



---

Gesellschaft für  
Reaktorsicherheit (GRS) mbH

---

GRS-Bericht

Strahlenexposition und  
Strahlenrisiko durch Inhalation  
oder Ingestion von Aktiniden

D. Bachner und W. Müller

---

GRS-1 (August 1977)



---

Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH

## **GRS-Bericht**

# **Strahlenexposition und Strahlenrisiko durch Inhalation oder Ingestion von Aktiniden**

**Dietrich Bachner und Werner Müller**

**GRS-1 (August 1977)**

## K u r z f a s s u n g

Auf der Basis des Lungenmodells nach der letzten Empfehlung der ICRP (ICRP 19) wurden Dose-commitments und Dosisfaktoren für die Organe Lunge, Lymphgewebe, Knochen und Leber nach einmaliger Aufnahme radioaktiver Stoffe durch Inhalation oder Ingestion berechnet. Diese Rechnungen wurden durchgeführt für die wichtigsten Isotope von Thorium, Uran, Neptunium, Plutonium, Americium, Curium und für Plutonium-Mischungen. Analogien zwischen Dosis und Dosisleistung bei einmaliger und kontinuierlicher Aufnahme radioaktiver Stoffe werden diskutiert. Abschließend werden Aussagen zum Kollektivrisiko und Individualrisiko gemacht.

## A b s t r a c t

On the basis of the lung model following the ICRP recommendations (ICRP 19) dose commitments and dose factors have been calculated for the lung, lymphatic tissue, bone and liver due to single uptake of radioactive nuclides by inhalation or ingestion. These calculations have been performed for the most important isotopes of thorium, uranium, neptunium, plutonium, americium, curium and for mixtures of plutonium. Analogies between dose and dose rate due to single and continuous intake of radioactive nuclides are discussed. Finally estimations of the collective and individual risk are made.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einleitung . . . . .	1
2. Entstehung der Transurane . . . . .	2
3. Biologische Auswirkungen nach Inkorporation von Plutonium . . . . .	5
4. Lungenmodell . . . . .	7
4.1 Transport von inhaliertem Plutonium . . . . .	9
4.2 Modellparameter . . . . .	10
5. Berechnung der Dose-commitments . . . . .	11
5.1 Einmalige Aufnahme durch Inhalation . . . . .	11
5.2 Einmalige Aufnahme durch Ingestion . . . . .	18
5.3 Kontinuierliche Aufnahme . . . . .	18
5.4 Strahlenexposition des Säuglings . . . . .	24
5.5 Plutoniummischungen . . . . .	27
5.6 Vergleich mit anderen Autoren . . . . .	28
6. Betrachtungen zum Strahlenrisiko . . . . .	28
6.1 Risikomodelle . . . . .	28
6.2 Kollektivrisiko . . . . .	35
6.3 Individualrisiko . . . . .	36
7. Zusammenfassung . . . . .	38
8. Literaturverzeichnis . . . . .	40
Anhang 1: Mathematischer Formalismus und Parameter zur Berechnung der Dose-commitments . . . . .	49
A1.1 Mathematischer Formalismus . . . . .	51
A1.2 Diskussion der Näherungsverfahren . . . . .	74
A1.3 Parameter . . . . .	79
Anhang 2: Berechnete Dose-commitments und Dosisfaktoren . . . . .	85
Verteiler . . . . .	119

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

	Seite
Bild 1: Bildung der Transurane . . . . .	4
Bild 2: Kompartiment-Modell der Lunge . . . . .	8
Bild 3: Dose-commitment (Integrationszeit 50 a) der Lunge in Abhängigkeit von der Aerosolgröße .	14
Bild 4: Dose-commitment (Integrationszeit 50 a) des Lymphgewebes in Abhängigkeit von der Aerosolgröße . . . . .	15
Bild 5: Dose-commitment (Integrationszeit 50 a) für die Knochen in Abhängigkeit von der Aerosolgröße . . . . .	16
Bild 6: Dose-commitment (Integrationszeit 50 a) für die Leber in Abhängigkeit von der Aerosolgröße . . . . .	17
Bild 7: Zeitabhängigkeit des Dose-commitments der Lunge . . . . .	19
Bild 8: Zeitabhängigkeit des Dose-commitments der Knochen . . . . .	20
Bild 9: Zeitabhängigkeit des Dose-commitments der Leber . . . . .	21
Bild 10: Zeitabhängigkeit des Dose-commitments des Lymphgewebes . . . . .	22
Bild 11: Gegenüberstellung von Dosis D und Dosisleistung D/a bei einmaliger und kontinuierlicher Aufnahme durch Inhalation . . . . .	23
 A n h a n g 1	
Bild A1: Kompartiment-Modell für die Organe . . . . .	63
Bild A2: Kompartiment-Modell des GI-Trakts . . . . .	71

TABELLENVERZEICHNIS

	Seite
Tab. 1: Plutonium-Nuklidspektren verschiedener Reaktoren . . . . .	3
Tab. 2: Abhängigkeit der Depositionsfaktoren $D_3$ und $D_5$ von der Partikelgröße . . . . .	7
Tab. 3: Parameter des Lungenmodells . . . . .	11
Tab. 4: Vergleich der Organmassen und der Atemrate für Säuglinge und 20jährigen Referenz-Menschen . . . . .	24
Tab. 5: Dose-commitments in rem/ $\mu$ Ci und Dosisfaktoren in rem $\cdot$ m <sup>3</sup> /Ci $\cdot$ sec verschiedener Plutoniummischungen (AMAD = 1 $\mu$ , CLASS = Y) . . . . .	25
Tab. 6: Dose-commitments in rem/ $\mu$ Ci und Dosisfaktoren in rem $\cdot$ m <sup>3</sup> /Ci $\cdot$ sec einer Plutoniummischung (LWR-U, spezifische Aktivität (alpha + beta) = 11.77 Ci/g) in Abhängigkeit von Stoffklassen, Aerosolgröße und Integrationszeit . . . . .	26
Tab. 7: Spezifische Aktivität A, Dosisfaktor g und Produkt A $\cdot$ g für verschiedene Plutoniummischungen . . . . .	27
Tab. 8: Vergleich der Pu-239-Dose-commitments mit Ergebnissen anderer Autoren . . . . .	29
Tab. 9: Vergleich der Pu-241-Dose-commitments mit Ergebnissen anderer Autoren . . . . .	30
Tab. 10: Personengruppen zur Bestimmung krankheitsspezifischer Risikoangaben . . . . .	32
Tab. 11: Krankheits- und altersspezifische Risikoabschätzung . . . . .	33
Tab. 12: Dose-commitments und Produkt aus Dose-commitment und Organrisiko für Pu-239 . . . . .	35
Tab. 13: Letale Plutoniummassen bei Inhalation . . . . .	37
 A n h a n g 1	
Tab. A1: Vergleich der Dose-commitments von Pu-241 bei exakter ( $DC_1$ ) und angenäherter ( $DC_2$ ) Berücksichtigung des Tochternuklids . . . . .	75
Tab. A2: Vergleich von Dose-commitments, die nach verschiedenen Näherungen berechnet werden . . . . .	77
Tab. A3: Halbwertszeiten, spezifische Aktivitäten und effektive Energien . . . . .	81

## 1. EINLEITUNG

Transurane sind die am häufigsten vorkommenden künstlichen Elemente. Sie werden z.B. produziert, wenn das in der Erdkruste vorhandene Uran in Kernreaktoren zur Energieerzeugung verwendet wird. Die wirtschaftliche Bedeutung des Urans ist zur Zeit in Fachkreisen unumstritten. Bei der heute weitgehend bevorzugten Leichtwasserreaktorbaulinie entsteht aus dem Uran eine ganze Reihe von Transuranen, darunter vorwiegend das Plutonium. Dieses Plutonium hat schon heute eine vielfältige Bedeutung. Das gilt nicht nur - wenn man von Kernwaffen einmal absieht - für das Gebiet der Kerntechnik, wo Plutonium als Brennstoff zur Stromerzeugung verwendet werden kann, sondern auch für das Gebiet der Medizin, wo Plutonium beispielsweise als thermoelektrischer Generator für Herzschrittmacher dient /1,2,3,4,5,6,7/.

Als thermoelektrischer Generator ist dabei bevorzugt das Pu-238 geeignet wegen seiner langen aber nicht zu großen Halbwertszeit von 87.75 a, der hohen spezifischen Aktivität und dem weitgehenden Fehlen störender  $\beta$ - bzw.  $\gamma$ -Strahlung. 1 kg Pu-238 liefert in 10 a eine Arbeit von 42 000 Wh und zerfällt dabei nur um etwa 7 % /3/.

In Kernreaktoren wird Plutonium ebenso wie andere Transurane durch Aktivierung aus Uran gewonnen. Es kann dann als Brennstoff sowohl für Leichtwasserreaktoren mit Uran-Plutonium-Brennelementen als auch für schnelle Brutreaktoren und für Hochtemperaturreaktoren verwendet werden. Der Energieinhalt von 1 g Plutonium entspricht dem von etwa 1500 bis 3000 l Öl /4/.

Die Handhabung von Transuranen, darunter besonders von Plutonium, hat in der Vergangenheit in einigen Fällen zu größeren Freisetzungen in die Atmosphäre geführt. Dabei waren die wesentlichen Quellen die Bombentests mit 300 - 500 kCi Pu-239 und Pu-240, eine Satellitenbatterie mit ca. 17 kCi Pu-238, lokal die B-52-Abstürze in Palomares und Thule und die Pu-239-Freisetzung in Windscale /1,5,7,10,11/. Man nimmt an, daß global etwa 300 - 680 kCi Pu-239 und etwa 25 kCi Pu-238 verteilt sind. Davon ist der größte Teil (ca. 90 %) in der nördlichen Hemisphäre ausgebreitet. Für den Bereich der USA hat man einen Fallout von etwa 10 - 15 kCi Plutonium mit einer Flächendichte von etwa 1 - 4 mCi/km<sup>2</sup> abgeschätzt /7/.

Plutonium kommt in der Atmosphäre im wesentlichen als PuO<sub>2</sub>, bei flüssigen Ableitungen auch als Hydroxid vor /1,12/. Eine Gefährdung kann den Menschen im wesentlichen über folgende Belastungspfade erreichen:

- Inhalation aus der Wolke,
- Inhalation nach Resuspension (Wiederaufwirbelung) vom Boden,
- Ingestion.

Resuspension spielt nach dem heutigen Kenntnisstand keine große Rolle. Eine Ingestion kann durch Kontamination von Nahrungsmitteln vorkommen /1,8/.

Über die Toxizität des Plutoniums und der anderen Transurane liegt eine Reihe von Daten aus Beobachtungen an Menschen und aus Tierexperimenten vor /9,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24/. Dabei sind die an Menschen gewonnenen Daten /9,18/ sehr fragmentarisch, da es sich meist um unkontrollierte, d.h. ohne Vergleich mit Kontrollgruppen und ohne genaue Kenntnis der Randbedingungen durchgeführte Beobachtungen nach Strahlenexpositionen durch Unfälle handelte. Immerhin hat eine medizinische Studie über die durch Plutonium kontaminierten Mitarbeiter am Manhattan-Projekt bisher keinen Hinweis auf signifikante Abnormalitäten erbracht /9,15/. Tierexperimente, die in großer Zahl durchgeführt worden sind /13,20-24/, zeigen, daß viele Transurane und darunter besonders Plutonium zu den stärksten krebs-erzeugenden Substanzen gehören. Das hat dazu geführt, daß Plutonium auf Grund seiner großen spezifischen  $\alpha$ -Aktivität und seiner langen physikalischen und biologischen Halbwertszeit teilweise als die "giftigste, dem Menschen bekannte Substanz" bezeichnet wurde /25/. Während beim Uran, besonders bei den längerlebigen Isotopen wie U-235 und U-238, chemische und radiologische Auswirkungen näherungsweise in der gleichen Größenordnung liegen /27/, dominiert bei den wichtigsten Plutonium-Isotopen (Pu-238 ... Pu-242) die Radiotoxizität ganz eindeutig. Dabei steht die karzinogene Wirksamkeit klar im Vordergrund /7,13/, während nach heutiger Kenntnis genetische Effekte demgegenüber vernachlässigbar gering sind /26/.

Daß sich bisher trotz umfangreicher Handhabung von Plutonium und anderen Transuranen keine Krebsfälle nachweisen ließen, die eindeutig auf Inhalation von Plutonium zurückzuführen sind, liegt besonders daran, daß bereits in einem sehr frühen Stadium geeignete Sicherheitsstandards und restriktive Grenzwerte eingeführt wurden /7,9,13,14,15,28,29,30,31,32/. Diese Grenzwerte sind im Laufe der Jahre nur unwesentlich geändert worden.

Bei der Beurteilung des Risikos durch Aufnahme von Plutonium in den menschlichen Organismus zeigt sich, daß je nach Randbedingungen (z.B. chemische Form, Aerosolgröße) unterschiedliche Organe das kritische Organ darstellen, bzw. daß mehrere Organe etwa gleich große Beiträge zur Strahlenexposition liefern können. Es ist eine der Hauptaufgaben des vorliegenden Berichtes, diese Abhängigkeiten von den wesentlichen Parametern zu analysieren. Dabei wird den Rechnungen das Lungenmodell der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) /19/ mit den neuesten Parametern für die Aktiniden zugrunde gelegt.

## 2. ENTSTEHUNG DER TRANSURANE

Im Kraftwerksbetrieb mit Leichtwasserreaktoren wird ein Uranbrennstoff mit einer Anreicherung des U-235 von ca. 3 % verwendet. Innerhalb einer Zykluszeit von 3 Jahren sind etwa 3.5 % des eingesetzten Urans teilweise direkt thermisch (U-235) oder durch schnelle (U-238) Neutronen gespalten. Zum Teil wird das Uran indirekt nach Konversion in Plutonium gespalten. In den zur Wiederaufarbeitung anfallenden Brennelementen tragen neben den Plutoniumisotopen Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242

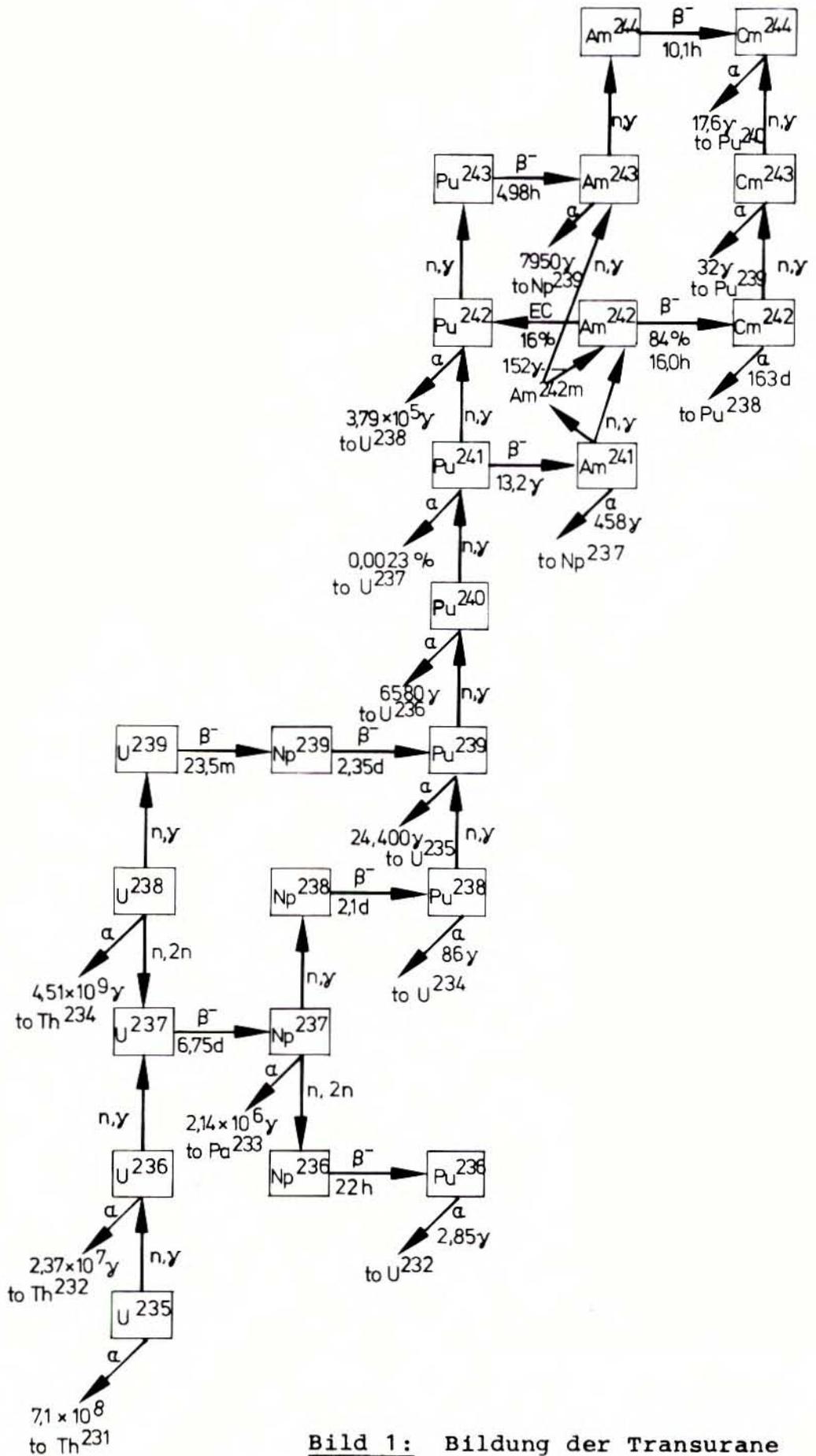
hauptsächlich die Isotope Am-241 bis Am-243 und Cm-242 bis Cm-244 zur Gesamtaktivität bei (Bild 1). Die Transurane Neptunium, Plutonium, Americium und Curium können als Brutprodukte aufgefaßt werden. Sie werden über Neutroneneinfang-Reaktionen aus U-238 und U-235 gebildet. Durch die Wiedergewinnung von Plutonium wird neuer Brennstoff sowohl für Leichtwasserreaktoren mit Uran-Plutonium-Mischbrennstoff als auch für schnelle Brutreaktoren bereitgestellt. Im Brennstoffkreislauf fallen die Transurane als Isotopenmischungen an. Hinsichtlich ihrer radiologischen Auswirkungen können sich jedoch die einzelnen Nuklide erheblich unterscheiden. Daher ist unter Strahlenschutzaspekten die Kenntnis des Nuklidspektrums abgebrannter Brennelemente zur Zeit der Weiterverarbeitung notwendig.

Von besonderer radiologischer und wirtschaftlicher Bedeutung sind dabei die Plutonium-Isotope. Nachfolgend werden einige Pu-Mischungen verschiedener Reaktoren angegeben.

Massenanteil in %					
	LWR-U /33/	LWR-U /34/	LWR-U-PU /33/	LMFBR /33/	LMFBR /12/
Pu-236	$0.1 \cdot 10^{-3}$	0.21	$0.37 \cdot 10^{-4}$	$0.15 \cdot 10^{-5}$	-
Pu-238	2.4	1.84	4.3	0.069	0.8
Pu-239	58.4	58.9	37.2	71.67	69.31
Pu-240	24.0	23.4	27.8	25.1	24.2
Pu-241	11.3	11.5	18.6	2.4	3.9
Pu-242	3.9	4.04	12.1	0.76	1.78

Tab. 1: Plutonium-Nuklidspektren verschiedener Reaktoren

- Leichtwasserreaktor mit Uranbrennstoff /33/
  - Anreicherung: 3,3 % U-235
  - Lastfaktor: 80 %
  - Abklingzeit: 150 Tage
  - Abbrand: 33 000 MWd/t
  
- Leichtwasserreaktor mit Uranbrennstoff nach eigenen Rechnungen mit ORIGEN /34/
  - Anreicherung: 3,3 % U-235
  - Lastfaktor: 100 %
  - Abklingzeit: 150 Tage
  - Abbrand: 33 000 MWd/t



**Bild 1:** Bildung der Transurane

- Leichtwasserreaktor mit Uran-Plutonium-Mischbrennstoff /33/
  - Anreicherung: 50 % Pu, 3 % spaltbares Pu
  - Lastfaktor: 80 %
  - Abklingzeit: 150 Tage
  - Abbrand: 33 000 MWd/t
  
- Schneller Brutreaktor /33/
  - Brennstoff: Pu/U = 0.206
  - Anreicherung: 0.25 % U-235
  - Abklingzeit: 30 Tage
  
- Schneller Brutreaktor /12/

Die von Pigford und Ang /33/ angegebene Plutoniummischung für Leichtwasserreaktor mit Uranbrennstoff weist für Pu-238 einen relativ hohen Anteil von 2.4 % auf. Infolge der hohen spezifischen Aktivität dieses Nuklids von 17.13 Ci/g ist der Einfluß von Pu-238 auf die radiologische Gefährdung einer Pu-Mischung erheblich. Rechnungen mit dem Programm ORIGEN /34/ für einen bis auf den Lastfaktor äquivalenten Reaktor zeigen, daß für Leichtwasserreaktoren mit Uranbrennstoff ein Pu-238-Anteil von 2.4 % erreichbar ist.

### 3. BIOLOGISCHE AUSWIRKUNGEN NACH INKORPORATION VON PLUTONIUM

Der überwältigende Anteil aller vorliegenden Ergebnisse über Organschäden, die durch Transurane hervorgerufen wurden, ist aus Tierexperimenten - vorwiegend mit Plutonium - gewonnen worden. An Beagles, Mäusen, Ratten und Kaninchen wurden Untersuchungen /20-23/ nach Inhalation, Ingestion und verschiedenen Injektionsmethoden durchgeführt, die heute die experimentelle Grundlage der Parameter für ein Modell zur Berechnung der Strahlenexposition durch Inhalation (Lungenmodell) bilden. Informationen über die Auswirkungen von Plutonium auf den menschlichen Organismus beruhen auf statistischen Untersuchungen an drei Gruppen /9/, den Überlebenden der Atombomben auf Japan, den Thorotrast-Patienten /35/ und amerikanischen Arbeitern, die am "Manhattan Projekt" beteiligt waren /18/. Von der letzten Gruppe sammelt die 1968 eingerichtete "Transuranium Registry" alle medizinischen Daten /36/.

Im folgenden werden wesentliche Auswirkungen von Plutonium auf den tierischen Organismus beschrieben.

Blut: Die früheste Reaktion des Organismus nach Inhalation von Plutonium ist die Lymphopenie, die Verminderung der Lymphozyten im Blut, die bei Hunden mit einer totalen Lungendeposition von 0.08  $\mu$ Ci beobachtet wurde /15/.

Lunge: Bei Hunden traten nach Inhalation von Plutonium Neoplasien der Lunge auf, d.h., es bildeten sich bösartige Wucherungen. Hunde mit einem Plutoniumgehalt von mehr als 50 mCi/g Lunge starben an strahleninduzierter Pneumonitis.

Durch Tierexperimente ist erwiesen, daß die Inhalation von Plutonium-Aerosolen zu einer sehr inhomogenen Verteilung der Aktivität in der Lunge führt. Wegen der kurzen Reichweite der  $\alpha$ -Strahlung von 40 - 45  $\mu\text{m}$  im Knochen und 320 - 480  $\mu\text{m}$  in der Lunge /37/ ist mit hohen lokalen Strahlenexpositionen, verursacht durch die als "hot particles" bezeichneten Pu-Aerosole, im Gewebe zu rechnen /15,31,32,38,39/. Nach heutigem Informationsstand kann keine größere karzinogene Wirkung der "hot particles" angenommen werden, als wenn die Plutoniumaktivität gleichförmig in der Lunge verteilt wäre /13,32,40,41/.

Lymphknoten: Die Autopsie von Menschen zeigt zweifelsfrei, daß die Plutoniumverteilung im Körper nicht gleichförmig ist /42/. Die Konzentration ist am größten in den pulmonalen Lymphknoten, gefolgt von den abdominalen Lymphknoten. Versuche mit Beagles über 11 Jahre zeigen, daß bösartige Wucherungen des lymphatischen Gewebes nicht auftraten. Metastasen von Lungentumoren bildeten sich zwar in den Lymphknoten, sie waren aber nicht die Todesursache. Für die karzinogene Wirkung der  $\alpha$ -Strahlen des Plutoniums scheinen die Lymphknoten von Hunden und Nagern nicht besonders empfänglich zu sein /28/.

Leber: Die in der Leber gespeicherte Plutoniummenge ist mit der in den Knochen vergleichbar. Vereinzelt festgestellte Tumoren der Gallengänge von Beagles waren statistisch jedoch nicht signifikant /28/. Nach Mays et al. /43/ dagegen ist die Tumorfrequenz für die Leber möglicherweise höher als für die Knochen.

Knochen: Über das Blut gelangt Plutonium in die Knochen, wo es sich im Gegensatz zu anderen knochensuchenden Substanzen wie Radium, Uran, Caesium und Strontium überwiegend an der Oberfläche anlagert. Die größte Plutonium-Konzentration wurde in der Wirbelsäule, die kleinste in den flachen Schädelknochen gefunden /12/. Geringe Anteile des in die Knochen gelangten Plutoniums sind im Knochenmark des Menschen nachgewiesen worden, jedoch ist der Beitrag zum gesamten, im Knochen abgelagerten Plutonium unbekannt; ebenso besteht Unkenntnis über den Plutonium-Rückhalte Mechanismus des Knochenmarks /19/. Die akute Radiotoxizität bei der Injektion von Plutonium wird durch die Bestrahlung des Knochenmarks bewirkt, die sowohl von der auf der inneren Knochenoberfläche als auch von der im Mark abgelagerten Plutoniumaktivität ausgeht. Experimente an Beagles haben gezeigt, daß die Toxizität von Plutonium-239 um einen Faktor 5 bis 10 größer als von Radium-226 ist. Eine Erklärung ist in der größeren spezifischen Aktivität von Plutonium-239 zu finden, die auf der Knochenoberfläche lokal zu höherer Dosis führt /20/. Wenn Plutonium im Chelat DTPA gebunden und im Blut gelöst vorliegt, lagert sich nur ein Bruchteil von 10 % dieses DTPA-Plutoniums im Knochen ab /37/. Als Folge der Ablagerung von Plutonium im Knochen können strahleninduzierte Knochensarkome auftreten. Der Nachweis von Sarkomen an Ratten ist bei Dosen von weniger als 10 rad erbracht, ein statistisch signifikanter Anstieg der Tumor-Inzidenz konnte allerdings nicht für Dosen unterhalb 30 - 50 rad erbracht werden /28/.

