

# Über die Aufnahme von Strontium durch höhere Pflanzen

Autor(en): **Läuchli, André**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Berichte der Schweizerischen Botanischen Gesellschaft = Bulletin de la Société Botanique Suisse**

Band (Jahr): **72 (1962)**

PDF erstellt am: **24.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-50852>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Über die Aufnahme von Strontium durch höhere Pflanzen

Von *André Läuchli*

(Aus dem Botanischen Institut der Universität Basel)

Manuskript eingegangen am 7. Juli 1962

## Inhalt

	Seite
Einleitung .....	147
Methodisches .....	148
Prinzip der Versuche .....	148
Aufzucht und Kultur der Versuchspflanzen .....	148
Aufarbeitung des Versuchsmaterials .....	152
Flammenspektrophotometrische Bestimmung des Strontiums .....	154
Experimentelle Ergebnisse .....	156
Analyse von Maiskaryopsen und <i>Pisum</i> -Samen auf autochthones Strontium ...	156
Einfluß der Strontiumkonzentration auf die Strontiumaufnahme .....	157
Bedeutung der Entwicklungsstadien für die Strontiumaufnahme .....	159
Verteilung des aufgenommenen Strontiums auf die verschiedenen Organe .....	165
Unterschiede in der Strontiumaufnahme zwischen <i>Zea Mays</i> und <i>Pisum sativum</i>	168
Einfluß von Calciumionen auf die Strontiumaufnahme .....	169
Einfluß von Kaliumionen auf die Strontiumaufnahme .....	172
Vergleich der Wirkung von Calcium und Kalium auf die Strontiumaufnahme...	177
Mechanismus der Strontiumaufnahme .....	179
Diskussion .....	186
Zusammenfassung .....	189
Zitierte Literatur .....	192

## Einleitung

Schon frühzeitig sind Spuren von Strontium in Pflanzen des natürlichen Standorts nachgewiesen worden (Dieulafait, 1877; Trimble, 1897; Robinson, Steinkoenig und Miller, 1917; Headden, 1921). Die Aufnahme von Strontium durch höhere Pflanzen wurde erstmals von Haselhoff (1893) untersucht; er ersetzte in Nährlösungen und Böden Calcium schrittweise durch Strontium und gelangte zur Auffassung, daß Strontium nur bei Calciummangel aufgenommen wird. Collander (1937,

1941) stellte dagegen fest, daß Strontium auch bei Anwesenheit von Calcium aufgenommen wird, und zwar in ähnlichen Mengen wie Calcium.

Neuerdings erlangte das Problem der Strontiumaufnahme durch Pflanzen eine besondere Bedeutung. Die radioaktiven Isotope  $\text{Sr}^{89}$  und  $\text{Sr}^{90}$ , Abfallprodukte der Uranspaltung, können infolge ihrer Aufnahme durch Kulturpflanzen in menschliche und tierische Nahrung gelangen, so daß besonders  $\text{Sr}^{90}$  mit seiner großen Halbwertszeit (28 Jahre) zu einer potentiellen Gefahr werden kann. Die zahlreichen einschlägigen Arbeiten der letzten Jahre versuchen denn auch, festzustellen, wie groß die Aufnahme aktiver Isotopen aus dem Boden in die Kulturpflanzen ist und ob Möglichkeiten einer Aufnahmehemmung bestehen.

Zweck der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der Gesetzmäßigkeit der Strontiumaufnahme durch höhere Pflanzen. Die grundlegenden Versuche von Collander (1937, 1941) und die in unserem Institut seit langem gebräuchlichen Methoden der Kultur höherer Pflanzen in Nährlösungen (Burlet, 1940; Vöchting, 1953; Rudin, 1956; Bürgin-Wolff, 1959) und der Gewinnung löslicher Aschen (Vöchting, 1953; Pedretti, 1958) bildeten den Ausgangspunkt. Als Substrat für die Versuchspflanzen wurden nicht die komplexen Böden, sondern definierte, geeignet gewählte Nährlösungen verwendet. Um die Zahl der Analysen bewältigen zu können, wurde die Untersuchung der Strontiumaufnahme auf eine Monokotyle (*Zea Mays*) und eine Dikotyle (*Pisum sativum*) beschränkt.

## Methodisches

### *Prinzip der Versuche*

Ausgelesene Karyopsen von *Zea Mays* L. und Samen von *Pisum sativum* L. wurden nach der Desinfektion und Quellung im Dunkeln zum Keimen gebracht und in definierter und variiertes Mineralsalznährlösung mit bekanntem Strontiumzusatz unter Gewächshausbedingungen kultiviert. Die Organe der Versuchspflanze wurden in verschiedenen Entwicklungsstadien auf ihren Strontiumgehalt untersucht, ebenso jeweils die Kulturlösung, was die Aufstellung einer Strontiumbilanz ermöglichte.

### *Aufzucht und Kultur der Versuchspflanzen*

Für die Versuche wurden die Sorten «Saatmais, Ohio M34 F1», später «Ungarischer Saatmais» und «Markerbsen Senator» verwendet.

Besondere Aufmerksamkeit erfordert bei Versuchen über Nährstoffaufnahme die Auslese der Samen und ihre Aufzucht, da das Versuchsmaterial möglichst homogen sein muß (s. a. Bergmann, 1958). Es wur-

den nur möglichst gleich große und gesunde Samen ohne Risse und Flecken verwendet und im wesentlichen nach der von Burlet (1940), Rudin (1956) und Bürgin-Wolff (1959) hier ausgearbeiteten Methode aufgezogen. Da die Nährlösungen rein mineralisch waren, waren aseptische Bedingungen nicht unbedingt erforderlich; um jedoch die häufige Infektion der keimenden Samen möglichst zu verhindern, wurden die Erbsensamen und Maiskörner nach der Vorschrift von Bürgin (1959, S. 78) mit Brom desinfiziert. Nach 48stündiger Quellung in fließendem Leitungswasser wurden die Samen in Keimröhrchen (Rudin, 1956) im Dunkeln bei 28 °C zum Keimen gebracht, wobei Leitungswasser (Strontiumgehalt unter der Grenze der Nachweisbarkeit) als geeignetes Keimmedium verwendet wurde. Nach 4 Tagen (für Mais) und 5–7 Tagen (für *Pisum*) wurden gleichmäßig und kräftig gewachsene Keimlinge für die Versuche ausgelesen; die weitere Kultivierung erfolgte auf Fernbachkolben mit mineralischen Nährlösungen, deren Schichthöhe jeweils etwa 3 cm betrug. Pro Versuchsbedingung wurden 10–15 Parallelkulturen durchgeführt.

Als Kulturmedium für Mais diente eine modifizierte Pfeffer-Robins-Nährlösung mit erhöhtem Eisengehalt (s.a. Vöchting, 1953); sie enthält in 6000 ccm entsalztem Wasser: 2 g Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, 0,5 g KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 0,5 g KNO<sub>3</sub>, 0,5 g MgSO<sub>4</sub>, 0,25 g KCl und 0,06 g FeCl<sub>3</sub>. *Pisum* wurde in einer Knop-Nährlösung kultiviert; in 1000 ccm entsalztem Wasser enthält sie: 1 g Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, 0,25 g KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 0,25 g KNO<sub>3</sub>, 0,25 g MgSO<sub>4</sub> und 0,004 g FeCl<sub>3</sub>. Bei den verwendeten Nährlösungen wurde pro Liter 1 ccm strontiumfreie «A-Z-Lösung a» nach Hoagland (aus Bergmann, 1958, S. 66), in der As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> durch 0,5 g MoO<sub>3</sub>/18 l ersetzt ist, zugesetzt. Das Anfangs-pH der Nährlösungen ist dann für Mais etwa 4,4 und für *Pisum* etwa 4,6. Da die Knop-Nährlösung auch Nitrate enthält, wurde *Pisum* ohne Knöllchenbakterien kultiviert; Knöllchenbildung trat daher nie auf.

In gewissen Versuchen wurde die Zusammensetzung der Nährlösung variiert; Einzelheiten werden bei der Beschreibung der jeweiligen Versuche angegeben. Alle verwendeten Chemikalien hatten den Reinheitsgrad «purissimum» oder «pro analysi»; die Lösungen wurden mit durch Ionenaustauscher (Gemischtbettverfahren) entsalztem Wasser hergestellt (spezifischer Widerstand rund  $2 \cdot 10^6 \Omega$ ). In den Nährlösungen konnte kein Strontium nachgewiesen werden (Empfindlichkeit des Nachweises etwa 0,2  $\gamma$  Sr/ccm).

#### Strontiumzusatz

Für die Stammlösungen wurde SrCl<sub>2</sub> + 6 H<sub>2</sub>O pro analysi verwendet. Das stark hygroskopische Salz kann nicht genau eingewogen werden, es wurde daher zuerst bei 80 °C unter Vakuum während mehrerer Tage getrocknet. Es ist dann nicht mehr hygroskopisch, enthält aber immer noch

12% Wasser (mit Zeiß-Eintauchrefraktometer bestimmt). In späteren Versuchen wurde auf einfachere Art vorgegangen, indem durch ungefähre Einwaage des ungetrockneten Salzes eine konzentrierte Stamm-lösung hergestellt wurde; diese verdünnte man so lange, bis ihr Refrakto-meterwert der gewünschten Strontiumkonzentration entsprach (Refrakto-meterwerte aus Wagner, 1928).

Über die Zuträglichkeit von Strontium für höhere Pflanzen ist bekannt, daß hohe Konzentrationen toxisch wirken (Hurd-Karrer, 1937, 1939; Scharrer und Schropp, 1937; Voelcker, 1915; Walsh, 1945). Toxi-sche Konzentrationen sind für die Untersuchung der physiologischen Strontiumaufnahme ungeeignet. Es mußte daher festgestellt werden, welche Strontiumkonzentrationen das Wachstum der Versuchspflanzen nicht beeinträchtigen (ein fördernder Einfluß niedriger Konzentrationen war nach den Literaturangaben nicht zu erwarten). Maiskörner und Samen von *Pisum* wurden in der üblichen Weise aufgezogen und während

Tabelle 1

*Zea Mays* und *Pisum sativum*: Einfluß von Strontium auf das Wachstum von Wurzel und Sproß.

	<i>Zea Mays</i>	<i>Pisum sativum</i>
Alter der Keimpflanzen bei Versuchsbeginn:	4 Tage	6 Tage
Nährlösung pro Versuchskolben:	250 ccm	250 ccm
Versuchsdauer:	21 Tage	21 Tage
Entwicklungszustand (Anzahl voll entwickelter Blätter):	4-6	4-7
Temperaturmittel:	ca. 22 °C	ca. 21 °C
Tageslänge:	14 ½ Stunden	14 Stunden
Mittelwerte von:	8-9 Pflanzen	9-10 Pflanzen

Anfangs-konzentration an Strontium $\gamma$ /ccm	<i>Zea Mays</i>				<i>Pisum sativum</i>			
	Frischgewicht in g		Trockengewicht in g		Frischgewicht in g		Trockengewicht in g	
	Wurzel	Sproß	Wurzel	Sproß	Wurzel	Sproß	Wurzel	Sproß
0,0	2,28	5,37	0,116	0,324	0,54	1,35	0,039	0,114
0,1	1,90	4,03	0,099	0,243	0,58	1,37	0,036	0,112
1	1,67 <sup>1</sup>	3,35 <sup>1</sup>	0,090 <sup>1</sup>	0,223 <sup>1</sup>	0,61	1,47	0,037	0,121
10	2,09	4,64	0,107	0,290	0,51	1,28	0,033	0,105
100	2,07	4,43	0,103	0,270	0,63	1,50	0,036	0,122
1000	1,31 <sup>2</sup>	3,30 <sup>2</sup>	0,078 <sup>2</sup>	0,236 <sup>2</sup>	0,39 <sup>2</sup>	1,37	0,032	0,114
2000	0,83 <sup>2</sup>	2,53 <sup>2</sup>	0,057 <sup>2</sup>	0,190 <sup>2</sup>	0,36 <sup>2</sup>	1,07	0,026 <sup>2</sup>	0,096
5000	0,55 <sup>2</sup>	1,73 <sup>2</sup>	0,043 <sup>2</sup>	0,166 <sup>2</sup>	0,20 <sup>2</sup>	0,45 <sup>2</sup>	0,019 <sup>2</sup>	0,051 <sup>2</sup>

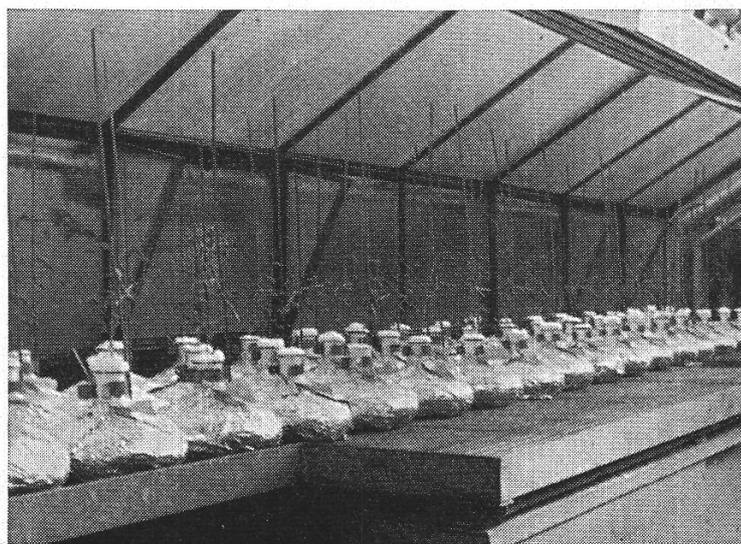
<sup>1</sup> Andere Versuche zeigten, daß diese Werte zufällig so niedrig sind und nur eine Hemmung vortäuschen.

<sup>2</sup> Gegenüber Kontrolle (0,0  $\gamma$  Sr/ccm) signifikant (t-Test,  $P < 0,05$ ) gehemmt.

dreier Wochen auf Fernbachkolben kultiviert, wobei den Nährlösungen Strontium in verschiedenen Konzentrationen zugesetzt wurde. Das Aussehen der Pflanze wurde täglich kontrolliert und nach Versuchsabbruch Frisch- und Trockengewicht von Wurzel und Sproß getrennt bestimmt.

Strontiumzusätze von 1000 bis 5000  $\gamma$ /ccm hatten Entwicklungsstörungen an beiden Versuchspflanzen zur Folge: Bei Mais verfärbten sich die Blätter braun, bei *Pisum* entfalteten sie sich nicht, und die Wurzeln waren bei beiden Pflanzen abnorm verdickt; beide Pflanzen zeigten auch gegenüber den Kontrollen ohne Strontiumzusatz ein geringeres Längenwachstum. In Tabelle 1 sind die Resultate der Frisch- und Trockengewichtsbestimmungen wiedergegeben. Bei Mais bewirken die Strontiumzusätze von 1000 bis 5000  $\gamma$ /ccm, bei *Pisum* diejenigen von 2000 und 5000  $\gamma$ /ccm gegenüber der strontiumfreien Kontrolle eine signifikante (s. S. 155) Abnahme des Frisch- und Trockengewichtes. Unter Berücksichtigung des Aussehens der Pflanzen darf angenommen werden, daß 1000  $\gamma$  Sr/ccm bereits schwach toxisch auf die Entwicklung von Mais und *Pisum* wirken. Hurd-Karrer (1937 und 1939) und Voelcker (1915) fanden für *Triticum* und *Hordeum* die toxische Grenzkonzentration für Strontium im selben Bereich. Aus diesen Gründen wurden daher in den folgenden Versuchen im allgemeinen nur Konzentrationen an Strontium verwendet, die 100  $\gamma$  Sr/ccm nicht überschritten.

Der Zusatz des Strontiums zur Nährlösung erfolgte immer bei Versuchsbeginn, also dann, wenn die Keimpflanzen auf die Fernbachkolben gesetzt wurden.



Figur 1

Kultivierung im Versuchsgewächshaus. *Pisum sativum*: 26 Tage alt, in Nährlösung.  
Rechts oben: Mehrrohrige Fluoreszenzlampe für Zusatzbeleuchtung.

Die Kultivierung der Pflanzen geschah in einem luftkonditionierten Gewächshaus; die Kulturkolben waren in «Latin Squares» (Fisher und Yates, 1948) aufgestellt. Das Temperaturmittel betrug 20–22 °C, die relative Luftfeuchtigkeit im Mittel rund 70% und die Tageslänge durch zusätzliche Belichtung mit Fluoreszenzlampen mindestens 14 Stunden; bei der Kultivierung von *Pisum* bis zur Samenbildung war die Tageslänge 16 Stunden. Figur 1 zeigt die Teilansicht eines Versuches mit *Pisum*.

### *Aufarbeitung des Versuchsmaterials*

#### Prinzip der Strontiumbestimmung

Pflanzenteile wurden naß verascht und der Gehalt der gereinigten Aschenlösung an Strontium flammenspektrophotometrisch bestimmt.

Die Versuchspflanzen wurden aus der Kulturlösung gehoben und die Wurzeln mehrfach mit entsalztem Wasser gespült (Spülwasser zu Kulturlösung!), um sie von der strontiumhaltigen Kulturlösung zu befreien (s. a. Rediske und Selders, 1953; Russell und Squire, 1958). Darauf wurden die Pflanzen in Wurzel und Sproß oder einzelne Organe des Sprosses aufgeteilt, das an den Wurzeln anhaftende Wasser mit Filtrierpapier entfernt, dann das Frischgewicht und nach Trocknen bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz das Trockengewicht der Pflanzenteile bestimmt.

#### Herstellung der Aschenlösung

Die Organe der Pflanzen wurden in der in unserem Institut gebräuchlichen und von Pedretti (1958, S. 107, Figur 3) beschriebenen Apparatur naß verascht. Die Veraschung von älteren Pflanzenteilen mit Salpetersäure nach Pedretti (1958) nimmt viel Zeit in Anspruch und wurde daher wie folgt abgeändert:

Das getrocknete Material wird mit redestillierter, konzentrierter Salpetersäure so weit verascht, bis die Lösung im Quarzkolben nur noch schwach gelb und fast eingedampft ist. Dann wird pro Kolben 5 ccm 30%iges Wasserstoffperoxyd pro analysi zugegeben, nach Abklingen der Reaktion abdestilliert und zum Rückstand frische Salpetersäure zugeetzt. Nach ein- bis zweimaliger Wiederholung dieser Operation ist die Asche rein weiß<sup>1</sup>; sie wird noch zweimal mit destillierter Salzsäure gekocht, um die Nitrate möglichst durch Chloride zu ersetzen, weil Metall-

---

<sup>1</sup> Die Eignung von Wasserstoffperoxyd für die rasche und vollständige Veraschung wurde von Herrn cand. phil. Ernst Fankhauser hier ausprobiert.

chloride für flammenspektrophotometrische Bestimmungen geeigneter sind als Metallnitate. Dann wird zur Trockne eingedampft, damit die Asche ganz von Salpetersäure befreit ist und das Gewicht der Asche bestimmt werden kann.

