

**KfK 4452**  
**August 1988**

**Untersuchungen zum  
Boden/Pflanzen-Transfer  
von Np-237, Pu-238, Am-241  
und Cm-244**

**M. Pimpl**  
**Hauptabteilung Sicherheit**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



**KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE**

**Hauptabteilung Sicherheit**

**KfK 4452**

**Untersuchungen zum Boden/Pflanzen-Transfer von  
Np-237, Pu-238, Am-241 und Cm-244**

**M. Pimpl**



**Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe**

Als Manuskript vervielfältigt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

## **Untersuchungen zum Boden/Pflanzen-Transfer von Np-237, Pu-238, Am-241 und Cm-244**

### **Zusammenfassung**

In einem Gewächshaus für radioökologische Untersuchungen wurde die Wurzel Aufnahme von Np, Pu, Am und Cm aus 5 verschiedenen Böden in 19 Nutzpflanzen gemessen, wobei den Böden die 4 Nuklide im Konzentrationsbereich zwischen 1-20 Bq/g Trockenboden zugesetzt wurden. In 7 aufeinanderfolgenden Vegetationsperioden wurden insgesamt etwa 1500 Transferfaktoren gemessen. Die erhaltenen Ergebnisse zeigen, daß der Boden/Pflanzen-Transfer von folgenden Faktoren bestimmt wird:

- von den chemischen und physikalischen Eigenschaften der einzelnen Nuklide
- von der Pflanzenart und der Pflanzensorte
- von der Art des Bodens
- von der Nutzungsdauer und der Bearbeitung des Bodens

Die gemessenen Transferfaktoren werden mit den Werten verglichen, die zur Berechnung der Strahlenexposition durch Ingestion kontaminierter pflanzlicher Nahrungsmittel in der Bundesrepublik Deutschland zur Zeit verwendet werden.

Die experimentellen Untersuchungen wurden von Anfang 1983 bis Ende 1986 durchgeführt. Die in diesem Bericht zusammengefaßten Ergebnisse sind in Form von Jahresberichten oder Vorträgen bei wissenschaftlichen Tagungen bereits veröffentlicht worden.

## **Investigation of the Soil-to-Plant Transfer of Np-237, Pu-238, Am-241 and Cm-244**

### **Summary**

Inside a greenhouse for radioecological studies the root uptake of Np, Pu, Am, and Cm from 5 different soils into 19 crop plants have been measured. The soils have been artificially contaminated with the 4 nuclides in range from 1-20 Bq/g dry soil. Within 7 vegetation periods about 380 transfer measurements have been performed. The obtained results show that the soil-to-plant transfer is mainly influenced by the following parameters:

- physical and chemical properties of the different radionuclides
- plant species and variety
- soil type
- time of soil utilization and soil management

The transfer factors measured are compared with those data which are proposed for the calculation of the long term radiation burden of the population by ingestion of contaminated food inside the Federal Republic of Germany.

The experiments have been performed from the beginning of 1983 to the end of 1986. The results summarized within this report have already been published in annual reports or as contributions to scientific meetings.

## Inhaltsverzeichnis:

	Seite
1. Einleitung	1
2. Durchgeführte Arbeiten	2
2.1 Entwicklung und Optimierung von Analysemethoden	2
2.2 Beschreibung des Gewächshauses für radioökologische Studien	4
2.3 Entwicklung von Arbeitstechniken für den Pflanzenanbau auf kontaminierten Böden	7
2.4 Messung des Boden/Pflanzen-Transfers von Aktiniden	8
3. Ergebnisse der Untersuchungen	12
3.1 Ergebnisse der Raumluftüberwachung	13
3.2 Ergebnisse auf Kreide	15
3.3 Ergebnisse auf Granit	25
3.4 Ergebnisse auf Gley	33
3.5 Ergebnisse auf Sandboden aus Gorleben	36
3.6 Ergebnisse auf Sandboden aus Spöck	38
4. Diskussion der Ergebnisse	41
4.1 Das Transferverhalten der verschiedenen Aktiniden	41
4.2 Die Aktinidenaufnahme in die verschiedenen Pflanzen	43
4.3 Die Abhängigkeit der Aktinidenaufnahme von der Bodenart	46
4.4 Der Einfluß der Aufzuchtbedingungen auf den Boden/Pflanzen-Transfer der betrachteten Transurane	47
4.5 Vergleich der gemessenen Transferfaktoren mit den zur Berechnung der Strahlenexposition durch Ingestion in der Bundesrepublik vorgeschriebenen Werten	49
5. Schlußfolgerungen	52
6. Literaturverzeichnis	53
7. Anhang	59

## 1. Einleitung:

Beim Betrieb von Kernkraftwerken werden aus den natürlich vorkommenden Elementen Uran und Thorium langlebige Aktiniden gebildet. Der überwiegende Anteil des heute in der Biosphäre vorhandenen Inventars an Aktiniden nicht natürlichen Ursprungs stammt aus oberirdischen Kernwaffenversuchen. Auch aus kerntechnischen Anlagen - Brennstofffabriken, Kernkraftwerken, Wiederaufarbeitungsanlagen und Einrichtungen zur Abfallbeseitigung - werden geringe Mengen Aktiniden mit der Abluft und dem Abwasser in die Umgebung abgegeben, allerdings sind diese Emissionen so gering, daß sie gegenüber dem Fallout zu vernachlässigen sind. Von praktischer Bedeutung sind die Elemente Neptunium, Plutonium, Americium und Curium, die zu den radioaktiven Stoffen mit höchster Radiotoxizität gehören. Ursache dieser hohen Radiotoxizität ist die hohe Energie der  $\alpha$ -Strahlung, die große Ionisierungsdichte von  $\alpha$ -Strahlen und die lange effektive Verweilzeit der Transurane im menschlichen Körper. Um eine realistische Abschätzung der Langzeitexposition der Bevölkerung durch die Freisetzung dieser Nuklide - insbesondere für den Fall einer unfallbedingten Freisetzung - vornehmen zu können, ist es notwendig, die Verteilung dieser Transurane in der Biosphäre zu untersuchen, ihr Verhalten in der Umwelt zu verstehen und ihre Wege zum Menschen zu verfolgen.

Die Aufnahme der in der Biosphäre vorhandenen Radionuklide in den Menschen erfolgt durch die Atmung, das Trinkwasser und die Nahrungsmittel. Betrachtet man das Langzeitverhalten der Transurane, nachdem sie in der Umwelt abgelagert wurden, und legt die Erkenntnisse aus kurz- und mittelfristigen Untersuchungen zugrunde, so ergibt sich eine Langzeitexposition der Bevölkerung durch Ingestion kontaminierter Nahrungsmittel, wobei die Radionuklide hauptsächlich durch Wurzelaufnahme in die pflanzlichen Nahrungsmittel gelangen. Resuspensionseffekte tragen in der ersten Zeit nach der Ablagerung auf der Bodenoberfläche nennenswert zur Pflanzenkontamination bei, werden aber mit der Zeit durch ständiges Umpflügen der landwirtschaftlich genutzten Böden und der damit stattfindenden Verdünnung mit Boden stark zurückgedrängt.

In der Literatur sind in den letzten 25 Jahren viele Arbeiten zum Boden/Pflanzen-Transfer von Plutonium veröffentlicht worden. Auch für Americium liegen zahlreiche Untersuchungen vor, während für Curium und Neptunium nur wenige Arbeiten erschienen sind (zusammenfassende Artikel siehe /1/ bis /4/). Die von verschiedenen Arbeitsgruppen mitgeteilten Transferfaktoren weichen sehr stark voneinander ab. Für Plutonium werden für die gleiche Pflanze Werte zwischen  $10^{-9}$  bis  $10^{-3}$  angegeben, für Americium von  $10^{-6}$  bis 1, für Curium von  $10^{-4}$  bis  $10^{-1}$  und für Neptunium von  $10^{-4}$  bis 1. Eine befriedigende Erklärung für die große Schwankungsbreite ist wegen der geringen Anzahl an Daten nicht möglich. Eine Verzerrung der tatsächlichen Vorgänge wird sicherlich auch dadurch bewirkt, daß der komplizierte Boden/Pflanzen-Transfer durch ein zu sehr vereinfachtes Modell beschrieben wird, indem

man eine lineare Beziehung zwischen Bodenkontamination und Konzentration in der Pflanze annimmt ohne Berücksichtigung von Boden-, Pflanzen-, Klima- und nuklidspezifischen Parametern.

Die meisten Transferfaktoren wurden in semiariden Gebieten der USA oder auf Böden aus dieser Region ermittelt, so daß die Übertragung dieser Ergebnisse auf deutsche Umgebungsbedingungen in Frage zu stellen ist. Des weiteren ist bei der Bewertung der Literaturdaten zu beachten, daß fast jede Arbeitsgruppe andere Versuchsbedingungen einhält (verschiedene Böden mit unterschiedlichem Kontaminationslevel, andere Pflanzen mit verschiedenen Aufzuchtbedingungen), was zur Folge hat, daß die einzelnen Ergebnisse nur bedingt miteinander vergleichbar sind. Bei Kenntnis dieses Sachverhaltes stellt sich die Frage, wie realistisch die in der Bundesrepublik vorgegebenen Transferdaten zur Berechnung des Aktinidentransports aus dem Boden in pflanzliche Produkte /5/ das tatsächliche Aufnahmeverhalten wiedergeben, nachdem alle diese Daten aus der Literatur entnommen sind.

## **2. Durchgeführte Arbeiten**

In die Umwelt freigesetzte Aktiniden können auf zwei Wegen in die Pflanzen gelangen: durch die Aufnahme aus dem Boden über die Wurzeln zusammen mit mineralischen Nährstoffen oder durch Aufnahme über die Pflanzenoberfläche nach einer dort erfolgten Ablagerung von aktinidenhaltigen Stäuben oder Aerosolen. Nach Literaturangaben gelangen im allgemeinen nur sehr geringe Mengen der in den Boden eingebrachten Aktiniden über die Wurzeln in die Pflanze, wohingegen die durch Deposition von Aktiniden verursachte Pflanzenkontamination um das 10- bis 100-fache höher sein kann. Für die experimentelle Messung des Boden/Pflanzen-Transfers bedeutet dies, daß die Wurzelaufnahme von Aktiniden nur dann zuverlässig bestimmt werden kann, wenn die Pflanzenaufzucht so erfolgt, daß die Aufnahme von Aktiniden durch Deposition vollständig vermieden wird. Für die hier beschriebenen Untersuchungen wurde dieses Problem durch den Bau eines vollklimatisierten Gewächshauses mit gefilterter Zu- und Abluft und durch die Erarbeitung von speziellen Arbeitstechniken zur Pflanzenaufzucht auf kontaminierten Böden zu lösen versucht.

### **2.1 Entwicklung und Optimierung von Analysemethoden**

Da die Wurzelaufnahme von Aktiniden unter normalen Aufzuchtbedingungen sehr klein ist, sind beim Pflanzenanbau auf kleinen Versuchsflächen auch bei hohen Bodenkontaminationen nur geringe Aktivitätskonzentrationen in den Pflanzen zu erwarten. Untersuchungen zum Boden/Pflanzen-Transfer sind deshalb nur dann mit Aussicht auf Erfolg durchführbar, wenn man über geeignete Verfahren zur Bestimmung der interessierenden Nuklide verfügt, die einerseits wegen der geringen Konzentrationen sehr empfindlich sind und die andererseits möglichst schnell sind, da die komplizierte Fragestellung die Analyse von vielen, unterschiedlichen Proben erfordert.



Ein Verfahren zur empfindlichen und schnellen Bestimmung von Plutonium in Umweltproben /6,7/, das seit mehreren Jahren mit großem Erfolg zur Bearbeitung von Routineproben zur Immissions- und Emissionsüberwachung des Kernforschungszentrums Karlsruhe eingesetzt wird, wurde zuerst zur simultanen Bestimmung von Americium und Curium erweitert /8/, und anschließend so optimiert, daß Neptunium quantitativ mitbestimmt werden kann /9,10/.

In Abb.1 ist ein Schema des verwendeten Analysengangs dargestellt. Die Transurane werden aus dem vollständig veraschten und kohlenstofffreien Probematerial mit Säuren herausgelöst. Zur Ausbeutebestimmung werden zuvor Pu-236, Am-243 und Np-239 zugegeben, wobei chemisch gleiches Verhalten von Am und Cm angenommen wird. Durch sequentielle Extraktion mit Trioctylphosphinoxid / Cyclohexan wird die Np/Pu-Fraktion von der Am/Cm-Fraktion getrennt. Die beiden Fraktionen werden radiochemisch gereinigt. Alpha-spektrometrisch werden Np-237, Pu-239+240, Pu-238 und Pu-236 sowie Am-243, Am-241, Cm-244 und Cm-242 gemessen. Die chemischen Ausbeuten liegen zwischen 60 und 90 %. Als Nachweisgrenze pro Nuklid werden 0,37 mBq/Probe erreicht. Beim von 100 g Boden zur Analyse bedeutet dies eine nachweisbare Konzentration von 3,7  $\mu$ Bq/g, beim Einsetzen von 20 g Pflanzenasche 18,5  $\mu$ Bq/g. Ein Techniker ist in der Lage, vier Proben parallel zu bearbeiten und benötigt für die komplette Analyse ca. 5 Arbeitstage.

## 2.2 Beschreibung des Gewächshauses für radioökologische Studien

Zur Vermeidung der Ablagerung aktivitätshaltiger Aerosole aus der Umgebungsluft auf den Versuchspflanzen wurde für die Untersuchungen des Boden/Pflanzen-Transfers ein vollklimatisiertes Gewächshaus geplant und errichtet, in dem mit radioaktiven Stoffen bis zum 10<sup>1</sup>-fachen der Freigrenze nach Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) /11/, Anlage IV, umgegangen werden kann /12,13/. In Abb. 2 ist der Grundriß der Anlage schematisch dargestellt. Abb. 3 zeigt die Schnitte A-B (Ost-West-Richtung) und C-D (Nord-Süd-Richtung). Vorbereitungsraum und Technikraum sind über eine Schleuse mit dem Gewächshaus, das aus vier Kammern besteht, verbunden. Das Gewächshaus ist eine einschiffige Anlage mit einer Breite von 11,45 m und einer Länge von 12,45 m. Die für Pflanzungen nutzbare Fläche beträgt etwa 150 m<sup>2</sup>. Da aus versuchs- und sicherheitstechnischen Gründen keine Lüftungsöffnungen im Versuchsbereich möglich sind, ist der Schleusen- und Gewächshausbereich voll klimatisiert. Zu- und Fortluft werden über Schwebstofffilter der Sonderklasse S geführt, wobei pro Stunde ein 5-6-facher Luftwechsel erfolgt. Die Temperatur kann für jede Kammer separat geregelt werden, ebenso die Luftfeuchte. Die Regelung wird für jede Kammer zentral durch einen Mikroprozessor gesteuert. Durch eine Zusatzbeleuchtung (Quecksilber-Hochdruckdampflampen) kann zu jeder Tages- und Nachtzeit eine für das Pflanzenwachstum notwendige Mindestbeleuchtung aufrechterhalten werden. Damit ist eine ganzjährige Nutzung des Gewächshauses gewährleistet.

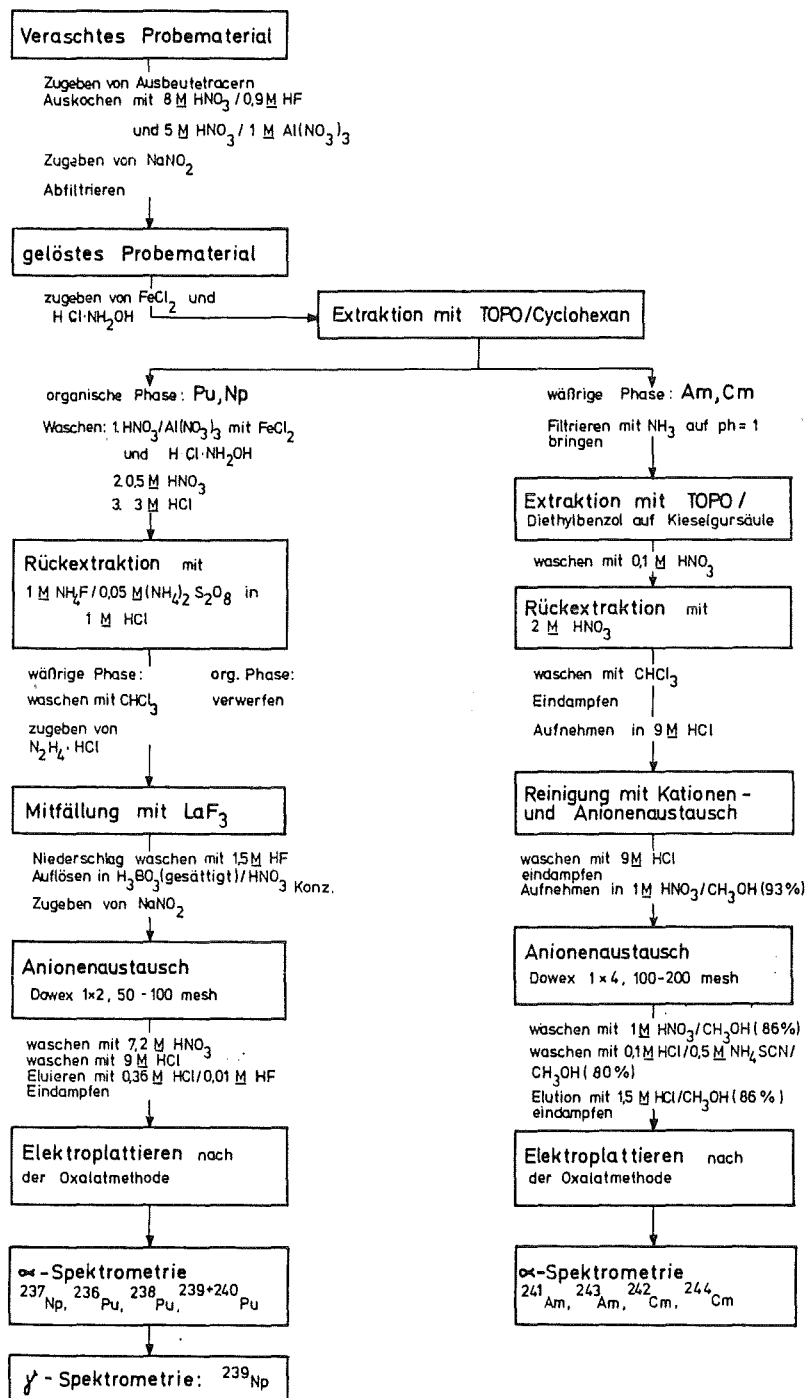


Abb. 1: Schematische Darstellung des Analysenganges zur simultanen Bestimmung von Np, Pu, Am und Cm

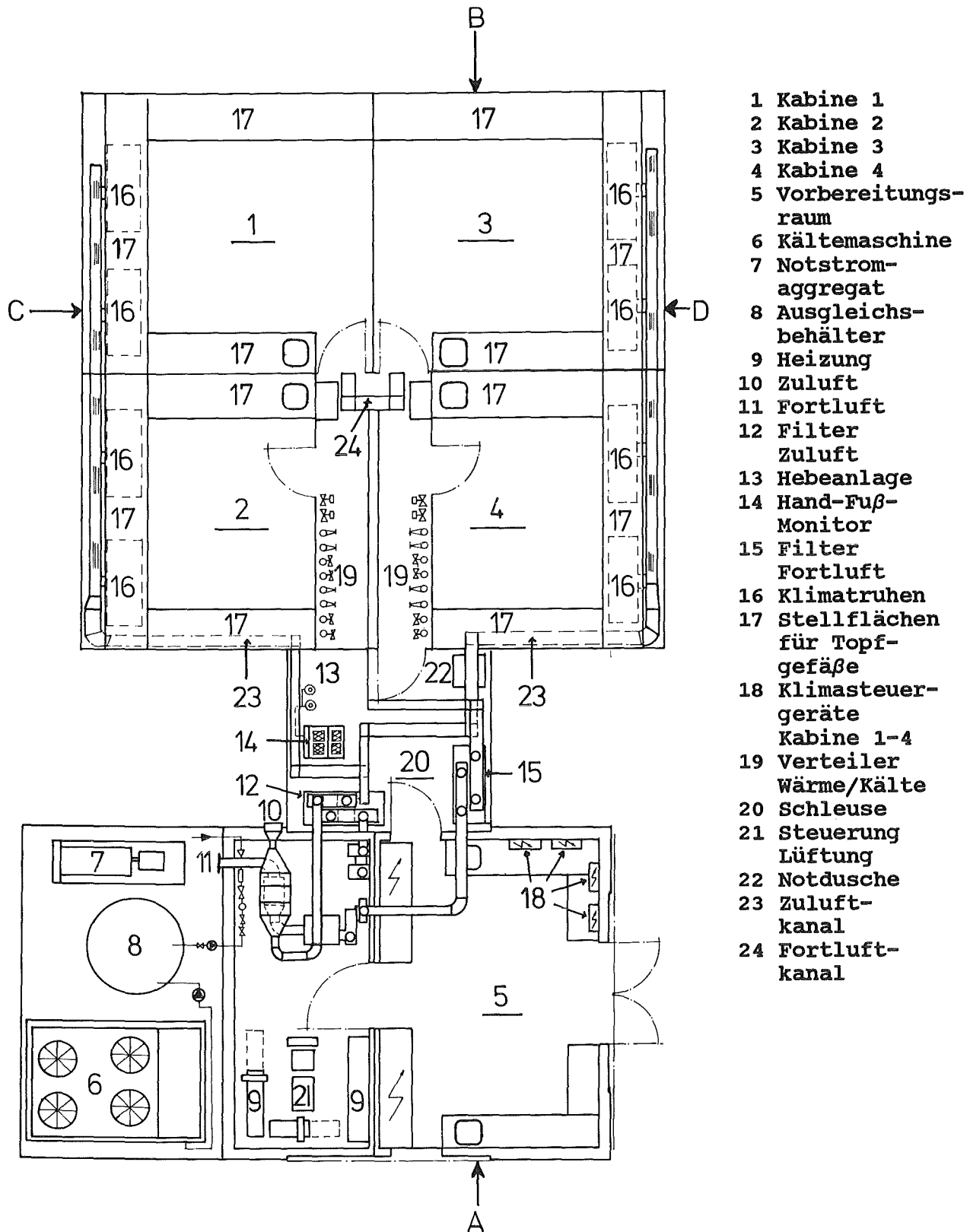
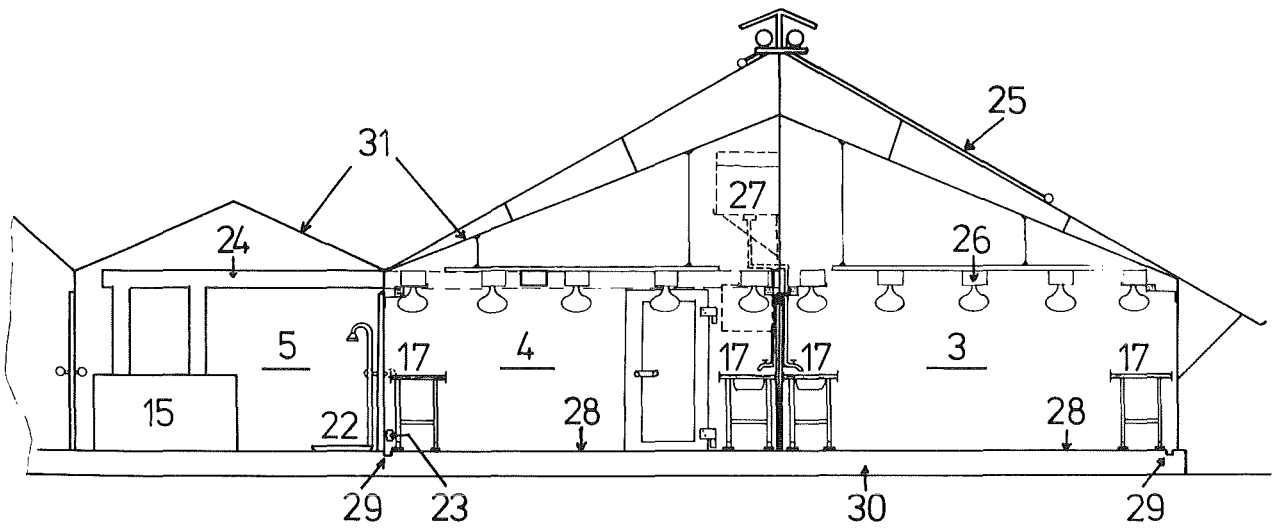


Abb. 2: Grundriß des Gewächshauses für radioökologische Untersuchungen im Kernforschungszentrum Karlsruhe



- |                 |                 |                     |
|-----------------|-----------------|---------------------|
| 1 Kabine 1      | 23 Zuluft-      | 29 Ablaufrinne      |
| 2 Kabine 2      | kanal           | für Kondens- und    |
| 3 Kabine 3      | 24 Fortluft-    | Befeuchtungs-       |
| 4 Kabine 4      | kanal           | wasser              |
| 15 Filter       | 25 Außen-       | 30 Betonfundament   |
| Fortluft        | schattierung    | 31 Verzinkte Stahl- |
| 16 Klimatruhen  | 26 Zusatz-      | konstruktion mit    |
| 17 Stellflächen | beleuchtung     | Kassetten-          |
| für Topf-       | 27 Behälter für | verglasung          |
| gefäße          | entionisiertes  | 32 Sprühanlage      |
| 20 Schleuse     | Wasser          | zur Luft-           |
| 22 Notdusche    | 28 Verzinkte    | befeuchtung         |
|                 | Bodenwanne      |                     |

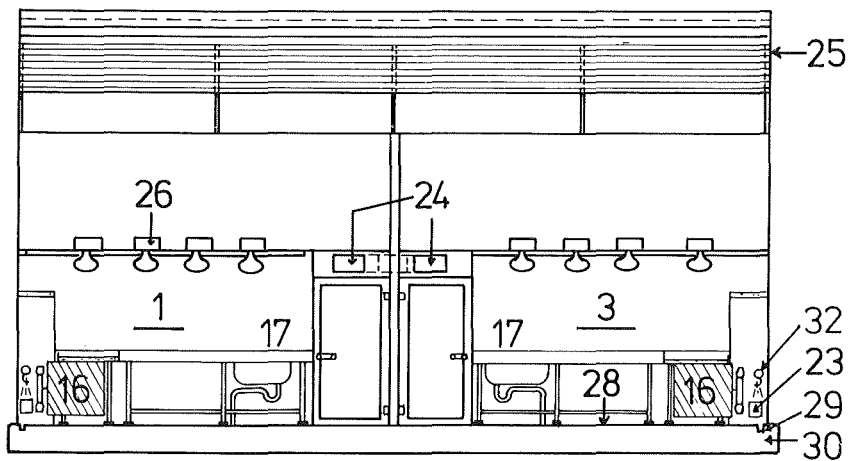


Abb. 3: Schnitt A-B und Schnitt C-D des Gewächshauses

Um zu verhindern, daß radioaktive Stoffe unkontrolliert aus der Anlage in die Umwelt gelangen, wurde das Gewächshaus wie ein Radionuklidlabor ausgelegt. Im Gewächshaus- und Schleusenbereich gewährleistet eine Stahlblechwanne die absolute Dichtigkeit zur Fundamentplatte aus Beton. Die Verglasung der feuerverzinkten Stahlkonstruktion besteht aus Verbundsicherheitsglasscheiben in Kassettenausführung, die gasdicht in Silikon verlegt sind. Die Anlage ist mit einer eigenen Abwasserhebestation ausgerüstet und verfügt über alle notwendigen Einrichtungen der Strahlenschutzüberwachung. Aus sicherheits- und versuchstechnischen Gründen ist die Anlage mit einem Netzersatzaggregat ausgerüstet, sodaß bei Ausfall der Stromversorgung sowohl die Überwachungseinrichtungen als auch die für die Versuchsdurchführung relevanten Klimaaggregate weiter betrieben werden können.

