

Kalium-Verfügbarkeit und Kalium-Dynamik in der Rhizosphäre

R. Kuchenbuch und N. Claassen

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird versucht, aufgrund des Wissens über Vorgänge in der Nähe der Pflanzenwurzel die Bedeutung

- der Kalium-Aufnahme der Pflanze,
- einer Kalium-Düngung und
- physiologischer und morphologischer Eigenschaften der Wurzel für die Kalium-Verfügbarkeit aufzuzeigen. Im einzelnen ergibt sich:

1. Die Pflanzenwurzel kann in ihrer unmittelbaren Umgebung

- die Konzentration der Bodenlösung stark erniedrigen, dadurch
- die Kaliumabgabe der Bodenpartikel bewirken und ihnen
- große Mengen an Kalium entziehen.

Dabei wird Kalium sowohl aus der austauschbaren als auch der nicht-austauschbaren Fraktion des Bodens abgegeben.

2. Nicht der gesamte Boden wird durch eine Kultur an Kalium entleert, sondern in starkem Maße nur ein dünner Zylinder um die Wurzel herum. Daher sind auch bei unterlassener Düngung zunächst die Ergebnisse der Bodenanalyse und die Verfügbarkeit von Kalium keinen drastischen Veränderungen unterworfen.

3. Die verfügbare Kaliummenge hängt auch von Pflanzeigenschaften ab:

- der Fähigkeit, die Kalium-Konzentration der Bodenlösung abzusenken,
- der Wurzellänge der Pflanzen,
- der Länge der Wurzelhaare.

Die Wurzeigenschaften müssen daher ebenso wie eine Reihe Bodeneigenschaften als Faktoren der Kaliumverfügbarkeit angesehen werden.

Schlüsselworte:

Pflanzenernährung - Nährstoffverfügbarkeit - Nährstoffdynamik - Wurzel - Weizen - Raps - Zwiebel - Kalium

Einführung

Die Pflanzenverfügbarkeit von Kalium im Boden ist ein Begriff, der sich trotz zahlreicher Versuche immer noch der zahlenmäßigen Erfassung entzieht. Für die landbauliche Praxis wird die Kalium-Versorgung "routinemäßig durch chemische Bodenuntersuchungen ermittelt. Das Ergebnis soll zeigen, ob ein Boden die zum normalen Wachstum der Pflanze notwendige Kaliummenge abgeben kann. In der Vergangenheit ist zu diesem Zweck eine Vielfalt von Extraktionsmethoden entwickelt worden, mit denen bestimmte Kaliumfraktionen des Bodens gemessen werden. Aus solchen Ergebnissen werden Düngungsempfehlungen abgeleitet, die den Höchstertrag der Pflanzen ermöglichen und die Ertragsfähigkeit des Bodens langfristig sichern sollen. Nach dieser Vorstellung besteht eine gesetzmäßige Beziehung zwischen dem Kaliumgehalt des Bodens und dem Ertrag von Kulturpflanzen.

Tatsächlich ist in Gefäßversuchen ein solcher Zusammenhang beobachtet worden. Feldversuche haben diesen Sachverhalt dagegen im allgemeinen nicht bestätigt. So haben *Rathsack* und *Jungk* (1969) sowie *Philb* und *Wiebach* (1972) festgestellt, daß Kalium-Dünger unabhängig vom Gehalt - also auch bei relativ hohen Werten im Boden - häufig zu gewissen, im allgemeinen aber nur geringen Mehrerträgen führt. Umgekehrt gibt es Fälle, bei denen bei geringen K-Gehalten des Bodens eine Ertragswirkung des Kaliumdüngers nicht auftritt (*Schwerdt* und *Jessen* 1961, *Finger* 1966, *Köhlein* 1976, *Kuhlmann* und *Wehrmann* 1984). Aus solchen Versuchsergebnissen muß gefolgert werden, daß die Bodenuntersuchung in ihrer jetzigen Form nur in manchen Fällen geeignet ist, um treffichere Vorhersagen über die verfügbare Kaliummenge eines Bodens und den Kalium-Düngerbedarf zu machen.

Schon *Bray* (1954) hat die Vorstellung geäußert, daß für die Verfügbarkeit eines Nährstoffs nicht der Gehalt im Boden, sondern seine Mobilität von maßgebender Bedeutung ist. Diese Vorstellung wird theoretisch gestützt durch die geringe Diffusibilität von Kationen im Boden. Experimentell ist sie durch autoradiographische Aufnahmen von *Walker* und *Barber* (1961), *Bhat* und *Nye* (1973), *Wilkinson* et al. (1968), *Claassen* et al. (1981) und *Claassen* und *Jungk* (1982) bestätigt worden. Aus diesen Untersuchungen geht hervor, daß sich in der unmittelbaren Umgebung der Wurzel Verarmungszonen ausbilden, die eine Ausdehnung von nur wenigen Millimetern besitzen.

Diese Entdeckung führt zu dem Schluß, daß die K-Dynamik im wurzelnahen Boden von Bedeutung für die K-Verfügbarkeit ist.