Diese Asche, besonders von Maissprossen, ist in Säuren zum größten Teil löslich; beim unlöslichen Anteil handelt es sich vorwiegend um Silikate. Da angenommen werden muß, daß Strontium zum Teil als Strontiumsilikat im unlöslichen Anteil vorliegt, wurde eine Methode zur Umwandlung von Strontiumsilikaten in säurelösliche Salze ausgearbeitet: Wird die Asche mit festem Ammoniumkarbonat behandelt, so werden die Silikate quantitativ in die entsprechenden Karbonate umgewandelt. Zu der Asche im Quarzkolben werden wenige Kubikzentimeter entsalztes Wasser und festes Ammoniumkarbonat im Überschuß gegeben; dann wird der Kolben während mehrerer Minuten geschüttelt, bis sich die an der Kolbenwand haftende Aschenkruste ablöst und mit dem Ammoniumkarbonat einen dicken Brei bildet. Der Brei wird während eines Tages stehengelassen, damit die Umsetzung quantitativ verläuft. Hierauf werden die Karbonate in destillierter Salzsäure gelöst.

Die Aschenlösung enthält neben Strontium auch Ionen, die die flammenspektrophotometrische Bestimmung von Strontium stören (s. a. *Menzel* und *Heald*, 1959). Es bestehen zwei Möglichkeiten, die Aschenlösung zu reinigen: Entweder fällt man Strontium quantitativ aus, oder die störenden Ionen werden, wenigstens zur Hauptsache, entfernt. Strontium kann quantitativ als Karbonat ausgefällt werden (s. a. *Colin* und *de Ruz de Lavison*, 1910); nach etwa ein bis zwei Tagen ist die Fällung beendet. Ein Teil des Calciums und etwas Magnesium fallen ebenfalls als Karbonat aus. Die Karbonate können abfiltriert werden, dadurch werden die hauptsächlich störenden Kalium- und Phosphationen eliminiert. Von dieser Möglichkeit wurde Gebrauch gemacht und die Aschenlösung wie folgt gereinigt:

Die Lösung wird in Pyrexkolben bis auf wenige Kubikzentimeter eingengt. Dann wird durch Zugabe von festem Ammoniumkarbonat in der Hitze Strontium als Strontiumkarbonat gefällt. Nach zwei Tagen werden die Karbonate abfiltriert und in möglichst wenig 2 *n* HCl gelöst. Durch ausgeschiedene Kieselsäure (s. a. *Scharrer* und *Heilenz*, 1959) ist die Lösung schwach trübe, sie wird daher noch filtriert. Nach der Verdünnung auf 50 ccm oder mehr (je nach dem zu erwartenden Strontiumgehalt) ist die gereinigte Aschenlösung für die Bestimmung des Strontiums bereit.

Der Restkulturlösung wurde nach starker Einengung die gleiche Reinigung zuteil.

## *Flammenspektrophotometrische Bestimmung des Strontiums*

Die empfindlichste und heute wohl am meisten verwendete Methode der Strontiumbestimmung ist die Messung der Strahlungsintensität von radioaktivem Strontium. Aus Gründen der Sicherheit wurde vorerst auf die Verwendung dieser Methode verzichtet.

Die Erscheinung der Emission von Licht bestimmter Wellenlängen durch geeignete Anregung der Atome lieferte die Grundlage für eine andere empfindliche Methode, die Spektralanalyse. Lundegardhs (1929 und 1934) quantitative Spektralanalysen waren wohl empfindlich, erforderten aber großen zeitlichen Aufwand. Einfacher und rascher in der Ausführung ist die in den letzten Jahren häufig verwendete Flammenspektrophotometrie. Diese Methode wurde gewählt, weil sie ziemlich genau und für die Bestimmung des Strontiums recht empfindlich ist. Über die Grundlagen und Anwendungen der Flammenspektrophotometrie siehe zum Beispiel die Monographien von Burriel-Marti und Ramirez-Munoz (1957) und von Herrmann (1956).

Als Flammenphotometer wurde ein Beckman-Spektrophotometer DU mit Photomultiplier und Flammenzusatz verwendet; Wasserstoff/Sauerstoff diente als Gasgemisch. Die Strontiumemission wurde bei der Wellenlänge  $460,7 \text{ m}\mu$  (empfindlichste Strontiumlinie nach den «*flame spectrograms*» von Watanabe und Kendall, 1955), der Flammenuntergrund bei  $458$  und  $462 \text{ m}\mu$  gemessen. Mit der höchsten Empfindlichkeitsstufe des Photomultipliers entsprach die Emission einer Strontiumchloridlösung mit  $10 \gamma \text{ Sr/ccm}$  bei einer Spaltbreite von  $0,02 \text{ mm}$  etwa dem Skalenwert «*70 % Durchlässigkeit*».

Hinsvark, Wittwer und Sell (1953), Hofstetter (1953), Hollander, Borgers und Alkemade (1956) und Taylor und Paige (1955) verwendeten Eichkurven zur Berechnung des Strontiumgehaltes aus den gemessenen Werten. Da die gewonnenen Aschenlösungen weder völlig frei von störenden Ionen sind (s. oben), noch deren Konzentration konstant ist, war es nicht möglich, Eichkurven aufzustellen. Aus den gleichen Gründen konnten auch keine Vergleichslösungen hergestellt werden, die alle störenden Ionen in Mengenverhältnissen entsprechend denjenigen der Aschenlösungen enthalten (Bestimmung von Strontium in Zement nach Diamond 1955). Chow und Thompson (1955) und Scharrer und Heilenz (1959) überwandern diese Schwierigkeiten, indem sie durch Zusätze bekannten Strontiumgehalts zu den Proben auf die Störungen korrigierte Eichkurven aufstellten. Aus der Emission der Probe ohne Zusatz und der Steigung der Eichkurve bestimmten sie den unbekanntem Strontiumgehalt. Eine ähnliche Methode wurde hier bereits anfangs 1959

für die Bestimmung des Strontiums verwendet<sup>1</sup>; sie erfordert mindestens 40 ccm Aschenlösung, ihre maximale Empfindlichkeit beträgt 0,2  $\gamma$  Sr/ccm, die durchschnittliche Genauigkeit etwa  $\pm 5\%$ .

### Auswertung der Versuchsergebnisse

Aus Zeitersparnis wurden Parallelkulturen gesamthaf und nicht einzeln verarbeitet; dadurch war es möglich, Strontiummengen noch einwandfrei zu bestimmen, die bei Verwendung von Einzelkulturen unter der Nachweisbarkeit gelegen wären. Um doch ein Maß für die Streuung der Mittelwerte zu erhalten, wurden gelegentlich Pflanzen einer Versuchsbedingung auch einzeln analysiert, dann die Mittelwerte und ihre Streuung  $\sigma_{\bar{x}}$  berechnet; diese diente zur statistischen Auswertung, indem die Mittelwerte nach dem *t*-Test (Fisher, 1946, S. 122 ff.) miteinander verglichen wurden. Signifikanz wurde angenommen, wenn die Irrtumswahrscheinlichkeit weniger als 5% betrug ( $P < 0,05$ ); nur signifikante Unterschiede werden in der Arbeit diskutiert.

Die Bestimmung des Restgehaltes der Kulturlösung an Strontium erlaubte die Aufstellung einer Strontiumbilanz (Beispiele s. Tabellen 2 und 3). Die Summe der in Wurzel, Sproß und Kulturlösung gefundenen Menge an Strontium sollte gleich der anfänglich in der Nährlösung ge-

Tabelle 2

*Zea Mays*: Beispiele von Strontiumbilanzen.

Die Werte in der ersten Kolonne entsprechen folgenden Anfangskonzentrationen an Strontium in der Nährlösung: 1  $\gamma$ /ccm, 10  $\gamma$ /ccm, 100  $\gamma$ /ccm (je 3 Beispiele).

mg Sr gegeben	mg Sr gefunden				Differenz	
	in Wurzel	in Sproß	in Kultur- lösung	total	mg	%
0,22	0,02	0,03	0,19	0,24	+ 0,02	+ 9,1
0,22	0,04	0,03	0,17	0,24	+ 0,02	+ 9,1
0,22	0,03	0,04	0,13	0,20	- 0,02	- 9,1
2,20	0,10	0,54	1,66	2,30	+ 0,10	+ 4,5
2,20	0,15	0,80	0,94	1,89	- 0,31	-14,1
2,20	0,18	0,46	1,39	2,03	- 0,17	- 7,7
22,0	0,98	1,97	17,1	20,1	- 1,9	- 8,6
22,0	0,43	0,71	24,9	26,0	+ 4,0	+18,2
22,0	1,09	3,82	19,7	24,6	+ 2,6	+11,8
					9,14	12,5

<sup>1</sup> Herrn cand. phil. Peter Frei möchte ich bestens dafür danken, daß er mir die von ihm hier ausgearbeitete Methode überlassen hat (Frei, 1963).

Tabelle 3

*Pisum sativum*: Beispiele von Strontiumbilanzen.

Die Werte in der ersten Kolonne entsprechen folgenden Anfangskonzentrationen an Strontium in der Nährlösung: 10  $\gamma$ /ccm, 100  $\gamma$ /ccm (je 3 Beispiele).

mg Sr gegeben	mg Sr gefunden				Differenz	
	in Wurzel	in Sproß	in Kultur- lösung	total	mg	%
2,20	0,01	0,05	2,31	2,37	+ 0,17	+ 7,7
2,20	0,0	0,01	2,17	2,18	— 0,02	— 0,9
6,60 <sup>1</sup>	0,16	0,66	5,51	6,33	— 0,27	— 4,1
22,0	0,0	0,10	19,7	19,8	— 2,2	—10,0
22,0	0,01	0,49	20,0	20,5	— 1,5	— 6,8
66,0 <sup>1</sup>	0,84	7,60	49,8	58,2	— 7,8	—11,8
<sup>1</sup> 750 cc Nährlösung, statt 250 cc					11,96	9,9

botenen sein. Diesem Ziel kamen die Bestimmungen bei Mais hier im Mittel bis auf 12,5% nahe (Tabelle 2), bei *Pisum* bis auf 9,9% (Tabelle 3).

### Experimentelle Ergebnisse

#### *Analyse von Maiskaryopsen und Pisum-Samen auf autochthones Strontium*

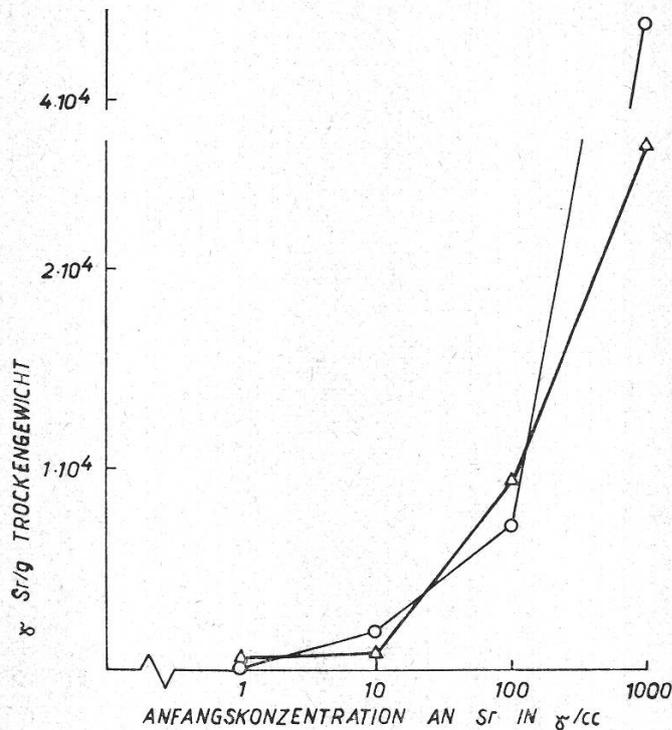
Über das Vorkommen von autochthonem Strontium in Samen und Früchten ist fast nichts bekannt. Lediglich Ramage (1936) wies Strontium in Äpfeln und *Ficus*-Früchten nach. Die Ursache der mangelnden Angaben mag darin liegen, daß Spuren von Strontium in Pflanzenmaterial quantitativ kaum mehr erfaßbar sind.

Je 2 Portionen von 25 Maiskörnern (etwa 8,5 g) und je 3 Portionen von 50 Erbsensamen (etwa 11,4 g) wurden verascht und auf den Gehalt an Strontium untersucht. Mit der oben (S. 154) angegebenen Methode wurde in keinem Fall Strontium nachgewiesen. Falls die Maiskörner und Erbsensamen doch Strontium enthalten haben, muß der Gehalt unter der Grenze der Nachweisbarkeit liegen, das heißt für Mais  $< 0,5 \gamma$  pro Korn, für *Pisum*  $< 0,25 \gamma$  pro Samen.

In den folgenden Versuchen werden infolgedessen vielleicht doch vorhandene geringe Spuren an autochthonem Strontium in den Maiskaryopsen bzw. *Pisum*-Samen vernachlässigt; es wird also angenommen, daß alles in den Versuchspflanzen nachgewiesene Strontium aus der Nährlösung stammt.

## Einfluß der Strontiumkonzentration auf die Strontiumaufnahme

Die Strontiumaufnahme durch Pflanzen wird durch die in der Nährlösung vorhandene Strontiumkonzentration wesentlich beeinflusst. Martin (1954), Rediske und Selders (1953), Romney et al. (1956), Russel und Squire (1958) untersuchten an verschiedenen höheren Pflanzen, Collander (1941) sogar an 20 verschiedenen Species die Strontiumaufnahme bei niedrigen bis mittleren Konzentrationen und zeigten übereinstimmend, daß Strontium im untersuchten Bereich proportional der äußeren Konzentration aufgenommen wird. In den folgenden Versuchen wurde der Konzentrationsbereich bis zur toxischen Grenzkonzentration ausgedehnt. Mais wurde während dreier Wochen in Nährlösung mit verschiedenen Strontiumzusätzen kultiviert und der Strontiumgehalt von



Figur 2

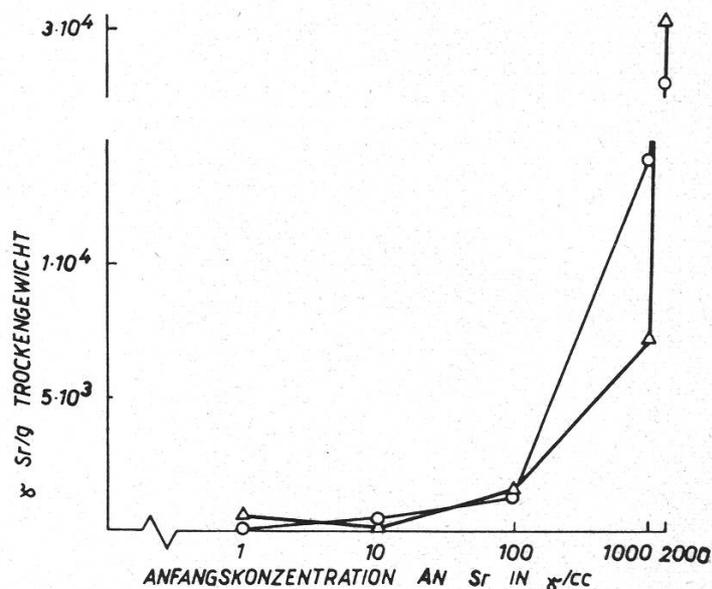
*Zea Mays*: Einfluß der Strontiumkonzentration auf die Strontiumaufnahme.

Alter der Keimpflanzen bei Versuchsbeginn:	4 Tage
Nährlösung pro Versuchskolben:	250 ccm
Versuchsdauer:	21 Tage
Entwicklungszustand:	4-6 voll entwickelte Blätter
Anfangs-pH:	4,4
End-pH:	7,0-7,4
Temperaturmittel:	ca. 22 °C
Tageslänge:	14 ½ Stunden
Mittelwerte von 8-9 Pflanzen	

- — ○ Relativer Strontiumgehalt des Sprosses  
 △ — △ Relativer Strontiumgehalt der Wurzel

Wurzel und Sproß bestimmt. Da die Konzentration der Nährlösung an Strontium das Trockengewicht beeinflusst (Tab. 1), wurde als Maß für die Aufnahme nicht der absolute Gehalt, sondern dieser, bezogen auf das Trockengewicht der Pflanze, gewählt (relativer Strontiumgehalt). Aus Figur 2 geht hervor, daß der relative Strontiumgehalt von Wurzel und Sproß bis zur toxischen Grenzkonzentration (1000  $\gamma$ /ccm) zunimmt; Parallelversuche an *Pisum* führten zu ähnlichen Ergebnissen, wobei als Grenzkonzentration 2000  $\gamma$ /ccm auftritt (Figur 3). Im toxischen Bereich der Strontiumkonzentrationen zeigen beide Versuchspflanzen Schädigungen, dementsprechend sinkt die Strontiumaufnahme.

Bezieht man die Menge des aufgenommenen Strontiums auf die Menge des anfänglich in der Nährlösung gebotenen (Figur 4), so erkennt man, wie zu erwarten ist, daß die Strontiumaufnahme bei den niedrigsten untersuchten Konzentrationen am größten ist (bei Mais bis 25–30%) und



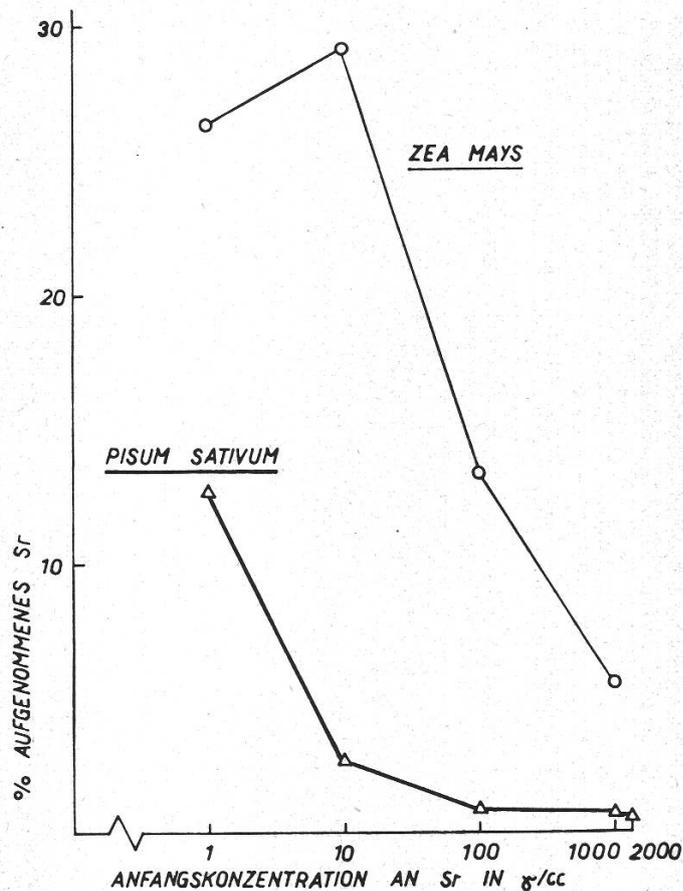
Figur 3

*Pisum sativum*: Einfluß der Strontiumkonzentration auf die Strontiumaufnahme.

Alter der Keimpflanzen bei Versuchsbeginn:	6 Tage
Nährlösung pro Versuchskolben:	250 ccm
Versuchsdauer:	21 Tage
Entwicklungszustand:	5–7 voll entwickelte Blätter
Anfangs-pH:	4,6
End-pH:	5,0–5,7
Temperaturmittel:	ca. 21 °C
Tageslänge:	14 Stunden
Mittelwerte von 9–10 Pflanzen	

○—○ Relativer Strontiumgehalt des Sprosses  
 △—△ Relativer Strontiumgehalt der Wurzel

bei den höchsten bis unter 1% absinkt. Dieses Ergebnis stimmt überein mit Beobachtungen von Klechkovsky (1957) für die Strontiumaufnahme durch *Avena* und *Triticum*.



