



Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

<http://www.ssk.de>

Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse
der Klausurtagung 1995 der Strahlenschutzkommission

Aktuelle radioökologische Fragen des Strahlenschutzes

12./13. Oktober 1995 in Elmau

Stellungnahme der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 139. Sitzung am 26.-28. Juni 1996

Veröffentlicht in Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 40

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Natürliche Umweltradioaktivität	3
2.1	Natürliche Strahlenexposition und ihr möglicher Beitrag zum Krebsrisiko der Bevölkerung	3
2.2	Berücksichtigung der natürlichen Radioaktivität in Strahlenschutz-Regelungen	4
2.3	Radon im Trinkwasser	4
3	Radionuklide in der Atmosphäre	5
4	Radionuklide in Gewässern	6
4.1	Radionuklide in Schwebstoffen und Sedimenten von Binnengewässern	6
4.2	Radionuklide in Fischen und in Nahrungsketten	7
4.3	Radionuklide im Meer	8
5	Radionuklide in naturnahen Ökosystemen	9
6	Radioökologische Modelle und ihre Validierung	11
7	Rechnergestützte Informations- und Entscheidungshilfesysteme zur Beurteilung radiologischer Konsequenzen von Stör- und Unfällen	12

1 Einleitung

Radioökologie ist das Fachgebiet des Strahlenschutzes, das sich mit Untersuchungen des Vorkommens, des Transports und des Verbleibs von Radionukliden sowie mit der Quantifizierung der daraus für Menschen, Pflanzen und Tiere resultierenden Strahlenexpositionen beschäftigt. In der Radioökologie werden dafür experimentelle Meßverfahren sowie Rechenverfahren zur retrospektiven und prospektiven Quantifizierung des Transports und der Strahlenexpositionen entwickelt und eingesetzt. Hierbei werden die natürlicherweise vorkommenden Radionuklide, die Veränderungen ihrer Gehalte in einzelnen Umweltbereichen durch menschliche Handlungen und die aus technischen Quellen herrührenden Radionuklide betrachtet.

Radioökologische Untersuchungen können aus den unterschiedlichsten Gründen durchgeführt werden, so z.B.

- Grundlagenforschung über das Vorkommen stabiler oder radioaktiver Stoffe,
- Erforschung von Transportvorgängen in der Atmosphäre, in Wasserkörpern, in der Pedosphäre oder der Biosphäre,
- strahlenhygienische Bewertungen im Rahmen von Genehmigungsverfahren für kerntechnische Anlagen,
- Grundlagen für Entscheidungen nach größeren unfallbedingten Freisetzungen von Radionukliden,
- strahlenhygienische Bewertungen von natürlichen oder durch menschliche Handlungen modifizierten Strahlenexpositionen.

2 Natürliche Umweltradioaktivität

Auf der Grundlage der derzeitigen Kenntnisse über die natürliche Strahlenexposition in Deutschland und deren möglichen Beitrag zur Krebshäufigkeit der Bevölkerung sowie der verstärkten Berücksichtigung der natürlichen Radioaktivität im Strahlenschutz kommt die SSK im Hinblick auf die natürliche Umweltradioaktivität zu folgender Zusammenfassung und Bewertung:

2.1 Natürliche Strahlenexposition und ihr möglicher Beitrag zum Krebsrisiko der Bevölkerung

- a) Die mittlere jährliche natürliche Strahlenexposition der Bevölkerung der Bundesrepublik - abgeleitet auf der Basis neuer Dosiskoeffizienten der ICRP/ICRU und der Dosiskonvention für Radon-Zerfallsprodukte der ICRP - beträgt nach Jacobi ca. 2 mSv. Hiervon entfallen jeweils etwa 40 % auf die externe Bestrahlung (kosmische und terrestrische Strahlung) und auf die Inhalation von Radon und Thoron mit ihren kurzlebigen Zerfallsprodukten, die verbleibenden rund 20 % auf die Ingestion natürlicher Radionuklide mit der Nahrung.
- b) Der Variationsbereich der individuellen Werte der Strahlenexposition kann erheblich sein und wird insbesondere durch den großen Schwankungsbereich der Radon-Konzentration in Wohnungen, die unterschiedliche Pb-210-Zufuhr mit der Nahrung und durch Zigarettenrauchen sowie durch die örtlichen Unterschiede der terrestrischen Gamma-Strahlung bestimmt.

