

Erfassung der Mineralstoffverteilung im wurzelnahen Boden durch Autoradiographie

N. Claassen, L. Hendriks und A. Jungk

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

Eingegangen: 9. 3. 1981

Angenommen: 6. 4. 1981

Zusammenfassung – Summary

Es wird eine Methode beschrieben, mit der die Mineralstoffkonzentration des Bodens in der Umgebung lebender Pflanzenwurzeln erfaßbar ist. Dazu werden Pflanzen in Flachgefäßen mit einem radioaktiv markierten Boden von 5 mm Schichtdicke herangezogen und Autoradiogramme der Wurzeln und ihrer Umgebung hergestellt. Die Filmschwärzung der Autoradiogramme wird densitometrisch ausgemessen. Die so ermittelte Schwärzungsverteilung stimmt bei Verwendung energieärmer Strahler, wie z. B. ^{33}P , mit der Verteilung des Radionuklids im Boden befriedigend überein. Im Falle der energiereicheren Strahler ^{32}P und ^{86}Rb weicht jedoch das Schwärzungsprofil wegen der größeren Reichweite der Strahlung von der Verteilung des Radionuklids im Boden erheblich ab. Um Fehlschlüsse zu vermeiden, wird eine Korrekturrechnung durchgeführt.

An Autoradiogrammen von Maiswurzeln, die in ^{86}Rb -markiertem Sand- und Lößboden gewachsen waren, wird das Resultat der Korrekturrechnung dargestellt.

Die Phosphatverarmungszonen des wurzelnahen Bodens sind i. a. nicht größer als die Reichweite der Strahlung von ^{32}P . Daher ist dieses Isotop für solche Untersuchungen nicht oder zumindest weniger als ^{33}P geeignet.

Determination of the nutrient distribution in the soil-root interface by autoradiography

A method is described to determine the nutrient concentration profile in soil in the vicinity of living plant roots. For this purpose plants are grown in flat boxes filled with radioactive labelled soil of 5 mm thickness and then autoradiographs of roots and surrounding soil are taken. The density of the x-ray film is scanned by use of a microdensitometer. The profile of the film density produced by ^{33}P , which is a β -emitter of relatively low energy, represents the P concentration profile rather accurately. In case of ^{32}P and ^{86}Rb , nuclides of higher β -energy, profiles of the film density deviate markedly from concentration profiles because of cross fire. To account for the cross fire a corrective calculation is applied.

The result of the corrective calculation is shown with autoradiographs of maize roots grown in either sand or loess soil labelled with ^{86}Rb .

Phosphate depletion zones around plant roots growing in soil usually do not exceed the distance of cross fire of ^{32}P . Therefore, this nuclide is not or at least less appropriate than ^{33}P .

Einleitung

Der Mineralstoffgehalt des wurzelnahen Bodens unterliegt Änderungen infolge des Entzugs der Pflanzen einerseits und des Antransportes aus entfernteren Zonen des Bodens andererseits. Richtung und Ausmaß dieser Veränderungen sind für die Ernährung der Pflanze bedeutsam, weil die Aufnahmerate eines Ions von dessen Konzentration an der Wurzeloberfläche abhängt. Die Untersuchung solcher Vorgänge erfordert Methoden, mit denen die Mineralstoffkonzentration des Bodens in geeigneter räumlicher und zeitlicher Auflösung meßbar ist.

In einer anderen Arbeit hatten wir über ein Verfahren berichtet, durch das der wurzelnaher vom wurzelfernen Boden getrennt und dann mit chemischen Methoden analysiert wird (Hendriks und Jungk, 1981). Dadurch lassen sich zwar Unterschiede feststellen, Lage und Verlauf der Konzentrationsgradienten sind aber nicht genau bestimmbar. Die Erfassung solcher Konzentrationsprofile scheint dagegen in der Weise möglich zu sein, daß man nach homogener Markierung des Bodens mit einem Radionuklid autoradiographische Aufnahmen der Wurzel und ihrer Umgebung herstellt. Konzentrationsveränderungen zeichnen sich hierbei durch Schwärzungsunterschiede der photographischen Platte ab. Das Verfahren ist von Walker und Barber (1961), Wilkinson et al. (1968) und in verfeinerter Form von Bhat und Nye (1973, 1974) für die Untersuchung der Wurzelumgebung angewendet worden.