### **2.3 Entwicklung von Arbeitstechniken für den Pflanzenanbau auf kontaminierten Böden**

Auf Grund des niedrigen Boden/Pflanzen-Transfers der Aktiniden und der kleinen Versuchsflächen im Gewächshaus wird wenig Pflanzenmaterial mit geringem Aktivitätsgehalt produziert. Um nun sicherzustellen, daß die Aktivitätskonzentrationen in den Pflanzenproben meßbar sind, also deutlich über der Erkennungsgrenze des benutzten analytischen Verfahrens liegen, sind relativ hohe Bodenkonzentrationen erforderlich. Für die betrachteten Aktiniden müssen die Konzentrationen 1 - 20 Bq/g trockenem Boden betragen, um im geernteten Pflanzenmaterial noch meßbare Konzentrationen zu erhalten. Bei diesen im Verhältnis zum Pflanzenmaterial sehr hohen Bodenkontaminationen muß gewährleistet sein, daß keine Resuspension auftreten kann und als Folge davon die Ablagerung von aktivitätshaltigen Staubpartikeln auf den Pflanzenoberflächen ermöglicht wird.

Resuspensionseffekte im Gewächshaus können zweierlei Ursachen haben: Zum einen kann von der ausgetrockneten Bodenoberfläche durch die Luftumwälzung Feinstaub aufgewirbelt werden, zum anderen können durch die zur Pflanzenaufzucht und Ernte notwendigen Bearbeitungsmaßnahmen Bodenpartikel unkontrolliert verteilt werden. Beide Effekte können zuverlässig vermieden werden, wenn man einerseits die Oberfläche des kontaminierten Bodens stets mit einer geeigneten, möglichst dünnen Deckschicht abschirmt, und andererseits darauf achtet, daß die Bodenoberfläche stets feucht gehalten wird, insbesondere dann, wenn Bodenbearbeitungsmaßnahmen durchgeführt werden müssen.

In umfangreichen Versuchsreihen auf inaktivem Boden wurden verschiedene Materialien auf ihre Eignung als Abdeckschicht zur Verhinderung von Resuspension überprüft /14,15/. Zur Abdeckung bewährte sich die Auflage einer 1,5 bis 2 cm dicken Bodenschicht ohne Aktivitätszusatz oder aber eine gleich dicke Schicht aus gebrochenem Quarzsand, Korngröße 0,7-1,2 mm. Gegenüber inaktivem Boden hat der Quarzsand den Vorteil, daß er sich farblich vom kontaminierten Boden abhebt und, wenn erforderlich, wieder vom

Boden abgenommen werden kann, beispielsweise bei der Ernte von Wurzelfrüchten. Damit kann ein Verdünnen des kontaminierten Bodens mit inaktivem Material vermieden werden, was insbesondere bei Langzeitversuchen zu Störungen führen kann wegen der dann inhomogenen Aktivitätsverteilung im Wurzelbereich der Pflanzen.

#### 2.4 Messung des Boden/Pflanzen-Transfers von Aktiniden

Für die ersten Versuchsreihen wurden drei verschiedene Böden aus dem Raum Schwandorf verwendet: eine Granitverwitterung, eine Kreideverwitterung und ein Gley-Boden aus dem Überflutungsbereich eines Bachlaufes. Ergänzende Untersuchungen wurden auf einem Sandboden aus Gorleben und einem Sandboden aus Spöck durchgeführt. Die Kenndaten der verwendeten Böden sind in Tab. 1 zusammengestellt.

Zur Pflanzenaufzucht wurden verschiedene Gefäße verwendet: Lysimeter mit aus ungestörter Lagerung gestochenem Boden (0,5 m<sup>2</sup> Oberfläche), Wannen mit etwa 250 kg Oberboden (0,6 m<sup>2</sup> Oberfläche) und Kick-Brauckmann-Töpfe mit 8-10 kg Oberboden (0,035 m<sup>2</sup> Oberfläche).

Tab. 1: Chemische und physikalische Kenndaten der verwendeten Böden

	Braunerde aus Granit	Braunerde aus Kreide	Gley Schwandorf	Sand Gorleben	Sand Spöck
pH (CaCl <sub>2</sub> )	5,2	6,8	5,4	4,9	6,8
Org. Substanz %	2,1	1,5	7,1	2,6	2,1
Ton %	5,8	5,5			
Schluff %	19,8	32,9			
Feinsand %	10,0	17,0			
Gesamt N %	0,14	0,08	0,40	nn	0,12
Ca meq/100 g	5,4	4,4			
T-Wert	10,0	6,3		7,1	7,8
S-Wert	8,1	5,5		2,9	6,8

#### Nährstoffgehalt (einstufige Extraktion)

P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ppm	140	440	140	360	180
K <sub>2</sub> O	ppm	580	370	200	120	260
MgO	ppm	120	50		20	40
B	ppm	0,34	0,30		0,19	0,48
Na	ppm	24	18		12	13
Cu	ppm	2,5	3,2		3	4,0
Mn	ppm	129	314		190	145
Mo	ppm	0,24	0,47		0,17	≤ 0,1

Zur Kontamination der Böden wurden Lösungen von Np-237, Pu-238, Am-241 und Cm-244 in Salpetersäure mit pH=1 verwendet. Der Konzentrationsbereich lag zwischen 1 - 20 Bq/g trockenem Boden für jedes Nuklid.

Bei Kick-Brauckmann-Gefäßen wurde die Aktivität mit Hilfe einer einfachen Gießmethode in den feuchten Boden eingebracht. Dazu wurde die für jeden Topf in Portionen zu 500 g abgewogene Bodenfüllung von 9 kg schichtweise eingebracht, leicht verdichtet und dann die Oberfläche jeder Schicht mit einem Aliquot der pro Topf zuzusetzenden aktivitätshaltigen Lösung gleichmäßig befeuchtet, bevor die nächste Schicht aufgelegt wurde. 16 kontaminierte Schichten zu je 500 g wurden mit 1 kg Boden ohne Aktivitätszusatz abgedeckt, um die Resuspension kontaminierter Erde zu vermeiden. Um zu prüfen, ob die Art und Weise der Bodenkontamination einen Einfluß auf den Transfer in die Pflanze hat, wurden bei den Untersuchungen auf Kreideverwitterung parallel dazu Töpfe mit einer anderen Mischtechnik kontaminiert: Die Aktivität wurde in entsprechender Verdünnung dem Boden zugesetzt und durch einen Mischer homogen im feuchten Boden verteilt.

Wannen mit 250 kg Bodenfüllung wurden nur bei den Untersuchungen mit Kreide- und Granitverwitterung eingesetzt. Die Bodenkontamination erfolgte mit der Gießtechnik, wobei eine Schicht 10 kg Boden entsprach.

Aus den Lysimetern wurde bei Kreide- und Granitverwitterung vor der Kontamination eine 3 cm dicke Bodenschicht abgenommen, dann der Oberboden bis zu einer Tiefe von 30 cm mechanisch gelockert. Die Oberfläche wurde nun mit verdünnter aktivitätshaltiger Lösung gleichmäßig befeuchtet. Durch mehrfaches manuelles Vermischen des Oberbodens wurde die aufgegossene Aktivität möglichst homogen bis zu 30 cm Tiefe verteilt. Nach dem Auflegen der 3 cm dicken Abdeckschicht wurde leicht verdichtet und dann eingesät.

Von dem Gley-Boden, der nur als Grünland genutzt wurde, wurden nur zwei Lysimeter aus natürlicher Lagerung gestochen. In einem davon wurde nach Abnehmen der Grasnarbe der Oberboden 10 cm tief durch manuelles Einmischen kontaminiert und dann die Grasnarbe zur Abdeckung wieder aufgelegt. Zur Simulation der Feldbedingungen wurde dieses Lysimeter in einer wasserdichten Wanne aufgestellt, wodurch die Anpassung des Grundwasserspiegels an die Schwankungen im Feld ermöglicht wurde.

Der Sandboden aus Gorleben wurde nur für Topfversuche eingesetzt, Pflanzenaufzucht auf dem Sandboden aus Spöck erfolgte nur in Lysimetern. In beiden Fällen wurden die Böden mit der Gießmethode kontaminiert.

Auf der Kreide- und Granitverwitterung wurden unter Einhalten eines Fruchtwechsels Kartoffeln, Mais und Sommerweizen angebaut. Kartoffeln der Sorte "Saphier", Mais der Sorte "Cargill" und Sommerweizen der Sorte "Kolibri" wurden verwendet. In einem Teil der Kulturgefäße wurden, beginnend mit der 2. Vegetationsperiode, drei weitere Kartoffel-Sorten angebaut: "Crista", "Culpa" und

"Granola". Mit den aus ungestörter Lagerung gestochenen Boden gefüllten Lysimetern wurde 7 aufeinanderfolgende Vegetationsperioden lang das Langzeitverhalten der Aktiniden hinsichtlich ihres Boden/Pflanzen-Transfers untersucht. Die mit Oberboden gefüllten Wannen wurden 3 Vegetationsperioden bepflanzt, mit den Kick-Brauckmann-Töpfen wurde über 4 Vegetationsperioden ein kompletter Fruchtwechsel durchgeführt, um festzustellen, ob abnehmende Er-

Tab. 2: Übersicht über die auf den verschiedenen Böden angebaute Pflanzen und Zahl der jeweils analysierten Pflanzenproben

Pflanze	Sorte	Braunerde aus Granit	Braunerde aus Kreide	Gley	Sand Gorleben	Sand Spöck
Mais	Cargill	50	58		8	
Weizen	Kolibri	54	54		4	
Roggen	Halo				4	
Hafer	Fleming				4	
Gerste	Gimpel				4	
Kartoffel	Saphier	20	24			
	Crista	3	2			
	Culpa	6	4			
	Granola	19	21		5	2
Möhren	Gonsen- heimer Treib					2
Lauch	Titan					3
Radieschen	Hildares				4	
Zwiebel	Braunschweiger Riesen					1
Blumenkohl	Delfter Markt					2
Spinat	Matador					1
Tomate	Hildares F1					2
Paprika	Neusiedler					1
Gurke	Bella				4	
Zucchini	Ambassador					1
Busch- bohne	Maxi					11
	Saxa					2
	Marona					1
	Maja					1
	Sotexa					1
	Goldjuwel					1
	Pfalzgräfin					1
	Walo					2
	Fori					1
	Joma					1
Gras				17	8	
Erdbeeren	Splendita					1



träge aufgrund von Bodenmüdigkeit den Transfer verändern. Der Umfang der auf diesen beiden Böden durchgeführten Untersuchungen ist Tab. 2 zu entnehmen.

Der Gley-Boden wurde von Juli 1983 bis März 1986 als Grünland genutzt. Insgesamt 17 Schnitte wurden entnommen und zur Analyse vorbereitet.

Auf dem Sandboden aus Gorleben wurden die in der Bundesrepublik wichtigen Getreide Mais, Weizen, Roggen, Hafer und Gerste angebaut, zusätzlich Kartoffeln und Gras. Als Zwischenfrüchte wurden Radieschen und Gurken gezogen.

Auf dem Sandboden aus Spöck wurden 10 verschiedene Gemüse angebaut, wie sie in jedem Nutzgarten anzutreffen sind. Um festzustellen, wie sich die einzelnen Pflanzensorten in ihrem Aufnahmeverhalten unterscheiden, wurden 10 verschiedene Sorten Buschbohnen parallel angebaut. Eine genaue Aufstellung der verwendeten Pflanzen und Sorten gibt Tab. 2.

Die Nährstoffversorgung erfolgte mit Volldünger "Blau" (12-12-17-2). Bei den Topfversuchen wurde 1 g Dünger/kg Boden eingemischt, bei Lysimetern und Wannen wurde die Startdüngung auf der Basis von 14 g N/m<sup>2</sup> flächendeckend gegeben. Zum Ährenschieben bei Getreide und Fahnschieben beim Mais wurde Stickstoff als Kalkammonsalpeter nachgedüngt: 0,25 g N/Topf und 6 g N/m<sup>2</sup> bei Wannen und Lysimetern. Das Dauergrünland auf dem Gley-Boden erhielt nach der Kontamination und nach dem ersten Schnitt je 15 g N/m<sup>2</sup>.

Die Ernte erfolgte bei Kartoffeln nach vollständigem Absterben des Krautes, bei Weizen und Mais zum Zeitpunkt der Vollreife, und bei den Gemüsearten und Erdbeeren zum Zeitpunkt der Reife der zum Verzehr geeigneten Pflanzenteile. Die Vorbereitung des Ernteguts zur radiochemischen Analyse wurde mit Ausnahme der Kartoffeln einheitlich durchgeführt: Trocknen bei 105 Grad Celsius bis zur Gewichtskonstanz, anschließend Veraschen bei 550 Grad mit Salpetersäurezusatz. Bei Kartoffeln wurden nach der Ernte der ersten Vegetationsperiode die frisch geernteten Knollen sorgfältig gewaschen, ungeschält getrocknet und verascht. Nach der zweiten Vegetationsperiode wurden die geernteten, gewaschenen Kartoffeln gekocht und geschält, und sowohl die geschälten Knollen als auch die Schalen zusammen mit dem Kochwasser wurden zur Analyse vorbereitet. Ab der dritten Vegetationsperiode wurden nur noch die gekochten und dann geschälten Knollen zur Analyse vorbereitet.

Bei Weizen, Roggen, Hafer und Gerste wurden jeweils die ungemahlten Körner analysiert, bei den verschiedenen Gemüsearten jeweils der zum Verzehr geeignete Pflanzenteil. Bei Gras wurde das gesamte Erntegut analysiert, entsprechend wurde beim Anbau von Mais als Futterpflanze der mittlere Nuklidgehalt in der gesamten Pflanze bestimmt. Um eine Vorstellung von der Verteilung der Aktiniden in der Pflanze zu erhalten, wurden zusätzlich einige Maispflanzen in Stengel, Blätter und Kolben zerlegt und die Aktivitätskonzentrationen in den einzelnen Pflanzenteilen gemessen.

### 3. Ergebnisse der Untersuchungen

Die in den veraschten Pflanzenproben gemessenen Konzentrationen an Np-237, Pu-238, Am-241 und Cm-244 wurden in die Konzentrationen in der Pflanzentrockensubstanz umgerechnet. Die Transferfaktoren für jedes Nuklid wurden durch Division der gemessenen Nuklidkonzentration in der Pflanzentrockensubstanz durch die in dem jeweiligen Pflanzungsgefäß vorhandenen Nuklidkonzentration in trockenem Boden berechnet.

Zur weiteren Bearbeitung der erhaltenen Einzelwerte wurde angenommen, daß die Werte einer logarithmischen Normalverteilung gehorchen, wie sie insbesondere bei Merkmalen aus Biologie und Wirtschaft vorherrscht /16,19/. Diese Lognormalverteilung wird beschrieben durch den Medianwert und den Streufaktor. Diese Kennzahlen berechnet man nach folgenden Formeln:

$$\text{Median } M = \exp \left( \frac{\sum_{i=1}^n f_i \cdot \ln x_i}{n} \right)$$

$$\text{Streufaktor } S = \exp \left( \frac{\sum f_i \cdot (\ln x_i)^2 - \frac{(\sum f_i \cdot \ln x_i)^2}{n}}{n - 1} \right)$$

Bei großen Stichprobenumfängen bezeichnet  $x_i$  die Klassenmitte der mit konstanter Klassenbreite klassifizierten Daten,  $f_i$  ist dabei die Häufigkeit pro Klasse. Bei kleinen Stichprobenumfängen werden statt der Klassenmitten die Einzelwerte verwendet, die Häufigkeit  $f_i$  jeder Klasse ist dann gleich Eins. Der Median entspricht in diesem Spezialfall dem geometrischen Mittel.

Beim Vorliegen einer logarithmischen Normalverteilung liegen 68 % der Meßwerte im Bereich zwischen

$$(\text{Median}) \cdot (\text{Streufaktor})^{\pm 1}$$

Will man 95 % der Meßwerte erfassen, so liegen diese im Bereich zwischen

$$(\text{Median}) \cdot (\text{Streufaktor})^{\pm 2}$$

Dies bedeutet, daß eine Verdoppelung des Streufaktors den Bereich, in dem 95 % der Meßwerte enthalten sind, um den Faktor 16 vergrößert. Ein Streufaktor von 1.8 legt also fest, daß 95 % der gemessenen Transferfaktoren innerhalb der Schwankungsbreite von einer Größenordnung liegen, ein Streufaktor von 3.1 bedeutet eine Schwankungsbreite von 2 Größenordnungen und ein Streufaktor von 5.6 kennzeichnet eine Schwankungsbreite von 3 Größenordnungen.

Um eine Aussage über die Streubreite der einzelnen Transfermessungen zu erhalten, wurde in Lysimetern und Wannen die zur

Pflanzung nutzbare Fläche geviertelt und das Erntegut jeder Teilfläche zur Analyse gebracht. Bei Topfversuchen wurden jeweils vier Töpfe parallel untersucht. Bei den Untersuchungen auf Sandboden aus Spöck wurden nur Stichproben der insgesamt geernteten Proben analysiert, die genaue Anzahl ist Tab. 2 zu entnehmen.

Zur übersichtlicheren Darstellung der Vielzahl an Ergebnissen sind die geometrischen Mittelwerte, die Streufaktoren und die Schwankungsbereiche der Parallelmessungen auf den verschiedenen Böden Kreide, Granit, Gley, Sand aus Gorleben und Sand aus Spöck in Tabellen aufgelistet und als Anhang angefügt.

### 3.1 Ergebnisse der Raumluftüberwachung

Zur strahlenschutzmäßigen Überwachung der Raumluft sind im Gewächshaus zusätzlich zu einer kontinuierlich messenden Luftüberwachungsanlage empfindlichere Festfiltermeßstellen installiert: eine in der Schleuse, zwei im Innenflur und je vier in jeder Kabine, jeweils in den Ecken in etwa 1,70 m Höhe. Durch ein Glasfaserfilter von 20 cm Durchmesser, das in eine Filterhalterung eingespannt ist, werden 20 m<sup>3</sup> Raumluft pro Stunde gezogen. Bei jeder Meßstelle wird das Filter wöchentlich gewechselt und das beaufschlagte Filter ausgemessen. Die für die Strahlenschutzüberwachung mit  $\alpha$ -Bruttomessung vorgegebene Nachweisgrenze von 1 mBq/m<sup>3</sup> wurde im Überwachungszeitraum nie überschritten.

Von März 1984 bis März 1986 wurden die Filter von jedem Raum monatlich gesammelt und der Plutoniumgehalt durch radiochemische Analyse bestimmt. Die erhaltenen Meßwerte sind in Tab.3 zusammengestellt. Die in der Raumluft des Gewächshauses gemessenen Pu-Konzentrationen liegen im Mittel eine Größenordnung niedriger als die in der bodennahen Umgebungsluft gemessenen Werte, die zwischen 0,1 - 12  $\mu$ Bq/m<sup>3</sup> schwanken /17/. Die höchsten Werte treten in der Raumluft im Frühjahr und im Herbst auf, also immer zu den Erntezeiten im Gewächshaus. Da in diesen Filterproben stets auch Spuren von Np nachweisbar waren, liegt es nahe, diese erhöhten Konzentrationen in der Raumluft darauf zurückzuführen, daß nicht verhindert werden kann, daß von abgestorbenen Blättern der Kulturen Kartoffeln, Weizen und Mais kleine Teile abbrechen und mit der zur Klimatisierung notwendigen Luftumwälzung gleichmäßig im Raum verteilt werden.

Um einen Eindruck zu haben, ob diese in der Raumluft gemessenen Pu-Konzentrationen durch Deposition auf den Pflanzen einen nennenswerten Beitrag zum Pu-Gehalt der Pflanze beitragen, wurde folgende Abschätzung vorgenommen. Für Kabine 3, in der die Langzeitversuche durchgeführt wurden, wurde die integrale Luftkonzentration  $c_L$  in Bq·s·m<sup>-3</sup> für die jeweiligen Vegetationsperioden berechnet. Den höchsten Wert erhält man mit  $c_L=7,3$  Bq·s·m<sup>-3</sup> für die 1. Vegetationsperiode von April bis September 1984. Multipliziert man diese integrale Luftkonzentration mit der Depositionsgeschwindigkeit  $v_g=0,001$  m/s /5/, so erhält man die auf 1 m<sup>2</sup> deponierte Pu-Menge  $D=0,0073$  Bq/m<sup>2</sup>. Dividiert man nun die pro Flächeneinheit abgelagerte Pu-Menge durch die Bewuchsdichte  $Y=2,4$

kg frisch/m<sup>2</sup>, so ergibt sich die durch Deposition auf der Pflanze verursachte Pu-Konzentration im Pflanzenmaterial  $c_{Pf}=0,003$  Bq/kg frisch, wobei angenommen wird, daß alles auf dieser Fläche abgelagerte Pu auf die Pflanze gelangt und zu einer gleichmäßigen Pflanzenkontamination führt.

Rechnet man nun diese für Frischgewicht erhaltene Konzentration unter der ungünstigen Annahme von 2% Ascherückstand in die Konzentration pro Gramm Asche um, so erhält man einen Wert von 0,15 Bq/kg Asche. Berücksichtigt man noch, daß wegen der kleinen Versuchsflächen nur wenig Pflanzenmaterial geerntet werden konnte und deshalb im Normalfall nur etwa 2 g Asche zur Analyse verwendet wurden, so zeigt ein Vergleich mit den in Kapitel 2.1 aufgeführten Nachweisgrenzen des analytischen Verfahrens, daß die zusätzlich zur Wurzelaufnahme mögliche Pu-Aufnahme in die Pflanze infolge von Deposition Pu-haltiger Partikel aus der Luft vernachlässigbar ist, da sie höchstens im Bereich der mit dem analytischen Verfahren erreichbaren Nachweisgrenze liegt.

Tab. 3: Pu-238 Konzentrationen in der Raumluft des für die Untersuchungen verwendeten Gewächshauses

Zeitraum	Aktivitätskonzentration in $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$					
	Schleuse	Flur	Kabine 1	Kabine 2	Kabine 3	Kabine 4
3 / 84	0,24	0,27	0,09	0,06	0,29	0,22
4 / 84	≤ 0,12	≤ 0,25	≤ 0,06	≤ 0,08	≤ 0,04	≤ 0,05
5 / 84	0,90	0,67	0,32	0,51	1,5	9,7
6 / 84	0,33	0,19	0,10	0,11	1,11	3,3
7 / 84	1,00	0,29	0,08	0,05	0,06	0,05
8 / 84	≤ 0,05	≤ 0,03	0,04	≤ 0,03	0,05	0,04
9 / 84	≤ 0,28	≤ 0,24	≤ 0,12	≤ 0,22	0,46	0,5
10 / 84	≤ 0,17	≤ 0,18	≤ 0,08	≤ 0,13	0,16	0,18
11 / 84	0,70	≤ 0,60	≤ 0,27	1,2	≤ 0,15	0,23
12 / 84	≤ 0,18	≤ 0,23	≤ 0,10	0,40	≤ 0,10	≤ 0,17
1 / 85	≤ 0,06	0,09	0,07	0,11	0,06	0,73
2 / 85	0,16	0,36	0,22	0,09	0,10	1,7
3 / 85	0,26	0,50	0,08	0,07	0,06	0,18
4 / 85	≤ 0,09	0,17	0,03	≤ 0,05	0,06	0,07
5 / 85	≤ 0,06	0,06	0,04	≤ 0,04	≤ 0,02	0,10
6 / 85	≤ 0,08	≤ 0,05	0,04	≤ 0,04	0,06	0,03
7 / 85	≤ 0,12	≤ 0,06			0,69	≤ 0,07
8 / 85	0,10	0,18			0,37	0,14
9 / 85	≤ 0,06	≤ 0,04			0,05	0,04
10 / 85	≤ 0,07	≤ 0,06			0,08	0,05
11 / 85	≤ 0,05	0,07			0,07	≤ 0,03
12 / 85	≤ 0,03	≤ 0,02			≤ 0,03	≤ 0,02
1 / 86	≤ 0,08	0,18			0,04	0,38
2 / 86	≤ 0,08				0,32	0,24
3 / 86	≤ 0,06	≤ 0,06			0,13	0,10

### 3.2 Ergebnisse auf Kreideboden

Die Ergebnisse der Parallelmessungen für Mais, Weizen und Kartoffeln für 7 Vegetationsperioden sind in Tab. A1 im Anhang zusammengestellt. Tab. A2 enthält die Ergebnisse von zusätzlichen Messungen in einzelnen Pflanzenteilen von Mais. In den meisten Fällen liegen die unter gleichen Bedingungen parallel ermittelten Transferfaktoren für eine Pflanze dicht zusammen, das heißt, daß 95 % der gemessenen Werte innerhalb einer Größenordnung liegen.