Figur 4

*Zea Mays* und *Pisum sativum*: Einfluß der Strontiumkonzentration auf die prozentuale Strontiumaufnahme. Kulturbedingungen wie in Figur 2 bzw. 3.

#### *Bedeutung der Entwicklungsstadien für die Strontiumaufnahme*

Der zeitliche Verlauf der Strontiumaufnahme wurde während der vegetativen Entwicklung von Mais geprüft, wobei der Calciumgehalt der Nährlösung niedrig war, damit es möglich wurde, die Strontiumaufnahme schon bei jungen Keimpflanzen zu untersuchen.

Mais wurde in Nährlösung mit herabgesetztem Calciumgehalt (10  $\gamma$  pro ccm statt normal 57  $\gamma$ /ccm) kultiviert und ein Teil des Versuchs jeweils nach der vollen Entwicklung eines Blattes (Blatt 1–5) abgebrochen; der letzte Abbruch geschah nach der Bildung des 5. Blattes, nach einer Versuchsdauer von 41 Tagen. Der zeitliche Verlauf von Wachstum (Trockengewicht) und Strontiumaufnahme (absoluter und relativer

Strontiumgehalt) ist in Tabelle 4 dargestellt. Unter den gewählten Bedingungen entwickeln sich Wurzel und Sproß regelmäßig.

Tabelle 4

*Zea Mays*: Strontiumaufnahme während der vegetativen Entwicklung.

Alter der Keimpflanzen bei Versuchsbeginn: 4 Tage  
 Nährlösung pro Versuchskolben: 250 ccm  
 Anfangskonzentration an Strontium: 1  $\gamma$ /ccm, 10  $\gamma$ /ccm, 100  $\gamma$ /ccm  
 Anfangskonzentration an Calcium: 10  $\gamma$ /ccm (herabgesetzt!)  
 Temperaturmittel: ca. 21 °C  
 Tageslänge: 14 Stunden  
 Mittelwerte von 8–10 Pflanzen

Sr-Konzentration	Entwicklungs- zustand: Anzahl voll entwickel- ter Blätter (Alter in Tagen)		Absoluter Sr-Gehalt in $\gamma$		Trockengewicht in g		Relativer Sr-Gehalt in $\gamma$ /g	
	Blatt- zahl	Alter	Wurzel	Sproß	Wurzel	Sproß	Wurzel	Sproß
1 $\gamma$ /ccm	1	9	1	4	0,023	0,048	43	90
	2	12	2	46	0,030	0,064	67	719
	3	20	27	51	0,052	0,110	519	464
	4	30	27	47	0,066	0,127	409	370
	5	41	35	37	0,087	0,205	402	180
10 $\gamma$ /ccm	1	9	20	54	0,023	0,046	869	1170
	3	20	38	147	0,028	0,069	1360	2130
	4	30	154	516	0,059	0,116	2610	4450
	5	41	148	797	0,071	0,214	2080	3730
100 $\gamma$ /ccm	1	9	74	195	0,018	0,035	4110	5570
	2	12	134	441	0,023	0,052	5820	8490
	3	20	354	947	0,038	0,086	9310	11000
	4	30	453	2640	0,052	0,110	8710	24000
	5	41	1090	3820	0,072	0,191	15100	20000

Bei der Konzentration 1  $\gamma$  Sr/ccm nimmt der absolute Strontiumgehalt der Wurzel bis etwa zur vollen Entwicklung des 3. Blattes zu (nach etwa 20 Tagen), der des Sprosses bis etwa zur vollen Entwicklung des 2. Blattes (nach etwa 12 Tagen), dann ändert er sich nicht mehr signifikant; der relative Strontiumgehalt nimmt sogar im Sproß bei der älteren Pflanze wieder ab. Die Werte sind jedoch teilweise bereits an der Grenze der Bestimmbarkeit; die Streuung der Werte ist dementsprechend groß.

Bei 10 und 100  $\gamma$  Sr/ccm nehmen absoluter und relativer Strontiumgehalt bis zur vollen Entwicklung des 4. bis 5. Blattes zu (nach etwa 30 bis 41 Tagen).

Aus den Resultaten geht also hervor, daß steigende Strontiumkonzentration in der Nährlösung eine zeitlich längere Strontiumaufnahme durch junge Maispflanzen bewirkt. Ferner geht aus Tabelle 4 auch eindeutig hervor, daß mit steigender Strontiumkonzentration der Strontiumgehalt des Sprosses erheblich größer wird als der der Wurzel.

Selders (1951) fand, daß Tomatenpflanzen den größten Strontiumgehalt in Blättern und Stengeln nach etwa 20 Tagen aufwiesen. Johns (1955) stellte fest, daß der relative Strontiumgehalt von Mais während 7 Tagen anstieg, längere Versuche führte er nicht durch. An *Phaseolus vulgaris* konnten Rediske und Selders (1953) nachweisen, daß die Dauer der Strontiumaufnahme von der Konzentration an Strontium in der Nährlösung abhängt. Die eigenen Versuchsergebnisse (Tabelle 4) bestätigen dies. Die Entwicklungsstadien scheinen also bei jungen Pflanzen keine allzu große Bedeutung für die Strontiumaufnahme zu haben.

Ein entsprechender Versuch wurde an *Pisum* in Nährlösung mit 30  $\gamma$  Ca/ccm statt normal 171  $\gamma$ /ccm durchgeführt; nach 22 Tagen hatten die Pflanzen das 5. Blatt gebildet. *Pisum* nimmt während der ersten Zeit der vegetativen Entwicklung sehr wenig Strontium auf; der Strontiumgehalt konnte daher nur bei der Strontiumkonzentration 100  $\gamma$ /ccm und für die ganze Pflanze gesamthaft bestimmt werden. Tabelle 5 zeigt, daß der absolute und relative Strontiumgehalt von *Pisum* bis etwa zur vollen Entwicklung des 4. Blattes zunehmen (nach etwa 19 Tagen), dann ändern sie sich nicht mehr signifikant.

Tabelle 5

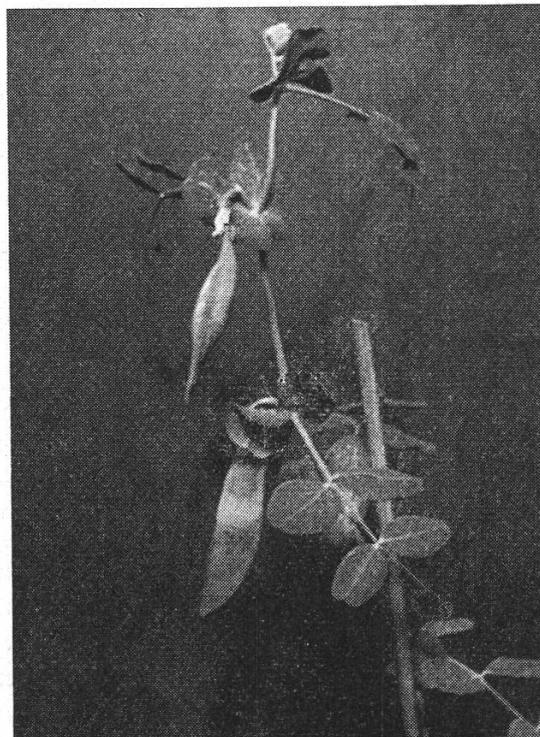
*Pisum sativum*: Strontiumaufnahme während der vegetativen Entwicklung.

Alter der Keimpflanzen bei Versuchsbeginn:	5 Tage
Nährlösung pro Versuchskolben:	250 ccm
Anfangskonzentration an Strontium:	100 $\gamma$ /ccm
Anfangskonzentration an Calcium:	30 $\gamma$ /ccm (herabgesetzt!)
Temperaturmittel:	ca. 22 °C
Tageslänge:	14 Stunden
Mittelwerte von 9–10 Pflanzen	

Entwicklungs- zustand: Anzahl voll entwickelter Blätter (Alter in Tagen)		Absoluter Sr-Gehalt in $\gamma$	Trockengewicht in g	Relativer Sr-Gehalt in $\gamma$ /g
Blattzahl	Alter			
1	12	102	0,067	1520
2	14	208	0,081	2570
4	19	577	0,119	4850
5	22	511	0,123	4160

An *Pisum* wurde die Strontiumaufnahme auch während der reproduktiven Entwicklung untersucht. Da Walsh (1945) eine Hemmung oder mindestens eine Verzögerung der Kornbildung bei Getreidearten durch mittlere Strontiumzusätze feststellte (an Bodenkulturen), wurden die Versuchspflanzen unter Bedingungen kultiviert, die in Nährlösung ein Wachstum bis zur Samenbildung sichern (siehe Angaben in Tabelle 6).

Unter den gewählten Bedingungen blühten nach 61 Tagen alle Pflanzen, nach 74 Tagen hatten sie Früchte mit Samen gebildet. Figur 5 zeigt Teile einer Erbsenpflanze mit Hülsen, die reife Samen enthielten. Bei Blühbeginn, zur Vollblüte und nach der Fruchtbildung wurden Trockengewicht und Strontiumaufnahme (absoluter und relativer Strontiumgehalt) von Wurzel und Sproß bestimmt. Da wegen der langen Versuchsdauer größere pH-Änderungen der Kulturlösung zu erwarten waren, wurde auch das End-pH der Kulturlösung bei jedem Versuchsabbruch gemessen (Tabelle 6). Vom Beginn der Blütenbildung an nimmt der absolute Strontiumgehalt erneut zu, vor allem in der Wurzel. Da das Trockengewicht der Wurzel nicht mehr stark zunimmt, steigt auch ihr relativer Strontiumgehalt; im Gegensatz dazu steigt das Trockengewicht des Sprosses noch sehr stark, sein relativer Strontiumgehalt ändert sich daher nicht mehr signifikant. Bei *Phaseolus* fanden Romney, Rhoads und Larson (1954) noch einen schwachen Anstieg im relativen Strontiumgehalt des Sprosses während der reproduktiven Entwicklung.



Figur 5.

*Pisum sativum*: Reife Pflanze in Knop-Nährlösung mit einem Strontiumzusatz von 100  $\gamma$ /ccm (72 Tage alt).

Bis zum Blühbeginn nimmt *Pisum* etwa einen Drittel (bei 10  $\gamma$  Sr/ccm) bis knapp die Hälfte (bei 100  $\gamma$  Sr/ccm) der total absorbierten Menge an Strontium auf. Zum Vergleich seien Versuche von Ito und Hiroshi (1959) erwähnt, die zeigen, daß Reis (Bodenkulturen) und Weizen (Kulturen in Nährlösung) über 90 % des total absorbierten Strontiums vor der Bildung der Ähren aufnehmen.

Tabelle 6

*Pisum sativum*: Strontiumaufnahme während der reproduktiven Entwicklung.

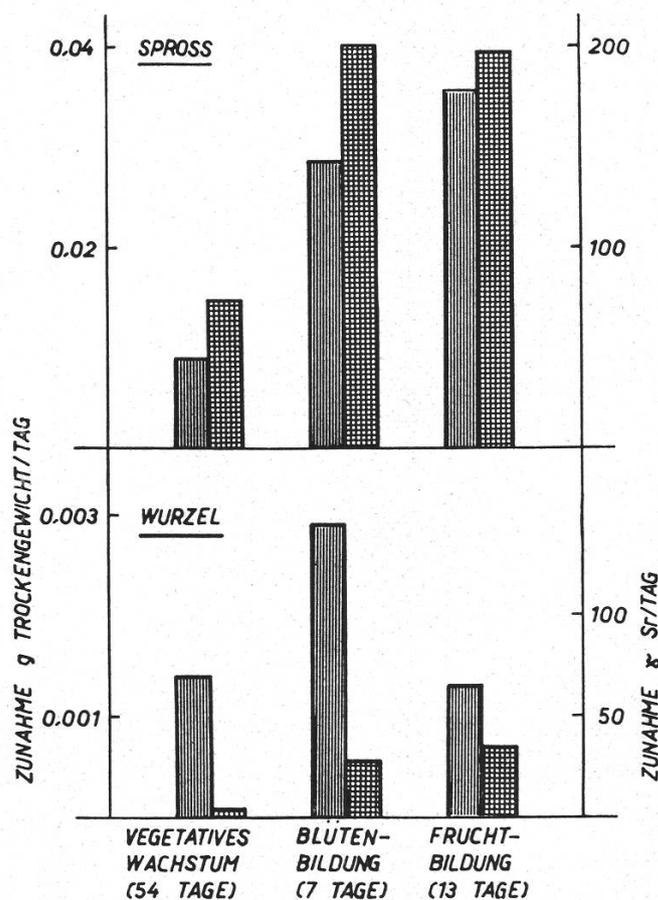
Alter der Keimpflanzen bei Versuchsbeginn:	5 Tage
Nährlösung pro Versuchskolben:	750 ccm
Anfangskonzentration an Strontium:	10 $\gamma$ /ccm, 100 $\gamma$ /ccm
Anfangskonzentration an Calcium:	171 $\gamma$ /ccm (normal)
Anfangs-pH:	4,6
Kein Nährlösungswechsel; zur Vollblüte Zugabe von 250 ccm entsalztem Wasser pro Versuchskolben	
Temperaturmittel:	ca. 20 °C
Tageslänge:	16 Stunden (Langtag)
Mittelwerte von 10 Pflanzen	

Sr-Konzentration	Entwicklungs-zustand (Alter in Tagen)	End-pH	Absoluter Sr-Gehalt in $\gamma$		Trockengewicht in g		Relativer Sr-Gehalt in $\gamma$ /g	
			Wurzel	Sproß	Wurzel	Sproß	Wurzel	Sproß
10 $\gamma$ /ccm	Bei Blühbeginn (54)	6,5	10	490	0,075	0,408	133	1200
	Zur Vollblüte (61)	6,3	159	659	0,121	0,687	1310	959
	Nach der Fruchtbildung (74)	6,7	435	1107	0,145	1,218	3000	909
100 $\gamma$ /ccm	Bei Blühbeginn (54)	6,0	192	3630	0,081	0,462	2370	7850
	Zur Vollblüte (61)	6,0	390	5040	0,101	0,662	3860	7610
	Nach der Fruchtbildung (74)	6,3	840	7610	0,118	1,125	7120	6760

Aus Tabelle 6 geht auch hervor, daß das pH der Kulturlösung von pH 4,6 bei Versuchsbeginn bis zum Ende der vegetativen Entwicklung auf pH 6,0–6,7 ansteigt und sich dann nicht mehr signifikant ändert. Da nach Johns (1955), Rediske und Selders (1953) und Romney et al. (1959b) das Optimum der Wasserstoffionenkonzentration für die Strontiumaufnahme bei pH 6–7 liegt (an verschiedenen mono- und dikotylen Kulturpflanzen untersucht), könnte die hohe Strontiumaufnahme durch *Pisum* während der reproduktiven Entwicklung mit der optimalen Wasserstoffionenkonzentration zusammenhängen.

Um einen Vergleich zwischen Wachstumsgeschwindigkeit und Geschwindigkeit der Strontiumaufnahme ziehen zu können, wurde die Zu-

nahme von Trockengewicht und absolutem Strontiumgehalt während der vegetativen Entwicklung, der Blüten- und der Fruchtbildung von *Pisum* jeweils pro 1 Tag berechnet. Die Resultate für die Strontiumkonzentration 100  $\gamma$ /ccm sind in Figur 6 dargestellt: Beim Sproß sind Wachstumsgeschwindigkeit und Geschwindigkeit der Strontiumaufnahme während der reproduktiven Entwicklung erheblich größer als in der vegetativen Phase; während der Blüten- und der Fruchtbildung bleibt die Geschwindigkeit der Strontiumaufnahme gleich. Die Verhältnisse in der Wurzel liegen grundsätzlich anders: Das schnellste Wachstum zeigt die Wurzel in der Zeit der Blütenbildung, während der Fruchtbildung ist es wieder erheblich langsamer; die Geschwindigkeit der Strontiumaufnahme ist jedoch während der Blüten- und der Fruchtbildung nicht signifikant verschieden, größer aber als während der vegetativen Entwicklung. Gegenüber der vegetativen Phase zeigt also die Wurzel während der Fruchtbildung eine größere Geschwindigkeit der Strontiumaufnahme und etwa



Figur 6

*Pisum sativum*: Wachstum und Strontiumaufnahme. Trockengewicht von Wurzel und Sproß bei Versuchsbeginn: 0,014 g. Anfangskonzentration an Strontium: 100  $\gamma$ /ccm. Mittlere Zunahme von Trockengewicht (senkrecht liniert) und absolutem Strontiumgehalt (kariert) pro 1 Tag. Kulturbedingungen wie in Tabelle 6.

gleiche Wachstumsgeschwindigkeit, der Sproß auch größere Wachstumsgeschwindigkeit. Ähnliche Resultate ergaben sich bei einer Anfangskonzentration von 10  $\gamma$ /ccm Nährlösung.

In einer Arbeit von Neel et al. (1953) wurde eine genaue Parallelität zwischen absolutem Strontiumgehalt und Trockengewicht von *Hordeum* festgestellt. Da diese Autoren nicht nach Wurzel und Sproß differenzierten, können ihre Resultate nicht ohne weiteres mit denjenigen der vorliegenden Arbeit verglichen werden.

### *Verteilung des aufgenommenen Strontiums auf die verschiedenen Organe*

Bei Mais- und Erbsenpflanzen, die sich in der vegetativen Entwicklungsphase befinden, treten Unterschiede im absoluten Strontiumgehalt zwischen Wurzel und Sproß auf. Schon aus Tabelle 4 geht hervor, daß in Mais mit steigender Strontiumkonzentration in der Nährlösung die Verteilung des Strontiums zugunsten des Sprosses zunimmt; aber auch für *Pisum* (Tabelle 7) zeigt sich das gleiche Ergebnis (s. a. Colin und de Rufz de Lavison, 1910).

Tabelle 7

*Zea Mays* und *Pisum sativum*: Verteilung des aufgenommenen Strontiums auf Wurzel und Sproß.

	<i>Zea Mays</i>	<i>Pisum sativum</i>
Alter der Keimpflanzen bei Versuchsbeginn:	4 Tage	6 Tage
Nährlösung pro Versuchskolben:	250 ccm	250 ccm
Versuchsdauer:	21 Tage	21 Tage
Entwicklungszustand (Anzahl voll entwickelter Blätter):	4-6	5-7
Temperaturmittel:	ca. 22 °C	ca. 21 °C
Tageslänge:	14 ½ Stunden	14 Stunden
Mittelwerte von:	8-9 Pflanzen	9-10 Pflanzen

Anfangskonzentration an Strontium $\gamma$ /ccm	Absoluter Sr-Gehalt in $\gamma$			
	<i>Zea Mays</i>		<i>Pisum sativum</i>	
	Wurzel	Sproß	Wurzel	Sproß
1	24	34	18	10
10	99	534	10	51
100	977	1965	52	171

Es interessiert aber auch die Verteilung des aufgenommenen Strontiums auf die verschiedenen Organe während der reproduktiven Entwicklung. In Tabelle 8 sind die Verhältnisse bei *Pisum* dargestellt. Auffallend ist, daß die Reproduktionsorgane wesentlich weniger Strontium enthalten

Tabelle 8

*Pisum sativum*: Verteilung des aufgenommenen Strontiums auf die verschiedenen Organe.