Die Methode ist deswegen problematisch, weil die Strahlenquelle den Film nicht nur an der Kontaktstelle zum Boden schwärzt, sondern, je nach Reichweite der Strahlung und Dicke der radioaktiv markierten Schicht, auch die Umgebung davon (Nadler, 1951, Schmeiser, 1953). Das Auflösungsvermögen der Autoradiogramme von Bodenschichten mit mehreren mm Dicke ist daher viel geringer als bei dünnen Objekten, und die Filmschwärzung stellt nur ein verzerrtes Abbild der Konzentrationsverteilung dar. Bei einem energiearmen β -Strahler, wie ^{33}P , ist dieser Effekt relativ gering. Daher wird dieses Nuklid von Bhat und Nye (1973) als besonders geeignet zum Studium der P-Verteilung des wurzelnahen Bodens angesehen.

Wir haben das Verfahren mit ^{33}P sowie mit den energiereicheren Strahlern ^{32}P und ^{86}Rb überprüft und in einigen Punkten verändert; insbesondere erschien es notwendig, die Reichweite der Strahlung zu berücksichtigen. Die Methode wird nachfolgend beschrieben und ihre Anwendungsmöglichkeit erläutert.

Material und Methodik

Die autoradiographische Erfassung der Mineralstoffverteilung in der Umgebung lebender Pflanzenwurzeln setzt voraus, daß

- die Wurzeln an der Bodenoberfläche liegen,
- das Radionuklid gleichmäßig im Boden verteilt ist, und
- die Markierungsdosis so gewählt wird, daß sich unter Berücksichtigung der Versuchszeit optimale Filmschwärzungen ergeben.

Nach Vorversuchen wurde wie folgt verfahren:

Markierung des Bodens

Lufttrockener, gesiebter Boden wird mit der in Wasser gelösten radioaktiven Substanz gründlich vermischt. Die Wassermenge ist so zu bemessen, daß sich eine Paste bildet. Mehr Wasser kann zu Entmischung und so zu inhomogener Verteilung des radioaktiven Stoffs führen. Dieser Effekt ist an den dunklen Flecken der Abb. 4 a zu erkennen. Als Aktivitätskonzentration haben sich $4 \mu\text{Ci } ^{32}\text{P}$, $8 \mu\text{Ci } ^{33}\text{P}$ und $2 \mu\text{Ci } ^{86}\text{Rb}$ pro g Boden bewährt. Zur Einstellung des Gleichgewichts wurde der Boden 2 Wochen feucht gehalten, wiederholt gemischt, dann luftgetrocknet.

Gefäße

Für die Untersuchungen haben wir Flachgefäße aus Plexiglas benutzt, ähnlich denen von Walker und Barber (1961). Bauart und Maße sind aus Abb. 1 ersichtlich. Die Rückwand enthält, unter Alu-Folie, eine mehrfache Lage Filterpapier. Gießwasser wird hier hineingegeben, um die Wurzeln mit Wasser zu versorgen, Fließbewegungen im Boden aber zu vermeiden. Die vordere Platte ist abnehmbar. Zwischen ihr und dem Boden befindet sich eine dünne Plastikfolie, auf die der Röntgenfilm zur Exposition gelegt wird.

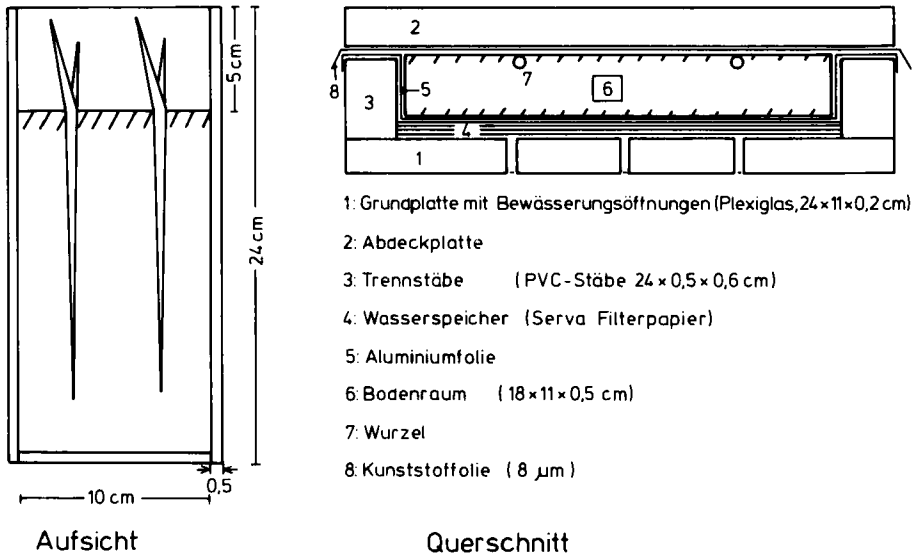


Abbildung 1: Flachgefäß zur Untersuchung der Mineralstoffverteilung im wurzelnahen Boden
 Figure 1: Flat box for studying the nutrient distribution in the soil-root interface

