

## TRANSFERPROZESSE VON CÄSIUM-RADIONUKLIDEN IN WALD-ÖKOSYSTEMEN

### TRANSFER PROCESSES OF CESIUM RADIONUCLIDES IN FOREST ECOSYSTEMS

G. Zibold<sup>1</sup>, J. Drissner<sup>1</sup>, W. Erb<sup>1</sup>, Th. Herrmann<sup>2</sup>, M. Hund<sup>1</sup>, G. Lindner<sup>1</sup>, H. Schodlock<sup>3</sup>, Ch. Wilhelm<sup>1</sup>, J. Wolf<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Innovation und Transfer, Fachhochschule Ravensburg-Weingarten, D-7987 Weingarten; <sup>2</sup>Lehrstuhl für Bodenkunde und Bodengeographie, Universität Bayreuth, D-8580 Bayreuth; <sup>3</sup>Realschule Bad Wurzach, D-7954 Bad Wurzach

#### Zusammenfassung

In der Region Oberschwaben im südwestdeutschen Alpenvorland wurde als Folge der Bodenkontamination durch den Fallout aus dem Reaktorunfall in Tschernobyl bei Rehwild eine überdurchschnittlich hohe Kontamination mit Cäsium-Radionukliden festgestellt, die nur langsam mit einer effektiven Halbwertszeit von 2,8 +/- 0,5 Jahren absinkt. Ein mehrjähriges, nahezu flächendeckendes Überwachungsprogramm ergab ausgeprägte saisonale und regionale Verteilungsmuster mit Kontaminationsmaxima im Herbst und in Moorgebieten. Untersuchungen zum Transfer Boden - Pflanze von Cäsium-Radionukliden in diesen Waldgebieten zeigten eine leichtere Freisetzbarkeit in Moorböden und eine Reduktion des Transfers auf Waldflächen, auf denen bereits vor der Kontamination durch den Tschernobyl-Fallout Kalk-Mischdünger bzw. Kaliummagnesia-Dünger ausgebracht worden war.

#### Summary

In the prealpine region of Oberschwaben in south-west Germany in roe deer a comparatively high contamination with Cesium radionuclides was observed as a consequence of soil contamination from the Chernobyl fallout, which decreases only slowly with an effective half-time of 2,8 +/- 0,5 y. From an almost complete surveillance of roe deer contamination over several years distinct seasonal and regional pattern were obtained, which exhibit maxima in autumn and in swamps, respectively. Investigations of the transfer soil - plant of Cesium radionuclides showed a higher mobilization in swampy soils and a reduction of transfer in forest areas, which had been treated with fertilizers including lime- and potassium-magnesium-mixtures prior to the Chernobyl accident.

#### 1. Einführung

Das Transferverhalten von oberflächlich deponierten Cäsium-Radionukliden aus dem Boden in Pflanzen und Tiere weist regionale Unterschiede auf, die vom Typ und von der Nutzung der Böden abhängen /1/. Bei Waldböden treten besonders hohe Transferfaktoren (definiert als Verhältnis zwischen der massenspezifischen Aktivität von Pflanzen bzw. Tieren in Bq/kg und der flächenspezifischen Aktivität des Bodens in Bq/m<sup>2</sup>) auf /2/. In der Region Oberschwaben im eiszeitlich gebildeten südwestdeutschen Alpenvorland, die in Mitteleuropa zu den am stärksten vom Tschernobyl-Fallout kontaminierten Regionen gehört, hatte dies bei Rehwild, das seine Nahrung überwiegend in Wäldern aufnimmt, eine im Vergleich zu anderen Tierarten überdurchschnittlich hohe und lang anhaltende Radiocäsium-Kontamination zur Folge /3, 4/.

