Niederlande.

bgb 257

zustandes ist das Ergebnis all dieser Prozesse von Bedeutung. Für stickstofffreie Düngemittel liegen zahlreiche übereinstimmende Ergebnisse vor, so daß daraus Rückschlüsse auf die Wirkung der Einzelkomponenten gezogen werden können. Für stickstoffhaltige Düngemittel findet sich in der Literatur dagegen eine breite Variation der Versuchsergebnisse. Eine gesonderte Diskussion des Einflusses dieser Produkte erscheint deshalb angebracht.

Einfluß stickstofffreier Komponenten

1. Auf Grund von Untersuchungsergebnissen und in Übereinstimmung mit *Pierre* (1933) kann als erwiesen gelten, daß KCl , K_2SO_4 und Kainit keinen bleibenden Einfluß auf den Kalkzustand ausüben. Zu dieser Gruppe dürfen gleichfalls Gips, Patentkali, Kieserit, Kochsalz und ähnliche gerechnet werden.

Der Einfluß dieser und ähnlicher Düngemittel kann als Resultante aus der Wirkung der Kationen und der Anionen und — sofern es sich um einen bewachsenen Boden handelt — aus der durch die Düngung hervorgerufene Änderung in der Ionenaufnahme durch die Pflanze betrachtet werden. Da keine Gesamtwirkung vorhanden ist, wird die alkalische Wirkung der Kationen offenbar durch die saure Wirkung der Anionen ausgeglichen. Es scheint deshalb gerechtfertigt, den Einfluß der Kationen und Anionen dieser Düngemittel auf die äquivalente Menge an CaO umzurechnen, indem die Kationen positiv und die Anionen negativ bewertet werden.

So ist 1 kg K_2O	äquivalent	0,6 kg CaO
1 kg CaO	äquivalent	1,0 kg CaO
1 kg MgO	äquivalent	1,4 kg CaO
1 kg Na_2O	äquivalent	0,9 kg CaO
1 kg SO_3	äquivalent	— 0,7 kg CaO
1 kg Cl	äquivalent	— 0,8 kg CaO

2. Für den Einfluß der Phosphate ergibt sich durch die vom pH-Wert abhängige Ionisation der Phosphorsäure ($\text{H}_3\text{PO}_4 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{H}_2\text{PO}_4^-$ oder $2\text{H}^+ + \text{HPO}_4^{2-}$) ein pH-abhängiger Einfluß auf den Kalkzustand. *Pierre* (1934) nimmt an, daß Monocalciumphosphat (also auch Superphosphat) bei pH-Werten des Bodens zwischen 5 und 6 keinen Einfluß auf den Kalkzustand hat. Unsere Untersuchungen und Ergebnisse bestätigen diese Annahme.

Da je Mol P_2O_5 maximal 3 Mol CaO gebunden werden können, im Monocalciumphosphat jedoch nur 1 Mol CaO vorhanden ist, wirkt die Phosphorsäure anscheinend nur zu einem Drittel versauernd. Da 1 kg P_2O_5 äquivalent ist 1,18 kg CaO , ergibt sich demnach bei pH-Werten zwischen 5 und 6 nur eine versauernde Wirkung von 0,4 kg CaO je kg P_2O_5 . Bei höherem pH des Bodens müßte dieser Wert etwas höher, bei niedrigeren pH-Werten (wohl auch infolge Bindung der Phosphate mittels Eisen und Aluminium) etwas niedriger angenommen werden.

3. Carbonat-, Silikat- und Hydroxid-Ionen in Düngemitteln können bei der Berechnung außer Betracht bleiben, da sie den Kalkzustand des Bodens kaum beeinflussen. Aus diesem Grund entspricht z. B. auch der Einfluß von 100 kg CaCO_3 oder 74 kg Ca(OH)_2 einer Wirkung von 56 kg CaO .