Füllung der Gefäße und ihre Bewässerung

Der markierte Boden wird nach obiger Vorbehandlung so besprüht, daß er 5–10 % Wasser aufnimmt, und zur Durchfeuchtung 24 h unter Folie belassen. So sind auch tonige Böden ohne Staubbildung zu zerkleinern. Nach Ausbreiten des Bodens auf der Alu-Folie wird Plastikfolie und Deckel aufgelegt und das Gefäß mehrfach aufgestoßen, damit sich der Boden gleichmäßig dicht verteilt. Die Alu-Folie wird durchstochen, damit Wasser aus dem Filterpapier in den Boden gelangt. Bei Bedarf wird Wasser nach Gewicht in den Speicher ergänzt.

Bepflanzung

Samen werden vorgekeimt, bis die Primärwurzel 1–2 cm lang ist und je drei Sämlinge gepflanzt. Schrägstellung des Gefäßes veranlaßt die Wurzel, an der Seite der Plastikfolie zu wachsen. Dabei muß die Wurzel *im* Boden wachsen, ihre Außenseite aber sichtbar sein, so daß sie auf der Ebene der Bodenoberfläche liegt.

Herstellung der Autoradiogramme

Ein Röntgenfilm wird auf die Plastikfolie gelegt und durch Federklemmen und Schaumgummi in engen Kontakt zum Boden gebracht. Als Filmmaterial haben wir Structurix 4 D (Agfa Gevaert) für ^{32}P - und 7 D für ^{33}P - und ^{86}Rb -markierten Boden im Format 10 × 24 cm verwendet. Die Expositionsdauer variiert je nach Aktivitätskonzentration zwischen 4 und 24 h. Die Entwicklung der Filme erfolgt auf die übliche Weise. Die sich ergebende Filmschwärzung ist bei diesen Expositionszeiten und den zuvor genannten Aktivitätskonzentrationen zu diesen proportional.

Densitometrie der Autoradiogramme

Die Schwärzungsverteilung in der Umgebung der Wurzeln wurde mit dem Photometer des Typs G II der Firma Zeiss, Jena, ausgemessen. Hierzu erfolgten an dem entwickelten Röntgenfilm Einzelmessungen von je 0,1 × 1 mm Fläche auf einer senkrecht zur Wurzel gelegenen Linie. Der Abstand der Einzelmessungen beträgt 0,1 mm, um die P-Verteilung, und 0,2 mm, um die Rb-Verteilung zu erfassen. Je nach Ausdehnung der Verarmungszone sind 50 bis 100 Einzelmessungen auf der Linie notwendig. Diese Serie von Messungen wird im Abstand von je 2 mm längs der Wurzel 5-fach wiederholt und so insgesamt ein 1 cm langer Wurzelabschnitt abgetastet. Aus den Mittelwerten dieser Messungen wird das Schwärzungsprofil gezeichnet.

Korrektur der Schwärzungsverteilung

Das Schwärzungsmuster des Autoradiogramms stellt ein verzerrtes Bild der Verteilung des Radionuklids an der Bodenoberfläche dar. Um die Verzerrung berücksichtigen zu können, haben wir

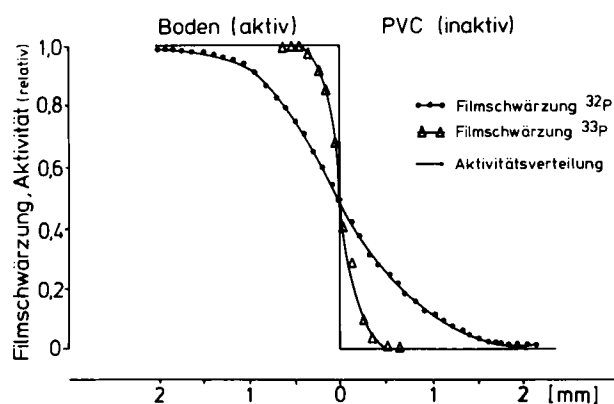


Abbildung 2: Filmschwärzung durch einen mit ^{32}P und ^{33}P markierten Boden beiderseits einer Boden/PVC-Grenzschicht

Figure 2: Film densities of ^{32}P and ^{33}P autoradiographs of a soil/PVC interface

die Schwärzungsverteilung bei bekannter Aktivitätsverteilung gemessen. Hierzu wurden Autoradiogramme von Bodenproben hergestellt, die in PVC-Gefäße mit senkrechter Wandung eingefüllt und an der Oberfläche glatt abgestrichen waren.

