

TELMA	Band 20	Seite 221 – 250	7 Abb., 12 Tab.	Hannover, November 1990
-------	---------	-----------------	-----------------	-------------------------

Zum Einfluß des pH-Wertes auf die Bodeneigenschaften Deutscher Hochmoorkulturen —

Auswertung eines 60jährigen Dauerversuchs im Königsmoor, Niedersachsen (1927–1988)

The influence of pH-value to soil properties of raised-bog cultivations —

Interpretation of a 60 years field trial in Königsmoor, Lower Saxony, FRG (1927–1988)

HERBERT KUNTZE, RÜDIGER BARTELS und BERNHARD SCHEFFER*)

Zur Erinnerung an Prof. Dr. Dr. e.h. BRUNO TACKE,
Vorsteher der Moorversuchsstation in Bremen von 1891 bis 1928

ZUSAMMENFASSUNG

Über einen 60 Jahre laufenden Feldversuch zur Frage der Optimierung des pH-Wertes in Hochmoorböden bei Grünlandnutzung wird berichtet. Wesentliche Ergebnisse sind:

1. Für einen nachhaltig optimalen Ertrag und gute Futterqualität sind pH-Werte (CaCl_2) zwischen 4,0–4,5 anzustreben und durch Nachkalkungen zu erhalten. Durch physiologisch alkalische Düngung entwickeln sich die pH-Werte auch ohne Kalkung in diesem pH-Bereich und bleiben langfristig stabil. Physiologisch saure Düngung dagegen führt innerhalb weniger Jahre zu pH-Absenkungen, die – auch wenn sie die Torfsubstanz besser schonen – zu Grünlandumbruch mit periodischen Nachkalkungen zwingen.
2. Physiologisch alkalische Düngung bewirkt über alle pH-Stufen hinweg eine annähernd gleich hohe, im Vergleich zur physiologisch sauren Düngung aber stärkere Humifizierung. Um 10% höhere Torfchwundraten werden über erhöhte Aschegehalte, engeres C/N-Verhältnis und höhere Kationenaustauschkapazität nachgewiesen. Insgesamt entstehen humuschemische Eigenschaften, wie sie von Niedermooren bekannt sind. Mit der erhöhten Düngeintensität sind die Torfverluste auch beim Dauergrünland ähnlich hoch wie beim Ackerbau.
3. Bei der Phosphat-Düngung ist es langjährig gelungen, eine bilanzierte Düngung nach Entzug einzurichten. Phosphate werden mit abnehmendem pH-Wert mobiler und damit auswaschungsgefährdet. Die Kaliumbilanz ist deutlich negativ. Eine PK-Anreicherung im Boden ist durch Düngung nicht möglich. Entzugsdüngung ist zu empfehlen. 5–7 mg $\text{P}_2\text{O}_5/100$ ml und 5–7 mg $\text{K}_2\text{O}/100$ ml sind als Versorgungsstufe C anzusehen.

*) Anschriften der Verfasser: Prof. Dr. H. KUNTZE, Dr. R. BARTELS, Dr. B. SCHEFFER, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Bodentechnologisches Institut, Friedrich-Mißler-Str. 46–50, 2800 Bremen

SUMMARY

Results of a 60 years long field trial on cultivated raised-bog under grassland are discussed:

The pH-value of cultivated raised-bog should be raised to 4,0-4,5 (CaCl_2) when grassland farming. Best effects are given by alkaline fertilizing, thereby the pH-value can be nearly conserved, on the other hand acid fertilizing effects sinking of the pH-value.

Alkaline fertilizing causes more intense humification rates up to 10% compared with acid fertilizing. The peat soil of the crumb becomes similar to fen peat and the decomposition increases. The sorption capacity of these peat soils is very high. A content of 5-7 mg P_2O_5 and 5-7 mg K_2O per 100 ml is sufficient for the top soil; when fertilizing more phosphate and potassium their leaching increases.

1. PROBLEMSTELLUNG

Für die Boden- und Nährstoffdynamik von Deutschen Hochmoorkulturen nimmt der pH-Wert eine Schlüsselfunktion ein. Schon seit der Entwicklung dieses Moorkulturtyps 1877 war bekannt, daß ein Kompromiß zu finden war zwischen dem nährstoffdynamisch nötigen Mindest-pH-Wert und dem im Hinblick auf die Geschwindigkeit und Richtung der Bodenentwicklung noch zulässigen Höchst-pH-Wert eines Hochmoorbodens (TACKE, 1927).

In den an Metalloxiden (Al, Fe, Mn) armen Hochmoortorfen können Kulturpflanzen noch bis zu einem pH-Wert von 3,5 herab durchaus gedeihen. In einem solch sauren Boden ist die biologische Aktivität außerordentlich gering, die davon abhängige Torfmineralisation und Humifizierung sind entsprechend gehemmt. Seit Anlage der ersten Deutschen Hochmoorkulturen war unklar, bei welchen pH-Werten dieser anthropogenen Böden das Optimum für den Ertrag und die Qualität von Kulturpflanzen liegt.

Dazu hat TACKE 1927 auf dem Versuchsfeld J II des Versuchsbetriebes Königsmoor einen umfangreichen Kalkversuch angelegt, der mit unterschiedlicher "Säureabstumpfung" von 20 - 100 % etwa den pH-Bereich 3,5 - 5,5 umfaßte. Das Feld war in 6 Teilstücke mit unterschiedlicher Nutzung unterteilt. Nur das Teilstück J II/6 (jetzt FV 23) blieb bis heute unter Dauergrünland erhalten. Ab 1929 wurde diese Versuchsfläche zur Hälfte physiologisch sauer (Superphosphat und Kainit) und zur Hälfte physiologisch alkalisch (Thomasphosphat und 40%iges Kalisalz) auf Ersatz gedüngt.

Bei einer ersten eingehenden Untersuchung 1942 stellte sich heraus, daß die angestrebte 100%ige Säureabstumpfung nicht erreicht worden war (BRÜNE, 1950). Erst 1956 wurde diese bei einer kalkmehrenden physiologisch alkalischen Düngung erreicht, jedoch nur in den oberen 2,5 cm (BADEN, 1955). 1966 hat BADEN

dann Calcium-Bilanzen erstellt. Er errechnete bis dahin bei physiologisch alkalischer Düngung in den oberen Zentimetern des Wurzelbettes eine schwach positive Kalkbilanz. Wegen der hohen selektiven Calcium-Sorption in Torfen hatte eine Wanderung des Calciums kaum stattgefunden. Das bedeutet eine durch die Torfmineralisation ausgelöste relative Anreicherung des Calciums in den oberen Zentimetern der Narbe mit entsprechender Verschlechterung der Pflanzenbestände. So mußten 1972/73 mit einer Ackerzweischennutzung zunächst die pH- und Nährstoffverhältnisse im gesamten Krumbereich neu eingestellt werden. Der pH-Wert wurde mit Hüttenkalk angehoben (BARTELS, 1977). Die Versuchsvarianten pH 3,5, 4,0, 4,5, 5,0 und 5,5 wurden seither sowohl auf dem physiologisch sauer als auch auf dem physiologisch alkalisch gedüngten Teilstück zusätzlich mit 180 kg N/ha versorgt. 1982 wurde zum ersten Mal ein Kalkausgleich nach SLUIJSMANS (1970) auf den physiologisch sauer gedüngten Flächen vorgenommen.

Nach weiteren 7 Versuchsjahren erfolgte 1988/89 eine erneute intensive Beprobung und Untersuchung des in seiner Laufzeit einmaligen Dauerversuches zur Beantwortung der folgenden Fragen:

- Welches ist der nachhaltig optimale pH-Wert für Ertrag und Qualität von Dauergrünland auf Hochmoorböden?
- Welche Veränderungen der Bodeneigenschaften durch bodenbildende Prozesse (Mineralisierung, Humifizierung) sind im Oberboden durch unterschiedliche Kalkzufuhr festzustellen?
- Wie beeinflussen die gleichzeitig in diesem Zeitraum eingebrachten Hauptnährstoffe K, P und N die Eigenschaften dieses Bodens?

Ein solcher Dauerversuch bietet sich an, um die von BADEN (1966) als "naturnah" herausgestellte Dauergrünlandnutzung von Hochmoorböden im Hinblick auf ihre Nähr- und Schadstoffmobilität einerseits und die Erhaltung wertvoller Torfsubstanzen im Sinne des Substanz- und Funktionsschutzes (= Bodenschutz) andererseits zu untersuchen und methodische Aspekte der Kalkbedarfsermittlung aufzuzeigen.

2. BESCHREIBUNG DER VERSUCHSANLAGE

2.1 Standort Königsmoor (Abb. 1a)

Am Fuße einer Endmoräne des Drenthestadiums der Saaleeiszeit ist auf vorgelagerten Sandern am Oberlauf der Wümme das ca. 1300 ha große Königsmoor bei Tostedt aufgewachsen (KUNTZE, 1971; SCHNEEKLOTH u. TÜXEN, 1978).

Die Versuchsfläche liegt (R 3544270, H 5900260) an der Grenze eines 1989 noch 5 dm mächtigen wurzelechten Hochmoores und eines von Seggen- und Birkenbruchwaldtorfen unterlagerten,

17 dm starken typischen nordwestdeutschen Hochmoores. 1989 war die Fläche in den oberen 5 dm mit mäßig zersetztem (H 4-5) Hochmoortorf, gebildet von der Pflanzengesellschaft Oxycocco-Sphagnetea, einheitlich, lediglich die oberen 20 cm sind je nach Bewirtschaftung anthropogen unterschiedlich stark humifiziert bis vererdet (s. Abschnitt 4.5).

Das Klima im Königsmoor ist gekennzeichnet durch eine Durchschnitts-Jahrestemperatur von $+7,8^{\circ}$ C. Die Jahresniederschläge liegen bei 645 mm, die durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit beträgt 83 %.

2.2 Versuchsanlage

Der Feldversuch wurde 1927 zur Prüfung der optimalen Aufkalkung Deutscher Hochmoorkulturen eingerichtet. Von den ursprünglich 6 mit verschiedenen Feldfrüchten bestellten Teilstücken ist ab 1952 nur Teil 6 mit der Grünlandansaat erhalten geblieben. Die 20 x 20 m großen Parzellen wurden bei ihrer Anlage entsprechend Tabelle 1 aufgekalkt.

Die Kalkmenge, die zur "Säureabstumpfung" benötigt wurde, um den pH-Wert (BaCl_2) von Torfproben im Labor auf 7,0 zu erhöhen (= 100 % Säureabstumpfung), wurde nach TACKE (1927) bestimmt. Um die so analytisch bestimmte Säure unterschiedlich "abzustumpfen", wurden 1927 die in Tabelle 1 aufgeführten Kalkmengen (CaO) benötigt.

