

## Bedeutung von Kaliumaufnahme, Wurzelwachstum und Wurzelhaaren für das Kaliumanreicherungsvermögen verschiedener Pflanzenarten

N. Classen und A. Jungk

Institut für Agrarkulturchemie der Georg-August-Universität,  
Von-Siebold-Strasse 6, D-3400 Göttingen

Herrn Prof. Dr. Dr. h. c. Paul Schachtschabel zum 80. Geburtstag gewidmet

Eingegangen: 10.9.1982

Angenommen: 11.8.1983

### Zusammenfassung – Summary

- Es wird die Frage behandelt, welche Bedeutung
- die K-Aufnahmerate pro Einheit Wurzellänge
  - die Relation Wurzellänge pro Einheit Sproßgewicht („Wurzel/Sproß-Verhältnis“) und
  - das mittlere Wurzelalter (als Maß für die Dauer der Aufnahmeaktivität der Wurzeln)
- für das Kaliumanreicherungsvermögen verschiedener Pflanzenarten haben.

Hierzu wurden Gefäßversuche mit jungen Pflanzen von Mais, Raps, Tomate, Weidelgras und Zwiebel durchgeführt und der K-Gehalt der Sprosse als Maß für das K-Anreicherungsvermögen verwendet. Die Versuchspflanzen wiesen erhebliche Unterschiede im K-Gehalt und in der Größe dieser drei Merkmale auf. Keines der Merkmale zeigte eine enge Korrelation zum K-Gehalt. Im gleichen Boden ergab sich zwar eine Korrelation des K-Gehaltes im Sproß zum Produkt aus K-Aufnahmerate der Wurzeln und Wurzel/Sproß-Verhältnis, die Regressionslinien für Mais, Raps und Zwiebel waren jedoch verschieden. Hingegen entstand eine einheitliche Regression, wenn der K-Gehalt zum Produkt aus K-Aufnahmerate, Wurzel/Sproß-Verhältnis sowie dem mittleren Wurzelalter in Beziehung gesetzt wurde. Der K-Gehalt der Sprosse wird demnach von diesen drei Merkmalen gemeinsam bestimmt. Der Beitrag der einzelnen Merkmale unterschied sich bei den verschiedenen Pflanzenarten erheblich. Sie waren ihrerseits vom Ernährungszustand abhängig. So stieg mit dem K-Angebot die K-Aufnahmerate, während das Wurzel/Sproß-Verhältnis und das mittlere Wurzelalter abnahmen.

Die Länge der Wurzelhaare beeinflusste maßgebend die Ausdehnung der K-(Rb)-Verarmungszone im wurzelnahen Boden sowie die Aufnahmerate pro Einheit Wurzellänge. Daraus wird der Schluß gezogen, daß Wurzelhaare große Bedeutung für das Anreicherungsvermögen von Kalium im Boden haben.

### Effect of K uptake rate, root growth and root hairs on potassium uptake efficiency of several plant species

Pot experiments with maize, rape, tomato, ryegrass and onion plants were carried out to evaluate the influence of

- rate of K uptake per cm of root,
- cm root per mg shoot dry weight and
- mean root age (as a measure of the time roots absorb potassium)

0044-3263/84/0306-0276 \$ 2.50/0

© Verlag Chemie GmbH, D-6940 Weinheim, 1984

on potassium uptake efficiency of these plants.

Percent K in shoot dry matter was used to indicate K uptake efficiency. No close correlation was observed between one of these factors to K concentration in shoot dry matter. The product of K uptake rate and root-shoot ratio was closely related to the K concentration of shoots. However, regression lines for maize, rape and onion were different. One single regression line was found when K concentration in shoot was related to the product of K uptake rate, root-shoot ratio and mean root age. It is therefore concluded that K uptake of plants depends on all three of these factors. In different species the proportion of these factors were markedly different. The plant factors in turn were affected by the K nutritional status of the plants. K uptake rate increased whereas root-shoot ratio and mean root age decreased with increasing K supply of the soil.

K uptake rate per cm root was strongly affected by root hairs. The radial distance of the K (Rb) depletion zone of the soil adjacent to the root surface also increased with the length of the root hairs. It is therefore concluded that root hairs substantially affect the spatial access of potassium in soil by the plant.

### Einleitung

Die Aufnahme eines Nährstoffs durch eine Pflanze wird bestimmt durch

- die Verfügbarkeit des Nährstoffs im Boden und
- das Anreicherungsvermögen der Pflanze

Die Verfügbarkeit hat ihre Ursache in der Mobilität des Nährstoffs im durchwurzelten Boden. Sie ist im Prinzip durch Massenfluß und Diffusion quantifizierbar, wie Barber (1962) dargelegt hat.

Das Anreicherungsvermögen ist die Fähigkeit der Pflanze, Nährstoffe aus dem Boden aufzunehmen und vorwiegend im Sproß anzureichern. Ein Maß dafür ist der Gehalt des betreffenden Nährstoffs im Sproß, wenn die Pflanzen unter den gleichen Umweltbedingungen wachsen. Das Anreicherungsvermögen ist in den vielfältigen physiologischen und morphologischen Eigenschaften der Pflanze begründet. Aus theoretischen Überlegungen ergibt sich, daß diese Vielfalt in drei im folgenden behandelten Merkmalen zum Ausdruck kommt, welche zahlenmäßig erfassbar und daher geeignet sind, um die Komponenten des Anreicherungsvermögens zu quantifizieren.

