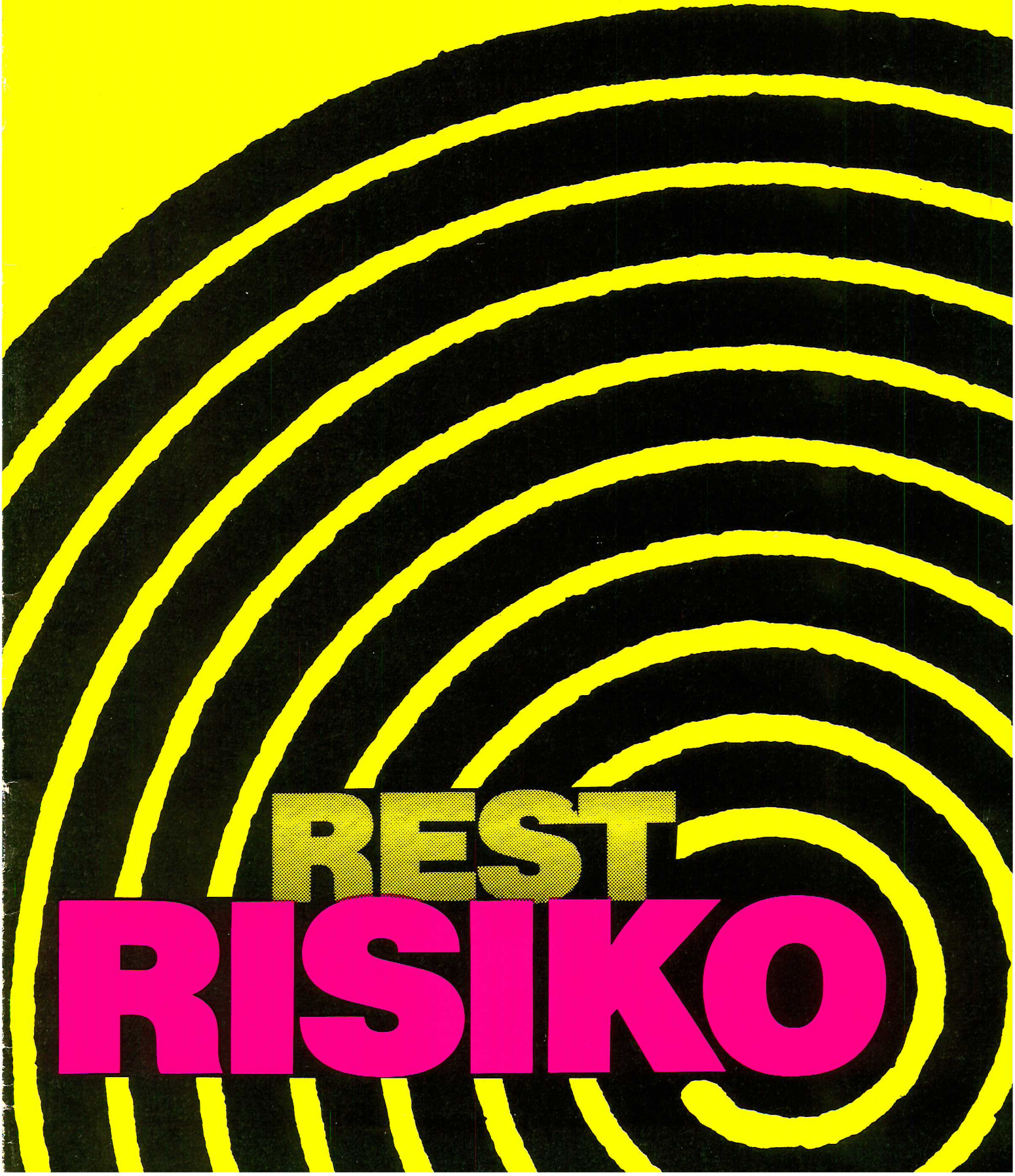
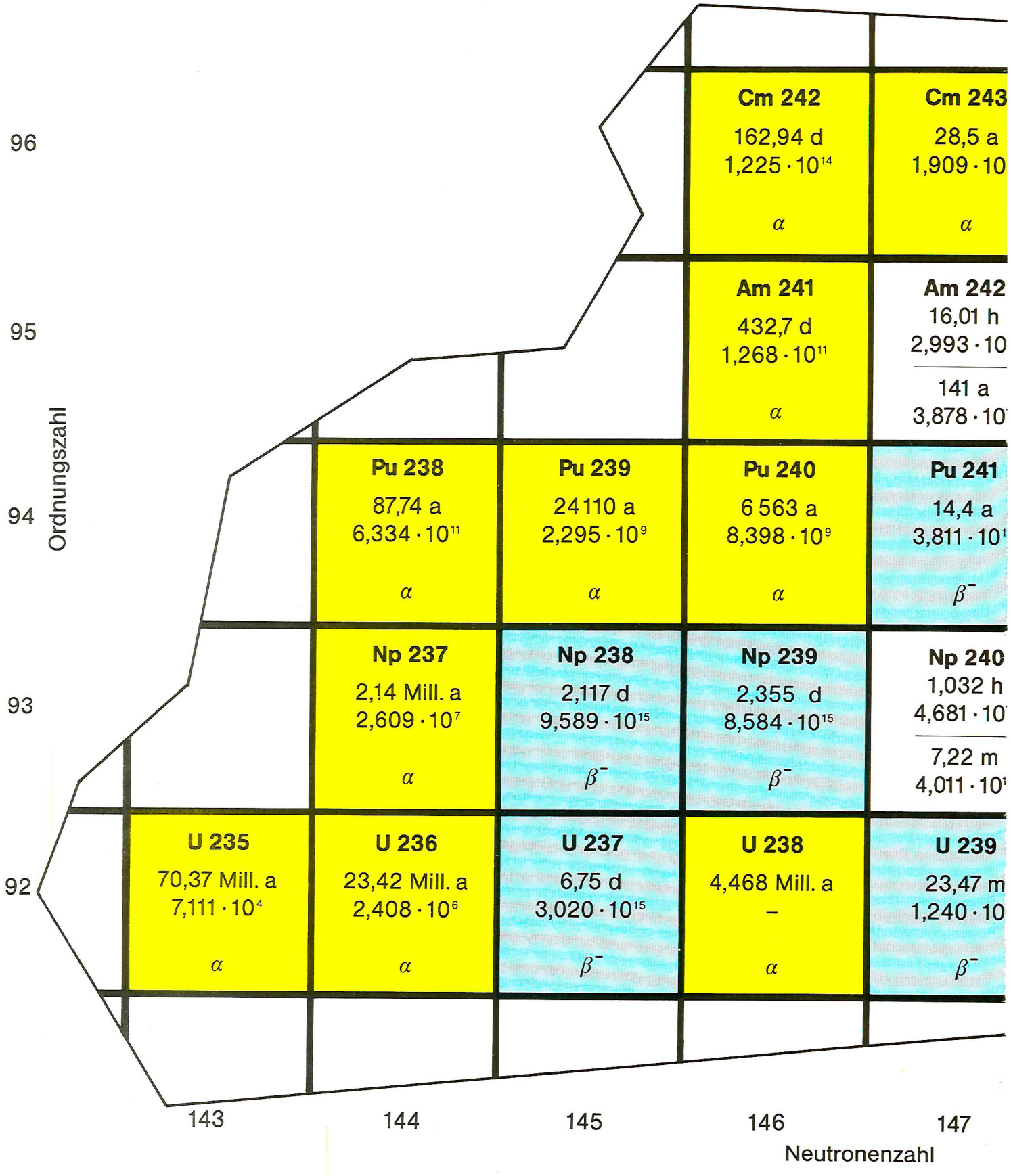
Nr. 5 · Juli 1989

GREENPEACE

Das lebensbedrohliche Vermächtnis der Wiederaufarbeitung

PLUTONIUM – REICHTUM UND TOD




Cm 242
162,94 d
1,225 · 10^14
α
Cm 243
28,5 a
1,909 · 10
α
Am 241
432,7 d
1,268 · 10^11
α
Am 242
16,01 h
2,993 · 10
141 a
3,878 · 10
Pu 238
87,74 a
6,334 · 10^11
α
Pu 239
24110 a
2,295 · 10^9
α
Pu 240
6 563 a
8,398 · 10^9
α
Pu 241
14,4 a
3,811 · 10
β⁻
Np 237
2,14 Mill. a
2,609 · 10^7
α
Np 238
2,117 d
9,589 · 10^15
β⁻
Np 239
2,355 d
8,584 · 10^15
β⁻
Np 240
1,032 h
4,681 · 10
7,22 m
4,011 · 10
U 235
70,37 Mill. a
7,111 · 10^4
α
U 236
23,42 Mill. a
2,408 · 10^6
α
U 237
6,75 d
3,020 · 10^15
β⁻
U 238
4,468 Mill. a
–
α
U 239
23,47 m
1,240 · 10
β⁻
96
95
94
93
92
Ordnungszahl
143
144
145
146
147
Neutronenzahl

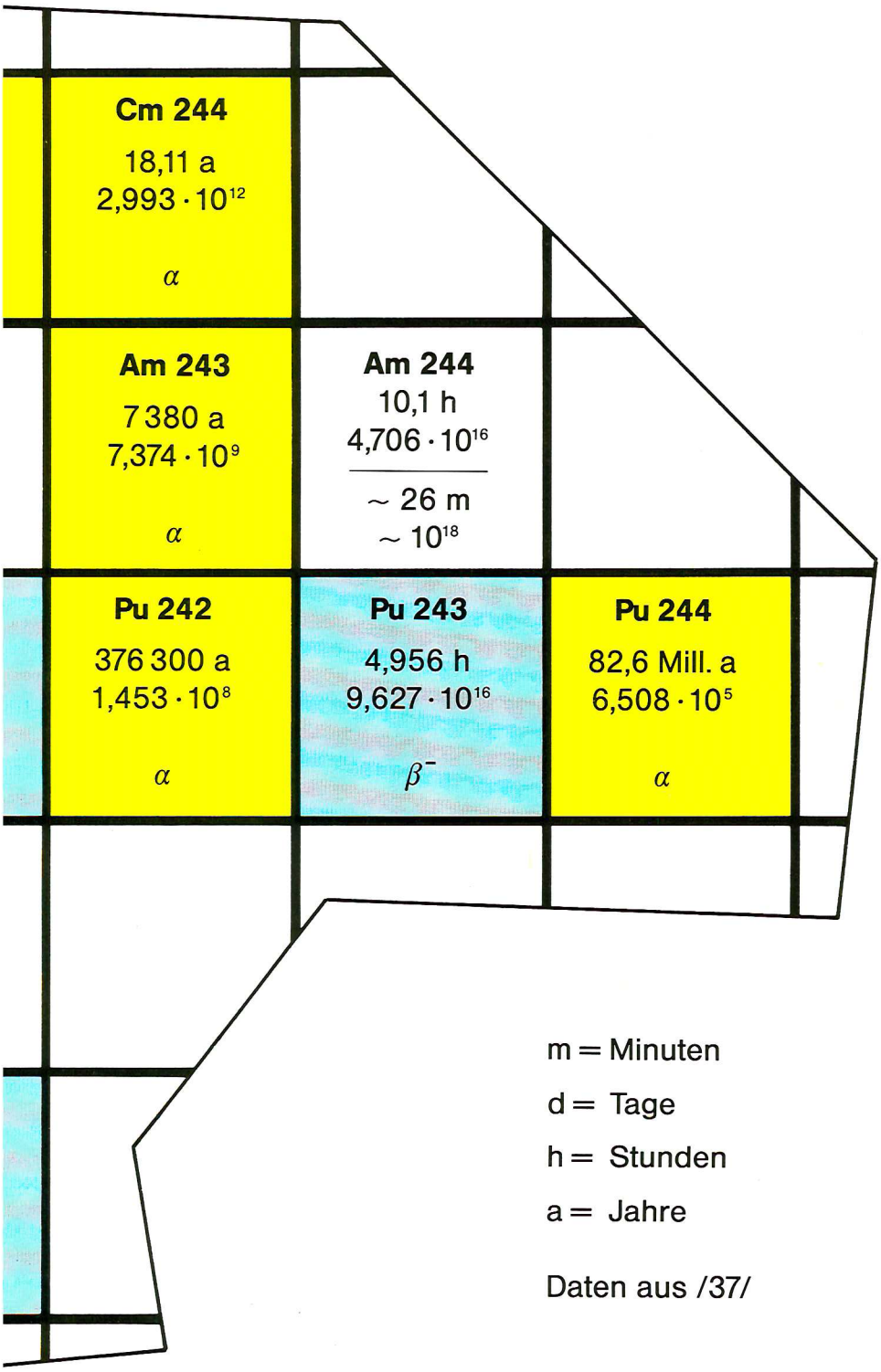


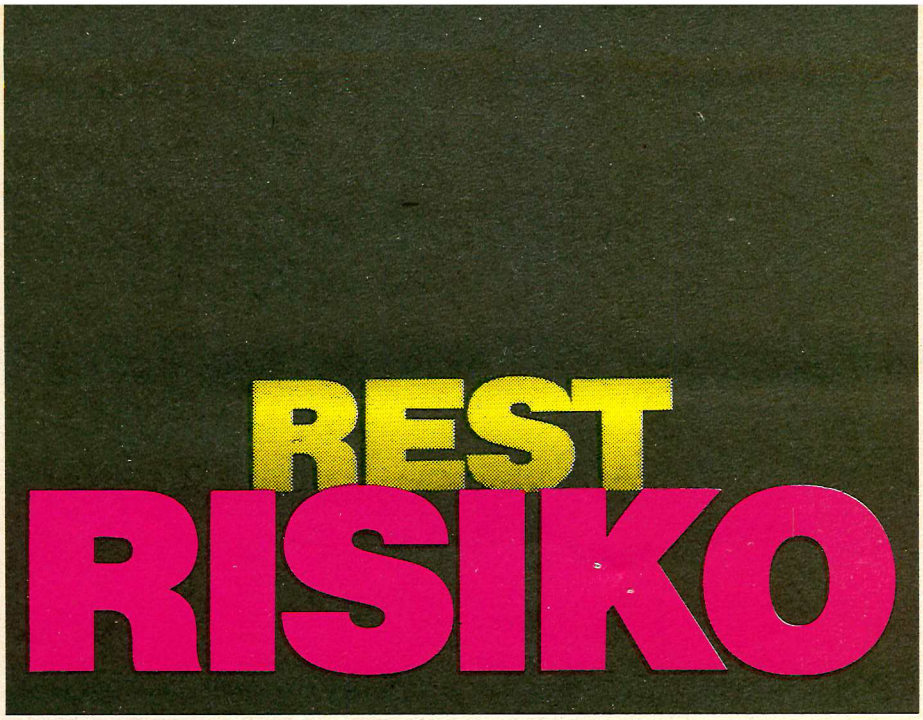
Abbildung 1:
Ausschnitt aus einer „Nuklidkarte“: Übersicht über die Eigenschaften wichtiger Nuklide von Uran (U) und der Transurane Neptunium (Np), Plutonium (Pu), Americium (Am) und Curium (Cm).

Atome bestehen aus einem Kern (aus Protonen und Neutronen) und einer Hülle (aus Elektronen). Die Anzahl der Protonen bestimmt, um welches chemische Element es sich handelt; so sind etwa alle Atome mit 94 Protonen Plutoniumatoma. Die Anzahl der Neutronen hingegen legt fest, welche „Atomsorte“ eines Elements vorliegt. Da Radioaktivität eine Eigenschaft der Atomkerne ist, sprechen Kernphysiker von Radionukliden (von gr. nucleus = Kern) – die Hülle aus Elektronen interessiert sie nicht. Eine „Nuklidkarte“, wie sie Abbildung 1 im Ausschnitt zeigt, ist nach folgendem Schema aufgebaut: In den waagerechten Reihen stehen die Atome mit gleicher Protonenzahl (oder mit gleicher Ordnungszahl); in den senkrechten Spalten die Atomkerne mit gleicher Neutronenzahl.
Jedes Kästchen enthält folgende Angaben (siehe auch Lesebeispiel):
- Nuklidsymbol
- Massenzahl, d.h. die Summe der Masse von Protonen und Neutronen (die Elektronen der Hülle wiegen so wenig, daß sie praktisch nichts zur Masse eines Atoms beitragen)
- Halbwertszeit $T_{1/2}$, also derjenige Zeitraum, in dem die Hälfte der vorhandenen radioaktiven Atomkerne zerfällt)
- spezifischen Aktivität in Becquerel pro Gramm [Bq/g]; sie gibt die Aktivität pro Masseneinheit des jeweiligen Radionuklids an
- Strahlungsart. Wir haben nur die hauptsächlich vorkommenden vermerkt. Bei den meisten Kernumwandlungen wird neben Alpha- und Betastrahlung auch Energie in Form elektromagnetischer Gamma-Strahlung frei; in manchen Fällen tritt auch Neutronen- oder Röntgenstrahlung auf.

Lesebeispiel:

Pu 239
24110 a
$2{,}295 \cdot 10^9$
α

Elementsymbol: Pu für Plutonium
Massenzahl M = 239
Halbwertszeit $T_{1/2}$ = 24110 Jahre
spezifische Aktivität: $2{,}295 \cdot 10^9$ Bq/g
d.h. 1 g Pu 239 hat eine Aktivität von 2,295 Milliarden Bequerel.
Zerfallsart: α-Zerfall



Das lebensbedrohliche Vermächtnis der Wiederaufarbeitung

PLUTONIUM – REICHTUM UND TOD

Autoren:

Dipl.-Ing. Lutz Gärtner (Kapitel I – IV)
Gruppe Ökologie Hannover

Ulrike Fink von Rabenhorst (Kapitel V – VIII)
Gruppe Ökologie Hannover

„Der Name ‚Plutonium' wird von dem griechisch-römischen Gott Pluto hergeleitet. Pluto war der Gott des Reichtums und der Macht, und Plutonium gibt in der Tat einigen Menschen Reichtum und Macht. Aber Pluto war auch der Herrscher des Hades, der Gott des Todes – so wie Plutonium in den Atomraketen und viel mehr in den Atombomben uns alle bedroht. Hoffentlich entschließen wir uns dazu, in unserer Zeit andere Götter als diesen Gott Pluto zu verehren."
H. Alfvén. Nobelpreisträger (zitiert in /1/)

INHALTSVERZEICHNIS

Einleitung 4

I. Auf der Suche nach den Transuranen 5

Die Entdeckung der Radioaktivität 5

II. Bombenstoff Plutonium 7

Der Teufel steckt von Anfang an dazwischen 7
Der Griff nach der Bombe 8

III. Der Bombenstoff aus dem Reaktor 9

„Atoms for Peace" oder der Traum vom Brennstoffkreislauf 9

IV. Wo Plutonium in der Umwelt vorkommt 11

Natürliches Vorkommen 11
Wie Plutonium in die Umwelt gelangt 11

V. Wenn Plutonium in die Umwelt gelangt 15

Der Weg des Plutoniums über die Nahrungskette 15

VI. Plutonium im menschlichen Körper 23

Die Flexibilität von Grenzwerten 23
Was macht Plutonium so gefährlich 23
Woher stammt unser Wissen über Plutonium 24
Wege in den menschlichen Körper 25

VII. Plutoniumnachweis – Methoden und Möglichkeiten 29

Wer nicht sucht, der findet auch nichts 29

VIII. Plutonium: Eine aktuelle Kontroverse 33

Nachtrag zum Restrisiko Nr. 3/4, Dezember 1989 34

Quellennachweis 35

Einleitung

Das „Integrierte Nationale Entsorgungskonzept" der Bundesrepublik Deutschland – seit etwa 15 Jahren von verschiedenen Bundesregierungen verfolgt und gepriesen – ist ins Schleudern gekommen. Dieses Konzept beinhaltete als zentralen Punkt die Wiederaufarbeitung von abgebranntem Kernbrennstoff. Zum tatsächlichen „Entsorgen" von Atommüll taugt dieses Konzept jedoch nicht. Entsorgung und Endlagerung sind nach wie vor ungelöst. Und Wiederaufarbeitung schafft zusätzliche Probleme. Dennoch schmiedeten Regierende und Kernkraftlobby bisher langfristige Pläne für eine (WAA*) im bundesdeutschen Wackersdorf.

Diese Pläne scheinen nun vom Tisch. Denn die Bundesrepublik will die Wiederaufarbeitung im Ausland nicht, wie bisher geplant, in den nächsten zehn Jahren mit den bestehenden Verträgen auslaufen lassen. Vielmehr soll die WAA im französischen La Hague etwa ab dem Jahr 2000 Riesenmengen bundesdeutschen Kernbrennstoffs übernehmen. Die hiesige Energiewirtschaft locken die erheblich geringeren Kosten einer Wiederaufarbeitung in Frankreich. Und der zähe Widerstand der Oberpfälzer gegen das Projekt vor ihrer Haustür machte der Atomlobby die Aufarbeitungspläne für die bayerische Anlage madig.

Wiederaufarbeitung im Ausland (teilweise oder vollständig) ist jedoch keine Alternative. Betriebswirtschaftliche Rechnungen der Energieunternehmen über die Billig-Aufarbeitung in Frankreich sind kein Argument. Entscheidend sind vielmehr die Probleme und Risiken der Wiederaufarbeitung, wie wir sie in den bisherigen Veröffentlichungen der Reihe RESTRISIKO (noch keineswegs vollständig) am Beispiel Wackersdorf aufgezeigt haben. Und die gelten auch in La Hague oder Sellafield. Hauptzweck einer WAA ist das Abtrennen von Plutonium. Zumindest beim Namen ist die französische Atomindustrie ehrlicher als die deutsche – für sie ist die Anlage in La Hague eine „usine plutonium", eine Plutoniumfabrik.

Die vorliegende Ausgabe von RESTRISIKO widmet sich diesem Element Plutonium: Wie sind die Menschen auf das Plutonium gekommen? Wozu wird es verwendet? Vor allem aber: Wie gelangt Plutonium in die Umwelt, und wie verhält es sich dort? Wie gelangt es in den Körper der Menschen und mit welchen Wirkungen?

Solche Fragen enthüllen Paradoxes: Zwar kennen Wissenschaftler heute alle Eigenschaften von Plutonium, die für den Bau immer kleinerer und komplizierterer Atomwaffen erforderlich sind. Im Hinblick auf sein Verhalten in Umwelt und Organismus klaffen im Expertenwissen jedoch große Lücken – bei einem Stoff, der schon in kleinsten Mengen sehr toxisch ist und gleichzeitig so schwer durch Messungen nachzuweisen, daß sich das Einhalten von gesetzlichen Grenzwerten überhaupt nicht kontrollieren läßt. Und diese Grenzwerte sind nicht einmal besonders streng und niedrig festgelegt.

Die Informationen, die hier zusammengestellt sind, zeigen die Gefahren der Wiederaufarbeitung – ob die Anlagen nun in Wackersdorf, La Hague oder sonstwo stehen. Gerade heute verschärft sich die Diskussion über das „Restrisiko" von Plutonium zunehmend. Anfang April 1989 hat die Strahlenschutzkommission in einer Stellungnahme erklärt, Plutonium werfe keine besonderen Probleme auf. – Da werden kritische Beiträge wie diese, die eine Auseinandersetzung über diese „keineswegs besonderen" Probleme ermöglichen, immer wichtiger. Übrigens: Die nächste Ausgabe des RESTRISIKOS wird sich mit den Plutoniumfabriken Sellafield und La Hague beschäftigen.

* Wiederaufarbeitungsanlage (WAA)

AUF DER SUCHE NACH DEN TRANSURANEN

Die Entdeckung der Radioaktivität

Die Entdeckung des Plutoniums und der übrigen Transurane [1] machte den Traum der Alchimisten wahr: Die Umwandlung (oder Transmutation) eines Elements in ein anderes. Jedoch erst der Kernphysik, die mit weitaus höheren Energien als die Chemie operiert, gelang schließlich dieser Substanzwandel, an dem sich die Alchimisten jahrhundertelang versucht hatten. Im Jahre 1934 machten Irène Curie und Frédéric Joliot eine bahnbrechende Entdeckung: Ein normalerweise stabiles Element ließ sich durch Bestrahlung mit Alpha-Teilchen radioaktiv machen. Mit ihren Experimenten hatten die Eheleute die künstliche Radioaktivität entdeckt. Viele Forscher versuchten daraufhin, auch von anderen Elementen radioaktive Formen herzustellen. Enrico Fermi beispielsweise studierte das Verhalten von Elementen unter Neutronenbeschuß. Die dabei auftretende Reaktion, so hoffte er, ließe sich zum Herstellen von Transuranen einsetzen: Das Uranisotop U-238 [2] sollte ein Neutron einfangen und das so entstandene U-239 sich dann durch β^--Zerfall [3] in ein Element der Ordnungszahl *) 93 umwandeln. Fermi beobachtete dabei die Bildung von wenigstens fünf neuen ß-Strahlern und vermutete unter ihnen auch ein Element mit einer Ordnungszahl größer als 92 /2/. Noch im gleichen Jahr kritisierte die Chemikerin Ida Noddack diese Hypothese: „Es wäre denkbar, daß bei der Beschießung schwerer Kerne mit Neutronen diese Kerne in mehrere *größere* Bruchstücke zerfallen, die zwar Isotope bekannter Elemente, aber nicht Nachbarn der bestrahlten Elemente sind." /3/ Der Gedanke an eine Abspaltung von Teilchen mit einer Ordnungszahl in der Größenordnung 20 bis 30 und einer Massenzahl *) in der Gegend von 50 schien damals den meisten Wissenschaftlern völlig absurd. Die Möglichkeit, daß durch Neutronenbeschuß von Uran Transurane entstehen, war neu und aufregend und veranlaßte besonders Otto Hahn, Lise Meitner und Fritz Straßmann zu eingehenden Untersuchungen. Die 30jährige Zusammenarbeit zwischen Hahn und Meitner brach im Juli 1938 jäh ab, als Meitner aus Nazi-Deutschland nach Schweden emigrieren mußte, kurz bevor im Dezember des gleichen Jahres die in Deutschland gebliebenen Hahn und Straßmann durch Neutronenbestrahlung von Uran radioaktives Barium herstellen konnten: Die Kernspaltung war nachgewiesen /4/. Lise Meitner besprach dieses Phänomen mit ihrem Neffen Otto Frisch, der ebenfalls aus Deutschland geflohen war. Sie fanden eine physikalische Erklärung für die Spaltung und berechneten, daß dabei eine ungeheure Energie frei wird /5/.

Ihr eigentliches Ziel – die Erzeugung von Transuranen – erreichten die Kernphysiker im Frühjahr 1940: An der Universität von Kalifornien in Berkely entdeckten E. M. McMillan und P. H. Abelson nach Neutronenbeschuß von Uran im institutseigenen Zyklotron Neptunium in Form des Isotops Np-239 /6/.

Entdeckung und Isolierung eines Elements allerdings sind zwei Paar Schuhe: Ein Element gilt als entdeckt, wenn die Existenz seiner Atome kernphysikalisch oder chemisch belegt ist. Isoliert ist es jedoch erst, wenn es sich in reiner Form und in einer wägbaren Menge herstellen läßt.

Isolieren konnten die Forscher Neptunium in Form des Isotops Np-237 erst 1944. Seinen Namen erhielt Neptunium vom Planeten Neptun. Denn so wie der neue Stoff im Periodensystem der Elemente auf Uran folgt, so kreist im Planetensystem der Neptun jenseits des Uranus. Diesem Schema folgt auch die Bezeichnung des nächsthöheren Elements mit der Ordnungszahl 94: Der Stoff, Plutonium, wurde nach dem Planeten Pluto benannt. Entdeckt hatten das 94. Element 1940/41 wiederum Forscher aus Berkely: G. T. Seaborg, E. M. McMillan, J. W. Kennedy und A. C. Wahl beschossen am 14. Dezember 1940 Uranoxid (U_3O_8) mit Kernen von schwerem Wasserstoff (Deuteronen). Dadurch entstand Np-238, und das wandelte sich anschließend in Pu-238 um:

$$^{238}_{92}U + {}^{2}_{1}d \longrightarrow {}^{238}_{93}Np + 2\,{}^{1}_{0}n \qquad (\beta^-)$$

$$^{238}_{93}Np \longrightarrow {}^{238}_{94}Pu \qquad (T_{1/2} = 2{,}1\ \text{Tage})$$

Wie Np-238 ist auch Pu-238 nicht stabil. Es zerfällt mit einer Halbwertszeit $T_{1/2}$ von knapp 88 Jahren unter Aussendung von α-Strahlen (siehe dazu auch die Übersicht auf der vorderen Umschlaginnenseite).