Diese Kalkmengen wurden nach den Regeln der Deutschen Hochmoorkultur 20 cm tief eingearbeitet, anschließend wurde zu Grünland (Wiese) angesät.

Tab. 1: Kalkung 1927 (dt/ha CaO) Liming 1927 (dt/ha CaO)		
Variante	"% Säure- abstumpfung"	CaO dt/ha
1	20	17,02
2	40	37,66
3	60	44,46
4	80	64,88
5	100	78,66

BRÜNE (1950) hat diese 20 x 20 m großen Einzelparzellen weiter unterteilt. Seither wurde jeweils die Hälfte "physiologisch sauer" und die andere Hälfte "physiologisch alkalisch" gedüngt. "Physiologisch sauer" bedeutet Superphosphat, Kainit

und später (ab 1969) schwefelsaures Ammoniak (Ammonsulfat); "physiologisch alkalisch" bedeutet Thomasphosphat, 40 %iges Kalisalz und ab 1969 Kalkammonsalpeter (Abb. 1b).

BADEN (1966) hat diesen Versuchsabschnitt bis 1965 wie folgt beurteilt: Die angestrebten pH-Werte im Boden wurden durch die 1927 durchgeführte Kalkung nicht erreicht, vielmehr wurden sie durch saure Depositionen, Bodenatmung, Kationenaufnahme der Wurzeln und Humifizierungsvorgänge in den oberen 10 cm weiter abgesenkt, so daß sie bis 1965 auf allen Varianten mit physiologisch saurer Düngung auf pH-Werte von 3,6 (100 % Säureabstumpfung) bis 3,0 (20 % Säureabstumpfung) und bei physiologisch alkalischer Düngung auf 4,6 (100 % Säureabstumpfung) bis 4,0 (20 % Säureabstumpfung) fielen (pH in CaCl₂).

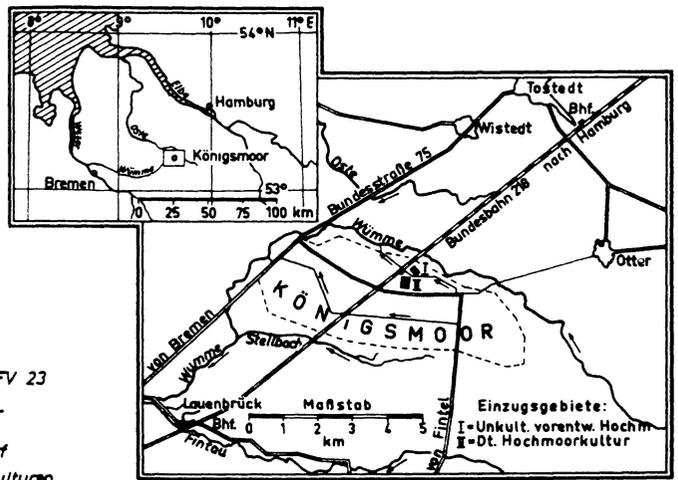
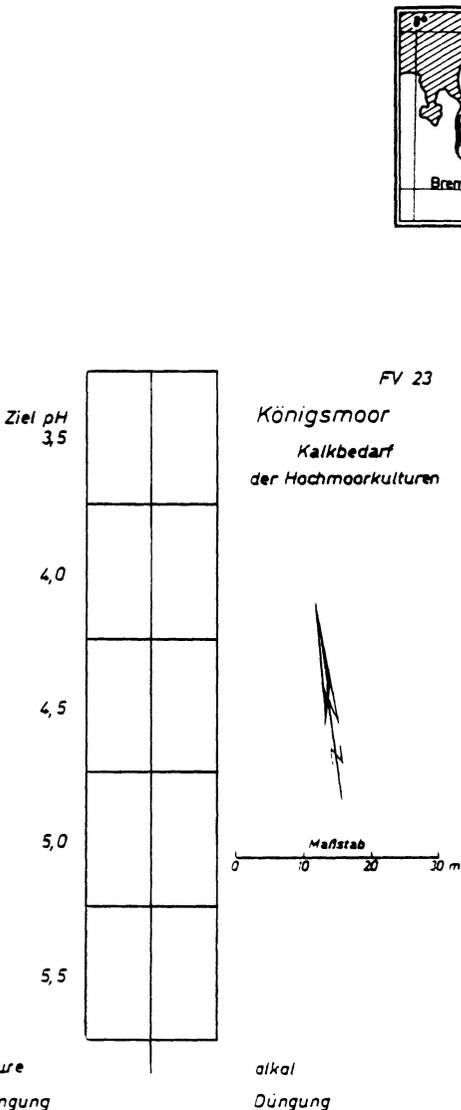


Abb. 1a
Lage des Untersuchungsgebietes Königsmoor
Situation of the investigation area
Königsmoor

Abb. 1b
Versuchsplan
Map of field trial

Weiter zeigte sich eine Abhängigkeit des Ertragspotentials von der unterschiedlichen Aufkalkung zu Versuchsbeginn. Im Verlauf der Jahre hat die kalkmehrende bzw. kalkschonende Grunddüngung (Phosphat und Kalium), vor allem mit Thomasphosphat, ausgereicht, die pH-Werte in den oberen 5 cm zu stabilisieren und das Ertragsniveau zu halten. Dagegen fielen auf den physiologisch sauer gedüngten Teilstücken die pH-Werte bis auf 3,0 ab, die Trockenmasseerträge nahmen in manchen Jahren entsprechend bis gegen Null ab.

BADEN (1966) beschrieb die mit Abstufung in den pH-Werten von der Dauer der Nutzung abhängige Horizontierung mit einem zum ungedüngten Unterbodentorf scharf abgegrenzten, stark humifizierten, wenige Zentimeter starken H-Horizont. Dieser ist feucht-kohärent und dicht, bei Austrocknung bröckelig. Parallelen zur Vermorschung in Niedermoorprofilen deuten sich an (OKRUSZKO, 1968). KUNTZE (1987) nennt diese für die anthropogene Bodenentwicklung auf Hochmoor typische Abstufung der pH-Werte mit korrelierender Konzentration der Phosphate im oberen Krumbereich "kopflastig" und spricht von physiologischer Flachgründigkeit, die nach entsprechender Dauer und Intensität der Nutzung von Moorgrünland zu Umbruch und Neuansaat zwingt.

2.3 Umstellung des Versuches 1968 (zusätzliche Stickstoffdüngung)

BRÜNE (1950) lehnte die mineralische Stickstoffdüngung von Hochmoorgrünland strikt ab, BADEN (1966) hat sich einer zusätzlichen mäßigen Stickstoffdüngung der Weiden nicht völlig verschlossen. Die Nutzungsintensität nahm jedoch in der westdeutschen Landwirtschaft weiter zu, und damit wurde die mineralische Stickstoffdüngung ständig erhöht (KUNTZE u. VOSS, 1980). Entsprechend dieser Entwicklung wurde die gesamte Versuchsfläche von 1968 ab auf allen Varianten einheitlich mit zunächst jährlich 80 kg N/ha versorgt. Für die physiologisch sauren Varianten wurde schwefelsaures Ammoniak gewählt. Die physiologisch alkalisch zu düngenden Parzellen erhielten Kalkammonsalpeter. Die in den folgenden Jahren unbefriedigende Ertragsentwicklung war begleitet von bzw. Folge einer radikalen Pflanzenbestandsumschichtung, wobei *Carex fusca* auf den sauren Varianten soweit bestandsbestimmend wurde, daß wegen dieser Unterschiede eine Vergleichbarkeit der Versuchsglieder nicht mehr gegeben war. Im Herbst 1972 wurden die pH-Werte nach vorgegebenen Ziel-pH-Werten neu eingestellt. Bereits 1968 wurde eine Nachdränung durchgeführt. Nach Ackerzwecknutzung wurde 1975 erneut zu Dauergrünland angesät.

Die Düngung erfolgte jetzt physiologisch sauer mit Ammonsulfat in Höhe von 80-90 kg N/ha bei Ackernutzung (1972 -1975) und 110-240 kg N/ha zu Grünland. Die physiologisch sauren Parzellen erhielten Superphosphat und Kainit als P- und K-Dünger.

Die physiologisch alkalische Düngung erfolgte mit Kalkammon-

salpeter, Thomasphosphat, Kornkali und ab 1979 mit Thomaskali (10/20).

3. UNTERSUCHUNGSMETHODEN

Bodenproben (0-10 cm) wurden jährlich nach Verbandsmethoden VDLUFA auf pH-Werte, Kalkbedarf, doppelactatlösliche Phosphate und Kalium analysiert. Die pH-Werte werden heute in einer wässrigen (0,01 mol/l) CaCl_2 -Suspension bestimmt, von 1951 bis 1973 erfolgte die Bestimmung in 0,1 mol/l KCl-Lösung, davor in 0,01 mol/l BaCl_2 -Lösung. Um Vergleichbarkeit zu erreichen, muß eine Umrechnung mit folgenden Korrekturfaktoren erfolgen: Umrechnung von KCl auf CaCl_2 : + 0,2 pH; Umrechnung von BaCl_2 auf CaCl_2 : + 1,0 pH. Die potentielle Kationaustauschkapazität (KAK) wird bei pH 7,0, die effektive bei pH 4,5 (DIN 19684, Teil 8) ermittelt. r-Wert und Aschegehalt werden nach DIN 11540 (1989) bestimmt. Die Pflanzeninhaltsstoffe (P und K) werden nach Verbandsmethoden VDLUFA analysiert.

4. ERGEBNISSE

4.1 Entwicklung der pH-Werte

Die Abbildung 2 zeigt die pH-Werte von 1968 bis 1986 in gleitendem 5jährigen Mittel der physiologisch sauer gedüngten Varianten. Die Entwicklung der pH-Werte der physiologisch alkalisch gedüngten Varianten - ebenfalls als gleitende 5jährige Mittelwerte - ist aus Abbildung 3 abzulesen.

Die Ziel-pH-Werte wurden in der gewünschten Abstufung bei allen Varianten bis 1975 zufriedenstellend erreicht. Das gilt sowohl für die physiologisch sauer gedüngten als auch für die physiologisch alkalisch gedüngten Varianten.