Für das Beispiel Kalium gilt:

Der Gehalt des Sprosses (% K) ergibt sich aus der K-Menge im Sproß ( $K_s$ ) und dem Sproßgewicht ( $TG_s$ )

$$\% K = \frac{K_s}{TG_s} \cdot 100 \quad (1)$$

$K_s$  ist seinerseits das Produkt aus der K-Menge, die ein Wurzelabschnitt, z. B. 1 cm Wurzel, aufnimmt ( $K_w$ ) und der Gesamtwurzellänge (L)

$$K_s = L \cdot K_w \quad (2)$$

Im Prinzip kann statt der Wurzellänge auch die Wurzelmasse verwendet werden. Bei Vergleich verschiedener Pflanzenarten ist jedoch die Wurzellänge der geeigneter Parameter, weil das Bodenvolumen, das zur K-Ernährung einer Pflanze beiträgt, mit der Wurzellänge enger als mit dem Wurzelgewicht korreliert. Als Wurzel/Sproß-Verhältnis wird daher in dieser Arbeit die Dimension cm Wurzel/mg Sproß-Trockenmasse verwendet.  $K_w$  ergibt sich aus der K-Aufnahmerate pro cm Wurzel (AR) und der Zeitspanne ( $t_0$ ) in der ein Wurzelabschnitt für Kalium aufnahmefähig ist

$$K_w = AR \cdot t_0 \quad (3)$$

Nach Einsetzen von (2) und (3) in (1) erhält man

$$\% K = AR \cdot \frac{L}{TG_s} \cdot t_0 \cdot 100 \quad (4)$$

Die vorliegende Arbeit hat das Ziel, diese drei Merkmale der Pflanze:

- die Aufnahmerate pro Einheit Wurzellänge
  - das Wurzel/Sproß-Verhältnis und
  - die Dauer der Aufnahmefähigkeit der Wurzeln
- zahlenmäßig zu bestimmen und ihre Bedeutung für das Kaliumanreicherungsvermögen einiger Pflanzenarten zu ermitteln.

Von diesen Merkmalen sind die Aufnahmerate der Wurzeln und das Wurzel/Sproß-Verhältnis wiederholt in ihrer Bedeutung für die P- und K-Aufnahme von Pflanzen untersucht worden (*Jungk und Barber, 1974; Schenk und Barber, 1980; Steffens, 1981; Barber, 1982*). Über die Funktionsdauer von Wurzelabschnitten liegen ebenfalls Berichte vor (*Bar-Yosef, 1971; Henry und Deacon, 1981*). Der Anteil, den diese drei Merkmale am Anreicherungsvermögen haben, und ihr Zusammenwirken ist jedoch u. W. bisher nicht behandelt worden.

### Material und Methoden

Die Untersuchungen umfassen zwei Gefäßversuche mit verschiedenen Pflanzenarten. Am Erntegut wurden Sproßgewicht, K-Erntung und Länge der Wurzeln zu je zwei Zeitpunkten bestimmt. Diese Daten dienten zur Errechnung der K-Aufnahmerate der Wurzeln, des Wurzel/Sproß-Verhältnisses und des mittleren Alters der Wurzeln. Durch getrennte Versuche mit Hilfe von Flachgefäßen wurde die Länge der Wurzelhaare sowie K (Rb)-Verarmungsprofile im wurzelnahen Boden ermittelt.

### Gefäßversuche

Versuch 1: Vegetationsgefäße von 3 l Inhalt wurden mit 3 kg Boden gefüllt und 5 verschiedene Pflanzenarten unter konstanten Klimabedingungen angezogen. Als Boden diente Oberboden eines Löß-Lehms aus Bulten: 21 % Ton, pH(H<sub>2</sub>O) 8,0; 166 µmol/100 g austauschbares K (n-NH<sub>4</sub>-Acetat); Bodenstättigungsextrakt 82 µmol K/100 g.

Düngung: 0,87 g P als Dicalciumphosphat und 1 g N als Calciumnitrat pro Gefäß.

**Tabelle 1:** Pflanzenarten, Bepflanzungsdichte und Versuchsdauer  $t_1$ ,  $t_2$  = erste, zweite Ernte; Tage nach Aussaat

**Table 1:** Plant species, number of plants per pot and growing period  $t_1$ ,  $t_2$  = first, second harvest; days after sowing

Pflanzenart	Pl./Gef.	Ernte n	Tage
		$t_1$	$t_2$
Mais, Zea mays cv. 'Garbu'	2	14	24
Raps, Brassica napus cv. 'Quinta'	2	14	24
Tomate, Lycopers. esc. cv. 'Eurocross B'	2	22	35
Weidelgras, Lolium sp. cv. 'Printo'	10	14	24
Zwiebel, Allium cepa cv. 'Stuttg. Riesen'	10	22	35

Pflanzenarten, Bepflanzungsdichte und Vegetationsdauer sind in Tab. 1 zusammengefaßt. Von 3 Parallelgefäßen wurde je eines am ersten Termin, die beiden anderen am zweiten Termin geerntet.

Versuch 2: Um die Wirkung der K-Düngung auf die K-Aufnahme zu erfassen, wurde Oberboden eines Löß-Lehms aus Groß Munsel, pH(CaCl<sub>2</sub>) 6,9 vor der Bepflanzung mit unterschiedlichen K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Gaben vermischt. Mais und Raps wurden zu je 2 Pflanzen in 5 l-Gefäßen, Zwiebel zu je 20 Pflanzen in 3 l-Gefäßen angezogen. Ernten erfolgten bei Mais und Raps in je 2 Parallelen nach 11 und 20 Tagen, bei Zwiebel in 3 Parallelen nach 32 und 52 Tagen.