- c) Kenntnisse über das Lungenkrebsrisiko durch Radon in Häusern basieren auf epidemiologischen Studien bei Radon-exponierten Bergarbeitern mit Unsicherheiten der Übertragung auf die häusliche Umgebung. Bisherige Fall-Kontroll-Studien bei der Wohnbevölkerung ergeben keine zweifelsfreien Ergebnisse über die Höhe des Risikos bei geringen Radonkonzentrationen. Es gibt aber den klaren Hinweis, daß - abgesehen vom Rauchen - Radon in Häusern bei stark erhöhten Konzentrationen der wichtigste Risikofaktor für Lungenkrebs ist.
- d) Ausgehend von UNSCEAR-Risikofaktoren ergibt sich - ohne Berücksichtigung des Lungenkrebsrisikos durch Radoninhalation in Häusern - ein Beitrag der natürlichen Strahlenexposition von 1 bis 3 Prozent zur Gesamtsterblichkeit; insgesamt beträgt der Anteil der soliden Tumoren an der Gesamtsterblichkeit 20 bis 25%. Auch in Gebieten stark erhöhter terrestrischer Strahlung dürfte der Beitrag natürlicher Strahlenexposition kaum 10 Prozent überschreiten. Deshalb ist nicht zu erwarten, daß mit geographischen Vergleichsstudien der Einfluß der externen natürlichen Strahlenexposition auf die regionalen Krebssterblichkeiten statistisch signifikant nachgewiesen werden kann.
- e) Bei Kindern und Jugendlichen im Alter von 5 bis 15 Jahren läßt sich nach Jacobi rechnerisch ein Risikobeitrag der natürlichen Strahlenexposition zur Leukämie von 20 bis 34 % (abhängig vom gewählten Modell) abschätzen. Epidemiologische Daten zur Leukämie bei Kindern und Jugendlichen in Abhängigkeit von ihrer natürlichen Strahlenexposition könnten zur Überprüfung dieser Hypothese beitragen.

2.2 Berücksichtigung der natürlichen Radioaktivität in Strahlenschutz-Regelungen

- a) Die Strahlenexposition durch K-40 im menschlichen Körper, die kosmische Strahlung in Bodennähe und die oberirdische Exposition durch Radionuklide in der nicht durch Eingriffe beeinträchtigten Erdrinde, sind praktisch nicht beeinflussbar und deshalb aus den Strahlenschutz-Regelungen ausgeschlossen. Diejenigen natürlichen Strahlenquellen, die wegen ihrer Radioaktivität oder ihrer Spalt- und Brut-Eigenschaften genutzt werden, unterliegen schon seit jeher der Strahlenschutz-Regelung.
- b) Die Empfehlungen der Strahlenschutzkommission für die Begrenzung der Strahlenexposition der Bevölkerung sowohl durch Radon als auch durch Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaus beruhen auf dem Grundsatz, Richtwerte festzulegen mit Zahlenwerten im oberen Bereich der unter natürlichen Bedingungen auftretenden Werte (z.B. Radon-Konzentration, spezifische Bodenaktivität u.a.). Für Strahlenexpositionen durch Konzentrations- oder Aktivitätswerte unterhalb dieser Richtwerte werden keine Strahlenschutzmaßnahmen empfohlen.
- c) Die Strahlenschutzkommission hält es für wünschenswert, sowohl diesen Grundsatz als auch den Gesamtkomplex der natürlichen Strahlenexposition bei der Diskussion über eine verstärkte Einbeziehung natürlicher Strahlenquellen in die Strahlenschutz-Regelungen zu beachten.

2.3 Radon im Trinkwasser

- a) Der Median der Radon-222-Konzentration in den untersuchten Trinkwässern in der Bundesrepublik Deutschland liegt bei ca. 5 Bq/l; etwa 10 % der Werte liegen oberhalb von 50 Bq/l, etwa 3 % (32 Probenentnahmestellen) oberhalb von 300 Bq/l. Radon im Trink-

wasser kann zu Strahlenexpositionen auf den Pfaden „Ingestion“ und - nach seiner Freisetzung in die Raumluft - „Inhalation“ führen.

- b) Aus den Berechnungen der Ingestionsdosis ergibt sich für den Medianwert der Rn-222-Konzentrationen im Trinkwasser von etwa 5 Bq/l eine Ingestionsdosis von 0,0025 mSv/a für Erwachsene und von 0,0075 mSv/a für Kinder (Altersgruppe 5 bis 15 Jahre). Diese Dosen sind klein gegenüber den Werten der Strahlenexposition aus anderen natürlichen Quellen. Bei sehr selten auftretenden Konzentrationen im Bereich von 500 Bq/l ergeben sich auf diesem Pfad für Kinder Werte der Jahresdosis von ca. 0,75 mSv.
- c) Die Exposition durch Inhalation läßt sich unter Annahme bestimmter Übergangsfaktoren für das Radon aus dem Trinkwasser in die Wohnraumluft (z.B. beim Duschen, beim Betrieb von Waschmaschinen) abschätzen. Bei einer Trinkwasserkonzentration von z.B. 5 Bq/l ist eine mittlere zusätzliche Radonkonzentration der Innenraumluft von maximal 0,5 Bq/m³ zu erwarten. Vergleicht man diese Werte mit den Radonkonzentrationen in Wohnräumen, die in der Bundesrepublik Deutschland in einem weiten Bereich bis zu einigen 1 000 Bq/m³ (im Mittel bei 50 Bq/m³) liegen, so ist diese zusätzliche Radonkonzentration und die damit verbundene Strahlenexposition sehr klein.
- d) In Fortsetzung der Diskussion auf der Klausurtagung hat die SSK im Dezember 1995 eine Stellungnahme zu diesem Thema verabschiedet, die im wesentlichen zu folgendem Ergebnis kommt:

„Der Radongehalt des Trinkwassers in der Bundesrepublik Deutschland stellt kein bedeutendes Problem des Strahlenschutzes der Bevölkerung dar.

Dennoch sollte geprüft werden, ob und wie bei Wasserwerken mit hohen Radon-Konzentrationen aus Gründen der Strahlenschutzvorsorge mit vertretbarem Aufwand eine Reduzierung des Radon-Gehaltes erreicht werden kann. Dazu schlägt die SSK vor, Pilotprojekte in Wasserwerken mit unterschiedlichen Verfahren der Wasseraufbereitung zu initiieren. Für diese Untersuchungen sollten nur Wasserwerke ausgewählt werden, bei denen die Radon-Konzentration des in das jeweilige Versorgungsnetz eingespeisten Trinkwassers im Mittel größer als 300 Bq/l ist.

Die SSK beabsichtigt, sich mit der Frage der radiologischen Bewertung des Radongehaltes des Trinkwassers erneut zu beschäftigen, sobald die Ergebnisse eines derartigen Pilotprojektes vorliegen werden.“

3 Radionuklide in der Atmosphäre

Auf der Klausurtagung wurden Rechenmodelle diskutiert, die das Ziel haben, den Transport luftgetragener Radionuklide nach einem kerntechnischen Stör- oder Unfall zu beschreiben. Zur Zeit werden im Rahmen der Kernreaktorfernüberwachungssysteme (KFÜ) Gauß-Fahnenmodelle eingesetzt, die von groben Näherungen Gebrauch machen, keine Strömungsmodelle als Vorschaltmodelle nutzen können und keine Prognose der zukünftigen Ausbreitungsbedingungen erlauben. Die 42. Umweltministerkonferenz bat im Mai 1994 das BMU, ein bundeseinheitliches EDV-Programm zur Verwendung in den KFÜs zur Verfügung zu stellen und Inhalt und Funktion eines bundeseinheitlichen, rechnergestützten, integrierten Entscheidungshilfesystems zwischen Bund und Ländern abzustimmen. Zuvor hatte sich die Strahlenschutzkommission mit dem gesamten Themenkomplex einschließlich der Prognose und der Nutzung der Möglichkeiten des Deutschen Wetterdienstes befaßt. Der inzwischen vorliegende Bericht der SSK (Heft 5),

der auch in die Diskussionen dieser Klausurtagung einbezogen wurde, kommt zu folgenden Ergebnissen:

- a) Für die Zwecke der Prognose sollte eine Modellkette, bestehend aus den numerischen Wettervorhersagemodellen des Deutschen Wetterdienstes, einem kleinskaligen, nicht-hydrostatischen Strömungsmodell und einem Ausbreitungsmodell entwickelt werden. Als Ausbreitungsmodell wird auf längere Sicht ein Lagrange-Partikel-Modell empfohlen. Die hierzu nötigen Eingabedaten können von einem nicht-hydrostatischen Strömungsmodell vollständig bereitgestellt werden. Um eine derartige Modellkette verfügbar zu machen, ist es nötig, eines der vorhandenen nicht-hydrostatischen Strömungsmodelle für den operationellen Einsatz zu ertüchtigen.
- b) Für die Diagnose kommen als Ausbreitungsmodelle Gauß-Puff- oder Lagrange-Partikel-Modelle (GPM bzw. LPM) in Frage. Vergleichsrechnungen haben gezeigt, daß beide Modelltypen auf modernen KFÜ-Rechnern in Echtzeit lauffähig sind. Die LPM sind den GPM zwar im Prinzip überlegen, erfordern aber zur Realisierung ihrer Überlegenheit Eingabedaten oder Vorschaltmodelle, die zur Zeit nicht verfügbar sind. Ein GPM wird von der Deutsch-Französischen Kommission als gemeinsames Ausbreitungsmodell empfohlen, ein GPM wird beim europäischen Entscheidungshilfesystem RODOS/RESY eingesetzt und GPM-Modelle können verwendet werden, wenn es nötig ist, einen nicht gemessenen Quellterm aus Umgebungsmessungen zu rekonstruieren.
- c) Als Ergebnis einer Gesamtbetrachtung und im Streben nach Harmonisierung wird empfohlen, kurzfristig ein Gauß-Puff-Modell mit der Parametrisierung des „Deutsch-Französischen Modells“ innerhalb der KFÜ, des Entscheidungshilfesystems RODOS/RESY und bei der Quelltermbestimmung zur Einsatzreife zu bringen. Die nötigen Präprozessoren werden z.Zt. entwickelt. Als Vorschaltmodell für Gauß-Puff-Modelle stehen massenkonsistente Windfeldmodelle bereits zur Verfügung.
- d) Die SSK empfiehlt, mittelfristig für die genannten Einsatzbereiche die Voraussetzungen für die Verwendung von Lagrange-Partikel-Modellen zu schaffen.