#### 2. Saisonale und regionale Struktur der Kontamination von Rehwild

In Zusammenarbeit mit den staatlichen Forstämtern wurden seit 1987 die spezifischen Aktivitäten von Cs-137 und Cs-134 bei nahezu allen in dieser Region erlegten Rehen

bestimmt (insgesamt ca. 800 Proben pro Jahr). Der zeitliche Verlauf der Kontamination zeigt eine ausgeprägte saisonale Struktur (Abb. 1). Die Kurve der gleitenden Mittelwerte der spezifischen Cs-137 Aktivität über einen Zeitraum von zwei Wochen besitzt regelmäßig im Herbst (September bzw. Oktober) auftretende, scharf begrenzte Maxima. Diese Kontaminationsmaxima fallen zeitlich zusammen mit dem Massenaufkommen von Maronenröhrlingen in den Wäldern, die eine besonders hohe spezifische Cäsium-Aktivität besitzen [3]. Wie aus Untersuchungen zum Äsungsverhalten der Rehe bekannt ist, sind Pilze im Herbst Bestandteil ihrer Nahrung [5]. Deshalb wird die Äsung von Pilzen, insbesondere von Maronenröhrlingen, als Hauptursache für die herbstlichen Kontaminationsmaxima angesehen. Die zeitliche Lage und Form der Maxima spiegelt dann den Zeitraum und das Ausmaß des Pilzaufkommens wieder. Diese Vermutung wird durch das Herbstmaximum des Jahres 1990 unterstützt, das im Vergleich zu den Vorjahren etwa einen Monat verspätet einsetzt und scharf auf einen Zeitraum von 4 Wochen begrenzt ist. In diesem Jahr wurde wegen des trockenen Sommers auch das Aufkommen von Maronenröhrlingen erst ungewöhnlich spät beobachtet (Ende September) und durch Nachtfrost bereits Ende Oktober abrupt beendet. Zwischen den herbstlichen Maxima bleibt die Rehwild-Kontamination auf einem relativ hohen Niveau fortbestehen; der langsame Rückgang der Kontamination der Gesamtpopulation kann mit einer effektiven ökologischen Halbwertszeit von  $2,8 \pm 0,5$  Jahren charakterisiert werden. Die effektiven Halbwertszeiten für den Kontaminationsrückgang in den wichtigsten Äsungspflanzen (Brombeere, Heidelbeere) und in Maronenröhrlingen liegen in der gleichen Größenordnung wie beim Rehwild und stimmen untereinander weitgehend überein [6, 7]. Dieser in Waldgebieten im Gegensatz zu landwirtschaftlichen Nutzflächen nur langsam abklingende Transfer aus dem Boden in Pflanzen deutet darauf hin, daß die Cäsium-Radionuklide in Waldböden über längere Zeiträume hinweg in einer pflanzenverfügbaren Form vorliegen.

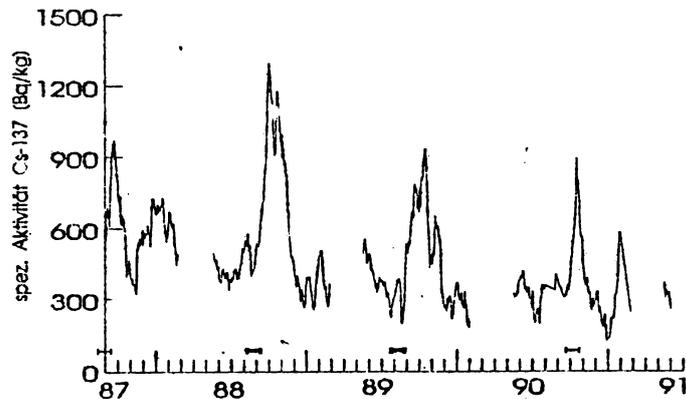


Abb. 1: Zeitlicher Verlauf der spezifischen Cs-137 Aktivität in Muskelfleisch von Rehwild aus der Region Oberschwaben. Aufgetragen ist der gleitende arithmetische Mittelwert über 15 Tage. Die Wachstumsperiode von Maronenröhrlingen ist markiert.

