

Fachgebiet 4

Bodenkunde
72. Folge

Nr. 5/1981

Die Chemie des Kaliums in sandigen Böden*

(On the chemistry of potassium in sandy soils)

D. L. Sparks

Assistant Professor of Soil Physical Chemistry,
Plant Science Department, University of Delaware, Newark, Delaware 19711, USA

Erweiterte Zusammenfassung folgender Untersuchungen:

Sparks D.L., Martens D.C., Zelazny L.W.: Plant uptake and leaching of applied and indigenous potassium in Dothan soils.

Sparks D.L., Zelazny L.W., Martens D.C.: Kinetics of potassium exchange in a Paleudult from the Coastal Plain of Virginia.

Sparks D.L., Zelazny L.W., Martens D.C.: Kinetics of potassium desorption in soils using miscible displacement.

Sparks D.L.: Chemistry of soil potassium in Atlantic Coastal Plain Soils: A Review.

Einleitung

Auf bestimmten Böden der Region der atlantischen Küstenebene blieb die Kalidüngung ohne Wirkung auf den Ertrag von Mais (*Zea mays* L.). Diese Böden sind charakterisiert durch sandige Oberflächenhorizonte und hohe Kalikonzentrationen im tonigen Untergrund. Normalerweise stützen sich die Empfehlungen über die Kalidüngung auf Proben, die der Oberflächenschicht von 18 bis 20 cm entnommen werden. Häufig weisen diese Proben niedrige Gehalte an ausziehbarem K auf; trotzdem stellt sich keine Wirkung der Kalidüngung auf den Ertrag ein. Dieses Fehlen einer Reaktion könnte eine Verfügbarkeit von Untergrundkalium reflektieren. Das Ziel dieser Phase unserer Studie bestand in der Beurteilung der Pflanzenverfügbarkeit von Untergrund K in zwei feinsandigen Lehmböden von Dothan der Küstenebene von Virginien und in der Abklärung der Frage, ob das Untergrundkalium von der Auswaschung von gedüngtem Kalium stammt oder genetischen Ursprunges ist. Die Pflanzenverfügbarkeit und die Wanderung des K wurde in zwei Wachstumsperioden beurteilt. Die Auswahl der zwei Böden stellte auf Unterschiede im Gesamtkalium in ihren Ap-, A2- und B21t-Horizonten ab.

* Beitrag für den 6. Wettbewerb für Junge Forscher des Internationalen Kali-Institutes, Bern.

Formen des Bodenkaliums

Der Zustand des Kaliums in den zwei Böden wurde aufgrund des mit verdünnter HCl-H₂SO₄ ausziehbaren K und des Indexes der Verfügbarkeit des austauschbaren K bestimmt (Tab.1). Das in verdünnter HCl-H₂SO₄ ausziehbare K wird in Virginien und in manchen anderen südöstlichen Staaten zur Bestimmung der Bedürfnisse an Kalidüngern benutzt. Gemäss den Eichungszahlen für das Verfahren enthielt der Ap-Horizont im Boden von Greenville County einen mittleren Gehalt an mit HCl-H₂SO₄ ausziehbarem K und einen niedrigen Gehalt im Boden der Nottoway County (Rich, 1955). Die Summe des entweder mit verdünnter HCl-H₂SO₄ ausziehbaren K oder des austauschbaren K war in den drei Horizonten des Bodens von Greenville County höher als in jenem von Nottoway County. Dies mag die Kalidüngung während mancher Jahre der Pflanzenproduktion im ersten Boden widerspiegeln. Eine Zunahme sowohl des mit verdünnter HCl-H₂SO₄ ausziehbaren K und des austauschbaren K von den Horizonten A2 zu B21t war in beiden Böden offensichtlich.

Die drei Horizonte der zwei Böden enthielten relativ grosse Mengen von Gesamtkalium im Bereiche von 6,5 bis 12,0 mval/100 g (Tab.1). In jedem Horizont der zwei Böden befanden sich mehr als 90% des Gesamtkaliums in den Formen des Feldspates und von Glimmern vor. Der hohe Anteil des Gesamtkaliums in diesen Formen der Primärminerale legt nahe, dass in jedem Horizont der zwei Böden der grösste Teil des K aus dem Muttergestein stammt. Relativ grosse Anteile des Gesamt-K befanden sich in der Schlufffraktion der beiden Böden, und selbst in der Sandfraktion des Bodens von Nottoway County. Das Vorkommen von K in Primärmineralen in den Fraktionen der Grössenordnung von Sand und Schluff stützt die Schlussfolgerung, dass viel vom gesamten K in den zwei Böden genetischen Ursprungs ist (Barshad, 1964). In den drei Horizonten der zwei Böden fanden sich relativ kleine Mengen von K in nichtaustauschbaren Formen (Yuan u.a., 1976), was zu erwarten ist in Fällen, in denen viel des gesamten Bodenkaliums in den Formen von Feldspat und Glimmer vorhanden ist.