4 Radionuklide in Gewässern

4.1 Radionuklide in Schwebstoffen und Sedimenten von Binnengewässern

- a) Das Verhalten von Radionukliden in aquatischen Systemen kann mit Hilfe radioökologischer Modelle beschrieben werden. Dabei werden die Anreicherung und der Transport von Radionukliden in dem System Wasser/Schwebstoff/Sediment oder Wasser/Biota vor allem durch die chemischen (insbesondere die Speziation) und physikalischen (z.B. Korngröße, Phasenverhältnis) Eigenschaften bestimmt. Die AVV zu §45 StrlSchV enthält ein Modell zur Berechnung der Ausbreitung von Radionukliden in Fließgewässern. Die Ergebnisse einer solchen Berechnung können mit Meßwerten des Gehalts an radioaktiven Stoffen im Flußwasser als Folge der Ableitungen eines Kernkraftwerkes verglichen werden. Am Beispiel der Mosel und des Kernkraftwerkes Cattenom wurde festgestellt, daß das Modell der AVV die realen spezifischen Aktivitäten im Schwebstoff und im Sediment überschätzt. Das Modell der AVV berücksichtigt nur das Verteilungsgleichgewicht zwischen fester und flüssiger Phase. Die Ergebnisse des in der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) entwickelten Sorptionsmodelles der Anreicherung von Radionukliden an

Schwebstoffe und Sedimente zeigen zwar gegenüber den realen Werten auch höhere Anreicherungen, sie liegen jedoch näher an den realen Verhältnissen als die Ergebnisse nach AVV. Die SSK wird diesen Befund prüfen.

- b) Im Fernbereich liegen die nach dem AVV-Modell berechneten Werte für Co-60 an Schwebstoffen sogar eine Größenordnung über den Messwerten der BfG. Entlang der Fließstrecke findet hier offensichtlich eine erhebliche „Verdünnung“ der kontaminierten Schwebstoffe statt. Die SSK wird auch diesen Befund prüfen.
- c) Die höchsten spezifischen Aktivitäten der Sedimente werden in Stillwasserbereichen beobachtet, in denen die kontaminierten Schwebstoffe abgelagert werden. Diese Bereiche kann man im Sinne der StrlSchV als „ungünstigste Einwirkungsstellen“ betrachten. Nach Einschätzung der SSK sollten diese Bereiche daher bei der Entnahme von Sedimentproben im Rahmen der Umgebungsüberwachung kerntechnischer Anlagen berücksichtigt werden, insbesondere wenn Ausbaggern und anschließende Deponierung auf Spülfeldern erfolgt.

4.2 Radionuklide in Fischen und in Nahrungsketten

- a) Die Anreicherung von Radionukliden in aquatischen Organismen und deren Nahrungsketten ist stark abhängig von der physikalisch-chemischen Beschaffenheit des Gewässers. In Binnenseen bildet sich im Sommer eine stabile thermische Deckschicht aus, durch die der vertikale Austausch von Wasser und Partikeln stark eingeschränkt ist. Dies hat zur Folge, daß möglicherweise kontaminierte feinste Partikel (Plankton) erst nach Aufbrechen der thermischen Sprungschicht im Herbst in tiefere Wasserschichten transportiert werden und dadurch die eingetragenen Radionuklide erst verspätet den Lebewesen in den tieferen Schichten (dem Profundal) zugeführt werden. Dies trifft in der Uferzone (dem Litoral) nicht zu. Die SSK wird prüfen, ob Modelle zur Berechnung der Konsequenzen eines kurzfristigen, stark erhöhten atmosphärischen Eintrags entwickelt werden sollen.
- b) In Fließgewässern ist die Konzentration eingeleiteter Radionuklide sowohl im Wasser als auch in Organismen von der Fließgeschwindigkeit, der Wasserführung und dem Einzugsgebiet des Flusses abhängig. Bei schubweisen Einleitungen aus kerntechnischen Anlagen werden die Gleichgewichtskonzentrationen in Organismen im allgemeinen nicht erreicht. Die Berechnung der Strahlenexposition durch Fischverzehr nach der AVV zu §45 StrlSchV verzichtet auf eine zeitliche Komponente der Aktivitätsaufnahme und -abgabe. Der Fisch wird in seinem Gleichgewichtszustand mit seinem Medium Wasser betrachtet, wobei ein Einkompartimentmodell mit der biologischen Halbwertszeit angewandt wird. Deswegen führt die Berechnung der Strahlenexposition nach dem Modell der AVV zu konservativen Ergebnissen. Dies ist beabsichtigt; die SSK sieht hier gegenwärtig keinen Handlungsbedarf.
- c) Raubfische weisen im allgemeinen höhere Anreicherungen an Radionukliden auf als Friedfische, wobei die maximale Konzentration bei Raubfischen erst zeitlich später und in höherem Fischalter erreicht wird. Soweit die Biokonzentrationsfaktoren für eine Mischung aus Raub- und Friedfischen festgelegt sind, ist zu prüfen, ob dieses Vorgehen hinreichend konservativ ist, insbesondere bei kurzfristigen, stark erhöhten Radionuklideinträgen.
- d) Bei Transuranen wurde eine Anreicherung in Organismen mit aufsteigender Nahrungskette als Folge des globalen Fallouts nicht beobachtet. So ergab sich im Lake Michigan