Die Kalkbedarfsbestimmung im Labor berücksichtigt nur den aktuellen Kalkbedarf der untersuchten Probe. Nicht berücksichtigt werden dabei die im Boden in Abhängigkeit von biochemischen Umsetzungen, Wurzelausscheidungen und Wurzelaufnahme sowie Depositionen ablaufenden Veränderungen der Wasserstoffionenkonzentrationen. 1972 wurde der in Tabelle 2 dargestellte Kalkbedarf ermittelt; tatsächlich mußte aber auf den physiologisch sauer gedüngten Parzellen wesentlich mehr Kalk aufgebracht werden, und zwar zusätzlich 17 bis 41 dt CaO/ha . So konnte erst 1975 der gewünschte pH-Wert im Boden erreicht werden. Die Kalkung hat also in den physiologisch sauren Varianten die biochemischen Umsetzungen gesteigert (bei einer verstärkten Protonenfreisetzung). In den physiologisch alkalisch gedüngten Varianten entsprach die Aufkalkungsmenge recht gut der nach Kalkbedarfsermittlung errechneten Menge. Ab 1975 erfolgte keine Kalkung mehr.

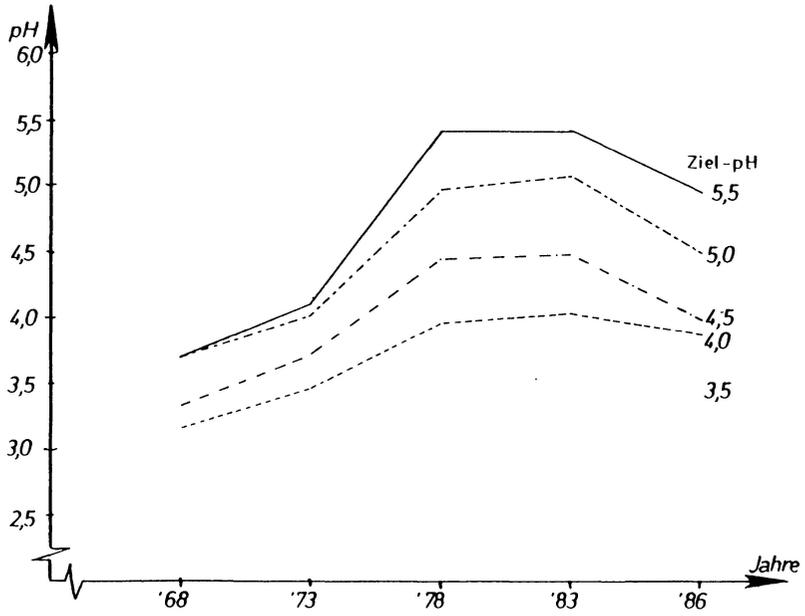


Abb. 2
pH-Werte nach physiologisch saurer Düngung (1968-1986) (gleitende Mittelwerte)
pH-values according to acid fertilizing (1968-1986)

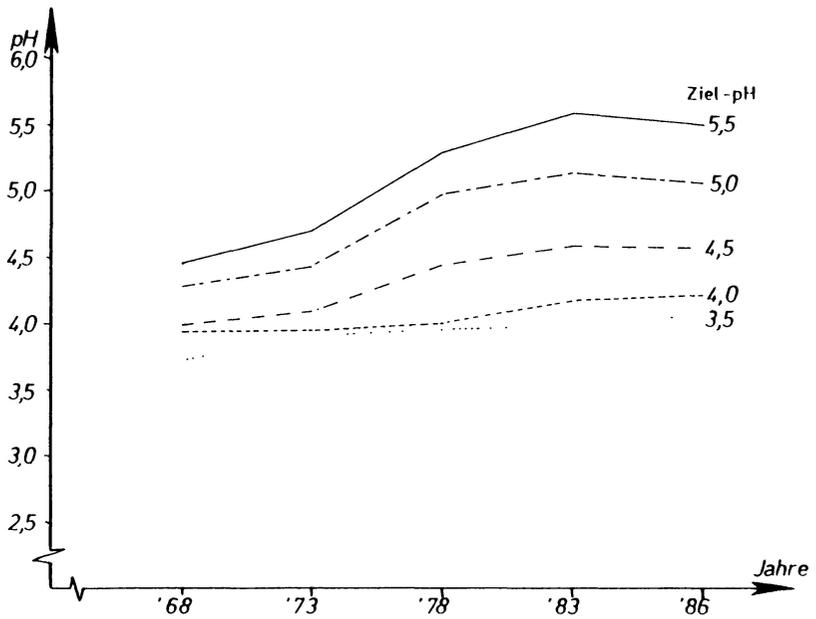


Abb. 3
pH-Werte nach physiologisch alkalischer Düngung (1968-1986) (gleitende Mittelwerte)
pH-values according to alkaline fertilizing

Tab. 2: Errechneter Kalkbedarf 1972 - 1975 und ausgebrachte Kalkmenge (kg CaO/ha) Calculated lime need 1972-1975 and applied lime (kg CaO/ha)			
Ziel-pH	Kalkbedarf nach Boden- untersuchung	tatsächlich ausge- brachte CaO-Menge	über Phosphat- dünger zusätzl. ausgebrachte Kalkmengen
physiologisch saure Varianten			
3,5	890	2600	530 *
4,0	2900	5700	530 *
4,5	4100	7100	530 *
5,0	5400	8700	530 *
5,5	6600	10700	530 *
physiologisch alkalische Varianten			
3,5	0	1700	4760
4,0	1000	1800	4760
4,5	4200	4200	4760
5,0	4900	5700	4760
5,5	6500	7000	4760

* einmalige Kalkgabe 1982

Auf den physiologisch sauer gedüngten Parzellen bestand rechnerisch ein jährlicher Kalkverlust durch die kalkzehrende Stickstoffdüngung von im Mittel 420 kg CaO/ha in dem Versuchszeitraum von 1972-1989. Nur 1982 wurden die physiologisch sauren Varianten einmalig mit 530 kg CaO/ha gekalkt. Daher erklärt sich, daß diese Parzellen deutlich niedrigere pH-Werte aufweisen als die physiologisch alkalisch gedüngten.

Dagegen wurde ein Kalkausgleich auf den physiologisch alkalisch gedüngten Parzellen annähernd über die Kalkgehalte in den Mineraldüngern erreicht. Insgesamt wurden den fünf physiologisch alkalisch gedüngten Parzellen so jährlich im Mittel 280 kg CaO/ha aus Thomaskali bzw. Thomosphosphat zugeführt, von denen rechnerisch der physiologisch schwach saure Kalkammonsalpeter ca. 50 kg CaO/ha zur Neutralisation verbrauchte. Diese Kalkzufuhr hat demnach ausgereicht, die pH-Werte dieser Parzellen konstant zu halten.

4.2. Entwicklung der Pflanzenbestände (1987)

Die Versuchsfläche wurde in regelmäßigen Abständen vom Geo-

4.3 Beeinflussung der Grünlanderträge durch die pH-Werte

Durch eine zusätzliche Stickstoffdüngung von anfänglich nur 80 kg/ha·a lassen sich von 1968 ab die Grünlanderträge der sauer gedüngten Varianten (Ausnahme pH 3,5) zwar positiv beeinflussen; die Erträge der alkalisch gedüngten Variante werden jedoch nicht erreicht. Die unausgeglichene Ertragsbeeinflussung ist größtenteils auf die Umstellung der Pflanzenbestände zurückzuführen, deshalb wurde, wie bereits erwähnt, zur Neuansaat umgebrochen. Nach dieser mit Nachkalkungen verbundenen Maßnahme ergeben sich von 1978-1986 nach Neuansaat und je nach Zahl der Schnitte zwischen 140 und 180 N/ha jährlich variiertes Stickstoffdüngung bei nun höheren pH-Werten steigende Erträge bis über 100 dt/ha TM sowohl auf den sauer als auch auf den alkalisch gedüngten Varianten (Abb. 4 u. 5).

Im Aufwuchs wurden jeweils die Phosphor- und Kaliumgehalte bestimmt. Aus dem Produkt mit den Trockenmasse-Erträgen wurde der Entzug errechnet. Für die pflanzliche Aufnahme von P (Tab. 4) spielt weniger der pH-Wert als die langjährig physiologisch saure oder alkalische Düngung eine Rolle. Die Änderungen der P-Gehalte der Pflanzen auf den verschiedenen pH-Varianten sind gegeneinander nicht absicherbar. Die von 1978 ab optimierte Phosphatdüngung hat wesentlichen Einfluß auf die P-Gehalte im Aufwuchs. Nach physiologisch saurer Düngung mit 80 kg P₂O₅/ha·a liegen 1978/1986 die Phosphatgehalte im Aufwuchs um 0,09 % Punkte höher als 1969/1972. Bei derselben Faktorenkombination, jedoch nach physiologisch alkalischer Düngung, werden die Phosphatgehalte von 0,26 auf 0,37 % P/TM erhöht.

Auch für Kalium wird in Tabelle 4 zwischen dem Abschnitt 1969/72 mit geringerem Düngungsniveau (120 kg K₂O/ha·a) und dem mit intensiver Düngung 1978/86 (220 kg K₂O/ha·a) verglichen. Hier hat die langjährige Abstufung der pH-Werte einen deutlichen Einfluß. Mit steigendem pH-Wert im Boden zeigen vor allem in den Jahren 1978/86 die physiologisch sauren Varianten eine deutlich fallende Tendenz der K-Gehalte im Aufwuchs. Die Kalium-Aufnahme der Pflanzen ist nach physiologisch saurer Düngung erhöht; dies gilt vor allem für den Abschnitt 1969 bis 1972 bei verhaltener Kalidüngung. Erwartungsgemäß ist die Calciumaufnahme in den Pflanzen nach physiologisch alkalischer Düngung etwa doppelt so hoch wie nach physiologisch saurer Düngung.

Die errechneten P- und K-Entzüge in Tabelle 5 richten sich bei geringen Gehaltsunterschieden mehr nach den mit den pH-Werten steigenden Trockenmasseerträgen. Bei über alle Varianten gleicher Phosphatdüngung von 80 kg P₂O₅/ha·a = 35 kg/ha P wird durch die geringeren Erträge auf den Varianten mit pH-Wert 3,5 und 4,0 mehr Phosphat gedüngt, als dem Boden entzogen wurde. Bei den Varianten mit pH-Wert 4,5 - 5,0 ist die Düngung entzugsgerecht erfolgt. Bei pH-Wert 5,5 ergibt sich eine geringfügig negative Bilanz. Im Durchschnitt ist die P-Bilanz nahezu ausgeglichen.