Alter der Keimpflanzen bei Versuchsbeginn: 5 Tage  
 Nährlösung pro Versuchskolben: 750 ccm  
 Kein Nährlösungswechsel; zur Vollblüte Zugabe von 250 ccm entsalztem Wasser pro Versuchskolben  
 Temperaturmittel: ca. 20 °C  
 Tageslänge: 16 Stunden (Langtag)  
 Mittelwerte von 10 Pflanzen

A. Anfangskonzentration an Strontium: 10  $\mu$ /ccm

Entwicklungs- zustand (Alter in Tagen)	Organ	Absoluter Sr-Gehalt		Trockengewicht		Relativer Sr-Gehalt in $\mu$ /g
		in $\mu$	in %	in g	in %	
Bei Blüh- beginn (54)	Wurzel	10	2,0	0,075	15,5	133
	Stengel	198	39,6	0,135	28,0	1470
	Blätter	292	58,4	0,273	56,5	1070
	pro Pflanze	500	(= 100 %)	0,483	(= 100 %)	1040
Zur Voll- blüte (61)	Wurzel	159	19,5	0,121	15,0	1310
	Stengel	197	24,1	0,227	28,1	867
	Blätter	458	55,9	0,439	54,3	1040
	Blüten	4	0,5	0,021	2,6	191
	pro Pflanze	818	(= 100 %)	0,808	(= 100 %)	1010
Nach der Fruchtbildung (74)	Wurzel	435	28,2	0,145	10,6	3000
	Stengel	377	24,4	0,336	24,6	1120
	Blätter	589	38,2	0,528	38,8	1120
	Hülsen	137	8,9	0,260	19,1	526
	Samen	4	0,3	0,094	6,9	43
	pro Pflanze	1542	(= 100 %)	1,363	(= 100 %)	1130

als die vegetativen (absolut und auf Trockengewicht bezogen): Die Blüten weisen nur 0,5 % des Gesamt-Strontiumgehalts auf, und in der fruchtenden Erbsenpflanze sind rund 90 % des Gesamt-Strontiumgehalts in den vegetativen Pflanzenorganen zu finden; diese 90 % verteilen sich je nach der Strontiumkonzentration in der Nährlösung verschieden auf Wurzel, Stengel und Blätter. Der Rest ist fast vollständig in den Hülsen abgelagert (9–11 %, je nach Strontiumkonzentration), nur 0,2–0,3 % sind in den Samen. Zu diesem wesentlichen Ergebnis, daß das aufgenommene Strontium nur zu einem geringen Teil in den Reproduktionsorganen abgelagert ist (auch bei verschiedenen Pflanzen), führten auch die Arbeiten von Jacobson und Overstreet (1948), Klechkovsky (1957), Klech-

B. Anfangskonzentration an Strontium: 100  $\gamma$ /ccm

Entwicklungs- zustand (Alter in Tagen)	Organ	Absoluter Sr-Gehalt		Trockengewicht		Relativer Sr-Gehalt in $\gamma$ /g
		in $\gamma$	in %	in g	in %	
Bei Blüh- beginn (54)	Wurzel	192	5,0	0,081	14,9	2370
	Stengel	1090	28,5	0,153	28,2	7120
	Blätter	2540	66,5	0,309	56,9	8210
	pro Pflanze	3822	(= 100 %)	0,543	(= 100 %)	7040
Zur Voll- blüte (61)	Wurzel	390	7,2	0,101	13,2	3860
	Stengel	1890	34,8	0,217	28,4	8710
	Blätter	3120	57,5	0,420	55,1	7430
	Blüten	29	0,5	0,025	3,3	1160
	pro Pflanze	5429	(= 100 %)	0,763	(= 100 %)	5810
Nach der Fruchtbildung (74)	Wurzel	840	10,0	0,118	9,5	7120
	Stengel	2930	34,7	0,295	23,7	9930
	Blätter	3740	44,2	0,467	37,6	8010
	Hülsen	922	10,9	0,261	21,0	3540
	Samen	17	0,2	0,102	8,2	167
	pro Pflanze	8449	(= 100 %)	1,243	(= 100 %)	6790

kovsky und Guliakin (1958), Ito und Hiroshi (1959), Lee (1959), Martin, Newbould und Russell (1958), Neel et al. (1953), Russell und Squire (1958) und der Forschergruppen um Rediske (1953, 1955), Romney (1954, 1956, 1957) und Selders (1953, 1956). Nur über den prozentualen Strontiumgehalt der Wurzel liegen einander widersprechende Ergebnisse vor. Vermutlich hängt dies mit der hier gefundenen starken Zunahme des relativen Strontiumgehalts der Wurzel in der fertilen Phase zusammen.

Aus Tabelle 8 geht weiter hervor, daß sich der relative Strontiumgehalt der Blätter während der fertilen Phase nicht signifikant ändert. Daraus kann geschlossen werden, daß kein Strontium aus den Blättern nach andern Organen zurückwandert (s.a. Bukovac und Wittwer, 1957; Comar et al., 1957; Ito et al., 1961; Rediske und Selders, 1953; Russell und Squire, 1958; Sudia und Linck, 1961). Dies mag zum Teil damit zusammenhängen, daß Strontium im Laufe der Entwicklung als Strontiumsulfat ausfällt (von Schilling, 1961, in Blättern von *Pisum* nachgewiesen).

Allgemein findet eine Neuverteilung der Mineralstoffe in der Pflanze während der reproduktiven Entwicklung statt (Stenlid, 1958); die vor-

liegenden Resultate bestätigen dies auch für Strontium. In der fruchtenden Erbsenpflanze wird das aufgenommene Strontium zu einem größeren Teil in den Wurzeln zurückgehalten als während der vegetativen Entwicklung. Ein geringer Teil des in den Sproß transportierten Strontiums wandert in die Reproduktionsorgane, während der relative Strontiumgehalt der Blätter unverändert bleibt.

*Unterschiede in der Strontiumaufnahme zwischen Zea Mays und Pisum sativum*

Untersuchungen von Collander (1937 und 1941) an verschiedensten Kulturpflanzen ergaben, daß dikotyle Pflanzen (Ausnahme: *Vicia sativa*) mehr Strontium pro Trockengewicht aufnehmen als Gramineen. Da der Calciumgehalt von Leguminosen im allgemeinen größer ist als der von Gramineen (Baumeister, 1958), wurde verschiedentlich versucht, diesen Unterschied auch für Strontium nachzuweisen, obwohl der Strontiumgehalt von Art zu Art stark variiert (Bowen und Dymond, 1955; Drescher-Kaden und Schwanitz, 1956; Middleton, 1958). Vose und Koontz (1959) untersuchten 15 verschiedene Kulturpflanzen (Gramineen und Leguminosen) auf ihren relativen Strontiumgehalt und fanden, daß die Leguminosen drei- bis sechsmal mehr Strontium pro Trockengewicht aufgenommen hatten als die Gräser.

Tabelle 9

*Zea Mays* und *Pisum sativum*: Unterschiede im relativen Strontiumgehalt.

	<i>Zea Mays</i>	<i>Pisum sativum</i>
Alter der Keimpflanzen bei Versuchsbeginn:	4 Tage	6 Tage
Nährlösung pro Versuchskolben:	250 ccm	250 ccm
Versuchsdauer:	21 Tage	21 Tage
Entwicklungszustand (Anzahl voll entwickelter Blätter):	4-6	5-7
Temperaturmittel:	ca. 22 °C	ca. 21 °C
Tageslänge:	14 ½ Stunden	14 Stunden
Mittelwerte von:	8-9 Pflanzen	9-10 Pflanzen

Anfangskonzentration an Strontium $\gamma$ /ccm	Relativer Sr-Gehalt in $\gamma$ /g			
	Wurzel		Sproß	
	<i>Zea Mays</i>	<i>Pisum sativum</i>	<i>Zea Mays</i>	<i>Pisum sativum</i>
1	270	490	150	80
10	930	310	1870	480
100	9500	1460	7280	1390
1000	26000	7190	43800	14500

Eigene Versuche ergaben ein grundsätzlich anderes Bild (Tabelle 9): Bei einem Strontiumzusatz von 1  $\gamma$ /ccm Nährlösung ist kein klarer Unterschied im relativen Strontiumgehalt zwischen Mais und *Pisum* erkennbar; wird der Strontiumgehalt der Nährlösung erhöht, so ist der relative Strontiumgehalt von Mais durchschnittlich etwa dreimal höher als der von *Pisum*. Die für die Kultivierung von *Pisum* verwendete Knop-Nährlösung ist wohl rund dreimal konzentrierter als die Nährlösung für Mais; der frappante Unterschied zu den Ergebnissen von Vose und Koontz (1959) dürfte aber damit nicht erklärt sein. Die Ursache dieses Unterschiedes mag zum Teil darin liegen, daß die eigenen Resultate an jungen Pflanzen gewonnen wurden, während Vose und Koontz (1959) den Strontiumgehalt blühender Pflanzen bestimmten. Wie schon aus Tabelle 6 hervorgegangen ist, nimmt *Pisum* während der reproduktiven Entwicklung viel Strontium auf. Offenbar spielen die genauen Versuchsbedingungen eine große Rolle; Resultate, die nur mit einer bestimmten Versuchsanordnung gewonnen wurden, dürfen daher nicht verallgemeinert werden.

#### *Einfluß von Calciumionen auf die Strontiumaufnahme*

Der Calciumgehalt des Nährmediums beeinflußt die Aufnahme von Strontium durch Pflanzen. Die Art der Beeinflussung hängt wesentlich davon ab, ob als Kulturmedien Nährlösungen oder Böden verwendet werden. Nur der Gehalt an austauschbarem Calcium kann die Strontiumaufnahme aus Böden beeinflussen (Menzel, 1954; Romney, Rhoads und Larson, 1954; Romney et al., 1957). Diese Beeinflussung ist je nach dem Charakter des Bodens verschieden. Für genauere Angaben siehe die Arbeiten von Cline und Hungate (1956), Comar, Russell und Wasserman (1957), Fowler und Christenson (1959), Martin (1954), McLean et al. (1960), Milbourn, Ellis und Russell (1959), Romney et al. (1959a, 1959b), Russell (1958), Russell und Milbourn (1957).

In Versuchen mit Nährlösungen ist der Einfluß des Calciums einheitlich: Hohe Calciumkonzentrationen hemmen die Strontiumaufnahme (Collander, 1941; Ehrler, Romney und Hamner, 1955; Klechkovsky, 1957; Romney et al., 1956, 1959b; Russell und Squire, 1958). Collander (1941) konnte zudem nachweisen, daß Strontium in ähnlichen Mengen wie Calcium aufgenommen wird. Daraus schloß er, daß die Strontiumaufnahme durch Pflanzen von der Strontium- und Calciumkonzentration zusammen abhängt. Während aber Menzel und Heald (1955) fanden, daß Strontium schneller als Calcium aufgenommen wird, kamen Russell und Squire (1958) zur gleichen Annahme wie Collander (1941).

Mais wurde in Nährlösung mit variiertem Calciumgehalt kultiviert: Verwendet wurden je eine niedrige und eine hohe Calciumkonzentration, bei denen die Versuchspflanzen noch keine Entwicklungsstörungen zeigten (10 und 500  $\gamma$  Ca/ccm statt normal 57  $\gamma$ /ccm). Die Ergebnisse der Strontiumbestimmungen sind in Tabelle 10 zusammengestellt. Bei der Strontiumkonzentration 1  $\gamma$ /ccm sind die Resultate unter Berücksichtigung der Streuung nicht einheitlich: Für die Wurzel ist keine eindeutige Aussage möglich; die Erhöhung der Calciumkonzentration der Nährlösung von 10 auf 500  $\gamma$ /ccm bewirkt aber beim Sproß eine mehr oder weniger starke Herabsetzung des Strontiumgehalts, wenn die Pflanzen zwei und mehr Blätter gebildet haben.

Bei 10 und 100  $\gamma$  Sr/ccm zeigt auch die Wurzel fast durchwegs einen erniedrigten Strontiumgehalt, wenn die Calciumkonzentration der Nähr-

Tabelle 10

*Zea Mays*: Einfluß von Calciumionen auf die Strontiumaufnahme.

Alter der Keimpflanzen bei Versuchsbeginn:	4 Tage
Nährlösung pro Versuchskolben:	250 ccm
Anfangskonzentration an Strontium:	1 $\gamma$ /ccm, 10 $\gamma$ /ccm, 100 $\gamma$ /ccm
Temperaturmittel:	ca. 21 °C
Tageslänge:	14 Stunden
Mittelwerte von 8–10 Pflanzen	

Sr-Konzentration	Entwicklungs- zustand: Anzahl voll ent- wickelter Blätter (Alter in Tagen)		Relativer Sr-Gehalt in $\gamma$ /g			
	Blattzahl	Alter	Wurzel		Sproß	
			10 $\gamma$ Ca/ccm	500 $\gamma$ Ca/ccm	10 $\gamma$ Ca/ccm	500 $\gamma$ Ca/ccm
1 $\gamma$ /ccm	1	9	43	111	90	111
	2	12	67	154	719	53
	3	20	519	310	464	76
	4	30	409	200	370	57
	5	41	402	440	180	102
10 $\gamma$ /ccm	1	9	869	833	1170	316
	3	20	1360	815	2130	286
	4	30	2610	829	4450	261
	5	41	2080	935	3750	492
100 $\gamma$ /ccm	1	9	4110	3050	5570	1880
	2	12	—	—	8490	1850
	3	20	9310	4000	11000	2940
	4	30	8710	3920	24000	2740
	5	41	15100	5740	20000	2940

lösung stark heraufgesetzt wird; der Strontiumgehalt sinkt hier auf die Hälfte bis einen Drittel bei Pflanzen mit drei und mehr voll entwickelten Blättern. Im Sproß ist die Reduktion des Strontiumgehalts sogar noch wesentlich höher, auch bei Pflanzen mit nur einem voll entwickelten Blatt.

Erhöhung der Calciumkonzentration der Nährlösung von 10 auf 500  $\gamma$ /ccm bewirkt also nur dann in der ganzen Maispflanze eine starke Herabsetzung des Strontiumgehalts, wenn die Strontiumkonzentration in der Nährlösung 10  $\gamma$ /ccm oder mehr beträgt ( $1 \cdot 10^{-4} \mu$  C/ccm für die Aufnahme von radioaktivem Strontium durch Pflanzen bei einer Aktivität des zugesetzten Strontiums von 10  $\mu$  C/g Sr).

Wie schon Collander (1941) und Russell und Squire (1958) gefunden haben, hängt die Strontiumaufnahme durch Pflanzen von der Strontium- und Calciumkonzentration der Nährlösung zusammen ab. Ferner geht aus Tabelle 10 hervor, daß der erwähnte Calciumeinfluß im Sproß ausgeprägter ist als in der Wurzel. Durch starke Erhöhung des Calciumgehalts der Nährlösung wird also vor allem der Transport von Strontium in den Sproß gehemmt. Dieses Ergebnis stimmt mit der Annahme überein, daß hohe Calciumkonzentrationen allgemein eine Abnahme des Nährsalztransportes in die Blätter und eine Ionenanhäufung in den Wurzeln bewirken (Burström, 1958). Vergleichsweise fanden Bowen und Dymond (1956), daß die Wurzel von *Lycopersicum esculentum* bei niedrigem Strontiumgehalt der Nährlösung sogar mehr Strontium aufnimmt als Calcium. Die Autoren führen dies auf einen physikalisch-chemischen Effekt zurück, da Austauschharze Strontium bei niedrigen Strontium-

Tabelle 11

*Pisum sativum*: Einfluß von Calciumionen auf die Strontiumaufnahme.

Alter der Keimpflanzen bei Versuchsbeginn:	5 Tage
Nährlösung pro Versuchskolben:	250 ccm
Anfangskonzentration an Strontium:	100 $\gamma$ /ccm
Temperaturmittel:	ca. 22 °C
Tageslänge:	14 Stunden
Mittelwerte von 9-10 Pflanzen	

Entwicklungs- zustand: Anzahl voll ent- wickelter Blätter (Alter in Tagen)		Relativer Sr-Gehalt in $\gamma$ /g	
Blattzahl	Alter	30 $\gamma$ Ca/ccm	1500 $\gamma$ Ca/ccm
1	12	1520	272
2	14	2570	356
4	19	4850	481
5	22	4160	735

konzentrationen ebenfalls stärker austauschen als Calcium. Es scheint also so zu sein, daß eine starke Erhöhung der Calciumkonzentration der Nährlösung für die Strontiumaufnahme durch die Pflanze physiologisch von gleicher Bedeutung ist, wie wenn die Strontiumkonzentration in der Nährlösung herabgesetzt würde. Da nun die Pflanze bei niedriger Strontiumkonzentration mehr Strontium als Calcium aufnimmt (Bowen und Dymond, 1956), wirkt sich die Erhöhung der Calciumkonzentration der Nährlösung erst oberhalb etwa 10  $\gamma$  Sr/ccm durch eine starke Reduktion der Aufnahme von Strontium durch die Pflanze aus.

Da *Pisum* wenig Strontium aufnimmt, konnte ein entsprechender Versuch an dieser Pflanze nur beschränkt ausgewertet werden. *Pisum* wurde in Nährlösung mit variiertem Calciumgehalt (30 und 1500  $\gamma$ /ccm statt normal 170  $\gamma$ /ccm) kultiviert und nach Versuchsabbruch der Strontiumgehalt der ganzen Pflanze bestimmt. Die Resultate in Tabelle 11 zeigen, daß der relative Strontiumgehalt in der Pflanze auf durchschnittlich einen Siebentel sinkt, wenn die Calciumkonzentration der Nährlösung von 30 auf 1500  $\gamma$ /ccm heraufgesetzt wird.

### *Einfluß von Kaliumionen auf die Strontiumaufnahme*

Die Kenntnis von Wechselwirkungen zwischen Kalium und Calcium (Fischer, 1956) führte zu Untersuchungen über den Einfluß von

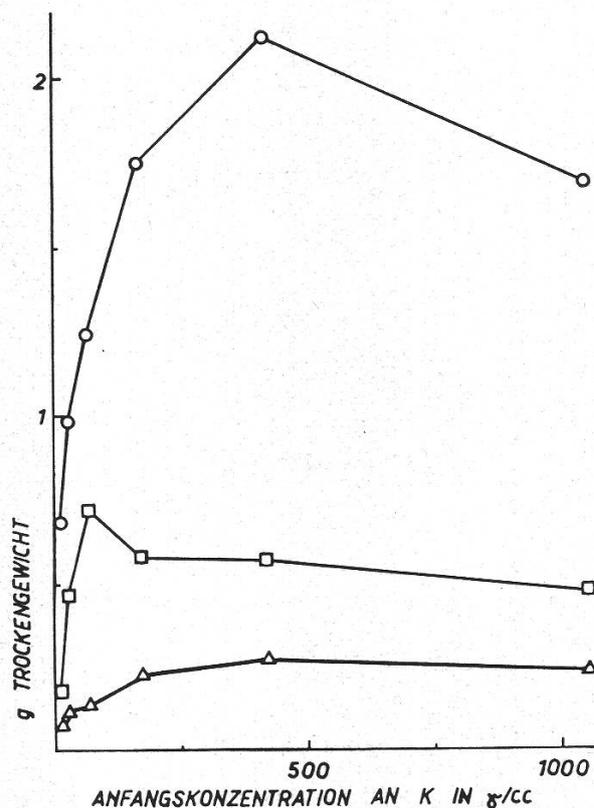
Tabelle 12

*Pisum sativum*: Einfluß von Kaliumionen auf das Wachstum von Wurzel und Sproß.