Natürlich ließ sich die Existenz von Pu-238 nicht unmittelbar nach dem Bombardement mit Deuteronen nachweisen. Erst in den folgenden Wochen entdeckten die Physiker ein Indiz für das Vorliegen des Stoffs: eine zunehmende α-Radioaktivität ihres Reaktionsprodukts, das chemisch abgetrenntes Neptunium enthielt.

1) Transurane sind Elemente, die im Periodensystem „jenseits" des Urans stehen. Uran und die Transurane werden auch als Aktiniden bezeichnet.

2) Isotope sind verschiedene Atomsorten ein und desselben Elements.

3) Beim β^--Zerfall wandelt sich ein Neutron in ein Proton und ein Elektron um. Das Elektron verläßt als Betastrahlung den Atomkern.

*) Zur Erklärung siehe vordere Umschlagsseite

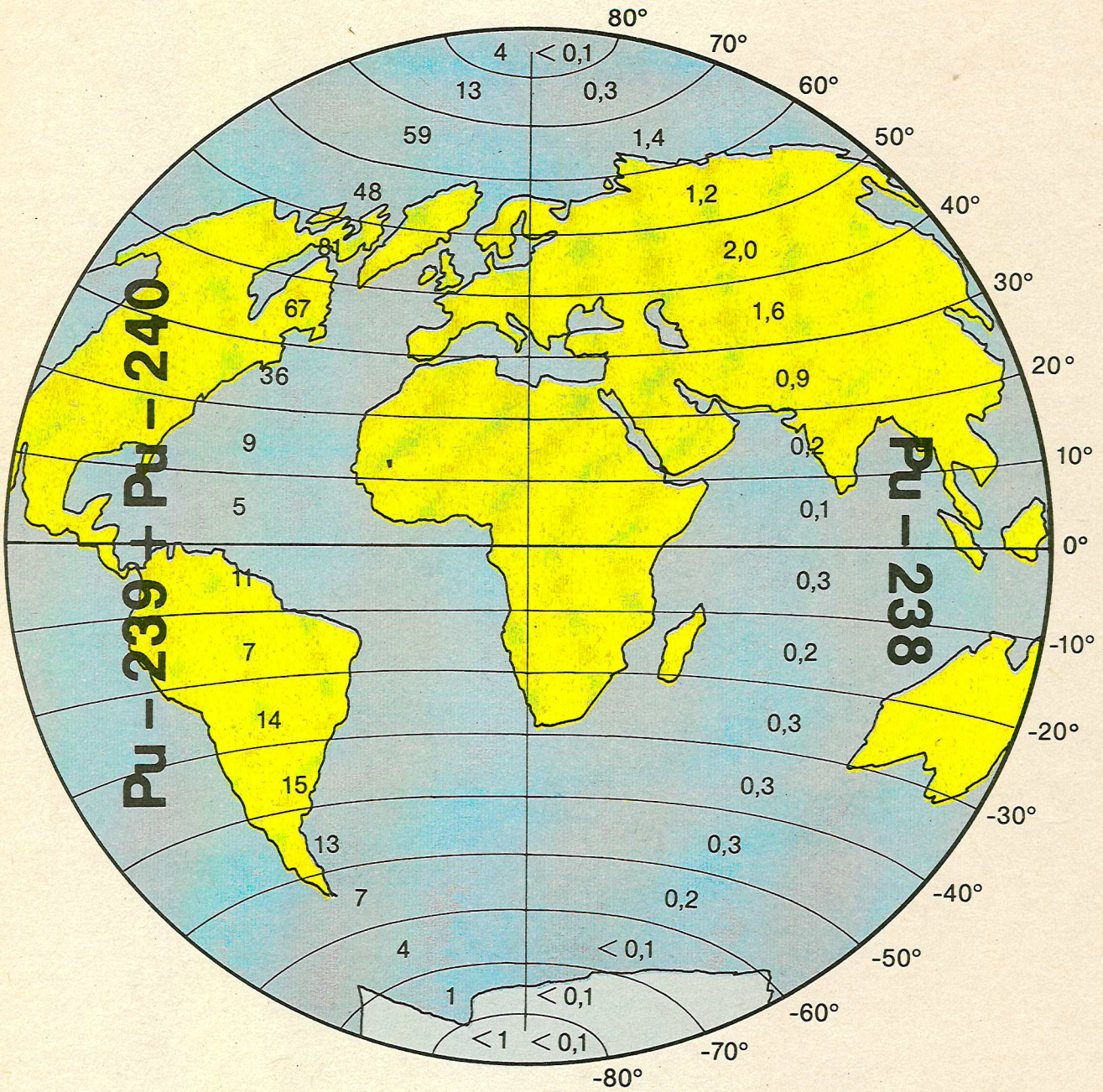


Abbildung 2:
Fall out [Bq/m^2] an Waffenplutonium
in verschiedenen Breitengraden
Zahlenwerk aus /29/

BOMBENSTOFF PLUTONIUM

Der Teufel steckt von Anfang an dazwischen

Die Suche nach den Transuranen und ihre Entdeckung galt als reine Grundlagenforschung, wobei quasi als Nebenprodukt die Entdeckung der Kernspaltung abfiel. Dieser „Forschungsabfall", nur neun Monate vor dem Ausbruch des Zweiten Weltkriegs entwickelt, sollte Grundlage des Atombombenbaus werden. Anfangs nahm sich die planmäßige Arbeit der USA auf diesem Gebiet noch bescheiden aus. Zu dieser Zeit war nämlich nur das Isotop U-235 als bombenfähiges Material bekannt (siehe Kasten 1). Und so mußte dieses Isotop aus Natururan, welches zu über 99 Prozent aus dem nicht bombentauglichen U-238 besteht, abgetrennt werden. Weil sich die beiden Uranisotope U-238 und U-235 chemisch nicht unterscheiden lassen, warf ihre Trennung enorme technische Probleme auf.
Der Physiker Leo Szilard, der 1922 an der Berliner Universität promoviert hatte und wegen seiner jüdischen Abstammung im Februar 1933 emigrieren mußte, fürchtete die Entwicklung einer Atombombe durch das Hitler-Regime. Da er in den Vereinigten Staaten wenig Einfluß hatte, trat er mit Hilfe Albert Einsteins an die amerikanische Führung heran. In einem Brief an Präsident Roosevelt forderte er eine rasche Entwicklung von Kernwaffen, um den Deutschen zuvorzukommen. Nach dem Eintritt der USA in den Krieg im Dezember 1942 avancierte daraufhin der „Manhattan Project" genannte amerikanische Atombombenplan zum größten Forschungsvorhaben, das jemals in der Geschichte der Wissenschaft durchgeführt wurde. Zu dieser Zeit arbeiteten in Tausenden von Unternehmen, Universitäten und eigens eilig eingerichteten Laboratorien Hunderttausende von Menschen an der Entwicklung der Atombombe – meist ohne es zu wissen.

Kasten 1:

Nuklide, die sich zum Bau einer Kernspaltungswaffe eignen, müssen
- ausreichend langlebig sein
- sich von Neutronen in beliebiger Energie spalten lassen
- in großen Mengen zur Verfügung stehen

Dazu gehören	Entdeckung der Spaltungseigenschaft
U-233	1941/42 /7/
U-235	Dezember 1939
Pu-239	März 1941 /8/

Schon 1939 begannen Forscher der Universität Chicago mit dem Bau eines Uran-Graphit-Reaktors mit 40 Tonnen Natururan. Dadurch wollten sie die Frage klären, ob sich eine Kettenreaktion überhaupt realisieren läßt. Am 2. Dezember 1942 ging der Reaktor als weltweit erster in Betrieb.
Als am 28. März 1941 bekannt wurde, daß sich auch Pu-239 durch Neutronen geringer Energie spalten läßt, schlug man einen zweiten Entwicklungspfad zur Konstruktion einer Bombe ein. Anfang 1942 wurde daher beschlossen, einen solchen Reaktor bei Hanford im Staate Washington zu bauen. Dieser sollte später Pu-239 in größeren Mengen liefern. Bis dahin wollte man einen Versuchsreaktor bei Oak Ridge, Tennessee errichten, der die zur Erforschung der Eigenschaften von Plutonium nötigen Mengen des Bombenstoffs produzieren würde. Dieser Reaktor nahm im November 1943 seinen Betrieb auf, elf Monate vor dem ersten Hanford-Reaktor.
Bei einer Atomspaltung entstehen neben Plutonium viele andere Spalt- und Aktivierungsprodukte. Deshalb mußten die Bombenbauer Pu-239 von den übrigen Nukliden trennen. Die entsprechenden chemischen Reaktionen waren zunächst noch zu erforschen. Voraussetzung dafür waren ausreichende Mengen von verfügbarem Plutonium. Den Weg dazu ebneten B. B. Cunningham und L. B. Werner am Metallurgischen Institut von Chicago /9/: Ihnen gelang es am 18. August 1942 erstmals, Plutonium in Form von Pu-239 (Masse etwa 1 μ g) zu isolieren. Nun war es möglich, mit Hilfe von ultramikrochemischen Untersuchungsmethoden die Chemie des Plutoniums tiefer zu ergründen. Die gesuchten Reaktionsmechanismen wurden gefunden und im vergrößerten Maßstab (um einen Faktor von etwa einer Milliarde) in einer Trennanlage eingesetzt, die inzwischen ebenfalls in Hanford errichtet war.
Die Entwicklung der Atombombe forderte viele Opfer. In den Laboratorien in Los Alamos im Staat Neu-Mexiko kam es beim Erforschen der Spaltungseigenschaften von metallischem Plutonium zu zwei schweren Kritikalitätsunfällen. Am 21. August 1945 wurden zwei Menschen einer übermäßigen Strahlungsdosis ausgesetzt. Einer der beiden starb 24 Tage später. Am 21. Mai 1946 waren acht Personen von einem Strahlenunfall betroffen. Einer der Arbeiter starb neun Tage danach /10/.
Am 12. April 1945 starb US-Präsident Roosevelt. Sein Vizepräsident Truman mußte seinen Platz einnehmen, obwohl er sich keineswegs auf dieses Amt vorbereitet fühlte. Truman hatte sich mit Roosevelt selten getroffen und war über die teilweise sehr geheimen politischen Absprachen des Präsidenten so gut wie nicht informiert. Vom supergeheimen Manhattan-Projekt hatte er nichts gewußt. Auch die Bedeutung der beiden riesigen Industriekomplexe in Oak Ridge und Hanford hatte er, wie die Bevölkerung in deren Umgebung, verkannt und für eine Anlage zur Giftgasherstellung gehalten. Erst ein paar Wochen nach der Amtsübernahme wurde er eingeweiht: Seit dem Jahre 1941 waren ohne Wissen des Kongresses zwei Milliarden Dollar für die Entwicklung der Atombombe ausgegeben worden.
In den Augen vieler Wissenschaftler, die vor den Verfolgungen der Nazis in die Vereinigten Staaten geflüchtet waren, galt die Atombombe als Verteidigungswaffe gegen das Dritte Reich. Als jedoch ab 1944 klar wurde, daß eine deutsche Kernwaffe nicht mehr zu befürchten war, und die US-Militärs Japan zum potentiellen Ziel einer US-amerikanischen Atombombe erklärten, setzte sich Leo Szilard gegen die Bombe ein. Bis zum 15. Juli 1945 sammelte er in Chicago 67 Unterschriften von Gelehrten gegen die Atombombe. Einen Tag später explodierte erstmals – als Test – eine plutoniumhaltige Kernspaltungswaffe unter dem Decknamen „Trinity" (Dreifaltigkeit) auf einem Versuchsgelände in der Nähe des kleinen Städtchens Alamogordo an der texanischen Grenze im Staat Neu-Mexiko. Das blendend helle Licht war in einem Umkreis von fast 300 Kilometern zu sehen. Und der Kommandant des Stützpunkts Alamogordo erklärte der besorgten Bevölkerung, ein Munitionsdepot sei in die Luft geflogen – aus Versehen.

Der Griff nach der Bombe

Der amerikanische Physiker Edward Teller, an der Entwicklung der Bombe maßgeblich beteiligt, betrachtete Kernwaffen als Geräte der Abschreckung: Nur wenn der Schock über Kernwaffen grenzenlos sei, würden die Menschen bereit sein, auf sie für immer zu verzichten. Am 6. August 1945 warfen US-Soldaten dennoch eine Uranbombe über Hiroshima ab. Ein fürchterlicher Blitz hüllte die Stadt frühmorgens um 8 Uhr 15, kurz nach Beginn des Arbeitstages, ein. Ein Feuerzyklon griff in Sekundenschnelle um sich und wütete sechs Stunden lang. Die Straßenbahnen blieben voller verkohlter Menschen stehen. Ein Orkan mit 1200 Stundenkilometern erhob sich, zerstörte alle Mauern im Umkreis von über einem Kilometer wie Kartenhäuser. Von Hiroshima blieben nur die Gerippe einiger Betongebäude stehen. 140 000 Menschen starben bis Ende 1945, 70 000 wurden verletzt. Drei Tage später vernichtete eine Plutoniumbombe Nagasaki, tötete 70 000 Menschen und verletzte 40 000. Dann war das Atomarsenal der Amerikaner leer. Doch nach ein paar Wochen hatten die Waffenschmieden in Hanford und Oak Ridge wieder genug spaltbares Material für neue Explosionen hergestellt ...

Heute verfügen die Atomnationen über tonnenweise waffenfähiges Plutonium (die Nagasaki-Bombe enthielt 6,1 Kilogramm davon). Erzeugt wird der Höllenstoff in speziellen Produktionsreaktoren und in zivil-militärischen „Zweizweckreaktoren". Aber auch Plutonium aus Atomkraftwerken, die „nur" zur Stromerzeugung dienen, eignet sich zur Kernwaffenproduktion (siehe dazu RESTRISIKO Nr. 2).

Kasten 2:

Abschätzung des Inventars an waffenfähigem Plutonium in den Atomwaffenstaaten bis 1983 /11/:

Staat	Menge an waffenfähigem Pu [kg]	Zahl von Atombomben
Großbritannien	3400 – 4660	686
China	3000	251 – 331
Frankreich	3500 – 6500	514
Israel	200 – 575	45 – 125
USA	100 000	26 000
UdSSR	140 000	18 000 – 40 000

Am 8. Dezember 1953 proklamierte Eisenhower vor den Vereinten Nationen in Genf das Programm „Atoms for Peace" (Atome für den Frieden) und änderte damit die Atompolitik der Vereinigten Staaten von Grundauf (dazu: Kasten 3). Nachdem er in seiner Rede den absoluten Friedenswillen seines Landes beschworen hatte – nicht ohne den Hinweis allerdings, daß bei einem Atomangriff auf die USA der angreifende Staat durch einen enormen Vergeltungsschlag ausradiert würde –, führte er seine Idee einer friedvollen Welt aus: Die Atomwaffenstaaten sollten ihre Vorräte an Natururan und spaltbarem Material einer zu gründenden Internationalen Atomenergiebehörde – unter dem Schutz der Vereinten Nationen – übergeben.

Das Programm „Atoms for Peace" entpuppte sich jedoch als ein großangelegter Propagandatrick der US-Regierung. Die Gegner der Atombombentests sollten damit zum Schweigen gebracht, Einwände von Energieexperten über die Unwirtschaftlichkeit der Kernenergie zurückgedrängt werden. Unter dem Motto „Wie verstecke ich am besten einen Baum?" – in einem Wald nämlich, unter vielen anderen Bäumen – begann die atomare Aufrüstung.

Kasten 3:

Aus der Rede des amerikanischen Präsidenten Eisenhower vom 8. 12. 1953 zu seinem Programm „Atoms for Peace".

„Die Vereinigten Staaten wünschen mehr als eine bloße Reduzierung oder Vernichtung von militärischem Atommaterial.
Es ist nicht genug, diese [Atom-] Waffe aus den Händen der Soldaten zu nehmen. Sie muß in die Hände derer gegeben werden, die ihr die militärische Verkleidung zu nehmen wissen und sie einer friedlichen Verwendung zuführen. Die Vereinigten Staaten wissen, daß die furchtbare Entwicklung der atomaren Aufrüstung umgedreht werden kann; diese größte der zerstörerischen Kräfte kann in eine große Wohltat zum Nutzen der ganzen Menschheit umgewandelt werden.
Die Vereinigten Staaten wissen, daß die friedliche Kraft der Atomenergie kein Zukunftstraum ist. Ihre Tauglichkeit ist bereits bewiesen und steht jetzt und heute zur Verfügung. Wer kann daran zweifeln, daß diese Tauglichkeit schnell in einen universellen effizienten und wirtschaftlichen Nutzen umgewandelt werden kann, wenn die Gesamtheit aller Wissenschaftler und Ingenieure der Welt über genügend Mengen an spaltbarem Material verfügt, mit denen sie ihre Ideen testen und entwikkeln kann.
[...]
Der Scharfsinn unserer Wissenschaftler wird für spezielle Sicherheitsbedingungen sorgen, unter welchen eine solche Bank von spaltbarem Material im wesentlichen immun gegenüber einem überraschenden Zugriff gemacht werden kann." /12/

Das Böse

Ein Mensch – was noch ganz ungefährlich –
Erklärt die Quanten (schwer erklärlich!).
Ein zweiter, der das All durchspäht,
Erforscht die Relativität.
Ein dritter nimmt, noch harmlos, an,
Geheimnis stecke im Uran.
Ein vierter ist nicht fernzuhalten
Von dem Gedanken, kernzuspalten.
Ein fünfter – reine Wissenschaft –
Entfesselt der Atome Kraft.
Ein sechster, auch noch bonafidlich,
Will die verwerten, doch nur friedlich.
Unschuldig wirken sie zusammen:
Wen dürfen, einzeln, wir verdammen?
Ist's nicht der siebte erst und achte,
Der Bomben dachte und dann machte?
Ist's nicht der Böseste der Bösen,
Der's dann gewagt, sie auszulösen?
Den Teufel wird man nie erwischen:
Er steckt von Anfang an dazwischen.
Eugen Roth

DER BOMBENSTOFF AUS DEM REAKTOR

III

„Atoms for Peace" oder der Traum vom Brennstoffkreislauf

Alle Atomreaktoren arbeiten nach dem gleichen Prinzip: Ein Neutron trifft auf einen spaltbaren Kern, welcher dann in zwei Bruchstücke zerfallen kann. Dann entstehen dabei zusätzlich zwei bis drei Neutronen, von denen eines nun einen anderen Kern spalten muß, um die Kettenreaktion aufrecht zu erhalten. Pro Spaltung wird dabei eine Energie von etwa 200 Mega-Elektronenvolt *) frei. Dieser Vorgang funktioniert allerdings nur, wenn Neutronen und die zu spaltenden Kerne bestimmte Eigenschaften aufweisen. Nur schwere Kerne wie die der Aktiniden lassen sich überhaupt spalten. Und nur bei Kernen mit einer ungeraden Anzahl von Neutronen (wie U-233, U-235, Pu-239, Pu-241) ist eine Spaltung durch Neutronen mit beliebiger Energie möglich. Reaktortauglich sind die jeweiligen Nuklide nur, wenn sie eine ausreichend lange Lebensdauer aufweisen. U-235 ist das einzige in der Natur vorkommende Nuklid, das all diese Eigenschaften besitzt. Allerdings besteht Natururan nur zu etwa 0,7 Prozent aus dem potentiellen Reaktorelement – der Rest ist U-238, ein starker Neutronenabsorber (Neutronenfänger). Der Absorbtionsgrad ist in komplizierter Weise von der Energie der Neutronen abhängig. Sind die Neutronen langsam genug, d.h. haben sie eine Energie von etwa 0,01 bis 0,1 Elektronenvolt (man spricht hier auch von langsamen oder thermischen Neutronen), so kann das U-238 sie nicht mehr einfangen. Folge: Auch im Natururan kann eine Kettenreaktion in Gang kommen. Eine höhere Konzentration an U-235 hätte dieselbe Wirkung: Wie die langsamen Neutronen würde sie die Reaktionskette auslösen. In der Praxis werden diese beiden Möglichkeiten kombiniert:

Ein sogenannter Moderator verlangsamt die bei der Spaltung freiwerdenden Neutronen. Diese werden dann nicht mehr von U-238 eingefangen und können weitere U-235-Kerne spalten. Außerdem wird das Natururan mit U-235 angereichert. Bei einem Anreicherungsgrad von drei Prozent U-235 kann gewöhnliches Wasser als Moderator benutzt werden, bei zehn Prozent kann auf den Moderator ganz verzichtet werden. Fängt ein U-238-Kern ein Neutron ein, ohne gespalten zu werden, so entsteht U-239, welches sich durch zweifachen β^--Zerfall in Pu-239 umwandelt (Kasten 4). Und Pu-239 hat wie U-235 „gute Spalteigenschaften".

Kasten 4:

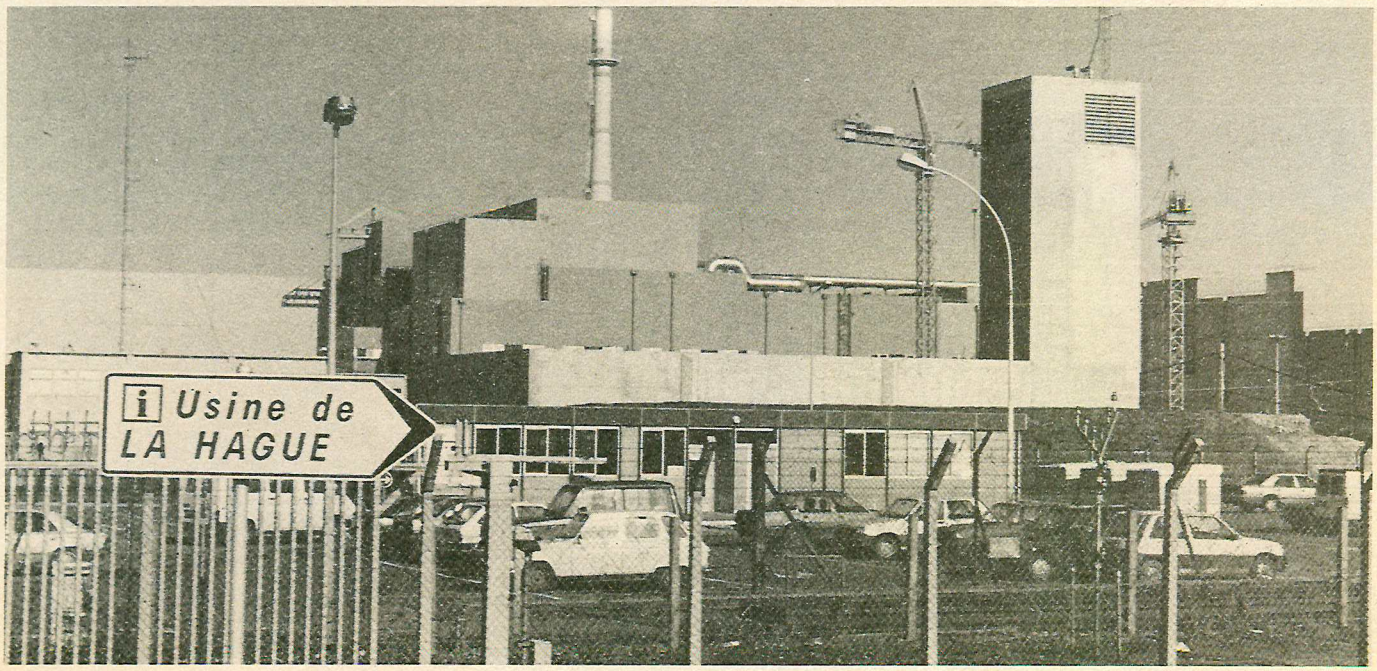
Reaktionen zur Pu-239-Herstellung in einem Reaktor, der mit natürlichem Uran und thermischen Neutronen arbeitet.

(1) $^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \longrightarrow$ Spaltprodukte + 2,5 $^{1}_{0}n$ + Energie

(2) $^{238}_{092}U + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{239}_{92}U + \mu$

$^{239}_{92}U \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}_{93}Np \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}_{94}Pu$

Die Zahl 2,5 in der Gleichung (1) ist ein Durchschnittswert für alle möglichen Reaktionen. Je nach Spezifikation des Spaltprodukts werden zwei, drei oder vier Neutronen ausgesandt. Ein nach (1) entstandenes Neutron wird zur Erzeugung von Pu-239 nach (2) benutzt.

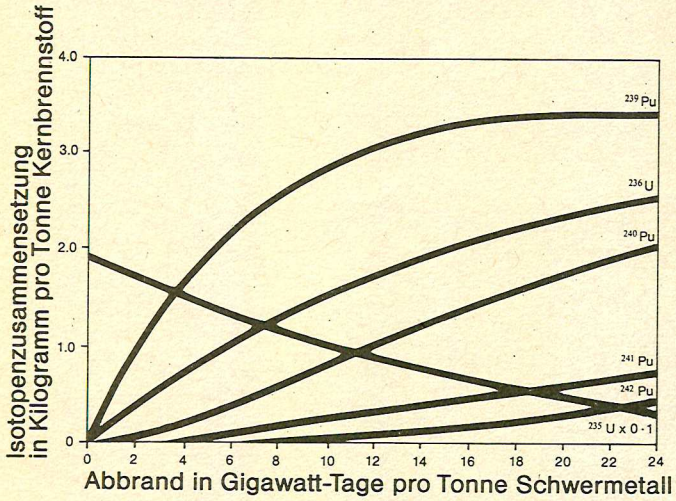


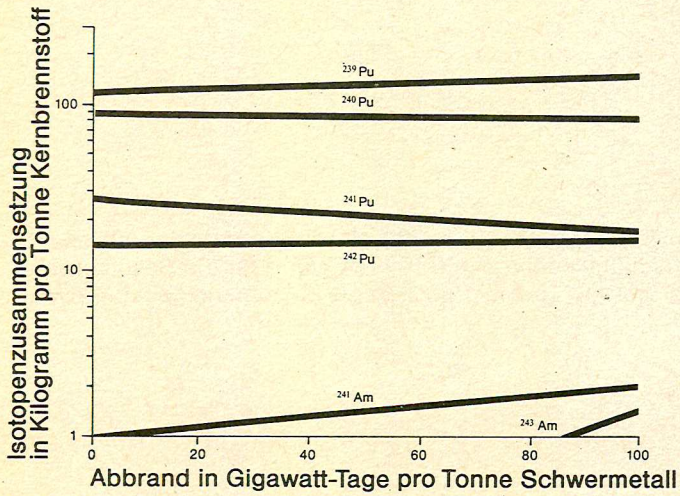
Die atomare Wiederaufarbeitungsanlage in La Hague/Frankreich, die nicht nur Atommüll aus „zivilen" Raktoren im In- und Ausland verarbeitet, sondern auch Plutonium für das französische Atomwaffenprogramm herstellt. Foto: dpa/AFP

*) Eine gigantische Energie: Wenn nur jedes Atom eines aus Uran-235 bestehenden Stecknadelkopfes zerfällt, wird dabei eine Energie von etwa 10 Gigajoule frei – genug, um ein 100 Tonnen schweres Flugzeug zehn Kilometer in den Himmel zu haben.