In Abb. 2 ist die Aktivitäts- und die Schwärzungsverteilung dieses Präparates beiderseits der PVC-Kante dargestellt. Man sieht, daß die Filmschwärzung von der Aktivität bei der Verwendung von ^{32}P viel stärker als bei ^{33}P abweicht. Das Auflösungsvermögen des Autoradiogramms (*Schmeiser, 1953*) ist demzufolge bei ^{33}P wesentlich größer als bei ^{32}P .

Aus den Daten der Abb. 2 läßt sich eine Übertragungsfunktion ableiten, mit deren Hilfe die Schwärzungswerte korrigierbar sind (*Passioura, 1972*). Dies soll am Beispiel der entsprechenden Kurve für ^{86}Rb (Abb. 3) erläutert werden. In diese Kurve haben wir eine Treppe hineingezeichnet. Die Höhe der Stufen gibt die Größe von Übertragungskoeffizienten (a bis e , für Entfernungsschritte von 0,4 mm) an, die zur Lösung von Gleichung 1 erforderlich sind.

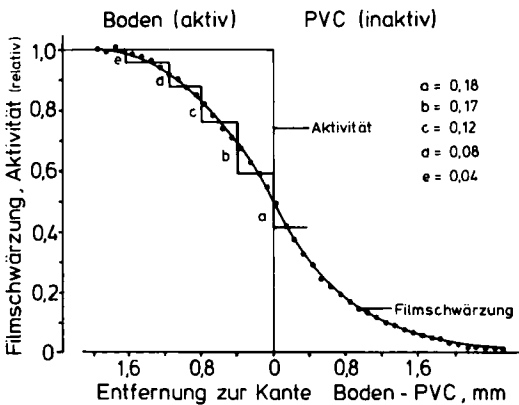


Abbildung 3: Filmschwärzung durch ^{86}Rb beiderseits einer Boden/PVC-Grenzschicht mit Übertragungskoeffizienten

Figure 3: Film density of a ^{86}Rb autoradiograph of a soil/PVC interface and transfer coefficients

Mit Hilfe des von *Passioura (1972)* vorgeschlagenen Rechenverfahrens haben wir versucht, das Schwärzungsbild mit der Aktivitätsverteilung in Beziehung zu bringen. Es basiert auf Gleichung 1:

$$S_{(i)} = a A_{(i)} + b (A_{(i+1)} + A_{(i-1)}) + c (A_{(i+2)} + A_{(i-2)}) \quad (1)$$

Darin bedeutet:

$S_{(i)}$ = Schwärzung am Punkt i

$A_{(i)}$ = Aktivität am Punkt i

$A_{(i\pm 1)}$ = Aktivität an dem Punkt, der eine Einheit von i entfernt ist

a, b, c = Übertragungskoeffizienten für Entfernungen von 0, 1 und 2 Einheiten. Sie sind in Abb. 3 erläutert.

Für die Koeffizienten gilt: $a + 2b + 2c = 1$

Nach Gleichung 1 ergibt sich die Schwärzung an einem Punkt des Autoradiogramms aus der Aktivität direkt unter diesem Punkt sowie aus benachbarten Aktivitäten unter Berücksichtigung der

Übertragungsfunktion. Gleichung 1 sieht nur den Fall vor, daß die Strahlung über zwei Entfernungseinheiten reicht. Der Überstrahlungsbereich kann aber weiter unterteilt werden. Hierzu sind zusätzliche Übertragungskoeffizienten zu ermitteln und die Gleichung entsprechend zu erweitern. Wir haben 4 oder 5 Übertragungskoeffizienten verwendet, eine weitere Abstufung erschien nutzlos.

Gleichung 1 erscheint mit Hilfe der Matrixalgebra lösbar. Unsere Versuche mißlingen jedoch, weil schon geringe Streuungen der Schwärzungswerte zu völlig falschen Aktivitätsverteilungen führten. *Passioura* (1972) hat Gleichung 1 mit einem Näherungsverfahren gelöst, indem er die Aktivitätswerte systematisch korrigiert hat, bis die errechneten mit den gemessenen Schwärzungswerten übereinstimmen. Wir kamen hierdurch auch nicht zum Erfolg, da die Lösung nicht konvergierte, sondern divergierte. Wir haben stattdessen ein empirisches Näherungsverfahren angewendet.

Dabei wird als Aktivitätsverteilung zunächst eine Kurve angenommen, die der Schwärzungsverteilung entspricht und mit Hilfe von Gleichung 1 die Filmschwärzung berechnet. Je nach dem Ergebnis der Rechnung wird dann die angenommene Aktivität nach oben oder unten korrigiert, bis das Rechenergebnis mit der gemessenen Schwärzung befriedigend übereinstimmt. Das Verfahren ist mühsam, liefert u. E. aber brauchbare Ergebnisse, wie nachfolgend gezeigt wird.