Auf der Grundlage unseres Wissens über die Vorgänge in Wurzelnähe sollen drei Fragen beantwortet werden.

1. Wie eignet sich die Pflanze Kalium an?
2. Welchen Einfluß hat eine Kaliumdüngung auf die in Wurzelnähe verfügbare Kaliummenge?
3. Welche Bedeutung hat die Gestalt der Pflanzenwurzel für die Verfügbarkeit von Kalium?

Material und Methoden**K-Desorption eines Lößbodens**

Je 0,3 g Boden wurden auf säuregewaschene Papierfilter in Glasrichter gebracht, deren Rohr mit einem Hahn versehen war. Die Desorption erfolgte durch Zugabe von 30 ml Desorptionslösung zum Boden und deren Abzug nach mehr als 8 h durch Öffnen des Hahns. Dies wurde mehrmals wiederholt. Die Lösung entsprach in ihrer Ca-Konzentration etwa der Bodenlösung (0,01 M CaCl₂). Die desorbierte K-Menge zum jeweiligen Zeitpunkt errechnet sich aus der K-Konzentration und Menge des Eluates.

K-Verarmungsprofil im wurzelnahen Boden

- Die Konzentration von austauschbarem Kalium im wurzelnahen Boden wurde mit der von *Kuchenbuch* und *Jungk* (1982) entwickelten Methode bestimmt. Hierbei wurden Kapselpflanzen (*Brassica napus*, cv. „Quinta“) in kleinen Gefäßen herangezogen, in denen ein Nylonnetz von 30 µm Maschenweite die Wurzeln vom Boden trennt. Durch eine große Zahl von vorgekeimten Pflanzen pro Gefäß wurde erreicht, daß die Netzoberfläche schon nach ca. 3 Tagen vollständig mit Wurzeln bedeckt war. Das Netz hinderte die Wurzeln, in den Boden einzudringen, jedoch nicht die Wurzelhaare. Nach der Ernte der Pflanzen wurde der Boden in Schichten von ca. 60 µm Dicke mit einem Gefermikrotom zerlegt. Je drei solcher Schichten wurden zu einer Probe vereinigt. Auf diese Weise ergaben sich Bodenproben von ca. 300 mg Gewicht, die eine definierte Entfernung von der Wurzel aufweisen. Weitere Einzelheiten zur Methode sind bei *Kuchenbuch* (1983) angegeben.

Aus der Konzentrationsverteilung des austauschbaren Kaliums ist die Kaliumabgabe des Bodens errechnet worden. Hierzu wurde das Verarmungsprofil graphisch in Schichten geeigneter Dicke unterteilt, die mittlere Konzentration der jeweiligen Schicht aus der Abbildung entnommen und hieraus die K-Abgabe errechnet. Die gesamte vom Boden abgegebene K-Menge ergab sich aus der Addition der K-Abgabe der einzelnen Schichten.

K-Einzugsbereich der Wurzel

- Um die Ausdehnung der K-Verarmungszone in der Umgebung der Wurzeln zu ermitteln, wurde der Boden mit ⁸⁶Rb-markiertem Rb homogen vermischt und Autoradiogramme der Wurzelumgebung nach der Methode von *Claassen* et al. (1981) hergestellt. Hierzu wurde ein Sandboden (Herrenhausen, 4,4% Ton, pH [H₂O] = 7,1) auf 0,2 mm gesiebt und mit 125 µmol Rb/100 g Boden vermischt. Die Messung des austauschbaren Anteils ergab danach 129 µmol Rb und 260 µmol K/100 g Boden. Der Bodensättigungsextrakt enthielt 20 µmol Rb und 364 µmol K/l. Rubidium wurde vor der Zugabe zum Boden mit ⁸⁶Rb in solcher Menge vermischt, daß die Aktivitätskonzentration zum Expositionsstermin 1 µ Ci/g Boden betrug. Zur Gleichgewichtseinstellung wurde bis zur Messung der Bodengehalte bzw. bis zur Befruchtung eine Wartezeit von 11 Tagen eingeschaltet.

Zur Herstellung der Autoradiogramme wurde der mit ^{86}Rb markierte Boden in Flachgefäße gefüllt und mit vorgekeimtem Samen bepflanzt. Infolge Schrägstellung dieser Gefäße wuchsen die Wurzeln an der nach unten geneigten Wandung entlang, auf diese Seite kam über dünner Folie Röntgenfilm „Strukturix D 7“ (Agfa Gevaert) 4 h zur Exposition.

Nach der Entwicklung des Films erfolgte die Messung der Schwärzungsverteilung in der Umgebung der Wurzeln mit einem Mikroskopphotometer (G. II, Zeiss Jena). Weitere Einzelheiten der Methode sind bei Claassen et al. (1981) aufgeführt. Die Umrechnung der Filmschwärzungen auf Aktivitätswerte erschien nicht notwendig, da in diesem Fall nur die radiale Ausdehnung der Verarmungszone, nicht die Konzentrationsabsenkung von Interesse war. Sie ist mit genügender Genauigkeit aus den Schwärzungswerten ersichtlich.