für Pu eine Minderung der Anreicherung in den verschiedenen Trophieniveaus jeweils um den Faktor 10.

- e) Trotz großer Datenmengen, insbesondere für Cs-137, fehlen noch quantitative prognostische Modelle zur Beschreibung der radiologischen Auswirkungen von Radionuklideinträgen in Gewässer und der nachfolgenden Kontamination von Gewässerorganismen. Die SSK empfiehlt, entsprechende Anstrengungen der Auswertung und Verallgemeinerung für den Fall von kurzfristigen, stark erhöhten Radionuklideinträgen zu unterstützen.

4.3 Radionuklide im Meer

- a) In viele Meeresgebiete werden Abwässer aus der Industrie des Kernbrennstoffkreislaufes eingeleitet. Die Einleitungen der Wiederaufarbeitungsanlagen in Sellafield und La Hague wurden benutzt, um den Transport von Wassermassen durch Meeresströmungen über Hunderte bzw. Tausende von Kilometern messend zu verfolgen. Das Studium derartiger Einleitungen hat auch zum Verstehen des geochemischen Verhaltens vieler Radionuklide im Meerwasser und Sediment beigetragen; als Werkzeug zum Studium von advektiven und diffusiven Prozessen im Sediment und zur Bestimmung der Sedimentationsraten sind künstliche und natürliche Radionuklide heute nicht mehr wegzudenken.
- b) Die derzeitigen Kontaminationen in der Nordsee liegen heute nur noch gering über denjenigen, die durch den atmosphärischen Bombenfallout der sechziger Jahre eingetragen wurden und heute noch vorhanden sind. In der Deutschen Bucht werden derzeit Werte für Cs-137 und Sr-90 zwischen 5 und 10 Bq/m³ gemessen. Entsprechend niedrig sind auch die Kontaminationen durch Cs-137 im Sediment (bis zu 20 Bq/kg). 1980 lagen die Konzentrationen im Wasser der zentralen Nordsee bei mehr als 300 Bq/m³. Dies war durch die hohen Ableitungen Mitte der siebziger Jahre in der Anlage Sellafield verursacht, die im Kalenderjahr 1975 mit einer Einleitung von 5200 TBq ihr Maximum erreichten. Heute liegen diese Einleitungen zwischen 10 und 20 TBq/a. Die Einleitungen der Anlage in La Hague lagen immer erheblich unter den Werten von Sellafield.
- c) Etwas andere Verhältnisse finden sich in der Ostsee, die eine hohe Deposition insbesondere im nördlichen Teil durch den Reaktorunfall von Tschernobyl erfuhr. Der Transport höher kontaminierter Wassermassen aus diesen Gebieten in die südliche und westliche Ostsee führte hier kaum zu einer Abnahme der Konzentration, so daß auch heute noch die Konzentration für Cs-137 zwischen 40 und 70 Bq/m³ liegt. Infolge des stark eingeschränkten Wasseraustausches mit dem Nordost-Atlantik - man geht von einer Wassererneuerungszeit der Ostsee zwischen 25 und 30 Jahren aus - wird auch die Kontamination nur innerhalb von Jahrzehnten auf typische „Falloutwerte“ der früheren Jahre zurückgehen.
- d) Die frühere UdSSR hat in der Barents- und Karasee große Mengen radioaktiver Stoffe versenkt. Dazu gehören u.a. 17 Reaktoren aus U-Booten und einem Eisbrecher; 7 enthalten noch Kernbrennstoff. Nur in direkter Umgebung der Abfälle wird eine Kontamination der Sedimente beobachtet; bisher wurde keine großräumige Kontamination dieser Meeresgebiete durch diese Abfälle festgestellt. Es gibt also keinen Hinweis auf eine Freisetzung durch Korrosion dieser sieben versenkten Reaktoren. Die Zirkulation der Wassermassen durch die europäischen Schelfmeere führt dazu, daß die aus den Anlagen Sellafield und La Hague eingeleiteten löslichen Radionuklide bis in die arktischen Meere Barentssee, Karasee und Grönlandsee verfrachtet werden. Die Transportzeiten z.B. aus der Irischen See bis in diese Meeresgebiete liegen zwischen 5 und 9 Jahren. Entsprechend den