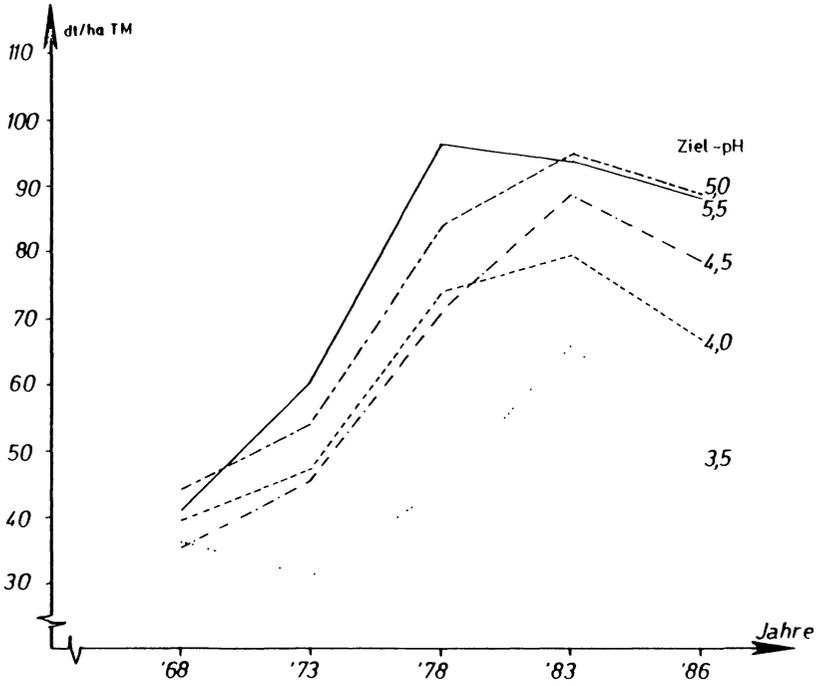


Abb. 4
Graserträge nach physiologisch saurer Düngung (1968-1986) (dt TM/ha)
Grassland yield according to acid fertilizing (1968-1986) (dt/ha DM)

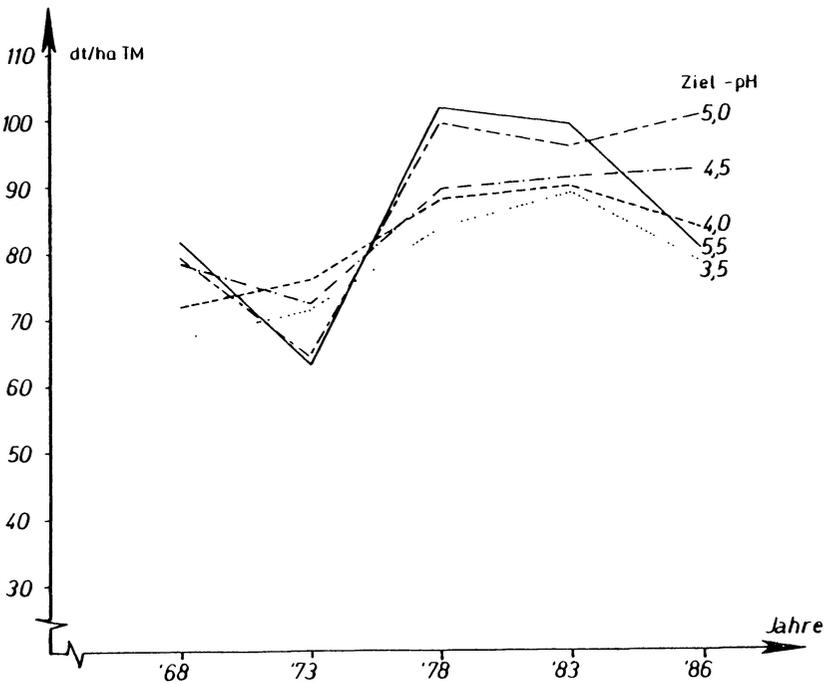


Abb. 5
Graserträge nach physiologisch alkalischer Düngung (1968-1986) (dt TM/ha)
Grassland yield according to alkaline fertilizing (1968-1986) (dt/ha DM)

Tab. 4: Mittlere P-, K- und Ca-Gehalte in Pflanzen (% TM) und Düngungsform P-, K-, Ca-contents in plants (% DM) and fertilizing form						
Ziel- pH	physiologisch-sauer					\bar{x}
	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	
<u>Phosphor</u>						
1969-72	0,35	0,32	0,33	0,35	0,35	0,34
1978-86	0,46	0,42	0,43	0,42	0,41	0,43
<u>Kalium</u>						
1969-72	1,93	1,84	1,95	2,17	2,19	2,02
1978-86	2,97	2,57	2,53	2,38	2,42	2,57
<u>Calcium</u>						
1969-72	0,23	0,25	0,27	0,25	0,25	0,25
1978-86	0,35	0,31	0,27	0,28	0,29	0,30
Ziel pH	physiologisch-alkalisch					\bar{x}
	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	
<u>Phosphor</u>						
1969-72	0,28	0,26	0,25	0,27	0,25	0,26
1978-86	0,36	0,36	0,36	0,38	0,38	0,37
<u>Kalium</u>						
1969-72	1,86	1,90	1,69	1,84	1,66	1,79
1978-86	2,50	2,46	2,41	2,43	2,56	2,47
<u>Calcium</u>						
1969-72	0,48	0,49	0,60	0,64	0,68	0,58
1978-86	0,48	0,55	0,59	0,62	0,56	0,56

Tab. 5: Mittlere P-, K-Entzüge (kg/ha·a) und Düngungsform P-, K-uptakes by plants (kg/ha·a) and fertilizing form						
Ziel- pH	physiologisch-sauer					\bar{x}
	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	
<u>Phosphor</u>						
1969-72	9,4	10,11	11,4	13,4	15,5	12,0
1978-86	25,7	32,6	35,3	35,5	38,3	33,5
<u>Kalium</u>						
1969-72	52,6	60,5	66,7	80,8	93,3	70,9
1978-86	167,8	200,0	209,5	217,2	227,3	204,4
Ziel- pH	physiologisch-alkalisch					\bar{x}
	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	
<u>Phosphor</u>						
1969-72	15,8	15,9	15,2	17,2	16,5	16,1
1978-86	29,6	30,0	33,4	36,9	37,3	33,4
<u>Kalium</u>						
1969-72	104,3	115,3	104,8	116,4	109,8	110,1
1978-86	219,2	219,3	225,7	238,9	253,0	231,2

Die Kaliumbilanz ist 1978/86 nur auf der Variante pH 3,5 physiologisch sauer gedüngt ausgeglichen, sonst zunehmend mit dem pH-Wert stark negativ. Je höher der pH-Wert des Hochmoorbodens ist, desto stärker wird Kalium durch die Pflanzen entzogen. Bei einer Düngung von 220 kg K₂O/ha·a = 170 kg K/ha wurden jährlich nach physiologisch saurer Düngung 30-57 kg/ha K mehr entzogen als gedüngt wurde. Auf den alkalisch gedüngten Flächen beträgt die Kaliumaufnahme durch die Pflanzen sogar 49 bis 63 kg K/ha·a mehr als 1978/86 gedüngt wurde.

Bis 1972 wurde dagegen mehr Kalium gedüngt als entzogen, so daß die DL-Werte bis auf 15 mg K₂O/100 ml Boden selbst in diesen sorptionsschwachen Hochmoortorfen angestiegen waren. In den Folgejahren wurde mehr Kalium entzogen als gedüngt. Dieser Bilanzüberschuß stammt aus dem Unterboden. Im folgenden Abschnitt werden die Veränderungen der Nährstoffgehalte P und K im Boden in Abhängigkeit von der Zeit und dem pH-Wert dargestellt.

4.4 pH-Werte und Nährstoffgehalte im Boden

4.4.1 Phosphat

Die unterschiedlichen pH-Werte im Hochmoorboden dieses Versuches beeinflussen neben den Erträgen auch die Verfügbarkeit von Pflanzennährstoffen, insbesondere die von Phosphat (Abb. 6 u.7). Nach dem Umbruch mit Nachkalkungen kommt es vorübergehend zur Phosphat-Mobilisation, wodurch die DL-P₂O₅-Gehalte bis zu 15 mg/100 ml Boden ansteigen. In beiden Versuchsteilen (physiologisch sauer bis physiologisch alkalisch) haben die Varianten mit den höheren pH-Werten die höchsten Gehalte an DL-P₂O₅ über den gesamten Versuchszeitraum. Von 1981/82 ab stellen sich konstante Werte ein mit max. 10 mg P₂O₅/100 ml Boden. Die geringen Gehalte an DL-löslichem Phosphat bei den niedrigeren pH-Stufen deuten an, daß hier eine höhere Phosphatverlagerung stattfindet. Hochmoorböden haben fast keine Phosphat-Sorption; Düngephosphate sind daher von pH 4,5 ab in diesen Böden sehr mobil. Daher werden auch im Dränwasser stets relativ hohe Phosphatkonzentrationen gemessen (SCHEFFER und KUNTZE, 1989). Erst mit Aufkalkung der pH-Werte über 6,0 kann der Phosphat-austrag deutlich gesenkt werden (SCHEFFER u. BLANKENBURG, 1978). Dieser hohe pH-Wert ist jedoch aus Gründen der Substanzerhaltung abzulehnen (s. Abschnitt 4.5). Daher gilt auch noch heute die Düngungsempfehlung von BADEN (1966), die Höhe der Phosphatdüngung auf diesem Boden bei einem pH-Wert von 4,5 nach Erreichen von 5-7 mg P₂O₅/100 ml Boden ausschließlich nach dem Bedarf der Pflanze zu bemessen. Eine höhere Bevorratung des Phosphates im Hochmoorboden ist nur bei höheren pH-Werten möglich.

Bei Grünlandnutzung werden die Düngemittel stets auf die Narbe ausgebracht, so daß es hier im Laufe der Zeit - verbunden mit der Mineralisierung der Torfe - zu einer Ca- und P-Akkumulation kommt. Diese ist umso ausgeprägter, je höher die pH-Werte sind (KUNTZE, 1982).

BADEN hat 1966 eine erste Auswertung des Feldversuches in Königsmoor vorgenommen und konnte zeigen, daß die Gehalte an doppelactatlöslichem Phosphat mit zunehmendem pH-Wert des Hochmoorbodens ansteigen und bereits unterhalb von 10 cm unter GOF nur noch Spuren von Phosphat vorhanden sind. Dort nicht sorbiertes Phosphat unterliegt der Auswaschung. Die geringen Phosphatgehalte unterhalb von 10 cm des Grünlandstandortes liegen in der gleichen Größenordnung wie die von unkultiviertem Hochmoor.