Ergebnisse

Abbildung 4 zeigt Autoradiogramme von Maiswurzeln in einem Sandboden, der – in getrennten Proben – mit drei verschiedenen Radionukliden vermischt war. Im ^{33}P -Autoradiogramm sind Einzelheiten wegen des hohen Auflösungsvermögens gut erkennbar, während ^{32}P und ^{86}Rb vergleichsweise unscharfe, verschwommene Bilder liefern.

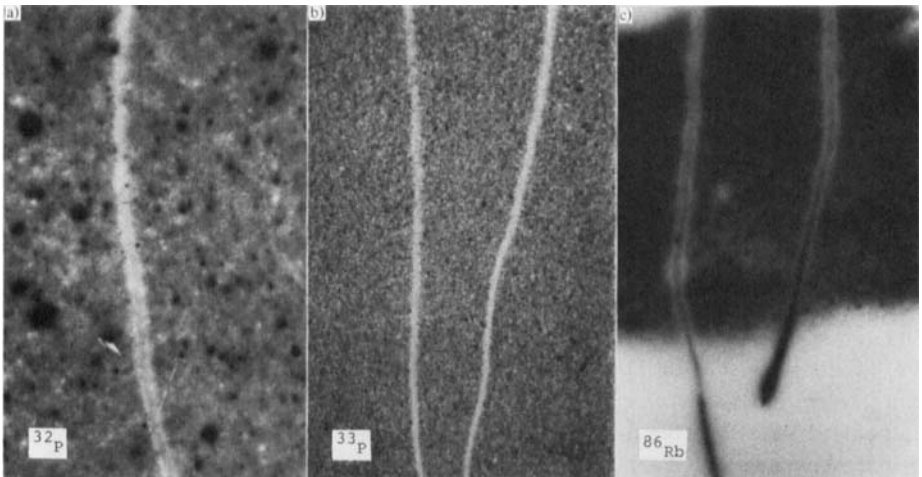


Abbildung 4: Autoradiogramme von Maiswurzeln im Boden markiert mit a) ^{32}P , b) ^{33}P , c) ^{86}Rb
Figure 4: Autoradiographs of maize roots in soil labelled with a) ^{32}P , b) ^{33}P , c) ^{86}Rb

Das Ergebnis der densitometrischen Messungen und der Korrekturrechnungen ist in den nächsten Darstellungen enthalten. Abb. 5 zeigt die Schwärzungsverteilung in der Wurzelumgebung von einem ^{32}P - und einem ^{33}P -markierten Boden. Die ^{32}P -Schwärzungskurve hat einen wesentlich flacheren Verlauf und dehnt sich in radialer Richtung von der Wurzel weiter als die ^{33}P -Kurve aus. Dieses Beispiel bietet die Möglichkeit, die Korrekturrechnung zu überprüfen. Als Aktivitätsverteilung wurde hierzu die ^{33}P -Schwärzungskurve angenommen, da der Überstrahlungsbereich dieses Nuklids gemäß Abb. 2 relativ gering ist. Die Schwärzungsverteilung entspricht daher ziemlich genau der Aktivitätsverteilung. Unter Anwendung von Gleichung 1 und den Übertragungskoeffizienten $a = 0,16$; $b = 0,16$; $c = 0,14$ und $d = 0,12$ für Schritte von $0,4\text{ mm}$ wurde die für ^{32}P zu erwartende Schwärzungsverteilung errechnet. Das Ergebnis der Rechnung stimmt mit der gemessenen ^{32}P -Filmschwärzung befriedigend überein, wie aus Abb. 5 zu entnehmen ist.

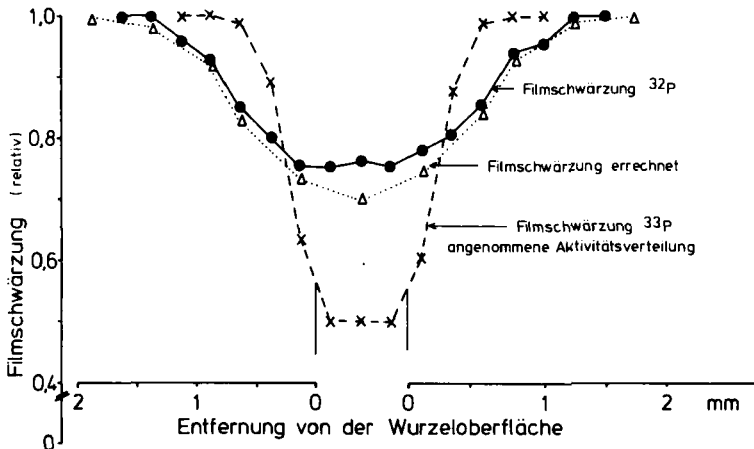


Abbildung 5: Filmschwärzung von Autoradiogrammen durch ^{32}P - und ^{33}P -markierten Boden in der Umgebung einer Maiswurzel