Austauschbares Kalium: Fünfmaliges Durchwaschen der Bodenproben mit 1 M $\text{NH}_4\text{-Acetat}$ und flammphotometrische K-Messung.

Effektiver Diffusionskoeffizient D_e : Nach der Methode von Valdyamathan und Nye (1966) mittels Ionenaustauschpapier, das mit Protonen belegt war.

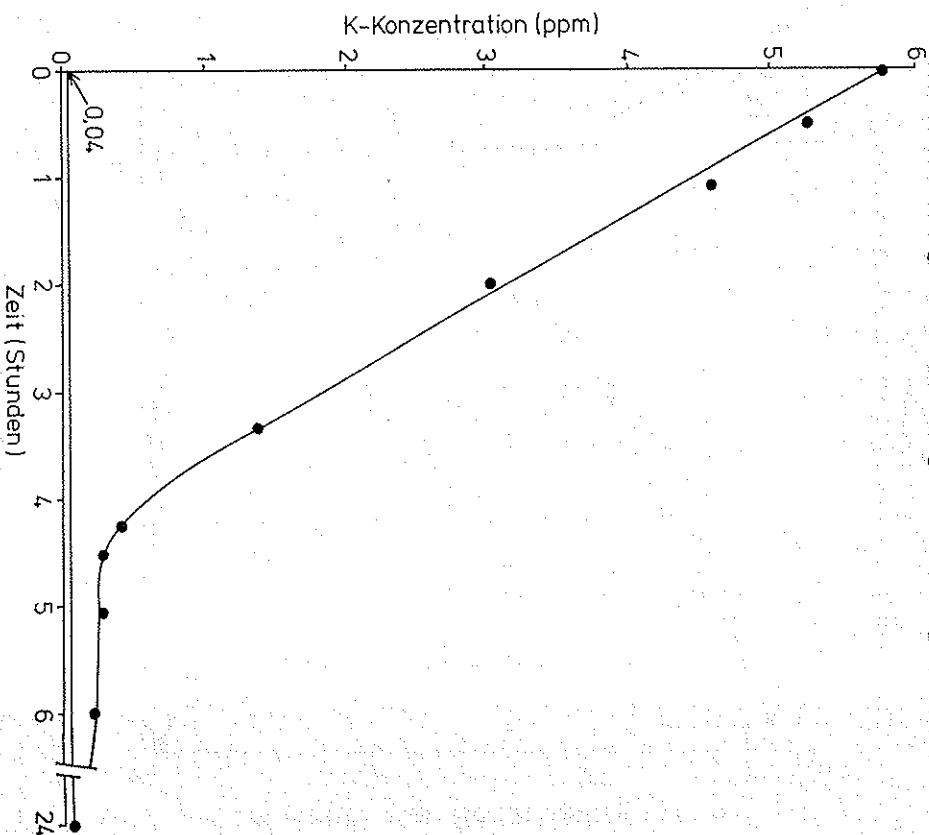
Ergebnisse und Diskussion

Es ist unbestritten, daß Pflanzenwurzeln Nährstoffe nur aus Lösung aufnehmen können. **Darstellung 1** zeigt das Ergebnis eines Versuchs, in dem junge Weizenpflanzen eine Nahrung an Kalium verarmen, in diesem Versuch ist somit der Boden als Nährstoffspeicher nicht berücksichtigt. Im Konzentrationsbereich von 6 bis etwa 1 ppm K entleeren die Wurzeln die Lösung mit konstanter Rate. Unterhalb 1 ppm K verlangsamt sich der Prozeß, und nach einer Aufnahmezeit von 24 h stellt sich eine Minimalkonzentration von 0,04 ppm K ein. Dies zeigt die Fähigkeit der Pflanzenwurzel, die K-Konzentration der umgebenden Lösung bis auf sehr niedrige Werte zu entleeren.

Die Reaktion des Bodens auf eine solche Konzentrationsabsenkung in der umgebenden Lösung ist aus **Darstellung 2** zu ersehen. Es handelt sich um einen Lößlehm, dem durch Desorption mit kaliumfreier Lösung Kalium entzogen wurde. Die K-Konzentration der Bodenlösung beträgt etwa 15 ppm; durch den ersten Extraktionsschritt sinkt sie auf etwa 2 ppm ab, hierbei setzt der Boden 20 mg K/100 g Boden in die Lösung frei. Bei Fortführung der Desorption wird für diesen Boden eine Endkonzentration von etwa 0,1 ppm K erreicht, wobei mit jeder Extraktion vom Boden Kalium an die umgebende Lösung abgegeben wird. Insgesamt wird deutlich mehr Kalium von den Mineralen freigesetzt, als der Boden zu Versuchsbeginn austauschbar enthält; die Konzentration der Bodenlösung wird hierbei auf Werte abgesenkt, bei denen Pflanzen noch Kalium aufnehmen können (vergl. Darst. 1).