#### 4. LUNGENMODELL

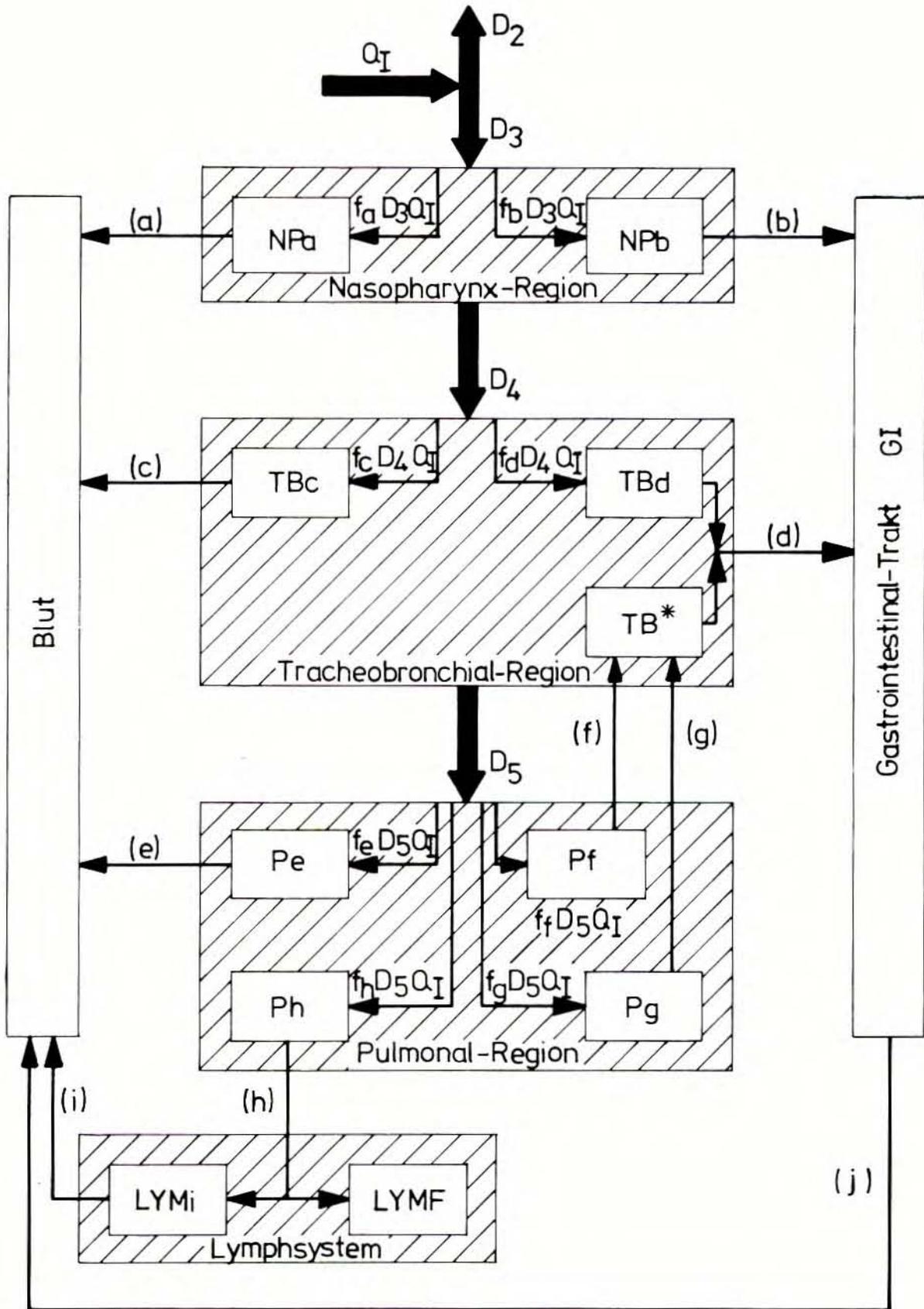
Zur mathematischen Beschreibung des Stofftransports im menschlichen Organismus wird der Atemtrakt in mehrere Kompartments mit dazugehörigen Subkompartments (Bild 2) unterteilt /44/. Der Clearance-(Abbau)-Prozeß wird durch die Wege a, b, c, d, e, f, g, h, i des biologischen Stofftransports, die dazugehörigen Transferfaktoren  $f_a$  bis  $f_i$  und die effektiven Halbwertszeiten beschrieben. Im einzelnen können folgende Kompartments der Regionen des Lungenmodells für die verschiedenen Wege unterschieden werden:

- NP: Nasopharynx (Nasen-Rachen)-Region mit den Subkompartments für die Wege a und b
- TB: Tracheobronchial (Luftröhre-Bronchialbaum)-Region mit den Subkompartments für die Wege c und d
- P: Pulmonal-(Lunge)-Region mit den Subkompartments für die Wege e, f, g und h
- Lymphknoten mit den beiden Subkompartments LYMi und LYMF für die Clearance über den Weg i und biologisch stabile Stoffablagerung
- GI: Gastrointestinal-(Magen-Darm)-Trakt mit dem Weg j

Die Ablagerung von Aerosolen bei Inhalation wird durch die Depositionsfaktoren  $D_3$ ,  $D_4$ ,  $D_5$  der NP-, TB- und P-Region, bezogen auf den Zugang  $Q_I$ , beschrieben. Die Depositionsfaktoren  $D_3$  und  $D_5$  sind von der Partikelgröße abhängig (Tab. 2).

Depositionsfaktoren /44/		
AMAD / $\mu\text{m}$ /	(NP) $D_3$	(P) $D_5$
0.05	(0.002)	0.59
0.10	0.01	0.50
0.20	0.04	0.41
0.30	0.07	0.36
0.40	0.10	0.32
0.50	0.14	0.30
0.60	0.18	0.28
0.70	0.21	0.26
0.80	0.24	0.25
0.90	0.27	0.24
1.0	0.30	0.23
2.0	0.51	0.16
3.0	0.64	0.13
4.0	0.72	0.11
5.0	0.77	0.10
6.0	0.81	0.09
7.0	0.84	0.08

Tab. 2: Abhängigkeit der Depositionsfaktoren  $D_3$  und  $D_5$  von der Partikelgröße



**Bild 2:** Kompartiment-Modell der Lunge

Im Kompartiment-Modell wird durch die Clearance-Wege a, c und e der direkte, für die Wege a und c schnelle Stofftransport in das Blut beschrieben. Die Wege b und d stehen für die schnelle Clearance per Schleimtransport aus der Nasopharynx-Region und der Tracheobronchial-Region. Der Transport von Fremdstoffen aus der Lunge zum Gastrointestinal-Trakt mit den beiden Prozessen Schleimtransport und Phagozytose durch die Luftröhre zur Speiseröhre erfolgt über die Wege f und g. Bei dominierendem Schleimtransport verläuft über den Weg f eine kurzzeitige Clearance. Im Modell wird angenommen, daß der über den Weg g langsam abgebaute Stoffanteil von derselben Größe ist. Der Weg h stellt ebenso wie die Wege e und g bei Plutonium und den anderen Aktiniden den langsamen Stoffabbau, in diesem Fall in das Lymphsystem dar. Das Verhalten der Lymphknoten bei der Speicherung von Fremdstoffen wird durch die Annahme von zwei Subkompartments beschrieben. Eine Clearance über biologischen Stofftransport ist dabei über den Weg i nur vom Subkompartiment LYMi möglich, während die Radioaktivität aus dem Subkompartiment LYMF ausschließlich durch den radioaktiven Zerfall vermindert werden kann /13,45/.

Aus dem GI-Trakt werden die Fremdstoffe fast vollständig in kurzer Zeit ausgeschieden. Nur der äußerst geringe Anteil von  $10^{-6}$  wird in das Blut über den Weg j abgegeben.

Mit dem Blut als Transportmedium gelangen die radioaktiven Stoffe in die Organe (Bild A1 im Anhang 1). Plutonium und die anderen Aktiniden lagern sich hauptsächlich in den Knochen und in der Leber ab.

Die biologischen Halbwertszeiten der einzelnen Clearance-Prozesse hängen, wie Tierversuche gezeigt haben, stark von der chemischen Verbindung ab. Im alten Lungenmodell der ICRP dagegen wurden die Stoffe in lösliche und unlösliche eingeteilt.

#### 4.1 Transport von inhaliertem Plutonium

Nach der Inhalation von Plutoniumaerosolen, die der Gruppe der Inhalationsallergene angehören, sind hauptsächlich zwei Transportphänomene am Abbau der in der Lunge eingelagerten Fremdstoffe beteiligt /44/. Durch Phagozytose, der Stoffaufnahme einer Zelle durch Einstülpfen der Zellwand, können Aerosole durch aktiven Stofftransport befördert werden. Der wirksamste Stofftransport geht jedoch von dem mit Cilien belegten Oberflächengewebe, dem Epithel, aus. Die Flimmerbewegung der Cilien befördert in relativ kurzer Zeit die Fremdkörper zusammen mit dem Schleim die Luftröhre aufwärts, so daß mit der Schluckbewegung ein Übergang zur Speiseröhre und damit zum Gastrointestinaltrakt ermöglicht wird, aus dem Plutonium nahezu vollständig ausgeschieden wird. Weitere Abbauprozesse (Clearance) von Fremdstoffen aus der Lunge und anderen Organen sind die Auflösung der Aerosole in den physiologischen Flüssigkeiten, die Diffusion durch die Zellmembrane, wenn die Staubteilchen hinreichend klein sind, und der Stofftransport durch enzymatische Trägermoleküle. Vom Pu-238 ist bekannt, daß es gelöst und angekoppelt

an einen Transferrin-Komplex mit diesem transportiert wird. Pu-239 zeigt diesen Effekt nicht; denn es ist wegen seiner erheblich geringeren spezifischen Aktivität von 0.06 Ci/g gegenüber 17 Ci/g für Pu-238 nicht in der Lage, genügend freie Radikale mit Hilfe der  $\alpha$ -Strahlung zu bilden /37,71/.

Zur Zeit sind keine quantitativen Angaben über den genauen Zeitablauf der an der Clearance beteiligten Prozesse sowie über den Beitrag der einzelnen Transportvorgänge möglich. Es ist jedoch bekannt, daß in den ersten 24 Stunden nach der Inhalation der Schleimtransport in der oberen Region des Respirationstraktes überwiegt /44/. Von dieser ersten Phase einer schnellen Clearance sind überwiegend die größeren Partikel betroffen, die sich auf dem Flimmerepithel der Luftröhre, der Stammbronchien und des Bronchialbaumes abgelagert haben. Partikel, die sich auf dem nicht mit Cilien besetzten Epithel der verzweigten Enden des Bronchialbaumes und der Alveolen abgesetzt haben, werden durch Phagozytose von den Alveolar-Makrophagen aufgenommen und zum Flimmerepithel des Bronchialstammes befördert /46/. Im Gegensatz zu den meisten anderen Partikeln ist der Transportmechanismus für Plutonium weniger wirksam. Die zweite Phase der Clearance aus der Lunge, die sich über Zeiten von 500 bis 1000 Tagen erstreckt /19/, betrifft die Partikel in den Alveolen, die von den Zellen des Alveolar-Epithels inkorporiert oder über die Lymphe, die sich aus der Gewebeflüssigkeit bildet, zu den Lymphknoten transportiert werden. Vorwiegend in den tracheobronchialen Lymphknoten und Hiluslymphknoten lagert sich das Plutonium zum Teil ohne weitere Clearance für lange Zeit ab /2,28/. Es zeigt sich, daß bei der Clearance der Lunge der in der ersten Woche abgebaute Anteil ganz wesentlich von der Verteilung innerhalb der Lungenregion, der Verbindung, der Partikelgröße und dem Isotop abhängt /28/.

#### 4.2 Modellparameter

Dabei besteht das Problem, daß die Löslichkeit meistens eine auf das Standardlösungsmittel Wasser bezogene Eigenschaft ist, die nicht bedenkenlos auf die Löslichkeit in physiologischen Flüssigkeiten übertragbar ist. Von der ICRP-Arbeitsgruppe "Task Group Lung Model" (TGLM) wurde für das neue Lungenmodell empfohlen, von einer Einteilung in lösliche und unlösliche Stoffe abzusehen und dafür eine Einteilung der Verbindungen in Stoffklassen (D), (W) und (Y) vorzusehen, die durch Clearance-Halbwertszeiten in der Größenordnung von Tagen (D), Wochen (W) oder Jahren (Y) charakterisiert sind /19/. Die Carbide, Oxide und Hydroxide von Plutonium und anderen Aktiniden gehören der Stoffklasse (Y) an, die Nitrate und Karbonate der Stoffklasse (W), alle nicht den Klassen (Y) oder (W) zugeordneten Verbindungen gehören der Stoffklasse (D) an /19/.

In der folgenden Tabelle sind die Transferfaktoren  $f$  und biologischen Halbwertszeiten nach der Empfehlung der ICRP für Plutonium und die anderen Aktiniden zusammengestellt. Die weiteren zur Berechnung von Dose-commitments und Dosisfaktoren notwendigen Parameter sind im Anhang 1 zusammengefaßt.

Region	Transportweg	Stoffklasse					
		(D)		(W)		(Y)	
		$T_{1/2}^{bio}$	f	$T_{1/2}^{bio}$	f	$T_{1/2}^{bio}$	f
N - P	(a)	0.01 d	0.5	0.01 d	0.1	0.01 d	0.01
	(b)	0.01 d	0.5	0.4 d	0.9	0.4 d	0.99
T - B	(c)	0.01 d	0.95	0.01 d	0.5	0.01 d	0.01
	(d)	0.2 d	0.05	0.2 d	0.5	0.2 d	0.99
P	(e)	0.5 d	0.8	50 d	0.15	500 d	0.05
	(f)	-	-	1 d	0.4	1 d	0.4
	(g)	-	-	50 d	0.4	500 d	0.4
	(h)	0.5 d	0.2	50 d	0.05	500 d	0.15
Lymphknoten	(i)	0.5 d	1.0	50 d	1.0	1000 d	0.9

Tab. 3: Parameter des Lungenmodells

## 5. BERECHNUNG DER DOSE-COMMITMENTS

Das Dose-commitment, auch als Folgeäquivalentdosis bezeichnet, ist die Äquivalentdosis, die ein Organ in einer vorgegebenen Zeit (Integrationszeit) erhält.

### 5.1 Einmalige Aufnahme durch Inhalation

Die mathematische Formulierung (siehe Anhang 1) des Kompartimentmodells zur Berechnung der Strahlenexposition der Lunge und anderer Organe, verursacht durch die Ablagerung radioaktiver Substanzen in diesen Organen, geht davon aus, daß der biologische Stofftransport exponentiell verläuft und das Zeitverhalten für den individuellen Transportweg durch nur eine Halbwertszeit beschrieben werden kann. Der aus einem Subkompartiment, z.B.  $P_e$  (Bild 2), längs des Transportweges  $e$  zum Blut transportierte Stoffanteil, bezogen auf die im Kompartiment - hier die Pulmonal-Region P - insgesamt abgelagerte Masse, wird durch einen Transferfaktor  $f_e$  beschrieben. Die Unsicherheit sowohl der Retentionszeiten (Halbwertszeit für den Stofftransport aus einem Kompartiment unter Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls bzw. Halbwertszeit für die Rückhaltung des in diesem Kompartiment abgelagerten Nuklids) als auch der Transferfaktoren läßt zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine sinnvolle Verfeinerung des Lungenmodells zu (z.B. Abhängigkeit von Lebensalter und Isotop). Im Hinblick auf die praktische Anwendung im Strahlenschutz bei der Abschätzung radiologischer Auswirkungen nach Inhalation von radioaktiven Substanzen darf der mathematische Formalismus nicht

dazu verleiten, die Genauigkeit der Ergebnisse überzubewerten. Die Stoffeinteilung in Klassen D, W und Y mit unterschiedlichen Retentionszeiten wird nicht von allen Autoren auch neuester Arbeiten als nützlich angesehen /47/. Die Problematik ist offenkundig, die Retentionszeiten müssen in teilweise zeitlich aufwendigen Testreihen an Tieren bestimmt werden; alle relevanten Verbindungen, die potentiell inhaliert werden können, müßten untersucht werden. Außerdem bleibt nach wie vor die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Tierexperimenten auf den menschlichen Organismus unsicher. Trotz der genannten Vorbehalte entspricht dieses Modell dem heutigen Wissensstand. Die Modellparameter wurden von der ICRP nach gründlicher Auswertung einer sehr großen Anzahl von Tierexperimenten nach Berücksichtigung der gegenwärtig bekannten Unterschiede beim Ablauf biologischer Prozesse im menschlichen und tierischen Organismus festgelegt.

Wenn bei den vorliegenden Untersuchungen in Abweichung zu anderen Rechnungen instabile Tochternuklide exakt bei der Dosisberechnung mitberücksichtigt werden und im Falle von relevanten Zerfallsketten diese über eine nach /48/ modifizierte effektive Energie der Strahlung der Tochternuklide (Bild A1 im Anhang 1) eingehen, so erfolgt das nicht nur, um das Modell genauer an die Wirklichkeit anzupassen, sondern auch um den Einfluß der Näherung festzustellen, der mit der Einführung der bisher verwendeten, durch instabile Tochternuklide modifizierten effektiven Energie der Strahlung der Mutternuklide verbunden ist. Erhebliche Abweichungen sind dann nicht auszuschließen, wenn die physikalische Halbwertszeit der Mutteraktivität klein im Vergleich zur Langzeit-Clearance der Lunge und des lymphatischen Systems ist.

Anhang 2 zeigt die Dose-commitments und Dosisfaktoren, dargestellt als Größen DC und G-Faktoren, für die Inhalation und Ingestion von Aerosolen mit einem Durchmesser (AMAD) von 0.3  $\mu\text{m}$  und 1.0  $\mu\text{m}$  nach Integrationszeiten von 50 und 70 Jahren. Für folgende Aktiniden wurden Rechnungen durchgeführt:

Thorium	228, 232, 234
Uran	232, 233, 234, 235, 236, 237, 238
Neptunium	235, 236, 237, 238, 239
Plutonium	236, 238, 239, 240, 241, 242
Americium	241, 242, 242m, 243
Curium	242, 243, 244, 245, 246

Die Dose-commitments für Inhalation von Lunge, Lymphgewebe, Knochen und Leber wurden für die Stoffklassen D, W und Y bestimmt. Außer für Uran wurden für alle Aktiniden die aus Experimenten mit Plutonium abgeleiteten Lungenmodellparameter verwendet /19/. Die Retentionszeit der Uran-Aerosole für den Stofftransport aus den Knochen /48/ und der Leber wurde zu  $T_{1/2} = 300$  Tage angesetzt. Die effektive, im Organ absorbierte Energie, die physikalische Halbwertszeit und die spezifische Aktivität sind im Anhang 1, Tabelle A2, zusammengestellt. Den Dosisfaktoren liegt eine Atemrate von 30 l/min zugrunde, wie sie nach ICRP 23 /49/ für den erwachsenen Mann bei leichter körperlicher Aktivität als obere Grenze angegeben wird. Bei An-

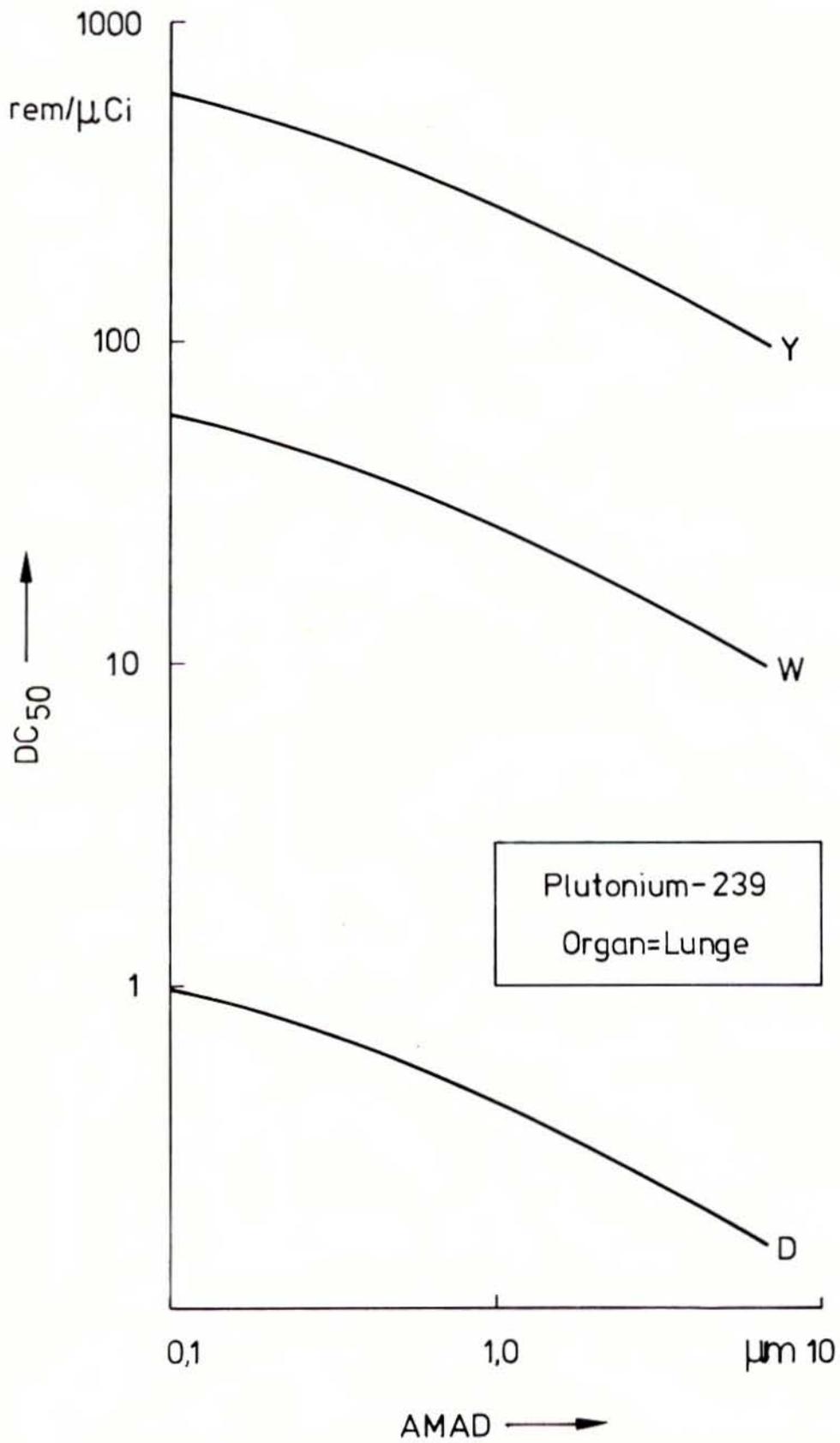
wendung dieser Dosisfaktoren zur Bestimmung der Strahlenexposition größerer Bevölkerungsgruppen und/oder über größere Inhalationszeiten ist eine Atemrate von 15 l/min, d.h. Reduktion des Dosisfaktors um 50 %, als konservativ anzusehen.

Wie auch im Lungenmodell durch das Subkompartiment LYMF berücksichtigt, besitzt das lymphatische System die Fähigkeit, Plutonium in den Lymphknoten zu speichern, so daß dort außerordentlich hohe Strahlenexpositionen möglich sind. Bei Pu-Arbeitern wurde in den Lymphknoten eine im Vergleich zum Lungengewebe bis um den Faktor 30 höhere Anreicherung ermittelt /13/. Eine dadurch hervorgerufene Erkrankung der pulmonalen Lymphknoten beim Menschen konnte aber bisher nicht signifikant nachgewiesen werden.