Die regionale Verteilung der Rehwild-Kontamination weist eine stärkere Schwankungsbreite auf als die entsprechende Boden-Kontamination [4]. Das Verteilungsmuster bleibt aber über mehrere Jahre hinweg erhalten (Abb. 2). Die Transferfaktoren Boden-Brombeere korrelieren gut mit den Transferfaktoren Boden - Reh [6]. Unter der Annahme, daß keine relevante

Artenverschiebung im Spektrum der Äsungspflanzen vorliegt, kann die Kontamination von Rehwild als Indikator für kleinräumig variierende Transferfaktoren Boden - Pflanzen angesehen werden. Dabei wurden in Waldgebieten mit vergleichsweise hohen pH-Werten des Bodens die niedrigsten (Bereich B in Abb. 2), in Mooregebieten mit mächtiger Humusauflage (Bereich A in Abb. 2) die höchsten Transferfaktoren Boden - Rehwild gemessen (4).

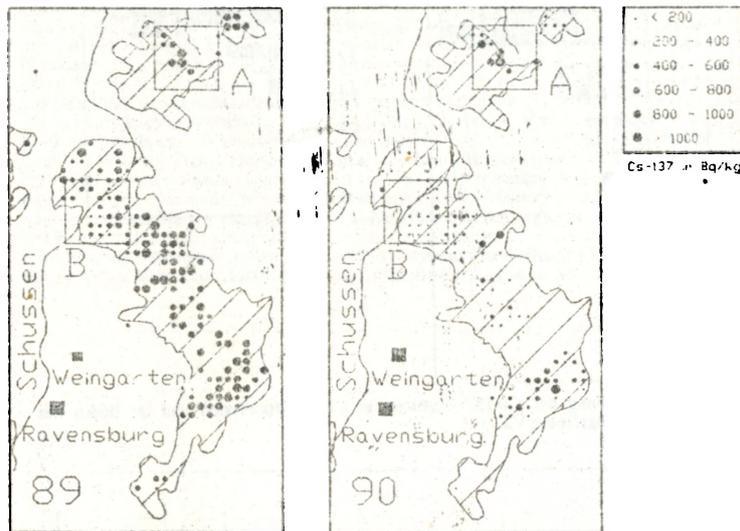


Abb. 2: Regionale Verteilung der spezifischen Cs-137 Aktivität in Rehwild in Oberschwaben in den Jahren 1989 und 1990. Die schraffierten Flächen kennzeichnen Waldgebiete. Jeder Punkt repräsentiert den Mittelwert der Meßwerte einer Rasterfläche von 0,5 \* 0,5 km<sup>2</sup>.

### 3 Transfer Boden - Pflanze in Wald- und Mooregebieten

Mit selektiven Extraktionsversuchen konnten Unterschiede in der Freisetzbarkeit von Cäsium-Radionukliden zwischen Wald- und Mooreböden festgestellt werden: Bei einer Mooreboden-Probe ergab sich ein signifikant höherer Anteil von Cäsium-Radionukliden, die sich durch H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Aufschluß in Lösung überführen lassen bzw. durch Ammonium-Ionen austauschen lassen, als bei einer Bodenprobe aus einem Fichtenhochwald (zur Vermeidung einer Readsorption von gelösten Cäsium-Radionukliden wurden bei diesen Experimenten stabile Cäsium-Ionen in Form einer CsCl-Lösung im Überschuß zugegeben) (7). Der leichteren Freisetzbarkeit in Mooreböden entspricht auch eine tieferreichende vertikale Verteilung als in Waldböden (Abb. 3). Während in Waldböden nicht mehr als 5 - 10 % des Cs-137 Inventars in größeren Tiefen als 10 cm gefunden wurden, sind in Mooreböden bis zu 22 % des Cs-137 in Tiefen von mehr als 12 cm vorgedrungen (7). Bei den Transferfaktoren Boden - Pflanze ergaben sich für Proben aus dem Brunnenholzried (Bereich A in Abb. 2) und aus dem benachbarten Hochwald bei Farnen höhere Werte als in den Mooreböden, während bei Heidelbeeren und Fichtentrieben keine signifikanten Unterschiede im Transfer zwischen dem Moor- und dem Waldgebiet festgestellt werden konnten (Abb. 4). Auf Mooreböden sind allerdings Pflanzen mit vergleichsweise hohem Radiocäsium-Transferfaktor häufiger anzutreffen als auf Waldböden (z.B. Heidekraut), so daß ein

