

Forschungsberichtsblatt

Vorhabensnummer BWR 24018,

Laufzeit 04/05 – 12/06

**Migration und Bioverfügbarkeit von
Radiocäsium in
Böden Süddeutschlands**

G. Zibold, I. Konopleva, E. Klemt und A. Konoplev

Hochschule Ravensburg-Weingarten,

88250 Weingarten,

zibold@hs-weingarten.de

1 Kurzbeschreibung des Forschungsergebnisses.

Zusammenfassung

Untersuchungsgebiet war der Altdorfer Wald bei Ravensburg in Oberschwaben, der sich über eine Fläche von ca. 60 km² als Mischwald mit Buche (*Fagus*) und Fichte (*Picea abies*) sowie Fichtenwald (*Picea abies*) erstreckt.

Die untersuchten Waldböden und Wiesen sind sauer, reich an organischem Material und arm an Nährstoffen wie z. B. Kalium. Sie enthalten außerdem immer noch etwa 6 bis 27 kBq/m² Radiocäsium (¹³⁷Cs aus Tschernobyl, 1986), das sich allerdings nur als Spurenverunreinigung in der Bodenlösung bemerkbar macht. Wären die Oberböden reich an Ton, so könnte das meiste Radiocäsium an den selektiven Bindungsplätzen der Tonminerale adsorbiert werden und damit wäre das Radiocäsium nicht mehr pflanzenverfügbar, ein Effekt, von dem man in landwirtschaftlich genutzten Böden profitiert. In Waldböden findet jedoch ein Wettbewerb zwischen den Pflanzenwurzeln und wenigen selektiven Bindungsplätzen um das verfügbare Radiocäsium statt, der zugunsten der Wurzelaufnahme ausgeht und damit zum Biorecycling des ¹³⁷Cs führt. Dieser Sachverhalt wurde durch das Projekt quantitativ aufgeklärt.

In diesem Projekt ist es für Misch und Fichtenwald erstmals gelungen die folgenden chemischen Eigenschaften

- den austauschbaren Cs-Anteil α_{ex} im Boden,
- das Radiocaesium Interception Potential (RIP), ein Maß für die selektive Sorption von ¹³⁷Cs, sowie
- die Konkurrenzionen von ¹³⁷Cs des Bodens

an 15 Positionen zu bestimmen und mit diesen Daten den ¹³⁷Cs Transfer Boden Pflanze (TF) vorherzusagen und mit TF-Messungen zu vergleichen.

- Der ¹³⁷Cs Transfer-Faktor Boden-Pflanze TF bezogen auf die Wurzelzone liegt in Fichtenwaldböden im Mittel um eine Größenordnung über jenem für Mischwaldböden für die Pflanzen Farn (*Dryopteris carthusiana*), Brombeere (*Rubus fruticosus*), und Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus*).
- Die Bioverfügbarkeit von ¹³⁷Cs wird wesentlich durch die Anzahl der selektiven Bindungsplätze an den in der Wurzelzone vorhandenen Tonmineralen bestimmt, dem Radiocaesium Interception Potential (RIP). TF ist umgekehrt proportional zu RIP. Im Mischwaldboden ist RIP deutlich größer als im Fichtenwaldboden.
- Großen Einfluss auf die Bioverfügbarkeit von ¹³⁷Cs haben auch die Ammonium und die Kalium Konzentration in der Bodenlösung, da sie in direkter Konkurrenz zu ¹³⁷Cs stehen, bezüglich der selektiven Bindungsplätze. Ihre Konzentration ist TF direkt proportional (Ausnahme Position12 und Position 12a). In den untersuchten Misch- und Fichtenwaldböden sind die Konzentrationen von Ammonium und Kalium ähnlich groß. Dabei ist Ammonium ein wirkungsvolleres Konkurrenzion zu ¹³⁷Cs als Kalium (der Selektivitätskoeffizient $K_c(\text{NH}_4/\text{K})$ variiert von 1,4 bis

2.8). Wir schließen daraus, dass in der Mehrzahl der untersuchten Positionen Ammonium das ^{137}Cs stärker mobilisiert als Kalium.