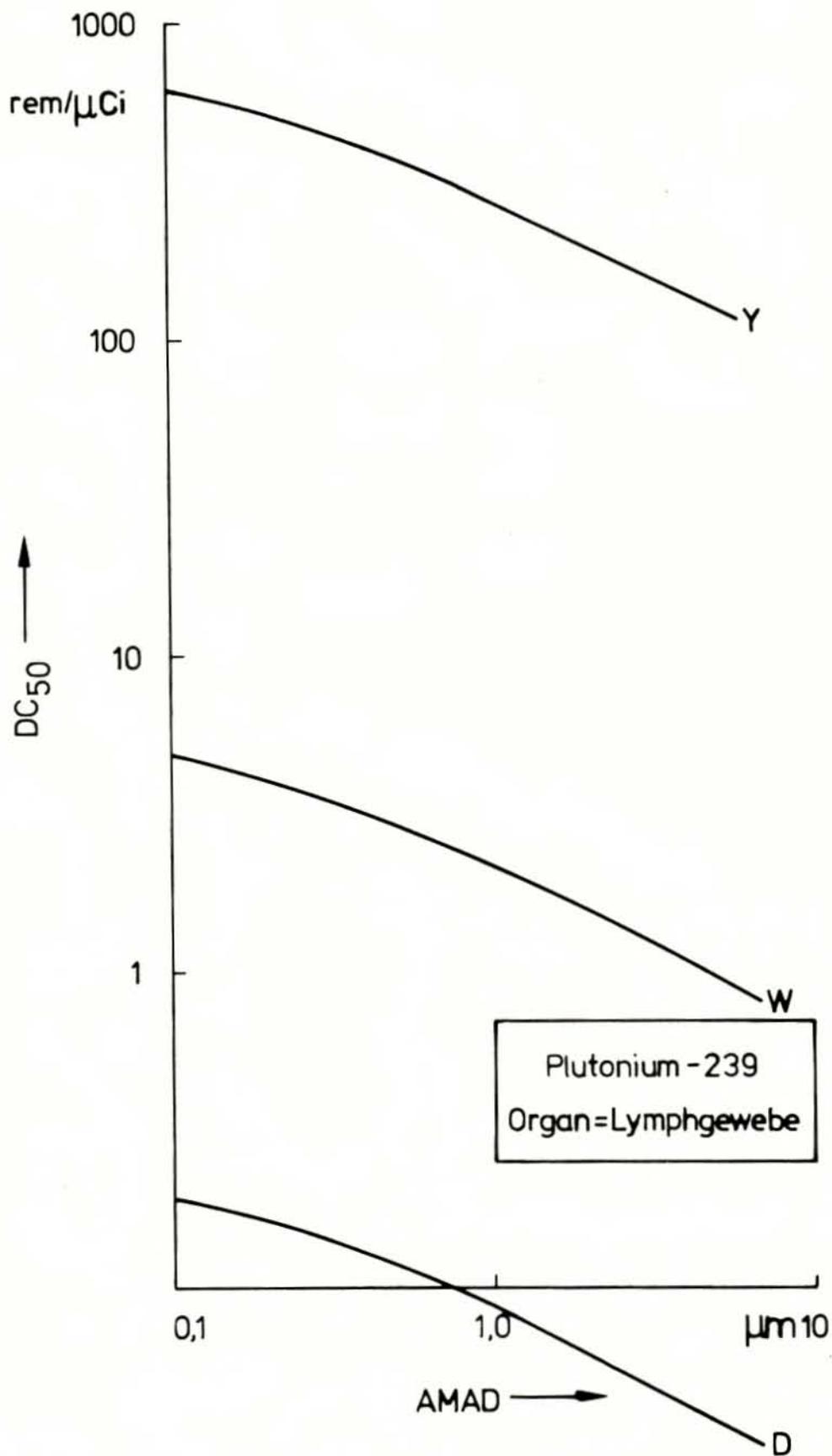
Bei Verwendung der Lymphknotenmasse von 15 g zeigt sich, daß nach Inhalation von Plutonium stets das Lymphgewebe die größte Strahlenbelastung erfährt. Die nachweislich größere Gefährdung geht aber von der Belastung der Knochen im Falle löslichen Plutoniums (Stoffklasse D) und von der Belastung der Lunge für Stoffklasse Y aus, weshalb die Knochen bzw. die Lunge und nicht die Lymphknoten als kritisches Organ angesehen werden. Die Beurteilung, wann ein Organ als kritisch anzusehen ist, erfolgt auf der Grundlage des strahleninduzierten Krankheitsrisikos. Um für den in der Strahlenschutzpraxis gebräuchlichen Begriff der Strahlenexposition vergleichbare Werte zu bekommen, wurde vorgeschlagen, in den Rechnungen für das Lymphsystem eine größere Masse anzunehmen. Zum Beispiel schlägt Dolphin /16/ vor, die Lymphknoten mit in die Lungenmasse einzubeziehen und für das Organ Lunge-Lymphsystem eine Masse von 1000 g zu nehmen. In den vorliegenden Rechnungen wurde für das Lymphsystem eine Masse von 1000 g angenommen. Wenn sich herausstellen sollte, daß durch die Strahlenschäden der beweglichen Lymphzellen, die in den Lymphknoten gespeichert werden, die Immunreaktion des menschlichen Organismus geschwächt wird und somit tumorverdächtige Zellen weniger stark durch die Lymphzellen in der Gewebeflüssigkeit bekämpft werden, wird der Strahlenexposition der Lymphknoten eine größere Bedeutung zukommen müssen. Gegenwärtig sind aber keine Hinweise darauf bekannt.

Der Einfluß der Aerosolgröße (AMAD = Activity median aerodynamic diameter) auf das Dose-commitment der Organe, hier aufgezeigt am Beispiel des Pu-239, ist unterschiedlich. Mit zunehmendem AMAD, d.h. abnehmender Lungengängigkeit, verringern sich die Lungendosis (Bild 3) und die Dosis des Lymphgewebes (Bild 4) für alle Stoffklassen. Dasselbe Verhalten zeigen Knochen- und Leberdosis (Bild 5 und 6) nur für die Stoffklasse Y, während für die Stoffklassen D und W die Dosis nahezu konstant bleibt.

Eine Inhalation von Plutonium in die tieferen Regionen der Lunge (lungengängige Aerosole) ist nur möglich, wenn die Aerosolgröße kleiner als ca. 10  $\mu$ m bleibt.



**Bild 3:** Dose-commitment (Integrationszeit 50 a) der Lunge in Abhängigkeit von der Aerosolgröße



**Bild 4:** Dose-commitment (Integrationszeit 50 a) des Lymphgewebes in Abhängigkeit von der Aerosolgröße

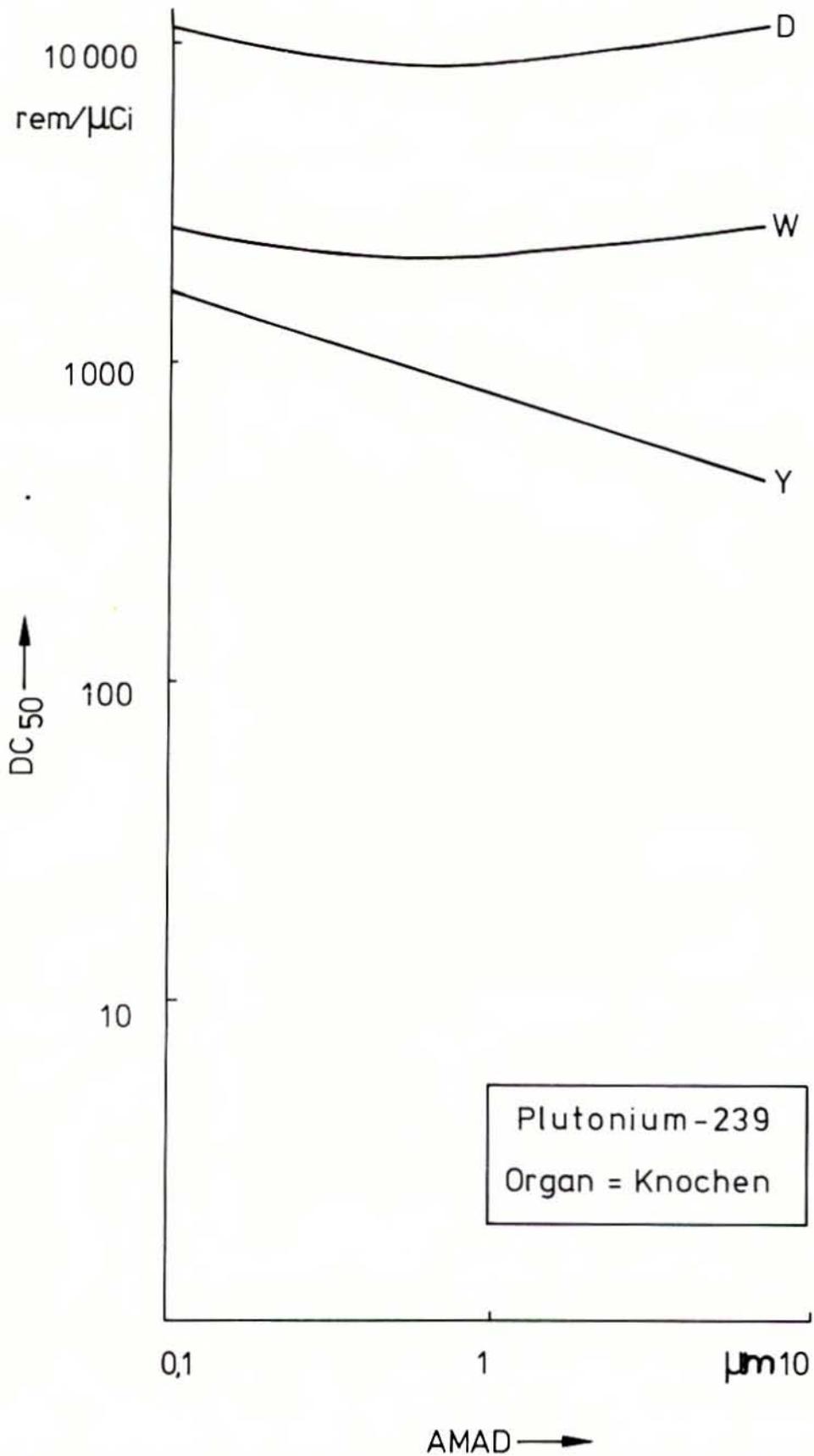


Bild 5: Dose-commitment (Integrationszeit 50 a) für die Knochen in Abhängigkeit von der Aerosolgröße

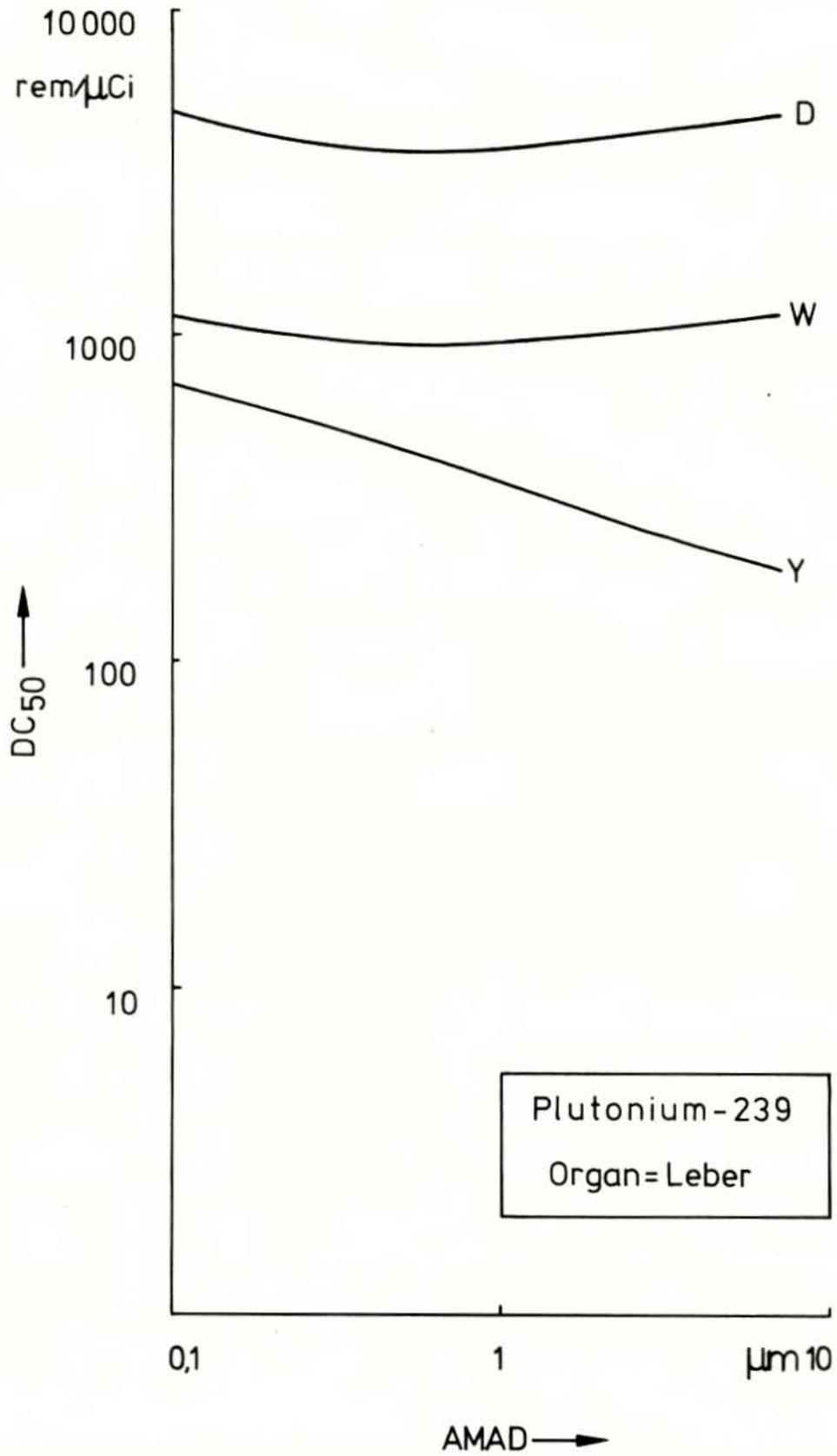


Bild 6: Dose-commitment (Integrationszeit 50 a) für die Leber in Abhängigkeit von der Aerosolgröße

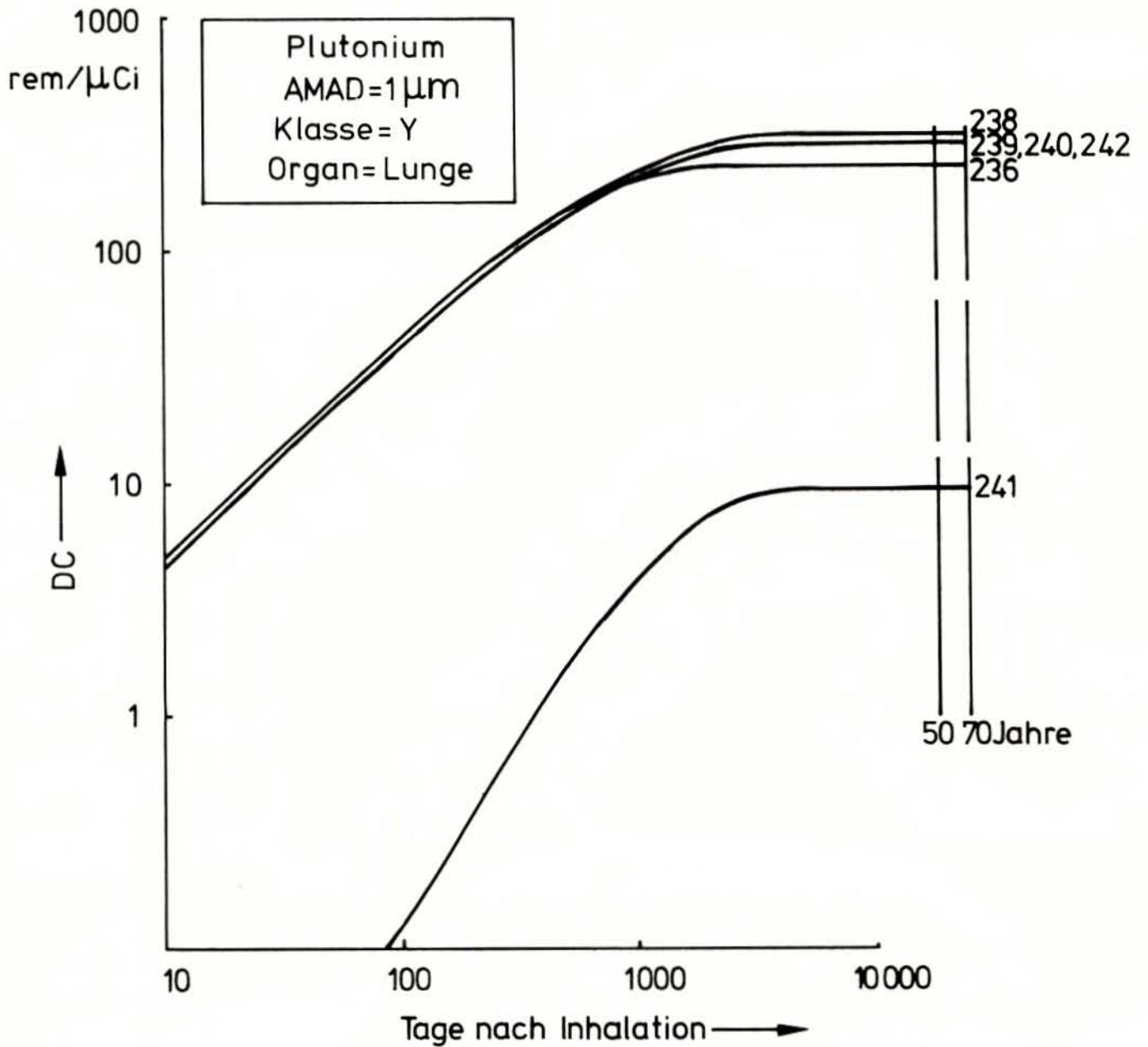
Um die Zeitabhängigkeit der Strahlenexposition nach einmaliger Inhalation aufzuzeigen, wurde am Beispiel schwerlöslicher Plutonium-Aerosole (AMAD =  $1 \mu\text{m}$ , Stoffklasse Y) der Zeitverlauf des Dose-commitments für Lunge, Lymphgewebe, Knochen und Leber im Intervall zwischen 10 Tagen und 70 Jahren nach Inhalation bestimmt (Bilder 7 - 10). Während die Lungendosis nach ca. 8 Jahren nicht weiter ansteigt, erreicht die Organdosis für das Lymphgewebe, die Knochen und die Leber auch nach 70 Jahren ihren Sättigungswert nicht. Kritische Organe bei der Inhalation von Plutonium sind die Knochen oder die Lunge, unabhängig davon, ob die inhalierte Plutoniumverbindung den Stoffklassen D, W oder Y angehört. Bild 10 zeigt zusätzlich das Dose-commitment für Pu-241, wenn die Masse des Lymphsystems mit 15 g angenommen wird.

## 5.2 Einmalige Aufnahme durch Ingestion

Der Gastrointestinal-Trakt (GI) kann als ein Einkompartiment-Modell (Bild A2 im Anhang 1) dargestellt werden, das den Nuklidtransfer in das Blut beschreibt. Die Absorption der mit der Nahrung aufgenommenen Stoffe findet im Dünndarm statt, der in diesem vereinfachten, für langlebige Nuklide jedoch ausreichenden Modell nicht durch ein weiteres Kompartiment herausgestellt wird. Im natürlichen Stoffwechsel haben die Aktiniden keine biologische Bedeutung. Der Abbau der Nahrung und die Aufnahme der Bestandteile durch die Epithelzellen des Dünndarms bewirken einen Zugang in den Blutkreislauf. Der Transfer von Aktiniden, meistens Plutonium, in das Blut ist in Tierversuchen an Ratten und Schweinen bestimmt worden (siehe Literaturhinweise in /19/). Für den Menschen wird bei schwerlöslichem Material wie  $\text{PuO}_2$  ein vom Blut absorbiertes Bruchteil von  $f_w = 10^{-4} \%$  angenommen /19/. Für lösliche Plutoniumverbindungen, insbesondere Pu-Zitrate und Pu-Nitrate, sind Transferfaktoren bis zu ca. 2 % gemessen worden. Die vorliegende Modellrechnung geht für alle Aktiniden von schwerlöslichem Material aus und berücksichtigt die Absorption mit  $f_w = 10^{-4} \%$ . Der Stofftransport aus dem GI-Trakt in das Blut wird exponentiell mit einer Halbwertszeit von 24 Stunden berücksichtigt. Das mathematische Modell wird im Anhang mit exakter Berücksichtigung der Tochteraktivität behandelt, wobei wie im Fall der Inhalation das Blut als Transportmedium und nicht als Kompartiment verstanden wird. Für Knochen und Leber sind die Dose-commitments für Integrationszeiten von 50 und 70 Jahren nach einmaliger Ingestion zusammen mit den berechneten Dose-commitments für Inhalation im Anhang 2 zusammengestellt.

## 5.3 Kontinuierliche Aufnahme

Bei einmaliger Aufnahme von  $1 \mu\text{Ci}$  radioaktiver Aerosole steigt das Dose-commitment als Funktion der Zeit monoton (nuklid- und organspezifisch) an, während die jährliche Dosisleistung entsprechend dem Verlauf des Differentialquotienten der Dosis als Funktion der Zeit monoton fällt (Bild 11).