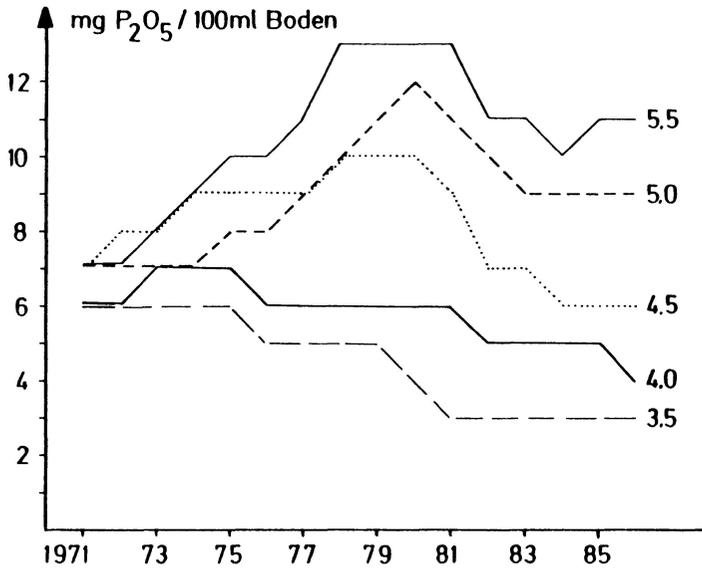


Abb. 6

DL-P₂O₅ (mg/100 ml Boden) in 0-10 cm Tiefe der physiologisch sauer gedüngten Varianten (1971-1986) (gleitende Mittelwerte)

DL-P₂O₅ (mg/100 ml soil) in a depth of 0-10 cm, according to acid fertilizing, 1971-1986

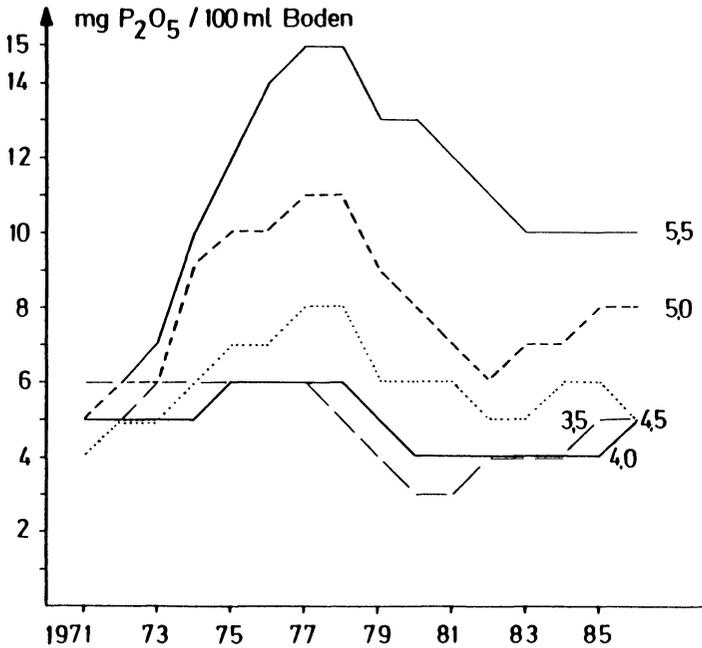


Abb. 7

DL-P₂O₅ (mg/100 ml Boden) in 0-10 cm Tiefe der physiologisch alkalisch gedüngten Varianten (1971-1986) (gleitende Mittelwerte)

DL-P₂O₅ (mg/100 soil) in a depth of 0-10 cm, according to alkaline fertilizing, 1971-1986

4.4.2 Kalium

Die Kaliumgehalte (DL-lösliches K_2O) sind von 1971 ab als gleitende Mittelwerte in Tabelle 6 aufgeführt. Zusätzlich enthält diese Tabelle auch die jährliche K-Düngung, die steigenden Erträgen/Entzügen angepaßt wurde. Eine Abhängigkeit von den pH-Werten, so wie von BADEN (1966) beschrieben, ist nach Umstellen der pH-Steigerungsvarianten auf zusätzliche N-Düngung nicht mehr zu erkennen. Die anfänglich hohe Bevorratung auf dem physiologisch sauer gedüngten Teilstück des Feldversuches 23 sinkt mit den auch hier steigenden Erträgen von 1975/76 ab. Nur die Variante mit pH-Wert 3,5 behält relativ hohe DL- K_2O -Gehalte.

Über die gesamte Zeitdauer des Versuchs stellen sich einheitliche DL- K_2O -Gehalte von 3-5 mg/100 ml Boden ein. Die seit 1971 in allen Varianten zurückgehenden Gehalte an doppellactatlöslichem Kalium sind darauf zurückzuführen, daß bis auf die pH-Stufe 3,5 der physiologisch sauren Variante der Kaliumentzug des Aufwuchses seit 1978 stets deutlich über der Kaliumdüngung liegt. Daher sollte zukünftig die Kaliumdüngung besser auf den Entzug abgestimmt werden, um den Boden nicht weiter an Kalium verarmen zu lassen.

Kalium (K^+) wird im Hochmoorboden nicht sorbiert, insbesondere nicht bei überdurchschnittlichem Ca^{2+} -Angebot. Es unterliegt daher verstärkt der Auswaschung, wenn es nicht von Pflanzen aufgenommen wird. Zwar wird die Kationenaustauschkapazität der Hochmoortorfe durch diese pH-Wert-Anhebung gesteigert, aber wegen der spezifischen selektiven Sorption von zweiwertigen Kationen (wie Ca^{2+}) sind diese zusätzlichen Plätze mit Calcium belegt (s. Abschnitt 4.6). Ein Austausch der Calciumionen ist auch mit hohen K-Gaben nicht möglich (SCHEFFER u. BARTELS, 1982).

4.5 pH-Wert und Torfeigenschaften

Durch Kalkung von Moorböden werden der biochemische Umsatz und die Humifizierung gefördert. Dieses ist bei bestimmter Bodenfeuchte durch die dunklere Färbung des Bodens der Varianten mit den höheren pH-Stufen zu erkennen. Deshalb wurden bei den langjährig mit unterschiedlichem pH-Wert eingestellten Varianten die pH-Wert abhängigen Zersetzungs- und Humifizierungsgrade, welche die Qualität der Huminstoffe bestimmen, sowie die C- und N-Gehalte, die Kationenaustauschkapazität (KAK), die Basensättigung (V%) und Sorptionsverhältnisse untersucht. Nach einem Zeitraum von 60 Jahren sollen damit anthropogene Bodenveränderungen festgestellt werden.

4.5.1 pH-Wert und Humifizierung

Da bei den stark durchwurzelten und zersetzten Krumentorfen die Ansprache nach v. POST keine wesentlichen Abstufungen erbrachte,

wurde der r-Wert nach DIN 11540 bestimmt. Auch der nichtsäurehydrolysierte Anteil der organischen Verbindungen läßt keine sichere Beziehung zum steigenden pH-Wert erkennen (Tab.7).

Auffallend ist, daß in beiden physiologisch unterschiedlich gedüngten Teilen des Versuchs im mittleren pH-Bereich 4,5 der jeweils geringste r-Wert festgestellt wurde, mit deutlicher Zunahme zu den höheren und tieferen pH-Werten. Im Mittel ist durch physiologisch alkalische Düngung im Hochmoorboden ein um 0,8 höherer r-Wert festzustellen, mit größerer Differenz von 2-4 bei pH-Werten von 5,5 bzw. 3,5.

Tab. 7: Ziel-pH-Werte und r-Werte unterschiedlich gekalkter und gedüngter Hochmoorböden (0-10 cm), 1988 pH-values and r-values of different limed and fertilized raised-bog soils in 1988 (0-10 cm depth)		
Ziel-pH-Werte	r-Wert bei physiologisch saurer Düngung	r-Wert bei physiologisch alkal. Düngung
3,5	52	56
4,0	50	51
4,5	49	49
5,0	52	53
5,5	56	54
\bar{x}	51,8	52,6

4.5.2 pH-Wert und Humusgehalt sowie Humusqualität

Durch pH-Wert-Erhöhung wird die Mineralisierung gefördert. Das belegen in Tabelle 8 die mit dem pH-Wert steigenden Aschegehalte. Im Vergleich zu Werten aus 1960 (BADEN, 1966) sind die mittleren Aschegehalte bis 10 cm Tiefe durch weitere 28 Jahre Einwirkung des Kalkes jetzt in einer Höhe, wie sie damals nur für die oberen 2,5 - 5 cm festgestellt wurden.

Jetzt sind nur noch in der stets physiologisch sauer gedüngten Versuchsreihe mit steigendem pH-Wert deutliche Zunahmen des Aschegehaltes zu erkennen. Bei physiologisch alkalischer Düngung wird der auch hier ursprünglich vorhandene Unterschied im Aschegehalt im Boden nicht mehr festgestellt. Offensichtlich reicht die langjährige Basenzufuhr bei dieser Düngungsform aus, um auch bei niedrigeren Boden-pH-Werten die Mineralisierung zu fördern; dies um so mehr, je tiefer der ursprüngliche pH-Wert lag. Bei physiologisch saurer Düngung verdoppelt sich der Aschegehalt von pH 3,5 auf 5,5 und damit

der Torfschwund, bei physiologisch alkalischer Düngung werden im extrem sauren Bereich genauso hohe Aschegehalte ermittelt wie bei der höchsten pH-Stufe.

Tab. 8: Ziel-pH-Werte und Aschegehalte (%TM) des Krumbodens (0-10 cm), 1988 pH-values and ash contents (% DM) of the crumb in 1988 (0-10 cm depth)		
Ziel-pH-Werte	Aschegehalte bei physiologisch saurer Düngung	Aschegehalte bei physiologisch alkal. Düngung
3,5	7,5	18,0
4,0	8,4	15,0
4,5	9,3	13,3
5,0	11,8	12,0
5,5	17,0	17,3

Neben den unterschiedlichen Gehalten an organischer Substanz ist durch die Kohlenstoff- und Stickstoffanalyse in den Krumböden auch eine qualitative Veränderung der Torfsubstanz im Hochmoorboden mit Huminstoffneubildung festzustellen (Tab. 9).