Durch geometrische Mittelung aller für Mais innerhalb einer Vegetationsperiode in verschiedenen Kulturgefäßen auf Kreide gemessenen Transferfaktoren wurden die in Tab. 4 zusammengefaßten Werte erhalten. Tab. 5 enthält die entsprechenden Werte für Weizen, Tab. 6 diejenigen für Kartoffeln. Bei der Mittelwertbildung wurden die Ergebnisse der 2. und 3. Vegetationsperiode der in Wannen durchgeführten Untersuchungen nicht berücksichtigt, da mehrere Proben eine relativ hohe Aktivitätskonzentration aufwiesen, die auf eine fehlerhafte Bearbeitung der Proben, vermutlich Querkontamination im Labor, zurückzuführen ist.

Es ist deutlich feststellbar, daß in den ersten Vegetationsperioden, wenn mehrere verschiedene Gefäße verwendet wurden, die Schwankungsbereiche der mittleren Transferfaktoren erheblich größer sind als bei den Parallelmessungen. Grund hierfür sind wohl die unterschiedlichen Wachstumsbedingungen in den verschiedenen Aufzuchtgefäßen. Es ist allerdings festzuhalten, daß kein einheitlicher Trend vorliegt, wonach einem Gefäßtyp ein hoher Transfer zuzuordnen wäre und einem anderen ein niedrigerer. Dies läßt den Schluß zu, daß weniger die generell zwischen Topf- und Lysimeterversuche bestehenden Unterschiede in der Wasser- und Nährstoffversorgung sich auf den Transfer auswirken, als vielmehr die in jedem Gefäß in jeder Vegetationsperiode durch die Bearbeitung veränderten Bodenbedingungen. Dazu gehören sowohl Änderungen in der Lagerungsdichte und in der Porenverteilung, als auch Änderungen des pH und des Gehaltes an organischer Substanz durch den Verbleib und die Zersetzung von Wurzeln der vorangehenden Vegetationsperioden. Da für die Untersuchungen nur kleine Versuchsflächen zur Verfügung standen, die intensiv ohne Winterpause genutzt wurden, erscheint es plausibel, daß sich diese nicht reproduzierbaren und nur schwer kontrollierbaren Veränderungen einiger wesentlicher Bodenparameter deutlich auf den Boden-Pflanzen-Transfer auswirken.

In Abb. 4 sind die Änderungen des Transferverhaltens von Mais, Weizen und Kartoffeln auf Kreideboden im Verlauf von sieben aufeinanderfolgenden Vegetationsperioden dargestellt. Bei Mais und Weizen ist eine Zu- oder Abnahme des Transferfaktors um eine oder sogar fast zwei Größenordnungen von einer Vegetationsperiode zur nächsten unter gleichen Versuchsbedingungen zu beobachten. Auch in diesem Fall sind zur Erklärung in erster Linie die Veränderungen im Boden als Folge der intensiven Bewirtschaftung heranzuziehen, da alle anderen relevanten Parameter - Pflanzenart und Sorte, Klima, Wachstumszeit, Pflegemaßnahmen - in den einzelnen Vegetationsperioden so konstant als möglich gehalten wurden.

Tab. 4 : Transferfaktoren für Mais auf Kreideverwitterung  
(Geometrischer Mittelwert aus Topf- und Lysimeter-  
Untersuchungen)

Vegetations- periode	Zur Mittel- wertbildung verwendet	Nuklid	Transferfaktor $\cdot 10^5$		
			Median	Streu- faktor	Schwankungs- bereich (68%)
1983	L, T, T*, W*	Np	510	2,33	220 - 1190
		Pu	8,3	3,59	2,3 - 30
		Am	7,3	3,71	2,0 - 27
		Cm	5,2	3,49	1,5 - 18
1983/84	L, T	Np	1610	4,58	350 - 7370
		Pu	5,6	2,67	2,1 - 15
		Am	9,0	5,19	1,7 - 47
		Cm	6,5	5,35	1,2 - 35
1984	L, T	Np	790	1,59	500 - 1250
		Pu	8,6	4,65	1,8 - 40
		Am	13	2,36	5,6 - 31
		Cm	10	2,59	3,9 - 26
1984/85	L, T, T*	Np	810	1,40	580 - 1130
		Pu	3,6	1,65	2,2 - 5,9
		Am	9,5	1,69	5,6 - 16
		Cm	8,7	1,70	5,1 - 15
1985	L	Np	660	1,06	620 - 700
		Pu	1,9	1,94	1,0 - 3,7
		Am	5,4	1,52	3,6 - 8,2
		Cm	4,2	1,66	2,5 - 7,0
1985/86	L	Np	1960	1,32	1480 - 2590
		Pu	40	1,36	29 - 54
		Am	160	1,42	110 - 220
		Cm	140	1,44	99 - 210
1986	L	Np	1050	*	1010 - 1100
		Pu	4,3	*	4,0 - 4,6
		Am	12	*	10 - 12
		Cm	6,7	*	5,7 - 7,7
Median für sieben Vegetationsperioden					
1983 bis 1986		Np	800	2,41	330 - 1920
		Pu	6,0	3,18	1,9 - 19
		Am	9,9	3,30	3,0 - 33
		Cm	7,7	3,38	2,3 - 26

Tab. 5 : Transferfaktoren für Weizen auf Kreideverwitterung  
(Geometrischer Mittelwert aus Topf- und Lysimeter-  
Untersuchungen)

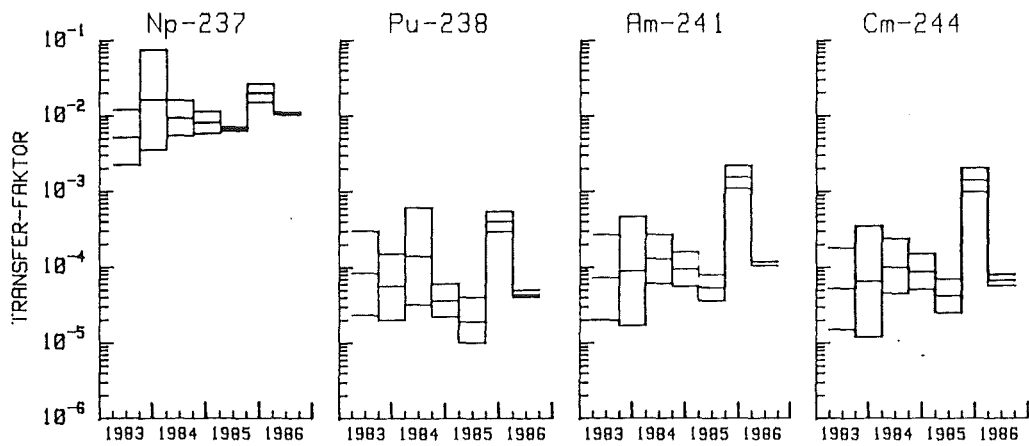
Vegetations- periode	Zur Mittel- wertbildung verwendet	Nuklid	Transferfaktor · 10 <sup>5</sup>				
			Median	Streu- faktor	Schwankungs- bereich (68%)		
1983	L, T, W*	Np	58	1,50	39	-	87
		Pu	5,0	1,45	3,4	-	7,3
		Am	≤ 6,7				
		Cm	≤ 4,3				
1983/84	L, T, T*	Np	78	2,39	32	-	190
		Pu	≤ 1,8				
		Am	3,5	1,94	1,8	-	6,8
		Cm	≤ 5,8				
1984	L, T	Np	120	2,47	50	-	310
		Pu	≤ 0,5				
		Am	≤ 0,9				
		Cm	≤ 0,7				
1984/85	L, T	Np	130	1,93	68	-	250
		Pu	6,7	1,16	5,8	-	7,8
		Am	5,1	1,03	5,0	-	5,3
		Cm	≤ 29				
1985	L	Np	61	1,27	48	-	78
		Pu	≤ 1,5				
		Am	≤ 3,6				
		Cm	≤ 3,7				
1985/86	L	Np	260	1,54	170	-	400
		Pu	3,2	1,49	2,1	-	4,8
		Am	12	1,49	8,0	-	18
		Cm	5,2	1,52	3,4	-	7,9
1986	L	Np	250	2,86	84	-	690
		Pu	≤ 0,3				
		Am	1,1	1,22	0,9	-	1,3
		Cm	≤ 1,0				
Median für sieben Vegetationsperioden							
1983 bis 1986		Np	110	2,32	46	-	250
		Pu	4,3	1,57	2,7	-	6,8
		Am	3,6	2,97	1,2	-	11
		Cm	3,6	2,44	1,5	-	8,8

Tab. 6 : Transferfaktoren für Kartoffeln auf Kreideverwitterung  
(Geometrischer Mittelwert aus Topf- und Lysimeter-  
Untersuchungen ohne Berücksichtigung der Sorten)

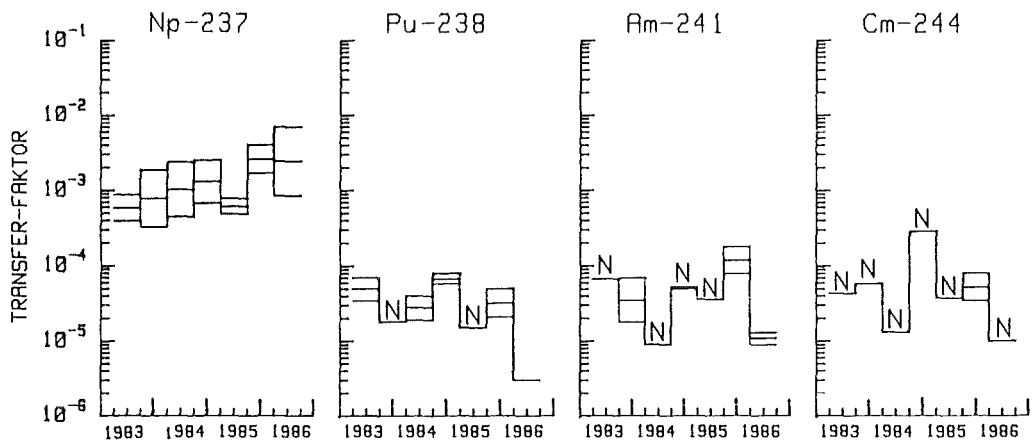
Vegetations- periode	Zur Mittel- wertbildung verwendet	Nuklid	Transferfaktor $\cdot 10^5$				
			Median	Streu- faktor	Schwankungs- bereich (68%)		
1983	L, T, W*	Np	260	2,45	100	-	630
		Pu	200	4,56	43	-	900
		Am	120	1,72	70	-	210
		Cm	82	1,98	41	-	160
1983/84	L, T	Np	340	1,34	250	-	460
		Pu	66	1,62	41	-	110
		Am	90	1,47	61	-	130
		Cm	63	1,38	46	-	87
1984	L, T, T*	Np	220	1,81	120	-	400
		Pu	4,4	2,35	1,9	-	10
		Am	5,0	2,06	2,4	-	10
		Cm	3,7	1,75	2,1	-	6,5
1984/85	L, T	Np	610	1,53	400	-	940
		Pu	10	4,39	2,3	-	44
		Am	9,0	1,84	4,9	-	17
		Cm	7,4	2,06	3,6	-	15
1985	L	Np	420	1,54	270	-	650
		Pu	2,4	1,62	1,5	-	3,9
		Am	4,8	3,77	1,3	-	18
		Cm	8,0	2,90	2,7	-	23
1985/86	L	Np	180	1,87	96	-	340
		Pu	0,8	1,61	0,5	-	1,4
		Am	1,8	1,95	0,9	-	3,5
		Cm	1,6	1,63	1,0	-	2,6
1986	L	Np	510	1,97	260	-	1000
		Pu	6,9	1,24	5,5	-	8,6
		Am	10	1,46	7,0	-	15
		Cm	7,7	1,66	4,6	-	13
Median für sieben Vegetationsperioden							
1983 bis 1986		Np	310	2,07	150	-	630
		Pu	16	8,86	1,8	-	140
		Am	15	5,26	2,9	-	80
		Cm	15	4,67	3,2	-	70



## MAIS



## WEIZEN



## KARTOFFEL

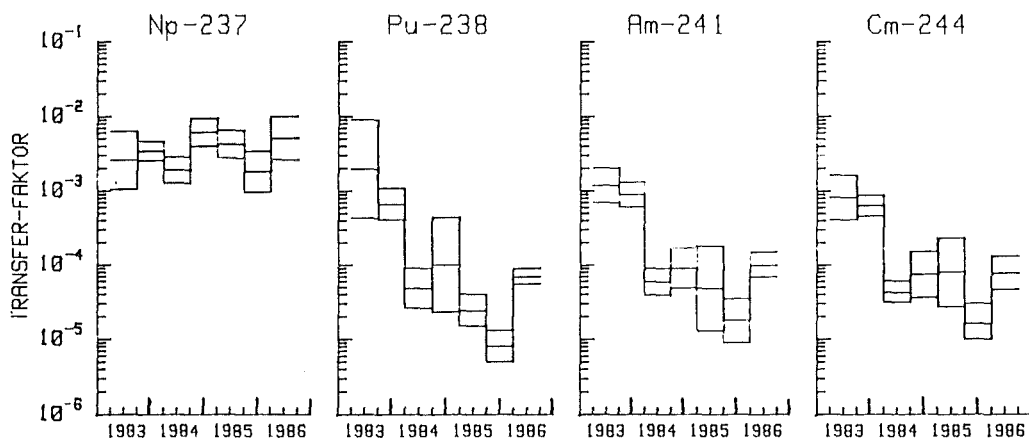


Abb. 4 : Änderungen des Transferfaktors auf Kreide im Verlauf von sieben aufeinanderfolgenden Vegetationsperioden (N bezeichnet Werte unter der Nachweisgrenze)

Bei Kartoffeln vermittelt Abb. 4 für Pu, Am und Cm den Eindruck, daß die Wurzel Aufnahme mit der Zeit drastisch abnimmt, im Falle von Pu fast um 3 Größenordnungen. Der Grund hierfür ist weniger im sogenannten "aging effect" zu suchen, wonach durch chemische Umwandlung der Nuklide im Boden diese in weniger pflanzenverfügbare Form vorliegen, als vielmehr in zwei weitreichenden Änderungen in der Versuchsdurchführung, die bei der Mittelung der Daten nicht entsprechend berücksichtigt werden konnten: zum einen wurden verschiedene Kartoffelsorten angebaut, zum zweiten wurde ab der 2. Vegetationsperiode nicht mehr die ungekochte Knolle mit Schale analysiert, sondern die gekochte und dann geschälte Knolle.

Ab der 2. Vegetationsperiode wurden parallel zu der Sorte Saphier in den Lysimetern weitere Kartoffelsorten angebaut, da die Erträge für die Sorte Saphier insbesondere auf Kreideboden stark zurückgingen und zusätzlich Schwierigkeiten bei der Beschaffung der Saatkartoffeln auftraten. Die Sorten Crista, Culpa und Granola wurden getestet. Die gemessenen Transferfaktoren deuten darauf hin, daß die Wurzel Aufnahme von Pu, Am und Cm in die ganz frühe Sorte Crista höher ist als in die mittelspäten Sorten Saphier, Culpa und Granola /18/, allerdings hat diese Aussage wegen der hohen Schwankungsbreite um die Mittelwerte und die begrenzte Anzahl der Messungen nur orientierenden Charakter.

Nachdem sich in ergänzend durchgeführten Analysen von Aktiniden in Pflanzenteilen gezeigt hatte, daß sich die Aktiniden in der Kartoffelschale anreichern, wurde ab der 2. Vegetationsperiode nicht mehr die gesamte Knolle mit Schale analysiert, sondern die geernteten, gut gewaschenen Knollen wurden mit wenig Wasser in einem Dampfkochtopf gegart. Anschließend wurden die Knollen geschält und dann die geschälten Knollen und die Schalen zusammen mit dem Kochwasser getrennt analysiert. In Tab. 7 sind die in den einzelnen Pflanzungsgefäßen erhaltenen Ergebnisse zusammengefaßt.

Tab. 7: Aktivitätsverteilung in Knollen und Schalen für Kartoffeln auf Kreideboden

Auf- zucht- gefäß	Aktivitätsgehalt in Prozent							
	Np		Pu		Am		Cm	
	Schale	Knolle	Schale	Knolle	Schale	Knolle	Schale	Knolle
L	88,3	11,7	96,6	3,4	95,1	4,9	95,0	5,0
	94,1	5,9	97,8	2,2	97,3	2,7	96,7	3,3
T	92,7	7,3	97,1	2,9	95,9	4,1	94,3	5,7
	94,3	5,7	99,3	0,7	98,8	1,2	98,2	1,8
	90,2	9,8	98,2	1,8	97,7	2,3	97,4	2,6
	94,5	5,5	97,2	2,8	96,4	3,6	95,0	5,0
Mittel	92,4	7,6	97,7	2,3	96,9	3,1	96,1	3,9
	± 2,6	± 2,6	± 1,0	± 1,0	± 1,3	± 1,3	± 1,6	± 1,6

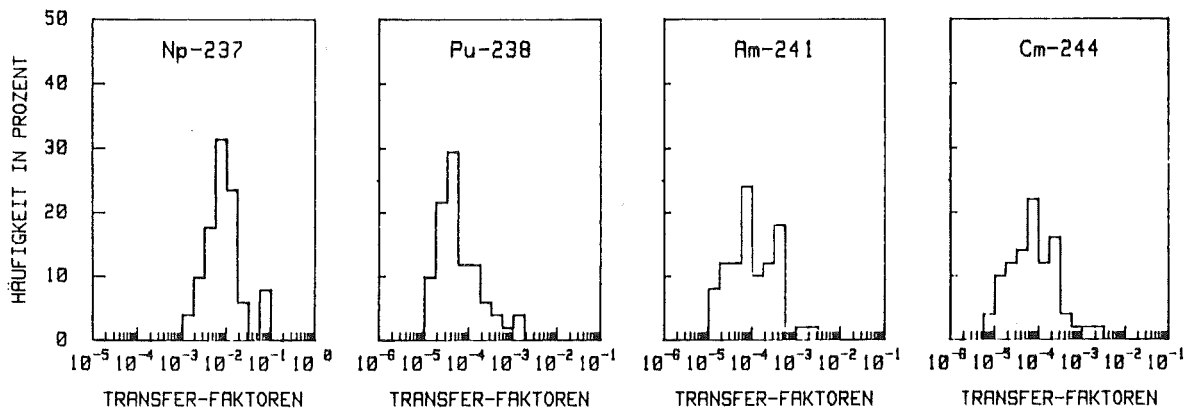
Die Ergebnisse zeigen, daß für alle Nuklide der überwiegende Teil der aufgenommenen Aktivität nicht in der Knolle, sondern in der Schale abgelagert wird. Bei Np sind dies etwa 92 %, bei Pu etwa 98 % und bei Am und Cm etwa 96 %. Der Transferfaktor Boden/geschälte Knolle liegt damit wesentlich niedriger als der Transferfaktor Boden/Knolle mit Schale, der üblicherweise in der Literatur angegeben wird: bei Np um den Faktor 12, bei Pu um den Faktor 50 und bei Am und Cm um den Faktor 25. Da rohe Kartoffeln nicht zum Verzehr geeignet sind, und gegarte Kartoffeln nur in Ausnahmefällen mit den Schalen verzehrt werden, erscheint es gerechtfertigt, den zur Dosisberechnung benötigten Transferfaktor für die gegarte und geschälte Knolle zu ermitteln. Werden die Kartoffeln als Futtermittel verwendet, so kann mit Hilfe der angegebenen Umrechnungsfaktoren der Transferfaktor Boden/Knolle mit Schale berechnet werden.

Die Anreicherung der Aktiniden in den Kartoffelschalen kann im Prinzip durch zwei verschiedene Effekte bewirkt werden. Zum einen können die Nuklide nach der Wurzelaufnahme in die Pflanze sehr spezifisch in den Schalen der Knollen abgelagert werden, zum zweiten wäre es denkbar, daß durch den ständigen Kontakt der Knollen mit der Bodenlösung die dort gelösten Nuklide an der Schale adsorbiert werden und so eine Anreicherung der Aktiniden in den Schalen vorgetäuscht wird. Die durchgeführten Versuche lassen keine Rückschlüsse darauf zu, welcher der beiden Effekte hauptsächlich zur Anreicherung in den Schalen führt. Zieht man zum Vergleich Ergebnisse von Schwermetalluntersuchungen heran, bei denen sehr häufig ebenfalls eine Schwermetallanreicherung in den Schalen beobachtet wurde, so kann man annehmen, daß auch bei Aktiniden nicht die Adsorptionsvorgänge, sondern die Verlagerung der Aktivitäten in den Pflanzen zur Anreicherung in den Schalen führt.

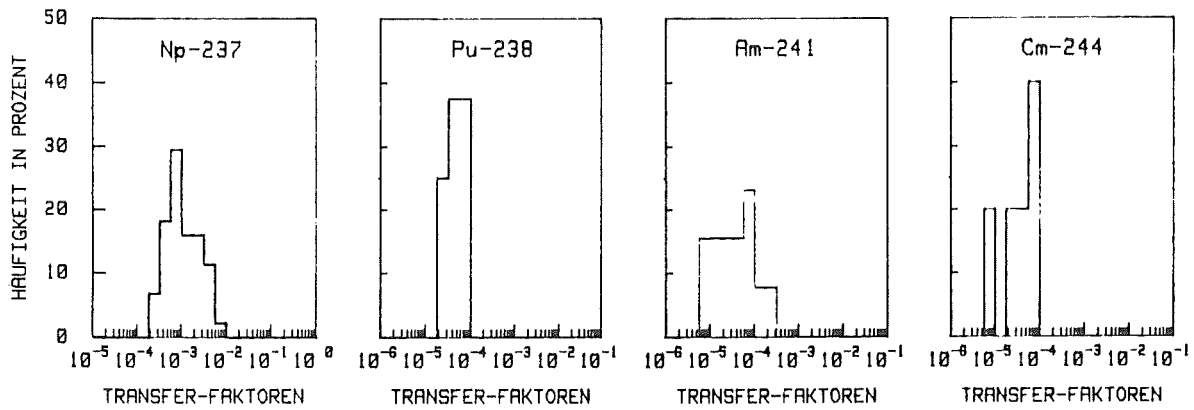
Die geometrischen Mittelwerte von allen in sieben Vegetationsperioden auf Kreideboden erhaltenen Transferfaktoren für Mais, Weizen und Kartoffeln wurden berechnet. Die Median-Werte für Np, Pu, Am und Cm sind zusammen mit den Streufaktoren und den Bereichen, in denen 68 % der Transferfaktoren zu erwarten sind, in den Tab. 4 bis 6 für die einzelnen Pflanzen mit aufgeführt. Aus den Ergebnissen ist erkennbar, daß unter der Voraussetzung eines 95 %-Signifikanzlevels die Transferfaktoren im Falle von Mais und Weizen innerhalb von 2 Größenordnungen liegen, während bei Kartoffeln zwischen niedrigstem und höchstem Wert mehr als 3 Größenordnungen beobachtet werden. Die Ursachen für diese große Schwankungsbreite sind, wie oben beschrieben, auf die Verwendung verschiedener Kartoffelsorten und die Mittelung über Transferfaktoren für Kartoffeln mit und ohne Schale zurückzuführen.