**Bild 7:** Zeitabhängigkeit des Dose-commitments der Lunge

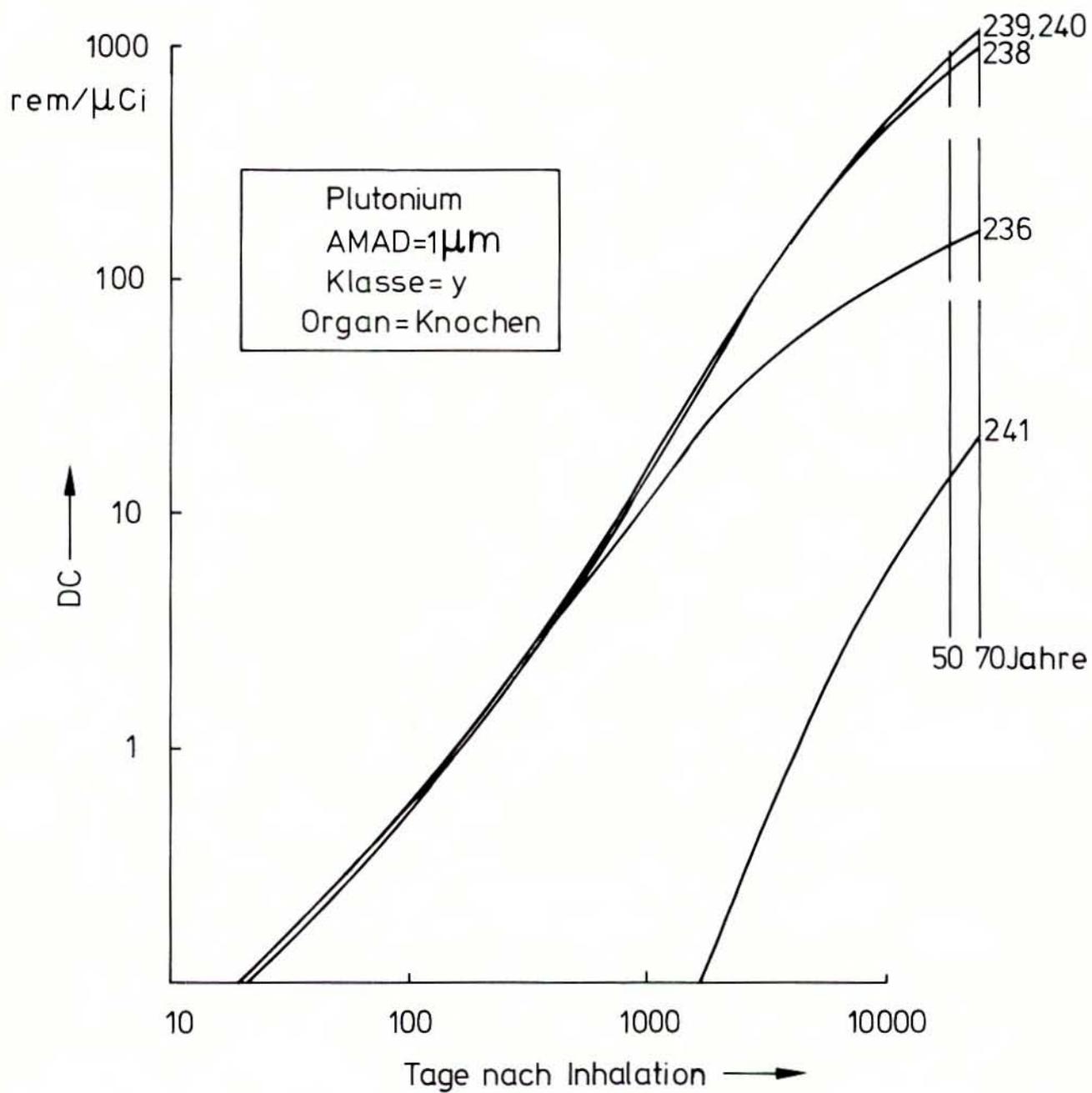


Bild 8: Zeitabhängigkeit des Dose-commitments der Knochen

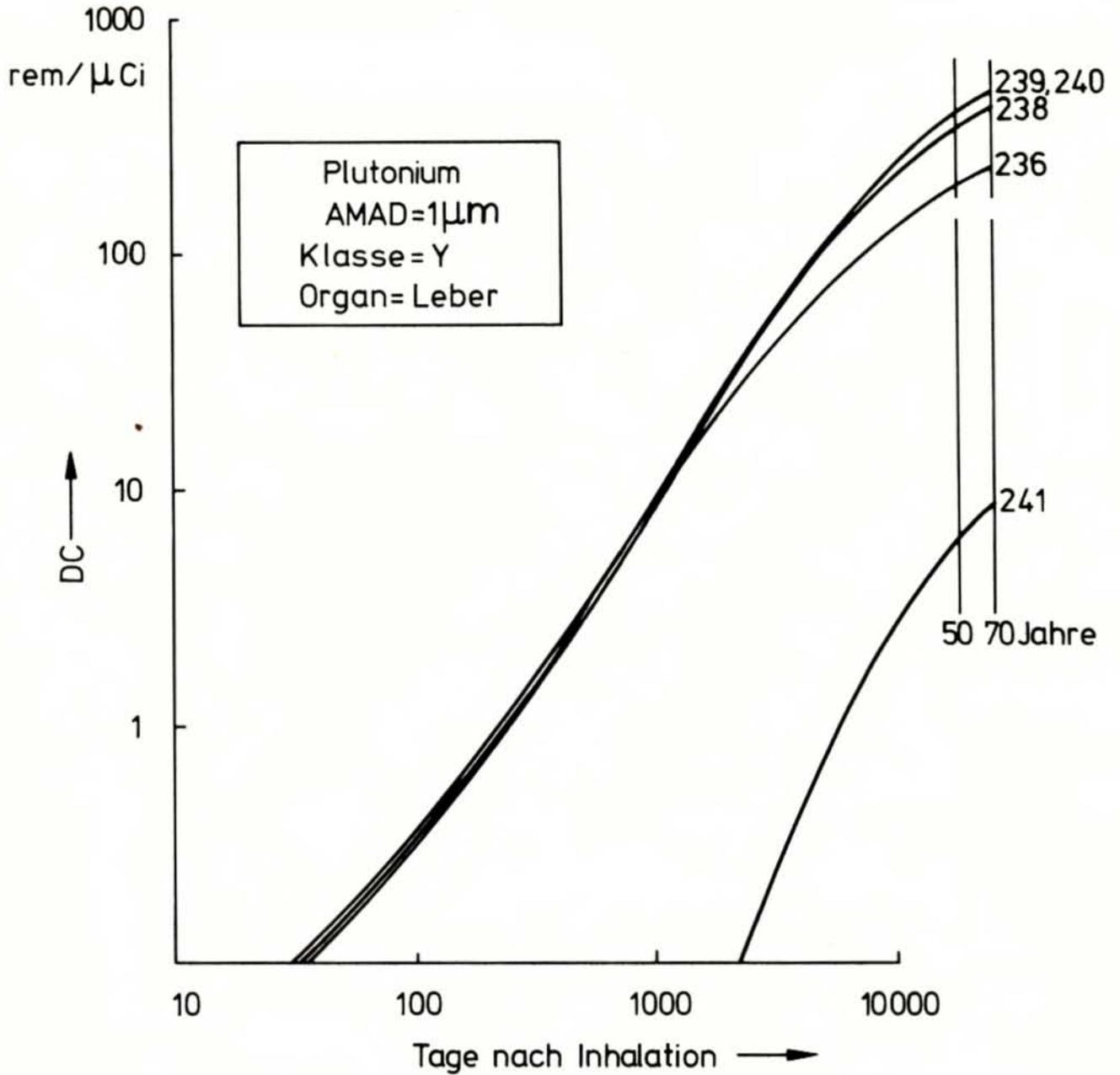


Bild 9: Zeitabhängigkeit des Dose-commitments der Leber

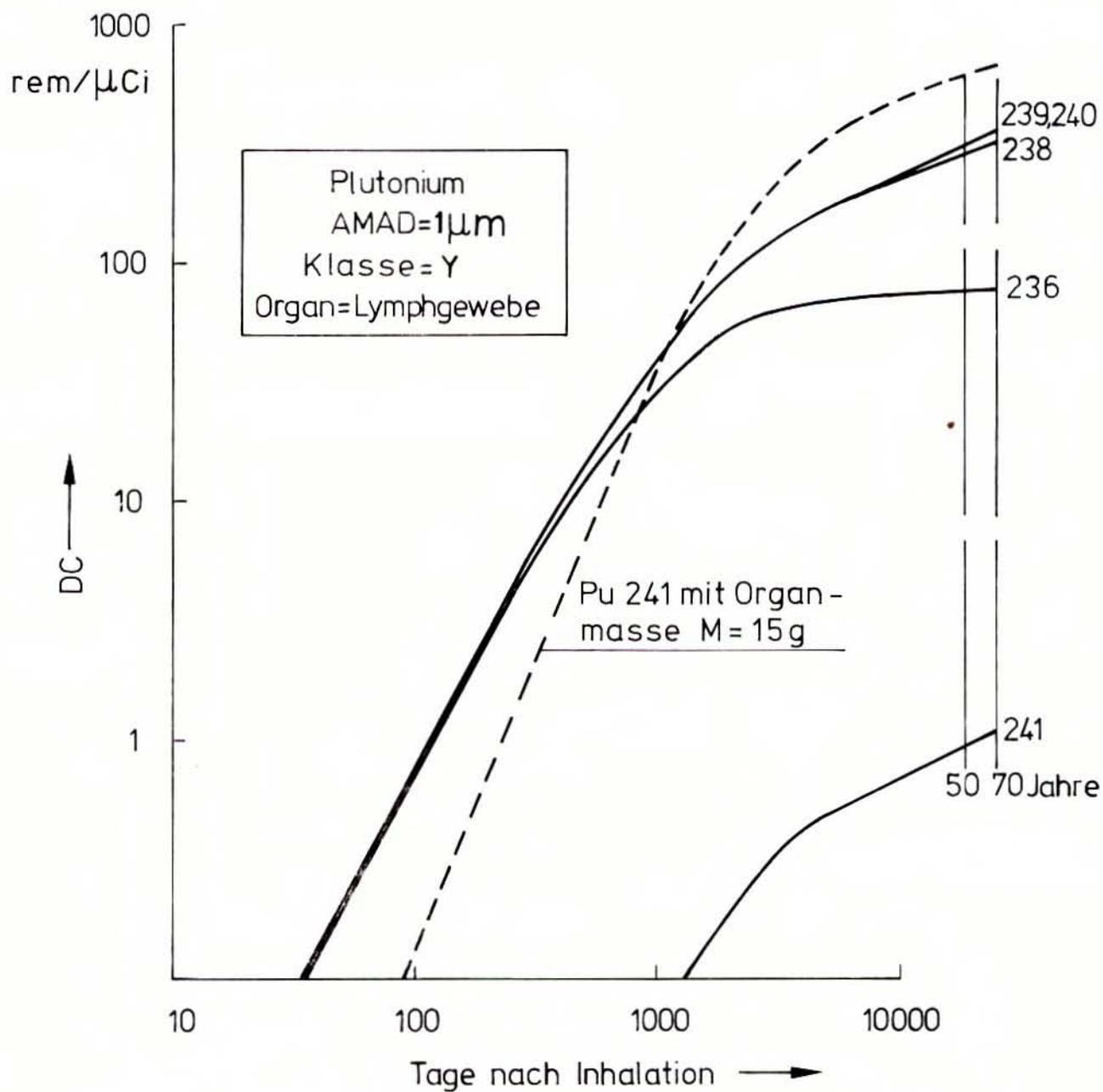
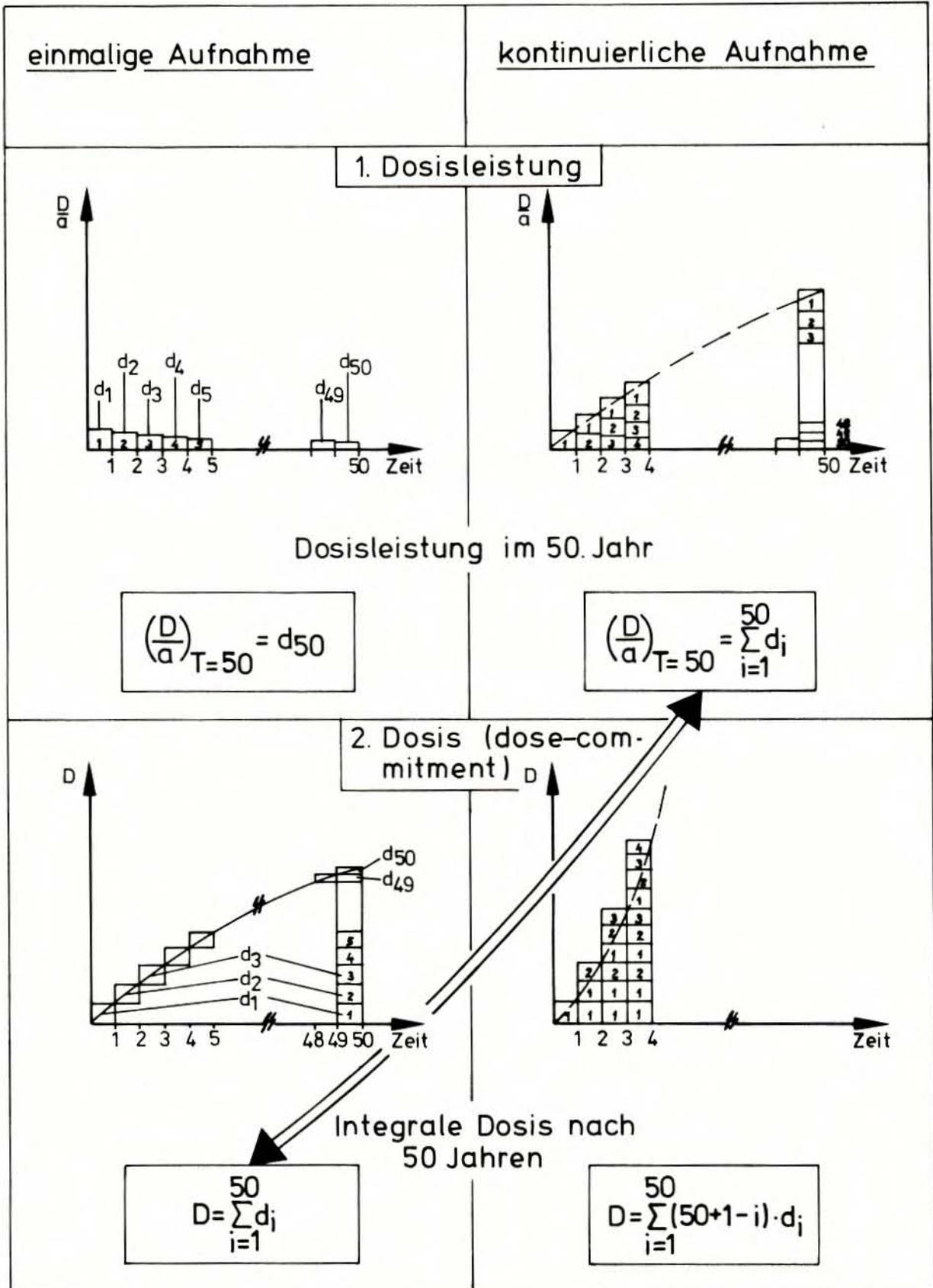


Bild 10: Zeitabhängigkeit des Dose-commitments des Lymphgewebes



**Bild 11:** Gegenüberstellung von Dosis D und Dosisleistung D/a bei einmaliger und kontinuierlicher Aufnahme durch Inhalation

Die Dosisleistung bei kontinuierlicher Aufnahme führt zu einer Zeitabhängigkeit, die identisch mit der Dosis bei einmaliger Aufnahme ist. Für die Übertragbarkeit der berechneten Dose-commitments und Dosisfaktoren (g-Faktoren) auf kontinuierliche Inhalation gilt daher:

Das Dose-commitment nach 50 Jahren (bzw. 70 Jahren) entspricht der Jahresdosis bei kontinuierlicher Aufnahme im 50. Jahr (bzw. im 70. Jahr). Da die Jahresdosis für kontinuierliche Aufnahme monoton ansteigt, ist der Wert im 50. oder 70. Jahr der größte, so daß für Jahresbelastungen von Personen in und in der Umgebung von kerntechnischen Anlagen in jedem Falle eine konservative Betrachtung gewährleistet ist. Im Hinblick auf die durch die Strahlenschutzverordnung /50/ vorgeschriebenen Richtwerte für die Dosisleistung geben daher die tabellierten Daten die Jahresdosis bei Normalbetrieb konservativ wieder. Zur Beurteilung der Strahlenexposition nach Störfällen - die Störfalldauer kann gegenüber der Integrationszeit von 50 bzw. 70 Jahren als klein angesehen werden - ist das Modell der einmaligen Aufnahme von radioaktiven Substanzen angemessen.

Die integrale Dosis bei kontinuierlicher Aufnahme, die nicht tabelliert wurde, läßt sich durch Integration der Dosisverteilung für einmalige Aufnahme bestimmen. Zum Beispiel erhält man für die Knochendosis nach Inhalation von jährlich 30 nCi Pu-239 in 70 Jahren 1200 rem. Die während dieser Zeit inhalede Gesamtaktivität beträgt ca. 2 µCi. Im Vergleich dazu wird durch die einmalige Inhalation von 1 µCi Pu-239 nach 70 Jahren dieselbe Knochendosis erreicht.

#### 5.4 Strahlenexposition des Säuglings

Die im Anhang 2 aufgeführten Dose-commitments für eine Integrationszeit von 70 Jahren sind mit den Organdaten des 20jährigen Referenz-Menschen bestimmt worden /49/. Einen Vergleich der Organmassen und der Atemrate für den Säugling und den 20jährigen Referenz-Menschen zeigt Tabelle 4.

	Säugling		Referenz-Mensch 20 Jahre	
	M = Masse /g/	A/M	M = Masse /g/	A/M
Lunge	66 /12/	$7.6 \cdot 10^{-3}$	1000 /49/	$3 \cdot 10^{-2}$
Knochen	500 /12/	$1 \cdot 10^{-3}$	5000 /49/	$6 \cdot 10^{-3}$
Leber	100 /12/	$5 \cdot 10^{-3}$	1800 /49/	$1.7 \cdot 10^{-2}$
A = Atem- rate l/min	0.5 /49/		29 /49/ 30 (diese Rechnungen)	

Tab. 4: Vergleich der Organmassen und der Atemrate für Säuglinge und 20jährigen Referenz-Menschen

			L u n g e		K n o c h e n		L e b e r	
Pu-Mischung	Spezifische Aktivität (Ci/g)	T (a)	DC	g-Faktor	DC	g-Faktor	DC	g-Faktor
LWR: U /33/	11.77	50	1.4 E+1	7.0 E+3	4.8 E+1	2.4 E+4	2.1 E+1	1.1 E+4
		70	1.4 E+1	7.0 E+3	6.5 E+1	3.2 E+4	2.6 E+1	1.3 E+4
LWR: U-Pu /33/	19.37	50	1.4 E+1	7.0 E+3	4.7 E+1	2.4 E+4	2.1 E+1	1.0 E+4
		70	1.4 E+1	7.0 E+3	6.4 E+1	3.2 E+4	2.6 E+1	1.3 E+4
FBR /33/	2.5	50	1.4 E+1	7.1 E+3	5.3 E+1	2.7 E+4	2.3 E+1	1.2 E+4
		70	1.4 E+1	7.1 E+3	7.4 E+1	3.7 E+4	3.0 E+1	1.5 E+4
FBR /12/	4.12	50	1.8 E+1	9.1 E+3	6.0 E+1	3.0 E+4	2.7 E+1	1.3 E+4
		70	1.8 E+1	9.1 E+3	8.2 E+1	4.1 E+4	3.3 E+1	1.7 E+4

Tab. 5: Dose-commitments in rem/ $\mu$ Ci und Dosisfaktoren in rem  $\cdot$  m<sup>3</sup>/Ci  $\cdot$  sec verschiedener Plutoniummischungen (AMAD = 1  $\mu$ m, KLASSE = Y)

KLASSE	AMAD / $\mu\text{m}$ /	T	L u n g e		K n o c h e n		L e b e r	
			DC	g-FAKTOR	DC	g-FAKTOR	DC	g-FAKTOR
D	0.3	50 Y	3.2 E-2	1.6 E+1	5.8 E+2	2.6 E+5	2.3 E+2	1.1 E+5
W	0.3	50 Y	2.0 E+0	9.8 E+2	1.3 E+2	6.6 E+4	5.7 E+1	2.9 E+4
Y	0.3	50 Y	2.0 E+1	1.0 E+4	6.4 E+1	3.2 E+5	2.8 E+1	1.4 E+4
D	1.0	50 Y	2.2 E-2	1.1 E+1	5.3 E+2	2.7 E+5	2.3 E+2	1.1 E+5
W	1.0	50 Y	1.4 E+0	6.8 E+2	1.3 E+2	6.7 E+4	5.8 E+1	2.9 E+4
Y	1.0	50 Y	1.4 E+1	7.0 E+3	4.8 E+1	2.4 E+4	2.1 E+1	1.1 E+4
D	0.3	70 Y	3.2 E-2	1.6 E+1	7.0 E+2	2.5 E+5	2.8 E+2	1.4 E+5
W	0.3	70 Y	2.0 E+0	9.8 E+2	1.8 E+2	8.8 E+4	7.0 E+1	3.5 E+4
Y	0.3	70 Y	2.0 E+1	1.0 E+4	8.7 E+1	4.4 E+4	3.5 E+1	1.8 E+4
D	1.0	70 Y	2.2 E-2	1.1 E+1	7.0 E+2	3.5 E+5	2.8 E+2	1.4 E+5
W	1.0	70 Y	1.4 E+0	6.8 E+2	1.8 E+2	8.8 E+4	7.1 E+1	3.5 E+4
Y	1.0	70 Y	1.4 E+1	7.0 E+3	6.5 E+1	3.2 E+4	2.6 E+1	1.3 E+4

Tab. 6: Dose-commitments in  $\text{rem}/\mu\text{Ci}$  und Dosisfaktoren in  $\text{rem} \cdot \text{m}^3/\text{Ci} \cdot \text{sec}$  einer Plutoniummischung /33/ (LWR-U, spezifische Aktivität (alpha + beta) = 11.77 Ci/g) in Abhängigkeit von Stoffklassen, Aerosolgröße und Integrationszeit

Der Dosisfaktor ist dem Quotienten aus Atemrate A und Organmasse M proportional (siehe Anhang 1). Der Quotient A/M des 20jährigen Referenz-Menschen ist für jedes der betrachteten Organe im Vergleich zu den Säuglingswerten größer, so daß vom Modell her die berechneten Dosisfaktoren für den 20 Jahre alten Referenz-Menschen nach einer Integrationszeit von 70 Jahren etwa um einen Faktor 3 zu groß sind, wenn sie auf den Säugling angewendet werden. Inwieweit allerdings die Transferfaktoren und biologischen Halbwertszeiten im Lungenmodell nach ICRP 19 den Metabolismus des Säuglings noch richtig berücksichtigen, ist nicht bekannt. Unsicherheiten bei der Abschätzung der Strahlenexposition des Säuglings werden durch die veränderten Retentionszeiten des jungen Organismus hervorgerufen, die eine Folge der im Vergleich zum Erwachsenen erhöhten Zellteilungsgeschwindigkeit und Stoffwechselaktivität ist. Andererseits ist bei einmaliger Inhalation im Kleinkindalter die Atemrate zu dieser Zeit relevant, während durch die kumulierte Strahlenexposition die mit dem Alter zunehmende Organmasse zu einer erheblichen Überschätzung der Organdosis führt.

### 5.5 Plutoniummischungen

Es wurden die Dose-commitments (DC) und Dosisfaktoren (g-Faktoren) für Plutoniummischungen (Tabelle 1) abgebrannter Brennelemente verschiedener Reaktortypen nach Integrationszeiten von 50 und 70 Jahren bestimmt (Tabelle 5). Für einen Leichtwasserreaktor mit Uranbrennstoff wurde außerdem der Einfluß der Stoffklasse und des Aerosoldurchmessers auf die Inhalationsdosis untersucht (Tabelle 6). Zur Beurteilung der relativen Gefährdung durch verschiedene Mischungen ist es sinnvoll, die Produkte A.g aus der spezifischen Aktivität A und dem Dosisfaktor g zu vergleichen (Tabelle 7).

	A = spezifische Aktivität	g = g-Faktor (KLASSE = Y, Knochen)	A . g
LWR U /33/	11.77	$2.4 \cdot 10^4$	$28.2 \cdot 10^4$
LWR U-Pu /33/	19.37	$2.4 \cdot 10^4$	$46.5 \cdot 10^4$
FBR /33/	2.5	$2.7 \cdot 10^4$	$6.75 \cdot 10^4$
FBR /12/	4.12	$3.0 \cdot 10^4$	$12.3 \cdot 10^4$

Tab. 7: Spezifische Aktivität A, Dosisfaktor g und Produkt A.g für verschiedene Plutoniummischungen

Die Plutoniummischung des Uran-Mischbrennstoffs eines Leichtwasserreaktors führt im Vergleich zu den anderen hier betrachteten Mischungen zur größten Knochendosis.

## 5.6 Vergleich mit anderen Autoren

Der Vergleich mit neueren Rechnungen anderer Autoren /12,51-56/, exemplarisch an den Beispielen Pu-239 und Pu-241 in der Tabelle 8 und 9 aufgezeigt, setzt die Kenntnis der jeweils verwendeten Modelle sowie des vollständigen Parametersatzes der Organ- und Nuklidaten voraus. Dose-commitments, die unter Berücksichtigung der letzten von der Arbeitsgruppe "Task Group Lung Model" empfohlenen Daten /19/ für das Kompartiment-Modell der Lunge berechnet wurden /52,53/, zeigen befriedigende Übereinstimmung. Abweichungen sind durch unterschiedliche Organmassen und durch die verschiedene Behandlung der Tochternuklidaktivität möglich. Während von anderen Autoren der Einfluß instabiler Tochternuklide auf die Organdosis allein durch eine modifizierte effektive Energie des Mutternuklids berücksichtigt wurde, erfolgte in der vorliegenden Untersuchung eine exakte Berechnung des von einem Tochternuklid verursachten Dosisanteils. Wenn Zerfallsketten von Bedeutung sind, wurde die effektive Energie des Tochternuklids modifiziert /48/, die effektive Energie des Mutternuklids blieb unverändert. Eine weitere Unsicherheit beim Vergleich mit anderen Rechnungen ist durch die, meistens nicht angegebene, Aerosolgröße (AMAD) gegeben. Die Vergrößerung des Aerosoldurchmessers bewirkt eine Reduktion der Lungendosis (Bild 4) für alle Stoffklassen D, W, Y, der Knochen- und Leberdosis (Bild 6, 7) für die Stoffklasse Y.

## 6. BETRACHTUNGEN ZUM STRAHLENRISIKO

### 6.1 Risikomodelle

Die Auswirkungen einer Strahlenexposition auf den menschlichen Organismus sind nicht allein aus der Kenntnis einer gemessenen oder berechneten Äquivalentdosis ersichtlich. Obwohl der Ablauf der Elementarprozesse bei der Bestrahlung von Zellen nicht vollständig verstanden ist, zum Beispiel die Wirkungsweise von Reparaturmechanismen, zeigen die zahlreichen Tierversuche, aber auch die langfristige Analyse der japanischen Atombombenüberlebenden, daß eine Strahlenexposition bösartige Tumoren erzeugen kann. Zwischen der Zeit der Exposition und dem Auftreten bösartiger Gewebeveränderungen können mehrere Jahrzehnte liegen. Wegen der erheblich verminderten Lebenserwartung nach Bildung von Krebs ist es sinnvoll, in Modellen zur Risikoabschätzung die Anzahl im Vergleich zu Kontrollgruppen zusätzlicher Todesfälle auf Grund strahleninduzierter Erkrankungen anzugeben. Nach der neuesten Empfehlung der internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP 26) steht im Strahlenschutz das Risiko für den Ganzkörper im Vordergrund, das aus einer gewichteten Summe über alle relevanten Organe zu bilden ist. Grundsätzlich werden zwei Risikomodelle unterschieden:

#### - A b s o l u t e s R i s i k o

Das absolute Risiko ist definiert als die auf die mittlere Strahlenexposition  $D$  und die sich über die Zeit  $T$  im Risiko befindliche Personengruppe  $N$  bezogene Anzahl zusätzlicher Todesfälle

Stoffklasse	AMAD /µm/	Pu-239 - Dose-commitments rem/µCi			Referenz	Herkunft der verwendeten Parameter	Computer- code
		Lunge	Knochen	Leber			
unlöslich	0.1	9.8 E+2	4.0 E+2	8.3 E+1	/51/ 1968	ICRP 2	-
	0.5	5.9 E+2	2.6 E+2	5.4 E+1			
-	-	1.9 E+0	4.7 E+2	3.0 E+1	/54/ 1972 <sup>1)</sup>	-	-
-	-	1.5 E+3	1.6 E+4	1.9 E+4	/12/ 1972	-	-
W	0.3	7.6 E+1	1.6 E+3	1.0 E+3	/52/ 1975	ICRP 19	DACRIN
W	1.0	4.9 E+1	1.6 E+3	1.0 E+3			
Y	0.3	7.5 E+2	8.7 E+2	5.6 E+2			
Y	1.0	4.8 E+2	5.9 E+2	3.9 E+2			
Y	-	2.9 E+2	8.7 E+2	-	/53/ 1975	ICRP 19	
-	-	1.7 E+2	3.1 E+2	4.2 E+2	/55/ 1976	ICRP 2	
unlöslich	-	1.8 E+2	6.6 E+3	8.9 E+2	/56/ 1976	ICRP 2	INREM
W	0.3		3.3 E+3	1.3 E+3	/6/ 1974	ICRP	
W	0.3	4.3 E+1	1.3 E+3	9.8 E+2	Eigene Ergeb- nisse 1977	ICRP 19	INHADO
W	1.0	3.0 E+1	2.3 E+3	9.9 E+2		ICRP 23	
Y	0.3	4.2 E+2	1.2 E+3	5.3 E+2			
Y	1.0	2.9 E+2	8.9 E+2	3.9 E+2			

1) Aus den in /54/ berechneten Dosisfaktoren für eine Atemrate von 20 m<sup>3</sup>/Tag wurde das Dose-commitment bestimmt.