starken Rückgängen der Einleitungen aus Sellafield nahmen inzwischen auch die Konzentrationen in diesen Gebieten deutlich ab.

In wieweit die enormen Mengen versenkter Abfälle in den beiden Schelfmeeren des Arktischen Ozeans, nämlich der Kara- und Barentssee, zu einer signifikanten radiologischen Exposition durch Verzehr von Meeresfrüchten bei zukünftigen Generationen führen wird, ist eine der Fragen, die international beantwortet werden müssen.

- e) Die radioökologischen Untersuchungen von Pu-Isotopen im Meer zeigen, daß Plutonium im Meer nur ein geringes Gefahrenpotential darstellt. Das Plutonium wird vor allem im Sediment gebunden und findet nur geringen Eingang in die Nahrungskette.

5 Radionuklide in naturnahen Ökosystemen

Im Mittelpunkt der Untersuchungen auf dem Gebiet der Radioökologie stand in den vergangenen Jahrzehnten vornehmlich die Erforschung des Transfers von Radionukliden in landwirtschaftlichen Nutzflächen und in Nahrungsketten zum Menschen hin. Die Ergebnisse dieser Analysen und der daraus entwickelten Modelle ermöglichten nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl Vorhersagen zur Kontamination pflanzlicher und tierischer Nahrungsmittel. Für das Verhalten der Radionuklide in naturnahen Ökosystemen fehlen bislang vergleichbare Modelle. Durch den Unfall und seine Folgen ergab sich die Notwendigkeit, wegen der im Vergleich zu landwirtschaftlichen Ökosystemen hohen Transferraten in naturnahen Ökosystemen das zeitliche Verhalten von Radionukliden, speziell von Cs-137, genauer zu untersuchen. Auf der Klausurtagung wurde ein Überblick über den gegenwärtigen Kenntnisstand zum Verhalten von Cs-137 und Sr-90 in Waldökosystemen gegeben. Wegen der oben erwähnten Defizite auf diesem Gebiet wird ihm in dieser Zusammenfassung etwas breiterer Raum gewidmet.

- a) Die sehr effektive Filterwirkung der Baumkronen führte beim Durchzug von Luftmassen zu hohen Ablagerungsraten der luftgetragenen Radionuklide. Da die meisten Laubbäume Mittel- und Nordeuropas zum Zeitpunkt des Unfalls von Tschernobyl noch unbelaubt waren, fanden sich die höchsten Ablagerungsraten bei Nadelbäumen.
- b) Im Laufe des Jahres 1986 kam es infolge der Abwitterung zu einer deutlichen Reduktion der Kontaminationen der Baumkronen und einer Verlagerung der Radionuklide in den Waldboden. Die sehr unterschiedlichen chemisch-physikalischen und biologischen Eigenschaften der verschiedenen Waldbodenhorizonte haben neben einer – z.B. durch Stammabfluß bedingten – horizontalen auch eine vertikale Ungleichverteilung der Radionuklide zur Folge.
- c) Insbesondere die organischen Horizonte der Waldböden sind für das Verhalten und für die Pflanzenverfügbarkeit von Radionukliden von Bedeutung. Während in den tieferen mineralischen Horizonten Cs-137 durch Fixierung an Tonmineralen immobilisiert wird, deuten verschiedene Untersuchungen auf eine überwiegend biologische „Fixierung“ des Radiocäsiums in den organischen Horizonten hin. Damit läßt sich seine vergleichsweise langsame physikalisch-chemische Migration (8 Jahre nach dem Reaktorunfall fand sich der größte Anteil Cs-137 noch in den organischen Horizonten) erklären. Für Abschätzungen der Verweilzeiten von Radiocäsium in verschiedenen Bodenhorizonten wurde ein Modell entwickelt. Der größte Anteil des Sr-90 befindet sich auch nach Jahrzehnten noch in den organischen Auflagehorizonten.