U-238 wird auch als Brutmaterial bezeichnet, da es sich in einen spaltbaren Stoff, nämlich Pu-239, umwandeln läßt, also Spaltmaterial „erbrütet". In einem thermischen Reaktor (Leichtwasserreaktor – LWR) – dazu gehören der Druckwasser- und Siedewasserreaktor (DWR bzw. SWR) – ist die Pu-239-Ausbeute jedoch relativ gering: Im statistischen Mittel entsteht aus annähernd zwei U-235-Kernen und einem U-238-Kern – neben Spaltprodukten, Neutronen und Energie – lediglich ein Pu-239-Kern. Beim Schnellen Brüter (SBR) fällt die statistische Bilanz günstiger aus: Aus zwei Pu-239- und drei U-238-Kernen können hier – neben Spaltprodukten, Neutronen und Energie – im Prinzip drei Pu-239-Kerne gewonnen werden. Es entsteht also mehr spaltbarer Brennstoff als verbraucht wird. Daher unterscheiden sich bei beiden Reaktortypen (LWR und SBR) auch das Plutoniuminventar und damit die Menge an höheren Aktiniden in Abhängigkeit vom Abbrand (Abb. 3). Der Abbrand ist definiert durch diejenige thermische Energie, die insgesamt während der Einsatzzeit des Brennstoffs pro Masseneinheit Schwermetall (d.h. Spalt- und Brutstoff) gewonnen wird. Durch sukzessiven Neutroneneinfang und andere Prozesse (siehe Abb. vordere Umschlaginnenseite) entstehen im Reaktor auch höhere Aktinide als Plutonium (Kasten 5). Durch deren α-Aktivität und spontane Spaltbarkeit werden Reaktionen ausgelöst, die Neutronen freisetzen. Besondere Schirme, die solche Neutronen einfangen, sind deshalb nötig, um gesundheitliche Gefahren beim Handhaben solcher Brennelemente zumindest zu vermindern.

Abbildung 3:
Isotopenzusammensetzung des Brennstoffs in Abhängigkeit vom Abbrand im Falle eines thermischen Reaktors (oben) und eines Schnellen Brüters (unten). /38/
Man beachte den unterschiedlichen Maßstab!





Kasten 5:

Die Häufigkeit des Vorkommens verschiedener Plutonium-Isotope und damit auch höherer Aktinide im Brennelement ist im wesentlichen abhängig
– vom Abbrand
– von der U-235-Anreicherung
– von den Halbwertszeiten
– von einem Wiederaufarbeitungsprozeß
– von den Lagerungszeiten der bestrahlten Brennelemente vor und nach einer Wiederaufbereitung

Am Beispiel des Druckwasserreaktors wollen wir nun die Zusammensetzung der Plutoniumisotope in verschiedenen Stadien darstellen. Dazu nehmen wir an: Die Brennelemente haben einen Abbrand von 32 Gigawatt-Tage pro Tonne Schwermetall. Der Brennstoff bestehe aus Urandioxid (UO_2) mit einer 3,2prozentigen Anreicherung an U-235.

Wenn im statistischen Mittel nach etwa zwei Jahren die Brennelemente ausgewechselt werden, dann sieht die relative Häufigkeit der Plutonium-Isotope folgendermaßen aus:

Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242
1,7 %	56,0 %	23,6 %	12,3 %	6,3 %

Pro Kilogramm Brennstoff sind 8,85 Gramm Plutonium entstanden.

Wird der Brennstoff wiederaufgearbeitet, so verändert das seine Plutonium-Zusammensetzung:

	Zahl der Wiederaufarbeitungen		
	1	2	3
Plutonium-Zusammensetzung in % bei Entladung der Brennelemente			
Pu-238	2,0	2,3	2,5
Pu-239	48,0	43,9	41,7
Pu-240	28,6	29,6	29,8
Pu-241	12,9	13,6	13,8
Pu-242	8,7	10,7	12,3
Pu-Menge [g/kg]	13,33	16,19	17,51

/13/

WO PLUTONIUM IN DER UMWELT VORKOMMT

Natürliches Vorkommen

Nachdem wichtige chemische Eigenschaften des Plutoniums bekannt waren, wurde während der Jahre 1941/42 erstmals von G. T. Seaborg und M. L Perlman ein Unternehmen zum Auffinden von Plutonium in der Erdkruste gestartet. Die Forscher hofften, in kanadischer Pechblende – einem uranhaltigen Mineral – ein sehr langlebiges Plutonium-Isotop zu entdecken und dies in so großer Konzentration, daß sie brauchbare Mengen extrahieren könnten /14/*). Doch Seaborg und Perlman fanden bei ihrem Projekt lediglich extrem geringe Spuren von Pu-239 (10^{-12} Prozent).

Die Ursache für diese geringen Plutoniummengen: Wegen ihrer – im Vergleich zur Erdgeschichte – kurzen Halbwertszeiten haben Plutonium-Isotope (bis auf das Isotop Pu-244) keinen primordialen Charakter, d.h. sie stammen nicht aus der Entstehungszeit der Erde. Pu-239 entsteht in der Natur vielmehr durch Kernreaktionen, die kontinuierlich in der Erdkruste stattfinden, und zwar aus U-238-Atomen, die Neutronen einfangen. Diese Neutronen können verschiedenen Ursprungs sein, sie können stammen aus

- der spontanen Spaltung des U-238,
- (α, n) Reaktionen mit Kernen leichter Elemente (z.B. $^{9}Be + ^{4}\alpha$ also $\rightarrow {}^{12}C + {}^{1}n$ $^{12}C + {}^{1}n$ (Be=Beryllium, C=Kohlenstoff))
- Kernspaltungs- sowie Kernzertrümmerungsreaktionen, hervorgerufen durch die kosmische Strahlung
- neutroneninduzierten Spaltungen des U-235.

Nur Pu-244 könnte auch aus einer primordialen Quelle stammen: Dieses Nuklid ist möglicherweise bei kosmischen Kernreaktionen, die zur Bildung der Materie des Sonnensystems beigetragen haben, entstanden. In noch geringerer Konzentration als Pu-239 wurde Pu-244 in dem Mineral „Bastnasit" gefunden /15/.

Wie Plutonium in die Umwelt gelangt

Anfangs ausschließlich als Bombenmaterial verwendet, wird Plutonium heute als Energiequelle in Satelliten, U-Booten, Schiffen, Herzschrittmachern und Reaktoren eingesetzt. Wiederaufarbeitungsanlagen verarbeiten tonnenweise Plutonium. Dem Transport dieses gefährlichen Stoffs kommt deshalb eine ständig wachsende Bedeutung zu. Betriebsbedingte – planmäßige und unfallbedingte – „Freisetzungen" sind inzwischen fast an der Tagesordnung.

Bomben-Fallout – Plutoniumschnee

Mehr als 400mal explodierten – als Test – seit 1945 oberirdisch Atombomben. Sie haben Festland und Meere weltweit radioaktiv verseucht. Dabei wurden nicht nur Spaltprodukte wie Strontium und Cäsium, sondern auch radiologisch hochgiftige Plutoniumisotope frei. Deren weltweite Verteilung zeigt Abb. 2. (S. 6) Besonders katastrophal waren die Folgen der US-amerikanischen Versuche in den Jahren 1946 bis 1958 auf dem südpazifischen Bikini- und dem Eniwetak-Atoll (siehe Tab. 1).

*) Der entsprechende Bericht wurde erst 1948 veröffentlicht, denn er war militärisch relevant und deshalb nicht für die Öffentlichkeit bestimmt.

Tab. 1: Das größte Plutoniuminventar der Bikini- und Eniwetak-Atolle lauert in den Lagunensedimenten. Im November 1972 wurden folgende Konzentrationen an Pu-239 + Pu-240 gemessen:

Meßstelle	[Bq/m³]
Bikini-Atoll	
Oberflächenproben der Lagune	1,9
Bodenproben der Lagune	4,1
Eniwetak-Atoll	
Oberflächenproben der Lagune	1,1
Bodenproben der Lagune	1,6

Diese Werte stiegen in den folgenden Jahren noch um mehrere Prozent. /16/

Das Bikini-Atoll war Schauplatz der berüchtigten Tests „Anna" und „Berta". Mit diesen Versuchen wollten US-Militärs die „Wirkung" von Kernwaffen auf Schiffen „studieren". Die US-Marine hatte eine Flotte ausgedienter Schiffe – zum Teil aus der Kriegsbeute – zusammengezogen. Am 1. Juli 1946 zündeten die Amerikaner eine Atombombe über der Flotte (Anna-Test); am 25. Juli 1946 fand mit dem Berta-Test die weltweit erste atomare Unterwasserexplosion statt. Die Folgen waren katastrophal: Die Radioaktivität stieg so hoch, daß die Militärs ihre Beobachtungsflugzeuge zurückziehen mußten. Viele der Zielschiffe konnten weder betreten noch abgeschleppt werden. Sie mußten auf Jahre hinaus im Atoll verbleiben. Beobachtungsschiffe mußten in großem Stil dekontaminiert werden: Holz wurde fünf Millimeter tief abgehobelt, Farbschichten mit Sandstrahlgebläsen vollständig abgetragen. Die Taue waren nicht mehr zu verwenden. Vor dem Versuch hatten einige Experten befürchtet, daß es bei der Unterwasserexplosion zu einer Fusion von Wasserstoffatomen zu Helium hätte kommen können und dadurch die gesamten Ozeane der Erde und die Erde selbst ausgelöscht würden /17/. Getestet wurde trotzdem!

Am 1. März 1954 brachten die Vereinigten Staaten die erste thermonukleare Explosion in Gang: Eine Wasserstoffbombe detonierte beim Bikini-Atoll. Und dies ohne Warnung oder Vorankündigung! Mehrere hundert Menschen wurden einer sehr hohen radioaktiven Strahlenbelastung ausgesetzt. Der heimtückische Fallout erfaßte sogar ein 300 Kilometer vom Explosionsort entferntes japanisches Fischerboot. Kurze Zeit später zeigten sich an der 23köpfigen Besatzung akute Strahlenschäden wie Übelkeit, Haarausfall, Durchfall und Hautjucken. Knapp sieben Monate später starb einer der Japaner /18/. 239 Menschen auf den nahen Marshall-Inseln und 28 amerikanische Bedienstete wurden ebenso unwissentlich und ungefragt bestrahlt.

Ab 1949 beteiligte sich auch die UdSSR an der radioaktiven Verseuchung der Erde. Über die Auswirkungen ist nichts bekannt. Kurz darauf folgte bald Großbritannien, das seine Testbomben in den Jahren 1952 – 1963 auf dem australischen Festland und bei den westaustralischen Monte-Bello-Inseln detonieren ließ. Selbst vor jahrhundertealten Kultstätten der Ureinwohner machten die Briten nicht halt, als sie zwischen 1953 und 1957 im Maralinga-Gebiet in Südaustralien mehrere Kernwaffen„versuche" unternahmen. Die Bomben verstreuten etwa 1,4 Kilo-

gramm Plutonium quadratkilometerweit über das Maralinga-Gebiet. Weitere 20 Kilogramm zementierten die Militärs an gleicher Stelle ein – Plutoniumgräber an den ehemals heiligen Orten der Eingeborenen. 1640 Tonnen radioaktiven Abfalls – darin zwei bis vier Kilogramm Plutonium – wurden einfach vergraben. Selbst Kaninchengänge lagen tiefer als der tödliche Stoff. So verseuchten diese Tiere ihre Felle, Verdauungs- und Atemwege mit Plutonium und schleppten das vermeintlich für immer beseitigte Gift wieder an die Oberfläche. Den Briten genügte es dennoch, den verstrahlten Bezirk mit Warnschildern zu „sichern": „Abgeriegelt" versprachen die Tafeln vergeblich. Denn die Eingeborenen, die kein Englisch sprechen, jagen noch heute dort, sammeln noch heute dort ihre Lebensmittel /17/. Mitte der 80er Jahre warf ein Untersuchungsausschuß der australischen Labourregierung England und Australien große Nachlässigkeit vor. Von einer finanziellen Entschädigung der betroffenen Menschen sehen die zuständigen Ministerien bis heute allerdings ab: Von den 15 000 Personen, die sich damals in den Testgebieten aufhielten, seien höchstens zwei krebsgefährdet gewesen /19/. Die Beweislast liegt bei den Geschädigten. Und – wie immer bei Strahlenschäden – werden die Menschen den Beweis für den Zusammenhang zwischen Strahlen und Schäden kaum je erbringen können.

Bald zog auch Frankreich in Sachen Kernwaffentests nach: Im Februar 1960 detonierte im Versuchsgelände Reggane in der algerischen Sahara die erste französische Nuklearwaffe. Drei weitere oberirdische und dreizehn unterirdische Testexplosionen mußte die Wüste bis 1966 über sich ergehen lassen. Dann verlegten die Franzosen ihre Bombentests in den Südpazifik. 1963 unterzeichneten nach weltweiten Protesten die USA, UdSSR und Großbritannien ein Abkommen, das ihnen nur noch unterirdische Kernwaffentests gestattete. Frankreich unterschrieb spät und widerwillig: erst 1974. Das südpazifische Moruroa-Atoll, jahrelang von französischen Testbomben erschüttert, ist heute so gut wie „tot". Es besteht aus porösem Basalt und hält dem hohen Druck atomarer Explosionen nicht stand: Bei jedem Test sackt das ganze Atoll um ein bis zwei Zentimeter ab. 1979 kam es zur schweren Panne: Eine Testbombe sollte tief in einem Schacht versenkt werden, detonierte versehentlich zu früh und sprengte eine riesige Höhle in den Schacht. Die Höhle stürzte ein, löste eine Flutwelle aus und die Lagune wurde von plutoniumverseuchtem Wasser überschwemmt. Fischen oder baden darf seitdem niemand mehr. Täglich müssen 6000 Liter Wasser sowie Lebensmittel von Versorgungsschiffen und -flugzeugen herangeschafft werden /20/, um die französische Atomkolonie auf dem Atoll zu versorgen. Auch andere Länder entwickelten Atomwaffenprogramme (siehe Kasten 6). Israel, Pakistan und Südafrika haben zwar noch keine nachweisbaren Testexplosionen durchgeführt, sind aber sehr wohl in der Lage, innerhalb weniger Monate Atombomben zu bauen oder haben sogar solche Waffen in ihren Waffenarsenalen gelagert. Anfang August 1977 entdeckten sowjetische und US-amerikanische Satelliten, daß Südafrika ein Atombomben-Testgelände in der Wüste Kalahari vorbereitet. Unter dem politischen Druck der USA, Frankreichs, Großbritanniens und der Bundesrepublik Deutschland versicherte Premierminister Vorster, Südafrika werde das Testgelände aufgeben und keine Atombomben bauen. Im September 1979 sichtete ein US-Satellit einen Blitz, der von einem südafrikanischen Atombombentest hätte stammen können. Bewiesen werden konnte das jedoch nicht /21/.

Unfälle mit Atomwaffen

Die verschiedensten militärischen Einrichtungen sind mit Kernwaffen bestückt: Munitionsfabriken, Waffenarsenale, Flugzeuge, Schiffe, U-Boote. Die Gefahr eines schwerwiegenden Unfalls ist also nicht nur mutmaßliche Theorie, sondern längst Realität. Die folgenden Beispiele verdeutlichen das.

Am 17. Januar 1966 stießen bei Palomares an der spanischen Ostküste beim Wiederauftanken in zehn Kilometer Höhe zwei Flugzeuge der US-Luftwaffe zusammen. Dabei stürzten drei thermonukleare Waffen auf die Erde und eine ins Meer. Der Aufprall auf Land verursachte bei zwei Bomben die Explosion des konventionellen *) Sprengsatzes. Dabei wurde metallisches Plutonium frei, das sofort verbrannte. Bilanz: 2,3 Quadratkilometer Kulturland wurden radioaktiv verseucht. In der Umgebung des Aufpralls betrug die α-Radioaktivität über 1,18 Megabecquerel pro Quadratmeter /23/.

Am 21. Januar 1968 stürzte ein Flugzeug, Typ B-52, des US-amerikanischen strategischen Luftkommandos auf das Eis in Bylot Sound, elf Kilometer westlich von Thule in Süd-Grönland. Durch den Aufprall detonierten die chemischen Sprengsätze der mitgeführten Atomwaffen, und einige Kilogramm Plu-

*) Jede Atombombe enthält auch einen konventionellen Sprengsatz, der zum Zünden der Kettenreaktion nötig ist.

Kasten 6:

Einige Informationen über Kernwaffentests weltweit /22/

1) Zahl der bekannt gewordenen Kernwaffenversuche bis einschließlich Juni 1988 und 1989

	USA	UdSSR	GB	Frankreich	China	Indien
oberirdisch	193	124	21	45	21	0
unterirdisch	555	354	18	95	8	1

2) Jahr der ersten Testexplosion

	USA	UdSSR	GB	Frankreich	China	Indien
Jahr	1945	1949	1952	1960	1964	1974

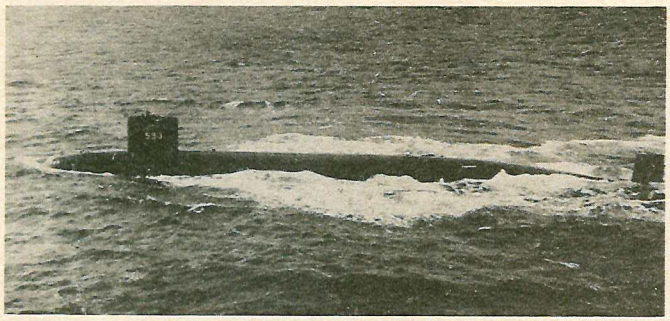
3) Testgebiete im vergangenen Jahrzehnt

USA	Nevada
UdSSR	Semipalatinsk, europäische UdSSR, Ural, Sibirien, Novaja Semlja, Kaspisches Meer, Lenabecken, Jakutien, Yeniseybecken
Großbritannien	Nevada
Frankreich	Tuamotu Archipel, Muroroa
China	Lop Nor

tonium wurden frei. Mit der Zeit hat sich das Plutonium besonders in den Sedimenten und der benthonischen Fauna (d.h. Fauna im Meeresboden) abgelagert. Aarkrog und Mitarbeiter bestimmten auf einigen Expeditionen das Plutoniuminventar. Im August 1979 ließen sich im gesamten Meeressediment folgende Aktivitätswerte /24/ feststellen:

Isotop	Aktivität [TBq]
Pu-239 + Pu-240	1
Pu-238	0,017
Pu-241	2

Am 3. Oktober 1986 ereignete sich an Bord eines sowjetischen atomgetriebenen U-Boots eine Explosion. Dadurch wurden vermutlich ein oder zwei nukleare Sprengköpfe ausgeworfen. Drei Tage später sank das U-Boot im Atlantischen Ozean, etwa 200 Kilometer südöstlich von New York. Mit ihm gingen mindestens 15 Kernwaffen unter, von denen jede einige Kilogramm Plutonium enthielt, und der Kernreaktor, der ein Radioaktivitätsinventar von etwa 10^{19} Becquerel besaß. Beim Aufprall auf dem Meeresboden sind wahrscheinlich sowohl die Waffen als auch der Reaktor beschädigt worden – zumal an der Aufschlagstelle in 5600 Meter Tiefe ein sehr hoher Wasserdruck herrscht /25/.
Eine radioaktive Kontamination hielten offizielle Stellen dennoch für ausgeschlossen.



US Atom-U-Boot „Thresher" am 11. 4. 1963 gesunken. Seit 1945 jede Woche ein gravierender Unfall mit Schiffen oder U-Booten der Marine der Großmächte. Foto: dpa

Atomunfälle auf Hoher See

Schon 1983 wurde die Zahl der atomgetriebenen Schiffe und U-Boote auf weltweit über 350 beziffert /26/; heute dürften es schon 500 sein. Die Gefahren und Risiken durch solche Gefährte sind kaum einzuschätzen: Die Marine läßt praktisch keine Informationen über den Betrieb oder über Unfälle in die Öffentlichkeit dringen. Seegängige Reaktoren werden fast ausschließlich von Militärs entwickelt und kontrolliert. Dennoch wurden von 1954 bis 1983 von einer Untersuchungsgruppe („Center for Investigative Reporting") 126 Zwischenfälle aufgedeckt, von denen über ein Viertel mit dem Reaktor zu tun hatten.
Auch die zivile Schiffahrt wollte sich den Atomantrieb zunutze machen. Die ersten kernbetriebenen Schiffe waren 1962 das US-Schiff „Savannah", gefolgt 1968 von der bundesdeutschen „Otto Hahn" und schließlich 1974 „Mutsu" aus Japan.
Die US-Marine beteuert jedes Jahr vor dem Kongreß, daß nie ein maritimer Reaktor in einen Unfall verwickelt gewesen, daß niemals Radioaktivität mit gravierenden Folgen für Menschen oder Umwelt freigegeben sei. Erklärungen dieser Art werden nun schon seit über 30 Jahren abgegeben – dies entspricht einem Reaktorbetrieb von 2400 Jahren.

Keine versunkenen Schätze – Atom-U-Boote auf dem Meeresgrund /27/:

Name des U-Bootes	gesunken am
USS Thresher	10. 4. 1963
sowj. U-Boot der Golf-Klasse	11. 4. 1968
USS Scorpion	27. 5. 1968
nicht identifiziertes sowj. U-Boot	April/Mai 1970
sowj. U-Boot November-Klasse	12. 4. 1970
sowj. U-Boot der Yankee-Klasse	6. 10. 1986
sowj. U-Boot der Mike-Klasse	7. 4. 1989

● nach einer Studie von Greenpeace und dem Institut für politische Studien (IPS) haben die Marinen der Weltmächte seit 1945 jede Woche einen gravierenden Unfall zu verzeichnen. Die Studie „Schiffs-Unfälle 1945-1988" bietet erstmals einen Überblick über Unfälle auf/mit Schiffen der Marine in Friedenszeiten. Zu beziehen bei Greenpeace Hamburg.

Strahlencrash im All – Satellitenunfälle

In den vergangenen 30 Jahren haben die USA und UdSSR mehr als 60 Raumfahrzeuge mit atomaren Energiequellen an Bord in den Weltraum geschossen. 15 Prozent der Allgefährte wurden in Unfälle verwickelt /28/. Mitunter wurden dabei beträchtliche Mengen an radioaktivem Material frei. So verseuchte zum Beispiel der sowjetische Satellit Kosmos 954 im Januar 1978 einen großen Teil der kanadischen Tundra mit 50 Kilogramm U-235. Und auch Plutonium gelangte bei einem Satellitenunfall in die Umwelt:
Am 21. April 1964 schossen US-Militärs einen Satelliten in den Weltraum. Seine Energie bezog er von einer sogenannten Atombatterie vom Typ SNAP-9A (SNAP steht für „Systems for Nuclear Auxiliary Powergenerator"). SNAP barg etwa ein Kilogramm Pu-238, das entspricht einer Radioaktivität von 630 Terabecquerel. Der Satellit konnte jedoch nicht in eine Erdumlaufbahn gebracht werden und verbrannte über dem Indischen Ozean. Die Atombatterie löste sich in 50 Kilometer Höhe über der Erdoberfläche auf. Zehn Jahre später, Mitte der Siebziger Jahre, waren 95 Prozent des Plutoniuminventars von SNAP-9A auf der Erde angekommen. Der Unfall verseuchte die südliche Hemisphäre stärker mit Pu-238 als alle bisherigen Atombombenversuche zusammen /29/.
Die UdSSR verfügt momentan als einziges Land über Atomreaktoren in Erdumlaufbahnen. Dies wird sich jedoch vermutlich ändern. Denn ab 1993 wollen US-Militärs im Rahmen ihres SDI-Projekts einige kompakte Klein-Reaktoren vom Typ SP-100 ins All schießen – angesichts der ständigen Pannen und Katastrophen in der US-Raumfahrt ein leichtsinniger und für die Weltbevölkerung unzumutbarer Plan.

Plutonium aus kerntechnischen Anlagen

Plutonium gelangt aus vielen Atomanlagen in die Umgebung. Der Mammutanteil stammt aus Wiederaufarbeitungsanlagen. Nachdem 1963 die Kernwaffenstaaten ihre oberirdischen Atombombentests weitgehend eingestellt hatten, verzeichneten Statistiken weltweit eine allmähliche Abnahme der radioaktiven Isotope in der Umwelt. Nur kurze Zeit allerdings. Ab 1969 beispielsweise registrierten die Meßgeräte erneut ein Ansteigen der Konzentration von Radionukliden in der Nordsee. Deren Quelle: Die Abwässer der französischen Wiederaufbereitungsanlage in La Hague, unweit von Cherbourg, und der britischen WAAs bei Sellafield (früher: Windscale) an der Irischen See und bei Dounreay am Schottischen Nordkap. Im April 1977

betrug die Aktivitätskonzentration von Pu-239 und Pu-240 im Nordseewasser der entsprechenden Gebiete etwa 75 Mikrobecquerel pro Liter /30/. In der Nähe der japanischen Wiederaufbereitungsanlage Tokai-Mura maßen Experten ähnliche Werte. Dort werden die flüssigen Abfälle mit „geringer" Radioaktivität rund 1,8 Kilometer vor der Küste in etwa 18 Metern Tiefe in den pazifischen Ozean abgelassen /31/.
Mögliche Unfälle in der geplanten Wiederaufarbeitungsanlage Wackersdorf und daraus resultierende Freisetzungen von Plutonium waren bereits Thema der letzten Ausgabe dieser Zeitschriftenreihe (RESTRISIKO Nr. 3/4).

Plutonium auf Achse

Wo immer in der Welt Kernkraftwerke und Wiederaufarbeitungsanlagen stehen (siehe Tab. 2), wird auch plutoniumhaltiges Material an- und abtransportiert. Schwere Transportunfälle lassen sich nicht ausschließen (über Ablauf und Auswirkung darüber siehe RESTRISIKO Nr. 1.). Besonders problematisch ist der Transport von Plutoniumnitrat (PuN). Da es als Flüssigkeit vorliegt, kann es sich bei einer eventuellen Freisetzung besonders weit verbreiten. In den USA ist deshalb seit 1978 der Transport von PuN mit einer Aktivität von mehr als $7{,}4^{0} \cdot 10^{11}$ Becquerel (20 Curie) untersagt. In der Bundesrepublik Deutschland hingegen wird seit vielen Jahren PuN von der Wiederaufbereitungsanlage Karlsruhe nach Hanau transportiert. Auch Wackersdorf wäre mit in das Transportnetz einbezogen worden (siehe auch RESTRISIKO Nr. 1).

Tab. 2: In Betrieb befindliche Wiederaufarbeitungsanlagen und ihre potentiellen Verarbeitungskapazitäten (Durchsätze) in Tonnen Schwermetall pro Jahr (t SM/a) /32/.

Staat	Ort	Durchsatz [t SM/a]
Frankreich	La Hague	400
	Marcoule	400
BR Deutschland	Karlsruhe	40
Indien	Kalpakkam	125
	Tarapur	100
	Trombay	30
Japan	Tokai-Mura	210
Großbritannien	Dounreay	8
	Sellafield	1000
USA	Idaho Falls	
	Rockwell Hanford	2400
	Savannah River	2700

Über Wiederaufbereitungsanlagen in der UdSSR sind keine Informationen zugänglich.

Plutonium – lohnende Beute für Terroristen?