Wirkung der K-Anwendung auf die Kaligehalte der Gewebe und den Maisertrag

Die Anwendungen von K steigerten im allgemeinen die K-Konzentrationen der Kolbenblätter der Maispflanze während des Frühstadiums des Wachstums der Blüten auf beiden Böden (Tab.2). Jones (1967) berichtete, dass eine K-Konzentra-

Tabelle 1 Formen des K in Dothan-Böden von den Greenville und Nottoway Counties

Horizont	Tiefe cm	In verd. HCl-H ₂ SO ₄ auszieh. K mval/100 g	Aus- tausch- bares K	Nicht- aus- tausch- bares K	K in Primär- mineralen		Total K	Total K		
					Feldspat	Glimmer		Sand	Schluff	Ton
Greenville County										
Ap	0-20	0,11	0,11	0,17	5,4	0,8	6,5	0,3	3,7	2,5
A2	20-31	0,06	0,11	0,19	5,7	0,9	6,9	0,4	3,4	3,1
B21t	31-41	0,10	0,22	0,38	5,1	3,6	9,3	0,2	1,4	7,7
Nottoway County										
Ap	0-15	0,07	0,10	0,22	11,3	0,4	12,0	2,5	4,1	5,4
A2	15-33	0,03	0,09	0,19	8,2	2,3	10,8	2,0	5,5	3,3
B21t	33-68	0,08	0,13	0,24	5,4	5,6	11,4	1,8	4,7	4,9

tion in den Kolbenblättern in diesem Wachstumsstadium von $<1,25\%$ eine für ein normales Wachstum der Maispflanze ungenügende K-Versorgung anzeige, und dass eine solche von 1,71 bis 2,25% dem entspräche, was maximale Körnererträge erfordern. Die Beziehung zwischen der Kalianwendung und dem Maisertrag war bei diesen kritischen Gehalten beständig. Das heisst, dass die Anwendung von K die gesamten Körner- und Stengelerträge erhöhte, wo die Kolbenblätter von Pflanzen auf den Kontrollparzellen auf dem Boden von Nottoway County in 1977 bzw. 1978 1,0 und 0,7% K enthielten, während die Kalidüngung die Totalerträge auf dem Boden von Greenville County nicht steigerte, wo die Kolbenblätter von Pflanzen auf den Kontrollparzellen 2,0% K enthielten. Auf dem Boden von Nottoway County waren die Erträge 1978 viel höher als 1977. Der niedrigere Ertrag 1977 widerspiegelt die starke Trockenheit, die mit der Bewässerung nur teilweise korrigiert werden konnte. Infolge eines grossen Mangels an Niederschlägen während der Körnerfüllung war der Ertrag an Maiskörnern im Jahre 1977 auf dem Boden von Greenville aussergewöhnlich niedrig. Dieser Standort erhielt im Juni Niederschläge von 3,5 cm und im Juli von 6,9 cm.

Die Summe entweder des in verdünnter $\text{HCl-H}_2\text{SO}_4$ ausziehbaren K oder des austauschbaren K in den Horizonten Ap, A2 und B2t war im Boden von Greenville County grösser als im Boden von Nottoway County (Tab.1). Diese Daten lassen einen höheren Gehalt an pflanzenverfügbarem K in den drei Oberflächenhorizonten des erstgenannten Bodens annehmen. Demgemäss waren die K-Konzentration in den Kolbenblättern und die Gesamtaufnahme von K in im Jahre 1977 auf dem Boden von Greenville County gewachsenen Maispflanzen grösser (Tab.2). In den Maisstengeln fand sich mehr K als im Korn. Dies war am augenscheinlichsten auf dem Boden von Greenville County im Jahre 1977, in dem der Körnerertrag wegen des Mangels an Niederschlägen ausserordentlich niedrig war; es war aber auch offensichtlich auf dem Boden von Nottoway County im Jahre 1978, wo annähernd ausreichende Niederschläge fielen. Im Gesamten gesehen, zeigen diese Daten einen viel grösseren Entzug von K aus dem Boden an, wo der Mais für Silage verwendet

Tabelle 2 Wirkung der K-Anwendung auf den Ertrag, die K-Konzentration und den K-Entzug von Mais auf Dothan-Böden von Greenville County für 1977 und von Nottoway County für 1977 und 1978

Behandlung*	Ertrag			K im Kolbenblatt	K-Entzug		
	Körner	Stengel	Total		Körner	Stengel	Total
kg K/ha	kg/ha			%	kg K/ha		
Greenville County, 1977							
0	330 a**	5300 a	5 630 a	2,0 b	1 a	70 b	71 b
83	340 a	5240 a	5 580 a	2,1 b	1 a	85 ab	86 ab
249	230 a	4590 a	4 820 a	2,5 a	1 a	113 a	114 a
Nottoway County, 1977							
0	4940 a	4890 b	9 830 b	1,0 b	12 a	46 a	58 a
83	5110 a	6060 a	11 170 a	1,5 a	13 a	54 a	67 a
Nottoway County, 1978							
0	6430 b	7330 a	13 760 b	0,7 b	11 b	19 b	30 b
83	8380 a	9220 a	17 600 a	1,2 a	14 a	66 a	80 a

* Das K wurde jährlich angewendet.

** Die Mittelwerte für die Behandlungen in der Kolonne sind mit verschiedenen Buchstaben gekennzeichnet, wenn sie mit einem Wahrscheinlichkeitsgrad von 0,10 in einem gegebenen Jahr abweichen.

Tabelle 3 Wirkung der K-Anwendung und der Zeit der Probenahme auf das austauschbare K in drei Horizonten der Böden von Greenville und Nottoway Counties