- d) Untersuchungen an verschiedenen Standorten zeigten, daß symbiotisch mit Pflanzenwurzeln vergesellschaftet lebende Pilze Cs-137 etwa 10fach höher akkumulieren als parasitische oder saprophytische (zersetzende) Arten. Zur Ermittlung artspezifischer Transferfaktoren ist die Bestimmung der Myzeltiefe der jeweiligen Spezies erforderlich. Die entsprechenden Transferfaktoren sind seit 1987 weitgehend konstant geblieben. Mit Hilfe des erwähnten Bodenmodells und der ermittelten Transferfaktoren bezogen auf die Trockenmasse (im Bereich von 0,1 bis 40) erscheint eine Prognose der spezifischen Cäsiumaktivität für 14 Pilzspezies möglich.
- e) Speziesabhängige Anreicherungsfaktoren bei Pilzen wurden für Sr-90 nicht beobachtet. Die ermittelten Transferfaktoren liegen (bezogen auf Feuchtmasse) zwischen 0,002 und 0,01.
- f) Die Cs-137-Aktivitäten in 14 Grünpflanzenspezies zweier Standorte wurden mit den entsprechenden Boden-Cäsiumaktivitäten verglichen. Während sich die mittleren Cs-137-Konzentrationen der beiden Böden praktisch nicht unterschieden, zeigten einzelne Spezies des einen Standortes verglichen mit entsprechenden Pflanzen des zweiten Standortes signifikant höhere Aktivitäten. Die ermittelten Transferfaktoren der Spezies beider Standorte liegen (bezogen auf Feuchtmasse) zwischen 0,01 und 3,2. Da das Verhältnis von Cs-137 zu K-40 in verschiedenen Pflanzenteilen unterschiedlicher Kalium-Konzentrationen weitgehend konstant ist, kann angenommen werden, daß die Cs-137-Aktivität über den Kaliummetabolismus geregelt wird. Eine Gesetzmäßigkeit der Cäsiumaufnahme konnte jedoch nicht festgestellt werden.
- g) Die Sr-90-Aktivität in Grünpflanzen wird offenbar über den Kalziumhaushalt reguliert. Wie bei Cs-137 fanden sich höhere Sr-90-Aktivitäten in Blättern und niedrigere in Früchten. Die Transferfaktoren für Sr-90 lagen (bezogen auf Feuchtmasse) zwischen 0,1 und 1,6.
- h) Untersuchungen an Fichtennadeln und Buchenblättern weisen darauf hin, daß bereits wenige Jahre nach der Deposition der Radionuklide die Wurzelaufnahme zum bestimmenden Kontaminationspfad geworden ist.
- i) Untersuchungen der Cs-137-Aktivität im Muskelfleisch von Rehen im Zeitraum 1987 bis 1993 ergaben, daß der höchste Monatsmittelwert jeweils im Oktober auftrat. Dies wird durch eine verstärkte Aufnahme höher kontaminierter Pilze in diesem Monat erklärt. Durch Fütterung mit gering kontaminiertem Winterfutter reduzierte sich die spezifische Aktivität im Februar im Muskelfleisch im Mittel um den Faktor 7. Nach Beendigung der Winterfütterung stieg auch die spezifische Aktivität im Fleisch wieder an. Für zwei Gebiete wurden mittlere Transferfaktoren ($\text{Bq/kg Rehfleisch zu Bq/m}^2 \text{ Bodenbelegung}$) von 0,036 bzw. 0,047 m^2/kg ermittelt. Vergleiche mit anderen Tierarten ergaben, daß z.B. Wildschweine deutlich höhere spezifische Aktivitäten im Muskelfleisch aufwiesen als Rehe aus der gleichen Umgebung. Die geringere Kontamination des Fleisches von Rothirschen kann auf den höheren Anteil minderkontaminierter Grases in ihrer Nahrung zurückgeführt werden.
- j) Die nach dem Reaktorunfall durchgeführten Untersuchungen haben zu einem vertieften Verständnis über das Verhalten von Radionukliden in Waldökosystemen geführt. Für die Entwicklung eines universell einsetzbaren Modells müssen die einzelnen Komponenten radiologisch relevanter naturnaher Ökosysteme noch detaillierter untersucht werden.