Düngung: Der NO<sub>3</sub>-Gehalt des Bodens wurde durch Düngung auf 0,5 g N/Gefäß aufgefüllt.

Bei beiden Versuchen erfolgte zur Ernte die Bestimmung des Gewichts und des K-Gehaltes von Sproß und Wurzeln. Die Wurzeln wurden aus dem Boden ausgewaschen und ihre Länge nach Newman (1966) ermittelt.

### K-Aufnahmerate

Zur Errechnung der K-Aufnahmerate (AR) diente die Formel von Williams (1948):

$$AR = \frac{U_2 - U_1}{t_2 - t_1} \cdot \frac{\ln(L_2/L_1)}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

Darin bedeuten U = K-Menge in der Pflanze (Erntung)

$L$  = Wurzellänge

$t$  = Zeit, die Indices 1 und 2 die Erntetermine.

### Alter der Wurzeln

Als Maß für die Zeitspanne, in der die Wurzeln Kalium aufgenommen haben, wurde das mittlere Alter der Wurzeln verwendet. Es ergibt sich aus dem Kehrwert der relativen Wachstumskonstante, d. h. dem Wert  $1/k$ . Dies wird wie folgt abgeleitet:

In der Jugendphase nimmt die Wurzellänge von Pflanzen exponentiell zu gemäß der Formel

$$L = L_0 \cdot e^{kt} - t_0 \quad (6)$$

Darin ist  $L$  die Wurzellänge zum Zeitpunkt  $t$ ,

$L_0$  die Wurzellänge zum Zeitpunkt  $t_0$

$k$  die relative Wachstumskonstante.

Für Wurzelabschnitte, die zwischen zwei Terminen,  $t_0$  und  $t_2$ , wachsen, ergibt sich ein mittleres Alter wenn man, wie in (7), die Länge der einzelnen Wurzelabschnitte mit ihrem jeweiligen Alter multipliziert, summiert und durch die Summe der Wurzelabschnitte dividiert:

$$\bar{t} = \frac{\int_{t_0}^{t_2} (t_2 - t) dL}{\int_{t_0}^{t_2} dL} \quad (7)$$

Aus (6) erhält man

$$dL = L_0 \cdot k \cdot e^{k(t-t_0)} dt \quad (8)$$

Nach Einsetzen von (8) in den Zähler von (7) und Integration entsteht

$$\bar{t} = \frac{1}{k} \left( 1 + \frac{L_0}{L_2 - L_0} \cdot \ln \frac{L_0}{L_2} \right) \quad (9)$$

Bei der Berechnung des mittleren Wurzelalters vom gesamten Wurzelsystem entspricht  $L_0$  der Wurzellänge bei der Keimung, d. h.  $L_0$  ist praktisch gleich null. Der zweite Term in der Klammer von (9) kann daher vernachlässigt werden und man erhält als Näherungswert für das mittlere Alter das Wurzelsystems

$$\bar{t} = \frac{1}{k} \quad (10)$$

Dies ist hier als Maß für die Zeitspanne der K-Aufnahme der Wurzeln  $t_a$  verwendet worden.

Zur Bestimmung von  $k$  wurden zwei Ernten, an den Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$ , durchgeführt und die Zeitdifferenz zwischen beiden Ernten sowie  $L_2$  und  $L_1$  in Formel (11), die aus (6) abgeleitet ist, eingesetzt

$$k = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \ln \frac{L_2}{L_1} \quad (11)$$

#### K-Einzugsbereich der Wurzel

Um die Ausdehnung der K-Verarmungszone in der Umgebung der Wurzeln zu ermitteln, wurde der Boden mit  $^{86}\text{Rb}$ -markiertem Rb homogen vermischt und Autoradiogramme der Wurzelumgebung nach der Methode von *Classen et al.* (1981) hergestellt. Hierzu wurde ein Sandboden (Herrnhäuser, 4,4% Ton,  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) = 7,1$ ) auf 0,2 mm gesiebt und mit 125  $\mu\text{mol Rb}/100\text{g}$  Boden vermischt. Die Messung des austauschbaren Anteils ergab danach 129  $\mu\text{mol Rb}$  und 260  $\mu\text{mol K}/100\text{g}$  Boden. Der Bodensättigungsextrakt enthielt 20  $\mu\text{mol Rb}$  und 364  $\mu\text{mol K}/\text{l}$ .

Rubidium wurde vor der Zugabe zum Boden mit  $^{86}\text{Rb}$  in solcher Menge vermischt, daß die Aktivitätskonzentration zum Expositionstermin 1  $\mu\text{Ci/g}$  Boden betrug. Zur Gleichgewichtseinstellung wurde bis zur Messung der Bodenengehale bzw. bis zu Befruchtung eine Wartezeit von 11 Tagen eingeschaltet.

Zur Herstellung der Autoradiogramme wurde der mit  $^{86}\text{Rb}$  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 Weise kam über dünner Folie Röntgenfilm „Structurix 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 H, Zeiss Jena). Weitere Einzelheiten der Methode sind bei *Classen 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.

#### Länge der Wurzelhaare

Die Länge der Wurzelhaare wurde an solchen Wurzeln gemessen, die an der mit Folie bedeckten Seitenfläche der Gefäße sichtbar waren. Hierzu wurden mit Hilfe eines Mikroskops Fotos hergestellt, die das Objekt 10-fach vergrößert abbilden. Die mittlere Wurzelhaarlänge ist diejenige Entfernung von der Oberfläche des Wurzelzylinders, die von 50% der Wurzelhaare erreicht wird.