Das US-Verteidigungsministerium hält die Sicherheitsvorkehrungen beim Transport von Plutonium und hochangereichertem Uran zu den Wiederaufbereitungsanlagen in Sellafield und La Hague für unzureichend /33/. Daß Terroristen den brisanten Stoff zu erpresserischen Zwecken in ihre Hände bringen könnten, erscheint den amerikanischen Sicherheitsexperten zumindest möglich. Potentielle Plutoniumdiebe brauchten nicht einmal eine funktionsfähige Atombombe zu bauen. Denn auch das Risiko, daß Hunderttausende von Menschen plutoniumverseucht sterben müßten, wird kein Staat der Welt auf sich nehmen wollen. Der zunehmende Plutonium-Umlauf macht auch einen Plutonium-Bluff, ohne daß die Erpresser sich den Höllenstoff tatsächlich verschafft haben, immer wahrscheinlicher. Bei einem Jahresdurchsatz von 350 Tonnen, wie er zum Beispiel in der WAA Wackersdorf geplant war, läßt sich eine Spaltstoffbilanz bestenfalls auf mehrere zehn Kilogramm genau aufstellen (siehe RESTRISIKO Nr. 2). Und die Mengen unterhalb dieser Genauigkeitsschwelle reichen zum Bau eines halben Dutzends Atombomben. Staaten mit atomaren Beschaffungsproblemen könnten sich auf dunklen Wegen fehlende Bombenrohstoffe besorgen. Durch die wachsende Zahl kerntechnischer Anlagen nehmen auch die potentiellen Ziele von Terrorgruppen zu. Schon mehrmals wurden in den letzten Jahren solche düsteren Prognosen Ernstfall /34/:
Am 25. März 1973 überfielen Terroristen des argentinischen Revolutionären Volksheeres (ERP) den Bauplatz des Atomkraftwerks Atucha, rund hundert Kilometer nördlich von Buenos Aires. Sie warfen Rauchbomben, überwältigten die Wachen, hißten die ERP-Flagge und sprühten revolutionäre Parolen an die Wände. Sie wagten sich jedoch weder in den Reaktorbereich noch zerstörten sie Teile des Atomkraftwerks.
Am 15. August 1975 ereigneten sich zwei Explosionen im Kernkraftwerk Mt. d'Arrée in Brennilis, Frankreich. Der Reaktor wurde nicht beschädigt, keine Radioaktivität freigesetzt. Für den Anschlag wurde eine bretonische Separatistengruppe verantwortlich gemacht.
Am 3. Juni 1977 bombardierte die baskische Separatistenorganisation ETA den Bauplatz eines Atomkraftwerks bei Lemoniz in der Nähe der nordspanischen Stadt Bilbao. Der Anschlag richtete jedoch keinen Schaden an. Ein erneuter Angriff dieser Terrorgruppe vier Monate später beschädigte verschiedene Gebäudeteile. Am 18. Dezember 1977 griff die ETA das im Bau befindliche Kernkraftwerk bei Lemoniz mit der Absicht an, die Reaktoren zu sprengen.
Am 17. März 1978 zündeten ETA-Mitglieder einen Sprengsatz im Dampferzeuger der Anlage bei Lemoniz. Zwei Arbeiter starben. Da der Reaktor noch nicht mit Brennstoff beladen war, wurden keine radioaktiven Stoffe freigesetzt. Der Schaden belief sich auf sechs Millionen Dollar.
Am 13. Juni 1979 ließen ETA-Mitglieder eine Bobmbe im Turbinenraum des Atomkraftwerks bei Lemoniz detonieren. Ein Arbeiter starb und 5000 Liter Öl fingen Feuer.
Am 20. Dezember 1982 detonierten vier Bomben im südafrikanischen Atomkraftwerk Koeberg bei Kapstadt. Einer der beiden Reaktoren wurde beschädigt. Die Verantwortung übernahm die Befreiungsbewegung ANC.

Plutonium in der Medizin

Das Isotop Pu-238 dient noch heute als Energiequelle in Herzschrittmachern. Seit 1977 haben bundesdeutsche Chirurgen jedoch keinem Patienten mehr Pu-Schrittmacher implantiert. Denn längst haben Forscher konventionelle Batterien mit einer vergleichbaren Betriebsdauer entwickelt. Ende 1985 lebten in der BRD 89 Menschen mit Plutonium in ihren Körpern. 195 Patienten waren die Pu-haltigen Herzschrittmacher bis dahin bereits wieder herausoperiert worden /35/. Deren Strahlenbelastung zeigt Tab. 3.
Alle Im- und Explantationen müssen beim Bundesgesundheitsamt schriftlich gemeldet werden. Das macht eine „ordnungsgemäße" Entsorgung der radioaktiven Abfälle zumindest möglich.

Tab. 3: Übersicht über die Strahlenbelastung durch Herzschrittmacher mit Pu-238 in Abhängigkeit von Bestrahlungsort und -dauer /36/.

Bestrahlungsort	Gesamtstrahlenexposition [rem] nach 1	nach 3	nach 5 Jahren
Dosis an der „heißesten" Stelle	50	160	270
Dosis 10 cm von der „heißesten" Stelle entfernt	0,3	1	1,6
Dosis gemittelt über die ganze Oberfläche	10	30	50

WENN PLUTONIUM IN DIE UMWELT GELANGT

V.

Der Weg des Plutoniums über die Nahrungskette

Aus den Kaminen und Abflußrohren der Atomanlagen quellen Tag für Tag die verschiedensten Radionuklide. Einmal freigesetzt, werden sie ein Teil der Ökosphäre und damit eines komplexen und dicht gewebten Netzes von Beziehungen und Wechselwirkungen zwischen belebter und unbelebter Natur. Wir wollen betrachten, was Plutonium in der Biosphäre für den Menschen als Endglied der Nahrungskette bedeutet. Auf die Belastung aller anderen Lebewesen und mögliche schädliche Einflüsse auf Ökosysteme gehen wir dabei – aus Platzgründen – nicht ein.

Plutonium ist ein Element mit sehr komplizierten und unübersichtlichen chemischen Eigenschaften. Es kann in einer Vielzahl von Verbindungen und Formen auftreten, abhängig von der Plutonium„quelle" und den „Umwelt"bedingungen (siehe Kasten 7).

Die komplexe Chemie des Plutoniums macht eine genaue Vorhersage über sein Aussehen im konkreten Fall unmöglich. Die chemisch-physikalische Form ist jedoch entscheidend für das Verhalten und die biologische Verfügbarkeit von Plutonium im Boden oder im Menschen, d.h. z.B. dafür, wie leicht es in den Körper aufgenommen werden kann. Genaue Vorhersagen sind auch hier unmöglich. Es scheint fraglich, ob die Forschung hier in absehbarer Zeit zu grundlegend neuen Ergebnissen kommen wird. Sicherlich kann man immer wieder neue Untersuchungen durchführen. Die Komplexität des Zusammenspiels in Ökosystemen setzt dem Forschen jedoch enge Grenzen. Deshalb sollten Aussagen, daß „wohl kein anderes Element so intensiv untersucht wurde und deshalb eine Menge über seine Physik, Chemie und Biologie bekannt ist", nicht überbewertet werden (zitiert aus dem 1982 erschienenen renommierten Radioökologie-Lehrbuch von Whicker und Schultz /39/). Nicht zuletzt die Auswirkungen von Tschernobyl haben gezeigt, daß „die Natur" noch immer gut ist für Überraschungen.

Kasten 7:

Wichtige Plutonium-Verbindungen, die in der Umwelt vorkommen können /40/:

- Oxide
- Mischoxide: Pu-Uran; Pu-Kalium; Pu-Natrium
- Carbonate
- Nitrate
- Nitride (Verbindungen allein mit Stickstoff)
- Tributylphosphat–Komplexe
- lösliche Komplexe mit organischen Stoffen wie z.B. Zitronensäure, Milchsäure, Huminsäuren, Proteinen und Aminosäuren
- unlösliche Formen, z.B. in Wasser aufgeschwemmt

Plutoniumprobleme – einige Beispiele /40; 41/:

Einige Plutoniumverbindungen, Nitrate oder Chloride etwa, sind zwar prinzipiell wasserlöslich, jedoch nur in stark sauren Lösungen mit einem pH-Wert unter 2, also nicht unter Umweltbedingungen. In schwächer saurem oder neutralem Milieu reagieren solche Pu-Verbindungen hingegen zunehmend mit Wassermolekülen (Hydrolyse) und bilden größere Teilchenzusammenschlüsse (Polymere oder Kolloide). Und die sind schwer löslich und lagern sich leicht an Oberflächen ab.

● Plutonium reagiert jedoch nicht nur mit Wasser, sondern auch mit den unterschiedlichsten organischen Molekülen. Diese organischen Substanzen heißen Komplexbildner, und bei solchen Reaktionen entstehen lösliche Komplexverbindungen. Der in der Wiederaufarbeitungs-Chemie wohl bekannteste Komplexbildner ist Tributylphosphat (TBP), mit dessen Hilfe Uran und Plutonium aus der wäßrigen salpetersauren Lösung (siehe RESTRISIKO Nr. 3/4) extrahiert werden. Auch unsere tägliche Umwelt ist voller Stoffe, die zusammen mit Plutonium komplexe Verbindungen bilden können. Das sind Stoffe wie Zitronensäure, Milchsäure, Essigsäure oder Proteine – also Verbindungen, die im Stoffwechsel von Lebewesen eine wichtige Rolle spielen. Es gibt sie deshalb überall dort, wo es Leben gibt.

● Der Strahlenschutz in der Industrie befaßt sich überwiegend mit Plutoniumoxiden, einer ganzen Palette von Stoffen also, die häufig pauschal als „unlöslich" und damit „biologisch nicht verfügbar" etikettiert werden. Abgesehen davon, daß sie nicht unlöslich, sondern lediglich schwer löslich sind, trifft diese Charakterisierung eigentlich nur auf reines Plutoniumdioxid (PuO_2) zu, das bei hohen Temperaturen hergestellt wird. Alle anderen Oxide können sich, je nach Zusammensetzung und Bildungstemperatur, anders verhalten.

Ob Plutoniumoxid löslich ist oder nicht, hängt wesentlich von der Größe seiner Teilchen ab. Während beispielsweise Oxid-Partikel mit einem Durchmesser von mehr als 0,1 Mikrometer (μm) schlecht in biologischem Milieu löslich sind, können sehr kleine Teilchen (Durchmesser etwa ein Nanometer (1 nm)) durchaus von organischen Molekülen gelöst werden. Solche Mini-Partikel können z.B. bei einem Natriumbrand (Unfall im Schnellen Brüter) entstehen. Plutoniumoxid tritt zudem bei der Wiederaufarbeitung häufig in Mischungen mit anderen Metall-Oxiden auf, z.B. mit Uranoxid. Die anderen Bestandteile solcher Mischoxide sind im allgemeinen besser löslich als PuO_2 selbst. In biologischen Medien lösen sie sich dann rascher auf und können Mini-PuO_2-Teilchen freilegen.

● Unterschiede im Verhalten der einzelnen Pu-Isotope beruhen vermutlich auch auf den unterschiedlichen Halbwertszeiten und damit auf ihrer unterschiedlichen Aktivität pro Masseneinheit (spezifische Aktivität, vergl. vordere Umschlaginnenseite). In einem Gramm Pu-238 finden z.B. $6{,}3 \cdot 10^{11}$ Zerfälle pro Sekunde statt; bei Pu-239 sind es nur $2{,}3 \cdot 10^{9}$ Zerfälle, also 275mal weniger. Allerdings widersprechen sich da die Versuchsergebnisse: Einerseits konstatierten die Forscher eine zunehmende biologische Verfügbarkeit mit zunehmender spezifischer Aktivität, also geringerer Halbwertszeit. So nehmen Pflanzen beispielsweise mehr Pu-237 und Pu-238 als Pu-239 auf /42/. Und Inhalationsexperimente bei Tieren zeigten eine etwa 200fache größere Löslichkeit von Pu-238-Oxid, verglichen mit Pu-239 /43/. Vermutlich spielen hier radiolytische Vorgänge eine Rolle: Größere Partikel „zerstrahlen" sich sozusagen selbst: Es entstehen viele kleine (und damit besser lösliche) Teilchen. Bei anderen radioaktiven Stoffen hingegen, so berichten die Protokolle von Experimenten, nimmt die biologische Verfügbarkeit mit abnehmender spezifischer Aktivität zu (Resorption von Neptunium; Übergang von Technetium aus dem

Futter in Ziegenfleisch und -milch) /44/. Befriedigende Deutungen stehen noch aus.
Über das Verhalten von Americum und Curium in der Umwelt ist nur wenig bekannt. Allerdings haben sie eine einfachere Chemie, und ihr Verhalten ist – wie auch das von Neptunium – weitgehend unabhängig von ihrer ursprünglichen physikalisch-chemischen Form. Ihre Oxide sind besser löslich als Pu-Oxid, Hydrolyse- und Komplexreaktionen verlaufen ähnlich wie beim Plutonium. Neptunium hingegen verhält sich unter biologischen Bedingungen eher wie ein Erdalkalimetall, wie Calcium oder Strontium etwa. Aus diesem Grund ist es viel mobiler, löslicher und damit biologisch verfügbarer als Plutonium, Americium oder Curium.

Wenn Plutonium die Nahrungskette infiziert

Routinemäßig blasen WAA-Schlote Plutonium in die Luft. Auch bei Stör- und Unfällen wird der Stoff freigesetzt. Jetzt kann er auf verschiedenen Wegen zum Menschen gelangen. Der kurzfristig kritischste Belastungspfad ist das Einatmen, die Inhalation. „Kurzfristig" meint in diesem Zusammenhang jenen Zeitraum, in dem Plutonium in der Atemluft vorhanden ist, also z.B. während der gesamten Betriebsdauer der WAA. Mittel- und vor allem langfristig spielen die Belastung von Boden und Nahrungsmitteln die größte Rolle. Plutonium-Partikel lagern sich auf dem Erdboden oder an Pflanzen ab (Fallout) oder werden durch Regen und Schnee ausgewaschen (Washout). Bereits am Boden abgelagerte Teilchen können wieder aufgewirbelt werden und erneut in die Atemluft gelangen oder Pflanzen äußerlich verschmutzen (Resuspension; vergl. RESTRISIKO Nr. 3/4). Über die Pflanzen gelangt das Plutonium zu den Tieren, deren Fleisch und Produkte uns Menschen als Nahrung dienen. Über Ausscheidungen, welke Pflanzenteile oder tote Tiere kann das langlebige Plutonium immer wieder in die Stoffkreisläufe der Natur eintreten.
In diesem RESTRISIKO wollen wir in erster Linie die atmosphärischen Ableitungen untersuchen. In einer späteren RESTRISIKO-Ausgabe werden wir uns dann ausführlich mit den Auswirkungen der flüssigen radioaktiven Ableitungen beschäftigen.

Wenn Plutonium auf den Blättern klebt

Auf die Pflanzenoberflächen gelangen Pu-haltiger Staub oder Pu-Partikel durch direkte Ablagerung auf Blätter, Blüten oder Früchte oder durch Resuspension. Dieser Weg belastet pflanzliche Nahrungs- oder Futtermittel zehn- bis hundertmal mehr mit Plutonium als die reine Wurzelaufnahme. Um die möglichen Folgen abschätzen zu können, muß man natürlich Annahmen darüber treffen, in welchem Ausmaß diese Vorgänge stattfinden. Bereits in früheren RESTRISIKO-Ausgaben haben wir darauf hingewiesen, wie wenig die Experten heute immer noch solche Ablagerungsprozesse verstehen. Genaue Vorhersagen sind daher so gut wie unmöglich.
Das Ausmaß des radioaktiven Fallouts ist u.a. von der Größe der Teilchen abhängig. So wurde in der Umgebung der WAA Karlsruhe (WAK) eine 15mal höhere Ablagerungsgeschwindigkeit von Pu-Aerosolen gefunden, als es amtliche Berechnungsvorschriften erlauben:

- Allgemeine Berechnungsgrundlage des Bundesinnenministeriums (BMI) (1979): 0,1 Zentimeter pro Sekunde /45/.

- Umgebung der WAK (1981): im Mittel 1,5 Zentimeter pro Sekunde. Die Einzeldaten streuen über mehr als eine Größenordnung /46/.

Eine mögliche Erklärung für diese erhebliche Abweichung: In der Umgebungsluft der WAK schweben größere Teilchen, an die sich die feinen Pu-Aerosole anlagern. Deshalb lagern sie sich rascher am Boden oder auf Pflanzen ab. Diese größeren Trägeraerosole sind offenbar sowohl in der näheren als auch in der weiteren Umgebung der WAK vorhanden: Zum einen stammen sie aus der Verbrennungsanlage für radioaktive Abfälle, zum anderen aus den Kaminen von Industrieanlagen und einem nahegelegenen Kohlekraftwerk. „Die starke industrielle Verschmutzung der Umgebungsluft (kann) durchaus Ursache für eine massive Erhöhung der Ablagerungsgeschwindigkeit sein." /47/.
Solche peinlichen Erkenntnisse mochten die Verantwortlichen bei ihrer Abschätzung der zu erwartenden Umgebungsbelastung durch die geplante WAA Wackersdorf nicht berücksichtigen, obwohl die Anlage – wenn sie in Betrieb gegangen wäre – zum republikweit größten Plutoniumemittenten geworden wäre. Die Betreiber beriefen sich in ihren diversen Sicherheitsberichten unverdrossen weiter auf den unveränderten amtlichen Wert von 0,1 Zentimeter pro Sekunde. Und die Gutachter des bayerischen Umweltministeriums haben ihren Berechnungen eine lediglich anderthalbmal (!) höhere Ablagerungsgeschwindigkeit von 0,15 Zentimeter pro Sekunde zugrundegelegt /48/.
Unterschiedliche Vegetationsformen beeinflussen ebenfalls das Ausmaß der Belastung. Auf großen, dünnen und behaarten Blättern bleiben Teilchen länger und fester haften. Regengüsse waschen weniger Aktivität von den Blättern, die Pflanze kann mehr strahlende Stoffe aufnehmen. Proben aus dem Südschwarzwald zeigten beispielsweise im Huflattich einen zehnmal höheren Pu-Gehalt als in Brunnenkresse oder Gras /46/. Moose und Flechten waren jedoch noch weit höher belastet (4 – 17mal mehr als Huflattich). Sie reichern Plutonium in hohem Maße an. Auch Bäume „filtern" Schadstoffe wirkungsvoller als viele andere Pflanzen aus der Luft – die Bodenbelastung steigt dadurch. So sind in Südbayern Weide- und Ackerböden durch Atombombenfallout pro Quadratmeter mit durchschnittlich 49 Becquerel Pu-239 und Pu-240 verseucht; Waldboden ist dagegen mit 64 Becquerel pro Quadratmeter, also etwa um 30 Prozent mehr belastet /49/.
Das Verhalten von Radionukliden aus Bombenfallout ist nur ein Weg, der den Radioökologen Auskunft über die Verseuchung der Umwelt gibt. Einen zweiten Erkenntnispfad bilden gezielte Experimente, bei denen Forscher Radionuklide in die Erde mischen oder direkt an Tiere verfüttern, und nicht zuletzt – wie wir am Beispiel des Kernforschungszentrums Karlsruhe gesehen haben – das Studium der radioaktiven Abgaben aus Atomanlagen.
Für das Studium von Plutonium bieten Wiederaufarbeitungsanlagen – zynisch genug – den Radioökologen besondere Möglichkeiten. Sie setzen bereits im Normalbetrieb derartig hohe Aktivitäten frei, daß „Freilandversuche" möglich werden. In Savannah River Plant (SRP) beispielsweise, einem großen, seit 1954 bestehenden militärischen Nuklearkomplex im Südosten der USA, stellten sich Forscher die Frage: Was passiert, wenn eine Weltraumsonde beim Start in Cape Canaveral explodiert und sich das Pu-238 aus ihrer thermoelektrischen Isotopenbatterie über Floridas Orangenhainen verteilt? Kein Experiment leichter als dies: Die Forscher stellten ein paar Orangenbäumchen in Kübeln als eine Art simulierte Plantage auf – und zwar etwa 200 Meter entfernt vom 62 Meter hohen Schornstein einer der beiden Wiederaufarbeitungsanlagen in Savannah River Plant. Und das dreimal, jeweils sechs Wochen. Anschließend analysierten sie die Blätter und Früchte. Überraschendes Ergebnis: Apfelsinen halten (möglicherweise wegen ihrer dicken Wachsschale) einmal abgelagertes Plutonium viel besser fest als

Bewohner der Insel Rongelap im Pazifik. Sie mußten ihre Heimat verlassen, weil sie durch den Fallout amerikanischer Atomtests zu sehr radioaktiv verseucht war. Das Greenpeace-Schiff „Rainbow Warrior" half ihnen im Mai 1985 bei der Umsiedlung auf die Insel Mejato. Foto: Greenpeace/Pereira

andere untersuchte Pflanzen und Früchte. Es ließ sich auch praktisch nicht abwaschen. Die Experten rechneten aus, daß etwa ein Prozent des pro Quadratmeter abgelagerten Pu-238 mit den Früchten geerntet würde. In den drei „Vegetationsperioden" zeigten sich allerdings erhebliche Unterschiede. Und die konnte niemand erklären. /50/.

Durch die Wurzeln ins Innere der Pflanze

Im Erdboden bindet sich Plutonium meist noch stärker als Cäsium an Mineralteilchen. Seine geringe Löslichkeit hat zwei wesentliche Konsequenzen: Zum einen nehmen die Pflanzenwurzeln den Stoff nur in geringem Maße – meist Bruchteile von Prozenten – auf. Zum anderen können Sickerwässer das Plutonium nur sehr langsam (mit einer Geschwindigkeit von etwa 0,1 bis 1 Zentimeter pro Jahr) in tiefere Bodenschichten transportieren /51/. Plutonium reichert sich langfristig in der Wurzelzone an. Ein Plutonium-Reservoir für Jahrzehnte und Jahrhunderte entsteht. Zum Vergleich: Die Wanderungsgeschwindigkeiten von Cäsium-137 im Boden liegen in der gleichen Größenordnung. Nach 300 Jahren ist die Aktivität von Cs-137 jedoch bis auf ein Tausendstel abgeklungen, während von der Pu-239-Aktivität noch mehr als 99 Prozent vorhanden sind! Langfristig kommt diesem Belastungspfad also allergrößte Bedeutung zu.

Wie die Pflanzen Plutonium aufnehmen, weiß heute niemand so genau. Möglicherweise wird das im Boden fest gebundene Plutonium durch komplexierende Stoffe wie Zitronensäure oder andere Komplexbildner gelöst, die von den Wurzeln selbst oder von Mikroorganismen abgeschieden werden. Generell gilt, daß sich die Aufnahme von Radionukliden (oder chemisch-toxischen Schwermetallen) aus dem Boden über die Wurzeln in Pflanzen nur schwer quantifizieren läßt. Denn allzuviele Faktoren beeinflussen diesen Prozeß. Am wichtigsten sind hier die Eigenschaften des Bodens, der einzelnen Pflanzen und das untersuchte Pflanzenorgan; weiterhin spielen Wetterbedingungen, Anbauverhältnisse, Jahreszeit und die Versuchsbedingungen eine Rolle. Kein Wunder also, daß die in der Literatur angegebenen Transferfaktoren, die den Übergang Boden-Pflanze beschreiben, über große Bereiche schwanken.

In den vergangenen dreißig Jahren wurden immer wieder Untersuchungsergebnisse zum Pu-Transfer veröffentlicht. Die meisten dieser Ergebnisse stammen jedoch aus trockenen Gebieten der USA, zum Beispiel dem Atombombentestgelände in Nevada. Sie lassen sich daher kaum auf bundesdeutsche Verhältnisse übertragen. Eine Reihe von Untersuchungen, meist „mit Hilfe" des Atombombenfallouts, wurde auch in Europa durchgeführt (z.B. in England und Skandinavien, wenige in der Bundesrepublik (siehe z.B. /52; 53/)). Gezielte Untersuchungen des reinen Wurzeltransfers sind aus mehreren Gründen sehr schwierig: Nur mit ausgeklügelten Versuchsanordnungen läßt sich verhindern, daß die Pflanzen nicht durch atmosphärische Ablagerungen oder resuspendierte Partikel verschmutzt werden. Wegen der geringen Transferraten muß eine große Nuklidaktivität in den Boden gemischt werden; die Analytik ist sehr aufwendig (vergl. Kap. 7).

In der Bundesrepublik führen nur die Wissenschaftler im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) solche komplizierten Versuche in einem extra konstruierten Gewächshaus durch, und zwar mit Neptunium-237 (Np-237), Plutonium 238 (Pu-238), Americium (AM-241) und Curium-244 (Cm-244). Erstmals 1983 untersuchten die Karlsruher Experten verschiedene

Nutzpflanzen und Böden. In den Jahresberichten der „Hauptabteilung Sicherheit" 1983 – 1986 sind die Ergebnisse teilweise dokumentiert; eine ausführliche Darstellung findet sich in /54/. Sehr aufschlußreich ist die Auswahl der Böden. Sie entlarvt das Ziel der Versuche, Daten für die geplante WAA zu gewinnen: Von Anfang an wurden drei verschiedene Böden aus dem Raum Schwandorf (!) untersucht, nämlich eine Braunerde aus Kreideverwitterung, eine Braunerde aus Granitverwitterung (beides gute Böden für den Anbau von Kulturpflanzen) und ein Gleyboden für die Dauerweidennutzung. Angebaut wurden Mais, Weizen und Kartoffeln, auf dem Gleyboden nur Gras. Bei weiteren Versuchen wuchsen auch verschiedene Gemüsesorten in Sandböden. Solche Experimente sind jedoch die Ausnahme geblieben. Das ist besonders bedauerlich, zumal bekannt ist, daß viele Pflanzen auf sandigen, nährstoffarmen Böden mehr Radionuklide aufnehmen als aus schwerer, reicher Erde.

Der Transfer von Plutonium wird, zumindest nach den Ergebnissen aus Karlsruhe, durch den „amtlichen" Wert von $2{,}5 \cdot 10^{-4}$ der „Allgemeinen Berechnungsgrundlage" zutreffend beschrieben. Das bedeutet: Im Mittel enthält ein Kilogramm Pflanzenfrischmasse etwa 0,025 Prozent der Plutoniumaktivität von ein Kilogramm Erdboden (Trockengewicht). Die Schwankungen sind allerdings enorm: Selbst bei der Aufzucht gleicher Pflanzen auf gleichen Böden unter identischen Versuchsbedingungen kann der Transferfaktor um zwei Größenordnungen und mehr nach oben oder unten abweichen! Wie Tabelle 4 zeigt, ist der Transfer in Kartoffeln und Getreidekörner am geringsten. Werte, die mit Vorsicht zu genießen sind: Im Experiment wurden nämlich gekochte und geschälte Knollen gemessen – Plutonium lagerte sich jedoch überwiegend (zu 98 Prozent) in der Schale ab. Der geringe Transfer in Weizenkörner spiegelt wider, daß bei allen Pflanzen die Samen die geringsten Transurankonzentrationen enthalten. Gras und Mais nehmen offenbar mehr Plutonium auf; hier wurden die ganzen Pflanzen gemessen. Die Transferfaktoren für andere Pflanzen sind in der Tabelle nicht enthalten. Die Karslruher Untersuchungen ermittelten für Blattgemüse wie Spinat und Wurzelgemüse wie Möhren erheblich höhere Transferraten! Fazit: Die Transferfaktoren für verschiedene Pflanzenarten, ja selbst für unterschiedliche Sorten derselben Art, weichen extrem voneinander ab.

Auch die Bodenart spielt oft eine große Rolle: So fanden Experten aus Karlsruhe und Schweden für einige Pflanzen (wie Weizen, Mais und Gras in den Karlsruher, Klee in schwedischen Untersuchungen) auf saurerem Boden erhöhte Transferwerte. Bezüglich anderer Aktinide sind wissenschaftliche Erkenntnisse weit spärlicher. Nach den Karlsruher Untersuchungen sind Americium und Curium nur etwa zwei- bis dreimal „besser" (also in der gleichen Größenordnung wie Plutonium) pflanzenverfügbar. In krassem Gegensatz dazu stehen allerdings neuere US-Ergebnisse, denen zufolge Pflanzen Curium (Cm-244) um eine bis zwei Größenordnungen stärker aufnehmen als Plutonium /55/. Für Neptunium gilt Ähnliches: Aufgrund der vergleichsweise hohen Löslichkeit wird es durchschnittlich etwa 100mal stärker als Plutonium aufgenommen /54/.