6 Radioökologische Modelle und ihre Validierung

Zur Berechnung der potentiellen Strahlenexposition des Menschen im bestimmungsgemäßen Betrieb und bei Störfällen werden für die Planung und Genehmigung kerntechnischer Anlagen Radioökologie-Modelle verwendet. Diese sollen - möglichst realitätsnah - die Ausbreitung der Radionuklide in der Biosphäre, über aquatische und terrestrische Nahrungsketten bis hin zum Menschen beschreiben. In den vergangenen Jahren wurde eine Reihe von radioökologischen Modellen entwickelt, die die Vorgänge in der Biosphäre mehr oder weniger vereinfachend beschreiben. Es besteht verständlicherweise Interesse, die Qualität der mit einem Modell erhaltenen Ergebnisse qualitativ und quantitativ zu überprüfen. Auf der Klausurtagung wurden die Ergebnisse zweier großer internationaler Studien (BIOMOVs und VAMP) zur Validierung von Rechenmodellen vorgestellt. Ergänzend dazu wurden Erfahrungen mit dem GSF-Modell ECOSYS nach Tschernobyl, speziell in Süddeutschland, berichtet:

- a) Es wurden im allgemeinen gute Übereinstimmungen zwischen vorhergesagten und gemessenen Kontaminationen von Nahrungsmitteln festgestellt.
- b) Es zeigte sich, daß die standortspezifischen Gegebenheiten großen Einfluß auf das Ergebnis haben können; die Benutzung generischer Parameter führte meist zu Fehleinschätzungen.
- c) Überprüfungen von Modellen sollten an möglichst vielen Zwischenschritten durch Vergleich mit Meßdaten erfolgen, um sich eventuell kompensierende Fehler in den Teilmodellen für die Nahrungsketten erkennen zu können.
- d) Im allgemeinen tendierten alle Prognosen eher zu einer Überschätzung als zu einer Unterschätzung der real resultierenden Ingestionsdosen. Dies lag zum großen Teil an fehlenden Daten über Verhaltens- und Ernährungsgewohnheiten der Bevölkerung und der ersatzweisen Verwendung überschätzender Parameter und Modellannahmen.
- e) Bei der Anwendung eines radioökologischen Modells ist auf seine Zweckbestimmung zu achten.
- f) Ein für alle Situationen validiertes Radioökologie-Modell existiert derzeit noch nicht.
- g) Bei der Validierung von Modellen ist auf die Qualitätssicherung der Meßwerte zu achten.

Die SSK kommt nach den Ausführungen zu dem Schluß, daß die international durchgeführten Vergleichsrechnungen wichtige Erkenntnisse zur Bewertung radioökologischer Modelle und ihrer Ergebnisse geliefert haben. Die SSK empfiehlt, den Anwendungsbereich radioökologischer Modelle zu erweitern und die modellgerechte Entwicklung dabei benötigter Datensätze für Kulturlandschaften, für naturnahe Ökosysteme und für urbane Umgebungen voranzutreiben. Die SSK empfiehlt ferner, die Lernfähigkeit derartiger Prognosemodelle so zu entwickeln, daß aktuelle Meßdaten optimal zur Verbesserung der Güte der Prognose eingesetzt werden können.

7 Rechnergestützte Informations- und Entscheidungshilfesysteme zur Beurteilung radiologischer Konsequenzen von Stör- und Unfällen

Ziel des Strahlenschutzes bei kerntechnischen Unfällen ist es, deren Auswirkungen auf Mensch und Umwelt durch das Ergreifen geeigneter Maßnahmen so gering wie möglich zu halten. Informationsquellen für die Lageermittlung sind die Betreiber einer betroffenen Anlage, unterschiedliche Meßeinrichtungen und Meßdienste des Bundes und der Länder, sowie die Stäbe der Katastrophenabwehr und der Strahlenschutzvorsorge. Die zur Unterstützung der Lageermittlung und die Lagebewertung eingesetzten Systeme lassen sich in vier Klassen einteilen. Systeme der Klasse 0 gestatten die Akquisition, Übertragung und Auswertung radiologischer und meteorologischer Meßdaten. Systeme der Stufe 1 ermöglichen zusätzlich die diagnostische und prognostische Ermittlung von meteorologischen Feldern (vgl. 3), von Aktivitätsfreisetzungen, Ausbreitungsbedingungen und Dosis- und Kontaminationsfeldern (vgl. 6). Systeme der Stufe 2 ermöglichen außerdem die Simulation von Schutz- und Gegenmaßnahmen sowie die Quantifizierung der damit verbundenen radiologischen und materiellen Konsequenzen. Systeme der Stufe 3 liefern schließlich eine Rangfolge alternativer Maßnahmenstrategien, die durch vergleichende Bewertung der Vor- und Nachteile von Maßnahmen ermittelt wird.

Die KFÜ-Systeme der Länder und das IMIS beinhalten Module der Stufen 0, 1 und -mit Einschränkungen- der Stufe 2. Die Entscheidungshilfesysteme RESY und RODOS enthalten zusätzlich Module der Stufen 2 und 3. Auch angesichts des Interesses der Länder befürwortet die SSK die Initiative des BMU zur Schaffung des Programmsystems RODOS/RESY für die Entscheidungsunterstützung bei kerntechnischen Notfällen und halten die Errichtung dieses Systems an zentraler Stelle für sinnvoll. Die Planungen zur Einrichtung einer solchen zentralen Einrichtung sind noch nicht abgeschlossen.