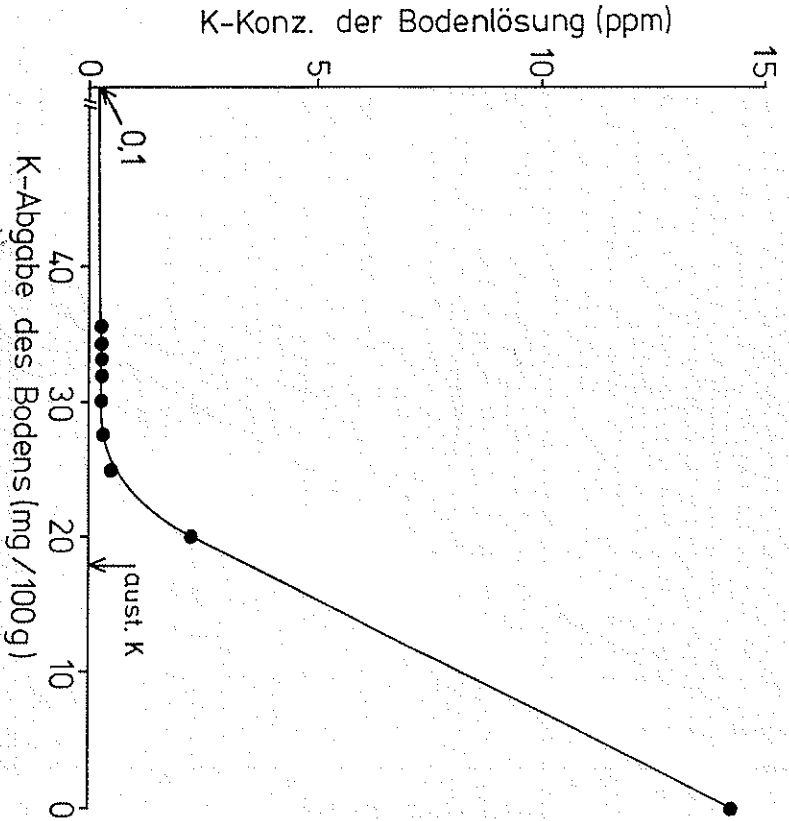
Nimmt man an, in der Krume eines Hektars dieses Bodens würde die Kaliumkonzentration der Bodenlösung durch Wurzeln von 15 auf 2 ppm abgesenkt, so entspräche dies einer Kaliumfreigabe von ca. 800 kg K. Dies ist

Darstellung 1
K-Verarmung einer Nährlösung durch Weizenpflanzen



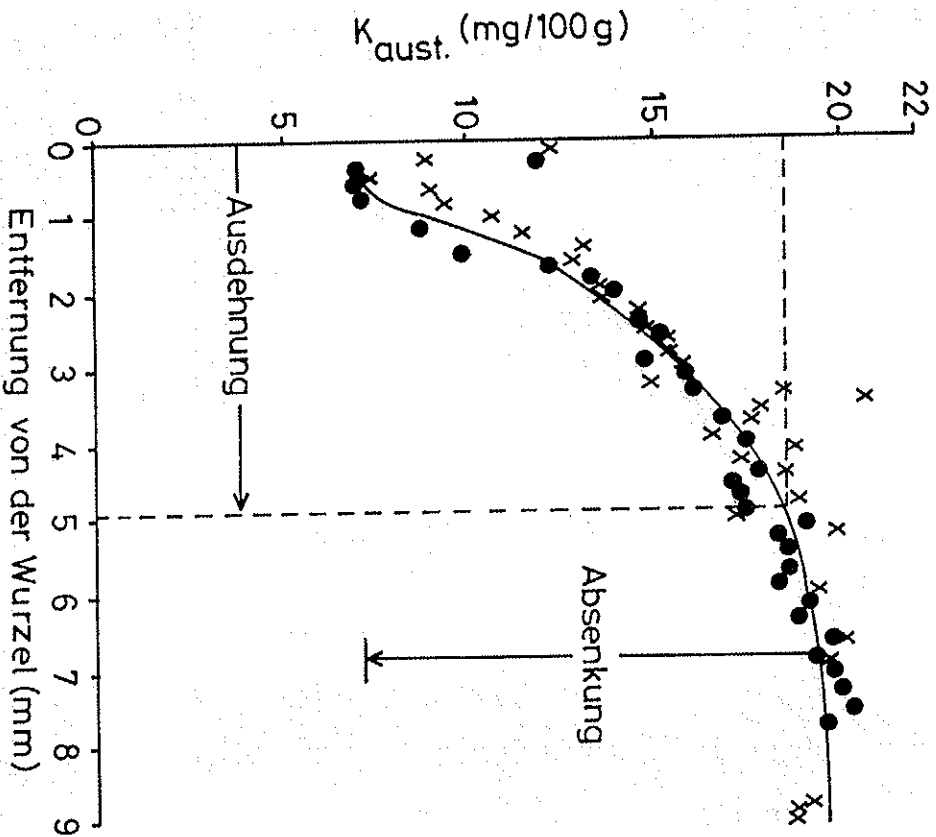
deutlich mehr als bei landwirtschaftlichen Kulturarten im Autwuchs gemessen wird. Eine Ursache ist sicherlich, daß sich Pflanzen gegen eine zu hohe Kaliumaufnahme durch physiologische Mechanismen schützen; zum anderen wird in der Regel die Konzentration der Bodenlösung nicht überall in der Krume gleich weit erniedrigt. Der Grund hierfür ist die geringe Mobilität des Kaliums im Boden. Sie hat zur Folge, daß die Pflanzenwurzel zunächst die Kaliumkonzentration der umgebenden Bodenlösung absenkt; daraufhin gibt der angrenzende Boden Kalium an die Bodenlösung frei, woraufhin es zur Wurzeloberfläche diffundiert. Das Ergebnis dieses Prozesses ist eine Konzentrationsverteilung des Kaliums in Wurzelnähe, wie sie **Darstellung 3** zeigt:

Darstellung 2
K-Abgabe eines Lößbodens bei Erniedrigung der K-Konzentration der Bodenlösung
 (Boden Börny, 17% Ton, austauschbares K 18,1 mg/100 g)



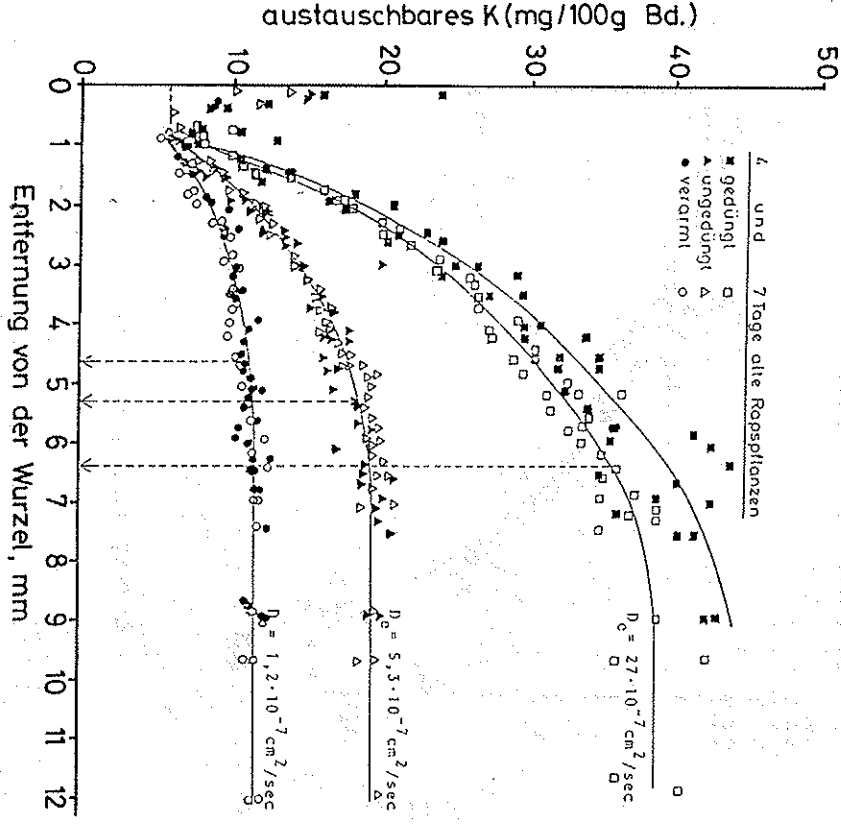
- An der Wurzeloberfläche ist der Gehalt des Bodens auf 7 mg/100 g, d. h. auf 30% des Ausgangsgehaltes reduziert.
 - in 5 mm Entfernung von der Wurzeloberfläche ist der Gehalt des Bodens an austauschbarem K vom Gehalt des unbepflanzten Bodens nicht zu unterscheiden.
- Hieraus ziehen wir den Schluß, daß nicht der gesamte Boden zur Ernährung der Pflanze beiträgt; vielmehr ist von Bedeutung, in welchem Maß die Konzentration abgesenkt wird und wie weit sich der verarmte Bodenbereich von der Wurzeloberfläche ausdehnt. Je größer Ausdehnung und Absenkung sind, um so mehr Kalium steht einem Wurzelabschnitt zur Verfügung.

Darstellung 3
K-Verarmungsprofil des wurzelnahen Bodens von 4 Tage alten Rapspflanzen
 (Boden „Söderhof“, ● und x = Parallelelfäße)



- Betrachten wir unter diesem Aspekt einen Kaliumdüngungsversuch. Hierzu wurde ein Lößlehm auf drei verschiedene K-Gehalte eingestellt:
- so belassen, wie er der Krume entnommen wurde („ungedüngt“),
 - durch vorherige Bepflanzung mit Mais verarmt („verarmt“) und
 - mit KCl gedüngt („gedüngt“).