Behandlung*	Horizont	Datum der Probenahme						
		6/77	8/77	11/77	3/78	6/78	9/78	12/78
kg K/ha		mval austauschbares K/100 g						
Greenville County								
0	Ap	0,09 cA**	0,07 cBC	0,08 cAB	0,07 bBC	—***	—	0,06 cC
83	Ap	0,12 bA	0,09 bBC	0,09 bBC	0,11 abAB	—	—	0,08 bC
249	Ap	0,19 aA	0,13 aB	0,12 aB	0,12 aB	—	—	0,11 aB
0	A2	0,12 aA	0,09 bB	0,10 bAB	0,10 bAB	—	—	0,08 bB
83	A2	0,13 aA	0,10 bB	0,10 bB	0,12 abAB	—	—	0,12 bAB
249	A2	0,13 aB	0,13 aB	0,13 aB	0,15 aB	—	—	0,19 aA
0	B21t	0,20 aA	0,16 aB	0,16 aB	0,18 aAB	—	—	0,13 bC
83	B21t	0,20 aAB	0,16 aBC	0,19 aABC	0,15 aC	—	—	0,23 aA
249	B21t	0,19 aB	0,16 aB	0,18 aB	0,18 aB	—	—	0,24 aA
Nottoway County								
0	Ap	0,11 bA	0,07 bB	0,08 bB	0,07 bB	0,07 bB	0,05 bC	0,05 bC
83	Ap	0,13 aA	0,09 aCD	0,10 aBC	0,10 aBC	0,11 aB	0,08 aD	0,09 aCD
0	A2	0,08 aA	0,06 aBC	0,07 aAB	0,07 aAB	0,06 bBC	0,06 bBC	0,05 bC
83	A2	0,07 aBC	0,06 aC	0,07 aBC	0,06 aC	0,09 aA	0,08 aAB	0,08 aAB
0	B21t	0,12 aA	0,10 aBC	0,12 aA	0,10 aBC	0,11 aAB	0,11 aAB	0,09 aC
83	B21t	0,10 aBC	0,09 bC	0,10 aBC	0,10 aBC	0,11 aB	0,13 aA	0,10 aBC

* Die K-Behandlung wurde nach der Entnahme der Bodenproben am 3/77 und 3/78 angewendet.

** Die Durchschnitte der Kolonnen jedes Horizontes sind gesichert verschieden auf der Wahrscheinlichkeitsschwelle von 0,10, wenn sie von verschiedenen kleinen Buchstaben gefolgt werden. Die Durchschnitte der Reihen sind gesichert verschieden auf der Wahrscheinlichkeitsschwelle von 0,10, wenn sie von verschiedenen grossen Buchstaben gefolgt werden.

*** Es waren keine Bodenproben erhältlich.

wurde, als dort, wo er der Körnererzeugung diene. Die Angaben über die Gesamtaufnahme zeigen, dass die Anwendung von 83 kg K/ha nicht immer genügt für den Ersatz des entzogenen Bodenkaliums, wenn die Pflanzen für Silage verwendet werden.

Aufnahme von K aus dem Untergrund

Wie erwartet, erhöhte die Kalianwendung den Gehalt an austauschbarem K in den Ap-Horizonten beider Böden (Tab.3). Zu Abnahmen des austauschbaren K in den Ap-Horizonten kam es in beiden Böden während der Probenahmen von Juni bis August 1977 und von Juni 1977 bis Dezember 1978 in den Kontroll- und den mit K behandelten Parzellen. Diese Abnahmen des austauschbaren K sind hauptsächlich der Aufnahme durch die Pflanzen und der Auswaschung von K und möglicherweise Fixierungen zuzuschreiben. Abnahmen von austauschbarem K erfolgten in den A2 und B21t-Horizonten von Kontrollparzellen auf beiden Böden während der Probenahmen von Juni bis August 1977. Diese Reduktionen weisen darauf hin, dass die sichtbar in diesen Horizonten vorgefundenen Maiswurzeln imstande waren, K dem Untergrund zu entziehen, obwohl die pH-Werte in den B21t-Horizonten beider Böden unter 5,0 lagen. Pflanzen nahmen kein K aus den B-Horizonten auf, in denen das Wurzelwachstum durch Al- und Mn-Toxizität gehemmt wurde. Ebenso erfolgte die Sorption von K nicht von B-Horizonten, wo die Wurzeln nicht in diesen Horizont hineinwuchsen, sei es wegen des Mangels an O₂ oder einer ungenügenden Entwicklung.

Auswaschung von Kalium

Obwohl 1978 auf dem Boden von Greenville County kein Mais angebaut werden konnte, wurde die Studie weitergeführt zur Bestimmung der Wirkung grosser Kaligaben in Kombination mit relativ geringen K-Entzügen (Tab.2) auf die Auswaschung von K. Die Anwendung von 249 kg K/ha erhöhte das austauschbare K im A2-Horizont des Bodens von den Probenahmen vom August 1977 bis Dezember 1978 (Tab.3). Das austauschbare K war im Horizont B21t des Bodens in der Stichprobe vom Dezember 1978 nach der Düngung von sowohl 83 als auch von 249 kg K/ha vermehrt worden. Diese Zunahmen des austauschbaren K zeigen eine Abwärtswanderung von K in den Boden an, wobei angenommen wird, dass in den A2- und B21t-Horizonten der Kontroll- und mit K behandelten Parzellen eine ähnliche Menge von K freigesetzt werde. Diese Schlussfolgerung über die Auswaschung von K würde nicht geändert, entweder, wenn die K-Freisetzung in den A2- und B21t-Horizonten der mit K behandelten Parzellen höher sein würde, wegen der grösseren Aufnahme von K durch die Pflanzen, oder wenn die Aufnahme durch die Kultur von ausgewaschenem K aus den A2- und B21t-Horizonten der mit K behandelten Parzellen grösser war.

Die Abwärtswanderung von K in den A2-Horizont des Bodens von Nottoway County wurde durch eine Zunahme von austauschbarem K von der Anwendung von 83 kg K/ha in diesem Horizont während den Stichproben von Juni 1978 bis Dezember 1978 (Tab.3) angezeigt. Man bemühte sich für diese Untersuchung, möglichst gleichmässige Versuchsflächen auszuwählen. Trotzdem trat eine leichte Änderung des austauschbaren K im B21t-Horizont zwischen den Kontroll- und den mit K behandelten Parzellen ein. So war zum Beispiel der Gehalt an austauschbarem K im B21t-Horizont der Kontrollparzellen höher als bei der Stichprobe im August 1977 in den mit K behandelten Parzellen. Die höheren Konzentrationen an austauschbarem K in diesem Boden an den Stichprobendaten Juni 1978 und September 1978 als nach den Proben im August 1977 lässt eine Abwärtswanderung von K in den B21t-Horizont des Bodens vermuten.