Tab. 8: Vergleich der Pu-239 - Dose-commitments mit Ergebnissen anderer Autoren

Stoffklasse	AMAD /µm/	Pu-241 - Dose-commitments rem/µCi			Referenz	Herkunft der verwendeten Parameter	Computer- code
		Lunge	Knochen	Leber			
-	-	1.9 E-3	1.5 E+0	7.8 E-2	/54/	-	-
		1.4 E+0	2.8 E+2	1.3 E+2	/12/	-	-
W	0.3	2.4 E-2	2.9 E+1	1.8 E+1	/52/	ICRP 19	DACRIN
W	1.0	1.6 E-2	2.9 E+1	1.7 E+1			
Y	0.3	1.3 E+0	1.3 E+1	8.2 E+0			
Y	1.0	8.5 E-1	9.3 E+0	5.7 E+0			
Y	-	5.9 E-1	1.7 E+2	-	/53/	ICRP 19	-
-	-	1.5 E-1	6.1 E+1	3.3 E+0	/55/	ICRP 2	-
unlöslich	-	1.6 E-1	1.2 E+2	6.4 E+0	/56/	ICRP 2	INREM
W			6.7 E+2	2.5 E+1	/6/	ICRP	
Y		2.0 E+0					
W	0.3	1.9 E-2	4.6 E+1	1.9 E+1	Eigene Ergeb- nisse 1977	ICRP 19	INHADO
W	1.0	1.3 E-2	4.7 E+1	1.9 E+1		ICRP 23	
Y	0.3	1.3 E+0	2.0 E+1	8.3 E+0			
Y	1.0	9.4 E-1	1.5 E+1	6.2 E+0			

Tab. 9: Vergleich der Pu-241 - Dose-commitments mit Ergebnissen anderer Autoren

(Differenz aus der Anzahl der gesamten Todesfälle X und den spontan auftretenden Todesfällen  $R \cdot P$ ) /57/.

$$\text{Absolutes Risiko } R_A = \frac{X - R \cdot P}{D \cdot P \cdot 10^6}$$

$$P = N \cdot T$$

Die Anzahl zusätzlicher Todesfälle ( $X - R \cdot P$ ) ist im Absolut-Risiko-Modell unabhängig von der Anzahl spontan auftretender Todesfälle ( $R \cdot P$ ).

#### - R e l a t i v e s R i s i k o

Das relative Risiko ist definiert als Quotient aus gesamten und spontan auftretenden Todesfällen.

$$\text{Relatives Risiko } R_R = \frac{X}{R \cdot P}$$

Der prozentuale Zuwachs zusätzlich auftretender Todesfälle beträgt im Relativ-Risiko-Modell:

$$r \text{ \%} = \frac{100 \cdot (R_R - 1)}{D}$$

Hier sind die zusätzlichen Todesfälle proportional zu den spontan auftretenden, so daß ein möglicher Alterseinfluß zur Zeit der Exposition mit berücksichtigt wird. Die einmalige Bestrahlung eines Kleinkindes führt mit größerer Wahrscheinlichkeit zu einer Erkrankung als die eines Erwachsenen, weil im jungen Organismus das Zellwachstum größer ist. Mit zunehmendem Alter nimmt außerdem die Neigung des Gewebes zu, karzinogen zu werden. Das alterabhängige relative Risiko einer strahleninduzierten Krankheit mit Todesfolge kann demnach auch für die jüngste und älteste Personengruppe Aussagen machen, wenn nur die Daten für spontane und zusätzliche Todesrate für verschiedene Altersgruppen bekannt sind.

Risikoabschätzungen für den Menschen gehen auf Daten zurück, die aus der Analyse von Beobachtungen an Personengruppen mit unterschiedlicher Strahlenexposition gewonnen wurden. Nachstehend sind die Personengruppen aufgeführt, deren statistische Auswertung die Grundlagen für das krankheitsspezifische Risiko geliefert haben (Tabelle 10).

Ausgehend von den Todesfällen innerhalb eines mehrjährigen (ca. 20 Jahre) Beobachtungsintervalls werden bei Annahme einer linearen Dosis-Wirkungsbeziehung jährliche, strahleninduzierte Todesfälle bestimmt. Bezogen wird diese Jahresrate auf eine vorgegebene Personenanzahl und die Einheitsdosis von 1 rem. Für eine Risikoanalyse ist von Bedeutung, nach welcher Latenzzeit eine strahleninduzierte Krankheit offenkundig ist und über wel-

Personengruppe	Risiko für
- Überlebende der Atombomben	Blutzellen (Leukämie) Brust /57/ Lunge Magen
- Röntgen-Therapie-Patienten	Blutzellen (Leukämie) Schilddrüse Knochen /57/ Haut Lunge Magen
- Ra-226-Arbeiter Bemalen von Uhrziffern- blätter	Knochen /57/
- Ra-224-Therapie	Knochen /57/
- Röntgen-Diagnose	Brust /57/
- Uran-Bergbau-Arbeiter	Lunge /57/
- Flußspat-Bergbau-Arbeiter	Lunge /57/
- Pu-Arbeiter Los Alamos Rocky-Flats	noch keine Risikoanalyse /58/ /40/
- Thorotrast-Patienten	Leber /35/

Tab. 10: Personengruppen zur Bestimmung krankheitsspezifischer Risikoangaben

che Zeit sich das Krankheitsrisiko erstreckt, das sog. Plateau. Die altersabhängige Latenzzeit erstreckt sich von 0 - 2 Jahre für Leukämie und 0 - 15 Jahre für alle anderen Krankheiten. Die Länge der Plateauregion variiert im Bereich zwischen 10 und 25 Jahren für Leukämie und 10 Jahren bis zum Lebensende für alle anderen Krankheiten /57/.

Bestrahlungs- alter	Krankheit	Latenzzeit (Jahre)	Plateau (Jahre)	Risiko- abschätzung	
				$\frac{R_A}{\text{Tote} \cdot \text{Jahre}^{-1}}$ $\frac{10^6 \text{ manrem}}{10^6 \text{ manrem}}$	r %
in utero	Leukämie	0	10	25	50
	alle anderen	0	10	25	50
0 - 9 Jahre	Leukämie	2	25	2.0	5.0
	alle anderen	15	(a) 30 (b) Le- benser- wartung	1.0	2.0
$\geq 10$ Jahre	Leukämie	2	25	1.0	2
	Brust	15	30	1.5	
	Lunge			1.3	
	GI incl.Magen			1.0	
	Knochen			0.2	
	alle anderen Krankheiten (Leber) (Nieren) /52/			1.0 (0.5) (0.5)	
	Summe ohne Leukämie:			5.0	

Tab. 11: Krankheits- und altersspezifische Risikoabschätzung /52,57/

Bei der Abschätzung eines Kollektivrisikos für die Bevölkerung ist zu beachten, daß bei Anwendung der Tabelle 11 die Todesfälle pro Jahr als Todesfälle pro Jahr in der Plateauregion verstanden werden können. Die einmalige Strahlenexposition von 1 rem, die eine Million Personen betrifft, führt bei einem totalen Risiko für alle Krankheiten von 6 Todesfällen/( $10^6$  Personen x Jahre x rem) und einer Plateaulänge von 30 Jahren zu 180 Todesfällen. Zahlreiche Vorbehalte sind angebracht bei der Ri-

sikoabschätzung der Bevölkerung bei kleinen Strahlenexpositionen nach dem man-rem-Konzept. Ohne an dieser Stelle auf alle Aspekte einzugehen - eine ausführliche Darstellung ist von Rausch /59/ und im BEIR-Report /57/ angegeben -, soll auf Unsicherheiten bei der Extrapolation von strahleninduzierten Krankheiten bei hohen Dosen und Dosisraten nach der linearen Dosis-Wirkungs-Beziehung hingewiesen werden. Die beobachteten Effekte an den Atombombenüberlebenden und Röntgentherapiegruppen sind durch Strahlen mit kleinem linearem Energietransfer (LET) bei hohen Dosen verursacht worden. Klein-LET-Strahlung, wie Gamma-, Beta- und Röntgenstrahlung, hat bei kleinen Dosen und Dosisraten eine verminderte biologische Wirksamkeit (RBW) und führt daher zu einer Risikoüberschätzung bei kleinen Dosen. Die Übertragung auf Strahlung mit hohem LET, wie Alpha- und Neutronenstrahlung, würde dagegen zu einer Risikounterschätzung führen, da bei kleinen Dosen und Dosisraten die Strahlenwirkung zunimmt. Dieser Effekt wird jedoch durch Einführung eines konstanten RBW-Faktors von 10 kompensiert.

Als kritische Anmerkung zur Hypothese einer linearen Dosis-Wirkungs-Beziehung sollen zwei Beispiele herausgestellt werden:

- Reparaturprozesse bei kleinen Dosen setzen die Strahlenwirkung herab und führen zu einer Verminderung des Risikos /60,61/.
- Während bei hohen Dosen die Effektivität der Strahlung durch Mehrfachtreffer (overkill der Zelle) herabgesetzt wird, werden bei kleinen Dosen die Zellen überwiegend durch Einzeltreffer inaktiviert, so daß sich eine relative Erhöhung der Strahlenwirkung ergibt /57/.

Inwieweit diese oder andere Effekte zu einer Abweichung von der linearen Dosis-Wirkungs-Beziehung führen können, ist gegenwärtig offen. Auf Grund der auf jeden Fall geringen biologischen Strahlenwirkung bei kleinen Dosen ist nicht zu erwarten, daß in absehbarer Zeit statistisch abgesicherte Aussagen über die Dosis-Wirkungs-Beziehung in diesem Bereich zur Verfügung stehen werden.

Der überwiegende Teil der hier untersuchten Literatur /25,52, 57,62,63,64/ zur Risikoabschätzung aus Untersuchungen am Menschen, dabei sind auch die Publikationen über Risiken von Plutonium und anderen Transuranen eingeschlossen, geht von den Daten des BEIR-Reports /57/ und UNSCEAR-Reports /65/ aus. Strom und Watson /52/ ergänzen die Risikoabschätzungen und geben Risiken für die Organe Leber und Nieren an (Tabelle 11). Das Risiko für Knochenerkrankungen stützt sich wesentlich auf die Ra-226-Arbeiter, wenn Abschätzungen für Plutonium nach Inkorporation durchgeführt werden.

Neuere Ergebnisse aus Tierexperimenten, die bei relativ hohen Dosen durchgeführt wurden, weisen darauf hin, daß der relative Schädigungsfaktor von Plutonium im Knochen auch unterschätzt sein könnte /13,66,67,68/. Ellett et al. /62/ nehmen daher als Mittelwert einen Faktor 30 an, so daß sich das Krankheitsrisiko bei der Aufnahme einer vorgegebenen Plutoniummenge um einen

Faktor 6 erhöhen würde. Mit dem Hinweis auf die Untersuchung an amerikanischen Plutonium-Arbeitern, die keinen Fall von eindeutig plutoniuminduzierter Tumorbildung ergab, wird gegenwärtig kein Anlaß zur Herabsetzung der zugelassenen Grenzwerte für Plutoniuminkorporation gesehen /41,69/.

Die vorliegende Untersuchung geht daher von der ICRP-Empfehlung /48/ aus, wonach Plutonium im Vergleich zu Radium im Knochen um den Faktor  $N = 5$  wirksamer ist. Auf der Grundlage derselben ICRP-Empfehlung sind für schwerlösliche Plutoniumverbindungen, die der Stoffklasse Y zuzuordnen sind, Lunge und Knochen als kritische Organe anzusehen, während für die Stoffklassen D und W von den Knochen die größte Gefährdung ausgeht. Als Maß für die biologische Strahlenwirkung (SW) kann für diese Betrachtung das Produkt aus Dose-commitment (DC) und Risiko angesehen werden. Für Pu-239 erhält man die in Tabelle 12 zusammengestellten Ergebnisse.

Stoff- klasse Organ	D		W		Y	
	DC $\text{rem}, \mu\text{Ci}^{-1}$	SW	DC $\text{rem}, \mu\text{Ci}^{-1}$	SW	DC $\text{rem}, \mu\text{Ci}^{-1}$	SW
Lunge	0.5	$6.5 \cdot 10^{-7}$	30	$3.9 \cdot 10^{-5}$	290	$3.8 \cdot 10^{-4}$
Knochen	9100	$1.8 \cdot 10^{-3}$	2300	$4.6 \cdot 10^{-4}$	890	$1.8 \cdot 10^{-4}$
Leber	3900	$2.0 \cdot 10^{-3}$	990	$5.0 \cdot 10^{-4}$	390	$2.0 \cdot 10^{-4}$

Tab. 12: Dose-commitments und Produkt aus Dose-commitment und Organrisiko für Pu-239

Die Tabelle zeigt, daß entweder Lunge oder Knochen kritisches Organ sein kann, je nachdem, ob man als Kriterium die Dosis oder das Risiko zugrunde legt. Für Stoffklasse Y zum Beispiel ergibt sich bei gleicher Aktivitätsaufnahme durch Inhalation für die Knochen die größere Dosis, für die Lunge aber die größere biologische Strahlenwirkung. Der Stoffklasse Y kommt bei störfallbedingter Freisetzung von Plutonium und anderen Aktiniden die größte Bedeutung zu /52/.

## 6.2 Kollektivrisiko

Aus den Daten der Atombombenüberlebenden und den Spondylarthritiden-Patienten mit Rückgratbestrahlung wurde nach linearer Extrapolation von großen auf kleine Dosen die Anzahl der Toten infolge strahleninduzierter Krankheiten innerhalb einer Zeit von 25 Jahren nach der Bestrahlung bestimmt. Die Umrechnung auf 200 Millionen Einwohner der USA und einmalige Strahlenexposition von 0,1 rem, dies entspricht etwa der natürlichen Jahresbelastung, ergab 1350 bis 3300 Tote /57/. Für eine kontinu-

ierliche Strahlenexposition in gleicher Höhe müßte mit 1350 bis 3300 Toten pro Jahr gerechnet werden.

Diskrepanzen zwischen Risiken nach dem absoluten und relativen Risiko-Modell - Abschätzungen nach dem relativen Modell führen auf Werte im Bereich von 2000 bis 9000 Toten - waren der Anlaß, von einer Todesrate von 2000 bis 4000 Toten innerhalb eines 25-Jahre-Plateaus auszugehen /57/. Mit der oberen Grenze von 4000 Toten erhält man folgende Risiken für die einmalige und kontinuierliche Strahlenexposition:

- Einmalige Strahlenexposition

$$R = \frac{4000 \text{ Tote}}{200 \cdot 10^6 \cdot 0.1 \text{ rem}} = \frac{200 \text{ Tote}}{10^6 \text{ man} \cdot \text{rem}} \quad \text{in 25 Jahren}$$

$$R = \frac{8 \text{ Tote}}{10^6 \text{ man} \cdot \text{rem} \cdot \text{Jahr}}$$

- Kontinuierliche Strahlenexposition

$$R = \frac{4000 \text{ Tote}}{200 \cdot 10^6 \cdot 0.1 \text{ rem Jahr}} = \frac{200 \text{ Tote}}{10^6 \text{ man} \cdot \text{rem} \cdot \text{Jahr}}$$

### 6.3 Individualrisiko

Auf der Grundlage des Absolut-Risiko-Modells, das Abschätzungen für ein Personenkollektiv (man·rem-Konzept) beschreibt, kann auch für das Individuum tentativ ein Risiko abgeleitet /25/ werden. Diese Näherung ist möglich, solange keine Daten für den Menschen nach Inkorporation entsprechend großer Mengen von Alpha-Emittern vorliegen. Aus der mit den organspezifischen Absolut-Risiko-Faktoren (Tabelle 11) gewichteten Summe der Dose-commitments und einer Plateauzeit von 30 Jahren ist bei der Inhalation von 45 µCi Pu-239 ein Todesfall innerhalb von 30 Jahren abzuleiten. Cohen /25,70/ berücksichtigt das vom Lebensalter zur Zeit der Inhalation abhängige Risiko und bestimmt die letale Pu-239-Aktivität von 85 µCi aus der Mittelung über alle Lebensalter einer Population. Aus der spezifischen Pu-239-Aktivität von  $6.137 \cdot 10^{-2}$  Ci/g ergibt sich, daß 45 µCi Pu-239 einer Masse von ca. 720 µg Plutonium entsprechen. Ein Vergleich dieser letalen Plutoniummasse (Pu-239) mit der Letalmasse einer Plutoniummischung (LWR-U-Mischung /33/) zeigt, daß die Inhalation der Plutoniummischung um den Faktor 10 gefährlicher ist (Tabelle 13). Bei Berücksichtigung der Störfallrichtwerte entsprechend der Strahlenschutzverordnung /50/ ist die zugelassene Aktivitätsaufnahme auf Grund der zu erwartenden Knochenodosis auf  $3.4 \cdot 10^{-2}$  µCi Pu-239 bzw. 0.55 µg inhaliertes Plutonium begrenzt. Für die Plutoniummischung entsprechen 0.625 µCi bzw. 0.053 µg nach Inhalation einer Knochenodosis von 30 rem. Wenn eine Plutoniummischung nach /33/ auf dem Wege der

	Risiko $R_A$ /Tote /man·rem·Jahr/	Pu-239		LWR-U-Mischung /33/	
		DC /rem· $\mu$ Ci <sup>-1</sup> /	$R_A \cdot DC$	DC /rem· $\mu$ Ci <sup>-1</sup> /	$R_A \cdot DC$
Lunge	$1.3 \cdot 10^{-6}$	290	$3.77 \cdot 10^{-4}$	14	$1.85 \cdot 10^{-5}$
Knochen	$0.2 \cdot 10^{-6}$	890	$1.78 \cdot 10^{-4}$	48	$9.6 \cdot 10^{-6}$
Leber	$0.5 \cdot 10^{-6}$	390	$1.95 \cdot 10^{-4}$	21	$1.05 \cdot 10^{-5}$
Summe:			$7.5 \cdot 10^{-4}$		$3.83 \cdot 10^{-5}$
Tote /Jahr· $\mu$ Ci inhaliert		$7.5 \cdot 10^{-4}$		$3.83 \cdot 10^{-5}$	
Tote / $\mu$ Ci inhaliert		$2.25 \cdot 10^{-2}$		$1.15 \cdot 10^{-3}$	
Tote / $\mu$ Ci in der Lunge abgelagert		$9.0 \cdot 10^{-2}$		$4.6 \cdot 10^{-3}$	
Spezifische Aktivität in Ci/g		$6.137 \cdot 10^{-2}$		11.77	
Letalmasse inhaliert		723 $\mu$ g		74 $\mu$ g	
Letalmasse in der Lunge abgelagert		180 $\mu$ g		18.5 $\mu$ g	

Tab. 13: Letale Plutoniummassen bei Inhalation

Ingestion in den Körper belangt, so beträgt die letale Masse im Falle löslichen Plutoniums etwa 1 Gramm. Für schwerlösliches Reaktorplutonium ist mit einer Erkrankung des Magen-Darm-Trakts bei Ingestion von 2.8 g zu rechnen /70/.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG

Nach einem kurzen Überblick zur Entstehung der Transurane und der radiologischen Auswirkungen nach Inkorporation werden die Methoden beschrieben, wie die Strahlenexposition verschiedener Organe bestimmt werden kann. Grundlage des mathematischen Formalismus, der im Anhang beschrieben wird, ist das Lungenmodell nach der letzten Empfehlung der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP 19). Es wurden Dose-commitments und Dosisfaktoren für die Organe Lunge, Lymphgewebe, Knochen und Leber nach einmaliger Aufnahme radioaktiver Stoffe durch Inhalation oder Ingestion berechnet. Für die Aktiniden Thorium, Uran, Neptunium, Plutonium, Americium und Curium wurde die Abhängigkeit der Dose-commitments von der Aerosolgröße und verschiedenen Clearance-Zeiten entsprechend der Löslichkeit der Stoffe in physiologischen Flüssigkeiten bestimmt. Die Einteilung der Stoffe erfolgte in Stoffklassen (D), (W) und (Y), die für die Clearance-Zeiten von Tagen, Wochen oder Jahren stehen. Dose-commitments werden sowohl für eine 50-Jahre- als auch 70-Jahre-Integrationszeit bestimmt, so daß eine konservative Abschätzung der Strahlenexposition auch des Kleinkindes möglich ist. Analogien zwischen Dosis und Dosisleistung bei einmaliger und kontinuierlicher Aufnahme radioaktiver Stoffe werden diskutiert mit dem Ergebnis, daß die Tabellen für 50- und 70-Jahre-Dose-commitments nicht nur für einmalige Inhalation gelten, sondern auch für die Dosisleistung im 50. bzw. 70. Jahr bei kontinuierlicher Inhalation oder Ingestion. Die Betrachtung von 50-Jahre-Dose-commitments gewährleistet bei kontinuierlicher Aufnahme, daß die durch die Strahlenschutzverordnung festgelegten Jahresdosisgrenzwerte konservativ berücksichtigt werden können. Ein Vergleich der berechneten Dose-commitments mit Ergebnissen anderer Autoren zeigt befriedigende Übereinstimmung in den Fällen, wo eindeutig dokumentiert ist, daß das neue Lungenmodell (ICRP 19) Grundlage der Rechnungen ist. Abweichungen um mehr als eine Größenordnung wurden festgestellt, wobei offen bleibt, ob diese Diskrepanzen allein aus den älteren Lungenmodellparametern (ICRP 2) resultieren oder ihre Ursache in der nicht angegebenen Aerosolgröße bzw. der fehlenden Zuordnung zu einer Löslichkeitskategorie haben. Ihrer Bedeutung bei der Handhabung entsprechend wurden die Dose-commitments auch für verschiedene Plutoniummischungen, die z.B. bei der Bearbeitung abgebrannter Brennelemente von Leichtwasserreaktoren und schnellen Brutreaktoren anfallen, für alle Stoffklassen und die besonders gefährdeten Organe nach Inkorporation berechnet. Plutoniummischungen sind demnach im Vergleich zu dem am häufigsten vorkommenden Isotop Pu-239 gefährlicher, und zwar wegen der schon durch kleine Massenanteile von Pu-238 verursachten erheblich höheren spezifischen Aktivität.

In der abschließenden Risikodiskussion werden zunächst die Modelle für das absolute und relative Risiko behandelt und die Personengruppen aufgezeigt, die bis heute untersucht wurden und werden, um statistisch signifikante Daten über die Risiken für Leben und Gesundheit zu erhalten. Insbesondere zum Risiko durch Inkorporation von Aktiniden liegen gegenwärtig noch keine Daten vor, so daß zur Abschätzung vorwiegend die Risiken auf Grund einer äußeren Bestrahlung durch Gammastrahlung und Neutronen berücksichtigt werden. Neben den Risikomodellen, die für ein Personenkollektiv Aussagen zulassen, wurde versucht, auch das Individualrisiko abzuschätzen, wenn vorgegebene Substanzmengen von Plutonium-239 oder von Plutoniummischungen durch Inhalation oder Ingestion in den menschlichen Organismus gelangen.

8. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Dolphin, G.W. et al.:  
Radiological Problems in the Protection of Persons Exposed to Plutonium  
NRPB-R 29, September 1974
- /2/ Bair, W.J., und R.C. Thompson:  
Plutonium: biomedical research  
Science 183 (1974), S. 715/22
- /3/ Hodge, H.C., J.N. Stannard und J.B. Hursh:  
Uranium, Plutonium, Transplutonic Elements  
Springer Verlag, 1973
- /4/ Larson, C.E.:  
The Future of Plutonium - an Overview  
Health Phys. 29 (1975), S. 443
- /5/ Dix, G.P., und T.J. Dobry:  
Critical Parameters in Plutonium Safety Evaluations  
Health Phys. 22 (1972), S. 569
- /6/ Barr, N.F.:  
Assessment of Potential Health Consequences of Trans-uranium Elements  
IAEA-SM-184/16, Portorož, Mai 1974
- /7/ Plutonium: Statement of the Problem  
Office of Radiation Programs, U.S. Environmental Protection Agency
- /8/ Ansphaugh, L.R., J.H. Shinn, P.L. Phelps und N.C. Kennedy:  
Resuspension and Redistribution of Plutonium in Soils  
Health Phys. 29 (1975), S. 571
- /9/ Voelz, G.L.:  
What we have learned about Plutonium from Human Data  
Health Phys. 29 (1975), S. 551

- /10/ Aarkrog, A.:  
Radioecological Investigations of Plutonium in an  
Arctic Marine Environment  
Health Phys. 20 (1971), S. 31
- /11/ Ramos, E., und E. Iranzo:  
Erfahrungen bei einer durch Unfall verursachten Ver-  
seuchung durch radioaktive Elemente  
2. Internationales Symposium über die Gefahren der  
Kernstrahlungen der Internationalen Organisation für  
Zivilverteidigung, 10. bis 15. Oktober 1966, Monaco,  
verteilt durch CERA, Zürich
- /12/ Fish, B.R., G.W. Keilholtz, W.S. Snyder und S.D. Swisher:  
Calculation of Doses due to Accidentally Released Plu-  
tonium from an LMFBR  
ORNL-NSIC-74, November 1972
- /13/ Medical Research Council:  
The Toxicity of Plutonium  
Her Majesty's Stationery Office, London, 1975
- /14/ Gamertsfelder, C.C.:  
Other Considerations in Establishing Standards  
Health Phys. 29 (1975), S. 563
- /15/ Bair, W.J., C.R. Richmond und B.W. Wachholz:  
A Radiobiological Assessment of the Spatial Distribu-  
tion of Radiation Dose from Inhaled Plutonium  
WASH-1320, September 1974
- /16/ Dolphin, G.W.:  
The Biological Problems in the Radiological Protection  
of Workers exposed to  $^{239}\text{Pu}$   
Health Phys. 20 (1971), S. 549
- /17/ Newton, D., J. Rundo und F.J. Sandalls:  
A case of internal contamination with  $^{231}\text{Pa}$  and  $^{227}\text{Ac}$   
via a puncture wound  
Diagnosis and Treatment of Deposited Radionuclides,  
Excerpta Medica Foundation Amsterdam, S. 521/33

- /18/ Hempelmann, L.H., W.H. Langham, C.R. Richmond und G.L. Voelz:  
Manhattan Project Plutonium Workers: A Twenty-Seven Year Follow-up Study of Selected Cases  
Health Phys. 25 (1973), S. 461; LA-5148-MS (1973)
- /19/ The Metabolism of Compounds of Plutonium and other Actinides  
ICRP Publication 19, Mai 1972
- /20/ Mays, C.W. und T.F. Dougharty:  
Progress in the Beagle Studies at the University of Utah  
Health Phys. 22 (1972), S. 793
- /21/ Park, J.F., W.J. Bair und R.H. Busch:  
Progress in Beagle Dog Studies with Transuranium Elements at Battelle-Northwest  
Health Phys. 22 (1972), S. 803
- /22/ Watters, R.L., und J.L. Lebel:  
Progress in the Beagle Studies at Colorado State University  
Health Phys. 22 (1972), S. 811
- /23/ McClellan, R.O.:  
Progress in Studies with Transuranium Elements at the Lovelace Foundation  
Health Phys. 22 (1972), S. 815
- /24/ Mays, C.W., T.F. Dougherty, G.N. Taylor, R.D. Lloyd, B.J. Stover, W.S.S. Jee, W.R. Christensen, J.H. Dougherty und D.R. Atherton:  
Radiation Induced Bone Cancer in Beagles, in: Delayed Effects of Bone-Seeking Radionuclides  
University of Utah Press, Salt Lake City, 1969, S. 387/405
- /25/ Cohen, B.L.:  
The Hazards in Plutonium Dipersal  
Institute for Energy Analysis, Oak Ridge, März 1975; TID-26794, Juli 1975

- /26/ Parker, H.M.:  
Plutonium - Health Implications for Man: Closing Remarks  
and Final Discussion  
Health Phys. 29 (1975), S. 627
- /27/ Till, J.E.:  
A Comparison of the Potential Radiological Impact of  
Recycle  $^{233}\text{U}$  HTGR Fuel and LMFBR  
Plutonium Fuel Released to the Environment, ORNL-TM-  
4768, 1975
- /28/ Bair, W.J.:  
Consideration of Reactor Accident Exposure Guides for  
Plutonium  
BNWL-SA-4968, CONF-140443-2
- /29/ Stannard, J.N.:  
The Concepts of Critical Organ and Radiation Dose as  
applied to Plutonium  
Health Phys. 29 (1975), S. 539
- /30/ Dolphin, G.W.:  
Problems associated with setting Safe Levels for Work-  
ing with Plutonium  
Health Phys. 22 (1972), S. 937
- /31/ Richmond, C.R.:  
The Importance of Non-Uniform Dose-Distribution in an  
Organ  
Health Phys. 29 (1975), S. 525
- /32/ Dolphin, G.W.:  
A Brief Critical Review of "A Report on the Inadequacy  
of Existing Radiation Protection Standards Related to  
Internal Exposure of Man to Insoluble Particles of  
Plutonium and Other Alpha-Emitting Hot Particles" by  
A.R. Tamplin and T.B. Cochran, 14th February 1974  
NRPB, Harwell, 1974
- /33/ Pigford, T.H., und K.P. Ang:  
The Plutonium Fuel Cycles  
Health Phys. 29 (1975), S. 451

- /34/ Bell, M.J.:  
ORIGEN, the ORNL Isotope Generation and Depletion Code  
ORNL-4628, 1973
- /35/ International Meeting on Thorotrast and other Alpha-  
emitting Heavy Elements  
Lissabon, 28.6. - 2.7.1977
- /36/ Norcross, J.A., und C.E. Newton jr.:  
U.S. Transuranium Registry: A Progress Report  
Health Phys. 22 (1972), S. 887
- /37/ Reactor Safety Study (WASH-1400):  
A Review of the Draft Report  
U.S. Environmental Protection Agency, EPA-520/3-75-012,  
August 1975
- /38/ Radiosensitivity and Spatial Distribution of Dose  
ICRP Publication 14, 1969
- /39/ Tamplin, A.R., und T.B. Cochran:  
Radiation Standards for Hot Particles: A Report on the  
Inadequacy of Existing Radiation Protection Standards  
Related to Internal Exposure of Man to Insoluble Particles  
of Plutonium and Other Alpha-Emitting Hot Particles  
Natural Resources Defense Council Report, 1974
- /40/ Jacobi, W.:  
Zum Problem der heißen Partikel  
Atomkernenergie, Bd. 28 (1976), S. 29
- /41/ Der Bundesminister des Innern:  
Zur Toxizität inhalierter heißer Partikel, insbesondere  
von Plutonium  
Empfehlung der Strahlenschutzkommission, Febr. 1976,  
Hrsg. GRS-Köln
- /42/ Nelson, I.C., K.R. Heid, P.A. Fuqua und T.D. Mahony:  
Plutonium in Autopsy Tissue Samples  
Health Phys. 22 (1972), S. 925

- /43/ Mays, C.W. et al.:  
Speculated risks of bone and liver from Pu-234  
Health Phys. 19 (1970), S. 601
- /44/ Task Group on Lung Dynamics for Committee II of the  
International Commission on Radiological Protection  
"Deposition and Retention Models for Internal Dosimetry  
of the Human Respiratory Tract"  
Health Phys. 12 (1966), S. 173/207
- /45/ Morgan, K.L., und J.E. Turner:  
Principles of Radiation Protection  
Huntington, N.Y., 1973
- /46/ Sanders, C.L.:  
Deposition Patterns and the Toxicity of Transuranium  
Elements in Lung  
Health Phys. 22 (1972), S. 607
- /47/ Nehmiz, G., und H.D. Brenk:  
Berechnung organspezifischer Inhalationsdosisfaktoren  
mit Hilfe von Mehrcompartment-Modellen  
KFA Jülich, Zentralabteilung Strahlenschutz, ZST-Be-  
richt Nr. 241, Oktober 1976
- /48/ Report of Committee II on Permissible Dose for Inter-  
nal Radiation (1959)  
Pergamon Press, ICRP Publication 2
- /49/ Report of the Task Group on Reference Man  
ICRP-Publication 23, Pergamon Press, Oxford, New York,  
Toronto, Sydney, Braunschweig, 1975
- /50/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisie-  
rende Strahlen vom 13. Oktober 1976  
Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 125, S. 2905/95
- /51/ IDO-12067:  
AEC Research and Development Report Health and Safety  
TID-4500 (August 1968)

- /52/ Strom, P.O., und E.C. Watson:  
Calculated doses from inhaled transuranium radionuclides  
and potential risk equivalence to whole-body-radiation  
Proceedings of the Symposium on Transuranium Nuclides  
in the Environment, San Francisco, 17.-21. Nov. 1975,  
USERDA and IAEA
- /53/ WASH-1400 (NUREG-75/014):  
Reactor Safety Study  
USNRC, October 1975
- /54/ Comper, W.:  
Berechnung der Dosisfaktoren radiologisch wichtiger  
Nuklide  
Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe, 1972,  
KFK 1615
- /55/ USNRC-Regulatory Guide 1.109:  
Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases  
of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Com-  
pliance with 10 CFR Part. 50, Appendix I  
March 1976
- /56/ Killough, G.G., und C.R. McKay:  
A Methodology for Calculating Radiation Doses from Radio-  
activity Released to the Environment  
ORNL-4992, UC-41, Health and Safety
- /57/ The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of  
Ionizing Radiation  
Report of the Advisory Committee on the Biological Ef-  
fects of Ionizing Radiation, Nov. 1972
- /58/ Norwood, W.D., und C.E. Newton jr.:  
U.S. Transuranium Registry Study of Thirty Autopsies  
Health Phys. 28 (1975), S. 669
- /59/ Rausch, L.:  
Das manrem-Konzept - Formalismus und Realität  
In: Strahlenschutz in Forschung und Praxis, G. Thieme,  
Stuttgart, 1977

- /60/ Jacobi, W.:  
Somatic Risks from Radiation  
3. European Congress of the International Radiation  
Protection Association, Amsterdam, 13.-16. May 1975
- /61/ Jacobi, W.:  
Beziehungen zwischen der Strahlendosis und dem somati-  
schen Strahlenrisiko  
Atomwirtschaft, Heft 6 (1974), S. 278
- /62/ Ellett, W.H., N.S. Nelson und W.A. Mills:  
Allowed health risk for plutonium and americium stan-  
dards as compared with standards for penetrating radia-  
tion  
Proceedings of the Symposium on Transuranium Nuclides  
in the Environment, San Francisco, 17.-21. Nov. 1975,  
USERDA and IAEA
- /63/ Cohen, B.L.:  
Plutonium Toxicity: An Evaluation Indicates it is re-  
latively harmless  
Nuclear Engineering International, No. 250 (1976), S. 35
- /64/ ERDA-1538:  
Waste Management Operations Hanford Reservation  
UC-70, Dec. 1975
- /65/ United Nations Scientific Committee on the Effects of  
Atomic Radiation:  
Ionizing Radiation Levels and Effects, Vol. 1: Levels,  
Vol. 2: Effects  
United Nations, New York, 1972, Publ.No. E.72., IX, 17
- /66/ Marshall, J.H., und E. Lloyd:  
The Effect of the remodelling of bone upon the relative  
toxicity of radium and plutonium in man and dog. "Radio-  
nuclide Carcinogenesis"  
AEC Symp., Series 29 (1973), S. 421
- /67/ Mays, C.W.:  
Risk estimates for plutonium-239 in man  
Work shop Biological Effects and Toxicity of Pu-239 and  
Radium-226, Sun Valley, Idaho (1975)

- /68/ Morgan, K.Z.:  
Suggested reduction of permissible exposure to plutonium  
and other transuranium elements  
Am. Ind. Hygiene Assoc. J. 36 (1975), S. 567
- /69/ Alpha-Emitting Particels in Lungs  
Recommendations of the National Council on Radiation  
Protection and Measurements  
1975
- /70/ Cohen, B.L.:  
Hazards From Plutonium Toxicity  
Health Phys. 32 (1977), S. 359/79
- /71/ Bair, W.J., I.C. Nelson and D.H. Willard:  
Comparative metabolism of  $^{237}\text{Pu}$  and  $^{238}\text{Pu}$  in beagles,  
Pacific Northwest Laboratory  
Annual Report for 1968, BNWL-1050, Part 1, S. 317
- /72/ Seelmann-Eggebert, W., G. Pfennig und H. Münzel:  
Karlsruher Nuklidkarte  
Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Radio-  
chemie, 4. Aufl., 1974

A N H A N G 1

Mathematischer Formalismus und Parameter  
zur Berechnung der Dose-commitments

### A1.1 MATHEMATISCHER FORMALISMUS

Das Kompartiment-Modell der Lunge kann aufgespalten werden in primäre und sekundäre Subkompartments. In die primären Subkompartments gelangen radioaktive Aerosole direkt mit der Atemluft, in die sekundären erst nach Durchlaufen der primären Subkompartments.

#### Primäre Subkompartments

(NPa, NPb, TBc, TBd, Pe, Pf, Ph, Pg, Bild 2)

Bezeichnet man mit  $N_n^M$  die Anzahl der Mutternuklide im Subkompartiment n und ist  $\lambda_n^M$  die Zeitkonstante für die Elimination über den Weg (n), so wird das Zeitverhalten durch die folgende Differentialgleichung beschrieben.

$$\frac{d N_n^M(t)}{dt} = -\lambda_n^M N_n^M(t) \quad (1)$$

Die Eliminationskonstante setzt sich additiv aus der biologischen und radiologischen Zerfallskonstante zusammen.

$$\lambda_n^M = \lambda_n^{biol.} + \lambda_{rad}^M \quad (2)$$

Unter der Voraussetzung, daß nur eine kurzzeitige Inhalation zum Zeitpunkt  $t = 0$  stattfindet, gilt mit der Anfangsbedingung

$$N_n^M(0) = f_n D_i N^M(0) \quad (3)$$

für die Lösung der Gleichung (1):

$$N_n^M(t) = f_n D_i N^M(0) e^{-\lambda_n^M t} \quad (4)$$

Der Bruchteil der über den Weg (n) transportierten Nuklide wird durch den Transferfaktor  $f_n$  bestimmt,  $D_i$  berücksichtigt die De-

position der inhalierten Aerosole im Kompartiment i, das dem Subkompartiment n übergeordnet ist. Es ist zweckmäßig, von der Nuklidanzahl zur Aktivität überzugehen. Dann kann die zugeführte Aktivität

$$Q_I = N^M(0) \lambda_{rad}^M$$

eingeführt und die Retentionsfunktion angegeben werden:

$$Q_n^M(t) = f_n D_i Q_I e^{-\lambda_n^M t} \quad (5)$$

Für die Retention der Tochternuklide wird zunächst wieder die Differentialgleichung für die Anzahl der Tochternuklide im Subkompartiment n angesetzt.

$$\frac{dN_n^T(t)}{dt} = \lambda_{rad}^M N_n^M(t) - \lambda_n^T N_n^T(t) \quad (6)$$

Der erste Term beschreibt den Zugang an Tochterkernen aus dem Zerfall der Mutterkerne, der zweite Term berücksichtigt den Verlust an Tochterkernen durch Elimination, biologische und physikalische, aus dem Subkompartiment.

Mit

$$N_n^M(t) = f_n D_i N_n^M(0) e^{-\lambda_n^M t} \quad (7)$$

und der Anfangsbedingung

$$N_n^T(0) = 0 \quad (8)$$

folgt die Lösung der Gleichung (6):

$$N_n^T(t) = f_n D_i N_n^M(0) \frac{\lambda_{rad}^M}{\lambda_n^T - \lambda_n^M} (e^{-\lambda_n^M t} - e^{-\lambda_n^T t}) \quad (9)$$

Nach Übergang zur Tochteraktivität  $\lambda_{\text{rad}}^T \cdot N_n^T$  erhält man für die Retentionsfunktion:

$$Q_n^T(t) = f_m D_i Q_I \frac{\lambda_{\text{rad}}^T}{\lambda_n^T - \lambda_m^M} (e^{-\lambda_m^M t} - e^{-\lambda_n^T t}) \quad (10)$$

Wenn das Zeitverhalten für die Rückhaltung der radioaktiven Substanz in einem Organ nach der Inhalation bekannt ist, erhält man die Dosis aus der Integration der Gleichung (10) /51/ zu:

$$D_n(T) = 51.2 \frac{\epsilon_K}{M_K} \int_0^T Q_n(t) dt \quad (11)$$

$\epsilon_K$  = effektive absorbierte Energie pro Zerfall  
(MeV·rem·rad<sup>-1</sup>)

$M_K$  = Organmasse (g)

$D(T)$  = Dosis (rem) nach der Zeit T (d)

$Q_n(t)$  = Retention (μCi)

Dimension der Konstante: (sec<sup>-1</sup>·μCi<sup>-1</sup>·erg·MeV<sup>-1</sup>·rad·erg<sup>-1</sup>·g·sec·d<sup>-1</sup>)

Daraus ergibt sich das Dose-commitment DC:

$$DC = D_n(T) / Q_I \quad (11a)$$

Der Dosisfaktor, im Anhang 2 als g-Faktor beschrieben, ist das Produkt aus der Atemrate und dem Dose-commitment DC. Er berücksichtigt bei Dosisberechnungen aus der Quellstärke Q und der bodennahen Schadstoffkonzentration die organspezifische Wirkung.

$$g = \text{Atemrate} \cdot DC \quad (11b)$$

Mit

$$Q_m(t) = Q_n^M(t) + Q_n^T(t) \quad (12)$$

beträgt die Strahlenexposition der primären Subkompartments:

$$D_{NP_a}(T) = 51.2 D_3 Q_I \frac{f_a}{M_{NP}} \left[ \left( \epsilon_{NP}^M + \frac{\lambda_{rad}^T \epsilon_{NP}^T}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \right) \left( \frac{1 - e^{-\lambda_a^M T}}{\lambda_a^M} \right) - \frac{\lambda_{rad}^T \epsilon_{NP}^T}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \left( \frac{1 - e^{-\lambda_a^T T}}{\lambda_a^T} \right) \right] \quad (13)$$

$$D_{NP_b}(T) = 51.2 D_3 Q_I \frac{f_b}{M_{NP}} \left[ \left( \epsilon_{NP}^M + \frac{\lambda_{rad}^T \epsilon_{NP}^T}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \right) \left( \frac{1 - e^{-\lambda_b^M T}}{\lambda_b^M} \right) - \frac{\lambda_{rad}^T \epsilon_{NP}^T}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \left( \frac{1 - e^{-\lambda_b^T T}}{\lambda_b^T} \right) \right] \quad (14)$$

$$D_{TB_c}(T) = 51.2 D_4 Q_I \frac{f_c}{M_{TB}} \left[ \left( \epsilon_{TB}^M - \frac{\lambda_{rad}^T \epsilon_{TB}^T}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \right) \left( \frac{1 - e^{-\lambda_c^M T}}{\lambda_c^M} \right) - \frac{\lambda_{rad}^T \epsilon_{TB}^T}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \left( \frac{1 - e^{-\lambda_c^T T}}{\lambda_c^T} \right) \right] \quad (15)$$

$$D_{TB_d}(T) = 51.2 D_4 Q_I \frac{f_d}{M_{TB}} \left[ \left( \epsilon_{TB}^M - \frac{\lambda_{rad}^T \epsilon_{TB}^T}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \right) \left( \frac{1 - e^{-\lambda_d^M T}}{\lambda_d^M} \right) - \frac{\lambda_{rad}^T \epsilon_{TB}^T}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \left( \frac{1 - e^{-\lambda_d^T T}}{\lambda_d^T} \right) \right] \quad (16)$$

$$D_{P_m}(T) = 51.2 D_5 Q_I \frac{f_m}{M_P} \left[ \left( \epsilon_P^M - \frac{\lambda_{rad}^T \epsilon_P^T}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \right) \left( \frac{1 - e^{-\lambda_m^M T}}{\lambda_m^M} \right) - \frac{\lambda_{rad}^T \epsilon_P^T}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \left( \frac{1 - e^{-\lambda_m^T T}}{\lambda_m^T} \right) \right] \quad (17)$$

$m \cong e, f, h, g$

Die Dosis für die NP-, TB- und P-Region ist jeweils die Summe der Partialdosen der zugehörigen Subkompartments. Zur Dosis der TB-Region ist jedoch noch der aus der Lunge über den Tracheobronchialweg zum Gastrointestinaltrakt transportierte Aktivitätsbeitrag  $D_{TB^*}(T)$  zu addieren, der bei der Behandlung der sekundären Subkompartments abgeleitet wird.

### Sekundäre Subkompartments

( $TB^*$ , LYMi, LYMF, Bild 2)

$TB^*$

Sekundären Subkompartments ist gemeinsam, daß der Zugang an Aktivität vom biologischen Stofftransport in das Organ abhängt. Für das  $TB^*$ -Subkompartment gilt daher für die Differentialgleichung des Mutternuklids:

$$\frac{dN_{TB^*}^M(t)}{dt} = \lambda_f^{bio} N_{Pf}^M(t) + \lambda_g^{bio} N_{Pg}^M(t) - \lambda_d^M N_{TB^*}^M(t) \quad (18)$$

Zur Zeit  $t = 0$  befindet sich in den sekundären Subkompartments keine Aktivität. Die Anfangsbedingung ist daher:

$$N_{TB^*}^M(0) = 0 \quad (19)$$

Die Lösung der Gleichung (18) lautet damit nach Einsetzen von Gleichung (4) und Übergang zur Aktivität Q:

$$Q_{TB^*}^M(t) = D_5 Q_I e^{-\lambda_d^M t} \left[ \frac{\lambda_f^{bio} \cdot f_f}{\lambda_f^M - \lambda_d^M} \left( 1 - e^{-(\lambda_f^M - \lambda_d^M)t} \right) + \frac{\lambda_g^{bio} \cdot f_g}{\lambda_g^M - \lambda_d^M} \left( 1 - e^{-(\lambda_g^M - \lambda_d^M)t} \right) \right] \quad (20)$$

Für die Tochteraktivität gilt die Differentialgleichung

$$\frac{dQ_{TB^*}^T(t)}{dt} = \lambda_f^{bio} Q_{Pf}^T(t) + \lambda_g^{bio} Q_{Pg}^T(t) - \lambda_d^T Q_{TB^*}^T \quad (21)$$

wobei die Retentionsfunktionen  $Q_{Pf}^T$  und  $Q_{Pg}^T$  nach Gleichung (10) einzusetzen sind. Die Lösung der Gleichung (21) ist:

$$Q_{TB^*}^T(t) = D_5 Q_I \frac{\lambda_{rad}^T}{\lambda_{rad}^T \lambda_{rad}^M} \left[ \lambda_f^{bio} f_f \left( \frac{e^{-\lambda_d^T t} - e^{-\lambda_f^M t}}{\lambda_f^M - \lambda_d^T} - \frac{e^{-\lambda_d^T t} - e^{-\lambda_f^T t}}{\lambda_f^T - \lambda_d^T} \right) + \lambda_g^{bio} f_g \left( \frac{e^{-\lambda_d^T t} - e^{-\lambda_g^M t}}{\lambda_g^M - \lambda_d^T} - \frac{e^{-\lambda_d^T t} - e^{-\lambda_g^T t}}{\lambda_g^T - \lambda_d^T} \right) \right] \quad (22)$$

Die Dosis  $D_{TB^*} = D_{TB^*}^M + D_{TB^*}^T$  wird damit:

$$D_{TB^*}(T) = 51.2 D_5 \frac{Q_I}{M_{TB}} \left\{ \begin{aligned} & \epsilon_{TB}^M \frac{\lambda_f^{bio} \cdot f_f}{\lambda_f^M - \lambda_d^M} \left[ \frac{1 - e^{-\lambda_d^T T}}{\lambda_d^M} - \frac{1 - e^{-\lambda_f^M T}}{\lambda_f^M} \right] \\ & + \epsilon_{TB}^M \frac{\lambda_g^{bio} \cdot f_g}{\lambda_g^M - \lambda_d^M} \left[ \frac{1 - e^{-\lambda_d^T T}}{\lambda_d^M} - \frac{1 - e^{-\lambda_g^M T}}{\lambda_g^M} \right] \\ & + \frac{\epsilon_{TB}^T}{\lambda_{rad}^T \lambda_{rad}^M} \left[ \lambda_f^{bio} \cdot f_f \left[ \frac{1}{\lambda_f^M - \lambda_d^T} \left( \frac{1 - e^{-\lambda_d^T T}}{\lambda_d^T} - \frac{1 - e^{-\lambda_f^M T}}{\lambda_f^M} \right) - \frac{1}{\lambda_f^T - \lambda_d^T} \left( \frac{1 - e^{-\lambda_d^T T}}{\lambda_d^T} - \frac{1 - e^{-\lambda_f^T T}}{\lambda_f^T} \right) \right] \right. \\ & \quad \left. + \lambda_g^{bio} \cdot f_g \left[ \frac{1}{\lambda_g^M - \lambda_d^T} \left( \frac{1 - e^{-\lambda_d^T T}}{\lambda_d^T} - \frac{1 - e^{-\lambda_g^M T}}{\lambda_g^M} \right) - \frac{1}{\lambda_g^T - \lambda_d^T} \left( \frac{1 - e^{-\lambda_d^T T}}{\lambda_d^T} - \frac{1 - e^{-\lambda_g^T T}}{\lambda_g^T} \right) \right] \right] \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

LYMi

Nach der Empfehlung der TGLM /19/ sind für die Stoffklassen (D) und (W) die Zeitkonstanten für biologische Elimination längs der Wege (h) und (i) gleich, für die Stoffklasse (Y) dagegen verschieden (Tabelle 3). Die Ableitung der beiden Subkompartments des Lymphsystems - LYMi steht für den Anteil mit Clearance-Prozeß (i), LYMF für den nur dem radioaktiven Zerfall unterliegenden Anteil - erfordert daher eine Fallunterscheidung.

a)  $\lambda_i = \lambda_h$

Die Differentialgleichung für die Retention der Mutternuklidaktivität des Lymph-Subkompartments LYMi ist

$$\frac{dQ_{LYMi}^M(t)}{dt} = \lambda_h^{bio} f_i Q_{ph}^M(t) - \lambda_i^M Q_{LYMi}^M(t) \quad (24)$$

und geht mit Gleichung (5) für  $\lambda_h = \lambda_i$  bzw.  $\lambda_h^{bio} = \lambda_i^{bio}$  über in:

$$\frac{dQ_{LYMi}^M(t)}{dt} = \lambda_i^{bio} f_i f_h D_5 Q_I e^{-\lambda_i^M t} - \lambda_i^M Q_{LYMi}^M(t) \quad (25)$$

Mit der Anfangsbedingung  $Q_{LYMi}^M(0) = 0$  hat Gleichung (25) die Lösung:

$$Q_{LYMi}^M(t) = \lambda_i^{bio} f_i f_h D_5 Q_I t e^{-\lambda_i^M t} \quad (26)$$

Für die Dosis folgt:

$$D_{LYMi}^M(T) = 57.2 \lambda_i^{bio} f_i f_h D_5 Q_I \frac{E_{LYM}^M}{\lambda_i^M M_{LYM}} \left[ \frac{1 - e^{-\lambda_i^M T}}{\lambda_i^M} - T e^{-\lambda_i^M T} \right] \quad (27)$$

Für die Retention und Dosis der Tochternuklidaktivität gilt:

$$\frac{dQ_{LYMi}^T}{dt} = \lambda_i^{bio} f_i f_h D_5 Q_I \frac{\lambda_{rad}^T}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \left[ e^{-\lambda_i^M t} - e^{-\lambda_i^T t} \right] - \lambda_i^T Q_{LYMi}^T \quad (28)$$

$$Q_{LYMi}^T(t) = \lambda_i^{bio} f_i f_h D_5 Q_I \frac{\lambda_{rad}^T}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \left[ \frac{e^{-\lambda_i^T t} - e^{-\lambda_i^M t}}{\lambda_{rad}^M - \lambda_{rad}^T} - t e^{-\lambda_i^T t} \right] \quad (29)$$

$$D_{LYMi}^T(t) = 51.2 \lambda_i^{bio} f_i f_h D_5 Q_I \frac{E_{LYM}^T}{M_{LYM}} \frac{\lambda_{rad}^T}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \left[ \frac{1}{\lambda_{rad}^M - \lambda_{rad}^T} \left( \frac{1 - e^{-\lambda_i^T T}}{\lambda_i^T} - \frac{1 - e^{-\lambda_i^M T}}{\lambda_i^M} \right) - \frac{1 - e^{-\lambda_i^T T}}{(\lambda_i^T)^2} + \frac{T \cdot e^{-\lambda_i^T T}}{\lambda_i^T} \right] \quad (30)$$

b)  $\lambda_i \neq \lambda_h$

Mit den eingeführten Abkürzungen für Mutternuklid (M) und Tochternuklid (T) gelten die folgenden Beziehungen:

$$\frac{dQ_{LYMi}^M}{dt} = \lambda_h^{bio} f_i f_h D_5 Q_I e^{-\lambda_h^M t} - \lambda_i^M Q_{LYMi}^M \quad (31)$$

$$\frac{dQ_{LYMi}^T}{dt} = \lambda_h^{bio} f_i f_h D_5 Q_I \frac{\lambda_{rad}^T}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \left( e^{-\lambda_h^M t} - e^{-\lambda_h^T t} \right) - \lambda_i^T Q_{LYMi}^T \quad (32)$$

Lösung von Gleichung (31):

$$Q_{LYMi}^M(t) = \lambda_h^{bio} f_i f_h D_5 Q_I \frac{1}{\lambda_i^M - \lambda_h^M} \left( e^{-\lambda_h^M t} - e^{-\lambda_i^M t} \right) \quad (33)$$

Dosis:

$$D_{LYM_i}^M (T) = 51.2 f_i f_h D_5 Q_I \frac{\epsilon_{LYM}^M}{M_{LYM}} \frac{\lambda_h^{bio}}{\lambda_i^M - \lambda_h^M} \left( \frac{1 - e^{-\lambda_h^M T}}{\lambda_h^M} - \frac{1 - e^{-\lambda_i^M T}}{\lambda_i^M} \right) \quad (34)$$

Lösung von Gleichung (32):

$$Q_{LYM_i}^T (t) = \lambda_h^{bio} f_i f_h D_5 Q_I \frac{\lambda_{rad}^T}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \left( \frac{e^{-\lambda_i^T t} - e^{-\lambda_h^M t}}{\lambda_h^M - \lambda_i^T} - \frac{e^{-\lambda_i^T t} - e^{-\lambda_h^T t}}{\lambda_h^T - \lambda_i^T} \right) \quad (35)$$

Dosis:

$$D_{LYM_i}^T (T) = 51.2 f_i f_h D_5 Q_I \frac{\epsilon_{LYM}^T}{M_{LYM}} \frac{\lambda_{rad}^T}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \left[ \frac{1}{\lambda_h^M - \lambda_i^T} \left( \frac{1 - e^{-\lambda_i^T T}}{\lambda_i^T} - \frac{1 - e^{-\lambda_h^M T}}{\lambda_h^M} \right) - \frac{1}{\lambda_h^T - \lambda_i^T} \left( \frac{1 - e^{-\lambda_i^T T}}{\lambda_i^T} - \frac{1 - e^{-\lambda_h^T T}}{\lambda_h^T} \right) \right] \quad (36)$$

### LYMF

Für den biologisch unveränderlichen Stoffanteil im Subkompartiment LYMF gelten für die Differentialgleichungen, Retentionsfunktionen und Dosen der Mutter- und Tochternuklidaktivität die folgenden Formeln. Da keine Clearance über den Weg (i) möglich ist, unterliegt  $\lambda_h$  keiner Einschränkung.