Tab. 9: Ziel-pH-Werte und C/N-Verhältnisse (0-10 cm), 1988 pH-values and C/N-ratios in 1988 (0-10 cm depth)										
Ziel- pH-Werte	physiol.saure Düngung					physiol.alkal.Düngung				
	C _t	C _{org}	N _t	N _{org}	C/N	C _t	C _{org}	N _t	N _{org}	C/N
3,5	50	54	1,4	1,5	36	49	53	1,6	2,0	30
4,0	49	53	1,4	1,6	34	48	52	1,7	2,1	27
4,5	48	53	1,6	1,7	30	46	53	1,9	2,2	24
5,0	47	54	1,8	2,0	28	46	52	1,9	2,3	24
5,5	44	53	1,7	2,1	26	44	53	1,9	2,3	23

Mit zunehmendem pH-Wert und Ascheanteil (Tab. 8) sinkt der C_t-Gehalt der Moorböden in der physiologisch sauer gedüngten Versuchsreihe. Dieser Trend deutet sich unabhängig vom Aschegehalt auch bei physiologisch alkalischer Düngung an. Bezieht man dagegen den Kohlenstoffgehalt auf die aschefreie organische Bo-

densubstanz (C_{Org}), so ergibt sich in beiden Versuchsreihen ein überraschend gleichmäßiger C_{Org} -Gehalt von 52-54 %, der eine recht gute Humifizierung in den Krummentorfen in der 60-jährigen Versuchszeit ausdrückt. Wenig zersetzte Torfe haben einen Kohlenstoffgehalt von 46-48 %, Grauhuminsäuren von 58 %.

Der N_t -Gehalt deutet eine N-Anreicherung mit steigendem pH-Wert und Aschegehalt an. Wieder auf die aschefreie, organische Trockensubstanz bezogen (N_{Org}), wird dieses stärker verdeutlicht. Insgesamt wird durch physiologisch alkalische Düngung stets ein höherer N-Gehalt im Hochmoorboden erreicht als bei physiologisch saurer Düngung. Mit durchschnittlich 2,2 % N_{Org} bei physiologisch alkalischer Düngung bzw. 1,8 % N_{Org} bei physiologisch saurer Düngung sind anthropogen in der Narbe dieses Standortes einer Deutschen Hochmoorkultur durch eine Verdoppelung des ursprünglichen Stickstoffgehaltes ($\ll 1$ %) und mit dem bis zu 10fachen des ursprünglichen Aschegehaltes der Hochmoortorfe (2 %) niedermoorartige Verhältnisse erreicht worden. KUNTZE (1982) stellte bei gealterter Dauergrünlandnarbe N_t -Gehalte bis $\gg 2,5$ Gew.% fest, insbesondere in den oberen 5 cm der Narbe. Dabei ist die Humusbildung aus der N-reichen Wurzelmasse zu berücksichtigen. Je höher der jeweils eingestellte pH-Wert ist, um so enger wird also langfristig das C/N-Verhältnis. Dieses ist bei physiologisch alkalischer Düngung zudem jeweils um durchschnittlich 20 % enger als bei physiologisch saurer Düngung. Gegenüber C/N-Verhältnissen von 50-60 im Ausgangshochmoortorf (Weißtorf) wird die Moorbodenbildung durch diese ebenfalls dem Niedermoorboden ähnliche Verengung des C/N-Verhältnisses besonders deutlich.

4.6 pH-Wert und Sorptionsverhältnisse

Nach PUUSTJÄRVI (1981) steigt die Kationenaustauschkapazität (KAK) der Torfe mit dem Zersetzungsgrad. Sie ist auch stark abhängig von der Humusqualität (KUNTZE et.al., 1988).

Man unterscheidet eine aktuelle und eine potentielle KAK. Die aktuelle ergibt sich bei vorgegebenem pH-Wert 4,5 für Hochmoortorfe aus der Summe der austauschbaren Kationen, die potentielle nach dem methodisch jeweils gewählten höheren pH-Wert (7,0 - 8,2) für die Austauschlösung. Die potentielle KAK steigt wegen des hohen Anteils an variabler Ladung bei organischen Austauschern mit dem pH der Austauschlösung (Tab. 10). Sie wird bei Moorböden wegen ihrer geringen Rohdichte trocken in mmol/l Boden ausgedrückt.

Vergleicht man diese Werte mit den Austauschkapazitäten von Mineralböden (KUNTZE et.al., 1988), entsprechen die volumenbezogenen Werte der aktuellen und potentiellen KAK etwa denjenigen von Lehmböden. Bei Volumenbezug fällt die potentielle KAK mit steigendem Ziel-pH-Wert in der physiologisch alkalisch gedüngten Variante stärker als in der physiologisch sauer gedüngten. Dieses Verhalten wird mit der bei steigendem Ca^{++} -Ionen-Angebot starken Bindungsintensität dieses Kations an die sauren

Gruppen der Torf-/Humussubstanzen erklärt. Dadurch nimmt der austauschbare H⁺-Anteil ab.

Tab. 10:
Abhängigkeit der Kationenaustauschkapazität (mmol/l) vom pH-Wert (0-10 cm), 1988
pH-values and cation exchange capacity (mmol/l) of soils (0-10 cm depth), 1988

Ziel-pH-Werte	aktuelle KAK (pH 4,5)		potentielle KAK (pH 7,0)	
	physiol. saure Düngung	physiol. alkal. Düngung	physiol. saure Düngung	physiol. alkal. Düngung
	3,5	89	167	197
4,0	99	145	185	205
4,5	94	152	167	186
5,0	120	141	172	165
5,5	132	137	177	165

Tabelle 11:
Ziel-pH-Werte, Düngungsform und Sorption (%), 1988
pH-values, fertilizing form and actual sorption (%), 1988

Düngung u. Ziel-pH-Werte	H ⁺	Basensättigung V%	Ca %	Mg %	Na %	K %	Ca/Mg	Na/K
s*) 3,5	80	20	5	8	7	1,9	0,5	3,7
4,0	73	27	7	12	8	0,3	0,6	27
4,5	68	32	9	14	8	0,2	0,6	40
5,0	47	53	16	24	11	0,5	0,6	22
5,5	34	66	10	32	15	0,4	0,6	37
a*) 3,5	54	46	21	19	3	2,5	1,1	1,2
4,0	48	52	29	24	2	1,1	1,2	1,9
4,5	25	75	34	28	4	1,0	1,2	4,0
5,0	19	81	40	31	5	1,4	1,2	3,6
5,5	0	100	47	47	6	0,1	1,0	-

s*) = physiol.sauer

a*) = physiol.alkalisch

Sehr aufschlußreich sind die z.T. beachtlichen Verschiebungen der Sorptionsverhältnisse in Abhängigkeit vom eingestellten pH-Wert (s. Tab. 11). Mit steigendem Ziel-pH-Wert fällt die H^+ -Sorptions von 80 auf 34 % in der physiologisch sauer gedüngten Variante, von 54 auf 0 % in der physiologisch alkalisch gedüngten. Der Basensättigungswert (V-Wert) verhält sich reziprok. Die zunehmende Basensättigung betrifft vor allem die Erdalkalitionen Ca^{++} und Mg^{++} . Während das Ca/Mg-Verhältnis in der physiologisch sauer gedüngten Variante konstant bei 0,6 in fast allen Ziel-pH-Stufen bleibt, liegt es in den physiologisch alkalisch gedüngten Vergleichsparzellen im Mittel bei 1,2.

Die im Vergleich dazu geringe Alkaliionensorption der Hochmoortorfe wird mit der Kalkung zugunsten des Natriums verschoben. Da die physiologisch sauer gedüngten Teilstücke jeweils Kainit erhielten, ist dort die Na-Sorption besonders hoch. Auch die Erweiterung des Na/K-Verhältnisses mit steigendem Ziel-pH-Wert drückt die unterschiedliche Form der Düngung physiologisch alkalisch < physiologisch sauer aus. Je höher ein Hochmoortorf aufgekalkt wird, um so geringer ist die Kaliumsorptions. Dies wird auch in den fallenden doppellactatlöslichen Kaliumanteilen deutlich (Tabelle 6).

Physiologisch saure Düngung auf Hochmoor bei einem Ziel-pH-Wert von 5,0 führt zu etwa gleichen V-Werten wie eine physiologisch alkalische Düngung bei einem Ziel-pH-Wert von 4,0. Geht man davon aus, daß wechselnde physiologisch saure und alkalische Düngung vorherrscht, dürfte ein Ziel-pH-Wert von 4,5 im Hinblick auf Bodenbildungsprozesse (Humifizierung sowohl in der Mengenbilanz als auch Qualität der organischen Substanz) ein optimaler pH-Wert sein.

4.7 pH-Wert und Höhenverluste

Die Abnahme der Torfmächtigkeit nach einer Kultivierung und infolge landbaulicher Nutzung wird auf 4 Prozesse zurückgeführt:

- Sackung (in Abhängigkeit von Entwässerungstiefe, Torfmächtigkeit und Lagerungsdichte) vornehmlich in den ersten Jahren nach der Entwässerung
- Mineralisierung und Humifizierung (Torfschwund i.e.S.) als kontinuierlicher Prozeß je nach Nutzungsintensität
- Schrumpfung (in Abhängigkeit von Zersetzungsgrad und Humifizierung)
- Bodenabtrag durch Winderosion (bei Ackerbau durch zeitweise vegetationsfreie Bodenfläche).

Das Versuchsfeld wurde 1911 kultiviert. 1950 waren die Vorflutverhältnisse inzwischen durch die genannten Prozesse so verschlechtert, daß eine zweite Entwässerung, jetzt mit künstlicher Vorflut, notwendig wurde. Die bis 1960 dadurch eingetretenen Sackungen wurden von EGGELSMANN (1960) ermittelt. 1972 wurde eine weitere Bedarfsdrainage erforderlich.

Bei der Anlage des Feldversuches wurden die unterschiedlichen Torfmächtigkeiten nicht berücksichtigt. Zufällig liegen die hoch aufgekalkten Varianten im Bereich größter (> 3 m), die sauren bei jetzt nur noch 0,5 m Moortiefe. Eine 1989 wiederholte Moortiefenpeilung und ein Feinnivellement ergaben, daß seit der letzten Höhenaufnahme (1960) keine weiteren Moorsackungen mehr eingetreten sind, denn unabhängig von der Moortiefe sind in den letzten vier Jahrzehnten signifikante Höhenverluste nicht festzustellen. Die mittleren Höhenverluste aller Varianten betragen in diesem Zeitraum 44 cm oder 1,1 cm jährlich (Tab. 12).