Die Kinetik der Adsorption und Desorption von K in sandigen Böden

Umfangreiche Untersuchungen wurden über die verschiedenen Aspekte des ionischen Austausches mit K ausgeführt, doch waren der Literatur nur dürftige Angaben zu entnehmen über die Rate des K-Austausches oder über die Kinetiken der Adsorption und Desorption von K in den Bodensystemen. Während die Forschung über die Kinetiken in Systemen mit reinem Ton durchgeführt worden sind, ist wenig geforscht worden über Bodensysteme, in denen komplexe Mischungen von Tonmineralen und organischer Substanz vorhanden sind. Im weiteren ist die Kinetik der Ionenaustauschreaktionen nicht in einem bestimmten System verstanden worden (Thomas, 1977). Der Zweck der folgenden Untersuchung bestand darin, die Kinetik des K-Austausches zu ermitteln in den Ap-, A2-, B21t- und B22t-Horizonten der Dothan-Böden auf die früher verwiesen wurde.

Zeitliche Verhältnisse der K-Sorption

Die Kaliumsorption erfolgte von den mit Al- und Ca-gesättigten Proben aus den Ap- und B22t-Horizonten des Standortes Greenville County nicht sofort (Fig. 1-4). Obwohl er nicht gezeigt wird, trat ein ähnlicher Trend in den anderen Horizonten von diesem Standort und in allen Horizonten vom Standort Nottoway County in Erscheinung. Die nicht augenblickliche Sorption unterscheidet sich von den Befunden anderer Autoren mit «reinen» Systemen (Way, 1850; Malcolm und Kennedy, 1969).

Der Sorptionsprozess war in den mit 5 und 25 ppm K behandelten, mit Al- und Ca-gesättigten Ap-Horizonten des Standortes Greenville County in zwei Stunden absolut vollendet (Fig. 1 und 2). Die mit 100 ppm K behandelten Böden sorbierten mehr K als einer der mit 5 oder 25 ppm behandelten Böden, was vom Standpunkt der Konzentration aus erwartet wurde (*Kelley, 1948*); sie ergab eine relativ lineare Beziehung, wenn sie logarithmisch aufgetragen wurde. Dagegen stellte sich das Gleichgewicht nicht vor der Erreichung einer Gleichgewichtszeit von annähernd 24 Stunden ein. Der mit Ca gesättigte Ap-Horizont des Bodens von Greenville County sorbierte beträchtlich mehr K als der mit Al gesättigte Boden (Fig. 2), was aufgrund der leichteren Verdrängung des zweiwertigen Ca gegenüber dem dreiwertigen Al durch K (*Hefferich, 1962*) erwartet werden kann. Obwohl darüber nicht berichtet wird, waren die beiden Horizonte A2 und B21t dem Ap-Horizont ähnlich in bezug auf die Auftragung der Sorption im Verhältnis zur Zeit (Fig. 1 und 2); dies war zu erwarten, weil eine ähnliche Mineralogie und ähnliche Tongehalte vorlagen.

Mit Aluminium und Kalzium gesättigte Böden vom Horizont B22t sorbierten beträchtlich mehr K als jene von anderen Horizonten (Fig. 3 und 4). Der höhere Tongehalt dieses Horizontes lieferte mehr Austauschstellen für die Sorption von K in den mit Al und Ca gesättigten Proben. Die mit 5 und 25 ppm K behandelten Böden kamen in annähernd einer Stunde ins Gleichgewicht, während dieses in den mit 100 ppm K behandelten Böden erst nach etwa 24 Stunden erreicht worden ist. Ähnlich den anderen Horizonten sorbierte der mit Ca gesättigte Boden mehr K als der mit Al gesättigte.

Diese, einen nicht augenblicklichen Ionenaustausch für K durch Al- und Ca-gesättigten Böden nachweisenden Daten legen einen durch die Diffusion kontrollierten Austausch nahe. Diese Böden enthielten verмикulitische Tonminerale und Glimmer, von denen andere Autoren berichteten, dass sie einen langsamen, mit der Diffusion in Beziehung stehenden Austausch vollziehen (*Barshad, 1955; Malcolm und Kennedy, 1970*). Ein praktischer Aspekt dieser langsamen Sorptionsrate besteht darin, dass das K längere Zeit in der Phase der Bodenlösung verbleiben könnte, aus der es entweder ausgewaschen oder von den Pflanzen aufgenommen werden könnte.

Koeffizienten der Adsorptionsrate

Die Reaktionsraten sind den k_a -Werten direkt proportional (*Selim u. a., 1976*). Die gemessenen k_a -Werte nahmen mit zunehmender ionischer Stärke ab (Tab. 4). Dies bestätigt die raschere Austauschrate von niedrigerer Konzentration von zugefügtem K, wie dies die Theorie von Bronsted über die Aktivitätsrate besagt (*Moore, 1972*). Durch diese k_a -Werte wird auch auf einen Trend hingewiesen zu einer rascheren Austauschrate in mit Ca gesättigten Systemen, verglichen mit solchen mit Al-Sättigung.

An beiden Standorten waren die k_a -Werte der gleichen Horizonte ähnlich, was annehmen lässt, dass ähnliche Austauschreaktionen ablaufen, was infolge der ähnlichen Mineralogie zu erwarten wäre. Offenbar hatten die Anbauverhältnisse in der Vergangenheit keinen grossen Einfluss auf die Kinetik.