#### Ergebnisse

Als Maß für das Kaliumanreicherungsvermögen dient der Kaliumgehalt der Trockenmasse des Sprosses. Die Kaliumgehalte von fünf verschiedenen Pflanzenarten, die im Versuch 1 in einem relative K-armen Boden gewachsen waren, weisen deutliche Unterschiede auf, wie Tab. 2 zeigt. Die drei eingangs genannten Komponenten des Kaliumanreicherungsvermögens, (a) K-Aufnahmerate pro Einheit Wurzellänge, (b) Wurzellänge pro Einheit Sproßgewicht sowie (c) die Zeitspanne der Aufnahmeaktivität, für die hier das mittlere Wurzelalter verwendet wird, unterscheiden sich ebenfalls erheblich. Die relativen

**Tabelle 2:** K-Gehalt des Sprosses verschiedener Pflanzenarten, K-Aufnahmerate (K-AR), Wurzel/Sproß-Verhältnis und mittleres Wurzelalter. Boden: Büllen ul, aust. K 166  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  Boden, BSE 82  $\mu\text{mol K}/\text{l}$

**Table 2:** K concentration in shoots of different plant species, rate of K uptake (K-AR), ratio of cm root/mg shoot and mean root age (days). Soil: Büllen silt loam, exch. K 166  $\mu\text{moles}/100\text{g}$ , saturation extract: 82  $\mu\text{moles K}/\text{l}$

Pflanzenart	% K im Spross	K-AR	Verhältnis cm Wurzel mg Spross	mittl. Wurzel- alter, d
		$\mu\text{mol}$ cm · sec		
Raps	2,8	0,52	4,6	3,7
Tomate	2,3	0,48	2,9	5,2
Weidelgras	3,9	0,27	9,6	5,4
Mais	1,8	0,12	9,0	5,6
Zwiebel	1,6	0,03	15,8	15,2

Unterschiede sind jedoch größer als beim K-Gehalt. Dies gilt besonders für die K-Aufnahmerate der Wurzeln, die bei Raps den Wert von Zwiebel um den Faktor 17 übertrifft.

Wie ein Vergleich der Daten von Tab. 2 zeigt, weist keine der drei Komponenten eine enge Beziehung zum K-Gehalt des Sprosses auf.

Man kann annehmen, daß Pflanzen mit höherem K-Aneignungsvermögen eine geringere K-Versorgung des Bodens benötigen, um ihre volle Wachstumsleistung zu erreichen. Um diese Hypothese zu prüfen, wurde Versuch 2 mit drei verschiedenen Pflanzenarten in einem Boden mit vierfach gestaffelter K-Gabe durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. 3 zusammengefaßt.

Bei Raps traten trotz der weiten Differenzierung der K-Gehalte des Bodens keine deutlichen Wuchsunterschiede auf. Der niedrigste K-Gehalt hat demnach bei dieser K-effizienten Pflanzenart innerhalb dieser kurzen Versuchsdauer die maximale Wachstumsrate gewährleistet. Bei Mais (Differenz nicht signifikant) ist dagegen ein Zuwachs durch Kaliumdüngung bis zur zweiten und bei Zwiebel (signifikant) bis zu höchsten Düngungsstufe zu beobachten. Diese Abstufung stimmt mit dem K-Aneignungsvermögen der Pflanzenarten überein, die im Versuch 1 gefunden wurde.

Die K-Gehalte der Sprosse ergänzen diese Aussage. Aus Tab. 3 ist zu entnehmen, daß Raps schon bei niedrigem K-Angebot relativ hohe K-Gehalte aufweist. Diese Überlegenheit von Raps ist in erster Linie durch die hohe K-Aufnahmerate der Wurzeln bedingt. Das Wurzel/Sproß-Verhältnis war dagegen in diesem Fall von geringerem Einfluß, da zwischen den Pflanzenarten nur kleine Unterschiede bestanden. Bemerkenswert ist die abfallende Tendenz des Wurzel/Sproß-Verhältnisses mit steigender K-Versorgung. Die Pflanzen bilden demnach bei K-Mangel längere Wurzeln aus. Daraus erklärt sich auch das hohe Wurzel/Sproß-Verhältnis im ersten Versuch, der bei geringem K-Angebot durchgeführt worden war.

Das mittlere Alter der Wurzeln war bei Zwiebel größer als bei Raps und Mais. Die Bedeutung des mittleren Wurzelalters ist in diesem Versuch daran zu erkennen, daß trotz geringerer K-Aufnahmerate der K-Gehalt von Zwiebel z. T. sogar höher als von Raps und Mais war. Die K-Aufnahme, d. h. die K-Menge, die pro cm Wurzel aufgenommen wurde (Tab. 3), war bei gleicher K-Gabe für die verschiedenen Pflanzenarten überraschend ähnlich.

Setzt man die K-Gehalte der Pflanzen vom Versuch 2 in Beziehung zum Produkt aus K-Aufnahmerate und Wurzel/Sproß-Verhältnis, so ergibt sich (Abb. 1) für jede Pflanzenart ein positiver Zusammenhang. Die Linien weisen jedoch für jede Art einen anderen Verlauf auf. K-Aufnahmerate und Wurzel/Sproß-Verhältnis zusammen sind demnach von maßgebender Bedeutung für den K-Gehalt der einzelnen Pflanzenart. Das Aneignungsvermögen der verschiedenen Arten kann aber damit nicht voll erklärt werden. Berücksichtigt man jedoch außerdem das mittlere Wurzelalter (Abb. 2), so fügen sich die Werte aller drei Arten in die gleiche Regressionslinie ein.