Einfluß stickstoffhaltiger Komponenten

Hier ist grundsätzlich zwischen dem Einfluß der Nitrat-Ionen und der Ammonium-Ionen zu unterscheiden.

1. Nitrat-Ionen, die dem Boden zugeführt werden und dort unverändert verbleiben, binden äquivalente Mengen an Basen, d. h. 1 Mol NO_3 neutralisiert $\frac{1}{2}$ Mol CaO . 1 kg N erfordert also 2 kg CaO . Infolgedessen haben Düngemittel wie Natrium-, Kalium- oder Calciumnitrat keinen Einfluß auf den Kalkzustand des Bodens, wenn sie unverändert im Boden verbleiben.

Verschiedene Prozesse reduzieren jedoch die zur Neutralisation des NO_3 -N erforderliche CaO -Menge. Bereits ohne den Eingriff der Pflanze, also im unbewachsenen Boden, kann der Kalkzustand verändert werden, wenn NO_3 -Ionen ohne gleichzeitigen Verlust von Kationen verlorengehen.

Folgende Prozesse sind dabei in Betracht zu ziehen:

- a) Mikrobielle Festlegung von NO_3 -Ionen oder N-Einbau in die organische Substanz des Bodens. Der erste, sich in allen tätigen Böden abspielende Prozeß ist für das Kationen-Anionen-Verhältnis nur dann von Bedeutung, solange die Mikrobenpopulation noch kein Gleichgewichtsniveau erreicht hat. Gleiches gilt auch für den Gehalt des Bodens an organischer Substanz, z. B. bei der Umwandlung von Acker in Grünland. Im Gleichgewichtsniveau ist diese Festlegung jedoch gleich der Remineralisation und damit unter normalen Umständen nicht von bleibendem Einfluß.
- b) Stickstoffverluste durch Denitrifikation.
Durch Denitrifikation gasförmig entweichender Stickstoff kann naturgemäß nicht mehr versauernd wirken. Über das Ausmaß dieser Verluste bestehen jedoch bisher noch keine klaren Vorstellungen.
- c) Auswaschung von Nitrat in Form von HNO_3 .
Diese ist nur in sehr saurem Milieu zu erwarten und braucht hier nicht berücksichtigt zu werden. Im Normalfall gehen bei der Auswaschung von Nitraten äquivalente Mengen an Basen verloren.

Zu einer Verminderung der versauernden Wirkung der Nitrat-Ionen auf unbewachsenem Boden kann also lediglich die noch weitgehend unbekannte Höhe der Denitrifikation führen. Der Faktor hierfür sei zunächst mit X_1 angegeben.

Die Nährstoffaufnahme der Pflanze hat damit wohl den größten Einfluß auf die effektive Auswirkung der Nitrate. Wird zugeführtes Nitrat teilweise von der Pflanze aufgenommen, ohne daß durch die NO_3 -Zufuhr die Aufnahme

anderer Kationen und Anionen beeinflusst wird, so kann nur der im Boden verbleibende NO_3^- -Anteil versauernd wirken.

Nach holländischen Ergebnissen (*Mulder 1949, Posthuma 1959, u. a.*) werden auf Grünland annähernd 70%, auf Ackerland rund 50% des zugeführten Stickstoffs von den Pflanzen aufgenommen, d. h. 30 bzw. 50% verbleiben im Boden. Je kg N würde also nur eine Menge von $0,30 \times 2 = 0,6$ kg oder $0,50 \times 2 = 1,0$ kg CaO zur Neutralisation erforderlich sein. Nun ist jedoch zunehmende Stickstoffaufnahme mit einer Veränderung in der Aufnahme der Kationen sowie der übrigen Anionen verbunden. Aus einer Reihe von Grünlandversuchen und in weitgehender Übereinstimmung mit den Angaben von *Allison (1931)* für Getreide hat sich ergeben, daß diese Veränderung in der Nährstoffaufnahme den Kalkbedarf um rund 14% der erhöhten Nitrat-Aufnahme vermehrt. Je kg zugeführtem NO_3^- -Stickstoff entsteht also ein Kalkbedarf

auf Grünland von $0,30 \times 2 + 0,14 \times 0,70 \times 2 = 0,8$ kg CaO,

auf Ackerland von $0,50 \times 2 + 0,14 \times 0,50 \times 2 = 1,1$ kg CaO.