Tab. 12: Höhenverluste (cm) 1950-1989 und Düngungsform Lost of bog depth (cm) 1950-1989 and fertilizing form			
Ziel- pH-Werte	physiologisch saure Düngung (s)	physiologisch alkal. Düngung (a)	a - s
3,5	48	59	11
4,0	50	55	5
4,5	42	51	9
5,0	30	38	8
5,5	29	35	6
\bar{x} cm/a	40 1	48 1,2	8 0,2

Selbst wenn sorgfältigst die gleichen Meßpunkte bei gleicher Punktdichte (5 x 5 m) gewählt wurden und bei Wiesennutzung im Vergleich zur Weide (Trittschäden) oder gar Ackerland (Furchen) kleinräumige Unterschiede vernachlässigt werden können, sind in diesen Vergleichsmessungen auch andere Einflüsse auf das Meßergebnis zu berücksichtigen. Das vorletzte Nivellement wurde im Februar 1960, also in einer Zeit höchster Wassersättigung und Quellung, die jüngste Höhenaufnahme dagegen im August 1989, einem extrem trockenen Sommer, durchgeführt. Durch Mooratmung (Oszillation) sind Differenzen von etwa 4-6 cm möglich. Dies entspräche etwa 10 % der Höhendifferenz 1950/1989. Mit 1,1 cm jährlichem Höhenverlust, überwiegend durch Mineralisation, sind deutlich höhere Verlustraten im letzten Versuchsabschnitt durch zwischenzeitlich mehrjährige Ackernutzung und hohe N-Düngung (180 kg/ha) sowie nochmalige Kalkung (1972/74) aufgetreten, als für Hochmoorgrünland mit 0,5 cm jährlich bisher angenommen wurde.

Wegen der bereits erwähnten Unterschiede in der Torfmächtig-

keit ist eine Auswertung in Abhängigkeit von der pH-Abstufung nicht möglich, wohl aber der Parallelvergleich zwischen ständig physiologisch alkalischer bzw. physiologisch saurer Düngung. Die jeweiligen Unterschiede in den parallelen pH-Abstufungen sind nicht signifikant. Im Mittel wurden 8 cm Höhenunterschiede zwischen der physiologisch alkalischen und sauren Variante errechnet. Dies bedeutet wiederum, daß weniger der ursprünglich mit der Meliorationskalkung eingestellte pH-Wert als vielmehr die jährlich unterschiedliche Basenzufuhr neben der N-Düngung die Moorbodenbildung durch Mineralisation und Humifizierung bestimmen.

Geht man jedoch davon aus, daß analog zu den höheren Erträgen bei hohen pH-Werten auch in diesen Varianten eine höhere Wurzelmassebildung den Torfschwund kompensiert, ließen sich diese geringen Unterschiede zwischen den Varianten erklären. SEGEBERG u. SCHRÖDER gingen 1952 noch davon aus, daß sich unter Dauergrünland auf Deutscher Hochmoorkultur (unter der Nutzungsintensität der Vor- und Nachkriegsjahre!) damit eine völlige Kompensation der Torfverluste erzielen ließe. Daß dieses zumindest heute nicht mehr zutrifft, soll die nachfolgende Bilanzierung aufzeigen.

Der Trockenmasseertrag (oberirdisch) von Moorbiesen beträgt inzwischen bei jährlich 180 kg N/ha, 80 kg P₂O₅/ha, 240 kg K₂O/ha und ausgeglichener Wasserversorgung im Mittel 100 dt/ha (s. Abb. 4 u. 5) wie auf Mineralböden. Unterstellt man einen gleich hohen unterirdischen Trockenmasseertrag, so ist dieser dem Torfschwund von 1,1 cm x 240 g/l Rohdichte gealterter Hochmoorkulturen gegenüberzustellen. Dies ergibt, bezogen auf 1 ha, einen Verlust von 264 dt/ha Torftrockenmasse. Mithin wäre nur eine Kompensation des Verlustes in Höhe von ca. 40 % möglich. Bei früheren Heuerträgen von nur 50 dt/ha ohne Stickstoffdüngung und entsprechend mit 0,5 cm geringeren jährlichen Höhenverlusten sowie einer bei jüngeren Deutschen Hochmoorkulturen noch geringen Rohdichte von 100 g/l wurde eine fast ausgeglichene Bilanz erreicht (jährlicher Torfschwund 50 dt/ha Trockenmasse gegenüber 50 dt/ha Wurzeltrockenmasseneubildung).

Der geringere Wurzelmasseanteil in den sauren Varianten bei dort um bis zu 50 % geringerem Ertrag beeinflusst nun nicht nur die Menge, sondern auch die Qualität der organischen Moorbodensubstanz. Dies erklärt auch die höhere Kationenaustauschkapazität in den sauren Varianten.

5. DISKUSSION

5.1 Unter Bodenschutzaspekten

Die Entwicklung vom Torf zum Moorboden ist im Hochmoor besonders stark anthropogen bestimmt. Es dauert jedoch Jahrzehnte, um Unterschiede in der Bodenentwicklung aufzuzeigen, die durch verschiedene Nutzung, Düngung und Kalkung hervorgerufen werden.

Das unterstreicht die Notwendigkeit von Dauerversuchen. So sind viele wertvolle alte Versuchsflächen, die heute wichtige Aussagen zum Boden- und Gewässerschutz liefern könnten, mit der Aufhebung und Aufsiedlung der Moorversuchswirtschaft Domäne Königsmoor bedauerlicherweise durch praktische Nutzungen überprägt und somit nicht mehr auswertbar. Einer der wenigen mühsam erhaltenen Dauerversuche ist der von TACKE 1927 zur Frage des pH-Optimums auf Hochmoorböden angelegte Kalksteigerungs- und Düngeformenversuch.

Vergleicht man die Aussagen BADEN's (1966) über die ersten 4 Jahrzehnte dieses Versuchs in Wiesennutzung mit der anfangs üblichen verhaltenen PK-Düngung (30 kg P_2O_5 /ha und 120 kg K_2O /ha) ohne Stickstoff mit den folgenden 2 Jahrzehnten intensiver NPK-Düngung, so sind im letzten, nur halb so langen Versuchszeitraum stärkere Veränderungen im Moorboden und in der Vegetation bei deutlich erhöhtem Ertragspotential eingetreten als im 1. Versuchsabschnitt.

Schon wenige Jahre nach Einsetzen der Stickstoffdüngung mußte die Fläche infolge negativer Bestandsentwicklungen umgebrochen und die pH-Unterschiede neu eingestellt werden. Mit der zunehmenden Düngungs- und Nutzungsintensität entwickelten sich Nährstoffprofile (KUNTZE, 1982), die zu einer "Kopflastigkeit" in bezug auf die Nährstoffverteilung - nämlich P-Akkumulation unmittelbar an der Narbenoberfläche und K-Verarmungen - in diesen relativ kalkreichen Krümen führten. Das machte wiederholte Grünlandumbrüche erforderlich und führte zwangsläufig zu erhöhtem Torfschwund.

Unabhängig von diesen starken Eingriffen konnte nachgewiesen werden, daß die bisher unterstellte ausgeglichene Humusbilanz (Wurzelhumusersatz = Torfschwund + Humifizierung) bei intensiver NPK-Düngung für Moorgrünland nicht mehr gilt. Mit einem Höhenverlust von jährlich über 1 cm sind bei zugleich zunehmender Rohdichte ähnlich hohe Massenverluste festgestellt worden, wie sie sonst nur bei ackerbaulicher Nutzung Deutscher Hochmoorkulturen bekannt waren. Von einer "noch naturnahen" Dauergrünlandnutzung ist danach nicht mehr auszugehen.

Die inzwischen gegenüber dem Ausgangstorf um den Faktor 10 aschereicheren Hochmoorböden dieses Versuches weisen sich in den oberen 1-2 dm chemisch (KAK, C/N-Verhältnis, pH-Wert) als "anthropogene Niedermoorstoffe" mit einer diesen eigenen Nährstoffdynamik aus.

Höhenverluste führen langjährig zu Vorflutmängeln mit dem Zwang zur neuerlichen Vertiefung der Gräben und Nachdrainagen. Aus diesem Teufelskreis führt nur eine torfkonservierende Bodennutzung mit den Alternativen Wiedervernässung und Extensivierung oder Rekultivierung als Sandmischkultur zwecks Intensivierung heraus (KUNTZE, 1987).

5.2 Nährstoffmobilität und Nährstoffbedarf

Der Dauerversuch mit unterschiedlichen pH-Stufen und physiologisch sauren und physiologisch alkalischen Varianten zeigt erneut die starke Abhängigkeit der Phosphatlöslichkeit vom pH-Wert. Je niedriger dieser ist, umso schneller werden Phosphate ausgewaschen. Eine Phosphatakkumulation ist in sauren Hochmoorböden nur möglich, wenn der pH-Wert deutlich über 6,0 angehoben wird, und das ist bei Grünlandnutzung mit einer Düngung stets auf die Narbe nur in den oberen 1-2 cm der Fall (KUNTZE u. SCHEFFER, 1979). Da dieser hohe pH-Wert aber den Abbau der Torfe beschleunigt, ist so eine Reduzierung des Phosphataustrags nicht möglich. Daher muß sich die Phosphatdüngung ausschließlich am Entzug orientieren, um die Phosphatauswaschungsverluste so gering wie möglich zu halten. Bei 100 dt TM/ha und mit 0,35 % P optimalen Gehalten sind 80 kg P₂O₅/ha eine ausreichend bilanzierte Ersatzdüngung für diese Standorte.

Für sorptionsschwache Hochmoorböden sind Phosphatdünger mit zusätzlich enthaltenen Sorbenten für Phosphat, wie Eisen und Calcium im Thomasphosphat oder Calcium im Konverter- bzw. Hüttenkalk, besonders günstige Formen. Schon bei einem pH-Wert um 4,5 (SCHEFFER u. BLANKENBURG, 1978) kann bei der alleinigen Anwendung von Thomasphosphat der Phosphataustrag im Vergleich zum Einsatz von Superphosphat um ca. 80 % reduziert werden. Falls solche Dünger künftig nicht mehr zur Verfügung stehen, sollte geprüft werden, ob bei der notwendigen Kalkung eisenhaltige Kalke wie Thomaskalke bevorzugt einzusetzen sind, um damit den Eisengehalt im Hochmoorboden zu erhöhen. Eisenhaltige Industrie-Nebenprodukte - wie Rotschlamm der Aluminiumindustrie, Grünsalz der Titanherstellung und Fällungsschlämme der Wasserwerke - könnten den P-Austrag aus Moorböden ohne Nachteile für das Graswachstum deutlich reduzieren (SCHEFFER et al., 1986). Unterschiede bei physiologisch alkalischer und physiologisch saurer Düngung auf die Phosphatmobilität lassen sich nicht erkennen (Abb. 6 u. 7). Hier dürften das unterschiedlich gute Pflanzenwachstum und die damit verbundenen Phosphatentzüge mögliche Unterschiede verwischen. Die Phosphatdüngung sollte sich daher ausschließlich am Entzug orientieren. 7 mg DL-lösliches P₂O₅/100 ml Boden sind, wie schon von BADEN (1966) gefordert, ausreichend (Gehaltsklasse C nach VDLUFA).