Darstellung 4
Kaliumverarmungsprofile in Wurzelnähe von Raps bei unterschiedlichem K-Gehalt des Bodens nach 4 und 7 Tagen



In der Darstellung 4 sind die Verarmungsprofile angegeben, die die Pflanzen nach dieser Düngung erzeugen. Außerdem wird der Einfluß dieser Vorbehandlung auf den effektiven Diffusionskoeffizienten D_e mitgeteilt, der ein Maß für die Beweglichkeit der Kaliumionen im Boden ist. D_e wird durch diese Behandlung von $1,2 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ gesteigert. Die Beweglichkeit erhöht sich demnach stärker als der K-Gehalt des Bodens. Während der Gehalt nur um das 4,5fache steigt, nimmt D_e um den Faktor 20 zu. Dies resultiert, wie Darstellung 4 zeigt, in der Vergrößerung der Ausdehnung der Verarmungszone vom verarmten zum gedüngten Boden hin. An der Wurzeloberfläche wird die K-Konzentration in allen drei Fällen auf den gleichen Minimalwert abgesenkt. Aus diesen Sachverhalten ergibt

sich der Schluß: Kaliumdüngung erhöht die verfügbare K-Menge für einen Wurzelabschnitt durch die Möglichkeit einer stärkeren Konzentrationsabsenkung an der Wurzeloberfläche und eine Vergrößerung des Einzugsbereichs für die Wurzel. Diese beiden Prozesse erhöhen die verfügbare K-Menge stärker, als es der Gehalt des Bodens an austauschbarem Kalium anzeigt.

Um festzustellen, wie die K-Aufnahme der Pflanzen mit der Veränderung des K-Gehaltes des Bodens in Beziehung steht, wurde der K-Entzug der Rapspflanzen nach 4 und 7 Tagen Versuchsdauer ermittelt. Nach Tabelle 1 nahm, wie zu erwarten, der K-Entzug mit dem K-Gehalt des Bodens zu. Dies war nach 7 Tagen stärker als nach 4 Tagen ausgeprägt. Dieser Sachverhalt ist auch in den Verarmungsprofilen des Bodens zu erkennen. Aus Darstellung 4 geht hervor, daß über den 4. Tag hinaus nur bei der gedüngten Variante eine weitere Ausdehnung erfolgt ist.

Tabelle 1
Kaliumaufnahme junger Rapspflanzen aus der austauschbaren und nichtaustauschbaren K-Fraktion (Boden „Söderhof“)

Boden	K-Entzug in 4 Tagen (mg/Gef.)		% aus K_{aust}	
	aust. K mg/100 g	gesamt	nach 4 Tagen	nach 7 Tagen
verarmt	12	1,58	0,23	85
ungedüngt	20	2,08	0,72	66
gedüngt	53	5,53	5,42	2

Vergleicht man die von den Pflanzen aufgenommenen mit den vom Boden abgegebenen K-Mengen in Tabelle 1, so zeigen sich deutliche Differenzen. Nur in dem gedüngten Versuchsgefäß stimmt nach 4 Tagen die Veränderung der austauschbaren Fraktion mit dem Entzug der Pflanzen annähernd überein. Daraus muß man schließen, daß die Pflanze aus dem nicht mit K gedüngten Boden trotz der kurzen Versuchszeit bedeutende Mengen von nichtaustauschbarem Kalium entnommen hat.

Tabelle 1 läßt weiterhin erkennen, daß die nichtaustauschbare Fraktion des Bodens mit zunehmender Zeit vermehrt zur K-Versorgung der Pflanze beiträgt. Die Kaliumabgabe des Bodens wird demnach durch den Kaliumentzug der Pflanze ausgelöst.

Die vorstehenden Resultate haben u. a. gezeigt, daß die räumliche Zugänglichkeit des austauschbaren Kaliums durch Düngung zunimmt. Will man diese Erkenntnis, die unter den speziellen Versuchsbedingungen zustande kam, auf ihre Bedeutung für das Feld prüfen, sind folgende Fakten zu berücksichtigen:

- Liegen Wurzeln im Boden eng beieinander so können die Verarmungs-zonen überlappen. So liegen während der Vegetationsperiode unter Getreide (nach Böhm 1978) bis 4 cm Wurzeln/cm³ Boden vor. Diese Wurzeldichte schränkt den Einzugsbereich einer Wurzel auf 3 mm ein;

- das gesamte von den Pflanzen aufgenommene nichtaustauschbare Kalium entstammt einer Bodenschicht unter 2 mm Abstand von der Wurzel (Kuchenbuch und Jungk 1984);

- das durchwurzelte Bodenvolumen umfaßt 3 Millionen Liter je Hektar.

Aufgrund dieser Annahmen errechnen sich verfügbare Kaliummengen von 260 bis 1670 kg K/ha für die Böden des Düngungsversuchs (Tabelle 2). Dies zeigt, daß auch auf dem „verarmten“ Boden allein in der Krume für die meisten Kulturen genug K verfügbar wäre. Da weiterhin in diesem Fall nur ein Teil des gesamten Bodenvolumens deutlich zur Ernährung der Pflanze in einem Jahr beiträgt, ist diese verfügbare K-Menge über mehrere Vegetationszeiten als relativ konstant anzusehen.

