

Kaliumdynamik im wurzelnahen Boden in Beziehung zur Kaliumaufnahme von Maispflanzen

N. Claassen und A. Jungk

Institut für Pflanzenernährung der Universität Hannover, Herrenhäuser Straße 2,
D-3000 Hannover 21

Herrn Professor J. Wehrmann zum 65. Geburtstag gewidmet

Eingegangen: 10.8.1982

Angenommen: 14.9.1982

Zusammenfassung – Summary

Junge Maispflanzen wurden in Flachgefäßen auf einem Sand- und einem Lehmboden nach Zugabe von ^{43}K als Tracer angezogen und die Veränderung der K-Konzentration des Bodens in Wurzelnahe aus der Filmschwärzung von Autoradiogrammen bestimmt. In der nahen Umgebung der Wurzeln war – ähnlich wie bei früheren Versuchen mit P und Rb – eine scharf ausgeprägte K-Verarmungszone im Boden erkennbar. Kalium wurde besonders stark aus der von den Wurzelhaaren erreichbaren Bodenschicht bis zu 0,7 mm Abstand von der Oberfläche des Wurzelzylinders entzogen. Die von diesem Teil des Bodens in der Versuchszeit von 2,5 Tagen abgegebene K-Menge überstieg das zu Versuchsbeginn durch Ammoniumacetat austauschbare Kalium um das Doppelte. An diese Zone schloß sich in radialer Richtung ein Verarmungsprofil an, dessen maximale Ausdehnung im Lehmboden 3 mm und im Sandboden 5 mm betrug.

Die K-Konzentration der Bodenlösung sank in Wurzelnahe auf 2–3 $\mu\text{mol/l}$ ab. Um die Wirkung dieser Absenkung durch die Pflanze auf die K-Freigabe zu untersuchen, wurde der Boden in parallel angelegten Desorptionsversuchen schrittweise mit einer Lösung extrahiert, deren Kationenkonzentration – mit Ausnahme von Kalium – der Bodenlösung entsprach. Hierdurch ergab sich eine massive K-Freisetzung aus dem Boden, nachdem die Gleichgewichtskonzentration auf 2–3 $\mu\text{mol K/l}$ abgesunken war.

Es wird der Schluß gezogen, daß

- in einer Vegetationsperiode nur ein Teil des durchwurzelteten Bodenvolumens zur K-Versorgung der Pflanze beiträgt und andererseits
- erhebliche Anteile des von der Pflanze aufgenommenen Kaliums schon nach kurzer Zeit aus der nichtaustauschbaren Fraktion des Bodenkaliums stammen.

Potassium dynamics at the soil-root interface in relation to the uptake of potassium by maize plants

Young maize plants were grown in flat containers on a sandy and a silt loam soil after addition of ^{43}K as tracer. Changes of the K concentration in soil in the vicinity of the roots were determined by scanning the film density of autoradiographs. A distinct zone of K depletion in the soil adjacent to the root surface was observed, similar to those found earlier with phosphate and rubidium. The highest degree of depletion occurred within a distance of 0.7 mm from the surface of the root cylinder which corresponds to the average length of root hairs of the cultivar used. The quantity of K released within 2.5 days per unit of this part of the soil exceeded the exchangeable K by a factor of two. In a radial direction the zone of maximum depletion was followed by a depletion profile which extended over 5 mm in the sandy and over 3 mm in the silt loam soil.

The K concentration of the soil solution decreased to 2–3 $\mu\text{moles K/l}$ at the root surface. In order to determine the effect of depleting the K concentration by plant roots on the release of soil K, desorption studies were carried out in parallel. For this purpose the soil was successively extracted by solutions with cation concentrations corresponding to the soil solution, except for K. With this procedure a massive release of K from the soil was observed after the equilibrium concentration decreased to 2–3 $\mu\text{moles K/l}$.

It is concluded that

- in one growing season only part of the soil volume of the rooted layer contributes potassium to the plant and, on the other hand,
- substantial part of the potassium absorbed by plants is derived from nonexchangeable soil K, even in short periods of time.

Einleitung

Kalium wird überwiegend durch Diffusion und nur in geringem Maße durch Massenfluß aus dem Boden zur Wurzel transportiert (*Barber*, 1962). Man muß daher annehmen, daß die K-Konzentration des Bodens an der Oberfläche der Wurzeln absinkt. So entstehen durch den Entzug der Pflanzen Konzentrationsgradienten, von denen die K-Diffusion abhängt. Außerdem ist die Absenkung der K-Konzentration der Bodenlösung eine Voraussetzung für die Freigabe von nichtaustauschbarem Kalium aus Tonmineralien (*Scott und Smith*, 1966). Die Veränderung der K-Konzentration im wurzelnahen Boden ist demnach für die Verfügbarkeit des Kaliums von Bedeutung. Die vorliegende Arbeit hat das Ziel, diesen Aspekt der Verfügbarkeit des Kaliums im Boden zu untersuchen. Hierzu haben wir Versuche durchgeführt, um die Veränderung der K-Konzentration der Bodenlösung und die K-Abgabe des Bodens in der nahen Umgebung intakter Wurzeln zu erfassen.