Nach Tschernobyl: 500 Tonnen radioaktiv belastetes Milchpulver aus Österreich sollen nach Venezuela geschafft werden. In einer beigefügten Bescheinigung heißt es, „... daß dieses Milchpuler als für den menschlichen Genuß geeignet und nicht als gesundheitsschädigend gilt." Foto: dpa/Wagner

Tab. 4: Transferfaktoren Boden-Pflanze für Plutonium-238 auf Böden aus der Schwandorfer Gegend: niedrigste und höchste Werte sowie Mittelwerte von vier Vegatationsperioden (aus / 56 /)

Transferfaktor Boden – Pflanze =	Bq/kg Pflanzenfrischgewicht / Bq/Kg Trockenboden	
Pflanze	Boden	Transferfaktor
Weizen (Korn)	Kreide	8,5 E-7 bis 6 E-5 Mittel: 1,7 E-5
	Granit	8,5 E-7 bis 8,5 E-4 Mittel: 2,5 E-6
Kartoffeln (Knolle)	Kreide	2,2 E-6 bis 2,2 E-4 Mittel: 8,4 E-5
	Granit	2,2 E-6 bis 4,4 E-4 Mittel: 9,5 E-5
Mais (ganze Pflanze)	Kreide	3 E-6 bis 6 E-4 Mittel: 4,8 E-5
	Granit	9 E-6 bis 6 E-3 Mittel: 3,6 E-4
Gras	Gley	1,2 E-5 bis 1,2 E-4 Mittel: 5 E-5

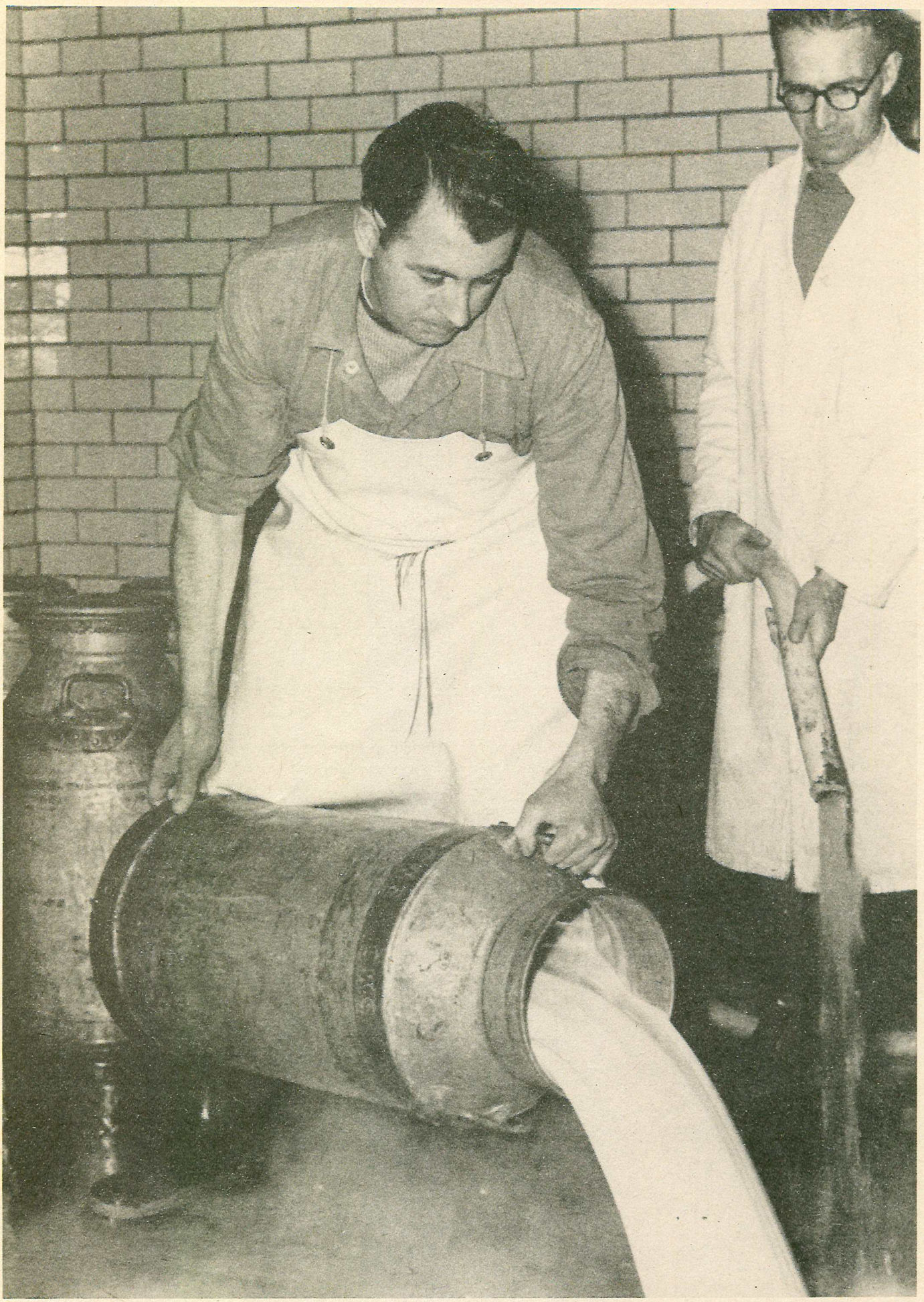
Anmerkungen: Die Transferfaktoren wurden auf Pflanzenfrischgewicht umgerechnet. Dabei wurden folgende Trokkenmassen angenommen: Gras 20%; Mais 30%; Weizen 85%; Kartoffeln 22%.
Ausführungen zu den Böden finden Sie auf Seite 18.

Langzeitverhalten von Plutonium

Wegen seiner langen Halbwertszeit ist eine Frage besonders wichtig: Wie verhält sich Plutonium im Boden auf lange Sicht? Und wie sich die Pflanzenverfügbarkeit im Lauf der Jahrzehnte verändert, ob sie zunimmt oder sinkt – das läßt sich durch Transferuntersuchungen nur wenig klären. Denn die meisten Versuche laufen nur über kurze Zeit und unter möglichst standardisierten Bedingungen.
„Langzeit"versuche, auch wenn sie ein paar Jahre dauern, bringen kaum Klarheit. In manchen Untersuchungen ließ sich im Lauf der Zeit eine sinkende Pflanzenverfügbarkeit von Plutonium beobachten. Erklären könne man dies – so die Forscher – mit der Umwandlung und Festlegung des Plutoniums im Boden in zunehmend weniger lösliche Verbindungen: eine Art Alterungseffekt. US-Forscher fanden hingegen in den meisten Pflanzen, die sie auf langjährig radioaktiv verseuchtem Schwemmland anbauten, im Lauf von vier Vegetationsperioden steigende Plutoniumkonzentrationen. /55/. Plutonium – das ist auf Anhieb plausibel – muß nicht irreversibel im Boden fixiert sein. Und man kann vermuten, daß beispielsweise Bodenlebewesen Plutoniumverbindungen umbauen und so dessen Verfügbarkeit langfristig erhöhen. Genaues kann man darüber allerdings heute noch nicht sagen. Biologisch mobilere Plutonium-Verbindungen, wie die bereits erwähnten Komplexe mit Zitronensäure oder Huminsäuren, sind bislang kaum untersucht. Allerdings konnte schon 1976 gezeigt werden, daß der weitverbreitete Bodenpilz „Aspergillus niger" Zitronensäure produziert. Seine Sporen nehmen schwerlösliche Pu-Oxid-Partikel auf und wandeln sie in lösliches Pu-Zitrat um /57/.
Die Tätigkeit anderer Bodenorganismen könnte ebenfalls von Einfluß sein. Regenwürmer beispielsweise bauen schwerlösliche Verbindungen von chemisch-toxischen Schwermetallen wie Kobalt, Nickel, Blei und besonders Cadmium zu pflanzenverfügbareren Verbindungen um /58/.
Weiterhin ist zu vermuten, daß auch die Anbauweise eine Rolle spielt: Ausbringen von Dünger, Anbau von Vorfrüchten und so weiter. Weitere Faktoren sind eine gute Bodendurchwurzelung und vielfältige Mikrobentätigkeit, die einen gesunden, gewachsenen Boden kennzeichnen. Für den Transfer von Cäsium-137 konnte ein Einfluß der Anbaumethode inzwischen nachgewiesen werden: Noch drei Jahre nach Tschernobyl findet nämlich die Meßstelle der Universität Oldenburg in Bio-Milch und in biologisch angebauten Weizen Aktivitäten, die für diese norddeutsche Region recht hoch sind (z.B. Ende Januar 1989 in einem Demeter-Weizen 46 Becquerel Cäsium pro Kilogramm Korn). Erklären läßt sich das vielleicht damit, daß der Demeter-Anbau keinen Kalidünger einsetzt, sondern das Kalium des Bodens durch eine Vorfrucht – gut bewährt ist Klee – aufgeschlossen wird. Dadurch wird dann auch das chemisch ähnlich Radiocäsium für die Pflanzen verfügbar /59/. Auch bei Plutonium sind ähnliche Vorgänge denkbar.
Anlaß zu Besorgnis gibt auch die zunehmende Versauerung unserer Böden durch saure Niederschläge. Toxische Metalle wie z.B. Aluminium, die im Boden normalerweise in nahezu unlöslicher mineralischer Form vorkommen, lassen sich im sauren Milieu leichter lösen. In welchem Ausmaß das auch für Plutonium gilt, weiß bislang niemand genau. Wie aber die Transferversuche gezeigt haben, nehmen manche Pflanzen mit abnehmendem pH-Wert mehr Plutonium aus dem Boden auf.

Bodenverseuchung mit Aktiniden nach einem schweren Unfall

Was kann man tun, wenn nach einem schweren Unfall in der WAA die Umgebung großräumig mit langlebigen α-Strahlern verseucht wird? Atombefürworter bieten hier technische „Lösungsmöglichkeiten"an: Man kann das verseuchte Erdreich abtragen, den Boden zubetonieren oder eine dicke Schicht unverseuchten Mutterbodens auftragen. Solche Verfahren sind teuer und unzureichend: Sollte sich dies aufwendige Verfahren nicht vereinfachen lassen? Man wirft eine schmutzige Jacke schließlich auch nicht weg, sondern steckt sie in die Waschmaschine. So oder ähnlich müssen die Forscher aus dem Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) darauf gekommen sein, daß „eine weitere Lösung dieses Problems ... darin bestehen (könnte), daß eine Dekontamination der Erdoberfläche durch Verlagern der Aktiniden in tiefere Erdschichten auf chemischem Wege erfolgt. Durch Beregnen der Erdoberfläche mit komplexierenden Lösungen sollte es möglich sein, die Mobilität der Aktiniden im Boden drastisch zu erhöhen und sie mit dem Sickerwasser in tiefere Erdschichten oberhalb des Grundwasserspiegels zu verdrängen." /60/. Entsprechende Versuche wurden durchgeführt: In Bodensäulen im Labor fixierten die Forscher Aktiniden auf eben diesem Wege in tieferen Bodenschichten.
Nun spielte in vielen Einwänden gegen die geplante WAA in Wackersdorf der Schutz des Grundwassers in der Bodenwöhrer Senke eine große Rolle. Die Senke ist ein Trinkwasserreservoir von überregionaler Bedeutung, dessen Verseuchung unübersehbare Folgen hätte. Die Betreiber halten diesen Befürchtungen entgegen, radioaktive Stoffe würden im Boden so langsam wandern, daß sie größtenteils zerfallen, bevor sie die Grundwasserhorizonte erreichen. Wenn die Betreiber jedoch nach einem schweren WAA-Unfall die Erdoberfläche tatsächlich einmal mit Komplexbildnern „entseuchen" sollten, so wird das Grundwasser dabei kaum unversehrt bleiben. Niemand nämlich kann garantieren, daß die Transurane auch da steckenbleiben, wo sie das nach theoretischen Überlegungen tun sollten.



Nach einem Feuer in der englischen Wiederaufarbeitungsanlage Windscale (heute Sellafield) am 10. Oktober 1957 ist die Kuhmilch aus der Umgebung radioaktiv kontaminiert. Jeden Tag werden 6000 Gallonen (ca. 18.000 Liter) Milch vernichtet! Foto: pa

Wenn Nutztiere Plutonium aufnehmen

Tiere können Radionuklide einatmen. Oder sie nehmen die strahlenden Stoffe mit dem Futter auf. Plutonium gelangt dann in den Tierkörper und in alle tierischen Produkte wie etwa Milch und Eier. Aber auch andere Wege findet der Stoff in den Tierkörper. Denn viele Pflanzenfresser – beispielsweise Rinder und, in noch viel stärkerem Maße, Schafe – nehmen mit dem Weidegras und anderem Grünfutter auch (verschmutzte) Bodenteilchen auf. Wieviel von dem aufgenommenen Plutonium nun in die Organe gelangt, ist sehr unterschiedlich und hängt wesentlich ab von der Tierart, der chemischen Form der Radionuklide und der Zusammensetzung des Futters. Im allgemeinen gehen offizielle Strahlenschützer davon aus, daß nur ein sehr geringer Teil im Magen-Darm-Trakt resorbiert wird, also in den Tierkörper übergeht. Eine Plutoniumverseuchung von Fleisch oder Milch sei für die Strahlenbelastung des Menschen daher zu vernachlässigen. Solche Annahmen stützen sich jedoch auf eine sehr schmale Datenbasis. Für Plutonium (und erst recht für die anderen Aktiniden) ist eine „verläßliche Transferwertaussage" daher nicht möglich /61/.

In amtlichen Vorschriften oder Veröffentlichungen von Wissenschaftlern, die die herrschende Meinung stark prägen, spiegelt sich dieser geringe Kenntnisstand wieder: die von ihnen angenommenen Werte schwanken mitunter um Größenordnungen. Am Beispiel des Transferfaktors Futter – Rindfleisch für Plutonium wird dies deutlich (die Einheit ist Tag pro Kilogramm; durch Multiplikation des Zahlenwertes mit 100 erhält man darüber Auskunft, wieviel Prozent der täglich mit dem Futter aufgenommenen Plutonium-Menge sich in einem Kilogramm Rindfleisch wiederfindet):

→ $14 \cdot 10^{-6}$: Allgemeine Berechnungsgrundlage von 1979 /45/

→ $20 \cdot 10^{-6}$: Störfallberechnungsgrundlagen von 1983 /62/

$300 \cdot 10^{-6}$: Radioökologie-Gutachten für die WAA Wackersdorf von 1985 /48/

→ $2 \cdot 10^{-6}$: aufgeführt in der Empfehlung der Strahlenschutzkommission zu Höchstwerten in Futtermitteln von 1988 /63/.

Das Radioökologie-Gutachten für die WAA Wackersdorf, in Auftrag gegeben von der bayerischen Genehmigungsbehörde, stammt von einer Gutachter-Arbeitsgemeinschaft, in der der TÜV Bayern, die Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF) und die Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) saßen. Zu dem Wert von $300 \cdot 10^{-6}$ Tag pro Kilogramm kamen die Gutachter deshalb, weil Untersuchungen unter „realistischen Freilandbedingungen", nämlich in der Umgebung der WAA Sellafield, diese Transferrate in Rindfleisch ergeben hatten /64/.

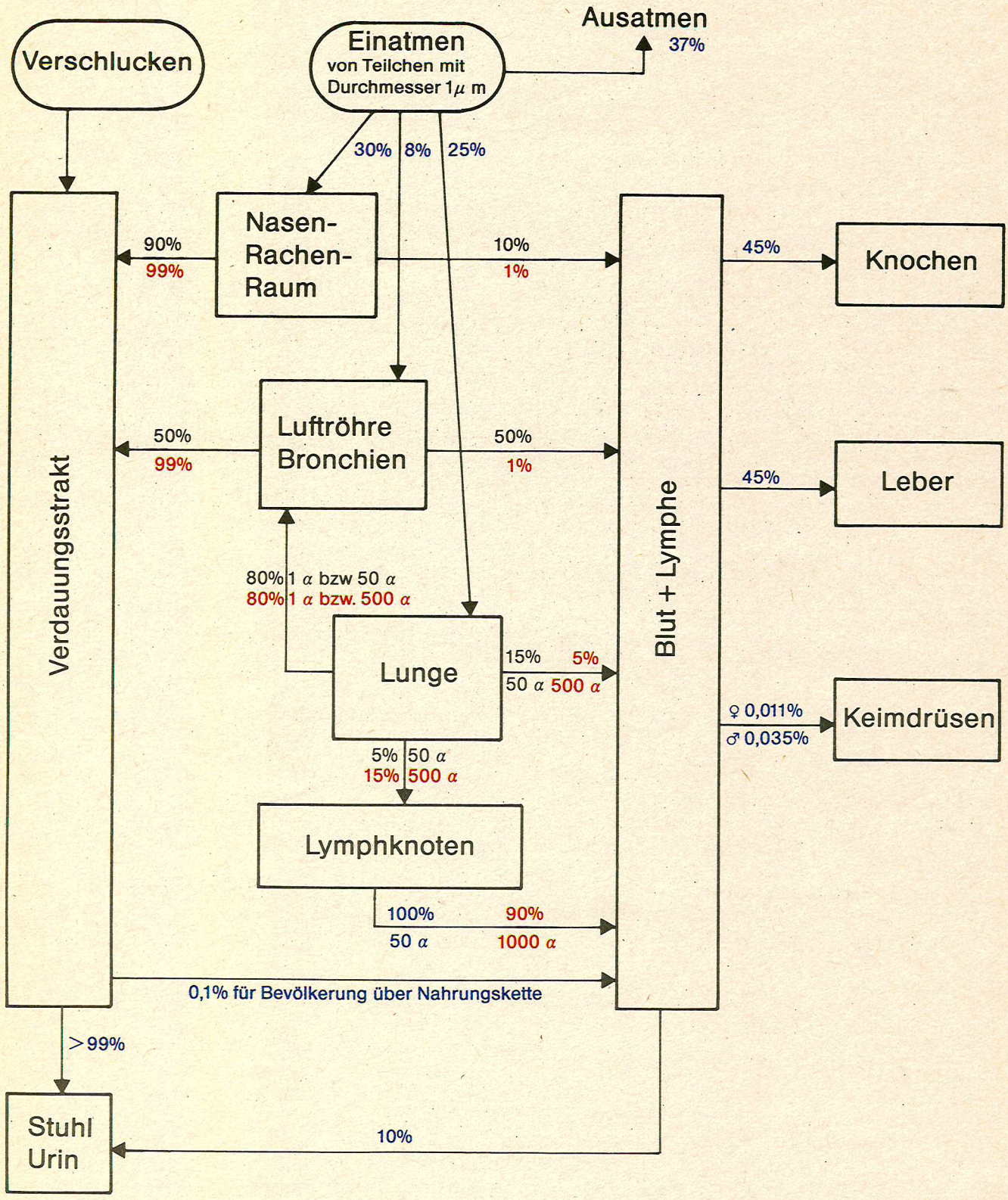
Wo die Strahlenschutzkommission (SSK) 1988 ihren 150fach niedrigeren Wert hergenommen hat, bleibt im Dunkeln. Als Quelle gibt sie eine Fassung der „Allgemeinen Berechnungsgrundlage" von 1988 an, die bislang noch nicht veröffentlicht wurde (!). Die unterschiedlichsten Versuche der letzten Jahre haben hingegen eine erhöhte Resorption von Plutonium und anderen Transuranen im Magen-Darm-Trakt von Labortieren gezeigt (s. Kap. 6). Der Niedrigstwert der SSK am untersten Ende aller veröffentlichten Transferfaktoren läßt den Beobachter einigermaßen fassungslos zurück. Fazit: Die amtlich festgelegten Transferfaktoren unterschätzen den Übergang Futter – Rindfleisch ganz erheblich.

Plutonium lagert sich nicht nur in Muskelfleisch ein. Es wandert auch in andere Organe, hauptsächlich ins Skelett oder die Leber. In der Leber reichern sich Schwermetalle an, mit zunehmendem Alter der Tiere steigt in dem Entgiftungsorgan der Metallgehalt. Für den Transfer Futter – Leber wurde ein etwa fünfmal höherer Transferfaktor als für Fleisch gefunden /64/. Bezüglich der Knochen gibt es keinen Wert. Denn schließlich, könnte man einwenden, spielen Knochen für die menschliche Ernährung keine Rolle. Falsch. In fabrikmäßig hergestellter Koch- und Brühwurst können beispielsweise bis zu zehn Prozent Knochenmus enthalten sein! /65/

In die Kuhmilch gelangen nur geringste Spuren von aufgenommenem Plutonium. Doch auch bei diesen Kleinstmengen liegen die offiziellen Transferfaktoren um mindestens einen Faktor 10 zu niedrig – wieder gemessen an den „realistischen Freilandbedingungen" um Sellafield.

Fazit: Nach heutigen Erkenntnissen sind Plutoniumverbindungen aufgrund ihrer Schwerlöslichkeit wenig mobil und damit biologisch wenig verfügbar. Im Wissen über das Verhalten dieses hochtoxischen Stoffes in der Biosphäre klaffen jedoch noch große Lücken, besonders was Komplexe mit organischen oder anorganischen Naturstoffen betrifft. Besonders bedenklich ist dabei die Langlebigkeit des Stoffes. Denn einmal freigesetztes Plutonium kann immer wieder in die Stoffkreisläufe der Biosphäre zurückkehren und damit viele Folgegenerationen belasten.

Abbildung 4: Schema des Plutonium-Stoffwechsels nach Vorstellungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP).



Erläuterungen:
schwarz: Verhalten von inhalierten Pu-Partikeln der Klasse W, d.h. allen Verbindungen außer Oxiden
rot: Verhalten von inhalierten Pu-Partikeln der Klasse Y, d.h. schwerlösliche Oxide

Prozentangaben (blau): Dieser Aktivitätsanteil wird in den einzelnen Modellbereichen abgelagert oder ausgeschieden bzw. geht vom Verdauungstrakt ins Blut über.

Prozentangaben (rot und schwarz): Dieser Aktivitätsanteil geht von einem Modellteilbereich in den nächsten über. Zum Beispiel: 99 Prozent des Pu-Oxids, das in Luftröhre und Bronchien zurückgehalten wird, gelangt in den Verdauungstrakt; nur ein Prozent wird ins Blut aufgenommen.

Zeitangabe in Tagen (d): Biologische Halbwertszeit. Zum Beispiel: Nach 1000 Tagen ist die Hälfte des in den Lymphknoten abgelagerten Pu-Oxids ins Blut gelangt.

PLUTONIUM IM MENSCHLICHEN KÖRPER

Die Flexibilität von Grenzwerten

Den Rüstungsforschern des Manhattan-Projekts zum Bau der Atombombe war sehr bald klar, mit welch gefährlichem Stoff sie da experimentierten. Denn Plutonium besitzt nicht nur eine ungeheuerliche Zerstörungskraft. Es ist zudem radiologisch hochgiftig. Diese Eigenschaft machten die Arbeit der Bombenbauer zu einer lebensgefährlichen Sache. „Bahnbrechende" Untersuchungen von Hamilton und Mitarbeitern mit Ratten, vermutlich 1943/44 durchgeführt, identifizierten erstmals Plutonium und die anderen Transurane als Knochensucher, Stoffe also, die sich in den Knochen ablagern /66/. Die Gefährlichkeit eines anderen knochensuchenden Alphastrahlers, nämlich Radium, war damals bereits bekannt: Viele Zifferblattmalerinnen, die radiumhaltige Leuchtfarbe auf Uhrenzifferblätter aufgemalt hatten, waren seit den 20er Jahren an Knochenkrebs und anderen Tumoren erkrankt und gestorben. Kranke, denen man aus therapeutischen Gründen große Dosen Radium verabreicht hatte, erlitten dasselbe Schicksal. Weil Radium der einzige Stoff war, mit dem man Plutonium vergleichen konnte, legte man deshalb – sozusagen als „betrieblichen Wert" – eine an Radium orientierte maximal zulässige Körperbelastung von 4 bis 5 Mikrogramm Plutonium fest. Das entspricht etwa 9 000 bis 12 000 Becquerel Plutonium-239. Möglichkeiten, die Einhaltung dieses Wertes zu überprüfen, gab es allerdings nicht.

Bald mußten die Forscher erkennen, daß Plutonium sich – anders als Radium – nicht in der gesamten mineralischen Knochensubstanz verteilt. Es reichert sich vielmehr an den Knochenoberflächen an und bestrahlt dort empfindliche Zellen. Das ließ Plutonium gefährlicher erscheinen als Radium. 1945 wurde deshalb der zulässige Wert für die maximale Körperbelastung um den Faktor fünf auf ein Mikrogramm gesenkt /67/. Weitere Tierversuche wiesen nach, in welchem Ausmaß Plutonium das Skelett schädigt und Knochenkrebs auslösen kann. Sie zeigten weiterhin, daß neben dem Skelett die Leber ein bevorzugtes Zielorgan ist, und daß ein Einatmen von Plutonium die Lunge und die pulmonalen Lymphknoten erheblich belastet.

Im September 1949 stellte der Toxikologe Dr. Brues auf einer wissenschaftlichen Konferenz die Ergebnisse seiner chronischen Toxizitätsuntersuchungen bei Ratten und Mäusen vor: Injiziertes Plutonium war fünfzehnmal radiotoxischer als Radium-226. Erschreckt empfahlen die Konferenzteilnehmer, die zulässige Körperbelastung auf ein Zehntel zu reduzieren. Dieser „konservative Wert" hätte jedoch, so schreibt Langham 1962 /67/, „ernsthafte Verzögerungen bei den Arbeiten mit Plutonium", sprich bei der Bombenentwicklung, verursacht. Und das war das letzte, was Politiker und Militärs wollten, zumal der Kalte Krieg mit der Sowjetunion in vollem Gange war. Also wurde intensiv konferiert, korrespondiert und überprüft. Ergebnis: 1950 widerrief Brues, und ein Grenzwert von 0,6 Mikrogramm (40 Nanocurie) wurde abgeleitet, natürlich „streng auf biologischer Grundlage". Versuchsergebnisse, so lehrt diese Episode, können immer unterschiedlich interpretiert werden. Der neue Wert war pragmatisch, d.h. er ließ sich technisch einhalten. Er fand deshalb die Unterstützung der nationalen und internationalen Strahlenschützer und wurde in den US-Vorschriften verankert. Noch 1959 empfahl die Internationale Strahlenschutzkommission (ICRP) in ihrer Veröffentlichung Nr. 2 eine maximal zulässige Körperbelastung von 40 nCi (das entspricht 1480 Becquerel) für lösliche Plutonium-239-Verbindungen. Dieser Wert basierte auf einem Vergleich der Giftigkeit von Radium und Plutonium, „kritisches Organ" war das Skelett /68/. Dieser Wert ist übrigens im Prinzip noch heute gültig!

Die 1959 in der ICRP-2-Veröffentlichung empfohlenen maximal zulässigen Körperbelastungen lassen sich zwar nicht direkt mit den später empfohlenen Grenzwerten der jährlichen Aktivitätszufuhr vergleichen (s. Kasten 8). Aber die daraus jeweils abgeleiteten zulässigen Konzentrationen in der Atemluft am Arbeitsplatz sind vergleichbar, und da zeigt sich: Für lösliche Plutoniumverbindungen gilt noch zwanzig Jahre später praktisch derselbe Wert wie 1959, nämlich 0,08 Becquerel pro Kubikmeter (Bq/m³). In der praktischen Anwendung hat sich also nichts verändert. Die zulässigen Konzentrationen von schwerlöslichem Oxid sind hingegen gesenkt worden, allerdings lediglich um den Faktor 7 von 1,5 Bq/m³ (ICRP 2) auf 0,2 Bq/m³ (ICRP 30) /69/.

Was macht Plutonium so gefährlich?

Plutonium ist ein hochgefährliches Gift. Dabei spielt seine chemische Giftigkeit – im Gegensatz zu anderen Schwermetallen wie beispielsweise Uran – praktisch keine Rolle. Denn die radiologischen Gefahren durch Plutonium, also die Strahlenschädigung, sind ungleich größer. Die sehr hohe Radiotoxizität kommt durch ein Zusammenwirken von drei Faktoren zustande: Die lange physikalische Halbwertszeit, die große Wirksamkeit der Strahlung und die Langzeitspeicherung in strahlenempfindlichen Organen.

● Halbwertszeit

Die vier Isotope Pu-238 bis Pu-241 spielen aktivitäts- bzw. mengenmäßig sowohl im militärischen als auch im zivilen Atomenergiebereich die größte Rolle. Von ihnen hat Pu-239 mit 24 000 Jahren die längste Halbwertszeit. Gemessen an menschlichen Alltagsvorstellungen strahlt es ewig, müssen plutoniumhaltige Abfälle für unendlich lange Zeit von der Biosphäre ferngehalten werden (in der übernächsten Ausgabe von RESTRISIKO werden wir uns mit den Endlagerproblemen auseinandersetzen).