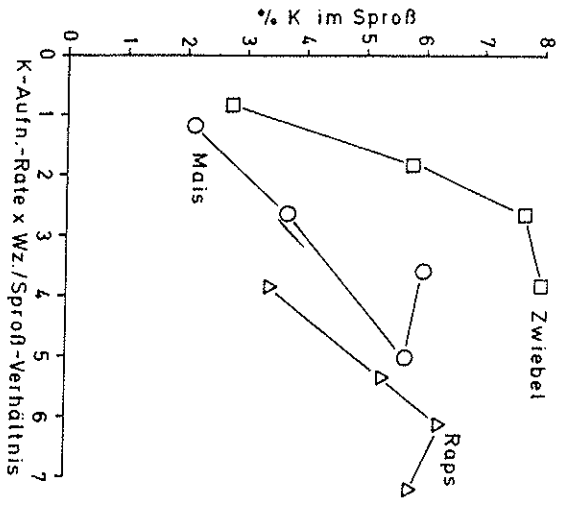
Um zu zeigen, welche Bedeutung Wurzelhaare für die räumliche Erschließung des Bodens und dadurch für die K-Aufnahmerate der Wurzeln haben, wurde die Ausdehnung der K-Verarmungzone des wurzelnahen Bodens durch Autoradiographie ermittelt.

**Tabelle 3:** Kalium in Boden und Pflanzen sowie einige Parameter der K-Aufnahme (BSE = Bodensättigungsextrakt; K-AR = K-Aufnahmerate)

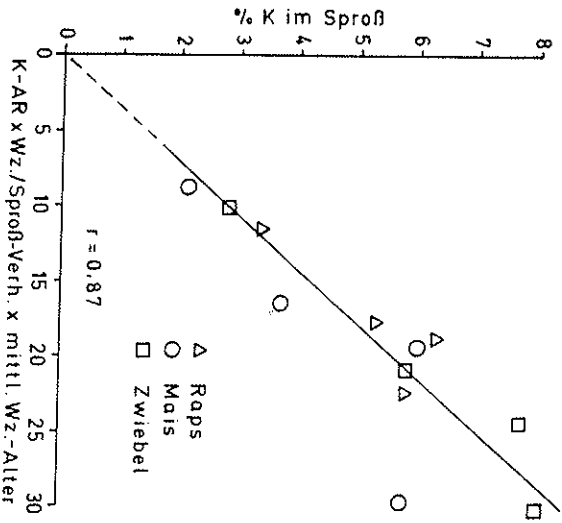
**Table 3:** Potassium in soil and plants and some parameters of K uptake (BSE = soil saturation extract; K-AR = K uptake rate; aust. K = exchangeable K)

Pflanzenart	K im Boden		Spross TS mg/Pfl.	K im Spross %	Wz/Spr.- Verh. cm/ng	K-AR pmol cm · sec	mittl. Wz-Alter d	K-Aufnahme µmol K cm Wz
	aust. K µmol/100 g	BSE µmol/l						
Raps	255	205	500 n.s.	3,4	6,2	0,61	3,0	0,15
	366	825	570	5,3	5,8	0,92	3,3	0,24
	1 261	3 950	500	6,3	4,1	1,48	3,1	0,42
	1 363	4 500	450	5,8	5,0	1,44	3,1	0,31
Mais	255	205	1 000 n.s.	2,1	4,1	0,28	7,6	0,15
	366	825	1 330	3,7	5,1	0,51	6,3	0,22
	1 261	3 950	1 180	5,7	5,0	1,00	5,9	0,35
	1 363	4 500	1 390	6,0	3,2	1,11	5,4	0,57
Zwiebel	255	205	83 a*	2,8	5,8	0,14	12,4	0,14
	366	825	89 a	5,8	5,6	0,32	11,6	0,28
	1 261	3 950	96 ab	7,7	4,9	0,53	9,4	0,42
	1 363	4 500	115 b	8,0	4,7	0,81	7,9	0,53

\* Duncan-Test: Verschiedene Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede

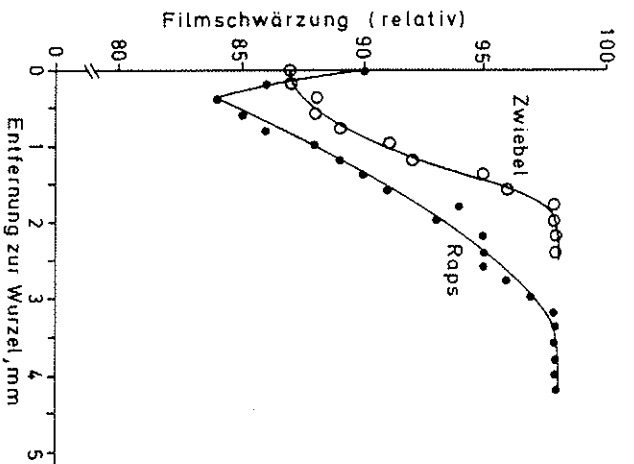


**Abbildung 1:** K-Gehalt des Sprosses von Zwiebel, Mais und Raps in Beziehung zum Produkt aus K-Aufnahmerate (pmol/cm sec) und Wurzel/Sproß-Verhältnis (cm/mg). Boden: Gross Munzel Ul.