- Kleine Kalium-Konzentrationen in der Bodenlösung (kleiner als ca. 0,25 mM) begünstigen einen erhöhten Transfer Boden - Pflanze von ^{137}Cs .
- Nicht das gesamte ^{137}Cs im Boden ist für die Wurzelaufnahme verfügbar, sondern nur der austauschbare Cs-Anteil α_{ex} . Der Transferfaktor TF ist direkt proportional zu α_{ex} .
- Einige chemo-physikalische Eigenschaften des Bodenprofils (Dicke der Humusschicht, pH-Wert, RIP) werden durch die Art des Waldes (Bestockung) bestimmt. Damit erlaubt schon die Kenntnis der Bestockung eine grobe Vorhersage der Cs-Bioverfügbarkeit und des Transfer Faktors.

Bestätigung der Modelle der selektiven Sorption und Bioverfügbarkeit von ^{137}Cs

Die Modelle für die selektive Sorption und die Bioverfügbarkeit von Radiocäsium werden durch die Messungen bestätigt. Der Radiocäsium Transferfaktor TF, der auf die Wurzelzone bezogen ist, kann als Produkt $\text{TF} = A \cdot B$ geschrieben werden mit dem Bioverfügbarkeitsfaktor A, der in diesem Projekt mit einer relativen Genauigkeit von 12 % berechnet wurde (für $\text{RIP}(\text{K}) > 23 \text{ meq/kg}$) und dem Faktor B, der die biologischen Eigenschaften der Pflanze berücksichtigt. Die Bestimmung von B gelang für Farn und Brombeere mit einer Genauigkeit, dass 70 bis 80 % der Variabilität der berechneten A Werte durch das lineare Modell erklärt wurden.

Ein linearer Zusammenhang des Radiocäsium Transfer Faktors TF bezogen auf die Wurzelzone von Farn und Brombeere mit dem Bioverfügbarkeitsfaktor A wurde für die Waldbodenstandorte im Fichten- und im Mischwald gefunden. Dies bedeutet, dass die Bioverfügbarkeit von Radiocäsium überwiegend durch chemo-physikalische Eigenschaften der Wurzelzone bestimmt wird.

Neben dem Verhältnis der Konzentrationen von Ammonium zu Kalium in der Bodenlösung sind der Anteil des austauschbaren ^{137}Cs und der RIP Wert in der Wurzelzone die wichtigsten Einflussgrößen auf die Bioverfügbarkeit von Radiocäsium und damit auf den Transferfaktor TF und den aggregierten Transferfaktor T_{ag} .

In Fichtenwaldböden mit kleinem RIP Wert sind die regulären Austauschplätze (RES) in ihrer Wirkung vergleichbar zu den selektiven Austauschplätzen (FES) was die Adsorption von Radiocäsium und damit dessen Bioverfügbarkeit betrifft.

Einfluss von Kalk-Düngung

Düngung des Fichtenwaldes mit dolomitischem Kalk reduziert den ^{137}Cs Transfer Boden-Pflanze um einen Faktor drei bis zehn mit Langzeitwirkung. Diese Wirkung kann mit dem Modell der selektiven Sorption von Radiocäsium berechnet werden

Im ungedüngten Fichtenwaldboden ist der pH Wert kleiner, der austauschbare Cs-Anteil α_{ex} größer und der RIP Wert kleiner als im gedüngten Fichtenwaldboden. Berücksichtigt man die Konzentrationen der Kationen in der Bodenlösung, so berechnet man Bioverfügbarkeitsfaktoren A, die im ungedüngten Boden mehr als zehn mal größer sind als im gedüngten in Übereinstimmung mit gemessenen TF und

T_{ag} Werten für die Pflanzen Farn (*Dryopteris carthusiana*), Brombeere (*Rubus fruticosus*), und Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus*).

Die Lage des ^{137}Cs Maximums im Fichtenwaldboden blieb in neun Jahren in konstanter Tiefe von ca. 5 cm. Auch die Dicke der Humusschicht (L, O_f, und O_h) blieb praktisch konstant mit der Zeit. Düngung hatte darauf keinen Einfluss. Nur der Anteil des ^{137}Cs im Horizont O_h wurde nach dem Düngen größer. T_{ag} wurde nach dem Düngen kleiner, um einen Faktor 3 bis 10, und blieb über 9 Jahren konstant für die Pflanzen Farn (*Dryopteris carthusiana*), Brombeere (*Rubus fruticosus*) und Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus*)

Weitere Erkenntnisse

Drei Jahre nach einem Kahlschlag eines Fichtenbestandes haben sich die Bodenchemie und der Transfer von Radiocäsium nicht verändert.