● Alpha-Strahlung

Bis auf eine Ausnahme (Pu-241) sind die hier betrachteten Plutonium-Isotope Alpha-Strahler; Pu-241 wandelt sich in α-strahlendes Americium-241 um. Alpha-Strahlung hat im Gewebe nur eine Reichweite von Millimeterbruchteilen und gehört zu den Strahlenarten mit der größten biologischen Wirksamkeit: Sie verursacht – bei gleicher Energieübertragung – im Gewebe viel stärkere Schäden als Gamma- oder Röntgenstrahlung. Um die Unterschiede zwischen den einzelnen Strahlenarten zu beschreiben, wurden vereinfachte Annahmen getroffen und sogenannte „Qualitätsfaktoren" festgesetzt. Mit deren Hilfe läßt sich die Äquivalentdosis (die biologisch wirksame Dosis in

rem oder Sievert) aus der Energiedosis (in rad oder Gray) berechnen. Während beispielsweise für Gamma-Strahlung der Qualitätsfaktor 1 beträgt, liegt er für α-Strahlung seit 1977 bei 20 (davor bei 10). Weitere Erhöhungen sind nicht ausgeschlossen. So hat zum Beispiel die ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements) in ihrem Bericht Nr. 40 von 1986 empfohlen, für α-Teilchen einen Qualitätsfaktor von 25 zu verwenden /70). Alpha-Strahlung wurde also im Lauf der Zeit in der Gefahrenskala immer wieder hochgestuft.
Die größere Schadwirkung der α-Strahlung entsteht dadurch, daß sie ihre Energie auf einer sehr kurzen Wegstrecke abgibt und auf kleinerem Raum viele geladene Teilchen (Ionen) erzeugt. Man spricht deshalb auch von „dicht ionisierender" Strahlung (im Gegensatz zu locker ionisierender Gamma- oder Röntgenstrahlung). Seit Jahren streiten die Experten erbittert darüber, wie die Beziehung zwischen Dosis und Schaden nach Einwirken von locker ionisierender Strahlung im Niedrigdosisbereich zu beschreiben ist – erbittert deshalb, weil von der Dosis-Wirkungs-Beziehung abhängt, wie hoch Risikofaktoren und damit Grenzwerte angesetzt werden müssen. Die letzte Auswertung zur strahlenbedingten Krebssterblichkeit bei den Überlebenden der Atombomben von Hiroshima und Nagasaki /71/ zeigt erneut, daß niedrige Strahlendosen gefährlicher sind als offiziell bisher angenommen. Es gibt keinen Hinweis auf eine (unschädliche) Schwellendosis: Bereits ein einziges Strahlenquant kann eine normal funktionierende Körperzelle in eine krankhaft veränderte Krebszelle verwandeln. In Ei- und Samenzellen kann bereits ein Strahlenquant eine genetisch wirksame Erbgutveränderung auslösen, die früher oder später bei den Nachkommen zutage tritt.
Dies gilt erst recht für die dicht-ionisierende Alpha-Strahlung.

● Lebenslang Plutonium –
Langszeitspeicherung in empfindlichen Organen

Einmal in den Körper aufgenommen, bleibt Plutonium dort Jahrzehnte, zum Teil ein Leben lang gespeichert. Die hauptsächlichen „Zielorgane" wie Lunge, Leber und Knochen, in denen sich das Plutonium anreichert und die deshalb mit hohen Dosen belastet werden, sind gleichzeitig besonders strahlempfindlich: In ihnen kann leicht Krebs ausgelöst werden. Ergebnisse von Tierversuchen und umfangreiche Erfahrungen mit der Wirkung anderer α-Strahler wie Radium beispielsweise haben die knochenschädigende Wirkung gezeigt. Es kann aber nicht nur Knochenkrebs ausgelöst werden, sondern durch Bestrahlen des blutbildenden roten Knochenmarks auch Blutkrebs. Erhöhte Leukämieraten lassen sich sowohl bei Bevölkerungsgruppen nachweisen, deren Grund- und Trinkwasser erhöhte Radiumkonzentrationen enthalten /72/, als auch bei den vielen Tausend Patienten, denen bis zu Beginn der 50er Jahre Thorotrast, ein α-strahlendes Kontrastmittel, gespritzt wurde. Bei diesen Patienten zeigte sich auch eine sehr hohe Lebertumorrate – die bisherige Vorstellung von der Leber als einem strahlenunempfindlichen Organ muß also revidiert werden. /43/.
Wenn ein Mensch Plutoniumteilchen einatmet, belastet dies vor allem seine Lunge; Gewebeschädigungen und Lungenkrebs können die Folge sein. Die krebserregende Wirkung anderer Alphastrahler, des natürlich vorkommenden Radons etwa und seiner Tochterprodukte, ist seit langem bekannt. Untersuchungen bei Arbeitern in Uranminen und anderen Bergwerken brachten die Gefahren an den Tag. Die Strahlenbelastung durch Radon-Zerfallsprodukte in Häusern – eine alltägliche Strahlengefahr – ist nach Schätzungen der Weltgesundheitsorganisation etwa für zehn Prozent der heute auftretenden Lungenkrebstodesfälle verantwortlich.

Plutonium gelangt auch in alle anderen Organe und Gewebe. Nach dem Tod läßt es sich dort nachweisen – zum Beispiel in der Milz, im Muskelgewebe oder in den Nieren. Die Ergebnisse von Tierversuchen geben hier Anlaß zu allergrößter Besorgnis: Man hat nämlich ein erhöhtes Auftreten von Tumoren in verschiedensten Geweben beobachtet, ohne daß sich ein Zusammenhang herstellen läßt mit der Plutoniumkonzentration in diesen Geweben. Möglicherweise verursacht die Strahlenbelastung eine Schwächung der Immunabwehr /40/.

Woher stammt unser Wissen über Plutonium?

Unser Wissen über das Verhalten und die Wirkungen von Plutonium im menschlichen Körper stammt im wesentlichen aus Tierversuchen, Menschenversuchen und Autopsien. Erfahrungen über die Wirkungen anderer Alphastrahler liefern weitere Anhaltspunkte.

Tierversuche

Seit den Anfängen der Plutoniumforschung sind (vermutlich) viele Millionen Dollar und Rubel für Forschungen ausgegeben und unzählige Ratten, Mäuse, Meerschweinchen, Hunde und andere Tiere umgebracht worden. Plutonium oder andere Transurane wurden den Tieren in die Atemluft oder das Futter beigemischt, direkt in Venen oder den Bauchraum injiziert. Tierversuche dienen noch immer als wesentliche Grundlage für die Abschätzung der Gesundheitsgefahren durch und des Stoffwechselverhaltens von Plutonium. Beim Übertragen der Befunde auf den Menschen ist Vorsicht geboten. Man bedenke allein die Unterschiede zwischen einzelnen Tierarten und die Tatsache, daß Menschen einer Vielzahl von Schadstoffen ausgesetzt sind, nicht nur am Arbeitsplatz. Ganz abgesehen davon, daß „der" Mensch natürlich auch nur als Fiktion existiert.

Menschenversuche

Die Mediziner des Manhattan-Projekts hielten deshalb Versuche mit Menschen für „zwingend erforderlich" /67/. 1945/46 wurde unter der Leitung des amerikanischen Arztes Dr. Langham insgesamt achtzehn Krankenhauspatienten Plutonium in erheblichen Mengen verabreicht, meist intravenös gespritzt – ohne deren Wissen offenbar. Denn nirgendwo findet sich ein Hinweis, daß die Kranken um ihr Einverständnis gefragt worden wären. Langhams Legitimation: Diese Patienten hätten ohnehin kurz vor dem Tode gestanden – was nichts rechtfertigt und ohnehin nicht für alle zutrifft. Die ungeheuerlichen Versuche fanden unter dem Etikett „Arbeitsschutz" statt: Erstens erhofften sich die Forscher durch Messung der Ausscheidungsaktivitäten ein praktisches Instrumentarium zum Überprüfen des Einhaltens von Grenzwerten. Zweitens wollte man genauer kennenlernen, wie sich Plutonium beim Menschen auf die einzelnen Organe verteilt. Obwohl die erbarmungslosen Wissenschaftler schon aus ihren Tierversuchen wußten, daß Plutonium für jedes Lebewesen hochgiftig ist, machten sie vor diesen Menschenversuchen nicht halt.
Darüber hinaus sind diese Versuche auch „wissenschaftlich" kaum brauchbar. Denn die Ergebnisse lassen sich nicht übertragen, sei es nun auf Arbeiter, die Plutonium einatmen, oder auf Personen, die plutoniumbelastete Nahrungsmittel essen. Schließlich handelte es sich um eine sehr kleine Gruppe, und die Opfer litten an den unterschiedlichsten Krankheiten, zum Beispiel an schweren Stoffwechselstörungen. In fast allen Fällen injizierten die Ärzte intravenös Pu-Zitrat – was unter „nor-

malen" Umständen nie vorkommt. Maximal beobachteten sie ihre Patienten 138 Tage; die überlebenden Patienten verließen dann die Klinik und konnten nicht weiter untersucht werden. Die Kontrolle von Blut, Urin und anderen Werten war sehr lückenhaft. Auch die damals viel größeren meßtechnischen Schwierigkeiten beim empfindlichen Plutonium-Nachweis haben vermutlich viele Fehler verursacht. Dennoch benutzen Strahlenschützer noch heute die Formel, die Langham ableitete – wenn auch teilweise modifiziert –, um aus der Plutonium-Aktivität in den Ausscheidungen auf die aufgenommene Menge zurückzurechnen (eine ausführliche kritische Darstellung dieser Menschenversuche findet sich in /73/). Übrigens blieb die Originalarbeit von Langham der wissenschaftlichen Öffentlichkeit lange Zeit nicht zugänglich. Begründung: Militärische Geheimsache. Ein Reprint wurde erst 1980 veröffentlicht /66/. In früheren Arbeiten (z.B. 1956 und 1957) hatte Langham zwar Ergebnisse seiner Versuche mitgeteilt, allerdings ohne auf nähere Einzelheiten einzugehen.

Autopsien

Sieben Langham-„Patienten", einige-zig Beschäftigte, die am Arbeitsplatz mit Plutonium belastet waren, und einige hundert Personen, die dem Atombombenfallout ausgesetzt waren, sind bislang nach ihrem Tod obduziert und auf Plutonium analysiert worden. Die Ergebnisse sind aus mehreren Gründen mit Unsicherheiten behaftet: Es wurden meist nur kleine Gewebeproben, hauptsächlich der Leber, Lunge und einiger Knochen untersucht und in manchen Fällen auch kleine Proben von Niere, Milz, Keimdrüsen oder Schilddrüse. Schließt man von diesen Werten auf die gesamte Organaktivität, führt dies aufgrund der inhomogenen Verteilung von Plutonium in den Organen zu großen Fehlern. Häufig überforderten die geringen Konzentrationen die Meßtechnik. Außerdem waren – abgesehen von den Patienten – Dosis und physiko-chemische Form unbekannt, oftmals auch der genaue Zeitpunkt der Kontamination.

Plutonium-Stoffwechsel

Wir sind bereits darauf eingegangen, welche Folgen eine Bestrahlung empfindlicher Gewebe haben kann. Im folgenden wollen wir näher betrachten, wie sich Plutonium im menschlichen Körper verhält – denn das ist die Grundlage aller Abschätzungen über die Dosis und damit die Gefahren für den menschlichen Organismus. Nun läßt sich eine solche Frage selbstverständlich für keinen Stoff allgemein beantworten, aber für Plutonium gilt erschwerend, daß der Stoffwechsel außerordentlich komplex ist und viele (wesentliche) Faktoren und Abhängigkeiten nicht oder nicht ausreichend bekannt sind. Autopsien und Tierversuche belegen: Viele Faktoren bestimmen den Plutoniumstoffwechsel:

- Weg der Aufnahme (Inhalation, Ingestion oder über Wunden)
- chemisch-physikalische Form (Teilchengröße, Löslichkeit, spezifische Aktivität usw.)
- aufgenommene Menge
- biologische Faktoren wie Alter, Gesundheitszustand und Ernährungsbedingungen.

Das übliche wissenschaftliche Vorgehen versucht, komplexe Systeme durch mathematische Modellbildung in den Griff zu bekommen. Modelle sollen die realen Verhältnisse so genau wie möglich abbilden. Die Internationale Strahlenschutzkommission hat nun Stoffwechselmodelle auf der Grundlage des sogenannten „Referenzmenschen" entwickelt, der definierte Organmassen und Stoffwechseleigenschaften besitzt (vgl. RESTRISIKO Nr. 3/4). Alle Variabilitäten, alle Unterschiede zwischen verschiedenen Menschen fallen dabei unter den Tisch. Die vielfältige Palette der Plutonium-Verbindungen wird ebenfalls in ein Schema gepreßt. Dieses Vorgehen wird damit begründet, daß es sich um ein für Strahlenschutzzwecke entwikkeltes Modell handelt – und das bedeutet hier nicht größtmöglichen Schutz jeder einzelnen Person vor der schädlichen Strahlung. Vielmehr soll der Umgang mit der Radioaktivität praktikabel gestaltet werden durch den Versuch, das durchschnittliche Verhalten von Radionukliden zu beschreiben. Es ist daher schwierig bis unmöglich, aufgrund der Modelle die Belastungssituation bei einer bestimmten Einzelperson abzuschätzen und vorherzusagen.

Wege in den menschlichen Körper

Verseuchte Atemluft – Aufnahmeweg Inhalation

Das Einatmen von Plutonium-Partikeln ist einer der Hauptpfade, auf dem die Teilchen in den Körper gelangen. Der Mammutanteil der inhalierten Aktivität wird wieder aus den Atemwegen entfernt: Das Flimmerepithel, das den Nasen-Rachen-Raum, die Luftröhre und die Bronchien auskleidet, fängt die Partikel ab und transportiert sie wieder rachenwärts: Der Mensch verschluckt dann die Partikel oder hustet sie aus. Oder bewegliche Freßzellen in der Lunge (Makrophagen) nehmen die Partikel in sich auf und transportieren sie ab oder lösen Teilchen auf. Wo sich die inhalierten Partikel im Atemtrakt ablagern, wie lange sie dort bleiben und auf welchem Weg sie schließlich wieder hinausgelangen – das hängt wesentlich vom individuellen „Atemverhalten" (z.B. dem Verhältnis Mund-/Nasenatmung) und den Eigenschaften der Schwebstoffteilchen ab. Größere Partikel werden schon in den oberen Atemwegen ausgefiltert, nur kleine gelangen tiefer in die Lunge hinein. Dort bleiben sie zunächst. Erst später gelangen sie, je nach Löslichkeit, ins Blut. Durch die Adern schwemmen sie zu den einzelen „Zielorganen" oder werden von Freßzellen verschluckt und lagern sich in den umliegenden Lymphknoten ab.
Als Oxid ist Plutonium am wenigsten löslich, bleibt also am längsten in den tiefen Lungenbereichen und bestrahlt das Gewebe. Hier spielt nun die spezifische Aktivität eine große Rolle. Tierversuche haben gezeigt, daß Pu-238-Oxid sich etwa 200fach besser löst als Pu-239-Oxid. Entsprechend unterschiedlich sind die Folgen: Inhalation von Pu-239-Oxid führt häufiger zu Lungentumoren und strahlenbedingten bindegewebigen Umwandlungen des Lungengewebes (Fibrose). Nach dem Einatmen von Pu-238-Oxid hingegen trat verstärkt Knochenkrebs auf, neben einigen Tumoren in Leber und Lunge /43/. Andere Plutonium-Verbindungen sind besser löslich und gelangen entsprechend rascher als das Oxid in die Blutbahn.
Das von den Freßzellen in den Lymphknoten abgelagerte Plutonium bleibt dort sehr lange. Es kann sich auf Konzentrationen anreichern, die einige hundertmal größer sind als in manchen Lungenbereichen /74/. Folge ist eine hohe Strahlenbelastung. Da die Lymphknoten im Immunsystem eine zentrale Rolle spielen, können Strahlenschäden eventuell die gesamte Immunabwehr gegen Fremdkörper, aber auch gegen entartete körpereigene Zellen beeinträchtigen und schwächen.

Ein Lungenmodell der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) soll die komplizierten Verhältnisse bei der Inhalation von Radionukliden handhabbar machen. Dem Modell zufolge werden knapp 40 Prozent sofort wieder ausgeatmet, das Schicksal der restlichen Aktivität hängt von Teilchen-

größe und Löslichkeit ab. Die ICRP unterscheidet bei Plutonium nur zwei Löslichkeitsklassen: Das Oxid kommt ohne Diffenzierung nach Isotopen in Klasse Y (für years) und soll mit einer biologischen Halbwertszeit von 500 Tagen aus der Lunge ins Blut übergehen. Allen anderen Verbindungen schreibt das Modell eine Halbwertszeit von 50 Tagen zu und ordnet sie in die sogenannte Klasse W (für weeks) ein (vergl. Abb. 5) In diesem Modell sind grobe Fehleinschätzungen vorprogrammiert: So werden ultrafeine Partikel (Durchmesser weniger als 0,1 Mikrometer) genausowenig berücksichtigt wie Mundatmung. Nicht zuletzt kann ein durch Rauchen oder Krankheit geschädigtes Flimmerhärchenepithel zu einer veränderten Reinigung und längeren Verweildauer im Atemtrakt führen.

Plutonium in der Nahrung – Aufnahmeweg Ingestion

Alle Abschätzungen darüber, wieviel Plutonium aus dem menschlichen Darm in das Blut resorbiert wird, beruhen auf Tierversuchen. Solche Ergebnisse auf den menschlichen Körper zu übertragen, ist problematisch. Zu verschieden sind die unzähligen Plutoniumverbindungen, zu groß die Unterschiede zwischen einzelnen Tierarten und die Schwankungsbreite von Versuch zu Versuch: Unterschiede um den Faktor 100, selbst bei gleicher Tierart und gleicher Verbindung, wurden gefunden. Und nicht zuletzt die Tatsache, daß Labortiere im allgemeinen gesund sind und ausreichend mit Mineralstoffen versorgt werden, macht ein Abschätzen der Verhältnisse beim Menschen fast unmöglich. Zumal sich die Bedingungen, unter denen Beschäftigte und Bevölkerung mit Plutonium in Kontakt kommen, meist grundlegend unterscheiden: Arbeiter werden zu einem großen Teil anorganischen, schwerlöslichen Verbindungen ausgesetzt, während die Bevölkerung eher organische Komplexe in Nahrungsmitteln aufnimmt, die besser resorbiert werden können.
Wieviel Plutonium im Darm resorbiert wird, hängt ab von den Faktoren, die wir bereits zu Beginn des Kapitels genannt haben. Fasten z.B., so zeigen Tierversuche, erhöht die Aufnahme, ebenso Eisenmangel /75/. Personen, die unter Anämie leiden, weil sie nicht genügend Eisen mit der Nahrung aufnehmen oder chronisch Blut verlieren, sind also vermutlich stärker gefährdet – Kinder im Wachstum etwa oder Frauen vor der Menopause.
Experten haben die Bedeutung des Ingestionspfades jahrzehntelang unterschätzt. Denn erstens standen Strahlenbeschäftigte, also erwachsene Männer im Mittelpunkt des ICRP-Interesses. Zum zweiten nahm man an, die Aufnahme von Plutonium aus dem Magen-Darm-Trakt sei vernachlässigbar gering. So legte die Internationale Strahlenschutzkommission in ihrer Veröffentlichung 30 (1979) einen Resorptionsfaktor von 0,001 Prozent für schwerlösliche und 0,01 Prozent für alle anderen Plutoniumverbindungen fest. Obwohl diese Annahmen immerhin schon höher liegen als früher, spiegeln sie keinesfalls den damaligen Stand der Wissenschaft wider – es wurden nämlich nur Resultate bis Anfang der 70er Jahre berücksichtigt! Eine Vielzahl neuer Experimente hatte seitdem jedoch deutlich höhere Resorptionsraten ergeben. Immerhin, 1986 kamen dann neue Empfehlungen (ICRP 48) heraus. Beschäftigte und Bevölkerung wurden erstmal getrennt „behandelt"; für die Bevölkerung wird für alle mit der Nahrung in den Körper gelangten Verbindungen eine Aufnahme von 0,1 Prozent angenommen /40/. Diese Werte liegen um das 30- bis 1000fache höher als in den Empfehlungen von 1972 /76/.
Nationale Strahlenschutzkommissionen neigen normalerweise dazu, die Empfehlungen der ICRP abzuwarten und erst dann ihre Änderungsvorschläge den zuständigen Politikern zu unterbreiten. Zumindest die britische Strahlenschutzkommission hat in diesem Punkt so etwas wie Eigenständigkeit gezeigt: 1983, also vor der ICRP, legte sie für die Bevölkerung eine höhere Aufnahmerate (nämlich 0,05 Prozent) als für Beschäftigte zugrunde.

Besonders gefährdet: Neugeborene

Versuche mit Ratten haben schon vor mehr als dreißig (!) Jahren ergeben, daß neugeborene Säugetiere Plutonium um Größenordnungen höher resorbieren als erwachsene. Folgeuntersuchungen bestätigten immer wieder diese „frühen" Erkenntnisse: Neugeborene Hamster, Ratten und Meerschweinchen resorbieren etwa 100mal mehr Plutonium als ausgewachsene Tiere, neugeborene Hunde etwa 400mal und neugeborene Schweine sogar etwa 700mal mehr /77/. Im Lauf der Zeit verringert sich die Aufnahmerate und erreicht schließlich – unterschiedlich schnell – das Resorptionsniveau von Erwachsenen. Möglicherweise hängt das mit der erhöhten Durchlässigkeit der Darmwand für Makromoleküle nach der Geburt zusammen. Denn um gegen Krankheitserreger passiv immun zu sein, müssen viele Tierarten Antikörper (Immunglobuline) aus der Muttermilch aufnehmen können. So erwerben Ratten und Hunde z.B. ihre Immunität prä- und postnatal, Schweine dagegen nur postnatal, Meerschweinchen (und Menschen) vermutlich nur pränatal. Trotzdem ließ sich auch bei Meerschweinchen eine erhöhte Aufnahmerate nachweisen. Und es ist bekannt, daß auch der Darm von neugeborenen Kindern durchlässiger ist für große Teilchen als der von Erwachsenen. Wie sehr, weiß man aber nicht. Die Frage ist also: Welche Tierart kann als Modell dienen? Sullivan & Gorham schlagen hier das Schwein vor, das dem Menschen insgesamt ähnlicher ist als alle übrigen untersuchten Tierarten /77/.
Neugeborene Kinder sind durch Plutoniumaufnahme über die Nahrung besonders gefährdet – egal, welche Tierart man zum Vergleich heranzieht. Neugeborene müssen in besonderem Maße geschützt werden, zumal sie erheblich strahlenempfindlicher sind als Erwachsene. Die ICRP hat immerhin 1986 empfohlen, für das erste Lebensjahr eine Resorptionsrate von einem Prozent anzunehmen; 1983 hatte die britische Strahlenschutzkommission im Alleingang 0,5 Prozent vorgeschlagen. Erstaunlich und empörend: Die bundesdeutsche SSK hat diese Erkenntnisse bislang völlig ignoriert. Es gibt zwar im bundesdeutschen Strahlenschutz das „Standardkleinkind" (Alter 1 Jahr), das 300 Liter Milch im Jahr trinkt. Neugeborene existieren jedoch in dieser Modellwelt nicht. Bei der Neuberechnung von Dosisfaktoren, wie sie das Institut für Strahlenhygiene des Bundesgesundheitsamts im Verlauf der Novellierung der Strahlenschutzverordnung bereits zweimal vorgenommen hat, sind in die 1988er Version alle Vorschläge aus ICRP 48 aufgenommen worden. Nur einer nicht: Die besondere Berücksichtigung des Babys im ersten Lebensjahr.

Wenn sich das Plutonium im Körper verteilt

Die Internationale Strahlenschutzkommission (ICRP 30) nimmt an, daß 10 Prozent des ins Blut gelangten Plutoniums unmittelbar wieder ausgeschieden werden; die restlichen 90 Prozent werden danach zu gleichen Teilen in Knochengerüst und Leber und ein winziger Bruchteil in die Keimdrüsen eingelagert (vergl. Abb. 5). Diese Aufteilung zeigt wiederum deutlich, daß der offizielle Strahlenschutz von Mittelwerten ausgeht. Die Plutoniumverteilung im menschlichen Körper schwankt nämlich – wie nicht anders zu erwarten – von Fall zu Fall erheblich. Auswertungen der Autopsiedaten von ehemaligen Plutonium-Arbeitern ergaben für Pu-239 im Mittel eine annähernde Gleichverteilung zwischen Leber und Knochen; Pu-238 hin-

gegen fand sich im Schnitt zu 63 Prozent in den Knochen. Aber: Im Einzelfall können die Knochen einer Person 97 und die Leber lediglich 3 Prozent des Plutoniums enthalten, während sich bei anderen Menschen nur etwa 20 Prozent im Skelett und 80 Prozent in der Leber anreichern /78/.
Besonders für die Keimdrüsen ist Strahlung gefährlich – wegen des genetischen Risikos für die Nachkommen. Der Plutonium-Anteil, der nach den Vorstellungen der ICRP in Hoden und Eierstöcken (dauernd) zurückgehalten wird, ist verschwindend gering – 0,035 bzw. 0,011 Prozent. Auch hier spiegeln gemittelte Belastungswerte kaum die realen Verhältnisse wider. Nach Autopsie-Befunden liegen diese Werte vermutlich um eine Größenordnung zu niedrig und schwanken von Fall zu Fall extrem. Bei einigen Personen einer größeren Gruppe, sammeln sich in den Hoden mindestens 3 Prozent und in den Ovarien mindestens 10 Prozent des Körper-Plutoniums! /79/

Wie lange bleibt Plutonium im Körper?

Die Dosis, mit der ein Organ belastet wird, hängt wesentlich davon ab, wie lange ein (langlebiges) Radionuklid in ihm gespeichert wird. Analog zur physikalischen Halbwertzeit formuliert man hier eine biologische Halbwertszeit: die Zeit nämlich, in der die Hälfte des betreffenden Stoffs wieder ausgeschieden ist. Die biologische Halbwertszeit ist allerdings keine Naturkonstante. Sie schwankt von Fall zu Fall.
Es erscheint erstaunlich, daß diese wichtige Größe in den Strahlenschutzbestimmungen im Lauf der Zeit immer weiter geschrumpft ist. Noch weit erstaunlicher sind die mageren Begründungen dafür. Langham war vermutlich der erste, der sich an der Bestimmung der biologischen Halbwertszeit von Plutonium versuchte. Aus den Ergebnissen seiner Menschenversuche berechnete er einen Zeitraum von 84 bis 175 Jahren

Ein Arbeiter der Plutoniumfabrik ALKEM an einem Handschuh-Kasten an einem der Produktionsbänder für Plutonium-Pellets (Tabletten). Atemmasken hält man dort offenbar nicht für erforderlich. Foto: dpa/Kleefeld

Tab. 5: Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr nach Anlage IV Strahlenschutzverordnung für wichtige Aktiniden (in Becquerel); Vergleich von alter mit neuer Strahlenschutzverordnung

	Bevölkerung				Beschäftigte			
	Inhalation		Ingestion		Inhalation		Ingestion	
	1976	1988[a]	1976	1988[a]	1976[b]	1988	1976[b]	1988
Np-237	2,2	0,54	5500	60	367	90	916700	10000
Pu 238	1,1	1,2[1)] 2,4[2)]	8900	120[3)] 1200[4)] 12000[5)]	183	200[1)] 400[2)]	1,48 Mio	20000[3)] 200000[4)] 2 Mio[5)]
Pu 239	0,95	0,6[1)] 2,4[2)]	8000	120[3)] 1200[4)] 12000[5)]	158	100[1)] 400[2)]	1,33 Mio	20000[3)] 200000[4)] 2 Mio[5)]
Pu 240	wie Pu 239							
Pu 241	51	42[1)] 120[2)]	400000	5400[3)] 54000[4)] 540000[5)]	8500	7000[1)] 20000[2)]	66,7 Mio	900000[3)] 9 Mio[4)] 90 Mio[5)]
Am 241	3,3	0,6	6700	120	550	100	1,1 Mio	20000
Cm 244	5,1	1,8	13000	180	850	300	2,17 Mio	30000

a) Der Novellierungsentwurf zur Strahlenschutzverordnung (StrlSchV), Stand: März 1989, gibt Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr für Beschäftigte an. Daraus errechnen sich durch Multiplikation mit 3/500 die Werte für die Bevölkerung.
b) Die StrlSchV von 1976 nennt Grenzwerte für die Bevölkerung. Umrechnung für Beschäftigte in Atomanlagen durch Multiplikation mit 500/3.