Alter der Keimpflanzen bei Versuchsbeginn:	7 Tage
Nährlösung pro Versuchskolben:	250 ccm
Versuchsdauer:	28 Tage
Entwicklungszustand:	5-8 voll entwickelte Blätter
Temperaturmittel:	ca. 20 °C
Tageslänge:	15 ½ Stunden
Mittelwerte von 14-15 Pflanzen	

Anfangskonzentration an Kalium $\gamma$ /ccm	Trockengewicht in g	
	Wurzel	Sproß
21	0,044	0,186
42	0,053	0,234
84	0,041	0,151
168	0,058	0,223
336	0,073	0,292
672	0,055	0,234
1344	0,057	0,234

Kaliumionen auf die Strontiumaufnahme. Die bis jetzt vorliegenden Ergebnisse widersprechen sich zum Teil. Während Ehrler, Romney und Hamner (1955) die Aufnahme von Strontium durch hohe Kaliumkonzentrationen in der Nährlösung steigern konnten, stellten Klechkovsky (1957) bei Nährlösungsversuchen und Libby (1958) an Bodenkulturen den gegenteiligen Effekt fest. In Bodenversuchen von Klechkovsky (1957) und Klechkovsky und Guliakin (1958) wurden nur schwache Effekte beobachtet. Die Unterschiede sind vermutlich auf die Verschiedenheit der Versuchsbedingungen zurückzuführen; auf deren Planung wurde daher besondere Sorgfalt verwandt.



Figur 7

*Pisum sativum*: Einfluß von Kaliumionen auf das Wachstum der Organe.

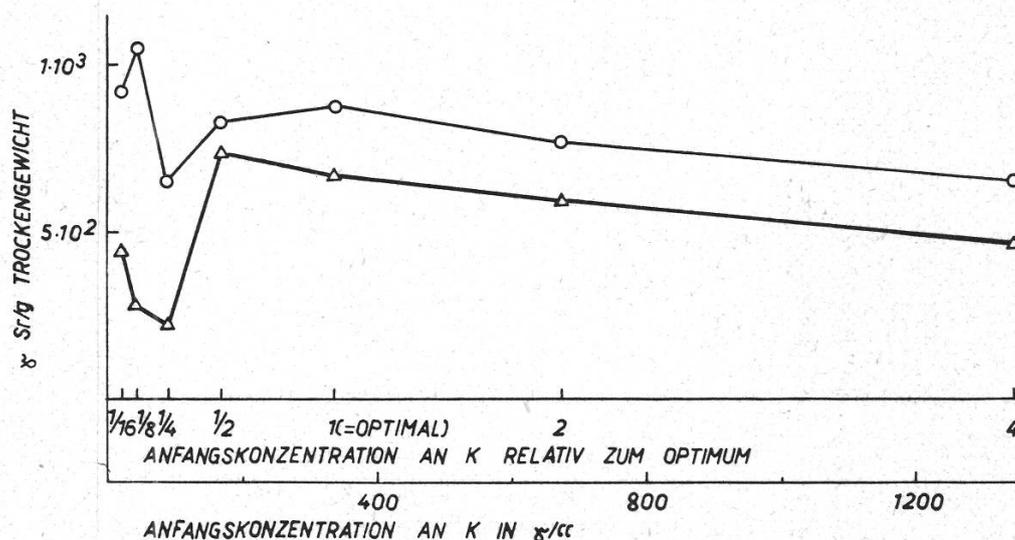
Alter der Keimpflanzen bei Versuchsbeginn:	6 Tage
Nährlösung pro Versuchskolben:	750 ccm
Entwicklungszustand (Alter in Tagen):	nach der Fruchtbildung (62)
Temperaturmittel:	ca. 20 °C
Tageslänge:	16 Stunden (Langtag)
Mittelwerte von 10–12 Pflanzen	

□	—	□	Früchte
○	—	○	Stengel und Blätter
△	—	△	Wurzel

Vorerst wurde die für das Wachstum der Versuchspflanzen optimale Kaliumkonzentration bestimmt. Da Entwicklungsunterschiede am ehe-

sten nach langer Kultivierung auftreten, wurde *Pisum* in Nährlösung mit variiertem Kaliumkonzentration aufgezogen, bis die in der gewöhnlichen Knop-Nährlösung kultivierten Pflanzen Früchte gebildet hatten. Für die vegetativen Organe von *Pisum* ist eine zweieinhalbmal größere Kaliumkonzentration als die normale, das heißt in der Knop-Nährlösung befindliche (= 168  $\gamma$ /ccm) optimal; für die Fruchtbildung ist diese bereits überoptimal (Figur 7). Als optimal für das Wachstum von *Pisum* wurde in der Folge eine zweimal größere Kaliumkonzentration als die normale, also 336  $\gamma$ /ccm, angenommen; diese Kaliumkonzentration ist auch für das Wachstum von *Pisum* während der vegetativen Phase optimal (Tabelle 12).

Die Aufnahme von Strontium wurde an *Pisum* bei unter- bis überoptimalen Kaliumkonzentrationen, die noch ein normales Wachstum ermöglichen, untersucht. Der Strontiumgehalt der Nährlösung betrug 10  $\gamma$ /ccm, wobei *Pisum* während der Versuchsdauer von 4 Wochen erfah-



Figur 8

*Pisum sativum*: Einfluß von Kaliumionen auf die Strontiumaufnahme.

Alter der Keimpflanzen bei Versuchsbeginn:	7 Tage
Nährlösung pro Versuchskolben:	250 ccm
Anfangskonzentration an Strontium:	10 $\gamma$ /ccm
Versuchsdauer:	28 Tage
Entwicklungszustand:	5-8 voll entwickelte Blätter
Temperaturmittel:	ca. 20 °C
Tageslänge:	15 1/2 Stunden
Mittelwerte von 14-15 Pflanzen	

Die relative Kaliumkonzentration ist auf der Abszisse so angegeben, daß die optimale Kaliumkonzentration gleich 1 gesetzt ist.

- — ○ Relativer Strontiumgehalt des Sprosses  
 △ — △ Relativer Strontiumgehalt der Wurzel

rungsgemäß genügend Strontium aufnimmt. Figur 8 zeigt folgendes: Wird die Kaliumkonzentration auf einen Viertel der optimalen herabgesetzt, so ist der relative Strontiumgehalt erniedrigt; bei weiterer Herabsetzung der Kaliumkonzentration nimmt er jedoch wieder signifikant zu. Überoptimale Kaliumkonzentrationen hemmen die Strontiumaufnahme in der Wurzel; die Abnahme des relativen Strontiumgehalts im Sproß liegt an der Signifikanzgrenze.

Für das Wachstum von Mais ist eine zweimal größere Kaliumkonzentration als die normale, das heißt in der Pfeffer-Robbins-Nährlösung befindliche (= 78  $\gamma$ /ccm), also 156  $\gamma$ /ccm, optimal (Tabelle 13).

Tabelle 13

*Zea Mays*: Einfluß von Kaliumionen auf das Wachstum von Wurzel und Sproß.

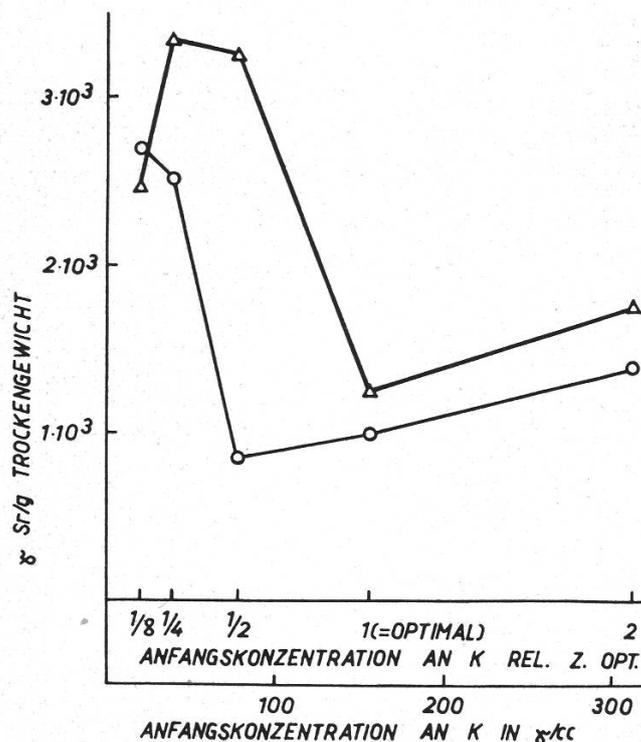
Alter der Keimpflanzen bei Versuchsbeginn:	4 Tage
Nährlösung pro Versuchskolben:	250 ccm
Versuchsdauer:	28 Tage
Entwicklungszustand:	4-5 voll entwickelte Blätter
Temperaturmittel:	ca. 21 °C
Tageslänge:	14 Stunden
Mittelwerte von 15 Pflanzen	

Anfangskonzentration an Kalium $\gamma$ /ccm	Trockengewicht in g	
	Wurzel	Sproß
19,5	0,084	0,256
39	0,092	0,246
78	0,090	0,235
156	0,104 <sup>1</sup>	0,270
312	0,111 <sup>1</sup>	0,249

<sup>1</sup> Unterschied nicht signifikant.

Der Einfluß der Kaliumkonzentration auf die Strontiumaufnahme verhält sich bei Mais folgendermaßen: Wie Figur 9 zeigt, ist der relative Strontiumgehalt bei der für das Wachstum optimalen Kaliumkonzentration am geringsten. Wird die Kaliumkonzentration auf einen Viertel bis einen Achtel der optimalen herabgesetzt, so nimmt der relative Strontiumgehalt um etwa 150% zu, wird sie auf das Doppelte heraufgesetzt, so nimmt er ebenfalls, aber schwächer, zu. Die Verhältnisse bei überoptimalen Kaliumkonzentrationen wurden noch einer weiteren Prüfung unterzogen (Figur 10). Dabei zeigte sich, daß die Erhöhung der Kaliumkonzentration auf das Doppelte der optimalen bei der Wurzel eine schwache Zunahme des relativen Strontiumgehaltes, beim Sproß aber

keine signifikante Änderung desselben zur Folge hatte. Wurde die Kaliumkonzentration auf das Dreifache der optimalen erhöht, so nahm der relative Strontiumgehalt beim Sproß schwach ab und blieb bei der Wurzel unverändert.



Figur 9

*Zea Mays*: Einfluß von Kaliumionen auf die Strontiumaufnahme.

Alter der Keimpflanzen bei Versuchsbeginn:	4 Tage
Nährlösung pro Versuchskolben:	250 ccm
Anfangskonzentration an Strontium:	10 $\gamma$ /ccm
Versuchsdauer:	28 Tage
Entwicklungszustand:	4–5 voll entwickelte Blätter
Temperaturmittel:	ca. 21 °C
Tageslänge:	14 Stunden
Mittelwerte von 15 Pflanzen	

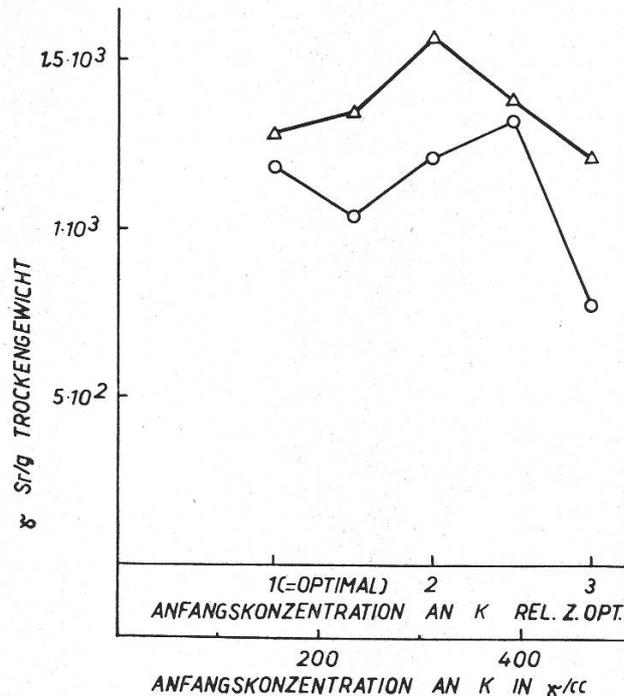
Die relative Kaliumkonzentration ist auf der Abszisse so angegeben, daß die optimale Kaliumkonzentration gleich 1 gesetzt ist.

○—○ Relativer Strontiumgehalt des Sprosses  
 △—△ Relativer Strontiumgehalt der Wurzel

Werden die Ergebnisse bei Mais und *Pisum* miteinander verglichen, so kann etwa folgendes gesagt werden: Erhöhung der Kaliumkonzentration um das Drei- bis Vierfache der optimalen bewirkt bei beiden Pflanzen meistens eine schwache Hemmung der Strontiumaufnahme; starke Herabsetzung der Kaliumkonzentration hat bei Mais eine erhebliche Förderung der Strontiumaufnahme zur Folge, bei *Pisum* ist sie dagegen

je nach dem Grad der Herabsetzung der Kaliumkonzentration mehr oder weniger stark erniedrigt oder praktisch unverändert.

Während die Strontiumaufnahme bei Mais durch Erniedrigung der Kaliumkonzentration stark gefördert wird, konnte bei *Pisum* kein gleichartiger Effekt beobachtet werden.



Figur 10

*Zea Mays*: Einfluß von Kaliumionen auf die Strontiumaufnahme.

Alter der Keimpflanzen bei Versuchsbeginn:	4 Tage
Nährlösung pro Versuchskolben:	250 ccm
Anfangskonzentration an Strontium:	10 $\gamma/ccm$
Versuchsdauer:	28 Tage
Entwicklungszustand:	5 voll entwickelte Blätter
Temperaturmittel:	ca. 21 °C
Tageslänge:	14 Stunden
Mittelwerte von 13–15 Pflanzen	

Die relative Kaliumkonzentration ist auf der Abszisse so angegeben, daß die optimale Kaliumkonzentration gleich 1 gesetzt ist.

- Relativer Strontiumgehalt des Sprosses  
 △—△ Relativer Strontiumgehalt der Wurzel

### Vergleich der Wirkung von Calcium und Kalium auf die Strontiumaufnahme

Epstein (1956) nennt den Antagonismus zwischen Calcium und Strontium einen Parallelismus. Begründet wird dieser Parallelismus damit, daß beide Ionen die gleichen «Träger» aufweisen (Epstein und

Leggett, 1954). In eigenen Versuchen konnte eine ähnliche Wechselwirkung zwischen Kalium und Strontium festgestellt werden; die Wirkung von Calcium und Kalium auf die Strontiumaufnahme soll daher einem Vergleich unterzogen werden.

Aus Versuchen mit Karottenscheiben schlossen Middleton und Russell (1958), daß die Aufnahme von Strontium durch ein Ion anderer Wertigkeit (Rubidium) stärker gehemmt wird als durch ein Ion gleicher Wertigkeit (Calcium); das würde, auf unsere Versuche bezogen, heißen, daß Kalium eine stärkere Hemmung bewirkt als Calcium.

In Tabelle 14 sind Resultate von Mais, die unter praktisch gleichen Bedingungen entstanden sind, verglichen; sie wurden auf folgende Art erhalten: Die Differenz zwischen der niedrigsten und höchsten Kaliumkonzentration betrug in dem in Figur 9 dargestellten Versuch 73,1 mg Kalium pro 250 ccm Nährlösung; diese Erhöhung der Kaliumkonzentration bewirkte eine Abnahme des relativen Strontiumgehaltes um 720  $\gamma/g$  in der Wurzel und um 1300  $\gamma/g$  im Sproß. Aus Tabelle 10, Zeile 8, geht hervor, daß eine Erhöhung der Calciumkonzentration um 122,5 mg Calcium pro 250 ccm Nährlösung eine Abnahme des relativen Strontiumgehaltes um 1781  $\gamma/g$  in der Wurzel und um 4189  $\gamma/g$  im Sproß bewirkt. Um diese Werte besser miteinander vergleichen zu können, wurden die

Tabelle 14

*Zea Mays*: Die Wirkung von Calcium und Kalium auf die Strontiumaufnahme.

	<i>Calcium</i>	<i>Kalium</i>
Alter der Keimpflanzen bei Versuchsbeginn:	4 Tage	4 Tage
Nährlösung pro Versuchskolben:	250 ccm	250 ccm
Anfangskonzentration an Strontium:	10 $\gamma/ccm$	10 $\gamma/ccm$
Versuchsdauer:	26 Tage	28 Tage
Entwicklungszustand (Anzahl voll entwickelter Blätter):	4	4
Temperaturmittel:	ca. 21 °C	ca. 21° C
Tageslänge:	14 Stunden	14 Stunden
Mittelwerte von:	10 Pflanzen	15 Pflanzen

Erhöhung des K <sup>+</sup> - bzw. Ca <sup>++</sup> -Gehaltes pro 250 ccm Nährlösung um	Abnahme des Sr-Gehaltes pro g Trockengewicht um	
	Wurzel	Sproß
73,1 mg K	720 $\gamma$	1300 $\gamma$
227 K <sup>+</sup>	1 Sr <sup>++</sup>	
126 K <sup>+</sup>		1 Sr <sup>++</sup>
122,5 mg Ca	1781 $\gamma$	4189 $\gamma$
150 Ca <sup>++</sup>	1 Sr <sup>++</sup>	
64 Ca <sup>++</sup>		1 Sr <sup>++</sup>

Gewichtsmengen in die entsprechende Anzahl Ionen umgerechnet und dann berechnet, um wieviel Ionen der Kalium- bzw. Calciumgehalt der Nährlösung erhöht werden muß, damit der relative Strontiumgehalt in der Pflanze um 1 Ion/g Trockengewicht abnimmt.

Der Vergleich der Werte ergibt, daß die Strontiumaufnahme durch Calcium stärker gehemmt wird als durch Kalium. Dieses Ergebnis steht im Gegensatz zu demjenigen, welches nach den Resultaten von Middleton und Russell (1958) zu erwarten war. Es muß aber berücksichtigt werden, daß die erwähnten Autoren Rubidium mit einem Atomgewicht, das mehr als das Doppelte des Atomgewichts von Kalium beträgt, verwendeten. Offenbar nimmt die hemmende Wirkung eines Ions auf die Strontiumaufnahme mit steigendem Atomgewicht zu. Wird die Hemmung durch zwei Ionen mit ähnlichem Atomgewicht, aber verschiedener Wertigkeit, wie es bei den eigenen Versuchen der Fall ist, betrachtet, so bewirkt das Ion gleicher Wertigkeit (Calcium) die stärkere Hemmung der Strontiumaufnahme als das Ion anderer Wertigkeit (Kalium).