Frühere Untersuchungen mit radioaktiv markiertem Rubidium (*Claassen et al.*, 1981b) hatten ergeben, daß sich im wurzelnahen Boden charakteristische Verarmungsprofile ausbilden. Man kann vermuten, daß sie die räumliche Ausdehnung der K-Verarmungszone zutreffend abbilden. Der Grad der K-Verarmung des wurzelnahen Bodens ist daraus jedoch nicht abzuleiten, weil die Bindungsfestigkeit des Kaliums im Boden von der des Rubidiums abweicht, wie *Fried et al.* (1959) sowie *Marckwordt und Niederbudde* (1964) gezeigt haben. Ungeeignet ist Rb insbesondere zur Bestimmung der Freigabe von nichtaustauschbarem K, von dem man seit langem weiß, daß es zur K-Versorgung der Pflanzen beiträgt (*Schachtschabel*, 1937, v. *Reichenbach*, 1958). Um diese Schwierigkeit zu umgehen, haben wir Versuche mit radioaktivem K durchgeführt. Von den beiden möglichen Isotopen ^{42}K und ^{43}K wurde das letztere gewählt, weil es infolge seiner geringeren β -Energie schärfere Autoradiogramme liefert. Die kurze Halbwertszeit von 22,4 h schränkt zwar die Dauer solcher Versuche auf wenige Tage ein. Dies erschien aber vertretbar, nachdem vorausgegangene Versuche mit ^{86}Rb als Tracer (*Claassen et al.*, 1981b) gezeigt hatten, daß sich die Verarmungszone in Wurzelnähe schon innerhalb eines Tages ausbildet und danach nur noch langsam ändert.

Material und Methoden

Für die Versuche wurden junge Maispflanzen nach der Vermischung des Bodens mit radioaktivem Kalium in Flachgefäßen angezogen, die K-Verteilung in der Umgebung der Wurzeln durch Autoradiogramme erfaßt und die Filmschwärzung in Wurzelnahe vermessen, wie von *Claassen et al.* (1981a) beschrieben. Die Beziehung zwischen Filmschwärzung und K-Gehalt des Bodens sowie der K-Konzentration der Bodenlösung wurde durch parallele Desorptionsversuche hergestellt.

Böden

Für die Versuche wurden zwei Böden verwendet:

Herrenhausen: schluffiger Sand, 4 % Ton, 374 μmol austauschbares K/100 g Boden

Bülten: schluffiger Lehm aus Löß, 166 μmol aust. K/100 g Boden.

Zugabe von ^{43}K -markiertem Kalium zum Boden

Das trägerfreie ^{43}K -Präparat, 380 μCi zu diesem Zeitpunkt, wurde mit H_2O auf 25 ml verdünnt (Lösung A), davon 5 ml je 10 g Boden gegeben, gründlich gemischt und 24 h feucht stehen gelassen. Danach Luft-Trocknung des Bodens, Wiederbefeuchtung auf etwa 10 % H_2O , Zerkleinerung und Sieben auf 0,5 mm.

Gefäße und ihre Bepflanzung

Die Pflanzen wurden in Flachgefäßen kultiviert, deren Art bei *Claassen et al.* (1981a) beschrieben ist. Für diese Versuche wurde eine kleine Ausführung von 5 cm Breite und 10 cm Höhe mit einer Schichtdicke des Bodens von nur 1 mm verwendet.

Der Boden wurde nach der oben beschriebenen Vorbereitung wie folgt in die Gefäße eingebracht: Um eine gleichmäßig dichte Bodenschicht zu erhalten, wurde beim Einfüllen Boden und Deckel durch zwei Drähte von 1,5 mm Dicke auf Abstand gehalten, zusammengeklammert und der Boden leicht eingerüttelt.

In der Mitte wurde ein Draht von 0,5 mm eingelegt, um den Weg der Wurzel vorzugeben. Nach Entfernung der 1,5 mm Drähte wurden Boden und Deckel fest zusammengedrückt. Dadurch ergab sich ein Volumengewicht des Bodens von 1,1 bis 1,3 g/cm^3 .

Nach Entfernung des 0,5 mm-Drahtes wurde der Boden mit dünner Folie bedeckt und der Deckel aufgelegt. Danach fügten wir die Keimwurzel, die auf etwa 1 cm Länge vorgekeimt war, in die entstandene Röhre ein, umgaben das Saatkorn mit nichtmarkiertem Boden und feuchteten es an. Das ganze Gefäß wurde nunmehr in einem Folienbeutel, um die Verdunstung zu hemmen, im Licht platziert. Schrägstellung veranlaßte die Wurzeln, an der nach unten geneigten Wandung entlang zu wachsen.

Als Versuchspflanze diente Mais (*Zea mays* cv. ‚Garbo‘).

Herstellung der Autoradiogramme und Bestimmung der K-Verteilung im wurzelnahen Boden

Um Autoradiogramme herzustellen, wurde ein, zwei und drei Tage nach der Bepflanzung Röntgenfilm „Structurix D 7“ (Agfa) auf die nach unten geneigte Seite der Vegetationsgefäße über die Folie gelegt, je nach Restaktivität für 5, 8 oder 16 h exponiert und entwickelt. Die Schwärzungsverteilung wurde auf dem Film mit einem Mikroskop-Photometer (Gerät G II der Firma Zeiss, Jena) ausgemessen.

Infolge der Reichweite der Strahlung von ^{43}K stellt die Schwärzungsverteilung des Autoradiogramms ein verzerrtes Abbild der Aktivitätsverteilung dar. Zur Beseitigung der Verzerrung wurde die Korrektur-Rechnung nach *Claassen et al.* (1981a) durchgeführt. Die hierzu notwendigen Übertragungskoeffizienten wurden entsprechend der Beschreibung für Rb ermittelt: Sie betragen:

$a = 0,308$; $b = 0,173$; $c = 0,100$; $d = 0,063$ und $e = 0,010$.