Die k_a -Werte dieser Böden befanden sich im Bereich von ungefähr 1 bis 20 Std.⁻¹, was langsame Reaktionsraten vermuten lässt (Fig. 1-4) im Vergleich mit Werten von 81 bis 216 Std.⁻¹, welche für die Böden von Florida berechnet wurden (*Selim u. a., 1976*). Dies kann mit dem Vorherrschen des Kaolinites in den Böden von Florida gegenüber dem der vermiculitischen Minerale in den Böden von Virginia erklärt werden.

Kinetiken der Desorption von K in sandigen Böden

Die Kaliumdesorption in den Böden von Dothan unterliegen den Kinetiken erster Ordnung (Fig. 5). Die Gleichung für die Rate der ersten Ordnung beschrieb die K-Desorption für einen Durchschnitt von 165 und 173 Minuten für die mit Al bzw. Ca gesättigten Proben in den Ap-, A2- und B21t-Horizonten, und von 439 und 505 Minuten für die mit Al und Ca gesättigten Proben im B22t-Horizont (Tab. 5). Diese repräsentieren Zeiten, in denen die K-Desorption in den betreffenden Bodenhorizonten effektiv vollendet war. Die Gleichung für die Rate der ersten Ordnung beschrieb die K-Desorption gut mit r -Werten im Bereiche von $-0,993$ bis $-0,998$ (Fig. 5). Der Befund, dass die Kinetik der Kaliumdesorption erster Ordnung ist, unterstützt die Annahme von *Selim u. a.* (1976).

Die k/d -Werte bei einer Fließgeschwindigkeit von $1,0 \text{ ml Min.}^{-1}$ nahmen von den Ap- zu den B22t-Horizonten in den Böden von Greenville und Nottoway ab, wenn der Tongehalt anstieg (Tab. 5).

Wegen des vergrößerten Transportes zwischen den Teilchen und der Diffusion würde man eine langsamere Desorption erwarten, wo höhere Tongehalte vorhanden sind. Es bestand die Tendenz nach höheren k/d -Werten in den mit Al gesättigten als in den mit Ca gesättigten Systemen (Tab. 5). Der Bereich der k/d -Werte in den vier Horizonten war klein; dies wurde auch für die Koeffizienten der Adsorptionsrate beobachtet (*Sparks u. a.*, 1980). Der geringe Bereich in den k/d -Werten lässt vermuten, dass sich bei dieser Fließgeschwindigkeit ähnliche Desorptionsreaktionen durch das ganze Bodenprofil abwickeln (*Evans und Kurinak*, 1976).

Tabelle 4 Koeffizienten der Adsorptionsrate für Dothan-Böden von Greenville und Nottoway Counties

Horizont	Sättigungs- behandlung	K_c	k_a Greenville	k_a Nottoway
		ppm	Stunde ⁻¹	
Ap	Al	5	10,23	12,07
		25	3,13	3,26
		100	1,08	0,95
Ap	Ca	5	14,23	12,93
		25	3,75	4,36
		100	1,84	2,07
A2	Al	5	12,79	10,00
		25	2,85	2,30
		100	1,60	0,75
A2	Ca	5	11,74	11,12
		25	4,54	3,92
		100	2,20	2,19
B21t	Al	5	13,22	10,85
		25	3,47	3,93
		100	1,92	1,55
B21t	Ca	5	15,75	14,26
		25	4,65	4,31
		100	2,46	2,30
B22t	Al	5	12,26	14,38
		25	3,64	4,64
		100	2,02	2,17
B22t	Ca	5	20,01	21,91
		25	4,53	8,45
		100	3,84	5,67

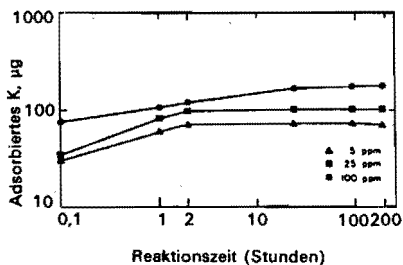


Fig. 1. Kaliumadsorption durch den Ap-Bodenhorizont (Al-gesättigt) von Greenville County als Funktion der Zeit, auf logarithmischer Skala bei 25°C aufgetragen.

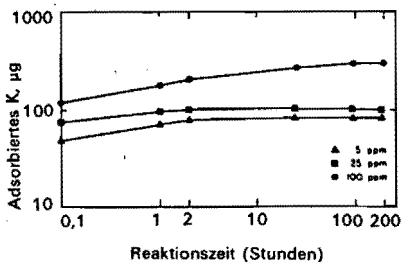


Fig. 2. Kaliumadsorption durch den Ap-Bodenhorizont (Ca-gesättigt) von Greenville County als Funktion der Zeit, auf logarithmischer Skala bei 25°C aufgetragen.

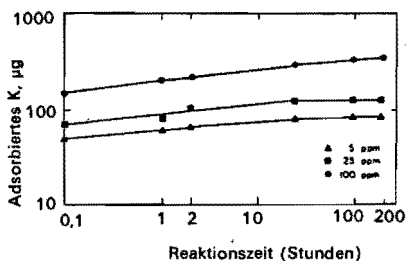


Fig. 3. Kaliumadsorption durch den B22t-Bodenhorizont (Al-gesättigt) von Greenville County als Funktion der Zeit auf logarithmischer Skala bei 25°C aufgetragen.

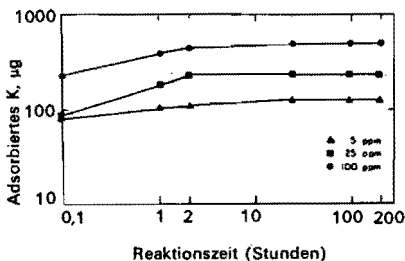


Fig. 4. Kaliumadsorption durch den B22t-Bodenhorizont (Ca-gesättigt) von Greenville County als Funktion der Zeit auf logarithmischer Skala bei 25°C aufgetragen.