### *Mechanismus der Strontiumaufnahme*

In der Literatur finden sich noch wenig Angaben über den Mechanismus der Strontiumaufnahme durch intakte Pflanzen. Jacobson und Overstreet (1947) versuchten die Frage zu klären, ob Strontium (markiert mit  $\text{Sr}^{85}$ ) passiv oder aktiv unter Energieaufwand durch Wurzeln höherer Pflanzen aufgenommen wird. Als Versuchsobjekte dienten ihnen isolierte Gerstenwurzeln; die Resultate können daher nur unter Vorbehalt auf intakte Pflanzen angewendet werden. Die Forscher stellten fest, daß die Aufnahme von Strontium temperaturabhängig ist, da die Gerstenwurzeln bei 25 °C mehr Strontium aufnehmen als bei 0 °C. Ferner fanden sie, daß sowohl lebende als auch abgetötete Wurzeln Strontium aufnehmen. Brachten sie die Wurzeln anschließend in eine Lösung mit inaktivem Strontium, so tauschten die abgetöteten Wurzeln das aufgenommene  $\text{Sr}^{85}$  schneller gegen inaktives Strontium aus als die lebenden Wurzeln. Sie schlossen aus ihren Versuchen, daß Strontium zum Teil aktiv unter Energieaufwand durch die Wurzel aufgenommen wird.

Rediske und Selders (1953) untersuchten als erste den Mechanismus der Strontiumaufnahme an verschiedenen intakten Pflanzen: Tote Wurzeln nahmen fast so viel Strontium ( $\text{Sr}^{90}$ ) auf wie lebende; die Autoren folgerten, daß Strontium zur Hauptsache durch Adsorption aufgenommen wird. Das Problem wurde durch Dios Lopez Gonzales und Jenny (1958) weiter untersucht. An *Alfalfa*-Keimlingen wurde mittels Kationenaustauschermembranen, gesättigt mit  $\text{Sr}^{85}$ , festgestellt, daß Strontium primär durch Austausch an die Wurzeloberfläche absorbiert wird. An-

schließlich erfolgt ein rascher Transport des aufgenommenen Strontiums nach den Blättern. Der Mechanismus dieses Transports wurde nicht weiter untersucht.

Schon Epstein und Leggett (1954) konnten an isolierten Gerstenwurzeln nachweisen, daß der Ionenaustausch eine wichtige Rolle bei der Aufnahme von Strontium spielt. Sie stellten fest, daß aufgenommenes Sr<sup>89</sup> zu einem großen Teil gegen Wasserstoffionen in der Außenlösung ausgetauscht wird, zu einem etwas geringeren Teil gegen Magnesium-, Calcium- und inaktive Strontiumionen. Der nicht austauschbare Teil des absorbierten Strontiums scheint aktiv unter Energieaufwand aufgenommen zu sein. Zu einer ähnlichen Annahme kamen Russell und Squire (1958) an intakten Gerstenpflanzen. Sie nahmen an, daß Strontium vor allem durch Austausch gegen Wasserstoffionen aufgenommen und anschließend aktiv durch die Wurzel transportiert wird.

Eigene Versuche sollen zur Klärung des Mechanismus der Strontiumaufnahme beitragen. Zuerst soll untersucht werden, ob Strontium passiv mit dem Wasser als «Lösung» oder unabhängig davon aufgenommen wird. Mais und *Pisum* wurde während dreier Wochen in Nährlösung mit verschiedenen Strontiumzusätzen kultiviert und der Strontiumgehalt von Kulturlösung und Pflanze bestimmt. Die pro Pflanze aufgenommene Wassermenge ergab sich aus der Differenz von Volumenabnahme der

Tabelle 15

*Zea Mays* und *Pisum sativum*: Strontium- und Wasseraufnahme.

Anfangsmenge Nährlösung pro Versuchskolben:	251 ccm
Kulturbedingungen wie in Figur 2 bzw. 3	
A. <i>Zea Mays</i>	
Verdunstetes Wasser pro Versuchskolben:	7,4 ccm
B. <i>Pisum sativum</i>	
Verdunstetes Wasser pro Versuchskolben:	6,5 ccm
Mittelwerte von 10 Kolben	

	Anfangskonzentration an Strontium in $\gamma$ /ccm	Endmenge Kulturlösung in ccm	Endkonzentration an Strontium in $\gamma$ /ccm	Wasseraufnahme pro Pflanze in g	Sr, mit dem Wasser als Lösung aufgenommen, in $\gamma$	Absoluter Sr-Gehalt pro Pflanze in $\gamma$
A	1	205,3	0,93	38,3	36– 38	58
	10	206,7	8,0	36,9	295– 369	642
	100	203,9	84	39,7	3340– 3940	2942
	1000	210,8	1270	32,8	32800–41600	12360
B	1	184,2	1,6	60,3	60– 96	28
	10	202,4	11,4	42,1	421– 480	61
	100	200,1	121	44,4	4440– 5370	223
	1000	210,8	1030	33,7	33700–34700	1887
	2000	229,1	1670	15,4	25700–30800	3484

Kulturlösung und dem aus ihr verdunsteten Wasser. Nimmt die Pflanze Strontium mit dem Wasser als «Lösung» auf, so muß der Strontiumgehalt der Pflanze gleich dem des aufgenommenen Wassers (bezogen auf Anfangs- bzw. Endkonzentration an Strontium in der Kulturlösung) sein. Tabelle 15 zeigt, daß dies nicht der Fall ist. Mais und *Pisum* nehmen Strontium und Wasser unabhängig voneinander auf. Bei 1 und 10  $\gamma$  Sr/ccm Nährlösung ist der Strontiumgehalt von Mais höher als der des aufgenommenen Wassers, sonst niedriger, besonders bei *Pisum*.

Durch Berechnung der Verteilung von Strontium zwischen Kulturlösung und Pflanze kann entschieden werden, ob die Pflanze Strontium akkumuliert oder ob sich Strontium zwischen der Kulturlösung und der Pflanze nur entsprechend dem Konzentrationsgefälle wie in einem einfachen physikalisch-chemischen System verteilt.

Die Verteilung wurde durch Vergleich des Strontiumgehaltes pro Volumenzunahme des Pflanzenorgans während des Versuchs und der Endkonzentration an Strontium in der Kulturlösung berechnet. Wegen des hohen Wassergehalts der Versuchspflanzen (90–95% des Frischgewichts) durften für die Volumina von Wurzel und Sproß die entspre-

Tabelle 16

*Zea Mays* und *Pisum sativum*: Verteilung von Strontium zwischen Kulturlösung und Pflanze.

Die Verteilung wurde durch Vergleich des Strontiumgehaltes pro Volumenzunahme des Pflanzenorgans während des Versuchs ( $C_1$ ) und der Endkonzentration an Strontium in der Kulturlösung ( $C_2$ ) berechnet. Kulturbedingungen wie in Figur 2 bzw. 3.

I. *Zea Mays*

- A. Wurzel      Anfangsvolumen:      0,22 ccm  
 B. Sproß      Anfangsvolumen:      0,40 ccm

	Konzentration an Strontium in der Nährlösung in $\gamma$ /ccm		Endvolumen des Organs in ccm	Volumenzunahme des Organs in ccm	Absoluter Sr-Gehalt des Organs in $\gamma$	Sr-Gehalt des Organs pro Volumenzunahme in $\gamma$ /ccm	Verteilung von Strontium: $\frac{C_1}{C_2}$
	anfangs	am Ende					
A	1	0,93	1,67	1,45	24	17	18,3
	10	8,0	2,09	1,87	99	53	6,6
	100	84	2,07	1,85	977	528	6,3
	1000	1270	1,31	1,09	2030	1860	1,5
B	1	0,93	3,35	2,95	34	12	12,9
	10	8,0	4,64	4,24	543	128	16,0
	100	84	4,43	4,03	1965	487	5,8
	1000	1270	3,30	2,90	10330	3560	2,8

II. *Pisum sativum*

A. Wurzel      Anfangsvolumen:      0,20 ccm  
 B. Sproß      Anfangsvolumen:      0,23 ccm

	Konzentration an Strontium in der Nährlösung in $\gamma$ /ccm		Endvolumen des Organs in ccm	Volumenzunahme des Organs in ccm	Absoluter Sr-Gehalt des Organs in $\gamma$	Sr-Gehalt des Organs pro Volumenzunahme in $\gamma$ /ccm	Verteilung von Strontium: $\frac{C_1}{C_2}$
	anfangs	am Ende					
A	1	1,6	0,61	0,41	18	44	21,2
	10	11,4	0,51	0,31	10	32	2,8
	100	121	0,63	0,43	52	121	1,0
	1000	1030	0,39	0,19	230	1210	1,2
	2000	1670	0,36	0,16	790	4940	3,0
B	1	1,6	1,47	1,24	10	8	5,0
	10	11,4	1,28	1,05	51	49	4,3
	100	121	1,50	1,27	171	135	1,1
	1000	1030	1,37	1,14	1657	1450	1,4
	2000	1670	1,07	0,84	2694	3200	1,9

chenden Frischgewichte eingesetzt werden. Die Resultate für drei Wochen alte Mais- und Erbsenpflanzen sind in Tabelle 16 zusammengestellt. Sie ergeben, daß Strontium durch Mais und *Pisum* bei niedrigen Strontiumkonzentrationen in der Nährlösung stark akkumuliert wird; bei höheren Strontiumkonzentrationen nimmt die Fähigkeit, Strontium zu akkumulieren, ab, oder es findet überhaupt keine Akkumulation statt. Bei beiden Pflanzen verhalten sich Sproß und Wurzel hinsichtlich der Akkumulation des Strontiums etwas verschieden.

Für die Aufnahme von Strontium durch die Wurzel intakter Pflanzen ergibt sich also etwa folgendes Bild: Strontium wird unabhängig vom Wasser aufgenommen (in eigenen Versuchen an Mais und *Pisum* festgestellt). Als primäre Phase der Strontiumaufnahme müssen Austauschreaktionen in Betracht gezogen werden, am ehesten ein Austausch gegen Wasserstoffionen (siehe Epstein und Leggett, 1954; Dios Lopez Gonzales und Jenny, 1958; Russell und Squire, 1958). Anschließend erfolgt starke Akkumulation von Strontium in Wurzel und Sproß, vor allem bei niedriger Außenkonzentration an Strontium.

Es stellt sich nun die Frage, ob die in diesen Versuchen nachgewiesene Akkumulation von Strontium unter Energieaufwand der Pflanze oder durch einen andern Mechanismus zustande kommt. Hohe Ionenkonzentrationen in Zellen können auch durch Donnan-Gleichgewichte zustande kommen, indem durch Anhäufung von organischen Anionen aus dem

Atmungsstoffwechsel eine hohe Konzentration an immobilen Anionen in den Zellen entsteht, die nach der Theorie der Donnan-Gleichgewichte eine hohe Konzentration an Kationen zur Folge hat (siehe zum Beispiel Robertson, 1958). Wenigstens für isolierte Wurzeln liegen experimentell gut belegte Beweise vor, daß aktive Prozesse unter Energieaufwand der Pflanze bei der Aufnahme von Strontium beteiligt sind (Jacobson und Overstreet, 1947; Epstein und Leggett, 1954).

Wie gelangt nun das in der Wurzel nicht akkumulierte Strontium durch die Wurzel in den Sproß? Aus Tabelle 15 geht hervor, daß Strontium und Wasser unabhängig voneinander aufgenommen werden; es ist daher auch wenig wahrscheinlich, daß Strontium passiv mit dem Wasserstrom von der Epidermis der Wurzel durch die Rinde zu den Gefäßen mitgeschleppt wird. Hingegen darf wohl angenommen werden, daß Strontium in den Gefäßen mit dem Transpirationsstrom in den Sproß gelangt (s. a. Hoagland, 1948).

Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten für den Transport von Strontium durch die Wurzel zu den Gefäßen:

1. Freie Diffusion. Strontium diffundiert durch den sogenannten «water free space» im Sinne von Briggs et al. (1958). Dieser «water free space» stellt eine wäßrige Phase dar, in der die Konzentration an Strontium gleich der in der Außenlösung ist. Er scheint zur Hauptsache in den Interzellularräumen und den Zellwänden lokalisiert zu sein.

2. Aktiver, Energie verbrauchender Transport. Folgende Berechnung soll Aufschluß darüber geben, welche dieser beiden Möglichkeiten am ehesten zutrifft: Es wird die Strontiumkonzentration im Transpirationsstrom verglichen mit der Endkonzentration an Strontium in der Kulturlösung (siehe Russell und Shorrocks, 1958, 1959). Als Maß für die Strontiumkonzentration im Transpirationsstrom dient der Strontiumgehalt des Sprosses, bezogen auf die Menge an transpiriertem Wasser (unter der Voraussetzung, daß sich Strontium in Form von freien Ionen im Transpirationsstrom vorfindet). Die Berechnung setzt also die Kenntnis der Transpirationsgröße voraus, diese kann aus der Differenz von Wasseraufnahme (siehe Tabelle 15) und Wassergehaltszunahme der Pflanze während des Versuchs berechnet werden.

Es zeigte sich, daß Strontium einen Einfluß auf die Transpiration ausübt; im folgenden sei kurz darauf hingewiesen (Tabelle 17). Die Transpiration wird bei *Pisum* durch alle untersuchten Strontiumkonzentrationen sehr stark gehemmt, und zwar sowohl die absolute Transpiration (pro Pflanze) als auch die relative, bezogen auf das Gewicht der transpirierenden Masse (das Gewicht der transpirierenden Masse wurde gleich dem Frischgewicht des Sprosses gesetzt). Bei Mais ist kein einheitlicher Effekt feststellbar. Zum Vergleich sei erwähnt, daß der Einfluß von Calcium auf

Tabelle 17

*Zea Mays* und *Pisum sativum*: Einfluß von Strontium auf die Transpiration.

Die absolute Transpiration (pro Pflanze) wurde aus der Differenz von Wasseraufnahme und Wassergehaltszunahme der Pflanze während des Versuchs berechnet (Wassergehalt = Frischgewicht minus Trockengewicht); die relative Transpiration ergab sich aus dem Verhältnis von absoluter Transpiration zum Gewicht des transpirierenden Organs (= Frischgewichtszunahme des Sprosses). Kulturbedingungen wie in Figur 2 bzw. 3.

Anfangs- konzentration an Strontium in $\gamma$ /ccm	<i>Zea Mays</i>			<i>Pisum sativum</i>		
	Absolute Transpi- ration in g	Gewicht transp. Organ in g	Relative Transpi- ration in g/g	Absolute Transpi- ration in g	Gewicht transp. Organ in g	Relative Transpi- ration in g/g
0	31,0	4,97	6,2	173,7	1,12	155,0
1	34,2	2,95	11,6	58,8	1,24	47,4
10	31,1	4,24	7,3	40,8	1,05	38,8
100	34,1	4,03	8,5	42,8	1,27	33,7
1000	29,1	2,90	10,0	32,5	1,14	28,5
2000	—	—	—	14,5	0,84	17,3

die Transpiration ebenfalls nicht einheitlich beschrieben wird. Wöstmann (1942) fand zwar an verschiedenen Pflanzen, unter anderem auch an Mais, daß die Transpiration durch hohe Calciumkonzentration in der Nährlösung gehemmt wird; Enzmann (1951/52) aber konnte keinen spezifischen Einfluß von Calcium auf die Transpiration von Gerste feststellen.

Wird nun die Strontiumkonzentration im Transpirationsstrom mit der Endkonzentration an Strontium in der Kulturlösung verglichen, so kann das Verhältnis der beiden Konzentrationen zueinander kleiner sein als 1; dies würde bedeuten, daß Strontium langsamer durch die Wurzel zu den Gefäßen gelangt als Wasser. Ist das Verhältnis gleich 1, so wandert Strontium gleich schnell wie Wasser. Beide Effekte beruhen auf freier Diffusion. Ein Verhältnis größer als 1 würde hingegen bedeuten, daß Strontium gegen einen Konzentrationsgradienten unter Energieverbrauch durch die Wurzel wandert (s.a. Russell und Shorrocks, 1958, 1959). Tabelle 18 zeigt, daß die Werte für das Verhältnis Strontiumkonzentration im Transpirationsstrom zu Endkonzentration an Strontium in der Kulturlösung bei Mais um 1 schwanken, bei *Pisum* sind sie durchwegs erheblich kleiner als 1. Dies spricht für freie Diffusion des in der Wurzel nicht akkumulierten Strontiums nach den Gefäßen.

Auf eine wichtige Tatsache ist bereits mehrfach in der Literatur aufmerksam gemacht worden: Aktiver Transport von Ionen durch die Wurzel kann nur dann gut nachgewiesen werden, wenn die Salzkonzentration

Tabelle 18

*Zea Mays* und *Pisum sativum*: Strontiumaufnahme und Transpirationsstrom.

Als Maß für die Konzentration an Strontium im Transpirationsstrom dient der Strontiumgehalt des Sprosses, bezogen auf die Menge an transpiriertem Wasser. Kulturbedingungen wie in Figur 2 bzw. 3.

Pflanze	Konzentration an Strontium in der Nährlösung in $\gamma/\text{cm}$		Konzentration an Strontium im Transpirationsstrom in $\gamma/\text{g}$	Sr-Konzentration im Transpirationsstrom
	anfangs	am Ende		Sr-Konzentration in Nährlösung am Ende
<i>Zea Mays</i>	1	0,93	0,99	1,1
	10	8,0	(17,5)	(2,2)
	100	84	58	0,7
	1000	1270	355	0,3
<i>Pisum sativum</i>	1	1,6	0,17	0,11
	10	11,4	1,25	0,11
	100	121	4,0	0,03
	1000	1030	51	0,05
	2000	1670	186	0,11

sowohl in der Nährlösung als auch in der Pflanze niedrig ist (Broyer und Hoagland, 1943; Russell und Shorrocks, 1958, 1959; Russell und Barber, 1960). Es muß angenommen werden, daß die Salzkonzentration in den Pflanzen bei den vorliegenden, drei Wochen dauernden Versuchen hoch war, denn die Verhältniszahlen in Tabelle 18 werden kaum beeinflußt von der Strontiumkonzentration in der Nährlösung. Ferner sind die Werte für *Pisum* in einer relativ konzentrierten Nährlösung, verglichen mit derjenigen für Mais, viel niedriger als die entsprechenden für Mais. Eine aktive Komponente im Strontiumtransport durch die Wurzel kann daher auf Grund der vorliegenden Resultate nicht ohne weiteres verneint werden.

Wäre aktiver Transport vorhanden, so darf angenommen werden, daß der Energieverbrauch an die Überwindung einer Barriere für freie Ionenbewegung gebunden ist (Russell und Barber, 1960). Ursprünglich wurde der Endodermis die Rolle der Barriere für freie Ionenbewegung zugeschrieben. Sandström (1950) fand dann aber, daß Ablösen der Wurzelepidermis durch Behandlung mit Di-n-Amylessigsäure erhöhte Aufnahme von Chlorid-, Phosphat- und Gesamtkationen bei Weizenkeimlingen zur Folge hatte. Er schloß aus seinen Versuchen, daß die aktive Ionenaufnahme in der Epidermis lokalisiert ist. Neuerdings konnte Emmert (1961) eine spezifische Barriere für den Transport von  $\text{P}^{32}$  durch die Wurzel von *Phaseolus vulgaris* nachweisen.

Weitere Untersuchungen sind notwendig, um eindeutig abzuklären, ob Strontium passiv oder aktiv durch die Wurzel nach den Gefäßen geleitet wird.