RIP-Werte für Moorwiese (Pfrunger Ried) und Waldwiese sind um ca. Faktor zwei größer als jene im Mischwald.

2 Welche Fortschritte ergeben sich für die Wissenschaft und/oder Technik durch die Forschungsergebnisse?

- Die Untersuchungen ergänzen das „Radioökologische Szenario Bad Waldsee“ - ein weltweit einmaliger Datensatz für die Jahre 1987 bis 2005, was Radiocäsium in Wild, Pilzen und Pflanzen betrifft - bezüglich der Bodendaten, sodass es für die weitere Modell-Bewertung verwendet werden kann. Das Projekt liefert also ein Werkzeug zur Kalibrierung von rechnergesteuerten Entscheidungshilfen (DSS), die weltweit einsetzbar sind, um z.B. bei Unfällen in Kernkraftwerken die Dosis für Mensch und Biosphäre zu minimieren.
- Die in diesem Projekt erhobenen bodenchemischen Daten ermöglichen, die ^{137}Cs Aufnahme der Waldprodukte vorherzusagen. Im Falle einer zukünftigen Kontamination kann damit gezielter reagiert werden. Das Projekt dient damit der Strahlenschutz Vorsorge.
- Die Modelle für die selektive Sorption und die Bioverfügbarkeit von Radiocäsium werden durch die Messungen für ein Waldgebiet von ca. 60 km² für Fichten- und Mischwald (Fichte, *Picea abies*, und Buche, *Fagus*) bestätigt.
- Düngung des Fichtenwaldes mit dolomitischem Kalk reduziert den ^{137}Cs Transfer Boden-Pflanze um einen Faktor 3 bis 10 mit Langzeitwirkung. Diese Reduzierung wurde gemessen und mit dem Modell für die selektive Sorption und die Bioverfügbarkeit von Radiocäsium quantitativ bestätigt. Damit wird ein Weg aufgezeigt, den ^{137}Cs Transfer Boden-Pflanze im Wald wirkungsvoll zu minimieren, und so die Strahlendosis für den Menschen durch Ingestion von Waldprodukten wie Pilzen und Wildfleisch zu verkleinern.

3 Welche Empfehlungen ergeben sich aus dem Forschungsergebnis für die Praxis?

- Der ^{137}Cs Transfer-Faktor Boden-Pflanze liegt in Fichtenwaldböden im Mittel um eine Größenordnung über jenem für Mischwaldböden. Entsprechend sind Pilze und Wildfleisch aus Fichtenwald höher kontaminiert als aus Mischwald. Deshalb ist beim Verzehr von Pilzen und Wildfleisch aus Fichtenwäldern besondere Vorsicht geboten.
- Die Kenntnis der Bestockung erlaubt eine grobe Vorhersage der Cs-Bioverfügbarkeit und der Größenordnung des Transfer Faktors z.B. Waldprodukte aus Nadelwald sind höher kontaminiert als solche aus Laubwald.
- Hohe Bioverfügbarkeit von Radiocäsium in Waldböden ist zu erwarten für,
 - kleine pH-Werte des Bodens,
 - dicke Humusschichten bzw. hohen organischen Anteil in der Wurzelzone,
 - kleine Konzentration von Kalium in der Bodenlösung,
 - geringer Tonanteil in der Wurzelzone,
 - kleine RIP Werte,
 - hoher Anteil α_{ex} an austauschbarem ^{137}Cs im Boden.
- Die zuletzt genannten Befunde waren im Einzelnen bekannt, wurden aber für Misch- und Fichtenwald in diesem Projekt erstmals gleichzeitig gemessen und mit dem Modell der selektiven Sorption von Radiocäsium erklärt.
- Düngung des Fichtenwaldes mit dolomitischem Kalk reduziert den ^{137}Cs Transfer Boden-Pflanze um einen Faktor 3 bis 10 mit Langzeitwirkung. Damit wird ein Weg aufgezeigt, den ^{137}Cs Transfer Boden-Pflanze im Wald wirkungsvoll zu minimieren, und so die Strahlendosis für den Menschen durch Ingestion von Waldprodukten wie Pilzen und Wildfleisch zu verkleinern.