Figure 5: Film density of autoradiographs in the vicinity of a maize root in soil labelled with ^{32}P or ^{33}P

Die Schwärzung von Autoradiogrammen, die mit ^{33}P erstellt werden, bildet zwar den Verlauf der Phosphatverarmungszone des Bodens in Wurzelnähe zutreffender ab als bei Verwendung von ^{32}P . Im Detail können jedoch auch ^{33}P -Autoradiogramme durch die Korrekturrechnung verbessert bzw. sicherer interpretiert werden. So ist aus Abb. 6 zu entnehmen, daß man die ansteigende Schwärzung im Bereich unter $0,5\text{ mm}$ von der Wurzeloberfläche als Ergebnis der Überstrahlung ansehen muß. Die Aktivitätskurve zeigt außerdem, daß der Boden in der Zone von 0 bis $0,7\text{ mm}$ Entfernung von der Wurzel, die der Länge der Wurzelhaare von Mais entspricht, offenbar gleichmäßig an P verarmt wird.

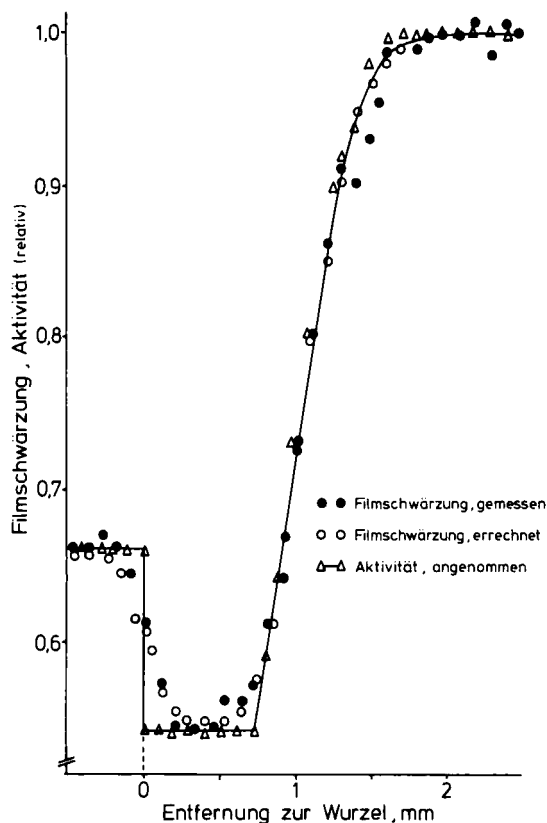


Abbildung 6: Angenommene Verteilung der ^{33}P -Aktivität und die daraus errechnete sowie die gemessene Filmschwärzung in der Umgebung einer Maiswurzel

Figure 6: Assumed distribution of the ^{33}P activity around a maize root and the resulting calculated as well as the measured film density

In Abb. 7 ist je ein mit ^{86}Rb an einem Sand- und einem Lößboden erzieltes Verarmungsprofil aufgezeichnet. Zur Berechnung der Schwärzungsverteilung wurde die durchgezogene Linie als Aktivitätsverteilung angenommen und die Übertragungskoeffizienten aus Abb. 3 verwendet. Bei beiden Böden stimmen die gemessenen und die errechneten Schwärzungswerte so gut überein, daß die angenommene Aktivitätsverteilung als die richtige anzusehen ist.

Diskussion

Die Ergebnisse bestätigen die Beobachtungen von Walker und Barber (1961), Wilkinson et al. (1968) sowie von Bhat und Nye (1974), daß die Mineralstoffkonzentration des Bodens in der Nähe lebender Wurzeln von der Konzentration des übrigen Bodens stark abweichen und daß man diese Erscheinung durch Autoradiographie nachweisen kann. Sie stimmen auch mit der Feststellung von Bhat und Nye (1973) überein, daß die Densitometrie der Filmschwärzung zahlenmäßige Informationen über den Verlauf der Mineralstoffkonzentration in Wurzelnähe liefern kann. Angesichts der geringen Entfer-