Die Kinetik der Desorption von K in den zwei Dothan-Böden verlief 2 bis 8 Stunden langsamer als die der K-Adsorption (Sparks u. a., 1980). Dies wird infolge der Schwierigkeiten bei der Desorption von K von den teilweise zusammengebrochenen Zwischenschichtpositionen erwartet (Sawhney, 1966). Ist das K einmal in die Zwischenschichtpositionen adsorbiert, so wird die Coulomb'sche Anziehung zwischen den K-Ionen und den Tonschichten grösser werden als die Hydratationskräfte des Ions, woraus ein partieller Zusammenbruch von Schichten resultiert (Sawhney, 1966). Die Beobachtung, dass die Desorption langsamer abläuft als die Adsorption, deckt sich mit Befunden von anderen Forschern (Kuo und Lotse, 1973). Dies führt zur Annahme, dass die kinetischen Reaktionen des K in den Dothan-Böden nicht einzeln ablaufen, sondern dass es zu einer Hysterisis kommen könnte (Ardakani und McLaren, 1977; Rao und Davidson, 1978).

Tabelle 5 Scheinbare Koeffizienten der Desorptionsrate (k/d), berechnet bei einer Fließgeschwindigkeit von $1,0 \text{ ml Min.}^{-1}$; die Werte von K_0 und die Zeit, die Gleichung der Rate der ersten Ordnung beschrieben die K-Desorption der Dothan-Böden von Greenville und Nottoway Counties

Horizont	Sättigungs- behandlung	K_0^*		Zeit erstrangiger Übereinstimmung**		k/d	
		Greenville	Nottoway	Greenville	Nottoway	Greenville	Nottoway
		$\mu\text{g/g Boden}$		Minuten		Stunde $^{-1}$	
Ap	Al	220	225	152	160	0,90	0,87
	Ca	251	259	163	170	1,30	1,23
A2	Al	238	242	161	175	0,96	0,92
	Ca	259	264	166	183	0,81	0,79
B21t	Al	249	251	162	177	0,84	0,80
	Ca	265	273	169	186	0,70	0,64
B22t	Al	310	312	438	440	0,44	0,40
	Ca	351	362	500	510	0,36	0,30

* Repräsentiert die K-Menge auf den Austauschstellen zur Zeit Null der K-Desorption.

** Repräsentiert die Zeit, für welche die Gleichung der erststufigen Rate die K-Desorption beschrieb.

Tabelle 6 Wirkung der Fließgeschwindigkeit auf die Grösse von k/d der Ap- und B22t-Bodenhorizonte von Nottoway County

Horizont	Fließgeschwindigkeit ml Min.^{-1}	k/d (Stunde $^{-1}$)	
		Al-gesättigt	Ca-gesättigt
Ap	0,0	0,83*	1,11*
	0,5	0,85	1,18
	1,0	0,87	1,23
	1,5	0,91	1,32
B22t	0,0	0,33*	0,26*
	0,5	0,37	0,28
	1,0	0,41	0,30
	1,5	0,48	0,34

* Diese k/d -Werte wurden erhalten mit der Auftragung einer Regressionslinie der dreifachen Werte von k/d gegenüber der Fließgeschwindigkeit. Die r -Werte betragen 0,970 und 0,973 für die Ap- bzw. B22t-Horizonte und waren gesichert auf der Wahrscheinlichkeitsschwelle von 1%.

Die mit der Gleichung von *Elovich* (*Chien und Clayton*, 1980) aufgetragene Kaliumdesorption war in den ursprünglichen Al- und Ca-gesättigten Systemen im Ap-Horizont (Fig.6) und im B22t-Horizont (Fig.7) des Nottoway-Bodens zuerst rasch und flachte mit der Zeit ab, was eine anfängliche Leichtigkeit der Desorption annehmen lässt, die von schwierigeren Desorptionsreaktionen gefolgt wurde. Dieser Trend wurde auch bei der Kinetik der K-Adsorption in diesen Böden beobachtet (*Sparks u.a.*, 1980). Der Prozentanteil an Kalium der bei 10 Minuten im Al- und Ca-gesättigten Ap-Horizont desorbiert wurde, betrug annähernd 84,4 bzw. 62,4%. In den Al- und Ca-gesättigten Systemen des B22t-Horizontes wurden in 10 Minuten 56,0 und 64,0% des K desorbiert. Die Quote der K-Desorption für eine gegebene Kationensättigung stand in exponentieller Beziehung zur prozentualen K-Sättigung bis fast alles K desorbiert war; von diesem Punkt an ging sie zurück. Die Reaktion war im Ap-Horizont der Al- und Ca-gesättigten Systeme in ungefähr 3 bzw. 4 Stunden nahezu vollendet. Zu dieser Zeit war die Desorption im wesentlichen abge-