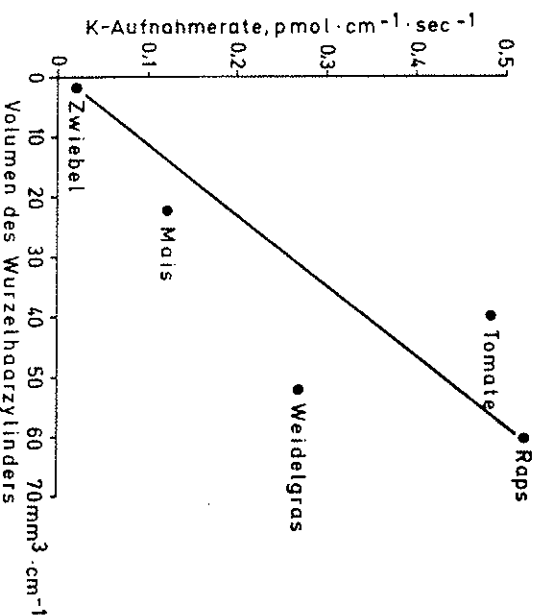


**Abbildung 2:** K-Gehalt des Sprosses von Zwiebel, Mais und Raps in Beziehung zum Produkt der drei Pflanzenfaktoren  
 a) K-Aufnahmerate (pmol/cm sec)  
 b) Wurzel/Sproß-Verhältnis (cm/mg) und  
 c) mittleres Wurzelalter (Tage)  
 Boden: Gross Munzel Ul.  
**Figure 2:** K concentration of the shoot of onion, maize and rape in relation to the product of the three plant factors  
 a) root/shoot ratio (cm/mg)  
 b) K uptake rate (pmol/cm sec) and  
 c) mean root age (days)  
 Soil: Gross Munzel silt loam

Dabei diente <sup>86</sup>Rb als Tracer. In Abb. 3 ist die Schwärzungsverteilung der Radiogramme in Wurzelhöhe für Raps und Zwiebel dargestellt. Wie Abb. 3 zeigt, erstreckt sich die Verarmungszone bei Raps über eine größere Entfernung als bei Zwiebel. In Überein-



**Abbildung 3:** Filmschwärzung durch <sup>86</sup>Rb auf Autoradiogrammen des wurzelnahen Bodens von Raps und Zwiebel. Alter der Wurzelabschnitte 3 Tage. Boden: Herrenhausen S.  
**Figure 3:** Film density of <sup>86</sup>Rb autoradiographs of the soil-root interface of rape and onion. Age of root segments 3 days. Soil: Herrenhausen sandy soil.



**Abbildung 4:** K-Aufnahmerate der Wurzeln verschiedener Pflanzenarten in Beziehung zum Volumen des Wurzelhaarzylinders. Boden: Bünten Ul.  
**Figure 4:** K uptake rate per cm root of different plant species (onion, maize, ryegrass, tomato and rape) in relation to the volume of the root hair cylinder. Soil: Bünten silt loam

stimmung damit wies auch die Behaarung der Wurzeln deutliche Unterschiede auf. Zwiebel besaß keine oder nur ganz kurze Wurzelhaare, während bei Raps zahlreiche Wurzelhaare mit einer mittleren Länge von 1,3 mm beobachtet wurden. Pro Einheit

Wurzellänge schöpft Raps demnach Kalium aus einem erheblich größeren Bodenvolumen als Zwiebel.

In Abb. 4 ist der Wurzelhaarzyylinder, d. h. das Bodenvolumen pro cm Wurzel, das sich in der Reichweite der mittleren Wurzelhaarlänge befindet, zur K-Aufnahmerate in Beziehung gesetzt worden. Man erkennt eine enge positive Korrelation zwischen den beiden Größen. Im gleichen Boden sind die K-Aufnahmeraten verschiedener Pflanzenarten demnach vor allem davon abhängig, welches Bodenvolumen pro Einheit Wurzellänge von den Wurzelhaaren erschlossen wird.

### Diskussion

Zunächst sei eine Anmerkung zu den Methoden gemacht, die zur Erfassung der Komponenten des K-Aneignungsvermögens verwendet wurden.

Die Messung der K-Aufnahmerate bietet keine sonderlichen Schwierigkeiten. Allerdings ist anzumerken, daß mit der hier verwendeten Methode nur eine mittlere K-Aufnahmerate des ganzen Wurzelsystems meßbar ist. Man kann nicht ausschließen, daß verschiedene Teile des Wurzelsystems, etwa aufgrund ihrer Position an der Pflanze oder ihres Alters, unterschiedliche Aufnahmeraten haben.

Als Maß für die Dauer der K-Aufnahmeaktivität der Wurzel wurde das mittlere Alter des Wurzelsystems benutzt. Dies wird wie folgt begründet: Das Wurzelsystem einer Pflanze setzt sich aus Wurzelabschnitten unterschiedlichen Alters zusammen. Die einzelnen Abschnitte haben bis zu einem bestimmten Zeitpunkt eine unterschiedliche Dauer der Nährstoffaufnahme. Bei jungen Pflanzen, wie sie hier benutzt wurden, kann man annehmen, daß alle Wurzeln während ihrer ganzen Lebenszeit aufnahmeaktiv waren. Daher scheint uns das mittlere Alter des Wurzelsystems in diesem Fall als Maß für die Dauer der Aufnahmeaktivität geeignet zu sein. Bei älteren Pflanzen könnte dieses Verfahren nicht angewendet werden.