2. Das Verhalten der Ammonium-Ionen muß unter dem Aspekt möglicher Nitrifikation und damit Umwandlung aus der Kationen- in die Anionenform gesehen werden. So entstehen z. B. aus 1 Mol $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ bei vollkommener Nitrifikation 2 Mol HNO_3 und 1 Mol H_2SO_4 . Der maximale Basenverlust beträgt demnach 2 Mol CaO oder entsprechend 4 kg CaO je kg N.

Diese maximal mögliche Versauerung wird nicht entstehen, wenn:

- a) N bereits vor der Nitrifikation als NH_3 entweicht. Dies trifft im wesentlichen jedoch nur auf CaCO_3 -haltigen Böden bei Ausbringung auf die Oberfläche ein. Durch sofortiges Einarbeiten lassen sich diese Verluste vermeiden.
- b) NH_4^+ vor der Nitrifikation ausgewaschen wird. Das Sorptionsvermögen der meisten Böden verhindert jedoch weitgehend diese Möglichkeit.
- c) Stickstoff während des Nitrifikationsprozesses als N_2 entweicht. Die Kenntnisse über die hierbei auftretenden N-Verluste sind unzureichend.

Für den Einfluß mikrobieller Prozesse oder die Auswaschung als HNO_3 nach der Nitrifikation gilt das Gleiche wie für die Nitrat-Ionen.

Als Summe dieser Einflüsse, deren Größe zwar wiederum weitgehend unbekannt ist, die aber vermutlich doch nur einen kleinen Wert darstellen wird, möge zunächst der Faktor X_2 eingesetzt werden.

Auch hier ist also der Einfluß der Pflanze von entscheidender Bedeutung für die Auswirkungen dieser Düngemittelkomponenten. Bezüglich der mengenmäßigen N-Aufnahme kann es als erwiesen gelten, daß keine wesentlichen Unterschiede zwischen $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{NO}_3\text{-N}$ bestehen.

Hinsichtlich der Wirkung von Ammoniumsalzen auf die Aufnahme anderer Ionen wurde in holländischen Untersuchungen auf Grünland gegenüber Nitratsalzen eine relativ stärkere Anionen-Aufnahme gefunden (die Höhe der Stickstoffaufnahme blieb dabei unberücksichtigt), diese Differenz ist jedoch für die hier zu behandelnde Frage ohne wesentliche Bedeutung und kann vernachlässigt werden.

Vorausgesetzt, daß diese Gesichtspunkte auch für Ackerland Gültigkeit besitzen und daß weiterhin der im Boden verbleibende Ammonium-Stickstoff nitrifiziert wird, ist der Einfluß von Ammonium-N also gleich dem von Nitrat-N.

Die Auswirkungen der sich im Boden vollziehenden Prozesse nach erfolgter Nitrifikation sind dann im Faktor X_1 enthalten.

3. Für den Einfluß stickstoffhaltiger Komponenten ergibt sich also zusammenfassend ein versauernder Einfluß von

0,8 (Grünland) bzw. 1,1 (Ackerland) kg CaO je kg N,

vermindert um die Faktoren X_1 und X_2 , die dem Basenverbrauch entgegenwirken.

Aus den Arbeiten von *Pierre* ergibt sich für den Stickstoffeinfluß der Wert 1,0. Dieses Ergebnis beruht jedoch ausschließlich auf Untersuchungen über die N-Wirkung auf Ackerland und kommt damit dem obigen Wert sehr nahe.