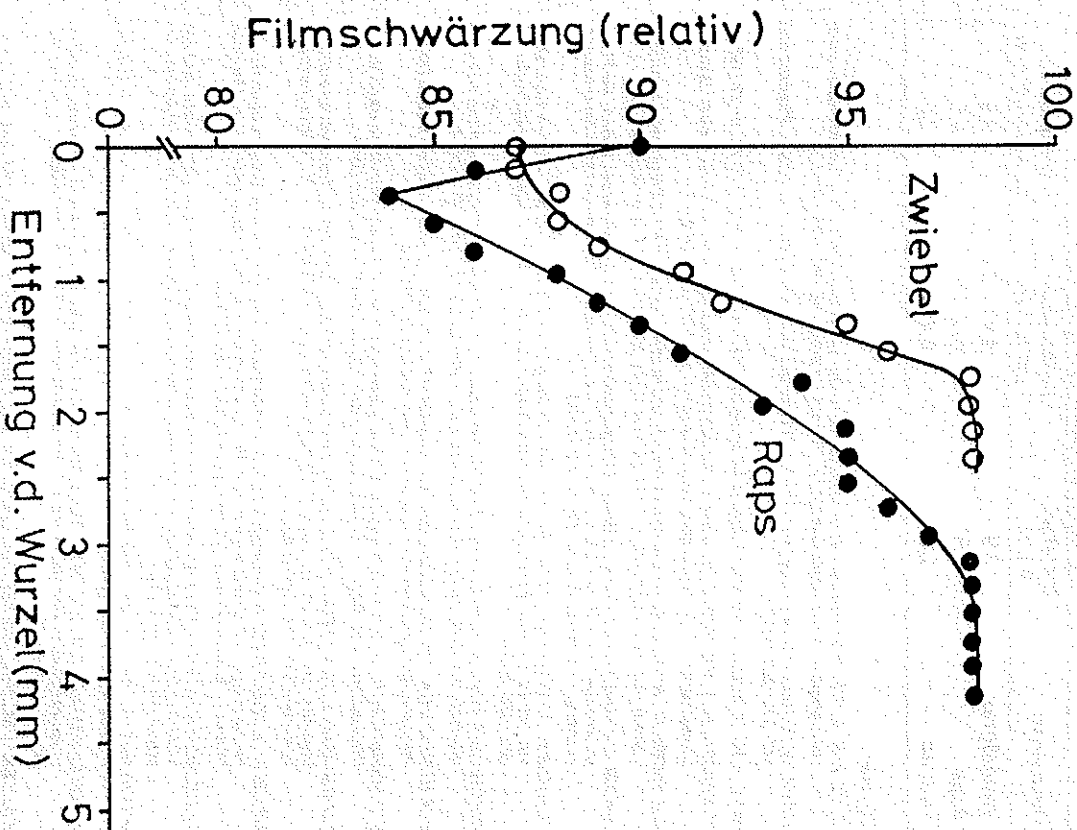
Tabelle 2
Verfügbare Kaliummenge, errechnet aus Verarmungsprofilen
(Annahme: Wurzeldicke 4 cm/cm³ Boden)

Boden	aust. K	verfügbare K-Menge (kg/ha)		Summe
	(mg/100 g)	aust. K	naust. K	
verarmt	12	125	135	260
ungedüngt	20	375	195	570
gedüngt	53	1500	170	1670

Anhand des Düngungsversuchs ist gezeigt worden, daß die Ausdehnung der Verarmungszone von Bedeutung für die Pflanzenverfügbarkeit von Kalium ist. Für diese räumliche Zugänglichkeit sind jedoch neben Bodenfaktoren auch pflanzeigene Faktoren bedeutsam. Dies zeigt Darstellung 5 am Beispiel zweier Pflanzenarten, die in dem gleichen Bodenbereich als Zwiebel hat. Für Raps ist demnach im gleichen Bodenbereich als für Zwiebel verfügbar. Der Faktor, der dies bewirkt, sind Wurzelhaare. Während die Zwiebelwurzel nur unbedeutend mit Wurzelhaaren ausgestattet ist, besitzt Raps viele und im Mittel mit 0,7 mm rel. lange Wurzelhaare. Sie drängen in den Boden ein und erweitern auf diese Weise den Einzugsbereich für Kalium.