1) für alle Plutonium-Verbindungen außer Pu-Oxid (PuO^2)
2) für (schwerlösliches) Pu-Oxid
3) für alle Pu-Verbindungen außer Nitraten und schwerlöslichen Oxiden
4) für Pu-Nitrat
5) für Pu-Oxide, außer polydispersen Oxiden

für den gesamten Körper, im Mittel 113 Jahre. Das veranlaßte ihn übrigens zu dem zweifellos richtigen Schluß, daß ein Arbeiter, dessen „maximale Toleranzbelastung" überschritten ist, diesen Job für den Rest seines Lebens nicht mehr ausüben darf /66/. Die ICRP übernahm 1959 (ICRP 2) Langhams oberen Wert und legte für die Knochen 200 Jahre und für die Leber 82 Jahre fest.

Zwanzig Jahre später empfahl die Kommission neue Grenzwerte (ICRP 30). Die Halbwertszeiten wurden halbiert, mit folgender Begründung aus einer Empfehlung von 1972 (ICRP 19): Angesichts „der Fehler und Unsicherheiten" von Langhams Versuchen und von Tierversuchen seien 100 Jahre biologische Verweildauer von Plutonium in den Knochen eine „vernünftige Annahme". Mangels ausreichender Kenntnisse schätzen die Experten dies anhand von Faustformeln ab, Tenor: Plutonium werde im Skelett von Säugetieren ein- bis zweimal länger zurückgehalten als deren Lebensspanne. Die Verweildauer in der Leber wurde ebenfalls halbiert. Grundlage waren allein die Ergebnisse von Tierversuchen.

Neuerdings empfiehlt die ICRP noch weiter reduzierte biologische Halbwertszeiten: 50 Jahre für das Skelett und 20 Jahre für die Leber halten die Strahlenschützer nun für „sinnvoller" /40/. Ein zweifelhaftes Vorgehen – zumal über die Verhältnisse beim Menschen und die Komplexität des Plutonium-Stoffwechsels genaue Kenntnisse noch immer fehlen. Lediglich für die Atomindustrie ist dieser Weg wohl „sinnvoller". Denn ihr bleiben auf diese Weise unliebsame Grenzwerterhöhungen erspart. Konservativ im Sinne eines ausreichenden Schutzes vor Strahlung sind diese Werte nicht.

Kasten 8: Was in den Körper reindarf – „Erlaubte" Aufnahmemengen für Transurane

Bundesdeutsche Vorschriften zum Strahlenschutz legen – in Anlehnung an die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) – Dosisgrenzwerte (in rem oder Sievert) fest, die in der Umgebung einer Atomanlage oder am Arbeitsplatz eingehalten werden müssen. Ob dieser sogenannte primäre Grenzwert tatsächlich eingehalten wird, läßt sich jedoch immer dann besonders schwer überprüfen, wenn Radionuklide in den Körper eines Menschen gelangt sind. Aus „praktischen" Gründen wurden deshalb schon frühzeitig sogenannte abgeleitete Grenzwerte eingeführt. Sie sollen, so nahmen Strahlenschützer an, leichter zu handhaben sein. Ein Beispiel sind die Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr in Becquerel (engl. ALI = Annual Limit of Intake).

Theoretisch lassen sie sich folgendermaßen ableiten:

$$\frac{\text{Dosisgrenzwert (rem)}}{\text{Dosisfaktor (rem/Bq)}} = \text{Grenzwert d. Jahresaktivitätszufuhr (Bq)}$$

Anders ausgedrückt: Diese Grenzwerte – in Anlage IV der Strahlenschutzverordnung festgelegt – sollen so abgeleitet sein, daß nach Ingestion oder Inhalation nur dieses Radionuklids eine Person mit den Eigenschaften des Referenzmenschen den jeweils limitierenden Dosisgrenzwert gerade erreicht. Für Plutonium und die anderen Transurane ist beispielsweise der Knochen bzw. die Knochenoberfläche das „kritische Organ".

Beispiel 1: Nach der novellierten Strahlenschutzverordnung dürfen Beschäftigte pro Jahr maximal 400 Becquerel schwerlösliches Plutonium-238-Oxid einatmen. Mit dem Dosisfaktor von $7{,}2 \cdot 10^{-2}$ Centisievert pro Becquerel (cSv/Bq) errechnet sich daraus eine Dosis für die Knochenoberfläche von (400 Bq · 7,2 10^{-2} cSv/Bq =) 28,8 cSv. Dabei wird der Dosisgrenzwert von 30 cSv pro Jahr für die Knochenoberfläche nach § 49 StrlSchV eingehalten.

Wenn noch weitere Radionuklide in der Luft vorhanden sind, müssen sie entsprechend berücksichtigt wereden. Die erlaubte Aufnahmemenge von Plutonium-238-Oxid durch Einatmen wird dann kleiner.

Beispiel 2: Für die Bevölkerung gilt für die Knochenoberfläche ein Grenzwert von 180 Millirem pro Jahr (mrem/Jahr), das ist ein 3/500stel des Wertes für Beschäftigte in Atomanlagen. Der Grenzwert für die Jahresaktivitätszufuhr von schwerlöslichem Plutonium-238-Oxid liegt also bei (400 Bq x 500/3 = 2,4 Bq). Soweit die reine Lehre. Tatsächlich sind jedoch in einer Reihe von Fällen die Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr höher als erlaubt: Wenn man sie zugrundelegt, kommt man zu Überschreitungen von Dosisgrenzwerten.

Beispiel 3: Beschäftigte in Atomanlagen dürfen nach Anlage IV der Strahlenschutznovelle 200 Becquerel Pu-238 einatmen (alle Pu-Verbindungen außer Pu-Oxid). Daraus folgt jedoch eine Dosis für die Knochenoberfläche von (200 Bq x 0,19 cSv/Bq =) 38 cSv. Dabei wird der Grenzwert um 27 Prozent überschritten. Dosisgrenzwerte können auch bei anderen Radionukliden überschritten werden, wenn man die Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr (Stand: März 1989) zugrundelegt; zum Beispiel um

7 % bei Ingestion von Pu-238,
9 % bei Inhalation von Pu-239/240-Oxiden,
20 % bei Ingestion von Pu-239 und Pu-240,
5 % bei Ingestion von Pu-241,
20 % bei Ingestion von Am-241 und
20 % bei Inhalation von Cm-244.

Solche Werte verstoßen gegen die Grundsätze des Strahlenschutzes, denn vorrangig begrenzend sind die Dosiswerte. Sie müssen in jedem Fall eingehalten werden.

Von den Grenzwerten der Jahresaktivitätszufuhr leiten Strahlenschützer – wiederum aus Gründen der Praktikabilität – einen weiteren Grenzwert ab: Die Abgeleitete Aktivitätskonzentration in Luft (engl. DAC = **D**erived **A**ir **C**oncentration), gemessen in Becquerel pro Kubikmeter Luft. Dabei wird angenommen, daß ein Beschäftigter während der Arbeit pro Jahr 2400 Kubikmeter Luft einatmet. Entsprechend darf dann beispielsweise nach der neuen Strahlenschutzverordnung die Aktivitätskonzentration von Plutonium-239-Oxid (400 Bq : 2 400 m^3 =) 0,17 Becquerel pro Kubikmeter Raumluft betragen.

Tabelle 5 stellt für wichtige Aktiniden die neuen, in Zukunft gültigen Grenzwerte für die Jahresaktivitätszufuhr den bisher geltenden gegenüber. Dabei ergeben sich z.T. große Unterschiede. Denn mit der Novellierung der Strahlenschutzverordnung wurden veränderte Stoffwechselmodelle nach ICRP 30 eingeführt. Wurde bislang nur nach Isotopen unterschieden, so will man jetzt auch, zumindest teilweise, unterschiedliche chemische Formen der Radionuklide berücksichtigen.

Die Novelle ordnet alle Isotope von Neptunium, Americium und Curium jeweils nur einer Löslichkeitsklasse für Inhalation bzw. Ingestion zu und setzt die erlaubten Aufnahmemengen generell herab. Bei Plutonium wird genauer unterschieden, und zwar sowohl nach Isotopen als auch nach der chemischen Form. Für Inhalation gibt es zwei Löslichkeitsklassen, für Ingestion sogar drei. Diese Differenzierung ist sicherlich ein Fortschritt gegenüber der bisherigen Vorgehensweise. In der Praxis wird man jedoch große Schwierigkeiten haben, festzustellen, welche chemisch-physikalischen Formen im konkreten Fall nun vorgelegen haben. Von allen Plutoniumverbindungen sind für die schwerlöslichen Oxide die erlaubten Aufnahmemengen am größten, sogar mehr als bisher erlaubt – angesichts der Probleme beim Abschätzen des Verhaltens und damit der Gefährdung durch inhaliertes Pu-Oxid ein absurdes Vorgehen.

PLUTONIUMNACHWEIS – METHODEN UND MÖGLICHKEITEN

Wer nicht sucht, der findet auch nichts

Nicht nur radioaktive Stoffe, auch die meisten giftigen Chemikalien können wir mit unseren Sinnesorganen nicht wahrnehmen: PCB in der Milch, Atrazin im Trinkwasser, Cäsium im Fischfleisch und Plutonium in der Leberwurst können wir nicht schmecken, riechen oder sehen. Wir sind deshalb auf die Ergebnisse von physikalischen und chemischen Meßverfahren angewiesen: Messungen müssen durchgeführt und die Ergebnisse veröffentlicht werden.
Der Nachweis von Radionukliden wie Cäsium-137, die durchdringende, charakteristische Gamma-Strahlung aussenden, ist noch vergleichsweise einfach. Aus diesem Grund war der Aufbau von unabhängigen Meßstellen nach der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl so erfolgreich. Reine Beta-Strahler wie Strontium-90 oder Alpha-Strahler wie Plutonium lassen sich ungleich schwieriger nachweisen. Wegen der geringen Reichweite der α-Strahlen muß man dabei besondere Verfahren und Tricks anwenden, störende Stoffe vorher abtrennen, geeignete komplizierte Meßapparaturen entwickeln. Dies alles erfordert nicht nur eine entsprechende Laborausrüstung, sondern auch sehr erfahrenes Meßpersonal, das die Messungen vorbereitet, durchführt und auswertet.

1) **Wie die Umgebung von Atomanlagen überwacht wird** oder:

Man findet nur, was man gezielt sucht ...
Nur durch eine Überwachung der Gegend um Atomanlagen läßt sich die Höhe eventueller radioaktiver Vorbelastungen vor Inbetriebnahme der Anlage (Beweissicherung) und die Veränderung durch den Betrieb oder nach Störfällen feststellen.
Bei Atomkraftwerken existiert hinsichtlich Plutonium und anderer α-Strahler eine solche Überwachung praktisch nicht. Nach der „Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen" /80/ nämlich sind keine Plutoniummessungen erforderlich. Lediglich die Abluft muß jedes Jahr achtmal gemessen und auf die langlebige Gesamt-α-Aktivität überwacht werden.
Bei Atomanlagen, in denen mit Plutonium umgegangen wird – wie MOX-Brennelementfabriken oder WAAs – vereinbaren die zuständigen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden mit den Betreibern Messungen und Probennahmen. Dieses gemeinsame Programm legt fest, welche Umweltbereiche in welchem Umfang auf Plutonium zu untersuchen sind.
Die geplante WAA in Wackersdorf sollte zur Atomanlage mit dem republikweit größten Ausstoß von Plutonium und anderen Aktiniden werden. Die DWK hatte beantragt, jedes Jahr über die drei Schornsteine insgesamt
- $1{,}4 \cdot 10^9$ Bq α-Strahler (davon $2{,}75 \cdot 10^8$ Bq Pu-238/239/240) und
- $6 \cdot 10^9$ Bq Pu-241

in die Atmosphäre abzugeben und
- $4{,}44 \cdot 10^8$ Bq α-Strahler (davon $1{,}54 \cdot 10^8$ Bq Pu-238/239/240 und
- $2{,}9 \cdot 10^9$ Bq Pu-241

in die Naab zu leiten.

Wer sich vom DWK-Sicherheitsbericht detaillierte Angaben hinsichtlich des entsprechenden Überwachungsprogramms erhoffte, der wurde enttäuscht. Dort heißt es erschöpfend nichtssagend: Es „werden Luft-, Boden-, Wasser-, Pflanzen- und Nahrungsproben genommen und im Umweltlabor untersucht." Dieses Umweltlabor, das wegen des hohen Radioaktivitätspegels in der Anlage „außerhalb" errichtet wird, enthält die „erforderlichen Laboreinrichtungen zur Erfüllung der Meßaufgaben ... entsprechend dem Stand der Technik ... Die Meßprogramme orientieren sich an der Richtlinie ... Das Umgebungsüberwachungsprogramm wird durch die atomrechtliche Genehmigungsbehörde festgelegt."

Abgesehen davon, daß die „Richtlinie" nichts zu speziellen Plutonium- oder Transuranmessungen sagt, müssen die Bürger also in bezug auf das Programm der Genehmigungsbehörde vertrauen.

2) **Plutonium-Nachweis in Proben** oder: Man findet nur, wovon man weiß, wie es zu finden ist ...

Alpha-Strahler in Luft (Filterproben), Wasser, Boden oder organischem Material lassen sich nur mit speziellen Meßapparaturen nachweisen. Vorbedingung für eine Messung ist jedoch, daß man das Plutonium weitgehend von anderen, störenden Elementen abtrennt und als sehr dünnes Präparat abscheidet. Deshalb steht am Beginn ein zeitraubender und aufwendiger chemischer Trennungs- und Anreicherungsprozeß.

Der „klassische" Pu-Trennungsgang für eine Bodenprobe sieht – kurzgefaßt – etwa so aus:
- Vorbereitung der Probe: Trocknen, evt. veraschen; Zugabe von Pu-242 oder Pu-236 zur Bestimmung der Ausbeute.
- Aufschluß mit Flußsäure (HF), um alle Verbindungen in Lösung zu bringen.
- Naßchemische Trennung von anderen Elementen durch Redox- und Fällungsreaktionen, Extraktionen und Ionenaustausch.
- Elektrolytische Abscheidung von Plutonium.
- Aktivitätsbestimmung.

Die Aktivitätsbestimmung geschieht in der Regel durch α-Spektrometrie. Alphateilchen werden dabei in elektromagnetische Strahlung umgewandelt, die wiederum über eine elektronische Nachweisapparatur in ein Spektrum umgewandelt wird. Anhand dieses Spektrums kann man dann die α-strahlenden Isotope identifizieren. Mit den Meßgeräten lassen sich noch sehr geringe Mengen Plutonium nachweisen. Die Grenze liegt bei ungefähr (10 Femtocurie =) 0,4 Millibecquerel. Das entspricht etwa $4 \cdot 10^8$ Atomen oder $1{,}6 \cdot 10^{-13}$ Gramm Pu-239 /81/. Diese hohe Empfindlichkeit hat einen hohen Preis: Bei Aktivitäten im Bereich der Nachweisgrenze dauert die Meßzeit etwa einen Tag; die statistische Fehlerquote beträgt 33 Prozent. Rechnet man den aufwendigen Analysegang mit ein, so kann eine Arbeitskraft etwa zwei bis vier Bestimmungen pro Woche nach der Standardmethode durchführen /82/.

Rückschlüsse auf die Isotopenzusammensetzung lassen die Verfahren nur eingeschränkt zu. So kann man im α-Spektrum Pu-240 kaum von Pu-239 unterscheiden, weil ihre α-Energien sehr ähnlich sind (deshalb werden in Veröffentlichungen auch immer Pu-239 + 240 gemeinsam angegeben). Mit einer bestimmten Methode läßt sich im niedrigen Energiebereich Pu-241 messen; die anderen α-strahlenden Isotope treten als ein gemeinsamer Peak im höheren Energiebereich auf. Ansonsten kann Pu-241 über das Tochterprodukt Am-241 gemessen werden; allerdings muß man dazu ein bis zwei Jahre warten, bis sich genügend Americium gebildet hat.
Der Nachweis von Plutonium erfordert also

- viel Zeit
- eine entsprechende Laborausstattung
- spezielle Meßgeräte
- und fachkundiges Personal mit viel Übung und Erfahrung;

mit anderen Worten: viel Geld. Aus diesem Grund sind nur wenige Einrichtungen wie Kernforschungszentren, Großforschungseinrichtungen, einige staatliche Labors und Universitätsinstitute in der Lage, Plutonium zu messen. Damit wird „eine wirksame Überwachung der Umwelt nach einer Freisetzung praktisch undenkbar" /83/.
„Qualitätskontrollen" anhand sogenannter Ringvergleiche hat unseres Wissens bislang weder für Plutonium noch für andere Aktiniden in Nahrungsmitteln irgendwer durchgeführt. Bei solchen Ringvergleichen, die von staatlichen Einrichtungen wie dem Bundesgesundheitsamt oder Bundesforschungsanstalten für andere Stoffe veranstaltet werden, können die (freiwillig) teilnehmenden Labors anhand einer Probe unbekannter Aktivität Aussagen über die Qualität ihrer Messungen gewinnen und mögliche systematische Fehler entdecken.

3) **Plutoniumsuche im menschlichen Körper** oder: Man findet längst nicht alles, was man gezielt sucht

Am Arbeitsplatz gibt es verschiedene Möglichkeiten der Plutonium-Überwachung: Man kann entweder die Aktivität vor Eintritt in den Körper messen (Raumluftüberwachung), die ausgeschiedene Aktivität bestimmen (Ausscheidungsmessung) oder die Aktivität im Körper selbst nachweisen (in vivo Messung, also Messung am lebenden Körper). Nach Zwischenfällen läßt sich die inhalierte Aktivität z.B. auch durch eine Schneuzprobe (Messung eines Papiertaschentuchs) grob abschätzen. Die Meßverfahren müssen nicht nur den Nachweis gestatten, daß die Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr eingehalten werden. Noch wesentlicher ist, ob durch sie gemäß der Richtlinie des Bundesinnenministeriums für die physikalische Strahlenschutzkontrolle „eine Inkorporation zu Beginn der Überwachungsperiode oberhalb 1/20 der Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr ... auch an deren Ende noch erkannt wird." /84/
Kein Verfahren erlaubt es, diese Vorgabe einzuhalten.

Überwachung der Luftaktivität

Der Hauptbelastungspfad am Arbeitsplatz ist die Inhalation. Mit speziellen Luftstaubsammlern, die die Raumluft ansaugen und Partikel ausfiltern, wird deshalb die Luftaktivität kontrolliert. Hauptproblem dabei ist, daß innerhalb eines Raumes die Aktivitätskonzentrationen oft extrem (bis zum Faktor 1000!) unterschiedlich sind. Daher können die in den Luftstaubsammlern abgeschiedenen Aktivitäten völlig anders ausfallen als die Mengen, die ein Mensch eingeatmet hat. Es gibt mittlerweile kleine tragbare, „persönliche" Luftsammler, die in die Brusttasche eines Arbeitskittels passen. Für die Plutoniumkontrolle sind sie jedoch kaum geeignet. Denn ihr Luftdurchsatz und damit die abgeschiedene Aktivität sind zu niedrig.

Ausscheidungsmessungen

Bestimmte Anteile des eingeatmeten Plutoniums werden über die Nieren oder den Verdauungstrakt wieder ausgeschieden. Aktivitätsmessungen in Urin oder Stuhl lassen daher Rückschlüsse auf die insgeamt zugeführte Aktivität zu.
Ausscheidungsmessungen werden bei Beschäftigten, die mit Plutonium umgehen, regelmäßig oder aus besonderem Anlaß durchgeführt. Zur routinemäßigen Kontrolle wird meist alle halbe Jahre Urin gesammelt (24-Stunden-Urin) und radiochemisch analysiert. Entdecken die Meßgeräte dabei Plutonium, so müssen die Strahlenschützer die Aktivitätswerte auf die ursprüngliche Zufuhr zurückrechnen – und zwar mit Hilfe von Formeln, die auf den Ergebnissen der Langham-Versuche an 18 Krankenhauspatienten beruhe (vergl. Kap. 6). Daß diese Formeln kaum geeignet sind, um bei gesunden Beschäftigten von Ausscheidungen auf die inhalierten Plutonium-Teilchen zu schließen, liegt auf der Hand. Entsprechend ungenau fallen die Abschätzungen aus: Mit Fehlern um den Faktor 10 und mehr ist zu rechnen. Je länger die Inkorporation zurückliegt, desto unsicherer das Meßergebnis.
Mit Urinanalysen lassen sich zudem nur die löslichen Plutoniumanteile abschätzen. Schwerlösliche Verbindungen wie Pu-Oxid werden in den ersten Wochen und Monaten nach der Inkorporation nämlich nur langsam von der Lunge in die Blutbahn aufgenommen und über die Niere ausgeschieden. Fällt die Urinanalyse negativ aus, so heißt das nicht zwangsläufig, daß in der Lunge tatsächlich kein Plutonium vorhanden ist. Urinanalysen in halb- oder ganzjährlichem Abstand im Rahmen der Routineüberwachung sind deshalb ein „unzuverlässiges Kontrollinstrument" /43/.
Hinweise auf eine Inkorporation von schwerlöslichen Verbindungen kann dagegen die **Stuhlanalyse** liefern, die jedoch nicht regelmäßig, sondern nur bei Messungen aus besonderem Anlaß vorgenommen wird. Bei dem Verdacht beispielsweise, daß ein Mitarbeiter eine erhöhte Menge inhaliert hat. Grundlage dieser Nachweismöglichkeit ist, daß unlösliche Partikel von den Flimmerhärchen im Atemtrakt wieder in den Rachen transportiert und dann verschluckt werden, schließlich in den Darm gelangen und ausgeschieden werden. Da dies überwiegend in den ersten Tagen geschieht, müssen solche Untersuchungen möglichst früh und umfassend stattfinden. Rückschlüsse auf die ursprünglich aufgenommene Aktivität sind ebenfalls mit größeren Fehlern behaftet – besonders wenn – wie es häufig vorkommt – nichts über die Größe der inhalierten Teilchen und damit das „Ausscheidungstempo" bekannt ist. „Nur unter günstigen Umständen und bei häufigen Stichproben" ist daher der Nachweis einer Plutonium-Inkorporation unterhalb der zulässigen Grenzwerte möglich /83/.

Lungenzähler

Diese dritte Methode hat – zumindest theoretisch – den Vorteil, daß die Aktivität im Körper direkt von außen gemessen und damit die zu erwartende Strahlenbelastung abgeschätzt werden kann. Soweit die graue Theorie; tatsächlich halten selbst ihre langjährigen Anwender und Entwickler diese Theorie für „im allgemeinen nicht so empfindlich wie die Ausscheidungsmessungen oder die Raumluftmessung" /85/.
Das Meßverfahren für Pu-239 nutzt aus, daß der α-Zerfall von einer charakteristischen Röntgenstrahlung begleitet wird. Diese Röntgenstrahlung ist jedoch erstens selten (im Mittel 4,5 Prozent der α-Zerfälle) und zweitens so schwach, daß ihr weitaus überwiegender Teil bereits im Körper absorbiert wird. Deshalb dringt nur sehr wenig Strahlung nach außen und kann von den speziellen Detektorsystemen erfaßt werden. Ein Beispiel: Bei einer Lungenbelastung von 600 Bq Pu-239 tritt durch eine

Christine und Christopher Merlin klagen gegen die Betreiberfirma der englischen WAA Sellafield, BNFL (British Nuclear Fuels). Sie haben in der Nähe der Anlage gewohnt, bis eines Tages in ihrem Haus Plutoniumspuren gefunden wurden. Das Haus mußten sie weit unter Preis verschleudern. Foto: pa

Fläche von hundert Quadratzentimetern im Bereich des Brustkorbs pro Minute nur ein Röntgenquant! /85/. Da schon etwa sechs Millimeter dickes weiches Gewebe die Strahlenintensität um die Hälfte abschwächt, muß die Brustwanddicke des Patienten durch Ultraschallmessungen genauestens bestimmt werden.

Die Auswertung der Messung ist eine höchst komplizierte Angelegenheit. Zunächst einmal muß ein „Nettospektrum" ermittelt werden. Dazu zieht man vom gemessenen Spektrum der untersuchten Person das Spektrum einer nichtbelasteten Vergleichsperson mit den gleichen Körperproportionen und dem gleichen Gehalt an Kalium-40 und Cäsium-137 ab. Das ist notwendig, weil der „Peak" von Plutonium durch die Strahlung anderer radioaktiver Stoffe überdeckt wird. Auswerten läßt sich das erhaltene Nettospektrum jedoch nur indirekt: durch Vergleich (Kalibrierung) mit einem sogenannten „Phantomspektrum". Dieses erhält man durch Messung eines Phantoms, also eines Teilkörpermodells, das möglichst genau dem Rumpf der untersuchten Person entsprechen muß und in dessen Inneren, z.B. in dessen „Lunge", bestimmte Plutonium-Aktivitäten plaziert worden sind.

Die untere Nachweisgrenze des Phoswich-Lungenzählers, der im Kernforschungszentrum Karlsruhe steht und speziell für den Plutonium-Nachweis entwickelt wurde, liegt theoretisch zwischen etwa 100 Bq bei sehr schlanken und 1000 Bq bei sehr dicken Personen. Diese Angaben gelten jedoch nur unter **idealen Meßbedingungen!** Das bedeutet u.a.:

- Pu-239 muß homogen in der Lunge verteilt sein.
- Außer Pu-239 und der natürlichen Radioaktivität dürfen keine anderen radioaktiven Stoffe im Körper vorhanden sein
- Zur Auswertung müssen geeignete Vergleichsspektren vorliegen.

Solche idealen Meßbedingungen kommen in der Realität nicht vor:

- Plutonium ist höchst ungleichmäßig in der Lunge und den pulmonalen Lymphknoten verteilt.
- Die Anwesenheit anderer radioaktiver Stoffe erhöht die Nachweisgrenze. Eine gleichmäßig über die Knochenoberfläche verteilte Americium-241-Aktivität kann z.B. eine etwa gleich große Lungenbelastung vortäuschen.
- Tschernobyl hat zu einer erhöhten Ganzkörperbelastung mit Cäsium-Isotopen geführt. Deshalb sind – bis auf weiteres – die vorhandenen Referenzspektren von unbelasteten Personen völlig unbrauchbar geworden.
- Die charakteristische Röntgenstrahlung der Cäsium-Isotope hat nach Tschernobyl laut Berichten des Kernforschungszentrums Karlsruhe zu einer „massiven" Erhöhung der Nachweisgrenze geführt /56/. Was unter „massiv" zu verstehen ist, wird dort nicht näher erklärt. Dennoch läßt sich die Größenordnung vielleicht verdeutlichen: Für Americium-241 soll nämlich durch Tschernobyl die Nachweisgrenze von vorher 4 Bq auf 50 bzw. 25 Bq angestiegen sein. Diese Erhöhung der Nachweisgrenze für Am-241 umd das 6- bis 12fache nennt der KfK-Bericht „mäßig".
- Von der insgesamt eingeatmeten Aktivität bleibt nur ein bestimmter Bruchteil in der Lunge. Die Modelle rechnen mit 25 Prozent – der Rest wird ausgeatmet bzw. ausgeschieden. Es ist deshalb unzulässig, die Nachweisgrenze des Lungenzählers auf die Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr zu beziehen. Denn die gelten ja für die dem Körper insgesamt zugeführte Aktivität.

Unter normalen Umständen läßt sich eine Lungendosis also erst dann abschätzen, wenn der Grenzwert deutlich überschritten ist. Gleiches gilt für die Knochenbelastung: Auch hier sind die Detektorsysteme zu unempfindlich und können daher eine Plutonium-Belastung unterhalb der Grenzwerte nicht direkt messen.

Wegen der hohen Nachweisgrenze versucht man deshalb, Plutonium **indirekt** zu bestimmen, und zwar über den Nachweis von leichter meßbaren Nukliden wie Am-241. Dies ist jedoch nur möglich, wenn beide Nuklide gleichzeitig inkorporiert wurden **und** ihr Verhältnis zueinander genau bekannt ist. Letzteres ist jedoch selten der Fall.

Der Karlsruher Lungenzähler konnte bisher nur ein einziges mal eine Pu-Verseuchung **direkt** nachweisen: Bei einem Mann, der 1983 „bei einem Zwischenfall im Ausland" mit Plutonium und Am-241 verseucht wurde. Damals ermittelte man nach schwieriger Auswertung eine Lungenaktivität von 2300 Bq Pu-239 – mit einem Gesamtfehler von 50 bis 70 Prozent /85/.