Da über die Größe der Faktoren X_1 und X_2 ohnehin nicht genügend Kenntnisse vorhanden sind, scheint es gerechtfertigt, den von uns gefundenen Faktor 1,1 auf 1,0 zu reduzieren und so den noch unbekanntem Verlusten im wesentlichen an gasförmigem Stickstoff in gewissem Umfange Rechnung zu tragen. Die Größen X_1 und X_2 brauchen dann nicht mehr berücksichtigt zu werden.

Schlußfolgerungen

Der Einfluß (E) von 100 kg irgendeines Düngemittels auf den Kalkzustand des Bodens, ausgedrückt in kg CaO, kann nach den obigen Ausführungen wie folgt berechnet werden:

$$E \text{ (kg CaO)} = 1,0 \times \text{CaO} + 1,4 \times \text{MgO} + 0,6 \times \text{K}_2\text{O} + 0,9 \times \text{Na}_2\text{O} - \\ 0,4 \times \text{P}_2\text{O}_5 - 0,7 \times \text{SO}_3 - 0,8 \times \text{Cl} - n \times \text{N}.$$

CaO, MgO usw. sind als prozentuale Gehalte im betreffenden Düngemittel einzusetzen. Der Koeffizient n beträgt 0,8 für Grünland und 1,0 für Ackerland; unter Bedingungen, bei denen die N-Ausnutzung geringer als 50% ist, ergibt sich für n ein Wert zwischen 1,0 und 2,0.

Ist E positiv, so trägt das Düngemittel zur Basenanreicherung bei — ein negativer Wert gibt das Ausmaß der versauernden Wirkung an. In der Tabelle 1 ist der Einfluß einiger Düngemittel auf die Änderung des Kalkzustandes im Boden angegeben, ausgedrückt in kg CaO je 100 kg Düngemittel und bei den N-Düngemitteln auch in kg CaO je 100 kg N. So sind z. B. bei der Düngung

Tabelle 1

Einfluß verschiedener Düngemittel auf den Kalkzustand des Bodens (in kg CaO)

Effect of a number of fertilizers on the liming status of the soil (in kg CaO)

Düngemittel	Nährstoffgehalt %			Einfluß von 100 kg Düngemittel			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Grünland	Acker	Grünland	Acker
Kalkammonsalpeter	23	—	—	0	- 4	+ 3	- 17
Kalksalpeter	15,5	—	—	+ 16	+ 12	+ 100	+ 80
Chilesalpeter	15,5	—	—	+ 20	+ 17	+ 130	+ 110
schwefels. Ammoniak	20	—	—	- 57	- 61	- 285	- 305
Stickstoff-Magnesia	20	—	—	+ 4	0	+ 20	0
Kalkstickstoff	20	—	—	+ 44	+ 40	+ 220	+ 200
Harnstoff	46	—	—	- 37	- 46	- 80	- 100
Kali-Salze	—	—	div.	0	0		
Superphosphat	—	17,5	—	0	0		
Thomasphosphat	—	17	—	ca. + 40	ca. + 40		

mit 100 kg Kalksalpeter bei Grünland 16 kg und bei Acker 12 kg CaO im Überschuß vorhanden (auf 100 kg N berechnet 100 und 80 kg CaO), bei der Düngung mit schwefelsaurem Ammoniak sind dagegen bei Grünland 57 kg und bei Ackerland 61 kg CaO zuzuführen, um den Kalkzustand des Bodens aufrechtzuerhalten (auf 100 kg N berechnet 285 bzw. 305 kg CaO). Bei der Düngung mit Kalisalzen wird dagegen der Basenzustand nicht verändert.

Für die Berechnung des Einflusses von Mischdüngemitteln ist es erforderlich, nicht nur den Gehalt an N, P, K und Mg zu kennen, sondern außerdem den Gehalt an den andern, in der Formel genannten Komponenten. Kennt man die chemische Verbindungen im Düngemittel, dann sind die Gehalte natürlich zu errechnen.