In Abb. 5 sind die für Mais, Weizen und Kartoffeln gemessenen Transferfaktoren entsprechend ihrer Häufigkeit aufgetragen. Bei Mais und Weizen bestätigen die Häufigkeitsverteilungen, daß die erhaltenen Transferfaktoren log-normal verteilt sind. Die Medianwerte und die Schwankungsbereiche entsprechen den in den Tab. 4 bis 6 angegebenen Werten. Das gleiche gilt für die Transferfaktoren für Np in Kartoffeln, während die Häufigkeitsverteilungen von

### MAIS AUF KREIDE



### WEIZEN AUF KREIDE



### KARTOFFEL AUF KREIDE

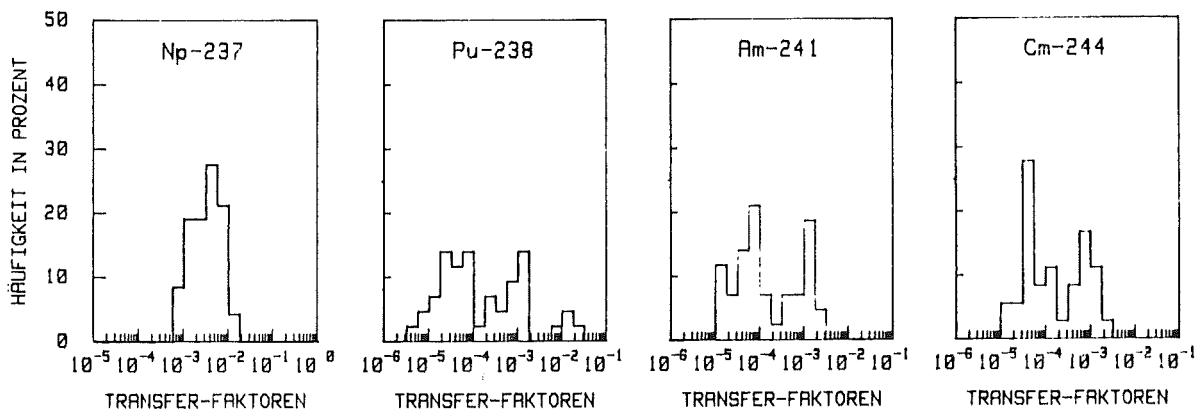


Abb. 5 : Häufigkeitsverteilungen der auf Kreide gemessenen Transferfaktoren für Mais, Weizen und Kartoffeln

Pu, Am und Cm sehr breit sind und mehrere Maxima aufweisen. Als Grund hierfür ist anzunehmen, daß die der Verteilung zugrundeliegenden Daten verschiedenen Grundgesamtheiten angehören, von denen eine jede einer Lognormal-Verteilung gehorcht. Durch Überlagerung der einzelnen Verteilungen erhält man dann eine breite Häufigkeitsverteilung mit mehreren Maxima.

Eine einfache Prüfung einer Verteilung auf Normalität kann durch Eintragen des betreffenden Datenkollektivs in ein Wahrscheinlichkeitsnetz vorgenommen werden. In Abb. 6 sind die auf Kreide gemessenen Pu-Transferfaktoren für Kartoffeln in ein solches Wahrscheinlichkeitsnetz eingetragen. Der Verlauf der Summenlinie läßt erkennen, daß sich die insgesamt gemessenen Pu-Transferfaktoren in 4 Datensätze aufteilen, die jeweils einer Lognormal-Verteilung gehorchen. Rechnet man die Transferfaktoren Boden/Knolle mit Schale mit Hilfe der gemessenen Aktivitätsverteilung zwischen Knolle und Schale in die Transferfaktoren Boden/geschälte Knolle um, so erhält man eine Summenlinie, die sich im Bereich zwischen 10 und 90 % durch eine Gerade approximieren läßt. Die mehrgipflige Häufigkeitsverteilung für Kartoffeln in Abb. 5 kann

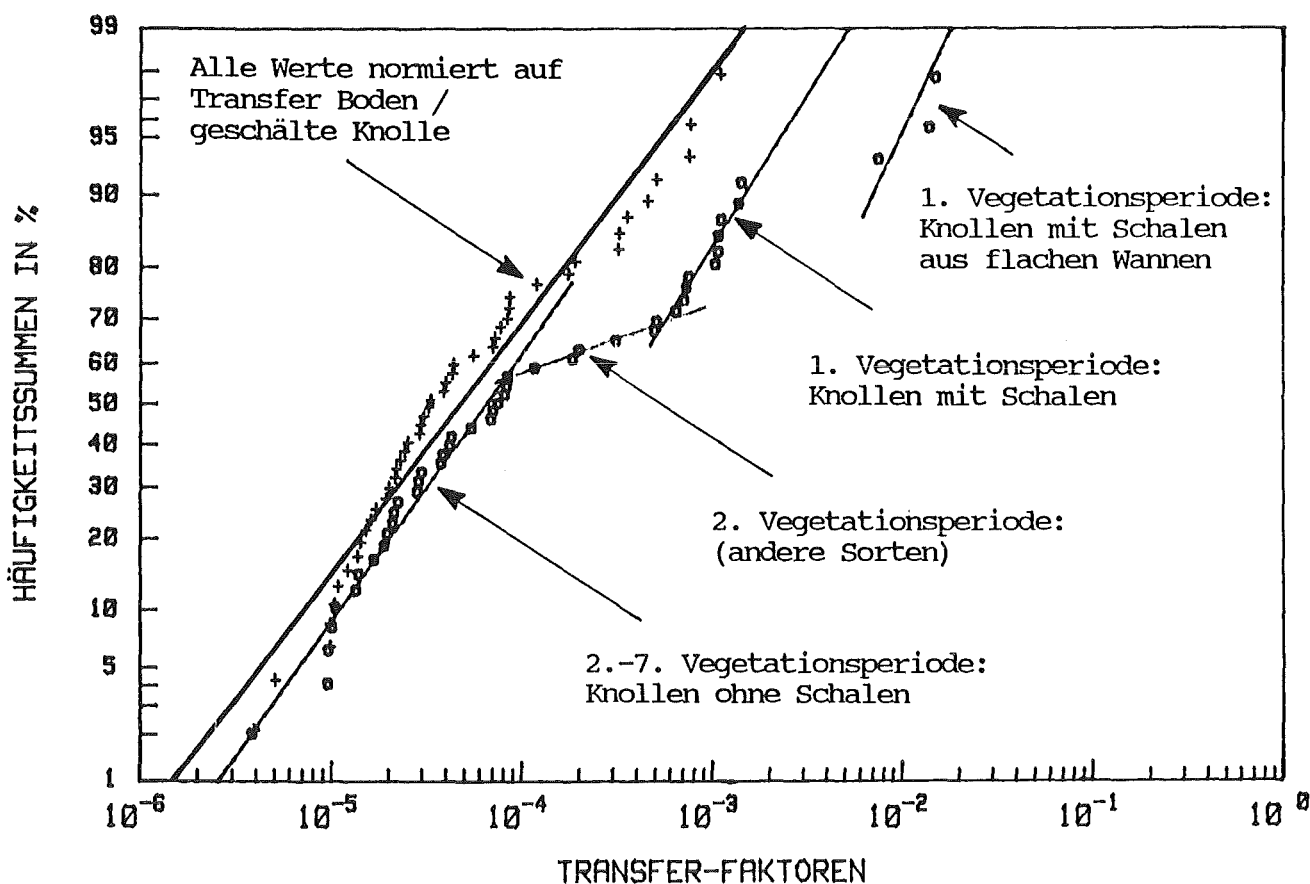


Abb. 6 : Prüfung der Pu-Transferfaktoren für Kartoffeln auf Normalverteilung im Wahrscheinlichkeitsnetz (ooo = Meßwerte, +++ = korrigierte Werte)

damit in eine Lognormal-Verteilung mit einem Maximum und einer Schwankungsbreite von 2 Größenordnungen überführt werden. Das Gleiche gilt für die Häufigkeitsverteilungen von Am und Cm für Kartoffeln in Abb. 5.

Zur Bestimmung eines mittleren Transferfaktors für Kreideboden wurden alle gemessene Werte ohne Unterteilung nach Pflanzen oder Vegetationsperioden zusammengefaßt. In Abb. 7 sind die Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Nuklide dargestellt. Die Medianwerte und Streufaktoren enthält Tab. 8.

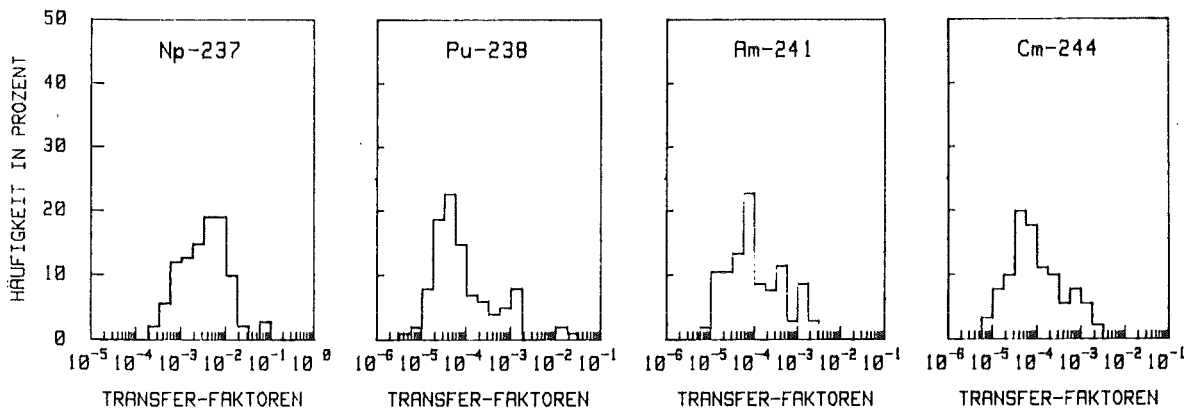


Abb. 7 : Häufigkeitsverteilungen der Transferfaktoren auf Kreide ( alle Pflanzen in 7 Vegetationsperioden )

Tab. 8 : Geometrischer Mittelwert der Transferfaktoren auf Kreide ( alle Pflanzen in 7 Vegetationsperioden )

Nuklid	Transferfaktor · 10 <sup>5</sup>		
	Median	Streufaktor	Schwankungsbereich (95 %)
Np	310	3,2	30 - 3200
Pu	8,8	5,5	0,3 - 270
Am	10	4,3	0,5 - 180
Cm	9,6	4,0	0,6 - 150

### 3.3 Ergebnisse auf Granitboden

Die Ergebnisse der Parallelmessungen für Mais, Weizen und Kartoffeln für 7 Vegetationsperioden auf Granitboden sind im Anhang in Tab. A3 zusammengestellt. Zusätzliche Messungen in verschiedenen Pflanzenteilen von Mais sind in Tab. A2 aufgeführt. Wie bei den auf Kreideboden durchgeführten Messungen liegen die unter gleichen Bedingungen parallel ermittelten Transferfaktoren für eine Pflanze dicht beisammen, das heißt, daß auch hier 95 % der gemessenen Werte innerhalb einer Größenordnung liegen.

Die geometrischen Mittelwerte aller für Mais in den einzelnen Vegetationsperioden auf Granit in verschiedenen Kulturgefäßen gemessenen Transferfaktoren sind in Tab. 9 zusammengefaßt. Tab. 10 enthält die für Weizen berechneten Mittelwerte, Tab. 11 diejenigen für Kartoffeln. Die Ergebnisse der in der 2. und 3. Vegetationsperiode in Wannen durchgeführten Untersuchungen sind nicht berücksichtigt, da mehrere Proben eine relativ hohe Aktivitätskonzentration aufwiesen, die auf eine fehlerhafte Bearbeitung der Proben hinweist.

Wie schon bei den Ergebnissen auf Kreideboden beobachtet, ist auch auf Granit deutlich feststellbar, daß die mittleren Transferfaktoren der ersten Vegetationsperioden, wenn über mehrere Gefäßarten gemittelt wird, eine höhere Schwankungsbreite aufweisen als sie bei den Parallelmessungen zu beobachten ist. Der Grund dafür ist wohl in den unterschiedlichen Aufzuchtbedingungen und den im Laufe der Untersuchungen sich verändernden Bodenverhältnissen zu suchen (vgl. Kap. 3.2).

Die Änderungen im Transferverhalten von Mais, Weizen und Kartoffeln im Verlauf von 7 aufeinanderfolgenden Vegetationsperioden auf Granitboden sind in Abb. 8 dargestellt. Auch hier sind, analog zu den Ergebnissen auf Kreideboden, Zu- oder Abnahmen der Transferfaktoren um eine bis zwei Größenordnungen von einer Vegetationsperiode zur nächsten unter gleichbleibenden Versuchsbedingungen zu beobachten. Die stärksten Schwankungen sind für Pu bei Mais und Kartoffeln zu verzeichnen. Zur Erklärung dieser Schwankungen im Aufnahmeverhalten sind auch hier die Veränderungen im Boden als Folge der intensiven Bewirtschaftung heranzuziehen.

Ähnlich wie bei den Untersuchungen auf Kreideboden vermitteln die auf Granit bei Kartoffeln für Pu, Am und Cm in Abb. 8 dargestellten Ergebnisse den Eindruck, als ob die Wurzelaufnahme mit der Zeit drastisch abnehmen würden. Als Grund hierfür ist genau wie bei Kreide nicht der "aging effect" anzuführen, sondern zum einen die Verwendung verschiedener Kartoffelsorten und zum anderen die Bestimmung der Aktivitätskonzentration in der gekochten, geschälten Knolle ab der 2. Vegetationsperiode. Die Gründe für diese Änderungen in der Versuchsdurchführung sind in Kapitel 3.2, Seite 20, ausführlich dargelegt.

Zur Bestimmung der Aktivitätsverteilung zwischen Knolle und Schale wurden die geernteten Kartoffeln der 2. Vegetationsperiode

Tab. 9: Transferfaktoren für Mais auf Granitverwitterung  
(Geometrischer Mittelwert aus Topf- und Lysimeter-  
Untersuchungen)

Vegetations- periode	Zur Mittel- wertbildung verwendet	Nuklid	Transferfaktor $\cdot 10^5$			
			Median	Streu- faktor	Schwankungs- bereich (68%)	
1983	L, T, W*	Np	8450	1,47	5750	-12400
		Pu	11	1,58	6,9	- 17
		Am	86	1,60	54	- 140
		Cm	68	1,53	45	- 100
1983/84	L, T	Np	10400	2,16	4820	-22500
		Pu	35	3,14	11	- 110
		Am	170	4,43	38	- 750
		Cm	150	3,80	40	- 570
1984	L, T	Np	4940	1,21	4100	- 6000
		Pu	5,8	1,31	4,4	- 7,6
		Am	72	1,40	51	- 100
		Cm	65	1,45	45	- 94
1984/85	L, T	Np	9350	1,73	5400	-16200
		Pu	9,7	1,29	7,5	- 12
		Am	84	1,22	69	- 100
		Cm	91	1,78	51	- 160
1985	L	Np	7200	1,18	6100	- 8500
		Pu	28	2,50	11	- 71
		Am	81	1,14	71	- 92
		Cm	92	1,27	73	- 120
1985/86	L	Np	8490	1,12	7560	- 9500
		Pu	130	2,09	64	- 280
		Am	440	1,58	280	- 700
		Cm	740	1,67	440	- 1240
1986	L	Np	12200	*	11700	-12700
		Pu	3,9	*	3,6	- 4,2
		Am	82	*	77	- 86
		Cm	130	*	125	- 140
Median für sieben Vegetationsperioden						
1983 bis 1986		Np	8200	1,67	4900	-13700
		Pu	15	2,93	5,1	- 44
		Am	110	2,36	45	- 250
		Cm	110	2,51	42	- 260



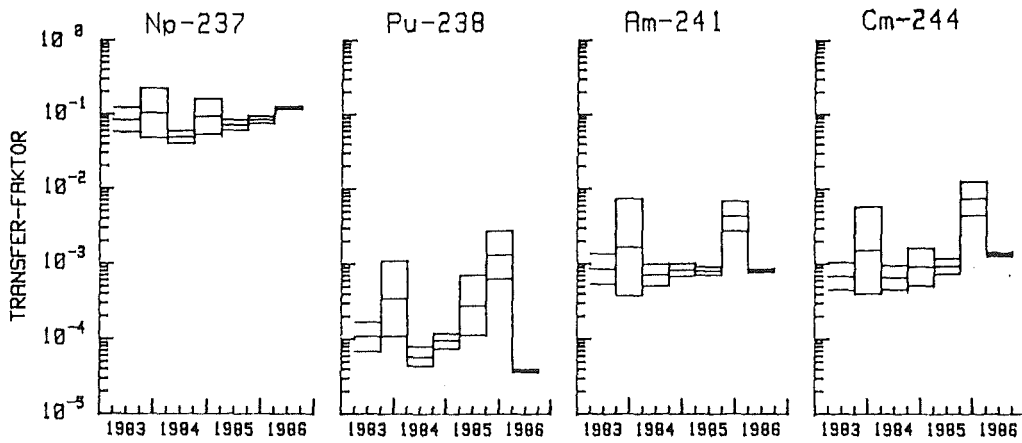
Tab. 10: Transferfaktoren für Weizen auf Granitverwitterung  
(Geometrischer Mittelwert aus Topf- und Lysimeter-  
Untersuchungen)

Vegetations- periode	Zur Mittel- wertbildung verwendet	Nuklid	Transferfaktor · 10 <sup>5</sup>			
			Median	Streu- faktor	Schwankungs- bereich (68%)	
1983	L, T, W*	Np	840	1,47	440	- 1640
		Pu	≤ 2,6			
		Am	≤ 4,5			
		Cm	≤ 1,4			
1983/84	L, T	Np	1070	1,61	660	- 1730
		Pu	0,7	1,48	0,5	- 1,0
		Am	2,1	1,94	1,1	- 4,1
		Cm	2,0	1,96	1,0	- 3,9
1984	L, T	Np	680	1,48	460	- 1010
		Pu	≤ 1,5			
		Am	≤ 1,7			
		Cm	≤ 2,9			
1984/85	L, T	Np	890	1,73	460	- 1720
		Pu	≤ 6,8			
		Am	≤ 11,5			
		Cm	≤ 11,5			
1985	L	Np	1350	1,27	1070	- 1720
		Pu	≤ 0,4			
		Am	1,4	1,17	1,2	- 1,6
		Cm	≤ 4,8			
1985/86	L	Np	510	1,37	380	- 700
		Pu	≤ 0,7			
		Am	3,2	1,73	1,9	- 5,5
		Cm	≤ 3,3			
1986	L	Np	870	1,05	820	- 910
		Pu	≤ 0,3			
		Am	1,2	1,31	0,9	- 1,6
		Cm	2,0	1,53	1,3	- 3,1
Median für sieben Vegetationsperioden						
1983 bis 1986		Np	860	1,71	500	- 1460
		Pu	0,9	1,46	0,6	- 1,3
		Am	1,7	1,77	1,0	- 3,0
		Cm	2,1	1,80	1,1	- 3,8

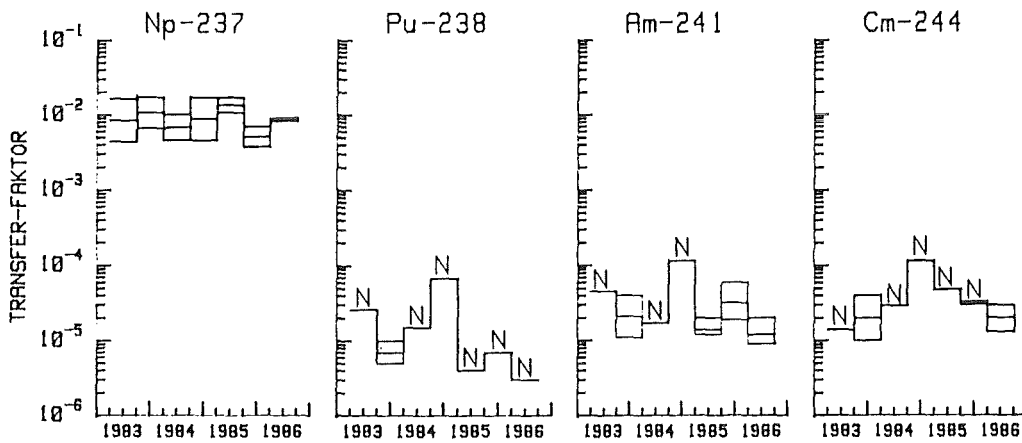
Tab. 11: Transferfaktoren für Kartoffeln auf Granitverwitterung  
(Geometrischer Mittelwert aus Topf- und Lysimeter-  
Untersuchungen ohne Berücksichtigung der Sorten)

Vegetations- periode	Zur Mittel- wertbildung verwendet	Nuklid	Transferfaktor $\cdot 10^5$			
			Median	Streu- faktor	Schwankungs- bereich (68%)	
1983	L, T, W*	Np	1420	1,65	860	- 2330
		Pu	79	1,78	44	- 140
		Am	80	2,74	29	- 220
		Cm	63	2,55	25	- 160
1983/84	L, T	Np	1390	1,32	1050	- 1830
		Pu	25	2,40	11	- 60
		Am	45	2,40	19	- 110
		Cm	36	2,46	15	- 88
1984	L, T	Np	2610	2,53	1030	- 6600
		Pu	6,2	2,57	2,4	- 16
		Am	21	1,96	11	- 41
		Cm	23	2,44	9,3	- 56
1984/85	L, T	Np	1830	1,53	1200	- 2800
		Pu	14	2,25	6,4	- 32
		Am	29	2,54	11	- 73
		Cm	28	2,09	14	- 59
1985	L	Np	740	1,13	650	- 840
		Pu	1,2	1,74	0,7	- 2,1
		Am	4,5	2,36	1,9	- 11
		Cm	8,2	1,51	5,4	- 12
1985/86	L	Np	2480	1,85	1340	- 4580
		Pu	2,0	1,66	1,2	- 3,3
		Am	8,3	1,65	5,1	- 14
		Cm	17	1,61	10	- 27
1986	L	Np	630	1,85	340	- 1160
		Pu	1,3	2,69	0,5	- 3,4
		Am	11	1,88	5,8	- 20
		Cm	10	1,38	7,6	- 14
Median für sieben Vegetationsperioden						
1983 bis 1986		Np	1490	2,01	740	- 2990
		Pu	12	5,56	2,2	- 67
		Am	24	3,30	7,3	- 80
		Cm	26	2,65	9,8	- 69

## MAIS



## WEIZEN



## KARTOFFEL

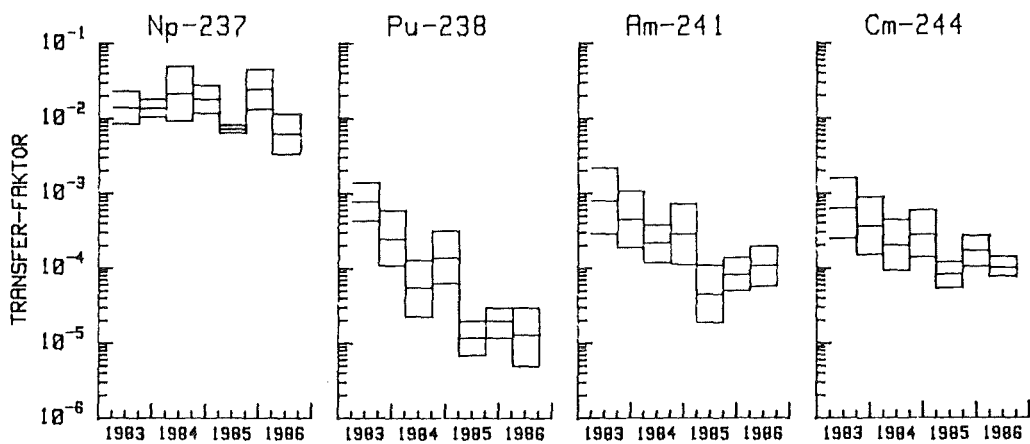


Abb. 8 : Änderungen des Transferfaktors auf Granit im Verlauf von sieben aufeinanderfolgenden Vegetationsperioden (N bezeichnet Werte unter der Nachweisgrenze)

mit wenig Wasser gegart und dann die geschälten Knollen und die Schalen mit dem Kochwasser getrennt analysiert. In Tab. 12 ist die prozentuale Verteilung der in Knolle und Schale gemessenen Aktivitätskonzentrationen für die verschiedenen Nuklide und die einzelnen Pflanzungsgefäße zusammenfaßt.

Tab. 12: Aktivitätsverteilung in Knollen und Schalen für Kartoffeln auf Granitboden

Auf- zucht- gefäß	Aktivitätsgehalt in Prozent							
	Np		Pu		Am		Cm	
	Schale	Knolle	Schale	Knolle	Schale	Knolle	Schale	Knolle
W*	69,8	30,2	96,6	3,4	94,8	5,2	92,1	7,9
	68,9	31,1	96,6	3,4	92,4	7,5	94,4	5,6
	85,5	14,5	99,4	0,6	97,8	2,2	96,9	3,1
L	75,1	24,9	98,1	1,9	95,1	4,9	92,2	7,8
	72,9	27,1	97,5	2,5	96,2	3,8	98,5	1,5
T	80,8	19,2	98,9	1,1	96,2	3,8	95,3	4,7
	75,1	24,9	99,4	0,6	98,2	1,8	97,9	2,1
	86,5	13,5	99,7	0,3	99,5	0,5	99,4	0,6
	65,0	35,0	97,7	2,3	94,7	5,3	87,6	12,4
Mittel	75,5	24,4	98,2	1,8	96,1	3,9	95,8	4,2
	± 7,4	± 7,4	± 1,2	± 1,2	± 2,1	± 2,1	± 2,8	± 2,8

Diese Ergebnisse zeigen, daß auch auf Granitboden der überwiegende Teil der aufgenommenen Aktivität nicht in der Knolle, sondern in der Schale abgelagert wird. Während bei Pu, Am und Cm genau die gleiche Verteilung wie auf Kreide gefunden wurde ( Pu: 98 % in der Schale, Am und Cm: 96 %), wird Np auf Granit mit 76 % etwas weniger in der Schale abgelagert als auf Kreide mit 92 %. Diese unterschiedliche Anreicherung von Np in den Kartoffelschalen könnte als Folge einer pH-abhängigen Adsorption aus der Bodenlösung interpretiert werden, die der Translokation der Nuklide nach erfolgter Wurzel Aufnahme aus der Pflanze in die Knollen überlagert ist. Das im Verhältnis zu Pu, Am und Cm recht gut im Bodenwasser lösliche Np würde dabei im mäßig sauren Granitboden (pH=5,2) weniger an Kartoffeln adsorbiert werden als im schwach sauren Kreideboden (pH=6,8).