Die vom Boden abgegebene K-Menge wurde mit Hilfe der in Abb. 2 dargestellten Desorptionskurven abgelesen.

Isotopisch austauschbares Kalium

Fügt man ^{43}K zum Boden zu, so stellt sich ein Gleichgewicht zwischen der flüssigen und der festen Phase ein. Die K-Menge, die an diesem Gleichgewicht beteiligt ist, bildet die isotopisch austauschbare K-Menge. Sie wird nach *Fried und Dean* (1952) oder einfacher nach *Broadbent* (1970) durch Gleichung (1) errechnet:

$$K_{\text{isot. aust.}} = K_1 \cdot \frac{^{43}\text{K}_{\text{ges}}}{^{43}\text{K}_1} \quad (1)$$

Darin bedeuten

K_1 = K-Konz. der Gleichgewichtslösung, $\mu\text{mol/ml}$

$^{43}\text{K}_{\text{ges}}$ = zugegebene ^{43}K -Menge, Ipm/g Boden

Ipm = Impulse pro Minute

$^{43}\text{K}_{\text{ges}}$ = (ml Lösg. A/g Boden) \cdot (Ipm/ml Lösg. A) (2)

$^{43}\text{K}_1$ = ^{43}K -Konzentration der Gleichgewichtslösung, Ipm/ml (3)

Die Bestimmung des isotopisch austauschbaren K erfolgte jeweils zum Zeitpunkt, an dem auch die Messung der K-Verteilung in Wurzelnähe erfolgte. Hierzu wurden 0,5 g Boden mit 10 ml Desorptionslösung in einem Reagenzglas kurz geschüttelt, nach 24 h vom klaren Überstand 2 ml auf 10 ml verdünnt, hiervon 2 ml auf einer Planchette eingedampft und die Impulsrate mit einem Berthold-Durchflußzähler gemessen. Die zur Berechnung der ^{43}K -Mengen verwendeten Impulsraten ergaben sich nach Abzug des Null-Effektes und Berücksichtigung der Zerfallsrate von ^{43}K .

Die Impulsrate von Lösung A wurde nach 400-facher Verdünnung mit 10^{-3} M K_2SO_4 -Lösung in gleicher Weise gemessen.

Desorbierbares Kalium

Je 0,5 g Boden wurden auf Papierfilter in Trichter gebracht, deren Rohr mit Schlauch und Quetschhahn versehen war. Die Desorption erfolgte durch Zugabe von 10 ml Desorptionslösung zum Boden und deren Abzug nach einigen h durch Öffnen des Hahns. Dies wurde schrittweise mit je 25 ml der gleichen Lösung 8-mal wiederholt. Die Desorptionslösung entsprach – mit Ausnahme von Kalium – der Kationenkonzentration der Bodenlösung.

Sie enthielt:

Boden	mmol/Liter		
	CaCl_2	MgCl_2	NaCl
Bülten	36,0	1,30	7,20
Herrenhausen	7,5	0,60	0,85

Nach ihrer Passage durch den Boden wurden von den Desorptionslösungen 2 ml der ersten und je 10 ml von den weiteren Proben eingedampft und die ^{43}K -Impulsrate gemessen. Außerdem wurde flammenphotometrisch die Konzentration an nichtradioaktivem K gemessen, nachdem die Radioaktivität abgeklungen war. Die vom Boden bis zum jeweiligen Desorptionsschritt abgegebenen K-Mengen, die in Abb. 2 die Abszisse bilden, ergaben sich aus der Summe der K-Mengen dieser Lösungen. Der Wert von $^{43}\text{K}_{\text{ges}}$ ist die Differenz zwischen der zugefügten Aktivität und der bis zum jeweiligen Schritt desorbierten ^{43}K -Aktivität.

Durch Einsetzen dieser Daten in Gleichung (1) erfolgte die Bestimmung des isotopisch austauschbaren Kaliums für jeden einzelnen Desorptionsschritt.

Ergebnisse

Die Daten der Tabelle 1 kennzeichnen den Kalium-Status der verwendeten Böden. Es handelt sich demnach um einen relativ K-armen, tonreichen Lehm und einen K-reichen Sandboden. Die Unterschiede sind bei der K-Konzentration der Bodenlösung deutlicher als beim austauschbaren K. Auffällig ist, daß das isotopisch mit ^{43}K austauschbare K erheblich höhere Werte besitzt als das durch Ammoniumacetat austauschbare. Mit dem Kalium der Bodenlösung steht demnach erheblich mehr Kalium im Gleichgewicht als das austauschbare K anzeigt.

Tabelle 1: Angaben über die Kalium-Versorgung der Böden

Table 1: Some data on the potassium status of the soils used: NH_4OAc and ^{43}K -exchangeable K, soil solution K and K-buffer power

Boden	%	NH ₄ OAc-aust. isotop. ^{43}K -aust.		Bodenlsg. $\mu\text{mol K/l}$	K- Pufferung *
		$\mu\text{mol K} / 100\text{ g}$			
	Ton				
Bülten	21	166	330	150	14,4
Herrenhausen	4	374	563	760	6,4

* $b = (\text{NH}_4\text{OAc-aust.} \cdot 1,3/100)/(\text{K-Konz. Bdlsg.}/1000)$

Diese Arbeit stellt die Fortführung von Untersuchungen dar, in denen zunächst ^{86}Rb als Tracer für Kalium verwendet wurde (Claassen et al., 1981b). Daher ist ein Vergleich der Ergebnisse von Interesse, die mit ^{86}Rb und ^{43}K gewonnen wurden. In Abbildung 1 ist daher die Aktivitätsverteilung der beiden Nuklide in der Rhizosphäre von Mais in einem Sandboden dargestellt. Man sieht, daß die Kurvenzüge sehr ähnlich sind. Die Wurzel schöpft vor allem den Teil des Bodens aus, der weniger als 1 mm von der Oberfläche des Wurzelzylinders entfernt ist. Die Breite der Verarmungszone von ^{43}K ist etwas größer als die von ^{86}Rb . So erstreckt sich die Verarmung nach Abb. 1 bei einer Aktivität von 60 % für ^{86}Rb über 0,84 mm, für ^{43}K dagegen über 1,12 mm, also ein Drittel weiter.