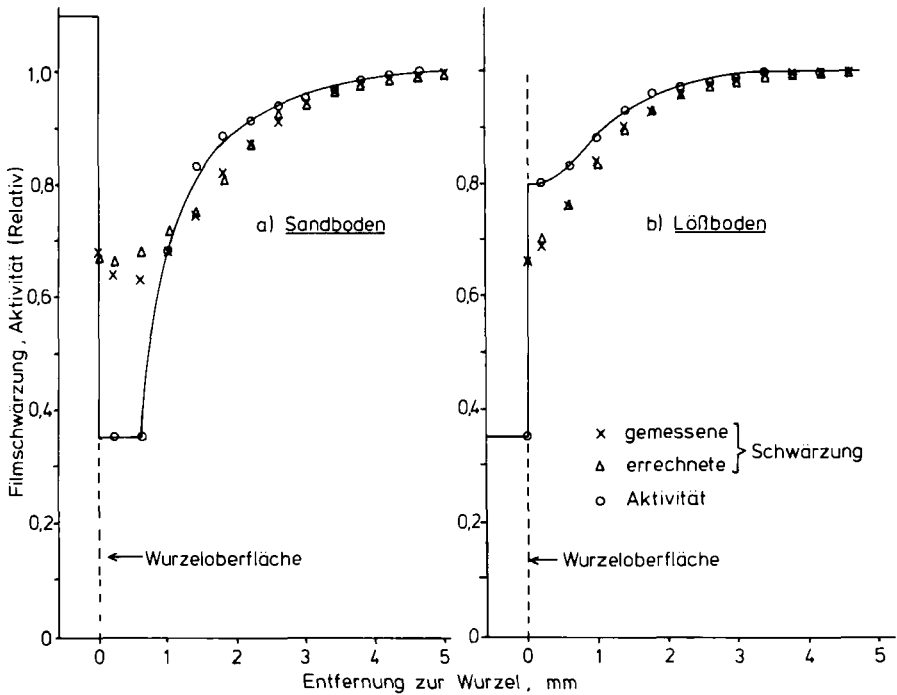


Abbildung 7: Angenommene Verteilung der ⁸⁶Rb-Aktivität und die daraus errechnete sowie die gemessene Filmschwärzung in der Umgebung einer Maiswurzel in a) Sandboden, b) Lößboden
Figure 7: Assumed distribution of the ⁸⁶Rb activity and the calculated as well as the measured film densities around a maize root in a) sandy soil, b) loess soil

nung, über die sich die Veränderung erstreckt, spielt jedoch das Auflösungsvermögen der Autoradiogramme eine wichtige Rolle. Von den drei verwendeten Nukliden liefert bei dieser Technik nur ³³P Autoradiogramme, deren Schwärzung ein hinreichend zutreffendes Abbild des P-Konzentrationsprofils darstellt. Bei Verwendung der beiden anderen Nuklide weichen dagegen infolge des Überstrahlungseffektes Schwärzungs- und Aktivitätsverteilung so stark voneinander ab, daß die Schwärzung allein zu erheblichen Irrtümern führt.

Die vorgeschlagene Korrekturrechnung erweist sich als ein wirksames Mittel, um die Verzerrung zu beseitigen oder zumindest eine bessere Annäherung an die Konzentrationsverteilung im Boden zu erreichen. Dies ist insbesondere aus Abb. 5 zu schließen. Man sieht hier, daß die Filmschwärzung bei ³²P eine etwa doppelt so große Ausdehnung der P-Verarmungszone des Bodens vortäuscht wie sie aufgrund des ³³P-Autoradiogrammes wirklich vorhanden ist. Untersuchungen des wurzelnahen Bodens mit ³²P ohne Korrektur, die z. B. Temple-Smith et al. (1977) veröffentlicht haben, können demnach nur begrenzte Information liefern.

Bei Anwendung der Korrekturrechnung scheint dagegen nach Abb. 5 auch ^{32}P ein Nuklid zu sein, das für die Erfassung der P-Verteilung in der Wurzel-Boden-Grenzschicht geeignet ist. Diese prinzipielle Folgerung muß jedoch relativiert werden. Zu der Korrekturrechnung ist zu sagen, daß man in Zonen, in denen sich die Gradienten stark ändern, die Aktivität in gewissem Maße variieren kann, ohne die Übereinstimmung von berechneter und gemessener Schwärzung wesentlich zu beeinträchtigen. Daher sind diejenigen Werte mit Unsicherheit behaftet, die sehr nahe an der Wurzeloberfläche liegen, weil sie dem Einfluß der Überstrahlung aus dem Inneren der Wurzel unterliegen. Außerdem ist in Betracht zu ziehen, daß die P-Verarmungszone mit circa 1 mm nicht größer als der Überstrahlungsbereich von ^{32}P ist. Daher eignet sich ^{32}P für die autoradiographische Darstellung der P-Verteilung im wurzelnahen Boden weniger als ^{33}P , eine Einschätzung, zu der auch Nye und Tinker (1977, S. 141) kamen.