Die für einen Wurzelabschnitt verfügbare Kaliummenge ist somit sowohl von Boden- als auch Pflanzenfaktoren abhängig. Es hat sich gezeigt, daß die Menge der Wurzeln, die eine Einheit Sproß ernährt (Wurzel/Sproß-Verhältnis), von großer Bedeutung für die Pflanze ist. Auf diesen Faktor ist es zum größten Teil zurückzuführen, daß sich Pflanzenarten und auch -sorten unterscheiden. Tabelle 3 weist dies aus: Weidelgras ist auf dem gleichen Boden in der Lage, wesentlich mehr Kalium im Sproß anzureichern (3,8%) als Raps und Tomate. Dies ist nicht in der von Art zu Art unterschiedlichen Aufnahme eines Wurzelsegments begründet, vielmehr ist der überragende Vorteil von Weidelgras seine sehr viel größere Wurzellänge pro Sproßeinheit. Sie ermöglicht die Erschließung eines größeren Volumens an Boden oder, sollte dies begrenzt sein, dessen stärkere

Darstellung 5
Filmschwärzung von ⁸⁶Rb-Autoradiogrammen in Wurzelnähe von Raps- und Zwiebelpflanzen



Ausschöpfung. Allein aus der Betrachtung des Bodens - ohne Berücksichtigung der Pflanze also - ist nach unserer Ansicht eine Bestimmung der verfügbaren Kaliummenge eines Bodenvolumens auf Standorten mit nennenswerter Kaliumpufferung nicht möglich.

Tabelle 3
Kaliumgehalt von 3 Pflanzenarten und Faktoren
des Kaliumaneignungsvermögens

Pflanzenart	K-Gehalt % i. TS	K-Aufnahme µg/cm Wz	Wz-Sproß-Vh cm Wz/mg Sproß
Weidelgras	3,9	4,9	9,6
Raps	2,8	6,5	4,6
Tomate	2,8	8,4	2,9

Literatur

- BHAT, K. K. S., P. H. NYE: Diffusion of phosphate to the plant roots in soil. I. Quantitative autoradiography of the depletion zone. - *Plant and Soil* 38, 161-175 (1973).
- BOHM, W.: Untersuchungen zur Wurzelentwicklung bei Winterweizen. - *Z. Acker, Pflanzenbau* 147, 264-269 (1978).
- BRAY, R. H.: A nutrient mobility concept of soil-plant relationship. - *Soil Sci.* 78, 9-22 (1954).
- CLAASSEN, N., L. HENDRIKS, A. JUNGK: Rubidium-Verarmung des wurzelnahen Bodens durch Maispflanzen. - *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* 144, 533-545 (1981).
- CLAASSEN, N., A. JUNGK: Kaliumdynamik im wurzelnahen Boden in Beziehung zur Kaliumaufnahme von Maispflanzen. - *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* 145, 513-525 (1982).
- FINGER, O.: Mehrjährige und einjährige Düngungsversuche mit gesteigerten Gaben an Phosphorsäure und Kali zur Überprüfung der Grenzwerte bei der chemischen Bodenuntersuchung. - *Landw. Forsch.* 19, 86-93 (1966).
- KOHNLEIN, J.: Ergebnisse 14jähriger Fruchtfolgedüngungsversuche mit steigenden Kaligaben auf jungdiluvialer Braunerde in Schleswig-Holstein. - *Bayer. Landw. Jahrbuch*, 53, 662-688 (1976).
- KUCHENBUCH, R., A. JUNGK: A method for determining concentration profiles at the soil-root interface by thin slicing rhizospheric soil. - *Plant and Soil* 68, 391-394 (1982).
- KUCHENBUCH, R.: Die Bedeutung von Ionenaustauschprozessen im wurzelnahen Boden für die Pflanzenverfügbarkeit von Kalium. - *Diss. Göttingen* (1983).
- KUCHENBUCH, R., A. JUNGK: Wirkung der Kaliumdüngung auf die Kaliumverfügbarkeit in der Rhizosphäre von Raps. - *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* 147, 435-448 (1984).
- KUHLMANN, H., J. WEHRMANN: Prüfung verschiedener Methoden der Bodenanalyse auf ihre Eignung zur Ermittlung des K-Düngerbedarfs auf Lössböden. - *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* 147, 334-348 (1984).
- PFULB, K., E. WIECHENS: Ergebnisse von Kaliumdüngungsversuchen sowie Folgerungen für die Festlegung von Grenzwerten für die Beurteilung des Kaliumgehaltes von Mineralböden. - *Landw. Forsch.* 35, Sonderheft, 586-593 (1972).
- RATHSACK, K., A. JUNGK: Beziehung zwischen dem laktatlöslichen Kalium des Bodens und der Wirkung einer Kaliumdüngung auf den Ertrag von Sellerie. - *Die Gartenbauwissenschaft* 33, 237-246 (1969).
- SCHWERDT, K., W. JESSEN: Düngungserfolg von Kali auf hessischen Lössböden. - *Landw. Forsch.* 14, 160-167 (1961).
- VAIDYANATHAN, L. V., P. H. NYE: The measurement and mechanism of ion diffusion in soils: II. An exchange resin paper method for measurement of the diffusive flux ... - *J. Soil Sci.* 17, 175-183 (1966).
- WALKER, J. M., S. A. BARBER: Ion uptake by living plant roots. - *Science* 133, 881-882 (1961).
- WILKINSON, H. F., J. F. LONERGAN, J. P. QUIRK: The movement of zinc to plant roots. - *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 32, 831-833 (1968).

Anschrift der Verfasser: Dr. Rolf Kuchenbuch und Dr. Norbert Claassen,
Institut für Agrikulturchemie, Von-Siebold-Straße 6, D-3400 Göttingen.