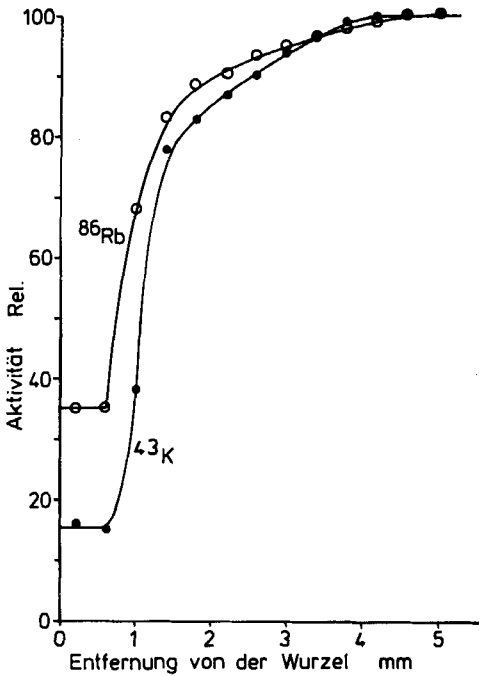


Abbildung 1: Verarmungsprofil der ^{86}Rb - und ^{43}K -Aktivität in der Umgebung von Maiswurzeln

Boden: Sandboden Herrenhausen, 4 % Ton
Aufnahmedauer: 1,5 Tage

Figure 1: Depletion profile of ^{86}Rb and ^{43}K activity in the vicinity of maize roots
Soil: Herrenhausen sandy soil, 4 % clay
Uptake period: 1.5 days

Dieser Unterschied war zu erwarten, weil sich auch die Pufferung der beiden Elemente unterscheidet, die in den Nenner der Diffusionsformel eingeht (Nye und Tinker, 1977). Die zusätzlich gemessene Pufferung beträgt in diesem Boden für Kalium 6,4, für Rb 8,6. Die Werte unterscheiden sich also ebenfalls um ein Drittel. Bei vergleichbaren Diffusionsbedingungen ist demnach für ^{86}Rb etwa mit dem gleichen Einzugsbereich einer Wurzel wie für ^{43}K zu rechnen.

Nach Abb. 1 ist auch der Grad der Aktivitätsabsenkung in Wurzelnahe bei Kalium größer als bei Rubidium. Dies steht in der Tendenz ebenfalls mit der höheren Pufferung von Rb in Einklang. Genaue Vergleiche sind jedoch in diesem Fall nicht möglich, weil hierzu die Konzentration statt der Aktivität betrachtet werden muß. Um von der ^{43}K -Aktivität des Bodens auf die K-Konzentration schließen zu können, wurden Desorptionsstudien an den mit ^{43}K markierten Böden durchgeführt. Hierzu wurde der Verarmungsprozeß, der sich in Wurzelnahe abspielt, durch wiederholte Extraktion mit K-freier Bodenlösung nachgeahmt. Dies erschien notwendig, weil aufgrund von Vorversuchen mit der Möglichkeit zu rechnen war, daß sich das isotopisch austauschbare K mit der Absenkung der K-Konzentration ändert. Hierfür muß zunächst die Beziehung zwischen der extrahierten K-Menge und der im Boden verbliebenen Restaktivität bekannt sein.

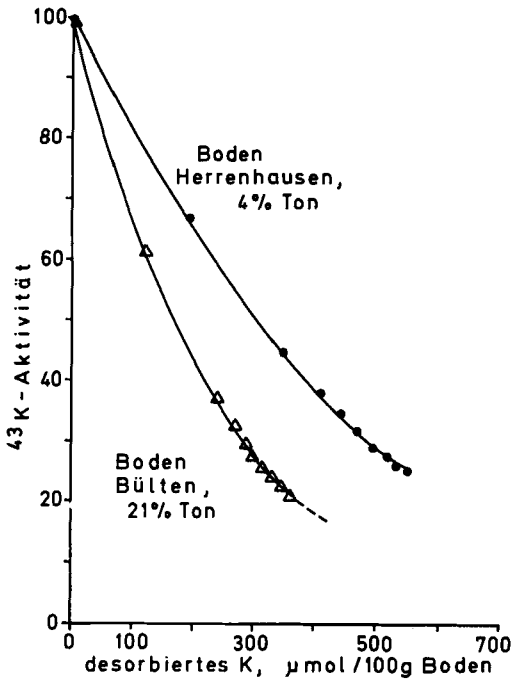


Abbildung 2: Beziehung zwischen der ^{43}K -Aktivität und der desorbierten K-Menge von zwei Böden

Figure 2: Relation between ^{43}K activity and quantity of K released from two soils (Herrenhausen sandy soil, 4% clay, and Bülten silt loam, 21% clay)