Auch auf Granit wurden die geometrischen Mittelwerte von allen in sieben Vegetationsperioden erhaltenen Transferfaktoren für Mais, Weizen und Kartoffeln berechnet. Die Median-Werte für Np, Pu, Am und Cm sind zusammen mit den Streufaktoren und den Bereichen, in denen 68 % der Transferfaktoren zu erwarten sind, in den Tab. 9 bis 11 für die einzelnen Pflanzen mit aufgeführt. Aus den Ergebnissen ist erkennbar, daß unter der Voraussetzung eines 95 %-

Signifikanzlevels die Transferfaktoren im Falle von Mais und Weizen innerhalb von 1 bis 2 Größenordnungen liegen, während bei Kartoffeln zwischen niedrigstem und höchstem Wert fast 3 Größenordnungen beobachtet werden. Die Ursachen für diese große Schwankungsbreite sind, wie oben beschrieben, auf die Verwendung verschiedener Kartoffelsorten und die Mittelung über Transferfaktoren für Kartoffeln mit und ohne Schale zurückzuführen.

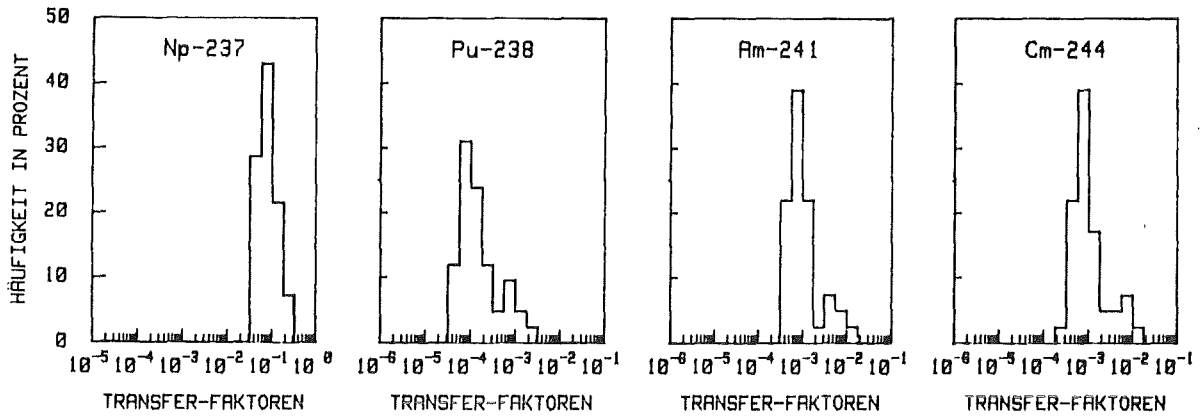
In Abb. 9 sind die für Mais, Weizen und Kartoffeln gemessenen Transferfaktoren entsprechend ihrer Häufigkeit aufgetragen. Bei Mais und Weizen bestätigen die Häufigkeitsverteilungen, daß die erhaltenen Transferfaktoren log-normal verteilt sind. Die Medianwerte und die Schwankungsbereiche entsprechen den in den Tab. 9 bis 11 angegebenen Werten. Das gleiche gilt für die Transferfaktoren für Np und Cm in Kartoffeln, während die Häufigkeitsverteilungen von Pu und Am sehr breit sind und mehrere Maxima aufweisen. Der Grund hierfür ist bei den Ergebnissen auf Kreide ausführlich dargelegt (vgl. Seite 23): die der Verteilung zugrundeliegenden Daten gehören zu verschiedenen Datensätzen, von denen ein jeder einer Lognormal-Verteilung gehorcht. Durch Überlagerung der einzelnen Verteilungen erhält man dann eine breite Häufigkeitsverteilung mit mehreren Maxima. Wie am Beispiel der Pu-Transferfaktoren für Kartoffeln auf Kreide gezeigt wurde, können die verschiedenen Datensätze durch Auftragen in ein Wahrscheinlichkeitsnetz identifiziert und dann durch entsprechende Korrektur in einen Datensatz überführt werden (vgl. Abb. 6).

Zur Bestimmung eines mittleren Transferfaktors für Granitboden wurden alle gemessenen Werte ohne Unterteilung nach Pflanzen oder Vegetationsperioden zusammengefaßt. Für Kartoffeln wurden die nicht korrigierten Werte verwendet. In Abb. 10 sind die Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Nuklide dargestellt. Die Medianwerte und Streufaktoren enthält Tab. 13.

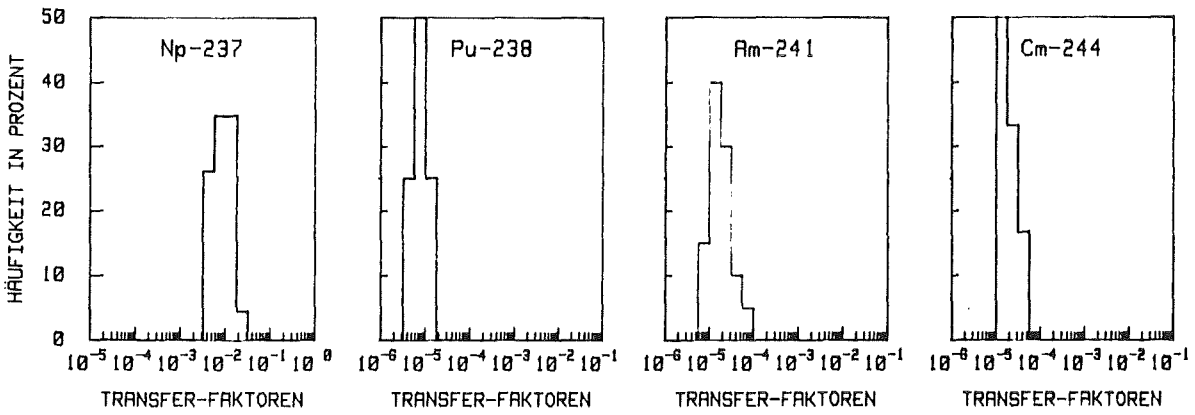
Tab. 13: Geometrischer Mittelwert der Transferfaktoren auf Granit ( alle Pflanzen in 7 Vegetationsperioden )

Nuklid	Transferfaktor $\cdot 10^5$		
	Median	Streufaktor	Schwankungsbereich (95 %)
Np	2100	3,1	220 - 20000
Pu	12	4,5	0,6 - 250
Am	26	6,0	0,7 - 920
Cm	42	4,1	2,5 - 710

MAIS AUF GRANIT



WEIZEN AUF GRANIT



KARTOFFEL AUF GRANIT

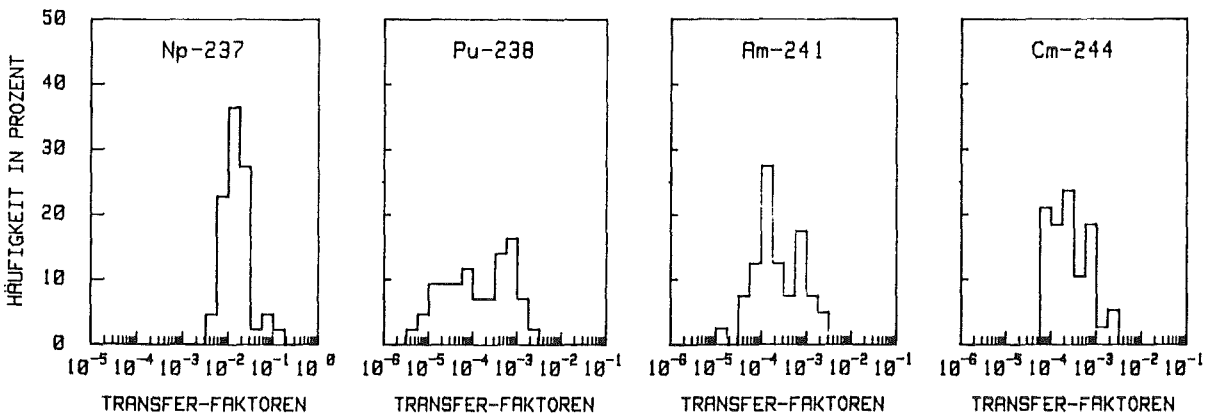


Abb. 9 : Häufigkeitsverteilungen der auf Granit gemessenen Transferfaktoren für Mais, Weizen und Kartoffeln

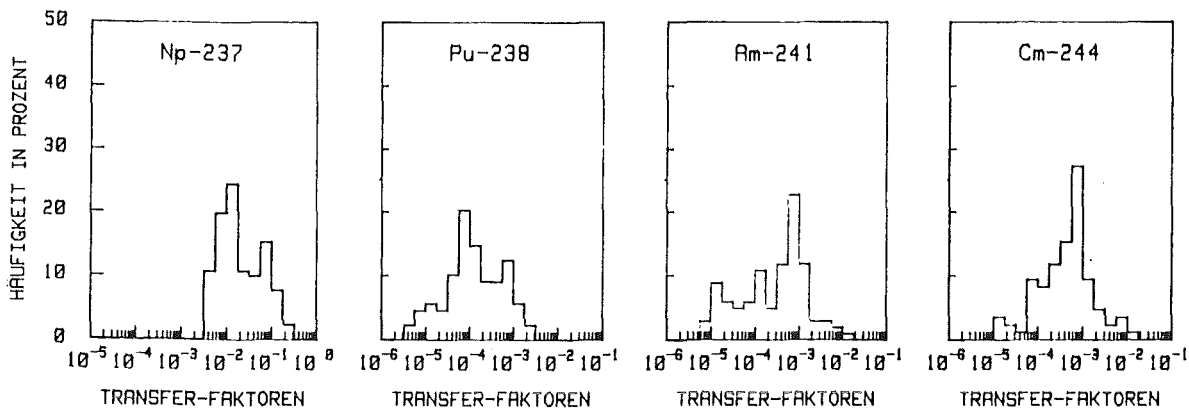


Abb. 10: Häufigkeitsverteilungen der Transferfaktoren auf Granit  
( alle Pflanzen in 7 Vegetationsperioden )

### 3.4 Ergebnisse auf Gley

Die von Juli 1983 bis März 1986 auf Gley-Boden gemessenen Transferfaktoren Boden/Gras sind in Tab. 14 zusammengestellt. Es fällt auf, daß die mit einem Stern gekennzeichneten Proben einen sehr hohen Transfer aufweisen, der auf den ersten Blick nicht erklärbar ist, da im Versuchsablauf keine Änderungen vorgenommen wurden. Im Verlauf der Untersuchungen zeigte sich allerdings, daß im Gley-Boden eine sehr dichter Regenwurmbesatz vorhanden war, erkennbar an den zahlreichen dunklen Aggregaten auf der mit gewaschenem Quarzsand abgedeckten Bodenoberfläche. Obwohl diese Aggregate möglichst bald nach der Ablage an der Oberfläche entfernt wurden, ist es denkbar, daß diese Aggregate oder daran haftende, kontaminierte Erde mit den Grashalmen oder den unteren Blättern in Kontakt kamen und dann bei den Probenahme Spuren davon mit in die Probe gelangten.

Um zu prüfen, ob diese hohe Aktivitätskonzentration in Grasproben tatsächlich auf eine Kontamination mit Bodenpartikeln zurückzuführen ist, wurden die für die einzelnen Aktiniden gemessenen Aktivitätskonzentrationen in jeder Pflanzenprobe zu einer Gesamt- $\alpha$ -Aktivitätskonzentration aufsummiert und der Anteil der einzelnen Aktiniden in Prozent der insgesamt in der Pflanzenprobe vorhandenen Gesamt- $\alpha$ -Aktivitätskonzentration berechnet (Tab. 15). Zum Vergleich wurden die Konzentrationsverhältnisse in nicht

kontaminierten Pflanzenproben und in Proben, die 1 mg oder 10 mg Boden enthalten, berechnet (Tab. 16). Wie aus Tab. 16 deutlich wird, wirkt sich in der zu analysierenden Probe ein geringer Gehalt des im Verhältnis zum Pflanzenmaterials sehr hoch kontaminierten Bodens sehr stark auf die prozentualen Beiträge der einzelnen Nuklide zur Gesamt- $\alpha$ -Aktivitätskonzentration aus, wobei mit zunehmender Kontamination die prozentuale Verteilung in der Probe sich sehr schnell der des Bodens angleicht.

Vergleicht man die Beiträge der einzelnen Nuklide zur Gesamt- $\alpha$ -Kontamination der Grasproben in Tab. 15 mit den Werten in Tab. 16, so zeigt sich, daß die in Tab. 14 mit einem Stern gekennzeichneten Proben höchstwahrscheinlich mit Bodenpartikeln kontaminiert waren. Bei einem mittleren Ertrag von 35 g trockenem Gras pro Schnitt wurden bei diesen Proben zwischen 35 und 350 mg kontaminierte Bodenpartikel in das jeweilige Erntegut eingebracht. Bei der Berechnung der mittleren Transferfaktoren Boden/Gras, die in Tab. 17 zusammengestellt sind, wurden diese Proben deshalb nicht berücksichtigt.

Tab. 14: Transferfaktoren für Gras auf Gley-Boden

Proben- nummer	Vegetations- periode	Transferfaktor $\cdot 10^5$			
		Np 237	Pu-238	Am-241	Cm-244
8	1983	4520	17	63	51
22		5690	18	56	95
55		4600	29	64	73
522	1984	4200	32	80	113
586		2740	6	56	79
666		4110	9	57	84
710 *	1985	6850	742	707	752
752		4820	34	65	69
753 *		7530	1400	1480	1580
804 *		11000	1080	1030	1070
930 *		12500	3170	2340	2930
931		1390	57	94	46
957 *	1986	2440	515	566	599
1167		1300	18	53	50
1198 *		6960	292	397	409
1249 *		6600	1160	1330	1420
1266		3890	50	147	141

\* Bei diesen Proben liegt vermutlich eine Kontamination mit Bodenpartikeln vor



Tab. 15: Aktivitätskonzentrationen in Grasproben und Beiträge der einzelnen Nuklide zur Gesamt- $\alpha$ -Aktivitätskonzentration in Prozent

Proben- nummer	Konzentration in $\mu\text{Bq/g}$ trocken				Beitrag zur Gesamt- $\alpha$ - Aktivitätskonzentration in %			
	Np-237	Pu-238	Am-241	Cm-244	Np-237	Pu-238	Am-241	Cm-244
8	300	3,2	13	3,1	94	1	4	1
22	380	19	62	32	77	4	13	6
55	300	5,5	13	4,8	93	2	4	1
522	280	6,2	16	6,9	90	2	5	2
586	180	1,2	11	4,8	91	1	6	2
666	270	1,7	12	5,1	94	1	4	2
710 *	450	140	140	46	58	18	18	6
752	320	6,4	13	4,2	93	2	4	1
753 *	500	270	300	97	43	23	26	8
804 *	720	200	210	65	60	17	17	5
930 *	820	600	470	180	40	29	23	9
931	91	11	19	2,8	74	9	15	2
957 *	160	98	110	36	39	24	28	9
1167	86	3,5	11	3,1	83	3	11	3
1198 *	460	56	80	25	74	9	13	4
1249 *	430	220	270	87	43	22	27	9
1266	260	9,5	30	8,6	84	3	10	3

\* Bei diesen Proben liegt vermutlich eine Kontamination mit Bodenpartikeln vor

Tab. 16 : Aktivitätskonzentrationen in Boden, Gras und kontaminierten Grasproben und Beiträge der einzelnen Nuklide zur Gesamt- $\alpha$ -Aktivitätskonzentration in Prozent

Nuklid	Boden		Gras		1 g Gras + 1 mg Boden		1 g Gras + 10 mg Boden	
	$\mu\text{Bq/g}$	%	$\mu\text{Bq/g}$	%	$\mu\text{Bq/g}$	%	$\mu\text{Bq/g}$	%
Np-237	6600	14	220	92	226	79	286	40
Pu-238	19100	40	4,2	2	23	8	195	27
Am-241	20300	42	14	6	34	12	217	30
Cm-244	1850	4	1,4	1	3,3	1	20	3

Tab. 17 : Transferfaktoren für Gras auf Gley-Boden  
(Geometrischer Mittelwert ohne Berücksichtigung der  
mit Boden kontaminierten Proben)

Vegetations- periode	Nuklid	Transferfaktor $\cdot 10^5$		
		Median	Streu- faktor	Schwankungs- bereich (68%)
1983	Np	4900	1,14	4300 - 5600
	Pu	21	1,34	16 - 28
	Am	61	1,07	57 - 65
	Cm	71	1,36	52 - 97
1984	Np	3600	1,27	2800 - 4600
	Pu	12	2,37	5,1 - 28
	Am	64	1,22	52 - 78
	Cm	91	1,21	75 - 110
1985	Np	2600	2,41	1100 - 6200
	Pu	44	1,45	30 - 64
	Am	78	1,30	60 - 100
	Cm	56	1,32	42 - 74
1986	Np	2300	2,17	1000 - 4900
	Pu	30	2,02	15 - 61
	Am	88	2,06	43 - 180
	Cm	84	2,07	41 - 170
Median für vier Vegetationsperioden				
1983 bis 1986	Np	3400	1,68	2000 - 5700
	Pu	22	2,02	11 - 45
	Am	70	1,37	50 - 100
	Cm	75	1,44	53 - 110

### 3.5 Ergebnisse auf Sandboden aus Gorleben

Auf dem Sandboden aus Gorleben wurden in Topfversuchen verschiedene Getreidesorten, Kartoffeln und Gras angebaut, als Zwischenfrüchte Radieschen und Gurken. Die erhaltenen Transferfaktoren sind in Tab. 18 aufgelistet, wobei die geometrischen Mittelwerte der Parallelmessungen mit den Streufaktoren und dem Bereich, in dem 68 % der Werte liegen, angegeben sind.

Tab. 18 : Transferfaktoren auf Sand aus Gorleben

Pflanze Sorte Anal. Teil	Gefäß	Vege- tations- periode	Nuklid	Transferfaktor · 10 <sup>5</sup>			
				Median	Streu- faktor	Schwankungs- bereich (68 %)	
Gras	T	1983 1983/84 1984	Np	22000	1,83	12000	-40000
			Pu	73	2,63	28	- 190
			Am	280	1,55	180	- 440
			Cm	220	1,63	130	- 350
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	T	1983/84 1984/85	Np	2860	1,81	1580	- 5170
			Pu	7,4	1,78	4,1	- 13
			Am	38	2,29	17	- 87
			Cm	23	2,10	11	- 48
Weizen "Kolibri" Körner	T	1984	Np	170	1,48	120	- 250
			Pu	≤ 0,4			
			Am	≤ 7,8			
			Cm	≤ 10,3			
Roggen "Halo" Körner	T	1983/84	Np	1850	1,17	1580	- 2170
			Pu	20	1,92	10	- 38
			Am	6,9	1,09	6,2	- 7,7
			Cm	≤ 7,4			
Hafer "Fleming" Körner	T	1984	Np	7560	1,09	6920	- 8250
			Pu	5,6	1,27	4,4	- 7,1
			Am	15	1,40	11	- 21
			Cm	16	1,19	13	- 19
Gerste "Gimpel" Körner	T	1984/85	Np	1890	1,22	1550	- 2300
			Pu	≤ 3,8			
			Am	≤ 15			
			Cm	≤ 18			
Kartoffel "Granola" Knolle ohne Schale	T	1984/85	Np	590	1,36	438	- 806
			Pu	6,6	1,83	3,6	- 12
			Am	13	1,41	9,5	- 19
			Cm	11	1,36	8,0	- 15
Radieschen "Hildares" Radieschen	T	1984	Np	2620	1,24	2100	- 3250
			Pu	77	1,89	41	- 150
			Am	140	1,95	70	- 260
			Cm	83	1,92	43	- 160
Gurke "Bella" Gurke	T	1984	Np	2530	1,17	2160	- 2950
			Pu	9,1	1,27	7,1	- 12
			Am	150	1,26	120	- 180
			Cm	110	1,29	88	- 150

### 3.6 Ergebnisse auf Sandboden aus Spöck

Auf dem Sandboden aus Spöck wurden in 10 Lysimetern 10 verschiedene Gemüse und Erdbeeren angebaut. Die gemessenen Transferfaktoren und beim Vorliegen von Parallelmessungen die geometrischen Mittelwerte der Transferfaktoren sind in Tab. 19 aufgeführt.

Nach diesen Untersuchungen wurde auf allen Lysimetern die gleiche Sorte Buschbohnen (Maxi) gepflanzt, um zu sehen, ob die Vorfrucht einen Einfluß auf den Transfer hat. Die geringe Schwankungsbreite der Transferfaktoren, die mit in Tab. 19 aufgenommen sind, zeigt, daß dies nicht der Fall ist.

Zum Abschluß der Untersuchungen auf diesem Sandboden aus Spöck wurden 10 verschiedene Sorten Buschbohnen in 10 Lysimetern aufgezogen, um einen Überblick zu bekommen, welche Schwankungsbreite für den Transfer in verschiedene Sorten einer Pflanze zu erwarten ist. Die erhaltenen Transferfaktoren sind in Tab. 20 zusammengefaßt. Die geometrischen Mittelwerte und die Streubreiten für die einzelnen Nuklide sind zum Vergleich mit den Werten der anderen Gemüse mit in Tab. 19 aufgenommen worden.

Tab. 19 : Transferfaktoren auf Sandboden aus Spöck

Pflanze Sorte Anal. Teil	Gefäß	Vege- tations- periode	Nuklid	Transferfaktor · 10 <sup>5</sup>			
				Median	Streu- faktor	Schwankungs- bereich (68 %)	
Zwiebel "Braunschweiger" Zwiebel	L	1984	Np	1290	Einzelprobe		
			Pu	8,7			
			Am	16			
			Cm	10			
Kartoffel "Granola" Knolle ohne Schale	L	1984	Np	1820	1,39	1310	- 2520
			Pu	7,3	1,06	6,9	- 7,7
			Am	6,1	1,16	5,2	- 7,1
			Cm	9,1	1,07	8,4	- 9,7
Möhren "Gonsenheimer" Rübe	L	1984	Np	3500	1,05	3320	- 3670
			Pu	410	1,65	250	- 670
			Am	210	1,38	150	- 280
			Cm	330	1,25	270	- 410
Tomate "Hildares F1" Frucht	L	1984/85	Np	810	2,78	290	- 2260
			Pu	1,7	4,47	0,4	- 7,6
			Am	4,5	2,53	1,8	- 11
			Cm	7,3	2,70	2,7	- 20
Paprika "Neusiedler" Schote	L	1984/85	Np	2650	Einzelprobe		
			Pu	5,4			
			Am	8,1			
			Cm	6,0			

Tab. 19 (Fortsetzung) : Transferfaktoren auf Sand aus Spöck

Pflanze Sorte Anal. Teil	Gefäß	Vege- tations- periode	Nuklid	Transferfaktor · 10 <sup>5</sup>			
				Median	Streu- faktor	Schwankungs- bereich (68 %)	
Zucchini "Ambassador" Frucht	L	1984/85	Np	5730	Einzelprobe		
			Pu	20			
			Am	69			
			Cm	130			
Spinat "Matador" Blätter	L	1984/85	Np	61900	Einzelprobe		
			Pu	210			
			Am	240			
			Cm	550			
Blumenkohl "Delfter Markt" Frucht	L	1984/85	Np	2280	1,60	1420	- 3640
			Pu	2,9	1,02	2,8	- 3,0
			Am	19	1,11	17	- 21
			Cm	38	1,40	27	- 53
Lauch "Titan" Ges.Pflanze	L	1984/85	Np	11500	2,13	5380	-24400
			Pu	63	6,72	9,4	- 430
			Am	210	2,24	93	- 460
			Cm	370	2,02	190	- 760
Erdbeere "Splendita" Frucht	L	1984/85	Np	1470	Einzelprobe		
			Pu	5,3			
			Am	41			
			Cm	64			
Buschbohne "Saxa" Bohne	L	1984	Np	890	3,05	290	- 2700
			Pu	5,0			
			Am	60	1,19	51	- 71
			Cm	130	1,18	110	- 150
Buschbohne "Maxi" Bohne	L	1985	Np	2410	1,33	1810	- 3200
			Pu	6,1	1,35	4,5	- 8,2
			Am	45	1,38	33	- 62
			Cm	77	1,62	47	- 120
Buschbohne 10 Sorten	L	1985	Np	1310	1,75	750	- 2290
			Pu	6,2	1,56	4,0	- 9,7
			Am	35	2,74	13	- 95
			Cm	73	1,53	48	- 110

Tab. 20 : Transferfaktoren für 10 verschiedene Bohnensorten,  
angebaut auf Sand aus Spöck

Bohnensorte	Transferfaktor $\cdot 10^5$			
	Np-237	Pu-238	Am-241	Cm-244
Fori	1070	4	37	53
Goldjuwel	1150	5	2	42
Joma	1260	4	43	65
Maja	2440	8	35	54
Marona	853	7	-	-
Maxi	1020	9	42	47
Pfalzgräfin	2730	15	66	122
Saxa	890	5	60	128
Sotexa	2300	8	60	89
Walo	1220	4	33	68
Geometrisches Mittel	1310	6,2	35	73

#### 4. Diskussion der Ergebnisse

Die Aufnahme von Radionukliden aus dem Boden in die Pflanze durch die Wurzeln und der anschließende Transport innerhalb der Pflanze in die verschiedenen Pflanzenteile hängt, neben den Eigenschaften des betrachteten Radionuklids, hauptsächlich vom Metabolismus der einzelnen Pflanzen und von den Bodenparametern ab, die die Löslichkeit des betrachteten Radionuklids im Bodenwasser bestimmen. Diese beiden Faktoren können jedoch in vielfacher Art und Weise durch die Aufzuchtbedingungen verändert werden, wobei insbesondere klimatische Verhältnisse, Bodenbearbeitungs- und Versorgungsmethoden, sowie Pflegemaßnahmen zu nennen sind. Eine qualitative Abschätzung darüber, wie sich jeder einzelne dieser vielen Parameter, die sich zudem noch gegenseitig beeinflussen, auf den Boden/Pflanzen-Transfer auswirkt, ist zwar prinzipiell möglich, kann jedoch nur in Ausnahmefällen experimentell bestätigt werden.

Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, realistische Transferdaten für deutsche Böden zu ermitteln und deren Schwankungsbreite für die überwiegende Anzahl der landwirtschaftlich genutzten Böden und beim Anbau der für die Ernährung der Bevölkerung relevanten Nutzpflanzen festzulegen. Die für diesen Zweck notwendige Versuchsplanung und -anlage verlangte also den Einsatz typischer Böden, relevanter Pflanzen und repräsentativer Aufzuchtverhältnisse. Eine gezielte Parametervariation, beispielsweise durch Einstellen verschiedener pH-Werte oder Zugabe organischer Substanz, war nicht vorgesehen. Bei der Diskussion der erhaltenen Ergebnisse kann deshalb der Einfluß verschiedener Boden-, Pflanzen- oder anderer Parameter auf die Wurzel Aufnahme nur sehr pauschal behandelt werden.

##### 4.1 Das Transferverhalten der verschiedenen Aktiniden

Für die Wurzel Aufnahme der betrachteten Radionuklide Np, Pu, Am und Cm ist maßgebend, welcher Anteil der dem Boden zugesetzten Aktivitätsmenge im Bodenwasser gelöst wird und damit zusammen mit den Nährstoffen von der Pflanze aufgenommen werden kann. Unterschiede im physikalischen und chemischen Verhalten dieser Radionuklide müssen sich daher deutlich im Transferverhalten niederschlagen.

Neptunium liegt in landwirtschaftlich genutzten Böden fast ausschließlich als Np(V) vor/4,20,21/. Das sehr stabile Neptunyl-Kation,  $[\text{NpO}_2]^+$ , ist hydrolysebeständig und zeigt wenig Tendenz zur Komplexbildung und zur Adsorption an Oberflächen /22,23/. Lediglich die Kationenaustauschkapazität kann das Lösegleichgewicht von Np beeinflussen/24/. Auf Grund dieser chemischen Eigenschaften ist Np im Boden, verglichen mit den anderen Aktiniden, sehr mobil und auch in hohem Maße pflanzenverfügbar. Dies zeigt sich auch in den durchgeführten Untersuchungen. Auf allen Böden wurde für Np der mit Abstand höchste Transfer in alle angebauten Pflanzen gemessen.

Plutonium zeigt im Boden ein völlig anderes Verhalten. Von der Lage der Redox-Potentiale her könnte Pu in den Oxidationsstufen III, IV, V und VI im Boden vorliegen, wobei bei niedrigem pH unter reduzierenden Bedingungen Pu(III) und bei hohem pH unter oxidierenden Bedingungen Pu(V) vorherrschen sollte /20,24/. Pu(IV) sollte nach thermodynamischen Berechnungen nur in einem schmalen Stabilitätsbereich unter reduzierenden Bedingungen bei hohem pH die vorherrschende Species im Boden darstellen. Vergleicht man die Aufnahme von Pu aus dem Boden in Pflanzen mit dem Verhalten von Th, das nur in der Oxidationsstufe IV vorliegen kann, so zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung /24/. Daraus kann gefolgert werden, daß Pu im Boden als Pu(IV) vorliegt, wobei die extrem schwerlöslichen Verbindungen  $\text{PuO}_2$  und  $\text{Pu(OH)}_4$  das System beherrschen. Pu liegt demzufolge in der Bodenlösung nicht in Form freier oder hydrolysierter Ionen vor, sondern ausschließlich in löslichen Komplexverbindungen mit anorganischen und organischen Substanzen des Bodens /21/. Aufgrund der äußerst geringen Löslichkeit von  $\text{Pu(OH)}_4$  und der Tatsache, daß Pu(IV) in schwach saurer bis neutraler Lösung sehr stark an Oberflächen adsorbiert wird, ist vom chemischen Verhalten im Boden her unter üblichen landwirtschaftlichen Bedingungen ein extrem niedriger Boden/Pflanzen-Transfer zu erwarten. Die durchgeführten Untersuchungen spiegeln dieses Verhalten wider. Die Aufnahme von Plutonium in alle angebauten Pflanzen ist niedriger als die der anderen eingesetzten Aktiniden.

Über das chemische Verhalten von Am und Cm in der Umwelt ist nur sehr wenig bekannt. Die Chemie der beiden im Periodensystem benachbarten Elemente ist sehr ähnlich. Unter Umweltbedingungen ist nur die Oxidationsstufe III stabil. Beide Elemente bilden schwerlösliche Hydroxide, zeigen sehr ausgeprägte Neigung zur Adsorption an Oberflächen und können sehr stabile Komplexe mit organischen Komplexbildnern eingehen. Ein unterschiedliches Verhalten der beiden Nuklide ist nur durch geringfügige Unterschiede in der Stabilität von Komplexen zu erwarten /25/. Die Aufnahme von Am und Cm in Pflanzen aus dem Boden sollte etwas höher sein als bei Pu, da die Hydroxide besser im Bodenwasser löslich sind als  $\text{Pu(OH)}_4$ . Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen bestätigen diese Abschätzung: Für Am und Cm wird etwa der gleiche Transferfaktor gemessen. Im Vergleich zu Pu wurden für Am und Cm bei den Parallelmessungen (siehe Tabellen im Anhang) bis zum Faktor 10 höhere Transferfaktoren gemessen. Im Mittel aller durchgeführten Messungen zeigen Am und Cm eine zwei- bis dreifach höhere Aufnahme als Pu.

Zusammenfassend ist festzuhalten, daß der Boden/Pflanzen-Transfer in folgender Reihenfolge abnimmt:



Np ist im Mittel etwa zwei Größenordnungen besser pflanzenverfügbar als Am und Cm, die wiederum im Mittel eine um den Faktor 2-3 höhere Aufnahme in Pflanzen als Pu zeigen (vgl Tab. 23).



## 4.2 Die Aktinidenaufnahme in die verschiedenen Pflanzen

Die Aktiniden können aus der Bodenlösung sowohl als freie Ionen als auch gebunden in löslichen, organischen Komplexverbindungen in die Wurzeln aufgenommen werden. Der Metabolismus der jeweiligen Pflanze ist maßgebend dafür, wie die Nuklide in die oberirdischen Teile dieser Pflanze verlagert werden. Man unterteilt die Pflanzen nach ihrem Boden/Pflanzen-Transfer in drei Gruppen /26/:

- Pflanzen, bei denen die Verlagerung aufgenommener Stoffe gehemmt ist ("excluders"). Die Konzentration in den Schößlingen bleibt über einen weiten Konzentrationsbereich im Boden hinweg konstant. Erst beim Überschreiten einer kritischen Konzentration im Boden bricht der regulierende Mechanismus zusammen und ein unbeschränkter Transport in die Schößlinge ist möglich.
- Pflanzen, bei denen die Wurzelaufnahme und die Verlagerung in oberirdische Pflanzenteile so ablaufen, daß die Konzentration in den Schößlingen die Konzentration im Boden widerspiegelt ("indicators").
- Pflanzen, bei denen durch die Wurzeln aufgenommene Stoffe in den Schößlingen konzentriert werden, und zwar sowohl bei niedrigen als auch bei hohen Konzentrationen im Boden ("accumulators").

Alle bisher für Untersuchungen des Boden/Pflanzen-Transfers von Aktiniden verwendeten Pflanzen gehören ihrem Verhalten nach zur Gruppe der "excluders" /3,22,27/. Komplexgebunden können die Transurane im Xylem-Strom in die einzelnen Pflanzenteile transportiert werden /22,27-29/, wobei aber keine gleichmäßige Verteilung in der Pflanze erreicht wird, sondern eine Abnahme mit zunehmender Entfernung von der Wurzel zur Spitze hin zu verzeichnen ist. Die geringsten Konzentrationen an Transuranen werden generell in den Samen gefunden /3,22/.

Da sich die verschiedenen Pflanzenarten in ihrem Stoffwechsel stark unterscheiden, ist verständlich, daß die für verschiedene Pflanzenarten gemessenen Transferfaktoren für die einzelnen Transurane erheblich voneinander abweichen. In Tab. 21 sind die für die verwendeten Pflanzen gemessenen mittleren Transferfaktoren zusammengestellt /30/. Bei der Berechnung des geometrischen Mittels wurden alle auf den verschiedenen Böden erhaltenen Ergebnisse verwendet, wobei Proben mit Ergebnissen unter der Nachweisgrenze und die Proben, die als querkontaminiert identifiziert wurden, nicht berücksichtigt wurden.

Mit Abstand der höchste Transfer wurde für Np in Spinat gemessen. Auch die Aufnahme von Pu, Am und Cm in Spinat liegt etwa zwei Größenordnung über den für Getreide gemessenen Werten. Lauch und Gras zeigen ebenfalls für alle eingesetzten Transurane einen hohen Transfer, während die Aufnahme in Mais, wenn man die Aufnahme in die gesamte Pflanze betrachtet, um eine Größenordnung tiefer liegt.

Tab. 21: Geometrischer Mittelwert der gemessenen Transferfaktoren für die verschiedenen Pflanzenarten

Pflanze	Analysierter Teil	Transferfaktor · 10 <sup>5</sup>			
		Np-237	Pu-238	Am-241	Cm-244
Mais	ges. Pflanze	2320	8,9	29	25
	Kolben	108	2,1	4,2	≤ 3,9
Weizen	Körner	301	2,5	2,3	2,7
Hafer	Körner	7560	5,6	15	16
Gerste	Körner	1890	≤ 3,8	≤ 15	≤ 18
Roggen	Körner	1850	20	6,9	≤ 7,4
Radieschen	Radieschen	2620	77	140	83
Möhren	Rübe	3500	410	210	330
Kartoffel	Knolle*	680	13	18	19
Lauch	ges. Pflanze	11500	63	210	370
Spinat	Blätter	61900	210	240	550
Gras	ges. Pflanze	7300	36	120	120
Zwiebel	Zwiebel	1290	8,7	16	10
Gurke	Gurke	2530	9,1	150	110
Zucchini	Frucht	5730	20	69	130
Tomate	Frucht	810	1,7	4,5	7,3
Paprika	Schote	2650	5,4	8,1	6,0
Blumenkohl	Frucht	2280	2,9	19	38
Bohne	Bohne	1750	6,1	39	74
Erdbeere	Frucht	1470	5,3	41	64

\* gekochte und geschälte Knolle

Bei den Wurzelgemüsen Radieschen und Möhren ist gegenüber den Blattgemüsen für Np ein um eine Größenordnung niedrigerer Transfer zu beobachten, während Pu, Am und Cm vergleichbar den Blattgemüsen aufgenommen werden. Kartoffeln zeigen für alle vier Nuklide den niedrigsten Transfer, was auf die Analyse von gekochten, geschälten Knollen zurückzuführen ist. Wären die frisch geernteten, gewaschenen Knollen zur Analyse gebracht worden, so würde der Transfer in der gleichen Größenordnung wie bei den anderen Wurzelgemüsen liegen (vgl. Kapitel 3.2, Tab. 7).

Von den verschiedenen Gemüsesorten weisen die Früchte der Zucchini und der Gurke den höchsten Transfer für alle vier Transurane auf. Während die Np, Am und Cm Aufnahme mit den bei Wurzelgemüse gemessenen Werten vergleichbar ist, liegt der für Pu gemessenen Transfer um den Faktor 5-10 niedriger. Bei den anderen Gemüsearten wurde in den zum Verzehr geeigneten Teilen ein niedriger Transferfaktor gemessen: im Mittel für Np 0,02, für Pu 0,00004, für Am 0,002 und für Cm 0,003.

Bei den verschiedenen Getreidearten wird für den Transfer in die Körner für alle vier Nuklide ein sehr niedriger Transfer gemessen, der noch unter dem liegt, der für die eßbaren Teile von Gemüsearten ermittelt wurde. Eine Ausnahme stellt die Aufnahme von Np in Haferkörner dar, wo ein um den Faktor 4 höherer Transfer als bei den anderen Getreidearten gemessen wurde.

Ein Vergleich der für Am und Cm gemessenen Daten zeigt, daß bei vielen Gemüsearten der Cm Transfer um etwa den Faktor 2 höher ist als bei Am. Ursache dafür ist wohl der unterschiedliche Stoffwechsel der Pflanzen und die geringfügigen Unterschiede zwischen Am und Cm Komplexen mit den verschiedenen organischen Stoffwechselprodukten in den jeweiligen Pflanzenarten, wobei Cm wohl stabilere Komplexe bildet und deshalb etwas besser in der Pflanze verlagert werden kann.

Bei Kartoffeln und Buschbohnen wurde der Einfluß der Sorte auf den Transfer untersucht (/18/ und Tab. 20). Bei Bohnen wurden Unterschiede in den gemessenen Transferfaktoren für die einzelnen Nuklide bis zum Faktor 5 beobachtet, die auf den unterschiedlichen Stoffwechsel der diversen Sorten zurückzuführen sind. Die Aufnahme der verschiedenen Transurane in die verschiedenen Sorten einer Pflanzenart ist dabei nicht aneinander gekoppelt, das heißt, daß ein hoher Np-Transfer nicht einen hohen Transfer von Pu, Am und Cm bedingt, sondern daß jedes Nuklid sein eigenes, sortenabhängiges Aufnahmeverhalten zeigt.

Vergleicht man die in Tab. 21 aufgeführten Transferfaktoren mit Literaturangaben /1-4, 22, 27-29, 31-47/, so zeigt sich eine gute Übereinstimmung der erzielten Ergebnisse mit solchen, die unter kontrollierten Bedingungen erhalten wurden, meist in Gewächshäusern oder in Lysimeteranlagen, in denen der kontaminierte Boden so abgedeckt war, daß Resuspensionseffekte vermieden werden konnten /31-33, 37-39, 41, 43-44/. In Feldversuchen, entweder auf unfallbedingt kontaminierten Böden /45-47/ oder auf Fallout kontaminierten Böden /34, 37, 40, 42, 48/, wurden für Pu, Am und Cm Transferfaktoren gemessen, die bis zu zwei Größenordnungen höher liegen als die unter kontrollierten Bedingungen gemessenen. Zur Erklärung ist einerseits die zusätzliche Aktivitätsaufnahme durch die Blätter infolge von Depositions- und Resuspensionseffekten zu nennen, andererseits aber auch die der Berechnung des Transferfaktors zugrundeliegende Modellvorstellung. Hier ist sehr vereinfachend angenommen, daß zwischen der Konzentration im Boden und der Konzentration in der darauf wachsenden Pflanze ein linearer Zusammenhang besteht. Aus der Literatur ist bekannt, daß für viele Elemente die Aufnahme in die Pflanze mit steigender Konzentration im Boden abnimmt /26, 49/. Die Nichtberücksichtigung dieses Effektes führt bei der Berechnung des Transferfaktors dazu, daß für Fallout kontaminierte Böden mit sehr niedriger Kontamination des Bodens ein hoher Transferfaktor berechnet wird, während bei Untersuchungen auf Böden mit hoher Bodenkontamination ein im Verhältnis dazu sehr niedriger Transferfaktor erhalten wird. Aus diesem Grund ist ein Vergleich von Transferfaktoren eigentlich nur dann zulässig, wenn die Daten auf Böden mit gleichem Kontaminationslevel ermittelt wurden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, daß die in der Literatur beschriebene Reihenfolge für das Transferverhalten der Transurane

**Blattgemüse und Gras** > **Speicherorgane von Wurzelgemüse** > **Speicherorgane von Gemüse** > **Speicherorgane von Getreide**

auch in den hier durchgeführten Untersuchungen gefunden wurde. Zwischen dem höchsten gemessenen Transferfaktor in Blattgemüse und dem niedrigsten gemessenen in Weizenkörnern liegen fast 4 Größenordnungen.

#### 4.3 Die Abhängigkeit der Aktinidenaufnahme von der Bodenart

Die Art des Bodens beeinflusst die Löslichkeit von Transuranen in der Bodenlösung und damit die Pflanzenverfügbarkeit. Aufgrund des chemischen Verhaltens der betrachteten Nuklide (vgl. Kapitel 4.1) ist davon auszugehen, daß sich insbesondere pH-Wert, Austauschkapazität, Gehalt an organischer Substanz und Anteil der Tonfraktion auf die Löslichkeit der Nuklide im Bodenwasser auswirken müssen. Unter Berücksichtigung der in Tab. 1 zusammengestellten Bodenkenndaten sollte die Pflanzenverfügbarkeit der einzelnen Transurane in den verwendeten Böden in folgender Reihenfolge abnehmen:

**Braunerde aus Granit** > **Sandboden Gorleben** > **Sandboden Spöck** > **Braunerde aus Kreide** > **Gley-Böden**

Vergleicht man die mittleren Transferfaktoren, die für die verschiedenen Pflanzenarten auf den verschiedenen Böden erhalten wurden (Tab. 22), so zeigt sich, daß diese Reihenfolge immer dann eingehalten ist, wenn ein verhältnismäßig hoher Transfer gemessen wurde, also beispielsweise beim Transfer der einzelnen Nuklide in Maispflanzen oder Gras.

Bei Kartoffeln und Weizen liegen die für Pu, Am und Cm auf den verschiedenen Böden gemessenen Transferfaktoren so dicht beisammen, daß unter Berücksichtigung der Schwankungsbreite der mittleren Werte eine Aussage über den Einfluß der Bodenart auf den Transfer nicht sinnvoll erscheint.

Tab. 22: Mittlere Transferfaktoren der Nutzpflanzen, die auf verschiedenen Böden angebaut wurden

Pflanze	Nuklid	Transferfaktor · 10 <sup>5</sup>				
		Kreide	Granit	Gley	Gorleben	Spöck
Kartoffel	Np	310	1490		590	1820
	Pu	16	12		6,6	7,3
	Am	15	24		13	6,1
	Cm	15	26		11	9,1
Mais	Np	800	8200		2860	
	Pu	6,0	15		7,4	
	Am	9,9	110		38	
	Cm	7,7	110		23	
Weizen	Np	110	860		170	
	Pu	4,3	0,9		≤ 0,4	
	Am	3,6	1,7		≤ 7,8	
	Cm	3,6	2,1		≤ 10	
Gras	Np			3400	22000	
	Pu			22	73	
	Am			70	280	
	Cm			75	220	

#### 4.4 Der Einfluß der Aufzuchtbedingungen auf den Boden/Pflanzen-Transfer der betrachteten Transurane

Die Transferuntersuchungen wurden in Lysimetern und parallel dazu in Töpfen mit 10 kg Bodenfüllung durchgeführt, um zu prüfen, ob die Größe des verwendeten Aufzuchtgefäßes einen Einfluß auf die Wurzel Aufnahme ausübt, da die Wachstumsbedingungen für die Pflanze in den unterschiedlichen Versuchsgefäßen hinsichtlich Wasserhaushalt und Nährstoffversorgung sehr stark voneinander abweichen. Vergleicht man die in Topf- und Lysimeterversuchen erhaltenen Ergebnisse (Tab. A1 und A3), so lassen sich im Aufnahmeverhalten keine signifikanten Unterschiede feststellen, die auf die unterschiedlichen Versuchsgefäße zurückzuführen sind. Für die Praxis bedeutet dies, daß Parameterstudien zum Auffinden und zur Untersuchung solcher Bodenparameter, die den Transfer deutlich beeinflussen - wie z. B. pH-Wert, organische Bestandteile, Porenvolumen usw. -, Kick-Brauckmann-Gefäße verwendet werden können, die von der Bodenbeschaffung bis hin zur Abfallentsorgung weniger arbeitsintensiv und auch kostengünstiger als Lysimeter sind. Für Langzeituntersuchungen sind allerdings Lysimeter unverzichtbar, da in Topfversuchen, bedingt durch Bodenmüdigkeit, nach

2-3 Vegetationsperioden die Ernteerträge drastisch abnehmen und dadurch die gemessenen Transferfaktoren verfälscht werden können.

Die in flachen Wannen auf Kreide- und Granitboden durchgeführten Versuche, die den Einfluß des Unterbodens auf den Transfer deutlich machen sollten, zeigten in der 2. und 3. Vegetationsperiode teilweise eine bis zu 2 Größenordnungen höhere Pu-Aufnahme als in Töpfen und Lysimetern, während die Aufnahme der anderen Transurane mit den Ergebnissen der anderen Gefäße vergleichbar war (vgl. Tab. A1 und A3). Da die relativ hohen Pu-Konzentrationen in den Pflanzenproben durch die Versuchsanlage nicht erklärt werden können, muß angenommen werden, daß die zum großen Teil parallel bearbeiteten Proben während der Probenvorbereitung oder der Analyse mit Pu kontaminiert wurden. Diese Ergebnisse wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Die verbleibenden Messungen zeigen, daß der Boden/Pflanzen-Transfer der Transurane in Lysimetern, also bei Anwesenheit von Unterboden, mit dem in den Wannen gemessenen vergleichbar ist. Eine Abnahme des Transfers infolge der Nährstoffaufnahme aus tieferen, nicht kontaminierten Bodenschichten ist nicht zu beobachten.

In der Literatur wird empfohlen, zwischen dem Einbringen der Aktivität in den Boden und dem Beginn der Pflanzenaufzucht ein bis drei Monate abzuwarten, damit sich das bodenphysikalische Gleichgewicht einstellen kann /50/. Damit soll vermieden werden, daß die in löslicher Form in den Boden eingemischten Radionuklide zu Beginn der Aufnahmeversuche einen überproportional hohen Transfer in die Pflanze aufweisen, der dann mit zunehmender Versuchsdauer immer mehr abnimmt, bis eine einigermaßen konstante Aufnahmerate erreicht ist, wenn die Nuklide mit den verschiedenen Bodenparametern im Gleichgewicht stehen. Obwohl in den hier beschriebenen Versuchen die Aussaat unmittelbar nach der Kontamination erfolgte, konnte dieser sogenannte "aging effect" nicht eindeutig festgestellt werden. Bei Mais und Weizen auf Kreide und Granit konnte keine Abnahme des Transfers der Transurane im Verlauf von 7 aufeinanderfolgenden Vegetationsperioden festgestellt werden (Abb. 4 und 8). Bei Kartoffeln wurde zwar eine drastische Abnahme des Transfers von Pu, Am und Cm gemessen, jedoch ist dies in erster Linie auf zwei weitreichende Änderungen in der Versuchsdurchführung zurückzuführen (vgl. Kapitel 3.2). Auch für die Aufnahme in Gras auf Gley-Boden konnte keine Abnahme der Wurzelaufnahme mit fortschreitender Versuchsdauer als Folge eines "aging effects" festgestellt werden. Offenbar stellt sich bei den hier gegebenen Versuchsbedingungen das Gleichgewicht zwischen Boden und zugemischten Transuranen viel schneller ein als unter nordeuropäischen Verhältnissen /41/, wo für Pu eine Abnahme des Transfers mit einer Halbwertszeit von 1-2 Jahren beobachtet wurde.

Die mechanische Bearbeitung des Bodens bei der Ernte und zur Vorbereitung einer neuen Aussaat hat nach den vorliegenden Ergebnissen starke Auswirkungen auf den Boden/Pflanzen-Transfer der Folgefrucht. Besonders deutlich zeigt sich dieser Effekt bei der Wurzelaufnahme in Mais, der im Anschluß an Kartoffeln angebaut wurde: Der Transferfaktor kann bis zu einer Größenordnung höher

liegen als in den Versuchen, bei denen Mais als erste Pflanze angebaut wurde. Ursache für diesen höheren Transfer ist das vollständige Umgraben des Bodens zur Ernte der Kartoffeln. Dieser lockere, gut durchlüftete Boden begünstigt das Wurzelwachstum der Folgefrucht Mais, wobei die stärkere Bodendurchwurzelung zu einer höheren Mineralstoffaufnahme und im Zusammenhang damit zu einer höheren Aufnahme der dem Boden zugemischten Radionuklide führt. Ob, wie an anderer Stelle vermutet /41/, die bessere Durchlüftung des Bodens nach der Lockerung eine Änderung der chemischen Form der im Boden vorhandenen Radionuklide bewirkt, woraus eine höhere Löslichkeit im Porenwasser und damit eine bessere Pflanzenverfügbarkeit resultieren könnte, kann weder aus den Ergebnissen gefolgert, noch durch thermodynamischen Berechnungen /20,21/ bewiesen werden.

Abschließend ist festzuhalten, daß sich durch die landwirtschaftliche Nutzung einige Bodenparameter verändern. Dazu gehören sowohl Änderungen in der Lagerungsdichte und in der Porenverteilung, als auch Schwankungen im pH und im Gehalt an organischer Substanz durch den Verbleib und die Zersetzung von Wurzeln der vorangehenden Vegetationsperiode im Boden. Da für die Untersuchungen nur kleine Versuchsflächen zur Verfügung standen, war eine kontinuierliche Entnahme von Bodenproben zur Messung dieser Veränderungen ohne Störung des Versuchsablaufes nicht möglich. Weil sich aber alle diese nicht reproduzierbaren und in der Praxis nicht kontinuierlich meßbaren Bodenparameter auf den Boden/Pflanzen-Transfer auswirken, erscheint es gerechtfertigt, die Schwankung des Transferfaktors einer Pflanze auf dem selben Boden im Verlauf der einzelnen Vegetationsperioden auf diese nicht quantifizierbaren Änderungen im Boden zurückzuführen.