Pflanzen mit höherem Transferfaktor hin verschobenes Äsungsspektrum als eine wichtige Ursache für den erhöhten Transfer Boden - Reh in Moorgebieten angesehen wird.

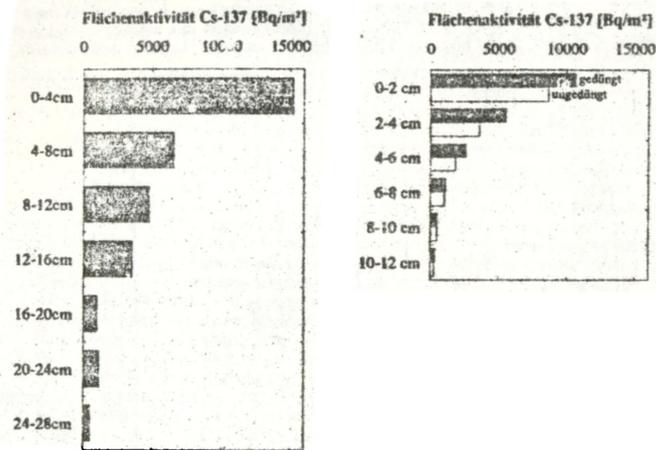


Abb. 3: Tiefenverteilung des Cs-137 Inventars in einem Moorboden und im Boden der Walddüngungsfläche V2.

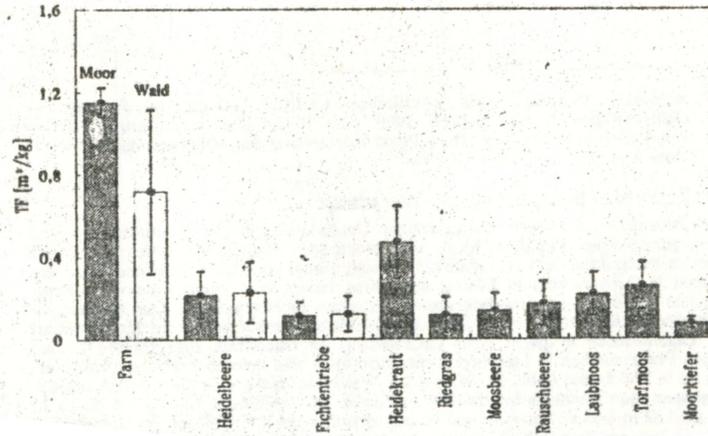


Abb. 4: Cs-137 Transferfaktoren (bezogen auf TS) von verschiedenen Pflanzen auf Moor- und angrenzendem Waldsrandort.