Sie ist in Abb. 2 für die zwei verwendeten Böden graphisch dargestellt. Die Kurven dienen als Eichkurven zur Ablese der vom Boden freigesetzten K-Mengen aus den Aktivitätswerten. Abb. 2 zeigt erwartungsgemäß, daß die ^{43}K -Aktivität des Bodens mit fortschreitender K-Desorption abnimmt. Bemerkenswert ist die Nichtlinearität der Kurven; sie flachen im unteren Bereich ab. Mit der Zahl der Desorptionsschritte, d.h. mit abnehmendem K-Gehalt des Bodens, nimmt demnach bei gleicher Änderung der ^{43}K -Aktivität die extrahierte K-Menge zu. Das isotopisch austauschbare K stellt demzufolge keine konstante Fraktion dar. Dieser Sachverhalt ist zahlenmäßig an der spezifischen Aktivität des desorbierten K zu erkennen (Tab. 2). Sie nimmt mit zunehmender K-Verarmung des Bodens erheblich ab.

In welchem Maße K durch die Desorption in Wechselwirkung mit der Bodenlösung kommt, ist am isotopisch austauschbaren K zu erkennen. Spalte 5 von Tabelle 2 gibt das nach der jeweiligen Extraktion im Boden verbliebene isotopisch austauschbare K an. Es nimmt erwartungsgemäß mit jedem Extraktionsschritt zunächst ab. Nach dem 4. Schritt steigt es jedoch überraschenderweise wieder an. Offenbar setzt an diesem Punkt eine massive Freigabe von inaktivem, d.h. zuvor nichtaustauschbarem K ein. Der Sandboden hat ein entsprechendes Bild ergeben. Es waren lediglich größere K-Mengen zu extrahieren, bevor der Wiederanstieg des isotopisch austauschbaren K einsetzte.

Tabelle 2: Extrahierte K-Menge in Beziehung zur K-Konzentration und der spezifischen ^{43}K -Aktivität der Gleichgewichtslösung sowie dem isotopisch austauschbaren K bei wiederholter Desorption (Boden Bülten, 21 % Ton)

Table 2: Extracted quantity of K in relation to K concentration and specific activity of the equilibrium solution and isotop. exchangeable K by repeated desorption (Bülten silt loam, 21 % clay)

Anzahl der Extraktions-schritte	extrahierte K-Menge	K-Konz. d. Gl.-Gew.-Lösung	Spezif. Aktivität	isotop. aust. K
	$\frac{\mu\text{mol K}}{100\text{ g Boden}}$	$\mu\text{mol K/l}$	Ipm/ $\mu\text{mol K}$	$\frac{\mu\text{mol K}}{100\text{ g Boden}}$
1	0	70,0	6243	330
2	127	19,0	3979	318
3	245	4,9	3939	202
4	275	2,4	3958	171
5	290	2,4	2917	213
6	305	2,5	2440	236
7	321	2,7	2074	259
8	338	2,2	2045	246
9	351	2,5	1360	349

Die Summe von isotopisch austauschbarem und dem bereits extrahierten K (Abb. 3) kann als Indikator für die Menge an pflanzenverfügbarem K angesehen werden. Sie beträgt nach dem 9. Desorptionsschritt etwa $700\ \mu\text{mol}/100\ \text{g}$ Boden. Im Vergleich zu den $166\ \mu\text{mol K}$ (Tab. 1), die zu Versuchsbeginn als NH_4OAc -austauschbares K vorlagen, wird deutlich, daß durch die Absenkung der K-Konzentration der Lösung große K-Mengen mobilisierbar sind.

Im Hinblick auf die Pflanzenverfügbarkeit des Kaliums erscheint die Beziehung zwischen der K-Konzentration der Gleichgewichtslösung und dem isotopisch austauschbaren K bedeutsam. Aus Abb. 3 ergibt sich, daß die Zunahme des isotopisch austauschbaren K einsetzt, wenn die K-Konzentration der umgebenden Lösung auf $2\text{--}3\ \mu\text{mol K/l}$ abgesunken ist. Man kann demnach vermuten, daß auch Pflanzen große K-Vorräte des Bodens mobilisieren können, wenn sie in der Lage sind, die K-Konzentration der Bodenlösung in der Umgebung ihrer Wurzeln auf ähnlich niedrige Werte abzusenken.

Die K-Konzentration der Bodenlösung in Wurzelnähe ist daher von besonderem Interesse. Tatsächlich hat die Ausmessung der mit ^{43}K erhaltenen Autoradiogramme in Verbindung mit den Desorptionsuntersuchungen ergeben, daß die K-Konzentration der Bodenlösung im wurzelnahen Boden $2\text{--}3\ \mu\text{mol K/l}$ beträgt. Der Verlauf des Konzentrationsprofils der zwei untersuchten Böden ist in Abb. 4 dargestellt. Man sieht, daß die Bodenlösung in beiden Böden innerhalb der Wurzelhaarzone von $0,7\ \text{mm}$ weitgehend von Kalium entleert wird, obwohl die Ausgangskonzentrationen sehr unterschiedlich waren.