Die Kenntnis über die ein Düngemittel zusammensetzenden Einzelkomponenten ermöglicht so eine schnell zu ermittelnde Aussage über die Auswirkungen auf den Kalkzustand des Bodens. Die Aufnahme des so errechneten Düngemittelinflusses ist für die Düngemittelgesetzgebung des Benelux-Verbandes bereits vorgesehen.

Bei der praktischen Anwendung obiger Formel darf jedoch nicht außer acht gelassen werden, daß der Einfluß eines Düngemittels nicht unbedingt auf die Krume beschränkt bleibt, sondern daß sich gewisse Anteile vom Basengewinn oder -verlust auch im Unterboden auswirken können. Außerdem ist zu berücksichtigen, daß in den so errechneten Kalkmengen die normale Basenauswaschung, die auch stattfindet, wenn nicht gedüngt wird, nicht einbezogen ist. Schließlich sei darauf hingewiesen, daß Düngemittel, die zum Teil auch nach vielen Jahren unverändert im Boden zurückbleiben, sich nicht völlig dem Resultat der Formel anschließen werden.

Zusammenfassung

Aufbauend auf den Arbeiten von *Pierre* und nach kritischer Überprüfung anhand zahlreicher Versuchsergebnisse wird eine Nährungsformel entwickelt und diskutiert, mit deren Hilfe der Einfluß der verschiedenen Düngemittel auf den Kalkzustand des Bodens errechnet werden kann.

Schrifttum

- Allison, F. E.*: The comparative effects of concentrated nitrogenous fertilizers on permanent soil acidity. *J. Amer. Soc. Agron.* 23, 878—908 (1931).
- Mulder, E. G.*: Onderzoekingen over de stikstofvoeding van landbouwgewassen. I. Proeven met kalkammonsalpeter op grasland. *Versl. Landbk. Onderz.* 55, 7 (1949).
- Pierre, W. H.*: Nitrogenous fertilizers and soil acidity: I. Effect of various nitrogenous fertilizers on soil reaction. *J. Amer. Soc. Agron.* 20, 254—269 (1928).
- Pierre, W. H.*: Determination of equivalent acidity and basicity of fertilizers. *Ind. Eng. Chemistry* 5, 229—234 (1933).
- Pierre, W. H.*: The effect of mono-, di- and tricalcium phosphates on the reaction of soils of different degrees of acidity. *J. Amer. Soc. Agron.* 26, 278—289 (1934).
- Posthuma, M.*: De minerale samenstelling van gras. II. Rlc. voor ZW-Friesland. *Gestenc. Meded.* no. 6 (1959).
- Sluijsmans, C. M. J.*: Invloed van (meng)-meststoffen op de kalktoestand van de grond. *Rapp. I.B.-Groningen* (1961). [3363]

Influence of Fertilizer upon the Liming Status of the Soil

By *C. M. J. Sluijsmans*

The work of *Pierre*, critically examined and coupled with many experimental data, is presented as a basis for the development and discussion of a formula, with which the effect can be calculated of a variety of fertilizers on the liming status of the soil. If the effect of 100 kg of a given fertilizer is represented by E and is expressed in kg CaO, then

$$E = 1.0 \times \text{CaO} + 1.4 \text{MgO} + 0.6 \times \text{K}_2\text{O} + 0.9 \times \text{Na}_2\text{O} - 0.4 \times \text{P}_2\text{O}_5 - 0.7 \times \text{SO}_3 - 0.8 \times \text{Cl} - n \times \text{N}.$$

CaO, MgO etc. represent the percentages of these constituents in the fertilizer. The coefficient n for nitrogen amounts to 0.8 for grassland and to 1.0 for arable land. Under conditions where less than 50% of the fertilizer nitrogen is taken up by the crop, n will lie somewhere between 1.0 and 2.0.

The result of the formula is represented in table 1 for a number of fertilizers. [3363]