Mutternuklid:

$$\frac{dQ_{LYMF}^M(t)}{dt} = C \cdot e^{-\lambda_h^M t} - \lambda_{rad}^M Q_{LYMF}^M(t) \quad (37)$$

$$C = \lambda_h^{bio} (1 - f_i) f_h D_5 Q_I$$

$$Q_{LYMF}^M(t) = C \frac{1}{\lambda_{rad}^M - \lambda_h^M} \left( e^{-\lambda_h^M t} - e^{-\lambda_{rad}^M t} \right) \quad (38)$$

$$D_{LYMF}^M(T) = 51.2 \cdot C \frac{E_{LYM}^M}{M_{LYM}} \frac{1}{\lambda_{rad}^M - \lambda_h^M} \left( \frac{1 - e^{-\lambda_h^M T}}{\lambda_h^M} - \frac{1 - e^{-\lambda_{rad}^M T}}{\lambda_{rad}^M} \right) \quad (39)$$

Tochter nuklid:

$$\frac{dQ_{LYMF}^T(t)}{dt} = C \frac{\lambda_{rad}^T}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \left( e^{-\lambda_h^M t} - e^{-\lambda_h^T t} \right) - \lambda_{rad}^T Q_{LYMF}^T(t) \quad (40)$$

$$Q_{LYMF}^T(t) = C \frac{\lambda_{rad}^T}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \left( \frac{e^{-\lambda_{rad}^T t} - e^{-\lambda_h^M t}}{\lambda_h^M - \lambda_{rad}^T} - \frac{e^{-\lambda_{rad}^T t} - e^{-\lambda_h^T t}}{\lambda_h^T - \lambda_{rad}^T} \right) \quad (41)$$

$$D_{LYMF}^T(T) = 51.2 \cdot C \frac{E_{LYM}^T}{M_{LYM}} \frac{\lambda_{rad}^T}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \left[ \frac{1}{\lambda_h^M - \lambda_{rad}^T} \left( \frac{1 - e^{-\lambda_{rad}^T T}}{\lambda_{rad}^T} - \frac{1 - e^{-\lambda_h^M T}}{\lambda_h^M} \right) - \frac{1}{\lambda_h^T - \lambda_{rad}^T} \left( \frac{1 - e^{-\lambda_{rad}^T T}}{\lambda_{rad}^T} - \frac{1 - e^{-\lambda_h^T T}}{\lambda_h^T} \right) \right] \quad (42)$$

Damit kann die Gesamtstrahlenexposition des Lymphsystems angegeben werden.

$$D_{LYM} = D_{LYM_i}^M + D_{LYMF}^M + D_{LYM_i}^T + D_{LYMF}^T \quad (43)$$

1. Fall  $\lambda_i = \lambda_h$

Die Summanden sind entsprechend den Gleichungen (27), (30), (39) und (42) zu berücksichtigen.

2. Fall  $\lambda_i \neq \lambda_h$

Die Summanden sind entsprechend den Gleichungen (34), (36), (39) und (42) zu berücksichtigen.

Die Belastung anderer, nicht zum Respirationstrakt gehörender Organe

Bei der Inhalation radioaktiver Substanzen bewirken die verschiedenen Clearance-Prozesse in Abhängigkeit von der zugehörigen Stoffklasse, daß neben der Exkretion aus dem Gastrointestinal-Trakt der verbleibende Stoffanteil in den Blutkreislauf eintritt und damit eine vollständige Verteilung der Aktivität im Organismus stattfindet. Von mehreren Organen ist die Selektivität gegenüber bestimmten Elementen bekannt, so z.B. die Jod-Anreicherung in der Schilddrüse und die Kalzium-, Strontium-, Radium- und Transuranablagerung im Skelett. Kalzium, Strontium, Radium und die Transurane werden daher auch als knochensuchende Substanzen bezeichnet. Die mathematische Behandlung der Strahlenexposition dieser Organe geht vom Blut als Transportmittel aus, ohne diesem den Charakter eines Kompartments zu geben. Die spontane Übertragung von Fremdstoffen durch das Blut stellt eine gute Näherung dar, denn die Zeit für einen Blutumlauf beträgt nur ca. 1 Minute und ist im Vergleich zu den Clearance-Zeiten und den Halbwertszeiten der interessierenden Radionuklide vernachlässigbar. Nach der ICRP-Empfehlung /48/ wird angenommen, daß der vom Blut an ein Organ abgegebene absorbierte Anteil stets der im Blut vorhandenen Menge proportional ist. Dieser konstant angesetzte Bruchteil vom Organ aufgenommener Fremdstoffe wird mit  $f_2$  bezeichnet. Unter Vernachlässigung der sehr geringen Absorption im Gastrointestinal-Trakt, d.h. ohne Berücksichtigung des Clearance-Weges (j), können für die zeitliche Aktivitätsänderung im Blutstrom aus den Zugängen (Blutstromrate) der Subkompartments  $NP_a$ ,  $TB_c$ ,  $Pe$  und  $LYM_i$  deren Beiträge aufsummiert werden.

$$\frac{d Q_{Blut}}{dt} = \lambda_a^{bio} Q_{NP_a} + \lambda_c^{bio} Q_{TB_c} + \lambda_e^{bio} Q_{Pe} + \lambda_i^{bio} Q_{LYM_i} \quad (44)$$

Für instabile Tochternuklide gilt entsprechend:

$$Q_m = Q_n^M + Q_n^T \quad (45)$$

Kompartiment-Modell für ein vom Blut versorgtes Organ K

Die Wirkung der Aktivität eines Subkompartments  $n$ , wobei  $n$  für NPa, TBc, Pe oder LYMi steht, auf das Organ K veranschaulicht Bild A1. Im Subkompartiment  $n$  setzt sich die Gesamtaktivität aus den beiden Anteilen  $Q_n^M$  und  $Q_n^T$  für die Mutter- und Tochternuklide zusammen. Durch radioaktiven Zerfall der Tochternuklide kann Aktivität aus dem System entfernt werden. Für den Zeitablauf des Transports der Radionuklide in das Blut sind die biologischen Eliminationskonstanten bestimmend. Im Modell erfolgt der Übergang für die Anteile  $Q_K^M$  und  ${}^2Q_K^T$  in das Organ K ohne Verzögerung, der Anteil  ${}^1Q_K^T$  dagegen bildet sich erst im Organ aus dem Zerfall der Mutternuklide. Aus dem Blut tritt zu jeder Zeit der konstante Bruchteil  $f_2$  der momentanen Aktivität in das Organ über.

1. Retention  $Q_K^M$  der Mutternuklide

Mit der Blutstromrate nach Gleichung (44) gilt für die Differentialgleichung:

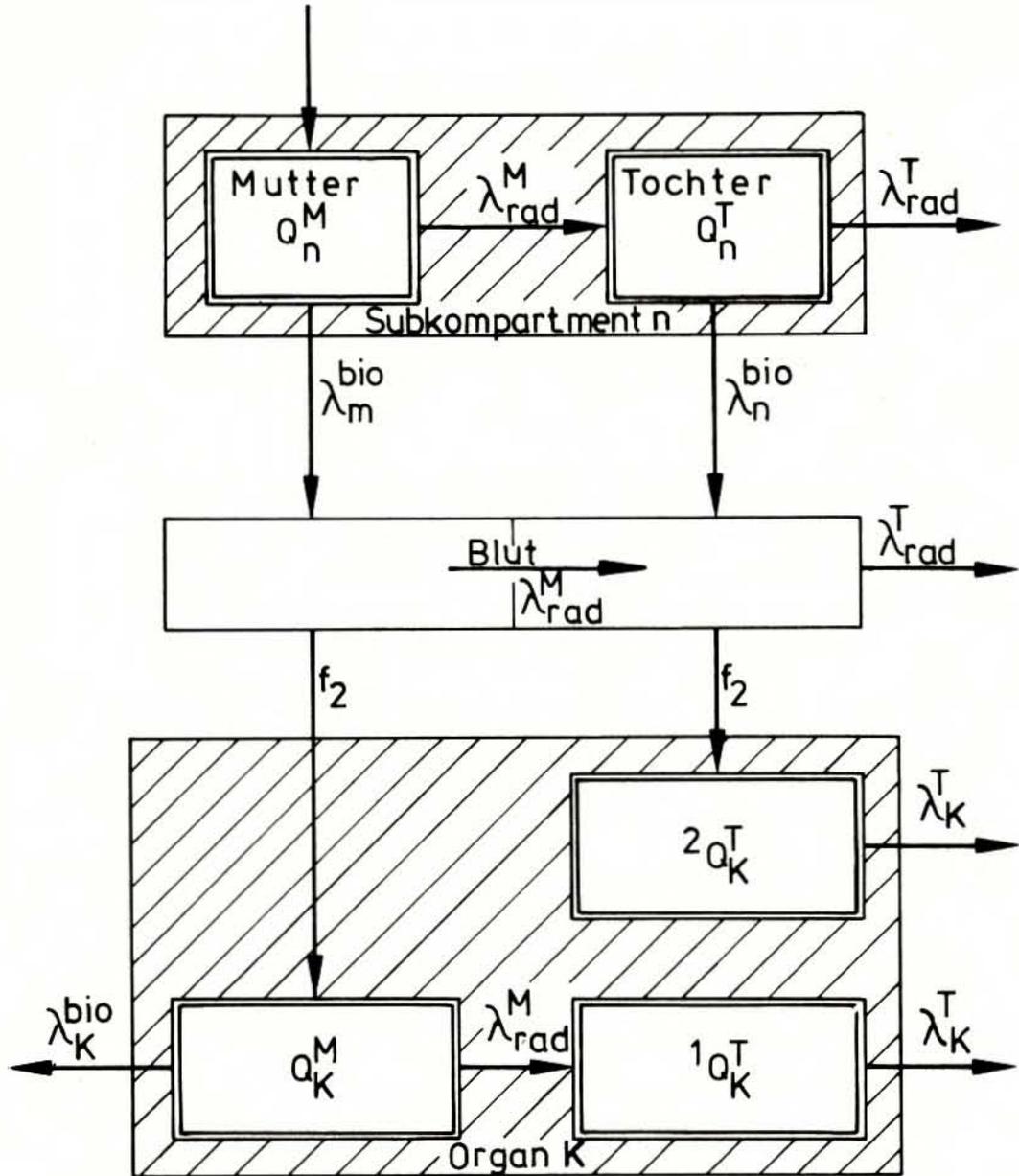
$$\frac{dQ_K^M}{dt} = f_2 \frac{dQ_{\text{Blut}}^M}{dt} - \lambda_K^M Q_K^M \quad (46)$$

Exemplarisch soll die Organstrahlenexposition berechnet werden, die durch ein einzelnes primäres Subkompartiment hervorgerufen wird. Die Gleichung (46) vereinfacht sich zu:

$$\frac{dQ_K^M}{dt} = f_2 \lambda_n^{\text{bio}} Q_n^M - \lambda_K^M Q_K^M \quad (47)$$

Für die Anfangsbedingung  $Q_K^M(0) = 0$  hat Gleichung (47) die Lösung:

$$Q_K^M(t) = f_2 \lambda_n^{\text{bio}} D_i Q_i \frac{1}{\lambda_n^M - \lambda_K^M} (e^{-\lambda_K^M t} - e^{-\lambda_n^M t}) \quad (48)$$



**Bild A1:** Kompartiment-Modell für die Organe

2. Retention  $Q_K^T$  der Tochternuklide

In Analogie zu Gleichung (47) gilt:

$$\begin{aligned} \frac{dQ_K^T}{dt} &= {}^1Q_K^T + {}^2Q_K^T - \lambda_K^T Q_K^T \\ \frac{dQ_K^T}{dt} &= \lambda_{rad}^T Q_K^M + f_2 \lambda_m^{bio} Q_m^T - \lambda_K^T Q_K^T \end{aligned} \quad (48a)$$

Nach Einsetzen der bekannten Ausdrücke für  $Q_K^M$  nach Gleichung (48) und  $Q_n^T$  nach Gleichung (10) folgt für die der Anfangsbedingung  $Q_K^T(0) = 0$  genügende Lösung:

$$\begin{aligned} Q_K^T(t) = f_2 \lambda_m^{bio} D_i Q_I \lambda_{rad}^T &\left[ \frac{1}{\lambda_m^M - \lambda_K^M} \left( \frac{e^{-\lambda_K^T t} - e^{-\lambda_K^M t}}{\lambda_{rad}^M - \lambda_{rad}^T} - \frac{e^{-\lambda_K^T t} - e^{-\lambda_m^M t}}{\lambda_m^M - \lambda_K^M} \right) \right. \\ &\left. + \frac{1}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \left( \frac{e^{-\lambda_K^T t} - e^{-\lambda_m^M t}}{\lambda_m^M - \lambda_K^M} - \frac{e^{-\lambda_K^T t} - e^{-\lambda_m^T t}}{\lambda_m^T - \lambda_K^T} \right) \right] \end{aligned} \quad (49)$$

3. Organdosis  $D_K^M$  (Mutternuklide)

$$D_K^M(T) = 51.2 \cdot f_2 \lambda_m^{bio} D_i Q_I \frac{\epsilon_K^M}{M_K} \frac{1}{\lambda_m^M - \lambda_K^M} \left( AM - \frac{1 - e^{-\lambda_m^M T}}{\lambda_m^M} \right) \quad (50)$$

4. Organdosis  $D_K^T$  (Tochternuklide)

Die Integration der Gleichung (49) liefert:

$$AM = \frac{1 - e^{-\lambda_K^M T}}{\lambda_K^M} \quad ; \quad AT = \frac{1 - e^{-\lambda_K^T T}}{\lambda_K^T}$$

$$\begin{aligned}
 D_k^T(T) = & 51.2 f_2 \lambda_m^{bio} D_i Q_I \lambda_{rad}^T \frac{\epsilon_k^T}{M_k} \left\{ \frac{1}{\lambda_m^M - \lambda_k^M} \left[ \frac{1}{\lambda_{rad}^M - \lambda_{rad}^T} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_k^M T}}{\lambda_k^M} \right) \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{1}{\lambda_m^M - \lambda_k^T} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_k^M T}}{\lambda_m^M} \right) \right] \right. \\
 & \left. + \frac{1}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \left[ \frac{1}{\lambda_m^M - \lambda_k^T} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_m^M T}}{\lambda_m^M} \right) - \frac{1}{\lambda_m^T - \lambda_k^T} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_m^T T}}{\lambda_m^T} \right) \right] \right\} \quad (51)
 \end{aligned}$$

Für die relevanten Stoffe ist die Zeitkonstante für die Clearance aus den Subkompartments des Respirationstrakts im Vergleich zur Zeitkonstante für die Elimination aus dem Organ (z.B. Knochen und Leber) groß, so daß für die Beziehung (51) eine Näherungslösung angegeben werden kann.

Unter den Annahmen

$$\begin{array}{lll}
 \lambda_m^M \gg \lambda_k^M & \text{und damit} & \lambda_m^M - \lambda_k^M \approx \lambda_m^M \approx \lambda_m^{bio} \\
 \lambda_m^T \gg \lambda_k^T & \text{und damit} & \lambda_m^M - \lambda_k^T \approx \lambda_m^M \approx \lambda_m^{bio} \\
 & & \lambda_m^T - \lambda_k^T \approx \lambda_m^T \approx \lambda_m^{bio}
 \end{array}$$

gilt die Formel:

$$D_k^T(T) = 51.2 f_2 D_i Q_I \frac{\epsilon_k^T}{M_k} \left[ \frac{1}{\lambda_{rad}^M - \lambda_{rad}^T} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_k^M T}}{\lambda_k^M} \right) - \frac{1 - e^{-\lambda_k^T T}}{\lambda_m^{bio} \lambda_k^T} \right] \quad (52)$$

Für die gesamte Strahlenexposition des Organs über das Blut sind damit die grundlegenden Beziehungen bekannt, so daß die Retention und die Dosis angegeben werden können.

5. Blutstromrate nach Gleichung (44):

$$\begin{aligned} \frac{dQ_{Bl}}{dt} &= \frac{d(Q_{Bl}^M + Q_{Bl}^T)}{dt} = \lambda_a^{bio} f_2 D_3 Q_I \left[ e^{-\lambda_a^M t} + QT (e^{-\lambda_a^M t} - e^{-\lambda_a^T t}) \right] \\ &+ \lambda_c^{bio} f_c D_4 Q_I \left[ e^{-\lambda_c^M t} + QT (e^{-\lambda_c^M t} - e^{-\lambda_c^T t}) \right] \\ &+ \lambda_e^{bio} f_e D_5 Q_I \left[ e^{-\lambda_e^M t} + QT (e^{-\lambda_e^M t} - e^{-\lambda_e^T t}) \right] \\ &+ LYM \end{aligned} \quad (53)$$

$$QT = \frac{\lambda_{rad}^T}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M}$$

a)  $\lambda_i \neq \lambda_h$

$$LYM = \lambda_i^{bio} \lambda_h^{bio} f_i f_h D_5 Q_I \left[ \frac{e^{-\lambda_h^M t} - e^{-\lambda_i^M t}}{\lambda_i^M - \lambda_h^M} + QT \left( \frac{e^{-\lambda_i^T t} - e^{-\lambda_h^M t}}{\lambda_h^M - \lambda_i^T} - \frac{e^{-\lambda_i^T t} - e^{-\lambda_h^T t}}{\lambda_h^T - \lambda_i^T} \right) \right] \quad (54)$$

b)  $\lambda_i = \lambda_h$

$$LYM = (\lambda_i^{bio})^2 f_i f_h D_5 Q_I \left[ t \cdot e^{-\lambda_i^M t} + QT \left( \frac{e^{-\lambda_i^T t} - e^{-\lambda_i^M t}}{\lambda_{rad}^M - \lambda_{rad}^T} - t \cdot e^{-\lambda_i^T t} \right) \right] \quad (55)$$

6. Lösung der Differentialgleichungen (46) und (48a) liefert:

$$\begin{aligned} Q_k^M(t) &= f_2 \left( C_a^M \frac{e^{-\lambda_k^M t} - e^{-\lambda_a^M t}}{\lambda_a^M - \lambda_k^M} + C_c^M \frac{e^{-\lambda_k^M t} - e^{-\lambda_c^M t}}{\lambda_c^M - \lambda_k^M} \right. \\ &\left. + C_e^M \frac{e^{-\lambda_k^M t} - e^{-\lambda_e^M t}}{\lambda_e^M - \lambda_k^M} + MQLYM \right) \end{aligned} \quad (56)$$

$$\begin{aligned}
 Q_k^T(t) = & f_2 \left[ C_a^T \left( \frac{\lambda_{rad}^T}{\lambda_a^M - \lambda_k^M} \left[ \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_k^M t}}{\lambda_{rad}^M - \lambda_{rad}^T} - \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_a^M t}}{\lambda_a^M - \lambda_k^M} \right] - QT \left[ \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_a^M t}}{\lambda_a^M - \lambda_k^M} - \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_a^T t}}{\lambda_a^T - \lambda_k^T} \right] \right) \right. \\
 & + C_c^T \left( \frac{\lambda_{rad}^T}{\lambda_c^M - \lambda_k^M} \left[ \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_k^M t}}{\lambda_{rad}^M - \lambda_{rad}^T} - \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_c^M t}}{\lambda_c^M - \lambda_k^M} \right] - QT \left[ \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_c^M t}}{\lambda_c^M - \lambda_k^M} - \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_c^T t}}{\lambda_c^T - \lambda_k^T} \right] \right) \\
 & + C_e^T \left( \frac{\lambda_{rad}^T}{\lambda_e^M - \lambda_k^M} \left[ \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_k^M t}}{\lambda_{rad}^M - \lambda_{rad}^T} - \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_e^M t}}{\lambda_e^M - \lambda_k^M} \right] - QT \left[ \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_e^M t}}{\lambda_e^M - \lambda_k^M} - \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_e^T t}}{\lambda_e^T - \lambda_k^T} \right] \right) \\
 & \left. + TQLYM \right] \tag{57}
 \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned}
 C_a^{M,T} &= \lambda_a^{bio} f_a D_3 Q_I \\
 C_c^{M,T} &= \lambda_c^{bio} f_c D_4 Q_I \\
 C_e^{M,T} &= \lambda_e^{bio} f_e D_5 Q_I \\
 C_i &= (\lambda_i^{bio})^2 f_i f_h D_5 Q_I \\
 C_h &= \lambda_i^{bio} \lambda_h^{bio} f_i f_h Q_I
 \end{aligned} \right\} \tag{58}$$

a)  $\lambda_i \neq \lambda_h$

$$MQLYM = C_h \left[ \frac{1}{\lambda_i^M - \lambda_h^M} \left( \frac{e^{-\lambda_k^M t} - e^{-\lambda_h^M t}}{\lambda_h^M - \lambda_k^M} - \frac{e^{-\lambda_k^M t} - e^{-\lambda_i^M t}}{\lambda_i^M - \lambda_k^M} \right) \right]$$

$$\begin{aligned}
 TQLYM = & C_h \frac{\lambda_{rad}^T}{\lambda_i^M - \lambda_h^M} \left[ \frac{1}{\lambda_h^M - \lambda_k^M} \left( \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_k^M t}}{\lambda_{rad}^M - \lambda_{rad}^T} - \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_h^M t}}{\lambda_h^M - \lambda_k^M} \right) \right. \\
 & \left. - \frac{1}{\lambda_i^M - \lambda_k^M} \left( \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_k^M t}}{\lambda_{rad}^M - \lambda_{rad}^T} - \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_i^M t}}{\lambda_i^M - \lambda_k^M} \right) \right] \\
 & + C_h \cdot QT \cdot \left[ \frac{1}{\lambda_h^T - \lambda_i^T} \left( \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_i^T t}}{\lambda_i^T - \lambda_k^T} - \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_h^T t}}{\lambda_h^T - \lambda_k^T} \right) \right. \\
 & \left. - \frac{1}{\lambda_h^T - \lambda_i^T} \left( \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_i^T t}}{\lambda_i^T - \lambda_k^T} - \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_h^T t}}{\lambda_h^T - \lambda_k^T} \right) \right]
 \end{aligned}$$

b)  $\lambda_i = \lambda_h$

$$MQLYM = C_i \frac{1}{(\lambda_i^M - \lambda_k^M)^2} \left[ e^{-\lambda_k^M t} - e^{-\lambda_i^M t} (1 + t(\lambda_i^M - \lambda_k^M)) \right]$$

$$\begin{aligned} TQLYM = C_i \frac{\lambda_{rad}^T}{(\lambda_i^M - \lambda_k^M)^2} & \left\{ \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_i^M t}}{\lambda_{rad}^M - \lambda_{rad}^T} - \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_i^M t}}{\lambda_i^M - \lambda_k^T} \right. \\ & \left. - \frac{(\lambda_i^M - \lambda_k^M)}{(\lambda_i^M - \lambda_k^T)^2} \left[ e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_i^M t} (1 + t(\lambda_i^M - \lambda_k^T)) \right] \right\} \\ + C_h \cdot QT & \left\{ \frac{1}{\lambda_{rad}^M - \lambda_{rad}^T} \left[ \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_i^T t}}{\lambda_i^T - \lambda_k^T} - \frac{e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_i^M t}}{\lambda_i^M - \lambda_k^T} \right] \right. \\ & \left. + \frac{1}{(\lambda_i^T - \lambda_k^T)^2} \left[ e^{-\lambda_k^T t} - e^{-\lambda_i^T t} (1 + t(\lambda_i^T - \lambda_k^T)) \right] \right\} \end{aligned}$$