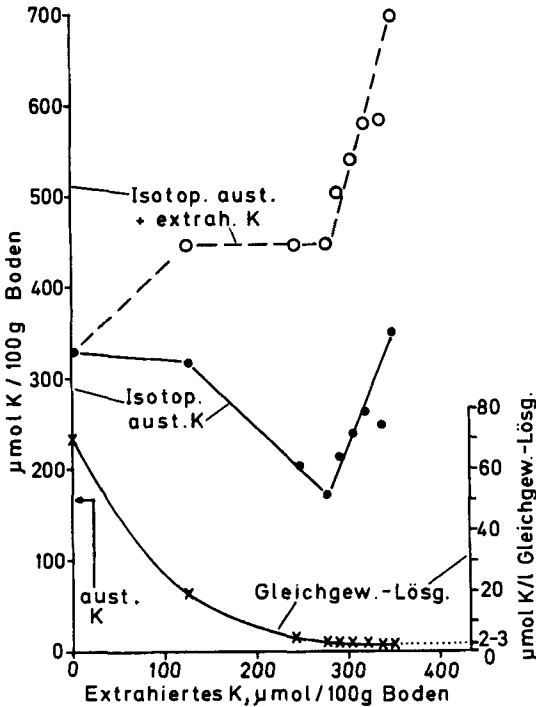


Abbildung 3: Isotopisch (⁴³K) austauschbares K und K-Konzentration der Gleichgewichtslösung in Beziehung zur K-Menge, die durch wiederholte Extraktionen mit K-freier Bodenlösung erfaßt wird
 Boden Bültlen, schluffiger Lehm, 21 % Ton
Figure 3: Isotopically (⁴³K) exchangeable K and K concentration of the equilibrium solution in relation to the quantity of K released from soil by successive extraction with soil solution devoid of K

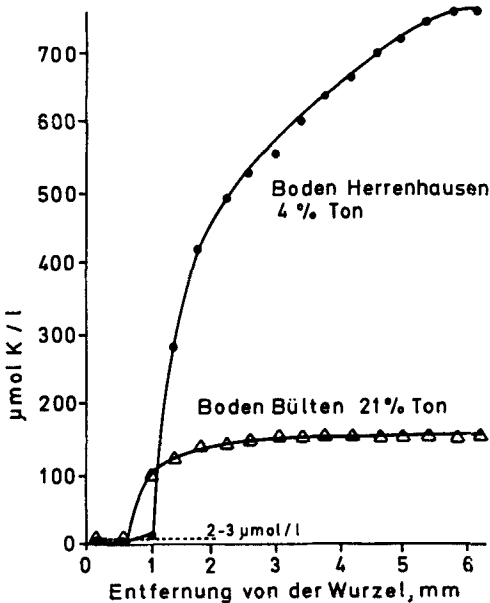


Abbildung 4: Kalium-Konzentration der Bodenlösung in der Umgebung von Maiswurzeln (mit ⁴³K ermittelt)
 K-Konzentration an der Wurzeloberfläche: 2-3 μmol/l
Figure 4: Potassium concentration of the soil solution in the vicinity of maize roots (with ⁴³K determined)
 K concentration at the root surface: 2-3 μmol/l

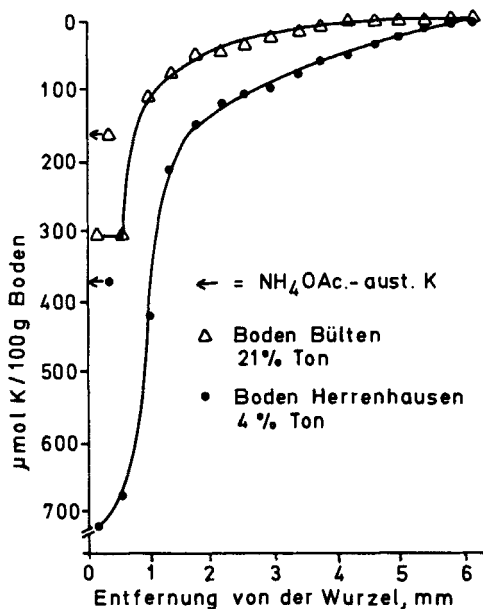


Abbildung 5: Kalium Verarmungsprofil von zwei Böden in der Rhizosphäre von Mais (mit ^{43}K ermittelt).

Figure 5: Potassium depletion profile of two different soils in the rhizosphere of maize (with ^{43}K determined)

An der Wurzeloberfläche der Maispflanzen liegen demnach Bedingungen vor, die im Desorptionsversuch zur Freigabe von nichtaustauschbarem K geführt haben.

Die K-Mengen, die die Böden in der Umgebung der Wurzel an die Pflanzen abgegeben haben, sind in Abb. 5 dargestellt. Wie man sieht, unterscheiden sich die Verarmungsprofile der beiden Böden sowohl im Grad der Verarmung als auch in der räumlichen Ausdehnung der Verarmungszone. Der Unterschied steht nach seiner Richtung mit dem Gehalt an austauschbarem K und der Höhe der K-Pufferung (Tab. 1) in Einklang.

Durch Vergleich mit Tab. 1 ist zu erkennen, daß die K-Mengen, die die Böden in Wurzelnähe abgegeben haben, den durch Ammoniumacetat austauschbaren Anteil um das Doppelte übersteigen. Die Pflanzen konnten demnach in erheblichem Maße nichtaustauschbares Kalium mobilisieren und aufnehmen, obwohl die Kontaktzeit der Wurzelabschnitte mit dem Boden nur 2,5 Tage betrug.

Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, daß Pflanzen den Kaliumvorrat von Böden nicht gleichmäßig ausschöpfen. In der nahen Umgebung der Wurzeln bilden sich schmale Verarmungszone, deren K-Verlust aber weit über das austauschbare K hinausgeht, das zu Versuchsbeginn vorlag. Die Verarmungszone geht mit steilen Gradienten in den unverarmten Boden über. Dieser Sachverhalt entspricht im Prinzip dem Bild, daß sich für Phosphat (Bhat und Nye, 1973; Hendriks et al. 1981) und für Rubidium (Claassen et al. 1981b) ergeben hat. Die Verfügbarkeit von Kalium hängt demnach keineswegs allein von

chemischen Faktoren ab, wie dem K-Gehalt des Bodens und der K-Bindungsfestigkeit, sondern ebenso von der räumlichen Zugänglichkeit. Der Anteil des Bodens, der zur K-Versorgung der Pflanze beiträgt, ist durch die chemische Bodenuntersuchung nicht bestimmbar. Hierin ist einer der Gründe für die geringe Treffsicherheit der chemischen Bodenuntersuchung bei der Bestimmung des K-Düngebedarfs zu sehen, über die u.a. *Schwerdt* und *Jessen* (1961) berichten.

Die Bedeutung des räumlichen Aspektes der K-Verfügbarkeit kann durch eine einfache Rechnung vor Augen geführt werden. Nimmt man die Zone der wesentlichen K-Verarmung des Bodens mit 1 mm Radius vom Zentrum der Wurzel an, so ergibt sich ein Volumen von $0,03 \text{ cm}^3$ Boden, das pro cm Wurzel stark ausgeschöpft wird. Bei einer Wurzel-dichte von 3 cm/cm^3 Boden, die in der Ackerkrume bei Winterweizen vorkommt (*Böhm*, 1978), wird demnach nur ein Zehntel des Oberbodens durch den Pflanzenbestand in so hohem Maße an Kalium verarmt. Über die Zone der maximalen Verarmung hinaus trägt zwar noch ein weiterer Teil des Bodens zur K-Versorgung der Wurzel bei. In dem Sandboden, dessen K-Verarmungszone sich in radialer Richtung bis zu 5 mm ausdehnt, kommt es sogar zur Überlappung der Verarmungszonen. Der Grad der Entleerung des Bodens nimmt jedoch mit der Entfernung von der Wurzel sehr rasch ab. Neben Zonen sehr starker Verarmung bleiben demnach große Bereiche nahezu unberührt. Nachwachsende Wurzeln treffen daher jederzeit auf unverarmten Boden. Die nachhaltige Konstanz der K-Versorgung, besonders von hoch gepufferten Böden, prägt sich hierin aus.

Die Ausschöpfung des Bodens geht von der Absenkung der K-Konzentration der Bodenlösung durch die Wurzel aus. Der hier gefundene Minimalwert von 2–3 $\mu\text{mol K/l}$ ist etwas höher als die Restkonzentration, die man bei der Verarmung von Nährlösungen durch Pflanzen findet. *Barber* (1979) nennt hierzu Werte von 2 μmol , in eigenen Versuchen (unveröffentlicht) wurden minimal 1 $\mu\text{mol K/l}$ gefunden. Es war zu erwarten, daß der Wert im Boden nicht so weit wie in einer Nährlösung absinkt, weil die Bodenlösung nahe der Wurzel sowohl durch Transport aus entfernteren Teilen des Bodens als auch durch Freisetzung von der festen Bodensubstanz ständig ergänzt wird. Angesichts dieser Überlegung erscheint der gefundene Wert erstaunlich niedrig; ein Hinweis auf die hohe Effizienz der Wurzel.

Die K-Konzentration an der Wurzel ist für die K-Verfügbarkeit aus zwei Gründen bedeutsam. Sie bestimmt erstens den Gesamt-Gradienten der K-Konzentration zwischen Wurzeloberfläche und dem entfernteren, unverarmten Boden. Von ihm ist die Diffusion und damit die K-Transportrate zur Wurzel abhängig. Da allerdings die Bodenlösung an der Wurzel fast völlig entleert wird, ist dieser Gradient praktisch nur von der K-Konzentration der Bodenlösung abhängig. Man kann sagen: die Pflanze stellt den maximal möglichen Gradienten her. Mit der Höhe des Gradienten steigt auch die Transportentfernung. Daher ist in dem Sandboden die Ausdehnung der Verarmungszone (Abb. 5) größer als in dem Lehmboden. Das Volumen Boden pro cm Wurzel, d.h. der Einzugsbereich wird größer.

Zweitens ist die Absenkung der K-Konzentration maßgebend für die K-Freisetzung aus der festen Phase. *Grimme* (1978) hat darauf hingewiesen, daß dabei zwei Puffersysteme

wirksam werden: die K-Abgabe aus dem austauschbaren und aus dem nichtaustauschbaren K-Vorrat des Bodens. Von besonderem Interesse erscheint hier die Freigabe von nichtaustauschbarem K. Die Ergebnisse zeigen, daß die Absenkung der Konzentration auf 2–3 $\mu\text{mol K/l}$ zur K-Freigabe aus dieser Fraktion und zur Aufnahme in die Pflanze führt. Das zweite der oben genannten Puffersysteme ist dabei offenbar von großer Wirksamkeit. Wie aus Abb. 3 zu entnehmen ist, bleibt die Gleichgewichtskonzentration praktisch konstant, während durch wiederholte Desorption eine erhebliche K-Menge entfernt wurde. Auch die Pflanze kann diese K-Quelle in erheblichem Maße nutzen, wie aus Abb. 5 zu erkennen ist, wenn man die Minimalwerte mit dem austauschbaren K (Tab. 1) vergleicht. Beachtlich erscheint, daß die untersuchten Wurzelabschnitte bereits nach 2,5 Tagen das Doppelte der austauschbaren K-Menge entzogen haben. Diese Wirksamkeit ist offenbar der Grund dafür, daß bei hochgepufferten Böden schon sehr niedrige Konzentrationen der Bodenlösung ausreichen, um die Pflanzen ausreichend mit K zu versorgen, wie Ergebnisse von *Niederbudde* (1978) belegen. Hiermit stimmt überein, daß die K-Konzentrationen, die an der Wurzel gehalten werden müssen, um die Pflanze ausreichend zu versorgen, nach *Woodhouse et al.* (1978) nur wenige $\mu\text{mol/l}$ betragen. Die Pflanze nutzt demnach nichtaustauschbares K keineswegs nur unter K-Mangelbedingungen.