#### 4 Transfer Boden - Pflanze auf Walddüngungsflächen

Von Untersuchungen an landwirtschaftlich genutzten Böden ist bekannt, daß durch Düngemaßnahmen der Transfer von Cäsium-Radionukliden in Pflanzen beeinflusst werden kann (8). Entsprechende Untersuchungen wurden an zwei Waldflächen in Oberschwaben durchgeführt, die bereits im Jahre 1985, also vor der Kontamination durch den Tschernobyl-Fallout, mit verschiedenen Düngergaben behandelt worden waren. Beide Waldflächen (4 ha bzw. 9 ha) befinden sich in einer Höhenlage von ca. 670 m mit 70-jähriger Fichten-Bestockung. Auf ihnen wurde eine Düngermischung bestehend aus 83% CaCO<sub>3</sub>, 8% MgO, 6% K<sub>2</sub>O, 3% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> mit einer Dosierung von 2,5 t/ha (V1) bzw. Kalimagnesia-Dünger mit 1,0 t/ha (V2) ausgebracht. Beide Flächen grenzen an vergleichbare ungedüngte Kontrollflächen mit gleicher Bestockung. Bei beiden Flächenpaaren wurden in den Jahren 1989 und 1990 an jeweils ca. 30 Beprobungspunkten Boden- und Pflanzenproben entnommen und hierfür jeweils der Transferfaktor bestimmt. Aus diesen Einzelwerten wurde für jede Fläche der Mittelwert mit Varianz bestimmt und auf den entsprechenden Mittelwert der Kontrollfläche bezogen. Die derart berechneten normierten Transferfaktoren sind in Abb. 5 für verschiedene Pflanzenarten dargestellt. Für beide Düngeflächen ergibt sich im Vergleich mit den Kontrollflächen für alle erfaßten Arten eine signifikante Reduktion der Transferfaktoren (ermittelt mit einseitigem t-Test mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner 1%). Für die Fläche V1 ist diese Reduktion stärker ausgeprägt als für die Fläche V2.

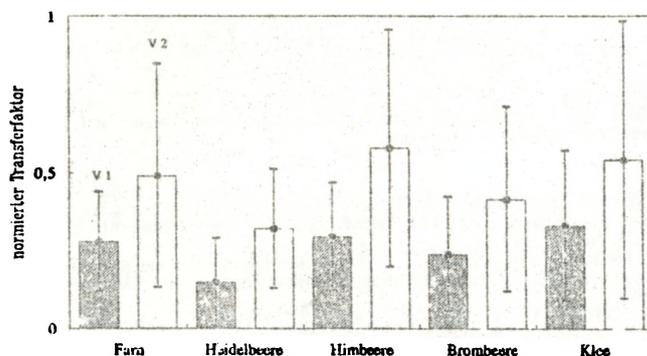


Abb. 5: Auf Kontrollflächen normierte Cs-137 Transferfaktoren für verschiedene Pflanzenarten von Walddüngungsversuchsflächen V1 und V2.

Im Gegensatz dazu wurde an einer weiteren, allerdings kleineren Walddüngungsfläche, auf der ebenfalls vor der Kontamination durch den Tschernobyl-Fallout parzellenweise verschiedene Dünger ausgebracht worden waren, bei Farnen ein niedrigerer Transferfaktor bei Kalimagnesia-Düngung im Vergleich zur Kalkung ermittelt (Abb. 6). Insbesondere im Hinblick auf die Wirkung der Kalkausbringung ist es daher erforderlich, die bodenchemischen Mechanismen aufzuklären, die die beobachteten Veränderungen im Transfer der Cäsium-Radionuklide bewirken.

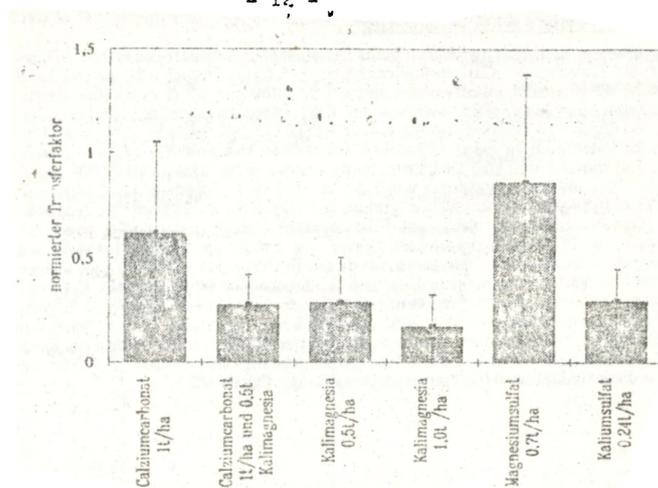


Abb. 6: Normierte Transferfaktoren für Farn bei unterschiedlichen Düngern auf einer weiteren Walddüngungsversuchsfläche.