#### **4.5 Vergleich der gemessenen Transferfaktoren mit den zur Berechnung der Strahlenexposition durch Ingestion in der Bundesrepublik vorgeschriebenen Werten**

Die Berechnung der Strahlenexposition durch Ingestion erfolgt in der Bundesrepublik Deutschland nach der Allgemeinen Berechnungsgrundlage /5/. Bei der Berechnung der Jahresdosis eines Nuklids in einem bestimmten Organ wird die Aufnahme dieses Nuklids mit vier Nahrungsmittelgruppen berücksichtigt: pflanzliche Nahrungsmittel ohne Blattgemüse, Blattgemüse, Milch und Fleisch. Die Aufnahme des Nuklids mit jeder Nahrungsmittelgruppe wird durch die verzehrte Menge und die Konzentration des Nuklids in dieser Nahrungsmittelgruppe abgeschätzt. Die verzehrte Menge läßt sich durch die Verzehrsgewohnheiten der Bevölkerung festlegen, die Konzentration des Nuklids in den einzelnen Nahrungsmittelgruppen wird berechnet, wobei durchweg unter pessimistischen Annahmen ausgewählte Daten verwendet werden. In diese Berechnung der Konzentration des betrachteten Nuklids in pflanzliche Nahrungsmittel und Blattgemüse geht der Transferfaktor Boden/Pflanze ein, der aus der Literatur unter Annahme der ungünstigsten Bedingungen entnommen ist. Aufgrund der Berechnungsvorschriften ist der Transfer aus dem Boden in den eßbaren Teil der Pflanze in Bq/kg

Naßgewicht pflanzliches Nahrungsmittel pro Bq/kg Trockenboden vorgegeben. Die festgelegten Zahlenwerte sind in Tab. 24 mit aufgeführt.

Zum Vergleich der gemessenen Transferfaktoren mit den in der Berechnungsgrundlage vorgegebenen wurde zunächst für alle angebauten Pflanzen, die zum Verzehr geeignet sind, der Transferfaktor in Bq/kg Pflanzenfrischgewicht pro Bq/kg Trockenboden berechnet. Die erhaltenen Werte wurden in ein Wahrscheinlichkeitsnetz eingetragen (Abb. 11). Es zeigt sich, daß die Gesamtheit der gemessenen Transferfaktoren ebenso wie die für Kreide- und Granitboden erhaltenen Werte log-normal verteilt sind. Die geometrischen Mittelwerte der Transferfaktoren und die zugehörigen Streufaktoren für die einzelnen Nuklide wurden berechnet und sind zusammen mit dem Schwankungsbereich, in dem 95% der gemessenen Werte enthalten sind, in Tab. 23 aufgelistet. Zur Berechnung der Strahlenexposition durch Ingestion kontaminierter pflanzlicher Nahrungsmittel unter Annahme von realistischen Bedingungen ist der geometrische Mittelwert der gemessenen Transferfaktoren zu verwenden (50%-Wert in Tab. 24), unter Annahme von konservativen Gesichtspunkten der größtmögliche Transferfaktor (95%-Wert in Tab. 24).

Der Vergleich der gemessenen Transferfaktoren mit den in der Berechnungsgrundlage für konservative Abschätzungen vorgegebenen zeigt für Pu und Am eine recht gute Übereinstimmung, während in der Berechnungsgrundlage bei Np der Boden/Pflanzen-Transfer um etwa eine Größenordnung unterschätzt und bei Cm um etwa eine Größenordnung überschätzt wird. Beim Vergleich der gemessenen Transferfaktoren mit empfohlenen Werten aus der neueren Literatur /51/, die in Tab. 24 mit aufgenommen sind, ist festzustellen, daß die notwendigen Korrekturen der Transferfaktoren von Np und Cm dort bereits durchgeführt sind, wobei nach den hier vorgestellten Ergebnissen diese empfohlenen Werte insgesamt etwas zu "konservativ" ausgelegt sind.

Tab. 23: Geometrischer Mittelwert der Transferfaktoren für pflanzliche Nahrungsmittel inklusive Blattgemüse (235 Proben)  
( Bq/kg Pflanzenfrischgewicht / Bq/kg Trockenboden )

Nuklid	N*	Transferfaktor · 10 <sup>5</sup>		
		Median	Streufaktor	Schwankungsbereich (95 %)
Np	229	210	3,75	15 - 3000
Pu	133	1,3	3,72	0,1 - 18
Am	155	2,7	3,30	0,2 - 29
Cm	121	3,6	3,56	0,3 - 46

\*N gibt die Zahl der bei der Mittelwertbildung berücksichtigten Ergebnisse über der Nachweisgrenze an



Tab. 24: Zusammenstellung von empfohlenen und gemessenen Transferfaktoren zur Berechnung der Strahlenexposition durch Ingestion kontaminierter pflanzlicher Nahrungsmittel ( Bq/kg Pflanzenfrischgewicht / Bq/kg Trockenboden )

Herkunft der Transferfaktoren	Np-237	Pu-238	Am-241	Cm-244
Berechnungsgrundlage /5/	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
Safety Series No. 57 /51/	$4 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Diese Arbeit:				
für konservative Abschätzung (95%-Wert)	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$
für realistische Abschätzung (50%-Wert)	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$

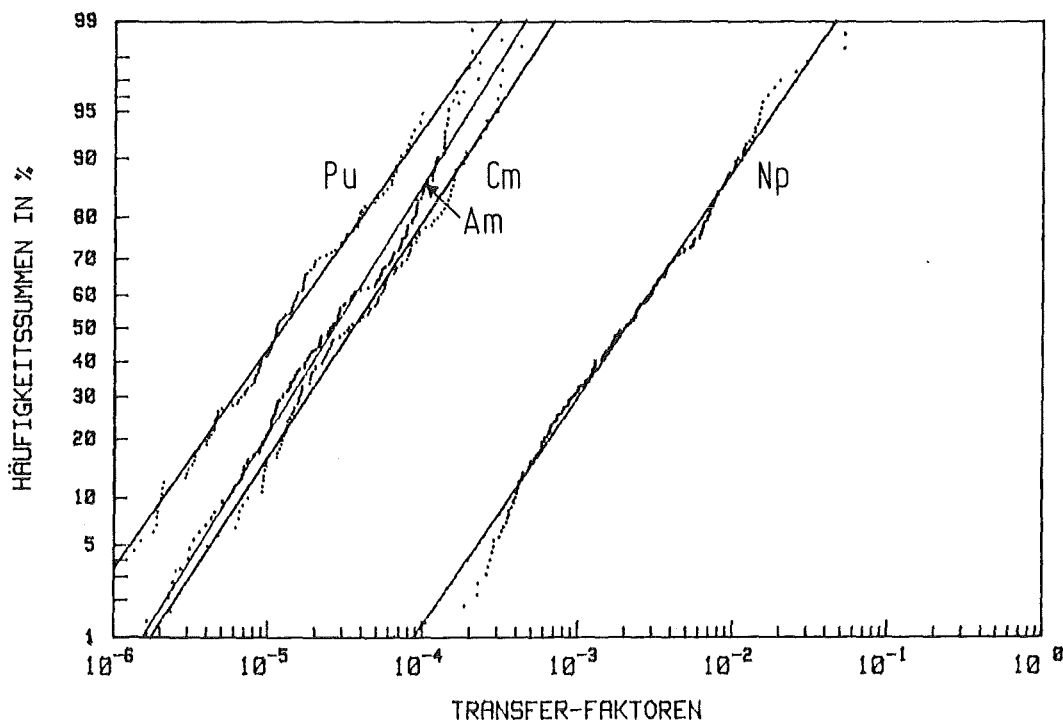


Abb. 11: Prüfung der Transferfaktoren Boden/eßbarer Pflanzenteil auf logarithmische Normalverteilung im Wahrscheinlichkeitsnetz (Bq/kg Pflanzenfrischgewicht / Bq/kg Trockenboden)

## 5. Schlußfolgerungen

Betrachtet man alle gemessenen Transferfaktoren für Np, Pu, Am und Cm ohne Berücksichtigung der einzelnen Böden und Pflanzen, so liegen zwischen dem niedrigsten und höchsten Wert bei jedem Nuklid etwa 3 Größenordnungen. Zieht man in Betracht, daß bei Parallelversuchen, d. h. Aufzucht gleicher Pflanzen auf gleichem Boden unter identischen Bedingungen, die Schwankungsbreite des gemessenen Transferfaktors innerhalb einer Größenordnung liegt, der mittlere Transferfaktor aber von Vegetationsperiode zu Vegetationsperiode sich um bis zu zwei Größenordnungen nach oben oder nach unten verschieben kann durch nicht reproduzierbare Änderungen der Bodenverhältnisse infolge der landwirtschaftlichen Nutzung, so wird deutlich, daß die Eingrenzung des Transferfaktors auf drei Größenordnungen den Boden/Pflanzen-Transfer für die meisten Böden und Pflanzen unter üblichen Aufzuchtbedingungen realistisch wiedergibt.

Zur Berechnung der Strahlenexposition durch Ingestion kontaminierter pflanzlicher Nahrungsmittel sind unter konservativen Gesichtspunkten die in der Berechnungsgrundlage vorgegebenen Transferfaktoren für Pu und Am mit den experimentell ermittelten Werten vergleichbar, während bei Cm das Transferverhalten nach der Berechnungsgrundlage um etwa den Faktor 10 über- und bei Np um etwa den Faktor 10 unterschätzt wird.

Mit den erhaltenen Ergebnissen kann das Langzeitverhalten der Aktiniden hinsichtlich des Boden/Pflanzen-Transfers abgeschätzt werden, ohne daß eine definitive Aussage über die Einflußgrößen und Mechanismen der Wurzel Aufnahme möglich ist. Zur Entwicklung eines allgemein gültigen Modells des Boden/Pflanzen-Transfers ist es erforderlich, das Multiparametersystem Boden-Pflanze-Nuklid stark zu vereinfachen. Dies kann beispielsweise dadurch erreicht werden, daß der Boden, der eine Vielzahl an Parametern aufweist, die den Transfer beeinflussen, durch Nährlösungen und definierte Trägermaterialien ersetzt wird, so daß gezielte Parameterstudien durchgeführt werden können. Auf Grund der komplizierten Fragestellung und der Vielzahl an möglichen Einflußgrößen sind sehr viele Einzelmessungen notwendig. Für Parameterstudien empfiehlt sich daher der Einsatz solcher Elemente, die sehr schnell, sehr empfindlich und mit möglichst geringem chemischen Aufwand gemessen werden können. Dazu bieten sich viele Schwermetalle an, deren Verhalten in der Umwelt nicht geklärt ist, die aber wegen der hohen Emissionsraten und der zwischenzeitlich weiten Verbreitung in der Umwelt Anlaß zur Besorgnis geben.

## 6. Literaturverzeichnis

- /1/ D. C. Adriano, A. Wallace, E. M. Romney  
Uptake of Transuranic Nuclides from Soil by Plants Grown  
under Controlled Environmental Conditions  
in "Transuranic Elements in the Environment"  
DOE/TIC-22800, (1980), pp. 336-360
- /2/ P. A. Cawse, G. S. Turner  
The Uptake of Radionuclides by Plants: A Review of Recent  
Literature  
AERE-R 9887 (1982)
- /3/ M. Pimpl, H. Schüttelkopf  
Transport von Plutonium, Americium und Curium aus Böden in  
Pflanzen durch Wurzel Aufnahme  
KfK-2891 (1979)
- /4/ R. C. Thompson  
Neptunium-The Neglected Actinide: A Review of the Biological  
and Environmental Literature  
Radiat. Res. 90, 1-32 (1982)
- /5/ Allgemeine Berechnungsgrundlagen für die Strahlenexposition  
bei radioaktiven Ableitungen mit der Abluft oder in Ober-  
flächengewässer  
Gemeinsames Ministerialblatt, G 3191 AX, Ausgabe A, Seite  
369, Der Bundesminister des Inneren, Bonn 15.08.1979
- /6/ H. Schüttelkopf  
Entwicklung einer Analysenmethode für Plutonium im Femto-  
gramm/Gramm-Bereich und ihre Anwendung auf Umweltproben  
KfK-3035 (1981)
- /7/ M. Pimpl, H. Schüttelkopf  
The Measurement of Plutonium in Environmental Samples and in  
Gaseous and Liquid Effluents of Nuclear Installations  
1st Internat. Contact Seminar in Terrestrial Radioecology,  
Uppsala, S, July 8-11, 1985  
SLU-REK-61 (1986), S. 53-62 (Editor: A. Eriksson)
- /8/ H. Schüttelkopf, M. Afsar, K. Bender  
Die Bestimmung von Americium und Curium in Umweltproben  
in KfK-3113 (1981), S. 139
- /9/ M. Pimpl, H. Schüttelkopf  
A Fast Radiochemical Procedure to Measure Neptunium,  
Plutonium, Americium and Curium in Environmental Samples for  
Application in Environmental Monitoring and Radioecological  
Research  
5th Intern. Conf. on Nuclear Methods in Environmental and  
Energy Research, Mayaguez, Puerto Rico, April 2-6, 1984

- /10/ M. Pimpl, H. Schüttelkopf  
A Fast Radiochemical Procedure to Measure Sequentially Pu, Am, Cm, and Np in Environmental Samples  
1st Internat. Contact Seminar in Terrestrial Radioecology, Uppsala, S, July 8-11, 1985  
SLU-REK-61 (1986), S. 69-76 (Editor: A. Eriksson)
- /11/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV)  
Bundesgesetzblatt Nr. 125 (1976), Teil 1, S. 2905-2995
- /12/ M. Pimpl, W. Schmidt, H. Schüttelkopf  
Messung des Boden/Pflanzen-Transfers von Pu, Am, Cm und Np in einem Gewächshaus für radioökologische Studien  
Strahlung und Radionuklide in der Umwelt: Tagung der Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen, Bonn, 8.-9. Nov. 1984
- /13/ W. Schmidt, M. Pimpl, T. Sollich  
Beschreibung des Gewächshauses  
in KfK-4067 (1986), S.142-145
- /14/ W. Schmidt, M. Pimpl, J. Hiller  
Vorbereitende Untersuchungen zur Messung des Transfers Boden/Pflanze von Aktiniden im Gewächshaus  
in KfK-3535 (1983), S. 175-178
- /15/ M. Pimpl, H. Schüttelkopf, W. Schmidt, G. Hefner, J. Hiller  
in KfK-3350, S.4800/1-4800/14 (1983)
- /16/ L. Sachs  
Angewandte Statistik  
Springer Verlag, 6. Auflage 1984
- /17/ H. Schüttelkopf, M. Pimpl  
Bestimmung und Verhalten von Plutonium in den Abwasser- und Abluftpfaden in der Umgebung des Kernforschungszentrums Karlsruhe  
Nukleare Entsorgung. Nuclear Fuel Cycle. Internat. Schriftenreihe zur Chemie, Physik und Verfahrenstechnik der nuklearen Entsorgung (Hrsg.: F. Baumgärtner), Band 3, Verlag Chemie, Weinheim 1986, S. 323-369
- /18/ M. Pimpl, W. Schmidt, H. Schüttelkopf  
Boden/Pflanzen-Transfer der Aktiniden  
in KfK-4170 (1986), S. 549-566
- /19/ A. W. Klement  
CRC Handbook of Environmental Radiation  
CRC Press, Boca Raton, Florida / USA, 1982, S. 173-182
- /20/ B. Skytte Jensen  
The Geochemistry of Radionuclides with Long Half-Lives  
RISO-R-430 (1980)

- /21/ M. Pimpl  
Influence of Redox-Potentials in Soils on the Plant Availability of Pu and Np  
2nd Internat. Seminar on Terrestrial Radioecology, Piacenza, Italy, Sept. 9-11, 1986
- /22/ R. L. Watters, D. M. Edgington, T. E. Hakonson, W. C. Hanson, A. H. Smith, F. W. Whicker, R. E. Wildung  
Synthesis of the Research Literature  
in "Transuranic Elements in the Environment"  
DOE/TIC-22800, (1980), pp. 1-44
- /23/ B. Allard  
Solubilities of Actinides in Neutral or Basic Solutions  
in Actinides in Perspective (Hrsg.: N. M. Edelstein),  
Pergamon Press 1982, S. 553-580
- /24/ E. A. Bondietti, T. Tamura  
Physicochemical Associations of Plutonium and Other  
Actinides in Soil  
in "Transuranic Elements in the Environment"  
DOE/TIC-22800, (1980), pp. 145-164
- /25/ C. Keller  
The Chemistry of the Transuranium Elements  
Verlag Chemie, Weinheim 1971
- /26/ A. J. M. Baker  
Accumulators and Excluders- Strategies in the Response of  
Plants to Heavy Metals  
Journal of plant nutrition 3(1-4), 643-654 (1981)
- /27/ D. A. Cataldo, T. R. Garland, R. E. Wildung  
Aspects of Neptunium Behavior in Plants: Absorption, Distribution and Fate  
PNL-SA--11778 (1984)
- /28/ T. R. Garland, D. A. Cataldo, R. E. Wildung  
Absorption, Transport, and Chemical Fate of Plutonium in  
Soybean Plants  
J. Agricult. and Food Chem. 29, 915-920 (1981)
- /29/ T. R. Garland, D. A. Cataldo, R. E. Wildung  
Chemical Transformations of Plutonium in Plants  
Symposium on Environmental Research for Actinide Elements,  
Hilton Head Island, SC - USA, November 1983
- /30/ M. Pimpl, W. Schmidt  
Soil-to-Plant Transfer Studies of Neptunium, Plutonium,  
Americium and Curium  
IV Intern. Symposium of Radioecology "The Impact of Nuclear  
Origin Accidents on Environment", Cadarache, France,  
14 - 19 March, 1988

- /31/ R. G. Schreckhise, J. F. Cline  
Comparative Uptake and Distribution of Plutonium, Americium,  
Curium, and Neptunium in Four Plant Species  
in "Transuranic Elements in the Environment"  
DOE/TIC-22800, (1980), pp. 361-370
- /32/ B. N. Vyas, K. B. Mistry  
Influence of Clay Mineral Type and Organic Matter Content  
on the Uptake of Pu-239 and Am-241 by Plants  
Plant and Soil 59, 75-82 (1981)
- /33/ A. Eriksson  
Long Term Open Field Lysimeter Study on the Transfer of  
Transuranics from Soil to Crop Plants  
Report on a Workshop on the Measurement of Soils to Plant  
Transfer Factors for Radionuclides, Wageningen, NL, 7-10  
December 1982, Part II, S. 14-29
- /34/ P. A. Cawse  
Transfer Factors for Cs-137 and Pu-239 determined in the U.K.  
Report on a Workshop on the Measurement of Soils to Plant  
Transfer Factors for Radionuclides, Wageningen, NL, 7-10  
December 1982, Part II, S. 124-133
- /35/ D. S. Popplewell, G. J. Ham, J. W. Stather  
The Uptake of Pu-239+240, Am-241, Sr-90 and Cs-137 into  
Potatoes  
Report on a Workshop on the Measurement of Soils to Plant  
Transfer Factors for Radionuclides, Wageningen, NL, 7-10  
December 1982, Part II, S. 164-171
- /36/ A. Saas  
Valeurs experimentales de transfert sol-plante des isotopes  
obtenues par le Laboratoire de Radioecologie Terrestre du  
CEN Cadarache (France)  
Report on a Workshop on the Measurement of Soils to Plant  
Transfer Factors for Radionuclides, Wageningen, NL, 7-10  
December 1982, Part II, S. 172-227
- /37/ P. A. Cawse, S. J. Baker  
Soil to Plant Transfer Factors for Cs-137 and Pu-239+240  
Determined by Field and Glasshouse Measurements in Great  
Britain  
III Report of the Workgroup Soil-to Plant Transfer Factors  
of the IUR, 1984. Contact person: M. J. Frissel, RIVM, P. O.  
Box 1, NL-3720 BA Bilthoven, S. 88-103
- /38/ A. Eriksson  
Data for the Workshop in Cadarache. Additional Information  
on Experiments Concerning the Plant Uptake of Transuranics  
III Report of the Workgroup Soil-to Plant Transfer Factors  
of the IUR, 1984. Contact person: M. J. Frissel, RIVM, P. O.  
Box 1, NL-3720 BA Bilthoven, S. 115-126

- /39/ D. S. Popplewell, G. J. Ham, T. E. Johnson  
The Uptake of Pu-239,240, Am-241, Sr-90 into Plants  
III Report of the Workgroup Soil-to Plant Transfer Factors  
of the IUR, 1984. Contact person: M. J. Frissel, RIVM, P. O.  
Box 1, NL-3720 BA Bilthoven, S. 127-131
- /40/ M. J. Frissel, R. M. J. Pennders  
The Uptake of Pu-239+240 and Am-241 by Grass on Normally  
Grased Pastures  
III Report of the Workgroup Soil-to Plant Transfer Factors  
of the IUR, 1984. Contact person: M. J. Frissel, RIVM, P. O.  
Box 1, NL-3720 BA Bilthoven, S. 138-139
- /41/ A. Eriksson  
Plant Uptake of Pu-238, Np-237 and Am-241 from Four Soils  
Compared in a 9-Year Lysimeter Study  
IV Report of the Workgroup Soil-to Plant Transfer Factors  
of the IUR, 1985. Contact person: M. J. Frissel, RIVM, P. O.  
Box 1, NL-3720 BA Bilthoven, S. 14-27
- /42/ P. A. Cawse, S. J. Baker  
Soil to Plant Transfer Factors for Am-241 and Additional  
Data for Cs-137 and Pu-239+240, Determined by Field  
Measurements in Great Britain  
IV Report of the Workgroup Soil-to Plant Transfer Factors  
of the IUR, 1985. Contact person: M. J. Frissel, RIVM, P. O.  
Box 1, NL-3720 BA Bilthoven, S. 28-50
- /43/ G. J. Ham, D. S. Popplewell, S. D. Shuttler  
The Uptake of Pu-239, Am-241, Sr-90 and Cs-137 into Cabbage  
and Potatoes  
IV Report of the Workgroup Soil-to Plant Transfer Factors  
of the IUR, 1985. Contact person: M. J. Frissel, RIVM, P. O.  
Box 1, NL-3720 BA Bilthoven, S. 51-61
- /44/ M.J. Frissel, J. Koster  
Soil-to Plant Transfer Factors of Radionuclides. Expected  
Values and Uncertainties. A Summary of Available Data.  
V Report of the Workgroup Soil-to Plant Transfer Factors  
of the IUR, 1987. Contact person: M. J. Frissel, RIVM, P. O.  
Box 1, NL-3720 BA Bilthoven, S. 2-25
- /45/ G. C. White, T. E. Hakonson, A. J. Ahlquist  
Factors Affecting Radionuclide Availability to Vegetables  
Grown at Los Alamos  
J. Environ. Qual. 10 (3), 294-299 (1981)
- /46/ D. C. Adriano, J. C. Corey, R. C. Dahlman  
Plutonium Contents of Field Crops in the Southeastern  
United States  
in "Transuranic Elements in the Environment"  
DOE/TIC-22800,(1980), pp. 381-402

- /47/ E. Iranzo, A. Espinosa, E. C. Iranzo  
Evaluation of Remedial Actions Taken in Agricultural Area  
Contaminated by Transuranides  
IV Intern. Symposium of Radioecology "The Impact of Nuclear  
Origin Accidents on Environment", Cadarache, France,  
14 - 19 March, 1988
- /48/ F. Dienstbach, K. Bächmann, C. Thom  
Untersuchungen des Plutoniumgehalts von Pflanzen  
Z. Pflanzenernaehr. Bodenk. **146**, 690-696 (1983)
- /49/ S. L. Simon, S. A. Ibrahim  
The Plant/Soil Concentration Ratio for Calcium, Radium,  
Lead, and Polonium: Evidence for Non-linearity with  
Reference to Substrate Concentration  
J. Environ. Radioactivity **5**, 123-142 (1987)
- /50/ Recommendations for the Determination of Transfer Factors  
Report on a Workshop on the Measurement of Soils to Plant  
Transfer Factors for Radionuclides, Wageningen, NL, 7-10  
December 1982, Part I, S. 3-10
- /51/ Safety Series No. 57 "Generic Models and Parameters for  
Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from  
Routine Releases"  
IAEA, Vienna 1982, S. 64



## 7. Anhang

Die folgenden Tabellen enthalten die geometrischen Mittelwerte der Parallelmessungen auf Kreide- und Granitboden für sieben aufeinanderfolgende Vegetationsperioden. Neben der Pflanzenart, -sorte und dem analysierten Anteil sind die Mittelwerte der Transferfaktoren für  $N_p$ ,  $P_u$ ,  $A_m$  und  $C_m$  angegeben zusammen mit den Streufaktoren und dem Bereich, in dem 68 % der Meßwerte liegen. Werte unter der Nachweisgrenze wurden bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt.