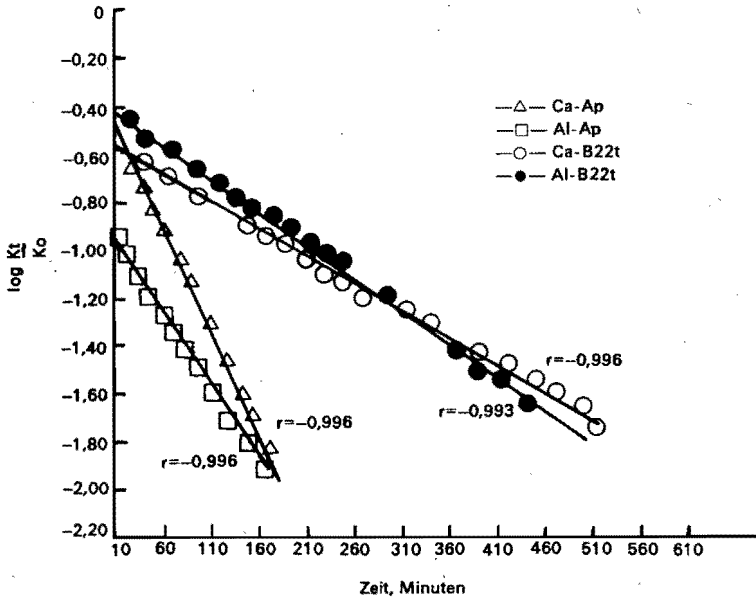


Fig. 5. Log (K_t/K_0) gegenüber Zeit der Auswaschung mit 0,01 M CaCl_2 .

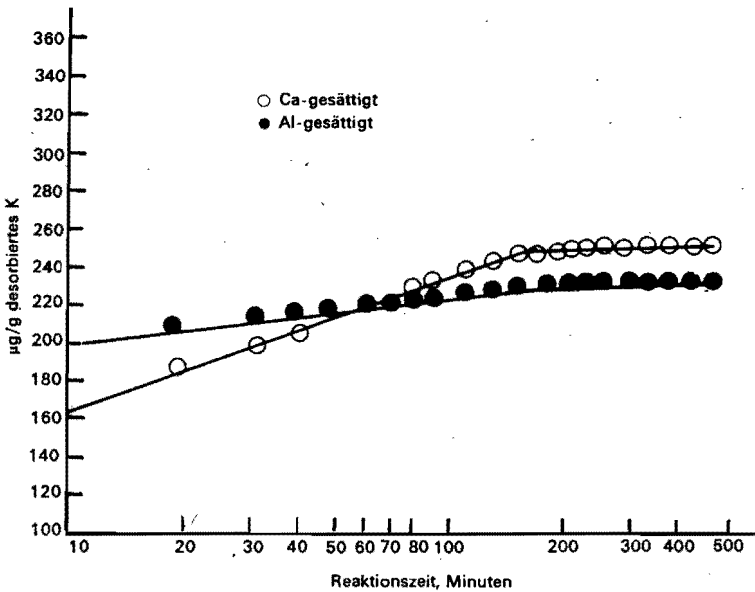


Fig. 6. Desorption von Kalium bei 25°C mit Benutzung von 0,01 M CaCl_2 bei einer Fließgeschwindigkeit von 1,0 ml Min.^{-1} im Ap-Horizont.

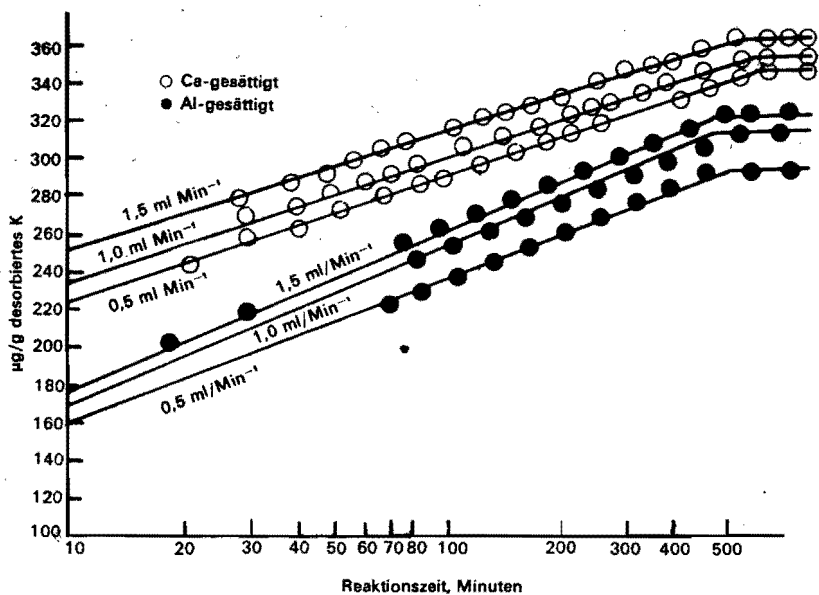


Fig. 7. Desorption von Kalium bei 25°C mit Benutzung von 0,01 M CaCl_2 bei Fließgeschwindigkeiten von 0,5, 1,0 und 1,5 ml Min^{-1} im B22t-Horizont.

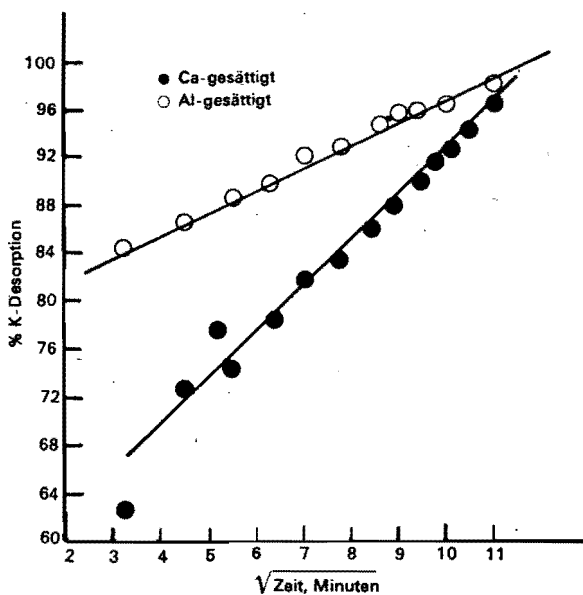


Fig. 8. Prozentuale Desorption von K gegenüber der Zeit $^{1/2}$ für den Dothan-Boden.