Es bleibt nun noch zu untersuchen, wie sich die verschiedenen Teile des Sprosses in bezug auf die in Tabelle 16 nachgewiesene Akkumulation von Strontium verhalten. Tabelle 8, letzte Kolonne, liefert dazu die experimentelle Grundlage. Im Sproß der fruchtenden Erbsenpflanze wird Strontium zur Hauptsache im Stengel und in den Blättern akkumuliert, während der relative Strontiumgehalt der Samen auffallend klein ist, auch gegenüber dem der Blüten und Hülsen. Es soll daher noch die Verteilung von Strontium zwischen den Reproduktionsorganen von *Pisum* und der Kulturlösung berechnet werden (für die Berechnung siehe Seiten 181ff); die Werte lauten wie folgt:

Bei 10 $\gamma$ Sr/ccm:	Blüten : Lösung = 1,4
	Hülsen : Lösung = 4,8
	Samen : Lösung = 0,55
Bei 100 $\gamma$ Sr/ccm:	Blüten : Lösung = 1,2
	Hülsen : Lösung = 2,9
	Samen : Lösung = 0,21

Aus diesen Resultaten darf wohl gefolgert werden:

1. Nur die Hülsen akkumulieren Strontium.
2. Die Samen besitzen ein Ausschließungsvermögen für Strontium.

### Diskussion

Der Mechanismus der Ionenaufnahme durch intakte Pflanzen ist noch nicht eindeutig geklärt. Anlaß zu Diskussionen gibt immer noch die Frage, ob der Ionentransport durch die Wurzel nach den Gefäßen und in den Sproß passiv vor sich geht und vom Transpirationsstrom beeinflusst wird oder aktiv unter Energieaufwand durch die Pflanze. In den neueren zusammenfassenden Arbeiten wird der zweiten Möglichkeit der Vorzug gegeben. Robertson (1958) ist der Ansicht, daß die Ionen in der Epidermis aktiv akkumuliert werden und entsprechend dem geschaffenen Konzentrationsgefälle durch die Wurzel diffundieren. Russell und Barber (1960) postulieren etwas allgemeiner, daß eine Barriere für freie Ionenbewegung außerhalb des Leitbündels vorhanden ist und daß der Ionentransport durch diese Barriere Energie verbraucht, also aktiver Natur ist.

Einige Versuchsergebnisse der Strontiumaufnahme sollen nun in Beziehung zu den in der Literatur beschriebenen Gesetzmäßigkeiten der

Calciumaufnahme gesetzt werden. Beide Ionen werden pro Trockengewicht in ähnlichen Mengen aufgenommen (Collander, 1937, 1941); ein Vergleich ist daher berechtigt.

In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, daß Strontium- und Wasseraufnahme zwei voneinander unabhängige Prozesse sind (siehe Tabelle 15). Strontium scheint durch Ionenaustausch aufgenommen zu werden (Epstein und Leggett, 1954; Dios Lopez Gonzales und Jenny, 1958; Russell und Squire, 1958). Anschließend wird es in Wurzel und Sproß akkumuliert (siehe Tabelle 16). Die Akkumulation ist vermutlich ein aktiver Prozeß unter Energieaufwand der Pflanze (Jacobson und Overstreet, 1947; Epstein und Leggett, 1954). Der Transport von Strontium durch die Wurzel zu den Gefäßen scheint nach Tabelle 18 ein passiver, durch Diffusion entstandener Vorgang zu sein. Da die Salzkonzentration in den Pflanzen jedoch hoch war, ist die Diffusion nicht eindeutig bewiesen.

Vom Calcium wird im allgemeinen angenommen, daß es mehr oder weniger passiv vom Wasserstrom durch die Pflanze mitgeschleppt wird (siehe Fischer, 1958). Vor allem die ausführliche Arbeit von Hylmö (1953), die in letzter Zeit allerdings sehr umstritten war (siehe Russell und Barber, 1960), ergab eine enge Korrelation zwischen der Aufnahme von Calcium und der Transpiration bei intakten Erbsenpflanzen. Zu ähnlichen Ergebnissen gelangten schon früher Schmidt (1936), Wright (1939) und Bötticher und Behling (1940). An isolierten Gerstenwurzeln studierten neuerdings Moore et al. (1961) die Aufnahme von Calcium. Sie stellen fest, daß Calcium weitgehend passiv, also nicht metabolisch, aufgenommen wird. Handley und Overstreet (1961) konnten nun aber an isolierten Wurzeln von *Zea Mays* nachweisen, daß die Aufnahme von Calcium nur in der meristematischen Zone der Wurzelspitze nicht metabolisch ist, in der vakuolisierten Zone aber metabolisch. Auch die an intakten Bohnenpflanzen gewonnenen Resultate von Biddulph et al. (1961) stehen den früheren Versuchsergebnissen entgegen. Sie zeigen, daß etwa 90% des in den Stengel transportierten Calciums nicht mehr austauschbar sind, also akkumuliert wurden. Dieser Befund spricht gegen eine passive Massenströmung für Calciumionen.

Durch den Vergleich der verschiedenen Versuchsergebnisse kann vor allem gesagt werden, daß der Mechanismus der Aufnahme von Calcium und Strontium durch intakte, höhere Pflanzen komplexer Natur ist. Die schwer beweglichen Calcium- und Strontiumionen scheinen eher passiv durch die Pflanze transportiert zu werden. Daneben findet sicher eine Akkumulation von Calcium und Strontium in der Pflanze statt. Es kann noch nicht eindeutig entschieden werden, ob diese Akkumulation passiver oder aktiver Natur ist.

Mehr Vergleichsmöglichkeiten der Aufnahme von Strontium und Calcium bietet die Betrachtung der Bedeutung der Entwicklungsstadien und der Verteilung der Ionen auf die verschiedenen Organe. *Pisum* nimmt am meisten Strontium während der reproduktiven Entwicklungsphase auf (siehe Tabelle 6); das gleiche Verhalten zeigten für Calcium Arnon und Hoagland (1940) an *Solanum lycopersicum*. Calcium wird hauptsächlich in den Blättern abgelagert (Bacq, 1959); am stärksten steigt der absolute Calciumgehalt der Blätter in jungen Pflanzen, in älteren steigt er nur noch schwach (Olsen, 1948; Stenlid, 1958). Den größten absoluten Strontiumgehalt weisen bei *Pisum* ebenfalls die Blätter auf (siehe Tabelle 8), wobei ihr Gehalt während der reproduktiven Entwicklung nur noch absolut zunimmt, pro Trockengewicht aber konstant bleibt (siehe Tabelle 8). Hauptakkumulierungsorgan für Strontium ist jedoch während der fertilen Phase die Wurzel; ihr relativer Strontiumgehalt nimmt noch stark zu (siehe Tabelle 8), während Wagner (1932) feststellte, daß sogar der absolute Calciumgehalt in den Wurzeln von *Avena* gegen Ende der Vegetationsperiode wieder zurückgeht. Die fruchtende Erbsenpflanze speichert also Strontium vermehrt in den Wurzeln, während der größte Teil des aufgenommenen Calciums durchwegs in den Sproß wandert (Baumeister, 1958). Es ist übrigens auch bekannt, daß Wurzeln von *Pisum* und andern Pflanzen ein bedeutend größeres Speicherungsvermögen für  $\beta$ -Indolylessigsäure (Heteroauxin) besitzen als der Sproß (Ebert, 1955, S. 227 ff.).

Auf Seite 167 konnte gezeigt werden, daß keine Rückwanderung von Strontium aus Blättern stattfindet. Dasselbe konnten Biddulph et al. (1958) und Bukovac und Wittwer (1957) für Calcium beweisen.

Der auffälligste Unterschied zwischen Calcium- und Strontiumgehalt wurde bei *Pisum* in den Samen gefunden (siehe Tabelle 8); der Calciumgehalt von Samen ist im allgemeinen wesentlich größer. André (1919) fand in den Achaenen von *Helianthus annuus* 4% des Gesamtcalciumgehaltes, Latshaw und Miller (1924) 3,4% in Maiskörnern und Mach und Herrmann (1934) in Samen von *Pisum* 0,09%, bezogen auf das Trockengewicht. Durch Umrechnung der Werte von Tabelle 8 ergibt sich für den Gehalt an Strontium je nach dessen Konzentration in der Nährlösung 0,0037–0,016% des Trockengewichtes. Die vegetativen Pflanzenteile nehmen Calcium und Strontium ungefähr in gleichen Mengen auf, die Samen aber speichern nur das für die Pflanze lebensnotwendige Calcium. Dies gilt nicht für die Früchte (Hülsen) von *Pisum*, denn die Fruchtwände enthalten rund 10% des Gesamtstrontiumgehaltes (siehe Tabelle 8). Vergleichsweise fand André (1919) 11% des gesamten Calciums in den köpfchenartigen Blütenständen von *Helianthus annuus*.

Es besteht also ein Unterschied in der Akkumulation von Calcium und Strontium, der sich hauptsächlich im Ausschließungsvermögen der Samen

der höheren Pflanze für Strontium zeigt (siehe Seite 186) und weniger im Verhalten der vegetativen Teile.

Nach Mothes (1961) kommen die gerichteten Stoffströme, besonders jene nach den Früchten und Samen durch aktiven Transport zustande; sie sind sozusagen ein Ausdruck der Vitalität der Pflanze. Offenbar besitzt die Pflanze auch die Fähigkeit, in diese gerichteten Stoffströme regulierend einzugreifen, derart, daß das wichtige Nährelement Calcium in den Früchten und Samen gespeichert wird, das nicht lebensnotwendige Strontium aber von den Samen ausgeschlossen wird.

Es soll nun noch kurz die Bedeutung des Strontiums für die höhere Pflanze diskutiert werden. Schon mehrmals wurde versucht, eine solche Bedeutung nachzuweisen. Mit wenigen Ausnahmen schlugen diese Versuche fehl; so gelang es nie, bei vollständiger Ersetzung des Calciums durch Strontium ein normales Wachstum zu erzielen (Hager, 1909; Hurd-Karrer, 1937, 1939; Loew, 1903; McHargue, 1919; Mevius, 1928; Scharrer und Schropp, 1937; Suzuki, 1900; Voelcker, 1915). In eigenen Versuchen konnte bestätigt werden, daß Strontium keinen fördernden Einfluß auf das Wachstum von Mais und *Pisum* hat (siehe Tabelle 1). Eine interessante Ausnahme stellt die Beobachtung von Wolf und Cesare (1952) dar, daß eine wohl durch Calciummangel hervorgerufene Chlorose bei *Prunus persica* durch Besprühen mit einer Strontiumsalzlösung beseitigt werden konnte. Frey-Wyssling (1935) verwendete für Elemente, die in größeren Mengen aufgenommen werden, für die Pflanze aber ohne Bedeutung sind, den Ausdruck Ballastelemente. Da Strontium diese beiden Voraussetzungen erfüllt, muß es zu den pflanzlichen Ballastelementen gezählt werden.

## Zusammenfassung

### *Methode*

Die Gesetzmäßigkeiten der Strontiumaufnahme wurden an *Zea Mays* und *Pisum sativum* untersucht.

1. Mais und *Pisum* wurden in definierten mineralischen Nährlösungen mit bekanntem Strontiumzusatz kultiviert und in verschiedenen Entwicklungsstadien die Organe der Pflanze und die Kulturlösung auf ihren Strontiumgehalt untersucht.
2. Das getrocknete Pflanzenmaterial wurde naß mit Salpetersäure und Wasserstoffperoxyd verascht.
3. Strontium wurde als Carbonat aus der Aschenlösung gefällt, dieses in verdünnter Salzsäure gelöst und in der Wasserstoff-Sauerstoff-Flamme bei  $\lambda = 460,7 \text{ m}\mu$  flammenspektrophotometrisch bestimmt.

## Ergebnisse

4. Handelsübliche Maiskörner oder Samen von *Pisum* enthalten keine nachweisbaren Mengen an autochthonem Strontium.
5. Mit steigender Strontiumkonzentration in der Nährlösung steigt der relative Strontiumgehalt bei Mais und *Pisum* an und zwar bis zur toxischen Grenzkonzentration, die für Mais bei etwa 1000  $\gamma/\text{ccm}$ , für *Pisum* bei etwa 2000  $\gamma/\text{ccm}$  liegt.
6. Während der vegetativen Entwicklung der Pflanze steigt der Strontiumgehalt (absolut und relativ) durchschnittlich bis etwa zur vollen Entwicklung des 4. Blattes (Mais etwa 30 Tage, *Pisum* etwa 19 Tage) und bleibt dann mehr oder weniger konstant.
7. Vom Beginn der Blütenbildung an bis zur Fruchtbildung nimmt der absolute Strontiumgehalt erneut zu, vor allem in der Wurzel (an *Pisum* untersucht).
8. Gegenüber der vegetativen Phase zeigt die Wurzel während der Fruchtbildung eine größere Geschwindigkeit der Strontiumaufnahme und etwa gleiche Wachstumsgeschwindigkeit, der Sproß auch größere Wachstumsgeschwindigkeit (an *Pisum* untersucht).
9. In einer fruchtenden Erbsenpflanze sind rund 90% des Gesamt-Strontiumgehaltes der ganzen Pflanze in den vegetativen Organen zu finden, etwa 10% in den Hülsen und weniger als 1% in den Samen.
10. Mais nimmt pro Trockengewicht etwa dreimal soviel Strontium auf wie *Pisum*.
11. Die Calcium- bzw. Kaliumkonzentration in der Nährlösung beeinflußt die Strontiumaufnahme.
12. Erhöhung der Calciumkonzentration von 10 auf 500  $\gamma/\text{ccm}$  erniedrigt bei Mais den relativen Strontiumgehalt in der Wurzel je nach Entwicklungszustand bis auf einen Drittel, im Sproß noch wesentlich stärker; dieser Effekt wurde nicht oder nur viel schwächer beobachtet, wenn die Strontiumkonzentration weniger beträgt als etwa 10  $\gamma/\text{ccm}$ . Zum Vergleich mit der Bestimmung von radioaktivem Strontium bedeutet dies  $1 \cdot 10^{-4} \mu \text{ C}/\text{ccm}$  bei einer Aktivität von  $10 \mu \text{ C}/\text{g Sr}$ .
13. Die Strontiumaufnahme hängt von der Strontium- und Calciumkonzentration im Außenmedium zusammen ab.
14. Wird die Kaliumkonzentration gegenüber der optimalen um das Drei- bis Vierfache erhöht, so nimmt der relative Strontiumgehalt bei Mais und *Pisum* schwach ab oder bleibt unverändert; wird sie auf einen Viertel bis einen Achtel herabgesetzt, so steigt der relative Strontium-

gehalt bei Mais um etwa 150 %, während bei *Pisum* kein gleichartiger Effekt beobachtet wurde.

15. Calcium hemmt die Strontiumaufnahme stärker als Kalium (an Mais untersucht).
16. Der Mechanismus der Strontiumaufnahme ist komplexer Natur und noch nicht eindeutig geklärt. Strontium- und Wasseraufnahme verlaufen unabhängig voneinander. Strontium wird durch Ionenaustausch aufgenommen und anschließend in Wurzel und Sproß akkumuliert, vermutlich aktiv unter Energieaufwand (an Mais und *Pisum* untersucht).
17. Die Samen besitzen ein Ausschließungsvermögen für Strontium.
18. Es besteht ein Unterschied in der Akkumulation von Calcium und Strontium, hauptsächlich in den Samen der höheren Pflanze, weniger in den vegetativen Teilen.
19. Strontium kann in bezug auf die höhern Pflanzen als Ballastelement betrachtet werden.

---

Die vorliegende Arbeit wurde im *Botanischen Institut der Universität Basel* auf Anregung und unter Leitung von Herrn Prof. Dr. M. Geiger-Huber ausgeführt. Für sein Interesse an dieser Arbeit möchte ich ihm herzlich danken, ebenso dafür, daß er mir die Mittel des Institutes zur Verfügung gestellt und mir großzügige Hilfe bei den Serienversuchen gewährt hat.

Die *Kommission für Atomwissenschaft* hat die Arbeit durch Gewährung finanzieller Unterstützung wesentlich gefördert, wofür ihr auch hier bestens gedankt sei.

Den Herren cand. phil. E. Fankhauser und cand. phil. P. Frei danke ich herzlich für gelegentliche Unterstützung bei den Versuchen und den Laborantinnen (E. Rudin, C. Muser, M. Petersen, S. Labhard, S. Bowald-Fischer und E. Daniel) und dem technischen Angestellten des Institutes, Herrn H. Müller, für technische Hilfe.

Meine Frau war mir bei den Versuchen eine treue Helferin, ihr gebührt ganz besonderer Dank.

## Zitierte Literatur

### Referierende Arbeiten

- Baumeister W. 1958. Die Aschenstoffe. Handb. d. Pflanzenphysiologie 4, 5–36. Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg.
- Bergmann W. 1958. Methoden zur Ermittlung mineralischer Bedürfnisse der Pflanzen. Handb. d. Pflanzenphysiologie 4, 37–89. Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg.
- Burström H. 1958. Mineralstoffwechsel. Fortschr. d. Botanik 20, 155–168.
- Epstein E. 1956. Die Beeinflussung der Stoffaufnahme: Uptake and ionic Environment. Handb. d. Pflanzenphysiologie 2, 398–408. Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg.
- Fischer H. 1956. Ionenwirkungen. Handb. d. Pflanzenphysiologie 2, 706–746. Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg.
- 1958. Der Transport der Mineralstoffe. Handb. d. Pflanzenphysiologie 4, 289–306. Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg.
- Hoagland D.R. 1948. Lectures on the inorganic Nutrition of Plants. Sec. Printing, Chronica Botanica Company, Waltham, Mass.
- Klechkovsky V.M. 1957. On the Behaviour of Fission Products in Soil, their Absorption by Plants, their Accumulation in Crops (translated from Russian). AEC-TR 2867, 227 Seiten.
- Robertson R.N. 1958. The Uptake of Minerals. Handb. d. Pflanzenphysiologie 4, 243–279. Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg.
- Russell R.S. und Barber D.A. 1960. The Relationship between Salt Uptake and the Absorption of Water by intact Plants. Ann. Rev. Plant Physiol. 11, 127–140.
- Stenlid G. 1958. Salt Losses and Redistribution of Salts in higher Plants. Handb. d. Pflanzenphysiologie 4, 615–637. Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg.
- Stiles W. 1958. Der Haushalt der Mineralstoffe. Strontium and Barium. Handb. d. Pflanzenphysiologie 4, 604–606. Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg.
- Willis L.G. 1939. Bibliography of References to the Literature on the minor Elements and their Relation to Plant and Animal Nutrition. IIIrd ed. Chilean Nitrate Educational Bureau, New York.
- 1948. IVth ed., vol. I.
- Young R.S. 1935. Certain rarer Elements in Soils and Fertilizers and their Role in Plant Growth. Mem. Cornell Agricult. Exper. Stat., No. 174.

### Originalliteratur

- André G. 1919. Distribution et migration des matières salines chez un végétal annuel. Bull. Soc. chim. France 25, 610–613.
- Arnon D.J. und Hoagland D.R. 1940. Crop Production in artificial culture Solutions and in Soils with special Reference to Factors influencing Yields and Absorption of inorganic Nutrients. Soil Science 50, 463–485.
- Bacq C.M. 1959. Pénétration, localisation et redistribution de l'ion  $\text{Ca}^{++}$  chez *Raphanus sativus* L. Bull. Soc. Royale Sciences Liège 28, 275–290.
- Biddulph O., Biddulph S., Cory R. und Koontz H. 1958. Circulation Patterns for Phosphorus, Sulfur and Calcium in the Bean Plant. Plant Physiol. 33, 293–300.
- Nakayama F.S. und Cory R. 1961. Transpiration Stream and Ascension of Calcium. Plant Physiol. 36, 429–436.
- Bötticher R. und Behling L. 1940. Licht, Transpiration, Salzaufnahme und Blattstruktur. Ein Beitrag zum Problem der Sonnen- und Schattenblätter. Flora 134, 1–44.