Folgende drei Tabellen sind im Anhang zusammengefaßt:

Tab. A 1: Transferfaktoren auf Kreideverwitterung  
( L=Lysimeter, T=Kick-Brauckmann-Töpfe, W=Wannen,  
\*=kontaminiert mit der Gießmethode )

Tab. A 2: Transferfaktoren für Blätter und Kolben von Mais,  
angebaut auf Kreide- und Granitverwitterung

Tab. A 3: Transferfaktoren auf Granitverwitterung  
( L=Lysimeter, T=Kick-Brauckmann-Töpfe, W=Wannen,  
\*=kontaminiert mit der Gießmethode )

Tab. A 1: Transferfaktoren auf Kreideverwitterung  
 ( L=Lysimeter, T=Kick-Brauckmann-Töpfe, W=Wannen,  
 \*=kontaminiert mit der Gießmethode )

Pflanze Sorte Anal. Teil	Gefäß	Vege- tations- periode	Nuklid	Transferfaktor · 10 <sup>5</sup>		
				Median	Streu- faktor	Schwankungs- bereich (68 %)
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	L	1983	Np	390	1,86	209 - 726
			Pu	4,4	2,03	2,2 - 8,9
			Am	1,5	1,09	1,4 - 1,6
			Cm	1,1	1,82	0,6 - 2,0
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	T	1983	Np	604	1,22	497 - 734
			Pu	3,6	1,60	2,3 - 5,8
			Am	5,6	1,23	4,6 - 6,9
			Cm	4,3	1,14	3,8 - 4,9
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	T*	1983	Np	1490	1,37	1090 - 2030
			Pu	5,1	1,19	4,3 - 6,1
			Am	44	1,26	35 - 55
			Cm	26	1,80	15 - 47
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	W*	1983	Np	193	1,45	133 - 280
			Pu	58	2,16	27 - 126
			Am	5,0	2,62	1,9 - 13
			Cm	3,9	2,28	1,7 - 8,9
Weizen "Kolibri" Körner	L	1983	Np	52	1,88	28 - 98
			Pu	≤ 2,1		
			Am	≤ 6,7		
			Cm	≤ 1,4		
Weizen "Kolibri" Körner	T	1983	Np	62	1,46	43 - 90
			Pu	≤ 4,5		
			Am	≤ 5,3		
			Cm	≤ 2,6		
Weizen "Kolibri" Körner	W*	1983	Np	63	1,08	59 - 69
			Pu	5,0	1,45	3,4 - 7,3
			Am	≤ 3,1		
			Cm	≤ 4,3		
Kartoffel "Saphier" Knolle mit Schale	T	1983	Np	611	1,48	412 - 906
			Pu	108	1,44	75 - 156
			Am	133	1,49	89 - 197
			Cm	81	1,59	51 - 129
Kartoffel "Saphier" Knolle mit Schale	L	1983	Np	196	1,96	100 - 385
			Pu	53	2,04	26 - 109
			Am	88	1,95	45 - 173
			Cm	56	2,06	27 - 115

Tab. A 1 (Fortsetzung): Transferfaktoren auf Kreideverwitterung  
 ( L=Lysimeter, T=Kick-Brauckmann-Töpfe, W=Wannen,  
 \*=kontaminiert mit der Gießmethode )

Pflanze Sorte Anal. Teil	Gefäß	Vege- tations- periode	Nuklid	Transferfaktor · 10 <sup>5</sup>			
				Median	Streu- faktor	Schwankungs- bereich (68 %)	
Kartoffel "Saphier" Knolle mit Schale	W*	1983	Np	139	2,37	59	- 331
			Pu	1330	1,50	887	- 2000
			Am	179	1,34	134	- 241
			Cm	56	1,54	116	- 276
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	T	1983/84	Np	6590	1,06	6210	- 6990
			Pu	12	1,16	11	- 14
			Am	41	1,13	36	- 46
			Cm	30	1,14	27	- 35
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	L	1983/84	Np	392	1,37	286	- 538
			Pu	2,5	2,09	1,2	- 5,2
			Am	2,0	1,55	1,3	- 3,1
			Cm	1,4	1,47	0,9	- 1,6
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	W*	1983/84	Np	759	1,51	501	- 1150
			Pu	1980	1,55	1280	- 3070
			Am	58	2,33	25	- 136
			Cm	89	1,78	50	- 158
Weizen "Kolibri" Körner	L	1983/84	Np	35	1,16	30	- 40
			Pu	≤ 0,5			
			Am	3,7	2,53	1,5	- 9,4
			Cm	≤ 0,9			
Weizen "Kolibri" Körner	T	1983/84	Np	173	1,19	146	- 206
			Pu	≤ 1,8			
			Am	≤ 1,2			
			Cm	≤ 0,8			
Weizen "Kolibri" Körner	T*	1983/84	Np				
			Pu				
			Am	≤ 4,2			
			Cm	≤ 5,8			
Weizen "Kolibri" Körner	W*	1983/84	Np	57	1,21	47	- 69
			Pu	1,9	1,22	1,6	- 2,3
			Am	≤ 1,1			
			Cm	≤ 1,3			
Kartoffel "Culpa" Knolle ohne Schale	T	1983/84	Np	305	1,15	266	- 350
			Pu	60	1,70	35	- 101
			Am	82	1,50	55	- 123
			Cm	60	1,50	40	- 91

Tab. A 1 (Fortsetzung): Transferfaktoren auf Kreideverwitterung  
 ( L=Lysimeter, T=Kick-Brauckmann-Töpfe, W=Wannen,  
 \*=kontaminiert mit der Gießmethode )

Pflanze Sorte Anal. Teil	Gefäß	Vege- tations- periode	Nuklid	Transferfaktor · 10 <sup>5</sup>				
				Median	Streu- faktor	Schwankungs- bereich (68 %)		
Kartoffel "Crista" Knolle ohne Schale	L	1983/84	Np	422	1,48	285	-	625
			Pu	82	1,44	57	-	118
			Am	109	1,36	80	-	148
			Cm	69	1,07	64	-	74
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	T	1984	Np	1080	1,38	779	-	1490
			Pu	17	5,52	3,1	-	96
			Am	24	1,36	18	-	32
			Cm	20	1,48	14	-	30
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	L	1984	Np	517	1,17	442	-	606
			Pu	3,3	1,87	1,8	-	6,2
			Am	5,9	1,87	3,2	-	11
			Cm	3,9	1,52	2,6	-	5,9
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	W*	1984	Np	1370	1,78	771	-	2440
			Pu	43	1,21	35	-	52
			Am	12	1,63	7,3	-	19
			Cm	12	1,83	6,3	-	21
Weizen "Kolibri" Körner	L	1984	Np	54	1,24	43	-	67
			Pu	≤ 0,2				
			Am	≤ 0,3				
			Cm	≤ 0,3				
Weizen "Kolibri" Körner	T	1984	Np	284	1,14	248	-	324
			Pu	≤ 0,5				
			Am	≤ 0,9				
			Cm	≤ 0,7				
Weizen "Kolibri" Körner	W*	1984	Np	71	1,89	38	-	134
			Pu	2,8	1,44	1,9	-	4,0
			Am	≤ 0,7				
			Cm	≤ 1,3				
Kartoffel "Saphier" Knolle ohne Schale	T	1984	Np	209	1,50	139	-	313
			Pu	4,3	1,49	2,9	-	6,4
			Am	7,0	1,72	4,1	-	12
			Cm	4,7	1,33	3,5	-	6,3
Kartoffel "Saphier" Knolle ohne Schale	T*	1984	Np	229	1,45	158	-	331
			Pu	6,0	2,63	2,3	-	16
			Am	6,9	1,24	5,6	-	8,6
			Cm	4,8	1,30	3,7	-	6,2

Tab. A 1 (Fortsetzung): Transferfaktoren auf Kreideverwitterung  
 ( L=Lysimeter, T=Kick-Brauckmann-Töpfe, W=Wannen,  
 \*=kontaminiert mit der Gießmethode )

Pflanze Sorte Anal. Teil	Gefäß	Vege- tations- periode	Nuklid	Transferfaktor · 10 <sup>5</sup>		
				Median	Streu- faktor	Schwankungs- bereich (68 %)
Kartoffel "Saphier" Knolle ohne Schale	L	1984	Np	143	1,28	112 - 183
			Pu	1,5	1,69	0,9 - 2,5
			Am	1,4	1,12	1,2 - 1,6
			Cm	1,5	1,49	1,0 - 2,2
Kartoffel "Granola" Knolle ohne Schale	L	1984	Np	357	2,76	129 - 985
			Pu	12		10 - 14
			Am	≤ 3,6		
			Cm	≤ 4,4		
Kartoffel "Saphier" Knolle ohne Schale	W*		Np	132	1,29	102 - 170
			Pu	4,2	1,59	2,6 - 6,7
			Am	3,9	1,32	3,0 - 5,1
			Cm	3,2	1,33	2,4 - 4,3
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	T	1984/85	Np	679	1,32	514 - 896
			Pu	2,9	1,16	2,5 - 3,4
			Am	9,1	1,15	7,9 - 10
			Cm	9,6	1,24	7,7 - 12
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	T*	1984/85	Np	1080	1,25	858 - 1350
			Pu	5,8	1,81	3,2 - 10
			Am	18	1,47	12 - 27
			Cm	13	2,05	6,2 - 26
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	L	1984/85	Np	747	1,41	531 - 1050
			Pu	3,0	1,53	2,0 - 4,6
			Am	6,4	1,34	4,8 - 8,6
			Cm	6,3	1,47	4,3 - 9,3
Weizen "Kolibri" Körner	T	1984/85	Np	115	1,20	96 - 137
			Pu	6,7	1,16	5,8 - 7,8
			Am	≤ 3,3		
			Cm	≤ 3,3		
Weizen "Kolibri" Körner	L	1984/85	Np	149	2,62	57 - 389
			Pu	≤ 7,1		
			Am	≤ 11,5		
			Cm	≤ 28,6		
Kartoffel "Granola" Knolle ohne Schale	L	1984/85	Np	728	2,11	345 - 1530
			Pu	≤ 2,9		10 - 14
			Am	6,8	1,46	4,7 - 10
			Cm	≤ 3,9		

Tab. A 1 (Fortsetzung): Transferfaktoren auf Kreideverwitterung  
(L=Lysimeter, T=Kick-Brauckmann-Töpfe, W=Wannen,  
\*=kontaminiert mit der Gießmethode)

Pflanze Sorte Anal. Teil	Gefäß	Vege- tations- periode	Nuklid	Transferfaktor · 10 <sup>5</sup>		
				Median	Streu- faktor	Schwankungs- bereich (68 %)
Kartoffel "Granola" Knolle ohne Schale	T	1984/85	Np	557	1,35	413 - 750
			Pu	10	4,39	2,3 - 44
			Am	10	2,02	5,1 - 21
			Cm	7,4	2,06	3,6 - 15
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	L	1985	Np	659	1,06	619 - 702
			Pu	1,9	1,94	1,0 - 3,7
			Am	5,4	1,52	3,6 - 8,2
			Cm	4,2	1,66	2,5 - 7,0
Weizen "Kolibri" Körner	L	1985	Np	61	1,27	48 - 78
			Pu	≤ 1,5		
			Am	≤ 3,6		
			Cm	≤ 3,7		
Kartoffel "Granola" Knolle ohne Schale	L	1985	Np	420	1,54	273 - 647
			Pu	2,4	1,62	1,5 - 3,9
			Am	4,8	3,77	1,3 - 18
			Cm	8,0	2,90	2,7 - 23
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	L	1985/86	Np	1960	1,32	1480 - 2590
			Pu	40	1,36	29 - 54
			Am	156	1,42	110 - 221
			Cm	142	1,44	99 - 205
Weizen "Kolibri" Körner	L	1985/86	Np	259	1,54	168 - 400
			Pu	3,2	1,49	2,1 - 4,8
			Am	12	1,49	8,0 - 18
			Cm	5,2	1,52	3,4 - 7,9
Kartoffel "Granola" Knolle ohne Schale	L	1985/86	Np	180	1,87	96 - 336
			Pu	0,9	1,61	0,5 - 1,4
			Am	1,8	1,95	0,9 - 3,5
			Cm	1,6	1,63	1,0 - 2,6
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	L	1986	Np	1054		1010 - 1100
			Pu	4,3		4,0 - 4,6
			Am	12		10 - 12
			Cm	6,7		5,7 - 7,7
Weizen "Kolibri" Körner	L	1986	Np	241	2,86	84 - 689
			Pu	≤ 0,3		
			Am	1,1	1,22	0,9 - 1,3
			Cm	≤ 1,0		

Tab. A 1 (Fortsetzung): Transferfaktoren auf Kreideverwitterung  
 ( L=Lysimeter, T=Kick-Brauckmann-Töpfe, W=Wannen,  
 \*=kontaminiert mit der Gießmethode )

Pflanze Sorte Anal. Teil	Gefäß	Vege- tations- periode	Nuklid	Transferfaktor · 10 <sup>5</sup>		
				Median	Streu- faktor	Schwankungs- bereich (68 %)
Kartoffel "Granola" Knolle ohne Schale	L	1986	Np	509	1,97	259 - 1000
			Pu	6,9	1,24	5,5 - 8,6
			Am	10	1,46	7,0 - 15
			Cm	7,7	1,66	4,6 - 13

Tab. A 2: Transferfaktoren für Blätter und Kolben von Mais,  
 angebaut auf Kreide- und Granitverwitterung

Boden	Gefäß	Pflanzen- teil	Anbau	Transferfaktor · 10 <sup>5</sup>			
				Np-237	Pu-238	Am-241	Cm-244
Kreide	L	Blatt Kolben	1983	338	1,8	2,7	3,1
				14	≤ 0,3	≤ 0,2	≤ 0,3
	W*	Blatt Kolben	1983	434	217	12	11
				12	0,3	-	-
	L	Blatt Kolben	1983/84	479	3,6	1,6	1,3
				18	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,2
Granit	L	Blatt Stengel Kolben	1983	34600	18	158	235
				15300	29	54	85
				623	≤ 0,2	-	-
	W*	Blatt Kolben	1983	11200	23	193	140
				263	≤ 0,3	-	-
	W*	Stengel Kolben	1983/84	8000	118	89	66
			1240	30	26	≤ 3,9	
	L	Stengel Kolben	1983/84	4350	5,5	26	24
				286	1,1	0,7	≤ 0,8

Tab. A 3: Transferfaktoren auf Granitverwitterung  
 ( L=Lysimeter, T=Kick-Brauckmann-Töpfe, W=Wannen,  
 \*=kontaminiert mit der Gießmethode )

Pflanze Sorte Anal. Teil	Gefäß	Vege- tations- periode	Nuklid	Transferfaktor · 10 <sup>5</sup>			
				Median	Streu- faktor	Schwankungs- bereich (68 %)	
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	L	1983	Np	11800	1,30	9080	-15300
			Pu	6,5	1,19	5,4	- 7,7
			Am	52	1,21	43	- 63
			Cm	80	1,06	76	- 86
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	T	1983	Np	5560	1,21	4590	- 6740
			Pu	11	1,11	10	- 12
			Am	122	1,19	103	- 145
			Cm	94	1,36	69	- 128
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	W*	1983	Np	9180	1,24	7400	-11400
			Pu	18	1,21	15	- 22
			Am	99	1,73	57	- 171
			Cm	42	1,41	30	- 59
Weizen "Kolibri" Körner	L	1983	Np	453	1,29	352	- 583
			Pu	≤ 1,8			
			Am	-			
			Cm	-			
Weizen "Kolibri" Körner	T	1983	Np	1070	1,42	752	- 1510
			Pu	≤ 2,6			
			Am	≤ 4,5			
			Cm	≤ 1,4			
Weizen "Kolibri" Körner	W*	1983	Np	1840	1,88	980	- 3460
			Pu	≤ 1,9			
			Am	-			
			Cm	-			
Kartoffel "Saphier" Knolle mit Schale	T	1983	Np	2130	1,70	1250	- 3600
			Pu	106	1,86	57	- 197
			Am	171	1,66	103	- 284
			Cm	129	1,83	71	- 236
Kartoffel "Saphier" Knolle mit Schale	L	1983	Np	1390	1,54	902	- 2130
			Pu	61	2,19	28	- 134
			Am	41	3,67	11	- 150
			Cm	39	2,19	18	- 85
Kartoffel "Saphier" Knolle mit Schale	W*	1983	Np	963	1,20	804	- 1150
			Pu	76	1,17	65	- 89
			Am	35	1,23	28	- 43
			Cm	24	1,06	23	- 25



Tab. A 3 (Fortsetzung): Transferfaktoren auf Granitverwitterung  
 ( L=Lysimeter, T=Kick-Brauckmann-Töpfe, W=Wannen,  
 \*=kontaminiert mit der Gießmethode )

Pflanze Sorte Anal. Teil	Gefäß	Vege- tations- periode	Nuklid	Transferfaktor · 10 <sup>5</sup>			
				Median	Streu- faktor	Schwankungs- bereich (68 %)	
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	T	1983/84	Np	21000	1,26	16700	-26400
			Pu	44	1,84	24	- 80
			Am	650	1,77	367	- 1150
			Cm	500	1,72	291	- 859
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	W*	1983/84	Np	7560	1,18	6430	- 8900
			Pu	1060	1,38	772	- 1470
			Am	122	1,14	107	- 138
			Cm	105	1,14	92	- 120
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	L	1983/84	Np	5160	1,12	4590	- 5800
			Pu	28	4,94	5,7	- 140
			Am	44	1,19	37	- 53
			Cm	45	1,20	38	- 54
Weizen "Kolibri" Körner	T	1983/84	Np	883	1,51	584	- 1340
			Pu	≤ 2,1			
			Am	2,9	1,18	2,4	- 3,4
			Cm	1,6	1,62	1,0	- 2,6
Weizen "Kolibri" Körner	W*	1983/84	Np	1070	1,75	610	- 1870
			Pu	0,6	1,03	0,6	- 0,6
			Am	3,4	1,26	2,7	- 4,3
			Cm	≤ 3,3			
Weizen "Kolibri" Körner	L	1983/84	Np	1300	1,66	782	- 2160
			Pu	≤ 0,3			
			Am	1,0	1,53	0,6	- 1,5
			Cm	≤ 2,8			
Kartoffel "Culpa" Knolle ohne Schale	T	1983/84	Np	1370	1,52	900	- 2070
			Pu	17	2,35	7,2	- 40
			Am	31	2,77	11	- 85
			Cm	21	2,59	8,0	- 54
Kartoffel "Culpa" Knolle ohne Schale	L	1983/84	Np	1470	1,04	1410	- 1530
			Pu	23	2,11	11	- 49
			Am	50	1,71	29	- 86
			Cm	47	1,48	32	- 70
Kartoffel "Crista" Knolle ohne Schale	W*	1983/84	Np	1890	1,90	1000	- 3600
			Pu	43	1,64	26	- 71
			Am	75	1,28	59	- 96
			Cm	55	1,62	34	- 89

Tab. A 3 (Fortsetzung): Transferfaktoren auf Granitverwitterung  
 ( L=Lysimeter, T=Kick-Brauckmann-Töpfe, W=Wannen,  
 \*=kontaminiert mit der Gießmethode )

Pflanze Sorte Anal. Teil	Gefäß	Vege- tations- periode	Nuklid	Transferfaktor · 10 <sup>5</sup>			
				Median	Streu- faktor	Schwankungs- bereich (68 %)	
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	T	1984	Np	4870	1,11	4390	- 5400
			Pu	6,0	1,13	5,3	- 6,8
			Am	91	1,17	78	- 106
			Cm	69	1,59	44	- 110
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	L	1984	Np	5040	1,35	3740	- 6800
			Pu	5,4	1,53	3,5	- 8,3
			Am	52	1,24	42	- 65
			Cm	60	1,31	46	- 79
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	W*	1984	Np	13400	1,43	9360	-19300
			Pu	15	1,34	12	- 21
			Am	225	1,11	204	- 249
			Cm	189	1,11	171	- 210
Weizen "Kolibri" Körner	T	1984	Np	831	1,29	644	- 1080
			Pu	≤ 1,5			
			Am	≤ 1,7			
			Cm	≤ 1,7			
Weizen "Kolibri" Körner	L	1984	Np	558	1,54	362	- 861
			Pu	≤ 0,4			
			Am	≤ 1,1			
			Cm	≤ 2,9			
Weizen "Kolibri" Körner	W*	1984	Np	1170	1,44	811	- 1680
			Pu	60	1,72	35	- 103
			Am	≤ 5,9			
			Cm	≤ 10,4			
Kartoffel "Saphier" Knolle ohne Schale	T	1984	Np	1310	1,31	1000	- 1710
			Pu	5,2	1,58	3,3	- 8,2
			Am	15	1,48	10	- 23
			Cm	13	1,52	8,7	- 20
Kartoffel "Saphier" Knolle ohne Schale	W*	1984	Np	1350	1,09	1230	- 1470
			Pu	4,1	1,96	2,1	- 8,0
			Am	23	1,10	21	- 25
			Cm	14	1,07	14	- 15
Kartoffel "Saphier" Knolle ohne Schale	L	1984	Np	2670	1,01	2630	- 2700
			Pu	2,5	2,07	1,2	- 5,2
			Am	15	1,38	11	- 21
			Cm	19	1,74	11	- 33

Tab. A 3 (Fortsetzung): Transferfaktoren auf Granitverwitterung  
 ( L=Lysimeter, T=Kick-Brauckmann-Töpfe, W=Wannen,  
 \*=kontaminiert mit der Gießmethode )

Pflanze Sorte Anal. Teil	Gefäß	Vege- tations- periode	Nuklid	Transferfaktor · 10 <sup>5</sup>			
				Median	Streu- faktor	Schwankungs- bereich (68 %)	
Kartoffel "Granola" Knolle ohne Schale	L	1984	Np	10200	1,54	6630	-15700
			Pu	22	1,06	21	- 24
			Am	56	1,33	42	- 74
			Cm	81	1,65	49	- 134
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	T	1984/85	Np	6060	1,51	4020	- 9130
			Pu	11	1,22	8,7	- 13
			Am	81	1,24	66	- 100
			Cm	58	1,34	43	- 78
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	L	1984/85	Np	14400	1,20	12000	-17300
			Pu	8,8	1,35	6,6	- 12
			Am	87	1,23	71	- 107
			Cm	142	1,49	95	- 211
Weizen "Kolibri" Körner	L	1984/85	Np	499	1,41	354	- 704
			Pu	≤ 1,5			
			Am	≤ 2,3			
			Cm	≤ 8,0			
Weizen "Kolibri" Körner	T	1984/85	Np	1580	1,08	1470	- 1700
			Pu	≤ 6,8			
			Am	≤ 11,5			
			Cm	≤ 11,5			
Kartoffel "Granola" Knolle ohne Schale	L	1984/85	Np	1360	1,55	880	- 2070
			Pu	16	3,97	4,0	- 63
			Am	13	1,24	11	- 16
			Cm	≤ 27			
Kartoffel "Granola" Knolle ohne Schale	T	1984/85	Np	2460	1,02	2400	- 2520
			Pu	13	1,14	11	- 15
			Am	63	1,41	45	- 88
			Cm	42	1,53	27	- 64
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	L	1985	Np	7200	1,18	6120	- 8500
			Pu	28	2,50	11	- 71
			Am	81	1,14	71	- 92
			Cm	92	1,27	73	- 117
Weizen "Kolibri" Körner	L	1985	Np	1350	1,27	1070	- 1720
			Pu	≤ 0,4			
			Am	1,4	1,17	1,2	- 1,6
			Cm	≤ 4,8			

Tab. A 3 (Fortsetzung): Transferfaktoren auf Granitverwitterung  
 ( L=Lysimeter, T=Kick-Brauckmann-Töpfe, W=Wannen,  
 \*=kontaminiert mit der Gießmethode )

Pflanze Sorte Anal. Teil	Gefäß	Vege- tations- periode	Nuklid	Transferfaktor · 10 <sup>5</sup>			
				Median	Streu- faktor	Schwankungs- bereich (68 %)	
Kartoffel "Granola" Knolle ohne Schale	L	1985	Np	739	1,13	653	- 836
			Pu	1,2	1,74	0,7	- 2,1
			Am	4,2	2,36	1,9	- 11
			Cm	8,2	1,51	5,4	- 12
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	L	1985/86	Np	8490	1,12	7560	- 9530
			Pu	133	2,09	64	- 279
			Am	442	1,58	280	- 699
			Cm	741	1,67	442	- 1240
Weizen "Kolibri" Körner	L	1985/86	Np	512	1,37	375	- 699
			Pu	≤ 0,7			
			Am	3,2	1,73	1,9	- 5,5
			Cm	≤ 3,3			
Kartoffel "Granola" Knolle ohne Schale	L	1985/86	Np	2480	1,85	1340	- 4580
			Pu	2,0	1,66	1,2	- 3,3
			Am	8,3	1,65	5,1	- 14
			Cm	17	1,61	10	- 27
Mais "Cargill" Ges.Pflanze	L	1986	Np	12200		11700	-12700
			Pu	3,9		3,6	- 4,2
			Am	82		77	- 86
			Cm	133		125	- 141
Weizen "Kolibri" Körner	L	1986	Np	866	1,05	821	- 913
			Pu	≤ 0,3			
			Am	1,2	1,31	0,9	- 1,6
			Cm	2,0	1,53	1,3	- 3,1
Kartoffel "Granola" Knolle ohne Schale	L	1986	Np	626	1,85	339	- 1155
			Pu	1,3	2,69	0,5	- 3,5
			Am	11	1,88	5,8	- 20
			Cm	10	1,38	7,6	- 14

## Danksagung

An dieser Stelle sei allen Mitarbeitern der HS/R Dank gesagt, die mit ihrer Arbeit die Voraussetzung schufen für die Durchführung der Untersuchungen und letztendlich die Erstellung dieses Berichtes. Mein besonderer Dank gilt:

Herrn Dr. H. Schüttelkopf für die Konzeption des Vorhabens und die erfolgreiche Einbindung in das F+E-Programm des Kernforschungszentrums, sowie für seine Unterstützung durch Rat und Tat während der Durchführung des Programms,

Herrn Dr. W. Schmidt und Herrn T. Sollich für die engagierte Betreuung des Gewächshauses und der darin durchgeführten Pflanzenaufzucht, sowie der sich daran anschließenden Probenvorbereitung zur Analyse,

Frau G. Hefner und Frau K. Gamer für die gewissenhafte Durchführung der zahlreichen Analysen,

Herrn DP. H. Fessler und seinen Mitarbeiterinnen für die sorgfältige Aufnahme der vielen  $\alpha$ -Spektren.

Weiterhin schulde ich Dank Herrn Prof. Dr. H. Kiefer und Herrn Dr. L. König für ihr stetes Interesse am Fortgang der Arbeiten und ihrer vielfältigen Hilfe bei der Lösung der jeweils anstehenden Probleme. Nicht vergessen werden soll ein besonderer Dank an die Projektleitung und die Mitarbeiter des Projektes Nukleare Sicherheit, ohne deren engagiertes Eintreten für dieses Forschungsthema wesentliche Teile des Programmes nicht hätten durchgeführt werden können.