### 5. Literatur

- 1/ Litz, N., Tietz, B.: Das Verhalten von natürlichen und künstlichen Radionukliden im Boden, Schriftenreihe des Fachbereichs Landschaftsentwicklung und Umweltforschung der TU Berlin, Nr. 46 (1987).
- 2/ Bunzl, K., Schimmack, W., Kreuzer, K., Schierl, R.: Interception and Retention of Chernobyl-derived  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{106}\text{Ru}$  in a spruce stand, *Sci. Tot. Environm.* 78, 77-87 (1989).
- 3/ Zibold, G., Geisler, A., Kissling, S., Niebuhr, J., Wilhelm, C.: Radiocesium in roe deer from the South of West-Germany, Proc. XVth Regional Congress of IRPA "The Radioecology of Natural and Artificial Radionuclides" (W. Feldt, ed.), Verlag TÜV Rheinland, Köln, pp.268-273 (1989).
- 4/ Lindner, G., Erb, W., Hain, K., Wilhelm, C., Zibold, G.: Control and management of natural ecosystems contaminated by cesium radionuclides from the Chernobyl fallout, Proc. Int. Conf. "European Trade and Technology", Sunderland (GB), pp. 265-273 (1990).
- 5/ Karlen, G., Johanson, K.J., Bergström, R.: Seasonal variation in concentration and daily intake of Cs-137 in Swedish roe deer, *J. Environm. Radioact.* (in press).
- 6/ Erb, W.: Untersuchung der regionalen Variation der Transferfaktoren für Radiocäsium in den Wäldern Oberschwabens, Diplomarbeit, Fachhochschule Ravensburg-Weingarten (1990).
- 7/ Hund, M.: Radiocäsium in Waldökosystemen Oberschwabens: Transportmechanismen, Diplomarbeit, Fachhochschule Ravensburg-Weingarten (1991).
- 8/ Rosen, K.: Effects of potassium on the Cesium transfer to the crops after Chernobyl, Proc. XVth Regional Congress of IRPA "The Radioecology of Natural and Artificial Radionuclides" (W. Feldt, ed.), Verlag TÜV Rheinland, Köln, pp. 232-237 (1989).

Diese Untersuchungen wurden gefördert vom Minister für Umwelt des Landes Baden-Württemberg.

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА (ТРАНСФЕРА) РАДИОНУКЛИДОВ  
ЦЕЗИЯ В ЛЕСНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Г. ЦИВОЛЬД 1), Д. ДРИССНЕР 1), В. ЭРБ 1), Т. ГЕРМАНИ 2), М. ХИЦД 1),

Г. ЛЯДНЕР 1), У. ШОДЛОК 3), Х. ВЕЛЬТЕЛМ 1), Д. БОЛЬФ 1).

- 1) Институт инноваций и трансфера, Фахшохле Равенсбурга-Вайнгартена, D-7987 Вайнгартен.
- 2) Кафедра почвоведения и географии, Университет в Байройте, D-8580 Байройт.
- 3) Реальная школа в Бад Вурцахе, D-7954 Бад Вурцах.

Резюме

-----

В регионе Верхней Швабии в юго-западном немецком предгорье Альп были установлены загрязнения радионуклидами цезия в мясе диких коз выше среднего уровня как следствие загрязнения почвы через радиоактивные осадки из взорвавшегося реактора в Чернобыле, которое медленно понижается с эффективным периодом полураспада  $2,8 \pm 0,5$  лет. Многолетняя, почти представляющая собой сплошной мониторинг, программа наблюдений дала ярко выраженное сезонное и региональное распределение максимума загрязнения на осень и в заболоченной местности. Исследования переноса (трансфера) радионуклидов цезия почва-растение в этих лесных массивах (областях) показали сравнительную сохраняемость радионуклидов в почвах болот и уменьшение переноса радионуклидов на лесных площадях, на которых до чернобыльских уровней загрязнения имело место загрязнение радионуклидами вследствие применения известковых и калийно-магниевого удобрений.