Die Ergebnisse zeigen, daß die drei eingangs erläuterten Komponenten des Kalium-Aneignungsvermögens bei den verschiedenen Pflanzenarten erhebliche Unterschiede aufweisen (Abb. 2). Keine dieser drei Komponenten ist jedoch für sich allein ausreichend, um das K-Aneignungsvermögen einer Pflanzenart zu charakterisieren. So weist Raps zwar die größte K-Aufnahmerate auf, wegen seines relativ geringen Wurzel/Sproß-Verhältnisses und des nur mittleren Wurzelalters erreicht er aber nicht den K-Gehalt des Weidelgrases. Nur eine günstige Kombination aller drei Merkmale führt zu einem hohen K-Aneignungsvermögen, wie aus Abb. 2 deutlich hervorgeht.

Die Komponenten des Aneignungsvermögens variieren jedoch auch infolge der K-Düngung des Bodens (Tab. 3). Sie haben demnach für eine Pflanzenart keine konstante Größe, sondern sie unterliegen ausgeprägten Wechselwirkungen zwischen genetischen und ökologischen Faktoren. Hierin kommt das Anpassungsvermögen von Pflanzen an ihren Standort zum Ausdruck.

Die K-Aufnahmerate pro cm Wurzel wird in starkem Maße, viel mehr als die beiden anderen Komponenten des Aneignungsvermögens, von der K-Düngung beeinflusst. Man

kann annehmen, daß die K-Aufnahmerate die K-Verfügbarkeit des Bodens deutlich widerspiegelt, wenn man die gleiche Pflanzenart auf verschiedenen Böden anbaut. Wegen der großen Variabilität der Aufnahmerate liegt die Frage nach den Ursachen, von denen sie abhängt, besonders nahe. Hierüber informieren die Ergebnisse über die Ausdehnung der Verarmungszone im wurzelnahen Boden (Abb. 3) und die Beziehung zwischen Länge der Wurzelhaare und K-Aufnahmerate (Abb. 4). Sie führen zu dem Schluß, daß es vor allem die räumliche Zugänglichkeit von Kalium im Boden ist, die die K-Menge pro cm Wurzel und damit die K-Aufnahmerate bestimmen. Die Länge der Wurzelhaare spielt hierbei – ähnlich wie es *Bhar* und *Mye* (1973) sowie *Hendriks* et al. (1981) für Phosphat gefunden haben – die maßgebende Rolle.

Die Länge der Wurzelhaare ist offenbar um so bedeutsamer, je geringer die Mobilität des Nährstoffs im Boden ist. Daher sind bei niedrigem K-Gehalt des Bodens die Pflanzen mit langen Wurzelhaaren besonders im Vorteil, weil unter diesen Bedingungen die K-Diffusionsstrecken klein sind. So ist es erklärbar, daß Zwiebel bei niedrigem K-Angebot viel kleinere K-Aufnahmeraten als Raps aufweist, während die Unterschiede bei hoher Düngung, d. h. bei relativ hoher Mobilität des Kaliums, prozentual erheblich geringer sind (Tab. 3).

Das Wurzel/Sproß-Verhältnis weist ebenfalls deutliche Unterschiede zwischen den Pflanzenarten auf (Tab. 2). Es wirkt sich auf die Erschließung des Bodenvolumens pro Einheit Sproßgewicht aus. Seine Bedeutung wird – ähnlich wie die Länge der Wurzelhaare – bei geringer Mobilität des Nährstoffs besonders groß sein. Diese Annahme wird durch Ergebnisse von *Förster* (1980) gestützt. Er fand, daß auf K-armen Böden der K-Gehalt des Sprosses und das Wurzel/Sproß-Verhältnis von Hafer, Weizen und Raps miteinander korrelieren. *Steffens* (1981) vermutet, daß Weidelgras infolge seines höheren Wurzel/Sproß-Verhältnisses größere K-Gehalte als Rotklee erreicht. Wegen der geringen Mobilität von Phosphor im Boden hat die Größe des Wurzelsystems nach den Untersuchungen von *Barber* (1982) die größte Bedeutung von allen Komponenten des P-Aneignungsvermögens und der P-Verfügbarkeit.

Über die Bedeutung der Dauer der Aufnahmeaktivität eines Wurzelabschnitts als Komponente des Aneignungsvermögens ist bisher wenig bekannt. *Bar-Yosef* (1971) errechnete aus Influxversuchen mit Nährlösungen, daß die P- und Ca-Aufnahme einzelner Wurzelabschnitte mit dem Alter rasch abnimmt und bereits nach 150 Stunden zum Erliegen kommt. In Übereinstimmung hiermit stellten *Henry* und *Deacon* (1981) fest, daß die Zellen der Wurzelrinde von Weizen und Gerste in manchen Fällen schon nach wenigen Tagen abzustarben beginnen. *Drew* et al. (1969) fanden im Gegensatz dazu, daß die Rb-Aufnahme eines Wurzelabschnitts von Zwiebel mindestens 16 Tage anhält. Die Pflanzenarten scheinen sich demnach erheblich zu unterscheiden.

Unsere Ergebnisse, vor allem der Vergleich von Abb. 1 und 2, zeigen, daß auch mit der hier benutzten Methode ein beachtlicher Einfluß des Wurzelalters auf das K-Aneignungsvermögen nachweisbar ist. Der hohe K-Gehalt, den Zwiebel trotz ihrer geringen Aufnahmerate erlangen kann, ist nur mit der langen Dauer der Aufnahmeaktivität zu erklären.

Aus den Untersuchungen ist daher insgesamt der Schluß zu ziehen, daß sowohl die Aufnahmerate der Wurzeln und das Wurzel/Sproß-Verhältnis als auch die Zeitspanne der Aufnahmekapazität der einzelnen Wurzelabschnitte, reale, zahlenmäßig erfassbare Größen sind, die als Komponenten des Nährstoffaneignungsvermögens von Pflanzen Bedeutung haben.