Infolge der sehr ähnlichen β -Energie ist die Überstrahlungszone von ^{86}Rb etwa ebenso groß wie die von ^{32}P . Sie wirkt sich jedoch weniger schwerwiegend aus, weil die Entleerungszone von Rb im Boden, wie Abb. 7 zeigt, größer als die von Phosphat ist. Daher ist ^{86}Rb besser geeignet als ^{32}P . Ein Nachteil von ^{86}Rb beruht auf der Tatsache, daß es als Tracer für Kalium herangezogen wird, obwohl es sich im System Pflanze–Boden nicht genauso wie Kalium verhält. Von dieser Seite kann es zu Fehlschlüssen Anlaß geben. Hierüber soll in anderem Zusammenhang berichtet werden.

Die Wirkung der Korrekturrechnung bei verschiedenen, mit ^{86}Rb -markierten Böden ist aus dem Vergleich der Abbildung 7a und 7b ersichtlich. Obwohl die Schwärzung an der Wurzeloberfläche mit 0,65 in beiden Fällen gleich groß ist, ergibt sich für die Aktivitätswerte ein großer Unterschied: 0,35 für den Sandboden und 0,80 für den Lößboden. Hieran bestätigt sich, daß die Schwärzungswerte des Autoradiogramms ohne Korrektur auch bei ^{86}Rb nicht zu befriedigenden Aussagen über die Rb-Konzentration in Wurzelnähe führt.

Der Unterschied zwischen Abb. 7a und 7b läßt sich wie folgt erläutern: vom Sandboden wird Rb relativ schwach adsorbiert. Die Pflanze kann die Rb-Konzentration des Bodens daher relativ weit absenken und Rb in der Wurzel entsprechend hoch anreichern. Das Nuklid strahlt in diesem Fall mehr aus der Wurzel in den umgebenden Boden und schwärzt so den Film verstärkt im Bereich außerhalb der Wurzel. Die Wurzel hat demnach den wurzelnahen Boden stärker entleert als es der Schwärzung des Autoradiogramms entspricht. Vom Lößboden wird Rb hingegen in höherem Maße gebunden, so daß die Wurzel einen kleineren Teil davon aufnimmt. In diesem Fall strahlt das Isotop stärker aus dem Boden in Richtung Wurzel, die Verarmung des Bodens ist folglich geringer als es der Filmschwärzung entspricht.

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

Literatur

- Bhat, K.K.S. and Nye, P.H.* (1973): Diffusion of phosphate to plant roots in soil. I. Quantitative autoradiography of the depletion zone. *Plant Soil* **38**, 161–175.
- Bhat, K.K.S. and Nye, P.H.* (1974): Diffusion of phosphate to plant roots in soil. II. Uptake along the roots at different times and the effect of different levels of phosphorus. *Plant and Soil* **41**, 365–382.
- Bhat, K.K.S. and Nye, P.H.* (1974): Diffusion of phosphate to plant roots in soil. III. Depletion around onion roots without root hairs. *Plant and Soil* **41**, 383–394.
- Hendriks, L. und Jungk, A.* (1981): Erfassung der Mineralstoffverteilung in Wurzelnähe durch getrennte Analyse von Rhizo- und Restboden. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkunde*.
- Nadler, N.J.* (1951): Some theoretical aspects of radioautography. *Canad. J. of med. Sci.* **29**, 182–194.
- Nye, P.H. and Tinker, P.B.* (1977): Solute movement in the soil-root system. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Passioura, J.B.* (1972): Quantitative autoradiography in the presence of crossfire. In: *U. Lüttge*, Ed. *Microautoradiography and Electron Probe Analysis*. Berlin – Heidelberg – New York.
- Schmeiser, K.* (1953): Autoradiographie. In: *Schwiegk, H.*: *Künstliche radioaktive Isotope in Physiologie, Diagnostik und Therapie*. Springer Berlin – Göttingen – Heidelberg, S. 76–92.
- Temple-Smith, M.G., Menary, R.C.* (1977): Movement of ³²P to roots of cabbage and lettuce grown in two soil types. *Commun. in Soil Sci. and Plant Anal.* **8**, 67–78.
- Walker, J.M. and Barber, S.A.* (1961): Ion uptake by living plant roots. *Science* **133**, 881–882.
- Wilkinson, H.F., Loneragan, J.F., and Quirk, J.P.* (1968): The movement of zink to plant roots. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **32**, 831–833.

[P 4054 B]