geschlossen, denn in den Auswaschungslösungen wurde nur noch wenig Kalium vorgefunden. Annähernd 95–98% des in diesen Böden adsorbierten K wurde nachher desorbiert. Dies würde vermuten lassen, dass die mischbare Verdrängungen benutzende K-Adsorption-Desorption ein reversibler Prozess ist. Indessen könnten annähernd 2–5% des adsorbierten K nicht durch Ca desorbiert worden sein, das aus der Adsorption von K an spezifischen Stellen hervorgehen könnte. Der mit Al gesättigte Ap-Horizont desorbierte anfänglich mehr K als der mit Ca gesättigte Boden, doch war die Gesamtmenge des desorbierten K am Ende der Desorptionsreaktion grösser für den mit Ca gesättigten Boden. Diese Beobachtung deckt sich mit den früher erhaltenen Daten über die Adsorption (*Sparks u.a.*, 1980). Dies war zu erwarten, weil das mit Ca gesättigte System anfänglich mehr K adsorbierte.

Die Wirkung von verschiedenen Fließgeschwindigkeiten im B22t-Horizont des Bodens von Nottoway ist in Figur 7 aufgezeichnet. Bei jeder gegebenen Zeit vergrösserte sich die Menge des desorbierten K mit zunehmender Fließgeschwindigkeit. Diese Daten stimmen mit den Befunden von *Sivasubramaniam* und *Talibudeen* (1972) überein und sind das Ergebnis einer Verdrängung von mehr Ca, das die Kolonne bei der rascheren Fließgeschwindigkeit durchläuft. Das scheinbare Gleichgewicht zwischen dem Austausch K–Ca begünstigte die Adsorption von Ca und die Desorption von K bei grösseren Fließgeschwindigkeiten. Die langsamere Fließgeschwindigkeit würde eine längere Kontaktzeit zwischen dem in die Lösung desorbierten K und dem Boden gewähren. In den Dothan-Böden erhöhte sich die Rate der K-Desorption leicht mit der Fließgeschwindigkeit, weil die Rate von der Konzentration abhängig ist (Fig. 7). Dagegen nahmen die k_d -Werte mit der Fließgeschwindigkeit nur wenig zu (Tab. 6).

Von einer niedrigen Quote der K-Desorption haben andere Forscher berichtet (*Talibudeen* und *Dey*, 1968; *Feigenbaum* und *Levy*, 1977). Die langsame K-Desorption zeigt wahrscheinlich einen von der Diffusion kontrollierten Austausch an, der auf die in den Dothan-Böden vorhandenen vermikulitischen Tone zurückzuführen ist (*Barshad*, 1954; *Reed* und *Scott*, 1962; *Chute* und *Quirk*, 1967; *Sawhney*, 1966; *Sparks u.a.*, 1980). Verschiedene Typen von Austauschstellen im Vermikulit weisen ungleiche Raten der Desorption auf. Während die äusseren planaren Oberflächenstellen und die Randstellen das K rasch desorbieren, bedingt die Desorption von K von den Stellen der Zwischenschicht eine langsame Rate der Diffusion (*Sawhney*, 1966). Dass die Diffusion in den Dothan-Böden der vorherrschende Mechanismus der K-Desorption war, wird in Figur 8 durch die lineare Beziehung zwischen der Zeit^{1/2} gegenüber der prozentualen K-Desorption im Ap-Horizont des Nottoway-Bodens illustriert. *Barshad* (1954) schreibt eine lineare Beziehung zwischen der Zeit^{1/2} gegenüber der K-Desorption dem von der Diffusion kontrollierten Austausch zu. Es bestand eine gewisse Abweichung in der Linearität der Aufzeichnung der Diffusion während der anfänglichen Periode der K-Desorption (Fig. 8). *Chute* und *Quirk* (1967) erwähnen, dass der von der Diffusion kontrollierte Austausch während der anfänglichen Periode der K-Desorption nicht strikt innegehalten wird. Dies könnte auf den Austausch von Aktionsmassen an Stellen auf den äusseren Oberflächen zurückzuführen sein (*Chute* und *Quirk*, 1967).

Ähnliche Kinetiken der K-Desorption wurden in den A2- und B21t-Horizonten des Bodens von Nottoway und in den Ap-, A2- und B21t-Horizonten des Bodens von Greensville beobachtet; die Angaben sind allerdings hier nicht angeführt. Dies könnte erwartet werden wegen der ähnlichen Folgen der Tonminerale und Tongehalte in diesen Horizonten (*Sparks u.a.*, 1980).

Beide Böden desorbierten im B22t-Horizont beträchtlich mehr K (331 μg K/g Boden, die den Durchschnitt der mit Al und Ca gesättigten B22t-Horizonte bei drei Fließgeschwindigkeiten repräsentieren) als in den drei anderen Horizonten (Durchschnitt von 245 μg K/g Boden). Die grössere Menge des in diesem Horizont desorbierten K (Fig. 7) ist dem höheren Gehalt an Ton zuzuschreiben. Die grössere Ton-

menge würde mehr Austauschstellen zur Adsorption von K bieten, und folglich auch für dessen Desorption. Das Verlieren von K war in den mit Al und Ca gesättigten Systemen in etwa 8 und 9 Stunden vollendet.

Die Quote der Freisetzung von K von den austauschbaren, nichtaustauschbaren und mineralischen Formen in diesen Böden erfordert weitere Studien. Mit den Daten über die Kinetik könnten für diese Böden voraussagende Modelle entwickelt werden, welche für die Erarbeitung von Empfehlungen für die Düngung sehr nützlich sein würden.