- Bowen H.J.M. und Dymond J.A. 1955. Strontium and Barium in Plants and Soils. *Proc.Roy.Soc. B*, **114**, 355–368.
- — 1956. The Uptake of Calcium and Strontium by Plants from Soils and nutrient Solutions. *J.Exp.Bot.* **7**, 264–272.
- Briggs G.E., Hope A.B. und Pitman M.G. 1958. Exchangeable Ions in Beet Disks at low Temperature. *J.Exp.Bot.* **9**, 128–141.
- Broyer T.C. und Hoagland D.R. 1943. Metabolic Activities of Roots and their Bearing on the Relation of upward Movement of Salts and Water in Plants. *Amer.J.Bot.* **30**, 261–273.
- Bürgin-Wolff A. 1959. Untersuchungen über die Infektion von Wurzeln durch Knöllchenbakterien. *Ber.Schweiz.Bot.Ges.* **69**, 75–111 (Diss.Basel).
- Bukovac H.J. und Wittwer S.H. 1957. Absorption and Mobility of foliar applied Nutrients. *Plant Physiol.* **32**, 428–435.
- Burlet E. 1940. Über die pflanzliche Organkultur und ihre Anwendung bei physiologischen Untersuchungen. *Ber.Schweiz.Bot.Ges.* **50**, 519–544 (Diss.Basel).
- Burriel-Marti F. und Ramirez-Munoz J. 1957. Flame Photometry. A Manual of Methods and Applications. Elsevier, Amsterdam/London/New York/Princeton.
- Chow T.J. und Thompson T.G. 1955. Flame photometric Determination of Strontium in Sea Water. *Anal.Chem.* **27**, 18–21.
- Cline J.F. und Hungate F.P. 1956. Effect of Strontium and Calcium in Soil on Uptake of Sr<sup>90</sup> by Barley Plants. *AECU-HW 41500*, 7–13.
- Colin H. und de Rufz de Lavison J. 1910. Absorption comparée des sels de Barium, de Strontium et de Calcium par la plante vivante. *Rev.gén. de Botanique* **22**, 337–344.
- Collander R. 1937. Über die Kationenelektion der höheren Pflanzen. *Ber.Deutsch.Bot.Ges.* **55**, 74–81.
- 1941. Selective Absorption of Cations by higher Plants. *Plant Physiol.* **16**, 691–720.
- Comar C.L., Russell R.S. und Wasserman R.H. 1957. Strontium-Calcium Movement from Soil to Man. *Science* **126**, 485–492.
- Diamond J.J. 1955. Flame photometric Determination of Strontium in Portland Cement. *Anal.Chem.* **27**, 913–915.
- Dieulafait L. 1877. La strontiane, sa diffusion dans la nature minérale. *C.r.Acad.Sci. Paris* **84**, 1303.
- Dios Lopez Gonzales J. De und Jenny H. 1958. Modes of Entry of Strontium into Plant Roots. *Science* **128**, 90–91.
- Drescher-Kaden F.K. und Schwanitz F. 1956. Über den Strontium- und Calciumgehalt in Pflanzen eines strontiumhaltigen Standorts. *Zschr.f.Bot.* **44**, 501–504.
- Ebert V.A. 1955. Versuche über die quantitative Bestimmung der  $\beta$ -Indolylessigsäure (Heteroauxin) und ihre Lokalisierung im Gewebe der Pflanze. *Phytopath. Zschr.* **24**, 216–242 (Diss. Basel).
- Ehrler W.L., Romney E.M. und Hamner K.C. 1955. The Effect of certain environmental Factors on Calcium, Phosphorus and Strontium Uptake by Barley. *UCLA* **351**, 22 p.
- Emmert F.H. 1961. Evidence of a Barrier to lateral Penetration of P-32 across Roots of intact transpiring Plants, based on Measurements of Xylem Stream Composition. *Physiol.Plantarum* **14**, 478–487.
- Enzmann J. 1951/52. Der Einfluß des Kalkes auf die relative Transpiration der Gerste. *Wiss.Z.Univ.Leipzig, H.* **2**, 1–76.

- Epstein E. und Leggett J.E. 1954. The Absorption of Alkaline Earth Cations by Barley Roots: Kinetics and Mechanism. *Amer. J. Bot.* **41**, 785–791.
- Fisher R.A. 1946. *Statistical Methods for Research Workers*. Oliver and Boyd, Edinburgh/London.
- und Yates Fr. 1948. *Statistical Tables for biological, agricultural and medical Research*. Oliver and Boyd, London/Edinburgh.
- Fowler E.B. und Christenson C.W. 1959. Effect of Soil Nutrients on Plant Uptake of Fallout, Soil Calcium and Potassium decrease  $Sr^{90}$  / Calcium and  $Cs^{137}$  / Potassium Ratios. *Science* **130**, 1689–1693.
- Frei P. 1963. Die Aufnahme von Strontium durch *Zea Mays* L. in Mischkultur mit Bodenpilzen. *Ber. Schweiz. Bot. Ges.*, im Druck (Diss. Basel).
- Frey-Wyssling A. 1935. Die unentbehrlichen Elemente der Pflanzennahrung. *Naturwissenschaften* **23**, 767–769.
- Hager J. 1909. Kulturversuche mit höheren Pflanzen über die Aufnahme von Strontium, Barium und Magnesium. *Arb. Landw. Versuchsstat. Marburg*.
- Handley R. und Overstreet R. 1961. Uptake of Calcium and Chlorine in Roots of *Zea Mays*. *Plant Physiol.* **36**, 766–769.
- Haselhoff E. 1893. Versuche über den Ersatz des Kalkes durch Strontian bei der Pflanzenernährung. *Landwirtschaftl. Jahrb.* **22**, 851–861.
- Headden W.P. 1921. Titanium, Barium, Strontium and Lithium in certain Plants. *Colorado Agr. Expt. Sta. Bull.* **267**.
- Herrmann R. 1956. *Flammenphotometrie*. Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg.
- Hinsvark O.N., Wittwer S.H. und Sell H.M. 1953. Flame photometric Determination of Calcium, Strontium and Barium in a Mixture. *Anal. Chem.* **25**, 320–322.
- Hofstetter J. 1953. Die flammphotometrische Bestimmung der Alkalien und Erdalkalien (Diss. ETH Zürich).
- Hollander T., Borgers A.J. und Alkemade C.T.J. 1956. A Contribution to the Application of Flame Photometry on Ca, Sr, Ba and Li. *Appl. Sci. Res. B*, **5**, 409–427.
- Hurd-Karrer A.M. 1937. Rubidium and Strontium Toxicity to Plants inhibited by Potassium and Calcium respectively. *J. Wash. Acad. Sci.* **27**, 351–353.
- 1939. Antagonism of certain Elements essential to Plants toward chemically related toxic Elements. *Plant Physiol.* **14**, 9–29.
- Hylmö B. 1953. Transpiration and Ion Absorption. *Physiol. Plantarum* **6**, 333–405.
- Ito S. und Hiroshi T. 1959. On Absorption and Distribution of  $Sr^{90}$  by lowland Rice and Wheat Plants. *Proc. Crop Sci. Soc. Japan* **28**, 160–163.
- — Toshiyuki M. und Nobuichi M. 1961. On the foliar Application and the Distribution of  $Sr^{90}$  in Sugar Beet Plants. *Proc. Crop Sci. Soc. Japan* **29**, 376–378.
- Jacobson L. und Overstreet R. 1947. A Study of the Mechanism of Ion Absorption by Plant Roots using radioactive Elements. *Amer. J. Bot.* **34**, 415–420.
- — 1948. The Uptake by Plants of Plutonium and some Products of nuclear Fission adsorbed on Soil Colloids. *Soil Science* **65**, 129–134.
- Johns C.G. 1955. The Absorption and Distribution of Radiostrontium ( $Sr^{89}$ ) and Ruthenium ( $Ru^{103}$ ) in certain vegetable Crops (Thesis). *AECU* **3101**, 28 p.
- Klechkovsky V.M. und Guliakin I.V. 1958. Behaviour of tracer Amounts of Strontium, Caesium, Ruthenium and Zirconium in Soils and Plants according to the Data of Investigations with radioactive Isotopes of these Elements. *Radioisotopes in scientific Research* **4**, 150–172. Pergamon, London/New York/Paris/Los Angeles.

- Latshaw J.L. und Miller E.C. 1924. Elemental Composition of the Corn Plant. *J. agric. Res.* **27**, 845–860.
- Lee C.C. 1959. Distribution of Radioactivity in Wheat Plants grown in the Presence of  $Sr^{90}$ . *Science* **129**, 1230.
- Libby W.F. 1958. Beneficiation of Soils contaminated with  $Sr^{90}$ ; beneficial Effects of Potassium. *Science* **128**, 1134–1135.
- Loew O. 1903. Einige Bemerkungen zur Giftwirkung der Salze des Magnesiums, Strontiums und Baryums auf Pflanzen. *Landwirtschaftl. Jahrb.* **32**, 509–515.
- Lundegardh H. 1929. Die quantitative Spektralanalyse der Elemente, 1. Teil. Fischer, Jena.
- 1934. 2. Teil. Fischer, Jena.
- Mach F. und Herrmann R. 1934. Nährstoff- und Aschenanalysen von wirtschaftseigenen Futtermitteln. *Landwirtschaftl. Versuchsstat.* **119**, 3–173.
- Martin D.C. 1954. The Absorption and Translocation of Radiostrontium by the Leaves, Fruits and Roots of certain vegetable Plants. Zusammenfassung in: *Diss. Abstracts* **14**, No. 2, 1875.
- Martin R.P., Newbould P. und Russell R.S. 1958. Discrimination between Strontium and Calcium in Plants and Soils. *Radioisotopes in scientific Research* **4**, 173–190. Pergamon, London/New York/Paris/Los Angeles.
- McHargue J.S. 1919. Effects of certain Compounds of Barium and Strontium on the Growth of Plants. *J. agric. Res.* **16**, 183–194.
- McLean E.O., Arscott T.G. und Volk V.V. 1960. Adsorption and Release of Strontium from Clays and Soils with Equilibration, Isotopic Tracer and Plant Uptake Techniques. *Soil Sci. Soc. Proc.* **24**, 453–457.
- Menzel R.G. 1954. Competitive Uptake by Plants of Potassium, Rubidium, Cesium and Calcium, Strontium, Barium from Soils. *Soil Science* **77**, 419–425.
- und Heald W.R. 1955. Distribution of Potassium, Rubidium, Cesium, Calcium and Strontium within Plants grown in nutrient Solutions. *Soil Science* **80**, 287–293.
- — 1959. Strontium and Calcium Contents of Crop Plants in Relation to Exchangeable Strontium and Calcium in the Soil. *Soil Sci. Soc. Proc.* **23**, 110–112.
- Mevius W. 1928. Weitere Beiträge zum Problem des Wurzelwachstums. *Jahrb. wiss. Bot.* **69**, 119–190.
- Middleton L.J. 1958. Absorption and Translocation of Strontium and Caesium by Plants from foliar Sprays. *Nature* **181**, 1300–1303.
- und Russell R.S. 1958. The Interaction of Cations in Absorption by Plant Tissues. *J. Exp. Bot.* **9**, 115–127.
- Milbourn G.M., Ellis F.B. und Russell R.S. 1959. The Absorption of radioactive Strontium by Plants under Field Conditions in the United Kingdom. *J. Nuclear Energy* **10**, 116–132.
- Moore D.P., Jacobson L. und Overstreet R. 1961. Uptake of Calcium by excised Barley Roots. *Plant Physiol.* **36**, 53–57.
- Mothes K. 1961. Aktiver Transport als regulatorisches Prinzip für gerichtete Stoffverteilung in höheren Pflanzen. *Biochemie des aktiven Transports*, 189–204. Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg.
- Neel J.W., Olafson J.H., Steen A.J., Gillooly B.E., Nishita H. und Larson K.H. 1953. Soil-Plant Interrelationships with Respect to the Uptake of  $Sr^{90}$ ,  $Cs^{137}$ ,  $Ru^{106}$ ,  $Ce^{144}$  and  $Y^{91}$ . *UCLA* **247**, 44 p.
- Olsen C. 1948. The mineral, nitrogen and sugar Content of Beech Leaves and Beech Leaf Sap at various times. *C.r. Trav. Labor. Carlsberg, Sér. chim.* **26**, 197–230.

- Pedretti E. 1958. Über Bestimmung und Verteilung autochthoner Spurenelemente in jungen Maispflanzen. Ber. Schweiz. Bot. Ges. **68**, 103–145 (Diss. Basel).
- Ramage H. 1936. Biological Distribution of Metals. Nature **137**, 67.
- Rediske J.H., Cline J.F. und Selders A.A. 1955. The Absorption of Fission Products by Plants. AECU-HW **36734**, 17 p.
- und Selders A.A. 1953. The Absorption and Translocation of Strontium by Plants. Plant Physiol. **28**, 594–605.
- Robinson W.O., Steinkoenig L.A. und Miller C.F. 1917. The Relation of some of the rarer Elements in Soils and Plants. U.S. Dept. Agr. Bull. **600**.
- Romney E.M., Alexander G.V., Le Roy G.M. und Larson K.H. 1959a. Influence of stable Sr on Plant Uptake of Sr<sup>90</sup> from Soils. Soil Science **87**, 42–45.
- — — Rhoads W.A., Neel J.W. und Larson K.H. 1956. Effects of Calcium and Strontium on Plant Uptake of Sr<sup>90</sup> and stable Strontium from nutrient Solutions and Soils. UCLA **374**, 61 p.
- — Rhoads W.A. und Larson K.H. 1959b. Influence of Calcium on Plant Uptake of Sr<sup>90</sup> and stable Strontium. Soil Science **87**, 160–165.
- Neel J.W., Nishita H., Olafson J.H. und Larson K.H. 1957. Plant Uptake of Sr<sup>90</sup>, Y<sup>91</sup>, Ru<sup>106</sup>, Cs<sup>137</sup> and Ce<sup>144</sup> from Soils. Soil Science **83**, 369–376.
- Rhoads W.A. und Larson K.H. 1954. Plant Uptake of Sr<sup>90</sup>, Ru<sup>106</sup>, Cs<sup>137</sup> and Ce<sup>144</sup> from three different Types of Soils. UCLA **294**, 28 p.
- Rudin P.E. 1956. Versuche zur Physiologie der Knöllchenbildung bei *Pisum sativum* L. Phytopath. Zschr. **26**, 57–80 (Diss. Basel).
- Russell R.S. 1958. Deposition of Sr<sup>90</sup> and its Content in Vegetation and in human Diet in the United Kingdom. Nature **182**, 834–839.
- und Milbourn G.M. 1957. Rate of Entry of radioactive Strontium into Plants from Soil. Nature **180**, 322–324.
- und Shorrocks V.M. 1958. The Effect of Transpiration on the Absorption of inorganic Ions in intact Plants. Radioisotopes in scientific Research **4**, 286–303. Pergamon, London/Paris/New York/Los Angeles.
- — 1959. The Relationship between Transpiration and the Absorption of inorganic Ions by intact Plants. J. Exp. Bot. **10**, 301–316.
- und Squire H.M. 1958. The Absorption and Distribution of Strontium in Plants. I. Preliminary Studies in Water Culture. J. Exp. Bot. **9**, 262–276.
- Sandström B. 1950. The Ion Absorption in Roots lacking Epidermis. Physiol. Plantarum **3**, 496–505.
- Scharrer K. und Heilenz S. 1959. Zur Methodik der quantitativen Bestimmung kleinster Mengen Strontium in Pflanzen und Böden. Atompraxis **5**, 170–172.
- und Schropp W. 1937. Über die Wirkung von Strontium- und Bariumionen auf das Wachstum einiger Pflanzen. Bodenk. u. Pfl. ernähr. **3**, 369–385.
- Schilling G. 1961. Der Einfluß von Alterungsprozessen auf die Verteilung von Calcium und Strontium im Erbsenblatt. Biol. Zentralbl. **80**, 33–36.
- Schmidt O. 1936. Die Mineralstoffaufnahme der Pflanze als Funktion einer Wechselbeziehung zwischen inneren und äußeren Faktoren. Zschr. f. Bot. **30**, 288–334.
- Selders A.A. 1951. Uptake of Strontium by several Species of Plants. AECU-HW **22242**.
- Cline J.F. und Rediske J.H. 1956. Uptake of radioactive Elements from "Bravo" Test Site Soil. AECU-HW **41500**, 87–92.
- Rediske J.H. und Palmer R.F. 1953. The Absorption and Translocation by Plants of radioactive Elements from "Jangle" Soil. AECU-HW **27620**, 12 p.

- Sudia T.W. und Linck A.J. 1961. The Effect of pH on the Absorption of Sr<sup>89</sup>, P<sup>32</sup> and Fe<sup>59</sup> Ions by Leaves of *Zea Mays*. Ohio Jour.Sci. **61**, 107–112.
- Suzuki U. 1900. Can Strontium and Barium replace Calcium in Phanerogams? Bul.Col. Agr.Imp.Univ.Tokyo **4**, 69–79.
- Taylor A.E. und Paige H.H. 1955. Determination of microgram Quantities of Strontium in Solution. Anal.Chem. **27**, 282–284.
- Trimble H. 1897. On the Occurrence of Strontium in Plants. Amer. J. Pharm. **69**, 296–297.
- Vöchting A. 1953. Über die Zinkaufnahme von *Zea Mays* L. und *Aspergillus niger* v.Tiegh. in Einzelkultur und in Mischkultur. Ber.Schweiz. Bot. Ges. **63**, 103–162 (Diss.Basel).
- Voelcker J.A. 1915. The Influence of Strontium Salts on Wheat. J.Roy.Agr.Soc. **76**, 344–351.
- Vose P.B. und Koontz H.V. 1959. Uptake of Strontium by Pasture Plants and its possible Significance in Relation to the Fall-out of Strontium-90. Nature **183**, 1447–1448.
- Wagner B. 1928. Tabellen zum Eintauchrefraktometer. II.Auflage. Selbstverlag, Sondershausen.
- Wagner H. 1932. Zum Wachstumsverlauf verschiedener Getreidearten, insbesondere von Hafer. Z.Pflanzenernähr., Düng. u. Bodenkde. A, **25**, 48–102.
- Walsh Th. 1945. The Effect on Plant Growth of substituting Strontium for Calcium in acid Soils. Proc.Irish Acad. B, **50**, 284–294.
- Watanabe H. und Kendall K.K. 1955. Flame Spectrograms: I. Common Metals. Appl. Spectr. **9**, 132–140.
- Wöstmann E. 1942. Der Einfluß von Kalium und Calcium auf den Wasserhaushalt der Pflanzen. Jahrb.wiss.Bot. **90**, 335–381.
- Wolf B. und Cesare S.J. 1952. Response of field-grown Peaches to Strontium Sprays. Science **115**, 606–607.
- Wright K.E. 1939. Transpiration and Absorption of mineral Salts. Plant Physiol. **14**, 171–174.