Fazit: Ob die Grenzwerte für Beschäftigte beim Umgang mit Plutonium eingehalten werden, läßt sich kaum und nur unter günstigen Bedingungen überprüfen. Für die Bevölkerung ist eine solche Überprüfung völlig illusorisch. Denn die erlaubte Jahresaktivitätszufuhr ist viel zu gering, als daß sie noch gemessen werden könnte. Allenfalls nach unserem Tod könnte eine Autopsie eventuell feststellen, ob wir im Laufe unseres Lebens mehr Plutonium als „zulässig" in unseren Körper aufgenommen haben. Aber das ist wohl doch ein bißchen spät.

PLUTONIUM: EINE AKTUELLE KONTROVERSE

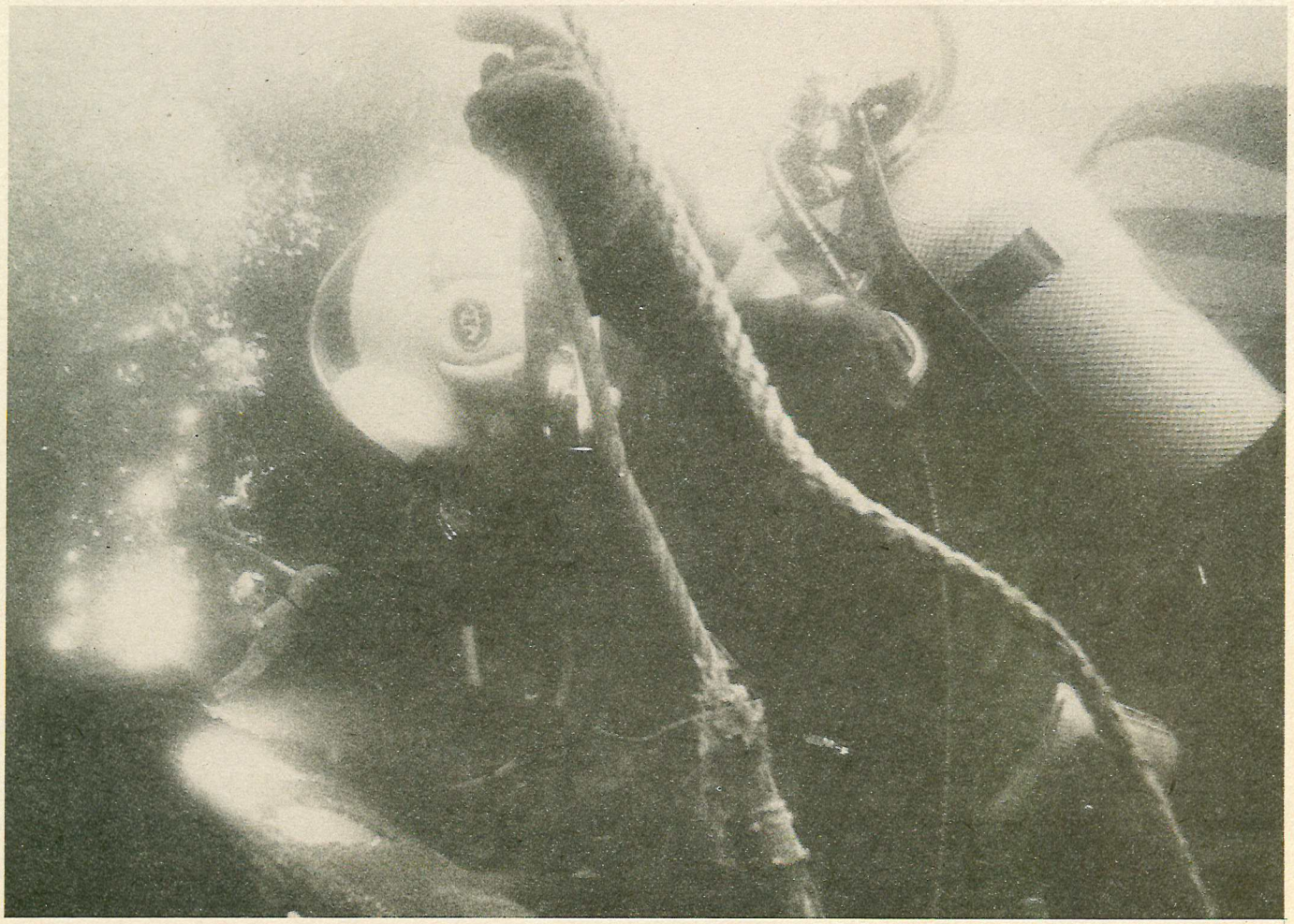
VIII

Die SPD, einst Befürworter einer weiter ausgebauten Plutonium-Wirtschaft, hat ihre Meinung revidiert und im April letzten Jahres beim Bundesverfassungsgericht eine Klage eingereicht: Die Nutzung von Plutonium, die das Atomgesetz zuläßt, verstoße gegen die Verfassung. Denn nach Artikel 2 Abs. 2 des Grundgesetzes ist der Staat verpflichtet, die körperliche Unversehrtheit der Bürger zu schützen. Ein effektiver Schutz ist beim Umgang mit Plutonium jedoch nicht möglich /86/.

Eine wesentliche Grundlage dieser Klage ist das Gutachten „Die Gefahr von Strahlenschäden durch Plutonium" von H. Kuni, Professor für Nuklearmedizin an der Universität Marburg /83/. Mit großer Sachkenntnis und einer Fülle von Details legt Kuni den neuesten Wissensstand zu diesem hochgiftigen Element dar. Klage und Gutachten treffen einen Lebensnerv der Atomindustrie – schließlich geht es hier um die Zukunft in Gestalt großtechnischer Wiederaufarbeitung und den möglichen Einstieg in die Brüterwirtschaft. Die Diskussion um die Gefährlichkeit von Plutonium – lange Zeit nur auf Sparflamme geführt – ist deshalb wieder voll in Gang gekommen. Anfang dieses Jahres erschienen zwei Veröffentlichungen des Kernforschungszentrums Karlsruhe /87, 88/, und Anfang April 1988 legte die Strahlenschutzkommission eine Empfehlung mit Materialsammlung vor. Schlußfolgerungen der SSK: Plutonium benötigt keine Sonderbehandlung; für Beschäftigte in Atomanlagen läßt sich ein Einhalten der Grenzwerte sicherstellen. Zur Zeit, so die SSK weiter, verursachen andere Radionuklide aus Atomanlagen höhere Dosen als Plutonium; auch bei einer WAA liegt die Strahlenbelastung unter den Grenzwerten und damit im Schwankungsbereich der natürlichen Strahlenbelastung /89/.

Die Strahlenkommission des Bundes für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. hat ebenfalls eine Stellungnahme zum Verfahren herausgegeben. Sie trägt Argumente vor, die das Kuni-Gutachten ergänzen, vor allem grundlegende Betrachtungen zu Dosis-Wirkungs-Beziehungen und Grenzwertfestlegungen. Ein Fazit: Angesichts von Schutzvorschriften, die auf veralteten Vorstellungen beruhen und längst überholte Dosisgrenzwerte enthalten, sind weder Erzeugung noch Umgang mit Plutonium verantwortbar /90/.

Es würde die Grenzen dieses RESTRISIKO-Heftes weit sprengen, wenn wir auf die jeweiligen Kritikpunkte und dazugehörigen Erwiderungen detailliert eingingen. Allen, die sich intensiver damit beschäftigen wollen, sei die Lektüre der Original-Veröffentlichungen empfohlen; bei Greenpeace oder der Gruppe Ökologie sind auch weitergehende Informationen erhältlich.



2. 6. 1987: Am 2. 6. 1987 gelingt es zwei Greenpeace-Tauchern, das Abflußrohr von Sellafield zu verschließen, durch das täglich etwa 6 Millionen Liter radioaktive Abwässer in die Irische See geleitet werden. Hier einer der beiden Taucher bei der Generalprobe. Foto: Greenpeace/T.M.

Berichtigung und Nachtrag zu RESTRISIKO Nr. 3/4:
Auf S. 37 heißt es dort, daß Höchstwerte für Radioaktivität nach atomaren Unfällen in Futtermitteln und Nahrungsmitteln von „geringer Bedeutung" auf EG-Ebene bisher noch nicht festgelegt sind. Zu Futtermitteln hat sich nun die Strahlenschutzkommission (SSK) geäußert, und zwar in einer „Empfehlung zur Festlegung von Höchstwerten an Radioaktivität in Futtermitteln im Falle eines nuklearen Unfalls oder einer anderen radiologischen Notstandssituation" (veröffentlicht im Bundesanzeiger Nr. 208 vom 5. November 1988). Eigentlich ist die SSK, sagt sie, zwar gegen solche Festlegungen. Wenn es jedoch sein muß, empfiehlt sie dem Umweltbundesminister, bei den EG-Beratungen bestimmte Höchstwerte vorzuschlagen. Die folgende Tabelle führt diese Werte auf – entsprechend den vier Klassen von Radionukliden. Sie gelten für eine **zeitlich unbeschränkte** Verfütterung nach einem Atomunfall und sollen so festgelegt sein, daß die EG-Höchstwerte in Nahrungsmitteln (vergl. Tabelle 14 in RESTRISIKO Nr. 3/4) nicht überschritten werden. Mit bestimmten Auflagen – Kennzeichnung oder zeitliche Beschränkung – sollen jedoch sogar **zehnmal höher** verseuchte Futtermittel verwertet werden können.
Die Werte werden für die vier Nuklidgruppen nach folgendem Ansatz berechnet: Konzentration im Futter = Höchstwert in Milch bzw. Fleisch dividiert durch tägliche Futtermenge mal Transferfaktor Futter-Fleisch bzw. Futter-Milch. In der Aktinidengruppe hat Americium-241 die höchsten Transferfaktoren, deshalb wird damit gerechnet.
Diese Empfehlungen sind Endprodukte einer erschreckenden Denkweise: Auf die Höchstwerte in Nahrungsmitteln, die per **Euratom** festgelegt sind und über die man deswegen offenbar nicht mehr nachdenken muß, wende man blind Rechenformeln an, in die höchst unsichere Faktoren eingesetzt werden. Die Ergebnisse muten dann wie ein grotesker Witz an: 2,5 Millionen Becquerel Plutonium-239 pro Kilogramm Rindermastfutter sind erlaubt oder mehr als 600 000 Becquerel pro Kilogramm Gras: Kein Karikaturist, der „wissenschaftliche" Methoden persiflieren will, hätte es sich besser ausdenken können.
Ein wenig bedenklich müssen die Werte aber selbst der SSK vorgekommen sein. Sie räumt zumindest ein, daß „eventuell die chemisch-toxische Wirkungvon Am und Pu auf Nutztiere einer längeren Verfütterung entgegensteht (dies ist von Toxikologen zu prüfen)"! Unseres Wissens ist dies übrigens das erste Mal, daß die SSK bei Höchstwertempfehlungen solche Prüfungen angeregt hat.

Andere Überlegungen und Anregungen fehlen, obwohl sie mehr als angebracht wären. Wer soll mit solchem Futter-„Material" umgehen? Landwirte im Strahlenschutzanzug mit Atemschutzmaske? Was soll mit stark radioaktiver Gülle geschehen? Will man analog zur Molkeentseuchungsanlage nun eine Gülle-Entseuchungsanlage bauen? Und wie sollen die Tiere geschützt werden?

	Radionuklidgruppe			
Tier- und Nutzungsart	Sr-90	I-131	Am-241/ Pu-239	Cs-137
Milchkuh	3.900	10.000	**62.000**	12.000
Milchziege	4.400	1.200	2,5 Mio	8.000
Milchschaf	4.400	1.200	n.*)	8.000
Kuh (Fleisch)	75.000	31.000	1,2 Mio	2.600
Mastrind	150.000	62.000	2,5 Mio	5.200
Mastkalb	**190.000**	330.000	n.*)	1.600
Mastschwein	150.000	260.000	800.000	1.200
Schaf (Fleisch)	120.000	330.000	400.000	4.100
Ziege (Fleisch)	120.000	330.000	400.000	4.100
Lamm	**190.000**	150.000	n*)	1500
Huhn (Fleisch)	180.000	**1,7 Mio**	**3,3 Mio**	2.200
Huhn (Ei)	21.000	5.900	73.000	51.000

Empfehlungen der SSK für Höchstwerte in Futtermitteln für den freien Verkehr ohne zeitliche Begrenzung; in Becquerel pro Kilogramm Trockensubstanz. Die niedrigsten Werte für die Radionuklidgruppe sind unterstrichen, die höchsten fettgedruckt. n*) = kein Wert angegeben

– Das Kampfflugzeug auf dem Photo auf Seite 17 ist keine Phantom, sondern ein Tornado – also schneller und schwerer als eine Phantom.

– Auf Seite 22, 2. Spalte, 22. Zeile von oben, muß es natürlich heißen: 500 Kilogramm Plutonium. Es handelt sich um einen bloßen Tippfehler; die Angaben in Tabelle 3, die der Folgenberechnung zugrundeliegen, sind korrekt.

– In den Abbildungen 5 und 6 (Seiten 28 und 30) ist der WAA-Standort nicht korrekt eingezeichnet. Er ist etwa 9 mm zu weit nach Norden und 5 mm zu weit nach Westen „gerutscht". Dementsprechend verschieben sich auch die Kreise. Das ist ein rein graphischer Irrtum; die zugehörigen Berechnungen und Tabellen sind korrekt.
(Diese Korrekturen sind in der 2. Auflage von Nr. 3/4 – von Mitte 1989 – bereits berücksichtigt.)

Quellennachweis

/1/ B. Manstein: Strahlen, S. Fischer Verlag, Frankfurt a.M., 1977

/2/ E. Fermi: Possible Production of Elements of Atomic Number Higher than 92; Nature 133 (1934), S.898

/3/ I. Noddak: Über das Element 93; Angew. Chem. 47 (1934), S.653

/4/ O. Hahn & F. Straßmann: Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden ERdalkalimetalle; Naturwissenschaften 27 (1939), S.11

/5/ O. R. Frisch: Desintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction; Nature 143 (1939), S.239

/6/ E. M. McMillan & P. H. Abelson: Radioactive Element 93; Phys. Rev. 57 (1940), S. 1185

/7/ J. W. Kennedy, G. T. Seaborg, E. Segrè, A. C. Wahl: Properties of 94 (239), Phys. Rev. 70 (1946), S. 555

/8/ G. T. Seaborg u.a.: Nuclear Properties of U-233: A New Fissionable Isotope of Uranium; Phys. Rev. 71 (1947), S. 378

/9/ B. B. Cunningham & L. B. Werner: The First Isolation of Plutonium; Am. Chem. Soc. J. 71 (1949), S. 1521

/10/ L. H. Hempelmann u.a.: What Happened to the Survivors of the Early Los Alamos Nuclear Accidents?

in: K. F. Hübner & S. A. Fry: The Medical Basis for Radiation Accident Preparedness, Proceedings of the REAC/TS International Conference, October 18 – 20, 1979, Oak Ridge, Tennessee, USA

/11/ D. Albright: World Inventories of Plutonium; PU/CEES Report No. 195 (rev.1), June 1987

/12/ Address by President Eisenhower before the United Nations General Assembly, December 8, 1958 from the Congressional Record, Vol. 100, Jan. 7, 1954, S. 61

auch in: W. C. Patterson: The Plutonium Business and the Spread of the Bomb; Paladin Books, London, 1984

/13/ Mehrfachrezyklierung von Plutonium und Uran in Thermischen Reaktoren, Ergebnisse eines Statusseminars im Bundesministerium für Forschung und Technologie am 14. 10. 1981

/14/ G. T. Seaborg & M. L. Perlman: Search for Elements 94 und 93 in Nature. Presence of 94^{239} in Pitchblende; Am. Chem. Soc. J. 70 (1948), S. 1571

/15/ D. C. Hoffman u.a.: Detection of Plutonium-244 in Nature; Nature 234 (1971), S. 132

/16/ V. E. Noshkin & K. M. Wong: Plutonium Mobilization from Sedimentary Sources to Solution in the Marine Environment; in Proceedings of the Third NEA Seminar on Marine Radioecology, Tokyo, 1 – 5 Ocotber, 1979, Nuclear Energy Agency, OECD, 1980, S. 165

/17/ F. L. Boschke: Kernenergie. Eine Herausforderung unserer Zeit; Birkhäuser Verlag, Basel, 1988

/18/ T. Kumatori u.a.: Follow-up Studies over a 25-Year Period on the Japanese Fishermen Exposed to Radioactive Fallout in 1954; in: s. /10/

/19/ Hannoversche Allgemeine Zeitung vom 21. 8. 1986

/20/ die tageszeitung vom 13. 11. 1985

/21/ L. S. Spector: The Undeclared Bomb; Ballinger Publishing Company, Cambridge, Mass. 1988

/22/ Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresberichte 1978 bis 1985; (Hrg): Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheite (ab 1984, davor: Bundesminister des Innern)

/23/ E. Iranzo u.a.: Air Concentrations of ^{239}Pu and ^{240}Pu and Potential Radiation Doses to Persons Living near Pu-Contaminated Areas in Palomares, Spani; Health Physics, 52 (1987), S. 453

/24/ A. Aarkrog u.a.: Further Studies of Plutonium and Americium at Thule, Greenland; Health Physics, 52 (1984), S. 29

/25/ The Greenpeace Campaign für Nuclear Free Seas.

/26/ *) D. E. Kaplan: Whe Incidents are Accidents. The Silent Saga of the Nuclear Navy. Oceans, July 1983, S. 26

/27/ WISE, World Information Service on Energy, Nr. 310 (14. 4. 1989)

/28/ Bull. of the Atomic Scientists, April 1989, S. 7

/29/ E. P. Hardy u.a.: Global Inventory and Distribution of Fallout Plutonium; Nature 241 (1973), S. 444

/30/ H. Kautsky: The North Sea Region taken as an Example for the Behaviour of Artificial Radioisotopes in Nearshore Sea Areas; in s. /16/, S. 283

/31/ M. Kurabayashi u.a.: Concentration Faktors of Marine Organisms used for the Environmental Dose Assessment; in: s. /16/, S. 335

/32/ World Nuclear Industry Handbook 1989

/33/ DER SPIEGEL Nr. 28, 1987

/34/ P. Leventhal & Y. Alexander: Preventing Nuclear Terrorism; Lexington Books, Massachusetts, 1987

/35/ Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 1985, (Herausgeber: Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit)

/36/ Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 1977, (Herausgeber: Bundesminister des Innern)

/37/ E. Browne & R. B. Firestone: Table of Radioactive Isotopes; John Wiley & Sons, New York, 1986

/38/ W. Marshall: Nuclear Power Technology, Vol. 1 (Reactor Technology); Clarendon Press, Oxford, 1983

/39/ F. W. Whicker & V. Schultz: Radioecology: Nuclear Energy and the Environment, Band I; Boca Raton, Florida 1982

/40/ ICRP: The Metabolism of Plutonium and Related Elements; ICRP 48, Oxford 1986

/41/ WHO: Nuclear Power – Health Implications of Transuranium Elements; WHO Regional Publ., European Series Nr. 11, Kopenhagen 1982

/42/ L. W. Hersloff & J. C. Corey: Uptake of three Isotopes of Plutonium from Soil by Sweet Corn grown in an Growth Chamber; in: Adriano & Bribin (Hrsg.): Environmental Chemistry and Cycling Processes, DOE Sympos. Series, CONF-760429, 1978

/43/ A. Blum & H. Kuni: Bericht zum BMFT-Projekt „Arbeitsbedingungen in nuklearen Wiederaufarbeitungsanlagen", Projektabschnitt II, Teil 1: Wissensstand über Strahlengefährdung; Marburg 1985

/44/ M. E. Ennis u.a.: A Specific Activity Effect in the Metabolism of Tc; Health Phys. 54 (1988), S. 157

/45/ Bundesminister des Innern: Allgemeine Berechnungsgrundlage für die Strahlenexposition bei radioaktiven Ableitungen mit der Abluft oder in Oberflächengewässer; GMBl. 30, Nr. 21, 1979 (sowie Korrekturen/Anderungen in den folgenden Jahren)

/46/ H. Schüttelkopf: Das Verhalten von Plutonium in der Umgebung des Kernforschungszentrums Karlsruhe; KfK 3034, 1981

/47/ Stellungsnahme von H. Schüttelkopf zum WAA-Wackersdorf-Prozeß; Juli 1986

/48/ Gutachter-ARGE: Gutachten für das atomrechtliche Genehmigungsverfahren über die Sicherheit der WAA Wackersdorf, Radioökologiegutachten; 2. Statusbericht, 1985

/49/ K. Bunzl & W. Kracke: Cumulative Deposition of ^{137}Cs, ^{238}Pu, $^{239+240}$Pu and ^{241}Am from Global Fallout in Soils from Forest, Grassland and Arable Land in Bavaria (FRG); J. Environ. Radioactivity 8 (1988), S. 1

/50/ J. E. Pinder u.a.: The Interception and Retenion of ^{238}Pu Deposition by Orange Trees; Health Phys. 52 (1987), S. 707

/51/ G. Hartmann & K. Bächmann: Pu and Other Trace Elements in/on Plants; J. Environ. Radioactivity 8 (1988), S. 21

/52/ Bundesminister des Innern: Statusbericht über den Transfer von Radionukliden; 2. Aufl., Bonn 1981

/53/ Workshop on the Measurement of Soils to Plant Transfer Factors for Radionuclides; Wageningen 1982

/54/ M. Pimpl: Untersuchungen zum Boden/Pflanzen-Transfer von Np-237, Pu-238, Am-241 und Cm-244; KfK 4452, 1988

/55/ D. C. Adriano u.a.: Long-Term Availability of Cm and Pu to Crop Plants; Health Phys. 50 (1986), S.647

/56/ KfK: Jahresbericht 1986 der Hauptabteilung Sicherheit; KfK 4207, 1987

/57/ W. F. Beckert & F. H. Au: Transuranium Nuclides in the Environment, IAEA 1976; zit. in BMI/AGU (Hrsg.): Radioökologiesymposium, 15./16. 10. 1981, Stuttgart, S. 157

/58/ KfK: Jahresbericht 1985 der Hauptabteilung Sicherheit; KfK 4067, 1986

/59/ Cäsium-Meßwerte der Radioaktivitätsmeßstelle der Universität Oldenburg für die Zeit vom 20. 01. 89 bis 16. 02. 89

/60/ KfK: Jahresbericht 1984 der Hauptabteilung Sicherheit; KfK 3883, 1985

/61/ G. Müller-Brunecker: Zum Verhalten von Cäsium, Strontium, Jod und einiger Transurane in Nutztieren; GSF-Bericht S-935, Neuherberg 1982

/62/ Bundesminister des Innern: Störfallberechnungsgrundlagen für die Leitlinien des BMI zur Beurteilung der Auslegung von Kernkraftwerken mit DWR gemäß § 28 Abs. 3 StrlSchV; Bundesanzeiger Nr. 245a, 31. 12. 1983

/63/ SSK: Empfehlung zur Festlegung von Höchstwerten an Radioaktivität in Futtermitteln im Falle eines nuklearen Unfalls oder einer anderen radiologischen Notstandsituation; Bundesanzeiger Nr. 208, 1988

/64/ T. J. Sumerling u.a.: Uptake of Radionuclides by Farm Animals close to a Major Nuclear Installation; in: Radiation – Risk – Protection, 6. Internat. Kongreß der IRPA, Berlin 1984, S. 156

/65/ E. Kapfelsberger & U. Pollmer: Iß und stirb; Köln 1982

/66/ W. H. Langham u.a.: Distribution and Excretion of Plutonium Administered Intravenously to Man; Health Phys. 8 (1980), S. 1031

/67/ W. H. Langham u.a.: The Los Alamos Scientific Laboratory's Experience with Plutonium in Man; Health Phys. 8 (1962), S. 753

/68/ ICRP: Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation; ICRP 2, New York 1959

/69/ ICRP: Limits of Intakes of Radionuclides by Workers; ICRP 30, Oxford 1979 – 81 (versch. Bände und Anhänge)

/70/ ICRU: The Quality Factor in Radiation Protection; ICRU Report 40, Bethesda/USA, 1986

/71/ D. L. Preston & D. A. Pierce: The Effects of Changes in Dosimetry on Cancer Mortality Risk Estimates in the Atomic Bomb Survivors, RERF TR-9-87, Hiroshima 1987

/72/ G. H. Lyman u.a.: Association of Leukemia with Radium Groundwater Contamination, J. Am. Med. Assoc. 254 (1985)

/73/ B. Splieth: Plutonium; Rowohlt Taschenbuch, Reinbek 1987

/74/ ICRP: Biologische Wirkungen von inhalierten Radionukliden; ICRP 31, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart 1987

/75/ M. F. Sullivan & P. S Ruemmler: Absorption of ^{233}U, ^{237}Np, ^{238}Pu, ^{241}Am and ^{244}Cm from the Gastrointestinal Tracts of Rats fed an Iron-Deficient Diet; Health Phys. 54 (1988), S. 311

/76/ ICRP: The Metabolism of Compounds of Plutonium and other Actinides; ICRP 19, Oxford 1982

/77/ M. F. Sullivan & L. S. Gorham: Can Information on the Gastrointestinal Absorption of Actinide Elements by Neonatal Rats, Guinea Pigs, Dogs and Swine be extrapolated to Man? Health Phys. 44 (1983), Suppl. S. 411

/78/ R. L. Kathren u.a.: Partitioning of ^{238}Pu, ^{239}Pu and ^{241}Am in Skeleton and Liver of U.S. Transuranium Registry Autpsy Cases; Health Phys. 54 (1988), S. 181

/79/ R. G. Thomas u.a.: Plutonium in Gonads: A Summary of the Current Status; Health Phys. 48 (1985), S. 7

/80/ Bundesminister des Innern: Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen; GMBl 1979, S. 668

/81/ Bestimmungsmethoden für Plutonium, angewandt im Bereich der Entsorgung; KFK 3578, 1983 (verschiedene Vorträge)

/82/ Arbeitskreis Umweltüberwachung des Fachverbandes für Strahlenschutz: Empfehlungen zur Überwachung der Umweltradioaktivität; FS-78-15-AKU, 1979/1982

/83/ H. Kuni: Die Gefahr von Strahlenschäden durch Plutonium. Konsequenzen für das Atom- und Strahlenschutzrecht aus medizinischer Sicht; Gutachten im Auftrag der Landesregierung Nordrhein-Westfalen, Dezember 1987

/84/ Bundesminister des Innern: Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle; GMBl. Nr. 22, 1978

/85/ H.-R. Doerfel: Zur in vivo-Messung von Transuranen; in: KfK 4444, 1988

/86/ Antrag des Abgeordneten Dr. Vogel und weiterer 179 Mitglieder des Deutschen Bundestages an das Bundesverfassungsgericht wegen der Verfassungswidrigkeit von Vorschriften des Atomgesetzes. 21. 04. 1989

/87/ H. Wagner: Verfassungswidrige Plutoniumnutzung? KfK 4515, Januar 1989

/88/ W. Koelzer (Red.): Plutonium; KfK 4516, März 1989

/89/ Bundesminister für Umwelt (Hrg): Strahlenexposition und Strahlengefährung durch Plutonium. Eine radiologische Bewertung des Plutoniums durch die Strahlenschutzkommission. G. Fischer Verlag, Stuttgart 1989

/90/ Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V./Strahlenkommission: Stellungnahme zum Verfahren - 1 BvF 3/88-; Bonn, Februar 1989

*) Fairerweise sollte auch die Gegendarstellung der US-Marine zu diesem Artikel beachtet werden: The Navy Defends the Nuclear Navy; Oceans, September 1983, S. 62

Herausgegeben von:
Greenpeace e.V.
Vorsetzen 53 · 2000 Hamburg 11
Telefon: 040 / 311 86-0

Verantwortlich: Kerstin Eitner
Redaktionelle Überarbeitung: Michael Mutz, Ingrid Reinecke
Graphik + Gesamtgestaltung: Barbara Geibel
Satz: Appelt Grafik-Design & Fotosatz Hamburg
Druck: Bernd K. Meyer KG, Hamburg
Auflage: 5000
Hergestellt aus 100% Umweltschutzpapier (Nur Umschlag holzfrei weiß)

Die Benutzung des Titels „Restrisiko" erfolgt mit freundlicher Genehmigung des Elternvereins Restrisiko e.V., Wiesbaden, der eine 14tägig erscheinende Zeitschrift mit gleichem Titel herausbringt.