Das einwertige Kalium wird im Hochmoorboden wegen dessen spezifischer Sorption für zweiwertige Kationen sehr wenig gebunden. Hier bewirken daher überhöhte Kalkgaben, daß die Gehalte an doppellactatlöslichem Kalium abnehmen. Diese Abnahme erklärt sich zum einen im höheren Pflanzenertrag und damit höherem Entzug, und zum anderen in einer erhöhten Auswaschung. Kalium sollte daher nur entsprechend dem Entzug durch die Pflanzen gedüngt werden. Bei 100 dt TM/ha und mit 2,1 % Kalium optimalem Gehalt sind 240 kg K₂O/ha Düngung ausreichend. Der Versuch, durch geteilte K₂O-Gaben der erhöhten Kaliumauswaschungsgefahr zu begegnen, brachte Ertragsnachteile (BARTELS u. SCHEFFER, 1982). Dann stellen sich in diesem Input/Output-

Gleichgewicht DL-K₂O-Gehalte von nur 4 mg/100 ml Boden ein (Tab. 6). Eine Kaliumanreicherung darüber hinaus ist auch mit 300 kg K₂O/ha nicht möglich gewesen.

5.3 pH-Werte und Kalkbedarf

Durch die Kalkung 1972-1975 waren alle Parzellen auf den gewünschten pH-Wert eingestellt worden. Die physiologisch alkalisch gedüngten Parzellen erhielten von 1972 ab zusätzlich mit den Phosphatdüngern Thomasphosphat und Thomaskali im Mittel 280 kg CaO/ha. Die Stickstoffdüngung mit Kalkammonsalpeter in Höhe von 80 kg N/ha bei Ackerzwecknutzung und 160-240 kg N/ha bei Grünlandnutzung hat rechnerisch im Mittel 50 kg CaO/ha jährlich neutralisiert.

Zur Neutralisation von 100 kg N aus Kalkammonsalpeter werden 27 kg CaO bei Grünlandnutzung erforderlich. Die weiteren Kalkmengen wurden benötigt, um die durch biochemische Umsetzungen im Boden freiwerdenden und durch Immissionen in den Boden gelangenden Protonen zu neutralisieren.

Im Mittel rechnet man in Mineralböden mit einer jährlichen Protonenproduktion von ca. 31 kg H⁺/ha, zu deren Neutralisation 860 kg CaO erforderlich sind, wie unter anderem auch Versuche von BARTELS et al. (1985) auf einem als Acker genutzten Brackmarschboden ergaben. Ein Drittel des Kalkbedarfs beruht dabei auf der versauernden Wirkung der Stickstoffdüngung, 10 % auf der Immission, der Rest wird durch das Pflanzenwachstum verursacht.

Wie diese Versuchsdaten auf dem sauren Hochmoorboden in Königsmoor ergaben, liegt hier der Kalkbedarf, bedingt durch die Wurzelaktivität und die Humifizierungsprozesse, deutlich niedriger, denn sonst hätte man nicht durch die Düngung mit kalkhaltigen Phosphaten die pH-Werte auf den physiologisch alkalisch gedüngten Parzellen so konstant halten können.

Im Abschnitt 4.7 war gezeigt worden, daß jährlich ca. 1 cm Höhenverlust durch biochemischen Torfabbau auftritt. Dabei müssen jährlich ca. 260 dt organische Substanz mineralisiert werden. Der Abbau der organischen Substanz hat demnach nicht zu einer Versauerung des Moorbodens geführt, wie die pH-Werte aller physiologisch alkalisch gedüngten Varianten zeigen.

Auf den physiologisch sauren Varianten ist allein durch die Stickstoffdüngung rechnerisch ein jährlicher zusätzlicher Bedarf von 420 kg CaO zur Neutralisation der Stickstoffdünger ermittelt worden. Dieser zusätzliche Kalkbedarf hat im Vergleich zu den physiologisch alkalisch gedüngten Varianten zu einer Abnahme der pH-Werte um bis zu 1 pH-Stufe geführt. Pflanzenwachstum und vor allem der biochemische Abbau der organischen Substanz hat die Versauerung nicht beschleunigt, wie es eigentlich zu erwarten gewesen wäre.

Aufgrund dieser Ergebnisse läßt sich ableiten, daß bei Grünlandnutzung saurer Hochmoorböden der jährliche Kalkbedarf, wenn einmal der optimale pH-Wert eingestellt ist, schon über eine Phosphatdüngung mit kalkhaltigen Phosphatdüngern erreicht werden kann. Die für Hochmoorböden ausschließlich auf den Entzug berechnete Phosphatgabe von 80 kg P₂O₅/ha reicht - als Thomaskali ausgebracht - aus, den jährlichen Kalkbedarf zu decken, wenn gleichzeitig physiologisch neutrale Stickstoffdünger wie Kalkammonsalpeter oder Kalksalpeter gedüngt werden.

Die biochemischen Umsetzungen, die Nährstoffaufnahme und auch das Pflanzenwachstum sind von der Höhe des pH-Wertes abhängig. Die hier vorgestellten Ergebnisse lassen den Schluß zu, daß saure Hochmoorböden optimal als Grünland bei einem pH-Wert von 4,0 bis 4,5 genutzt werden können. In diesem Bereich werden die höchsten Graserträge erzielt; dieser pH-Wert ist optimal im Hinblick auf den Nährstoffgehalt in den Pflanzen, die Nährstoffverfügbarkeit im Moorboden, die Sorptionsverhältnisse, den Humusgehalt und die Humusqualität des Torfes. Die biochemischen Umsetzungen und damit der Torfabbau sind bei einem pH-Wert um 4,0 deutlich niedriger als bei höheren pH-Werten. Da durch den verstärkten Abbau des Torfes die physikalischen Eigenschaften verschlechtert werden, das Pflanzenwachstum aber nicht gefördert werden kann, sollten diese sauren Hochmoorböden mit einem pH-Wert zwischen 4,0 und 4,5 genutzt werden.

LITERATUR

- BADEN, W. (1955): Beziehungen zwischen Phosphorsäuregehalt und Kalk- und Reaktionsverhältnissen des Hochmoorgrünlandes.- Phosphorsäure 15: 31-36, Essen.
- "- 1966): Bewirtschaftung und Leistung des Grünlandes auf Deutschen Hochmoorkulturen.- Mitt.über die Arbeiten der Staatlichen Moor-Versuchsstation in Bremen. 9.Bericht: 222 S.i. Eigenverlag, Bremen.
- BARTELS, R. (1977): Die landwirtschaftliche Nutzung von Moorböden.- Geol. Jb., F4: 141-174, Hannover.
- BARTELS, R. u. SCHEFFER, B. (1982): K-Düngung auf Hochmoor bei unterschiedlicher Wiesennutzung. 1.Einfluß auf Ertrag und Kaliumentzug.- Kali-Briefe 16:85-90, Hannover.
- BARTELS, R., KUNTZE, H., SCHÄFER, W. u. SCHEFFER, B. (1985):Kalkbedarf von Marschböden.- VDLUFA-Schriftenreihe 16:295-311; Darmstadt.
- BRÜNE, F. (1950): Fortschritte in der Bewirtschaftung von Hochmoor und Heidesandböden.- 192 S., Landbuchverlag, Hannover.
- DIN 11542 (1978): Torf in Gartenbau und Landwirtschaft.
- EGGELSMANN, R. (1960): Über die Höhenänderung der Mooroberfläche infolge von Sackung und Humusverzehr in Abhängigkeit von Azidität, "Atmung" und anderen Einflüssen.- Mitt.über die Arbeiten der Staatlichen Moor-Versuchsstation in Bremen, 8.Bericht: 99-132, Hamburg, Berlin.

- KUNTZE, H. (1971): Moorböden Norddeutschlands.- Mitt.Dtsch.Bodenkundl. Gesell. 13: 105-150, Göttingen.
- "- (1978): The need for peat soil conservation.- Intern.Peat J. 2: 55-63, Helsinki.
- KUNTZE, H. (1982): Die Anthropogenese nordwestdeutscher Grünlandböden.- Abh.Naturw.Verein Bremen 39: 379-395, Bremen.
- KUNTZE, H., ROESCHMANN, G. u. SCHWERTFEGER G. (1988): Bodenkunde.- 4.Auf-lage: 568 S. i.E.Ulmer Verlag, Stuttgart.
- KUNTZE, H. u. SCHEFFER, B. (1979): Die Phosphatmobilität im Hochmoorboden in Abhängigkeit von der Düngung.- Z.Pflanzenernähr.Bodenkd. 142: 155-168, Weinheim.
- KUNTZE, H. u. VOSS, W. (1980): Statusbericht Düngung.- Landwirtschaft - Angewandte Wissenschaft, H. 245: 144 S.- Landw.Verlag, Münster-Hil-trup.
- OKRUSZKO, H. (1968): Soil forming process in drained peatlands.- Proc.Int-ern. Peat Congr., Vol. 1: 189-197, Quebec.
- PUUSTJÄRVI, V. (1981): Nature of changes in peat properties during de-composition.- Peat and Plant Yearbook 1981/82: 5-20, Helsinki.
- SCHEFFER, B. u. BLANKENBURG, J. (1978): Löslichkeit und Wanderung von Phosphaten im sauren Hochmoorboden.- Mitt.Dtsch.Bodenkundl.Ges. 27: 271-280, Göttingen.
- SCHEFFER, B. u. BARTELS, R. (1982): K-Düngung auf Hochmoor bei mehrschnittiger Wiesennutzung. 2.Teil: Einfluß auf den K-Gehalt im Boden und den K-Austrag über Dräne.- Kali-Briefe 16: 91-104, Hannover.
- SCHEFFER, B. u. KUNTZE, H. (1989): Phosphate leaching from high moor soils.- International Peat Journal 3; 107-115, Helsinki.
- SCHEFFER, B., KUNTZE, H. u. BARTELS, R. (1986): Anwendung von Rotschlamm und Grünsalz auf sauren Hochmoorböden zur Reduzierung des Phosphataus-trages.- Z.f.Kulturtechnik u. Flurberein. 27: 76-82, Berlin.
- SCHNEEKLOTH, H. u. TÜXEN, J. (1978): Die Moore Niedersachsens.- 5.Teil. Veröffentl.Nds.Institut f. Landeskd. u. Landesentw. Göttingen, Reihe A: Forsch. z. Landes- und Volkskde. 96, H. 5: 220 S., Göttingen-Hannover.

Manuskript eingegangen am 13.Juni 1990