Das nichtaustauschbare Kalium stammt offenbar aus den Zwischenschichten der Tonminerale. Es ist schon lange bekannt (*Sumner u. Bolt*, 1962; *Scott u. Smith*, 1966), daß bei niedriger K-Konzentration Zwischenschicht-K austauschbar wird. Das ist in dieser Arbeit (Tab. 2) an der Abnahme der spezifischen Aktivität des extrahierten Kaliums mit zunehmender Zahl der Desorptionsschritte erkennbar. Das Gegenstück dazu ist die Zunahme des isotopisch austauschbaren K (Abb. 3). Je weiter demnach die K-Abgabe der Minerale fortschreitet, umso mehr inaktive K-Ionen werden pro Einheit ^{43}K freigesetzt. Desorption bzw. Entzug führen folglich zur Erschließung von K-Vorräten, die am Beginn des Versuches durch das zum Boden gegebene ^{43}K nicht austauschbar waren.

Danksagung

Wir danken Herrn Prof. *H. Glubrecht*, Institut für Biophysik der Universität Hannover, und Herrn Prof. *W. Kühn*, Abt. für Ökologische Physik der GSF, München, für ihre Unterstützung bei der Arbeit mit Radionukliden, der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Förderung des Projektes.

Literatur

- Barber, S.A.* (1962): A diffusion and mass flow concept of soil nutrient availability. *Soil Sci.* 93, 39–49.
- Barber, S.A.* (1979): In "The Soil-Root Interface" p. 5–20 Hrsg. *Harley, J.L. and Scott Russel, R.*, Academic Press, New York.
- Bhat, K.K.S. und Nye, P.H.* (1973): Diffusion of phosphate to plant roots in soil. I. Quantitati-

- ve autoradiography of the depletion zone. *Plant and Soil*, **38**, 161–175.
- Böhm, W.* (1978): Untersuchungen zur Wurzelentwicklung bei Winterweizen. *Z. Acker-Pflanzenbau* **147**, 264–269.
- Broadbent, F.E.* (1970): Variables affecting A values as a measure of soil nitrogen availability. *Soil Sci.* **110**, 19–23.
- Claassen, N., Hendriks, L., Jungk, A.* (1981a): Erfassung der Mineralstoffverteilung im wurzelnahen Boden durch Autoradiographie *Z. Pflanzenernähr. Bodenkunde* **144**, 306–316.
- Claassen, N., Hendriks, L., Jungk, A.* (1981b): Rubidium-Verarmung des wurzelnahen Bodens durch Maispflanzen. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkunde* **144**, 533–545.
- Fried, M. u. Dean, L.A.* (1952): A concept concerning the measurement of available soil nutrients. *Soil Sci.* **73**, 263–271.
- Fried, M., Hawkes, G., Mackie, W.Z.* (1959): Rubidium-potassium relations in the soil-plant system *Proc. Soil Sci. Soc. America* **23**, 360–362.
- Grimme, H.* (1978): Zur K-Dynamik in K-fixierenden Böden. Sonderheft 35 (Kongreßband 1978) *Landwirtsch. Forsch.* 205–218.
- Hendriks, L., Claassen, N., Jungk, A.* (1981): Phosphatverarmung des wurzelnahen Bodens und Phosphataufnahme von Mais und Raps. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkunde* **144**, 486–499.
- Marckwordt, U. u. Niederbudde, E.A.* (1964): Tracerversuche zur Verfügbarkeit des Kaliums in fixierenden Böden. 18. Sonderh. *Landwirtsch. Forsch.*, 75–83.
- Niederbudde, E.A.* (1978): Tonminerale als Faktoren der K-Verfügbarkeit in Böden Bayerns. 35. Sonderheft (Kongreßband 1978) *Landwirtsch. Forsch.* 193–204.
- Nye, P.H. u. Tinker, P.B.* (1977): Solute movement in the soil-root system. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Reichenbach, H. Graf v.* (1958): Über Beziehungen zwischen Kaliumnachlieferung und Kaliumfestlegung des Bodens. *Verhandl. Komm. II u. IV d. Intern. bodenkundl. Ges. Hamburg* **2**, 188–193.
- Schachtschabel, P.* (1937): Aufnahme von nicht-austauschbarem Kali durch die Pflanzen. *Bodenk. u. Pflanzenernährung* **48**, 107–133.
- Schwerdt, K. u. Jessen, W.* (1961): Düngungserfolg durch Kali auf hessischem Lößlehmböden. *Landwirtsch. Forsch.* 100–167.
- Scott, A.D. u. Smith, S.J.* (1966): Susceptibility of interlayer potassium in micas to exchange with sodium. *Clays and Clay Minerals* **26**, 69–81.
- Sumner, M.E. u. Bolt, G.H.* (1962): Isotopic exchange of potassium in an illite under equilibrium conditions. *Proc. Am. Soil Sci. Soc.* **26**, 541–544.
- Woodhouse, P.J., Wild, A. u. Clement, C.R.* (1978): Rate of uptake of potassium by three crop species in relation to growth. *J. Exp. Bot.* **29**, 885–894.

[P4165P]