Praktisches Interesse gebührt dem Aneignungsvermögen von Pflanzen, wo es um die Auswahl der geeignetsten Kulturart oder Sorte für einen bestimmten Standort geht, insbesondere wenn eine Verbesserung durch Düngung nicht möglich ist. Dieser Aspekt hat auch für die Verteilung der Düngung Bedeutung: wird die Düngung nicht jährlich verabreicht, wie es bei der Phosphat- und Kali-Düngung häufig geschieht, so wird man sie zum anspruchsvollsten Fruchtfolgeglied geben – ein altes Prinzip im Landbau.

Wenn verschiedene Pflanzenarten miteinander konkurrieren, kann das Nährstoffaneignungsvermögen für das Überleben einer Art entscheidend sein. Bekannt ist der Rückgang des Leguminosenanteils im Gemengeanbau von Klee und Gras auf K-armen Böden (Rossler, 1947; Schmitt und Brauer, 1979; Steffens und Mengel, 1979).

Schließlich kann man aus diesen Untersuchungen Ziele für Pflanzen ableiten, die sich besonders für den Anbau auf nährstoffarmen Böden mit geringem Düngeraufwand eignen. Diese Pflanzen sollten ein großes Wurzelsystem haben, d. h. eine große Wurzellänge pro Einheit Sproßmasse. Die Wurzeln sollten dünn sein, damit sie ein großes Bodenvolumen erschließen, aber dennoch wenig Assimilate zu ihrem Aufbau verbrauchen. Außerdem sind Wurzeln anzustreben, die mit zahlreichen langen Wurzelhaaren besetzt sind, damit sie ein großes Bodenvolumen pro Einheit Wurzellänge ausschöpfen können. Ebenso sollte auch die Zeitspanne groß sein, in der die Wurzelabschnitte aufnahmefähig sind.

#### Danksagung

Wir danken der DFG für die Unterstützung der Arbeit.

#### Literatur

- Barber, S. A.* (1962): A diffusion and mass flow concept of soil nutrient availability. *Soil Sci.* **93**, 39–49.
- Barber, S. A.* (1982): Soil-plant root relationship determining phosphorus uptake. In: Scalfie, A.: *Plant Nutrition 1982*. Commonwealth Agric. Bureau, Farnham Royal.
- Bar-Yosef, B.* (1971): Fluxes of P and Ca into intact corn roots and their dependence on solution concentration and root age. *Plant and Soil* **35**, 589–600.
- Bhar, K. K. S. and Nye, P. H.* (1973): Diffusion of phosphate to plant roots in soil. I. Quantitative autoradiography of the depletion zone. *Plant and Soil* **41**, 383–394.
- Classen, N., Hendriks, L. und Jungk, A.* (1981): Erfassung der Mineralstoffverteilung im wurzelnahen Boden durch Autoradiographie. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkde.* **144**, 306–316.
- Drew, M. C., Nye, P. H. and Vaidyanathan, L. V.* (1969): The supply of nutrient ions by diffusion to plant roots in soil. I. Absorption of potassium by cylindrical roots of onion and leek. *Plant and Soil* **30**, 252–270.
- Foster, H.* (1980): K-Aneignungsvermögen verschiedener Pflanzenarten im Gefäßversuch. *Landw. Forsch. Sonderh.* **37**, 645–652.
- Hendriks, L., Classen, N. und Jungk, A.* (1981): Phosphatverarmung des wurzelnahen Bodens und Phosphataufnahme von Mais und Raps. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkde.* **144**, 486–499.
- Henry, C. M. and Deacon, J. W.* (1981): Natural (non-pathogenic) death of the cortex of wheat and barley seminal roots, as evidenced by nuclear staining with acridine orange. *Plant and Soil* **60**, 255–274.
- Jungk, A. und Barber, S. A.* (1974): Phosphate uptake rate of corn roots as related to the proportion of the roots exposed to phosphate. *Agron. J.* **66**, 554–557.
- Newman, E. J.* (1966): A method of estimating the total root length in a sample. *J. Appl. Ecol.* **3**, 139–145.
- Rossler, R. C.* (1974): The effect of potassium on the growth of subterranean clover and other pasture plants on Crawley sand. 2. Field-plot experiments. *J. Council Sci. Indust. Res. (Australia)* **20**, 389–401.
- Schenk, M. K. und Barber, S. A.* (1980): Potassium and phosphorus uptake by corn genotypes grown in the field as influenced by root characteristics. *Plant and Soil* **54**, 65–76.
- Schmitt, L. und Brauer, A.* (1979): 75 Jahre Darmstädter Wissenschaftsversuche. J. D. Sauerländers Verlag, Frankfurt/Main.
- Steffens, D.* (1981): Vergleichende Untersuchungen über das Kalium-Aufnahmevermögen und die Entwicklung des Wurzelsystems von Lolium perenne und Trifolium pratense. *Dis. Univ. Giessen.*
- Steffens, D. und Mengel, K.* (1979): Das Aneignungsvermögen von Lolium perenne im Vergleich zu Trifolium pratense für Zwischenschicht-Kalium der Tommerate. *Landw. Forsch. Sonderh.* **36**, 120–127.
- Williams, R. F.* (1948): The effect of phosphorus and nitrogen upon certain aspects of phosphorus metabolism in graminaceous plants. *Austr. J. Sci. Res. (B)*, **1**, 333–361.