Nach Integration der Retentionsfunktionen (56) und (57) und Summation von Mutter- und Tochternuklidbeitrag folgt für die Organdosis:

$$\begin{aligned} D(T) = 51.2 \frac{f_2}{M_k} & \left\{ \epsilon^M \left[ C_a^M \frac{1}{\lambda_a^M - \lambda_k^M} \left( AM - \frac{1 - e^{-\lambda_a^M T}}{\lambda_a^M} \right) \right. \right. \\ & + C_c^M \frac{1}{\lambda_c^M - \lambda_k^M} \left( AM - \frac{1 - e^{-\lambda_c^M T}}{\lambda_c^M} \right) \\ & \left. \left. + C_e^M \frac{1}{\lambda_e^M - \lambda_k^M} \left( AM - \frac{1 - e^{-\lambda_e^M T}}{\lambda_e^M} \right) + MDLYM \right] \right\} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \varepsilon^T \left\{ C_a^T \left( \frac{\lambda_{rad}^T}{\lambda_a^M - \lambda_k^M} \left[ \frac{AT - AM}{\lambda_{rad}^M - \lambda_{rad}^T} - \frac{1}{\lambda_a^M - \lambda_k^T} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_a^M T}}{\lambda_a^M} \right) \right] \right. \right. \\
 & \left. \left. - QT \left[ \frac{1}{\lambda_a^M - \lambda_k^T} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_a^M T}}{\lambda_a^M} \right) - \frac{1}{\lambda_a^T - \lambda_k^T} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_a^T T}}{\lambda_a^T} \right) \right] \right) \right. \\
 & + C_c^T \left( \frac{\lambda_{rad}^T}{\lambda_c^M - \lambda_k^M} \left[ \frac{AT - AM}{\lambda_{rad}^M - \lambda_{rad}^T} - \frac{1}{\lambda_c^M - \lambda_k^T} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_c^M T}}{\lambda_c^M} \right) \right] \right. \\
 & \left. \left. - QT \left[ \frac{1}{\lambda_c^M - \lambda_k^T} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_c^M T}}{\lambda_c^M} \right) - \frac{1}{\lambda_c^T - \lambda_k^T} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_c^T T}}{\lambda_c^T} \right) \right] \right) \right. \\
 & + C_e^T \left( \frac{\lambda_{rad}^T}{\lambda_e^M - \lambda_k^M} \left[ \frac{AT - AM}{\lambda_{rad}^M - \lambda_{rad}^T} - \frac{1}{\lambda_e^M - \lambda_k^T} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_e^M T}}{\lambda_e^M} \right) \right] \right. \\
 & \left. \left. - QT \left[ \frac{1}{\lambda_e^M - \lambda_k^T} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_e^M T}}{\lambda_e^M} \right) - \frac{1}{\lambda_e^T - \lambda_k^T} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_e^T T}}{\lambda_e^T} \right) \right] \right) \right. \\
 & \left. + TDLYM \right\} \quad (59)
 \end{aligned}$$

a)  $\lambda_i \neq \lambda_h$

$$MDLYM = \frac{C_h}{\lambda_i^M - \lambda_h^M} \left[ \frac{1}{\lambda_h^M - \lambda_k^M} \left( AM - \frac{1 - e^{-\lambda_h^M T}}{\lambda_h^M} \right) - \frac{1}{\lambda_i^M - \lambda_k^M} \left( AM - \frac{1 - e^{-\lambda_i^M T}}{\lambda_i^M} \right) \right]$$

$$\begin{aligned}
 TDLYM = \frac{\lambda_{rad}^T C_h}{\lambda_i^M - \lambda_h^M} & \left\{ \frac{1}{\lambda_h^M - \lambda_k^M} \left[ \frac{1}{\lambda_{rad}^M - \lambda_{rad}^T} (AT - AM) - \frac{1}{\lambda_h^M - \lambda_k^T} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_h^M T}}{\lambda_h^M} \right) \right] \right. \\
 & \left. - \frac{1}{\lambda_i^M - \lambda_k^M} \left[ \frac{1}{\lambda_{rad}^M - \lambda_{rad}^T} (AT - AM) - \frac{1}{\lambda_i^M - \lambda_k^T} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_i^M T}}{\lambda_i^M} \right) \right] \right\} \\
 + C_h \cdot QT & \left\{ \frac{1}{\lambda_h^M - \lambda_i^T} \left[ \frac{1}{\lambda_i^T - \lambda_k^T} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_i^T T}}{\lambda_i^T} \right) - \frac{1}{\lambda_h^M - \lambda_k^T} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_h^M T}}{\lambda_h^M} \right) \right] \right. \\
 & \left. - \frac{1}{\lambda_h^T - \lambda_i^T} \left[ \frac{1}{\lambda_i^T - \lambda_k^T} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_i^T T}}{\lambda_i^T} \right) - \frac{1}{\lambda_h^T - \lambda_k^T} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_h^T T}}{\lambda_h^T} \right) \right] \right\}
 \end{aligned}$$

Der zweite Term von TDLYM ist unter den Voraussetzungen

$$\begin{aligned}\lambda_h^M &\approx \lambda_h^{\text{bio}} \\ \lambda_h^T &\approx \lambda_h^{\text{bio}}\end{aligned}\quad (60)$$

zu vernachlässigen.

b)  $\lambda_i = \lambda_h$

$$\text{MDLYM} = C_i \frac{1}{(\lambda_i^M - \lambda_k^M)^2} \left[ AM - \frac{1 - e^{-\lambda_i^M T}}{\lambda_i^M} - \frac{\lambda_i^M - \lambda_k^M}{(\lambda_i^M)^2} \left( 1 - e^{-\lambda_i^M T} (1 + \lambda_i^M T) \right) \right]$$

$$\begin{aligned}\text{TDLYM} = C_i \frac{\lambda_{\text{rad}}^T}{(\lambda_i^M - \lambda_k^M)^2} &\left\{ \frac{AT - AM}{\lambda_{\text{rad}}^M - \lambda_{\text{rad}}^T} - \frac{1}{\lambda_i^M - \lambda_k^M} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_i^M T}}{\lambda_i^M} \right) \right. \\ &- \left. \frac{\lambda_i^M - \lambda_k^M}{(\lambda_i^M - \lambda_k^M)^2} \left[ AT - \frac{1 - e^{-\lambda_i^M T}}{\lambda_i^M} - \frac{\lambda_i^M - \lambda_k^M}{(\lambda_i^M)^2} \left( 1 - e^{-\lambda_i^M T} (1 - \lambda_i^M T) \right) \right] \right\} \\ &+ C_h \cdot QT \left\{ \frac{1}{\lambda_{\text{rad}}^M - \lambda_{\text{rad}}^T} \left[ \frac{1}{\lambda_i^T - \lambda_k^T} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_i^T T}}{\lambda_i^T} \right) - \frac{1}{\lambda_i^M - \lambda_k^T} \left( AT - \frac{1 - e^{-\lambda_i^M T}}{\lambda_i^M} \right) \right] \right. \\ &- \left. \frac{1}{(\lambda_i^T - \lambda_k^T)^2} \left[ AT - \frac{1 - e^{-\lambda_i^T T}}{\lambda_i^T} - \frac{\lambda_i^T - \lambda_k^T}{(\lambda_i^T)^2} \left( 1 - e^{-\lambda_i^T T} (1 - \lambda_i^T T) \right) \right] \right\}\end{aligned}$$

Gleichungen für die Strahlenexposition innerer Organe nach Ingestion

Das mathematische Modell geht von einem Kompartiment für den GI-Trakt und einem weiteren für das Organ K aus, das z.B. die Knochen oder die Leber darstellt (Bild A2).

Wegen der biologischen Halbwertszeit von 24 Stunden für den GI-Trakt, die im Vergleich zur physikalischen Halbwertszeit der Aktiniden klein ist, wird im Modell davon ausgegangen, daß die

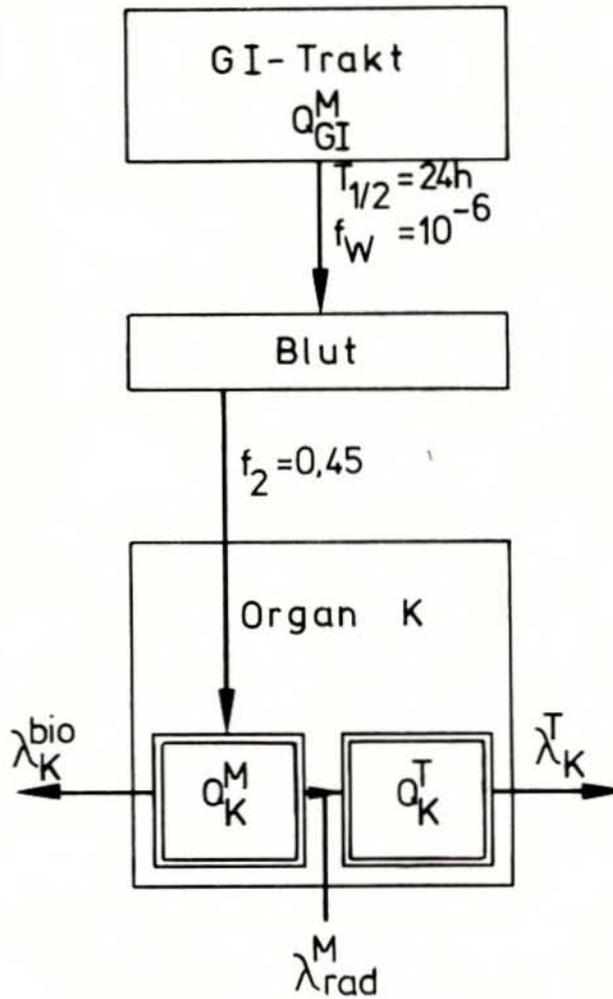


Bild A2: Kompartiment-Modell des GI-Trakts

Mutteraktivität erst durch ihren Zerfall im Organ zur Bildung der für die Strahlenexposition nicht vernachlässigbaren Tochteraktivität führt.

### 1. Mutteraktivität

Die Differentialgleichung für die Mutteraktivität  $Q_{GI}^M$  im GI-Trakt lautet:

$$\frac{dQ_{GI}^M}{dt} = -\lambda_{GI}^M Q_{GI}^M \quad (61)$$

Bei einmaliger Ingestion gilt mit der Anfangsbedingung

$$\begin{aligned} Q_{GI}^M(t=0) &= Q_I \\ Q_{GI}^M(t) &= Q_I \cdot e^{-\lambda_{GI}^M t} \end{aligned} \quad (62)$$

Die Aktivität im Organ K erfüllt die Differentialgleichung

$$\frac{dQ_K^M}{dt} = f_2 f_w \lambda_{GI}^{bio} Q_I e^{-\lambda_{GI}^M t} - \lambda_K^M Q_K^M, \quad (63)$$

die für  $Q_K^M(t=0) = 0$  die folgende Lösung hat:

$$Q_K^M(t) = f_2 f_w \lambda_{GI}^{bio} Q_I \frac{1}{\lambda_{GI}^M - \lambda_K^M} (e^{-\lambda_K^M t} - e^{-\lambda_{GI}^M t}) \quad (64)$$

Die bis zur Zeit T aufintegrierte Dosis beträgt:

$$D_K^M(T) = 51.2 f_2 f_w Q_I \frac{\epsilon_K^M}{M_K} \frac{1}{\lambda_{GI}^M - \lambda_K^M} \left( \frac{1 - e^{-\lambda_K^M T}}{\lambda_K^M} - \frac{1 - e^{-\lambda_{GI}^M T}}{\lambda_{GI}^M} \right) \quad (65)$$

## 2. Tochteraktivität

Für die Tochteraktivität im GI-Trakt gilt die Differentialgleichung:

$$\frac{dQ_{GI}^T}{dt} = \lambda_{red}^T Q_{GI}^M - \lambda_{GI}^T Q_{GI}^T \quad (66)$$

Mit der Anfangsbedingung  $Q_{GI}^T = 0$  zur Zeit  $t = 0$  gilt:

$$Q_{GI}^T = Q_I \frac{\lambda_{rad}^T}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \left( e^{-\lambda_{GI}^M t} - e^{-\lambda_{GI}^T t} \right) \quad (67)$$

Die Tochteraktivität im Organ K erfüllt die Differentialgleichung:

$$\begin{aligned} \frac{dQ_K^T}{dt} &= \lambda_{rad}^T Q_K^M + f_2 f_w \lambda_{GI}^{bio} Q_{GI}^T - \lambda_K^T Q_K^T \\ &= f_2 f_w \lambda_{GI}^{bio} Q_I \lambda_{rad}^T \left( \frac{e^{-\lambda_K^M t} - e^{-\lambda_{GI}^M t}}{\lambda_{GI}^M - \lambda_K^M} + \frac{e^{-\lambda_{GI}^M t} - e^{-\lambda_{GI}^T t}}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \right) - \lambda_K^T Q_K^T \end{aligned} \quad (68)$$

Die Lösung dieser Gleichung für die Anfangsbedingung  $Q_K^T = 0$  für  $t = 0$  ist:

$$\begin{aligned} Q_K^T(t) &= f_2 f_w \lambda_{GI}^{bio} Q_I \lambda_{rad}^T \left[ \frac{1}{\lambda_{GI}^M - \lambda_K^M} \left( \frac{e^{-\lambda_K^T t} - e^{-\lambda_K^M t}}{\lambda_K^M - \lambda_K^T} - \frac{e^{-\lambda_K^T t} - e^{-\lambda_{GI}^M t}}{\lambda_{GI}^M - \lambda_K^T} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \left( \frac{e^{-\lambda_K^T t} - e^{-\lambda_{GI}^M t}}{\lambda_{GI}^M - \lambda_K^T} - \frac{e^{-\lambda_K^T t} - e^{-\lambda_{GI}^T t}}{\lambda_{GI}^T - \lambda_K^T} \right) \right] \end{aligned} \quad (69)$$

Das Tochternuklid trägt zur Organdosis nach einer Integrationszeit T den folgenden Anteil bei:

$$\begin{aligned} D_K^T(T) &= 51.2 f_2 f_w \lambda_{GI}^{bio} Q_I \lambda_{rad}^T \frac{E_K^T}{M_K} \cdot \left\{ \right. \\ &\quad \frac{1}{\lambda_{GI}^M - \lambda_K^M} \left[ \frac{1}{\lambda_K^M - \lambda_K^T} \left( \frac{1 - e^{-\lambda_K^T T}}{\lambda_K^T} - \frac{1 - e^{-\lambda_K^M T}}{\lambda_K^M} \right) - \frac{1}{\lambda_{GI}^M - \lambda_K^T} \left( \frac{1 - e^{-\lambda_K^T T}}{\lambda_K^T} - \frac{1 - e^{-\lambda_{GI}^M T}}{\lambda_{GI}^M} \right) \right] \\ &\quad \left. + \frac{1}{\lambda_{rad}^T - \lambda_{rad}^M} \left[ \frac{1}{\lambda_{GI}^M - \lambda_K^T} \left( \frac{1 - e^{-\lambda_K^T T}}{\lambda_K^T} - \frac{1 - e^{-\lambda_{GI}^M T}}{\lambda_{GI}^M} \right) - \frac{1}{\lambda_{GI}^T - \lambda_K^T} \left( \frac{1 - e^{-\lambda_K^T T}}{\lambda_K^T} - \frac{1 - e^{-\lambda_{GI}^T T}}{\lambda_{GI}^T} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (70)$$

Die durch Mutter- und Tochternuklid erzeugte Gesamtdosis für ein Organ K beträgt:

$$D_k(T) = D_k^M(T) + D_k^T(T) \quad (71)$$

## A1.2 DISKUSSION DER NÄHERUNGSVERFAHREN

Der Einfluß unterschiedlicher Berücksichtigung instabiler Tochternuklide auf das Dose-commitment wird am Beispiel von Pu-241 dargestellt, weil hier Differenzen zu erwarten sind. Die Strahlenexposition durch Pu-241 wird nur zu einem geringen Teil durch die Beta-Strahlung des Mutternuklids erzeugt. Hauptsächlich ist die Alpha-Strahlung des Tochternuklids Am-241 für die Dosis verantwortlich. In der ersten Spalte ( $DC_1$ ) der Dose-commitments (Tabelle A1) sind die Ergebnisse der eigenen Rechnungen mit exakter Berücksichtigung des Tochternuklids aufgeführt. Während hierbei relevante Zerfallsketten durch eine Modifikation der effektiven Energie (Anhang A1.3) des Tochternuklids berücksichtigt werden, stehen in der zweiten Spalte ( $DC_2$ ) jeweils die Dose-commitments, die den Tochterzerfall und nachfolgende Zerfallsketten ausschließlich durch die effektive Energie des Mutternuklids annähern. Ein Vergleich der berechneten Dose-commitments zeigt befriedigende Übereinstimmung innerhalb eines Faktors von 3 im umrandeten Wertebereich. Andererseits ist zu bemerken, daß die Näherung ( $DC_2$ ) nicht in jedem Falle zu höheren Dose-commitments führt. Im Hinblick auch auf andere Nuklide gilt, daß für Mutternuklide, die im Vergleich zur Integrationszeit von 50 bzw. 70 Jahren langlebig sind, der Dosisbeitrag von Tochternukliden keine Bedeutung hat.

Eine andere häufig angewandte Näherung besteht darin, im Kompartiment-Modell der Lunge nur die Transferfaktoren, nicht aber das Zeitverhalten für die verschiedenen Clearance-Wege zu berücksichtigen. In diesem vereinfachten Modell ist die inhalierete Aktivität ohne Zeitverzögerung im Blut und damit auch in den

Organ	AMAD /µm/	Integra- tionszeit (Jahre)	KLASSE D		KLASSE W		KLASSE Y	
			DC <sub>1</sub>	DC <sub>2</sub>	DC <sub>1</sub>	DC <sub>2</sub>	DC <sub>1</sub>	DC <sub>2</sub>
Lunge	0.3	50	7.9 D-5	7.1 D-4	1.9 D-2	4.3 D-2	1.3 D-0	3.9 D-1
Lunge	0.3	70	1.9 D-5	7.1 D-4	1.9 D-2	4.3 D-2	1.3 D-0	3.9 D-1
Lymphgewebe	0.3	50	1.6 D-5	1.4 D-4	1.6 D-3	3.5 D-3	1.3 D-0	2.4 D-1
Lymphgewebe	0.3	70	1.6 D-5	1.4 D-4	1.6 D-3	3.5 D-3	1.6 D-0	2.5 D-1
Knochen	0.3	50	1.9 D+2	1.9 D+2	4.6 D+1	4.8 D+1	2.0 D+1	2.2 D+1
Knochen	0.3	70	2.8 D+2	2.0 D+2	6.9 D+1	5.1 D+1	3.0 D+1	2.4 D+1
Leber	0.3	50	7.7 D+1	3.4 D+1	1.9 D+1	8.3 D+0	8.3 D+0	3.8 D+0
Leber	0.3	70	1.0 D+2	3.4 D+1	2.6 D+1	8.5 D+0	1.2 D+1	4.0 D+0
Lunge	1.0	50	5.5 D-5	4.9 D-4	1.3 D-2	3.0 D-2	9.4 D-1	2.7 D-1
Lunge	1.0	70	5.5 D-5	4.9 D-4	1.3 D-2	3.0 D-2	9.4 D-1	2.7 D-1
Lymphgewebe	1.0	50	1.1 D-5	9.8 D-5	1.1 D-3	2.4 D-3	9.3 D-1	1.7 D-1
Lymphgewebe	1.0	70	1.1 D-5	9.8 D-5	1.1 D-3	2.4 D-3	1.1 D+0	1.7 D-1
Knochen	1.0	50	1.9 D+2	2.0 D+2	4.7 D+1	4.9 D+1	1.5 D+1	1.7 D+1
Knochen	1.0	70	2.8 D+2	2.0 D+2	7.0 D+1	5.1 D+1	2.3 D+1	1.8 D+1
Leber	1.0	50	7.8 D+1	3.4 D+1	1.9 D+1	8.3 D+0	6.2 D+0	2.8 D+0
Leber	1.0	70	1.0 D+2	3.4 D+1	2.6 D+1	8.7 D+0	8.7 D+0	3.0 D+0

Tab. A1: Vergleich der Dose-commitments von Pu-241 bei exakter (DC<sub>1</sub>) und angenäherter (DC<sub>2</sub>) Berücksichtigung des Tochternuklids

Organen Knochen und Leber. Die Zeitabhängigkeit der Aktivität in Knochen und Leber wird dann allein durch die Elimination auf Grund biologischer Abbauprozesse und des radioaktiven Zerfalls bestimmt. Das Organdose-commitment, z.B. für Knochen oder Leber, wird beschrieben durch

$$D_k(T) = 51.2 \frac{E_k}{M_k} f_2 \frac{1 - e^{-\lambda_k T}}{\lambda_k} (D_3 f_\alpha + D_4 f_c + D_5 (f_e + f_h f_i)) \quad (71a)$$

Es ist zu erwarten, daß die Qualität dieser Näherungsformel befriedigend ist, solange die effektiven Eliminationszeiten für den Abbauprozess von Fremdstoffen aus dem Organ groß sind im Vergleich zu den Clearance-Zeiten der Lungenkompartments. Unter diesem Aspekt wurden für die Plutoniumisotope Pu-239 und Pu-241 die Dose-commitments der Organe Knochen und Leber berechnet (Tabelle A2). Während für Pu-239 die Abweichungen 10 % nicht überschreiten, treten bei Pu-241 - hier ist die physikalische Halbwertszeit von 15 Jahren bereits näherungsweise vergleichbar mit den Clearance-Zeiten von 500 bzw. 1000 Tagen aus den Subkompartments der Lunge und des Lymphsystems - bis zu 25 % auf, wenn der Tochterzerfall nur durch die Näherung über die effektive Energie des Mutternuklids berücksichtigt wird. Bei exakter Berücksichtigung des Tochterzerfalls beträgt die Abweichung 30 bis 80 %.

1 $\mu$ m-Aerosole Stoffklasse Y	Pu-239		Pu-241	
	Knochen	Leber	Knochen	Leber
DC nach Formel (1) $E_{\text{eff}}$ /MeV/	960 (270)	414 (53)	21 (14)	3.5 (1)
DC mit Näherung für Tochterzerfall $E_{\text{eff}}$ /MeV/			17 (14)	2.8 (1)
DC mit Tochterzerfall $E_{\text{eff}}$ /MeV/	855 $E^{\text{M}}=270, E^{\text{T}}=228$	390 $E^{\text{M}}=53, E^{\text{T}}=46$	15 $E^{\text{M}}=0.029, E^{\text{T}}=283$	6.2 $E^{\text{M}}=0.0057, E^{\text{T}}=56$

Tab. A2: Vergleich von Dose-commitments, die nach verschiedenen Näherungen berechnet werden

$E^{\text{M}}$  = effektive Energie des Mutternuklids

$E^{\text{T}}$  = effektive Energie des Tochternuklids

Zeichenerklärung

- $\lambda_n^{M,T}$  Eliminationskonstante für physikalischen Zerfall und biologischen Transport über den Weg (n) für Mutternuklide bzw. Tochternuklide [ $\text{sec}^{-1}$ ]
- $\lambda_n^{\text{bio}}$  Eliminationskonstante für biologischen Transport über den Weg (n) [ $\text{sec}^{-1}$ ]
- $f_n$  Bruchteil der über den Weg (n) transportierten Nuklide. n steht für die Wege a, b, c, d, e, f, g, h, i, j.
- $D_i$  Depositionsfaktor für Aerosole im Kompartiment i  
 $D_3$  = Deposition für Nasopharyngal-Region  
 $D_4$  = Deposition für Tracheobronchial-Region  
 $D_5$  = Deposition für Pulmonal-Region
- $N_n^{M,T}$  Anzahl von Mutter- bzw. Tochternukliden im Subkompartiment n
- $Q_n^{M,T}$  Mutter- bzw. Tochternuklidaktivität oder Retention im Subkompartiment n [ $\text{Ci}$ ]
- $\epsilon_k^{M,T}$  effektive, im Organ k absorbierte Energie pro Zerfall eines Mutter- bzw. Tochternuklids [ $\text{MeV} \cdot \frac{\text{rem}}{\text{rad}}$ ]
- $M_k$  Masse eines Organs k [ $\text{g}$ ]
- $D_k^{M,T}(T)$  Dose-commitment [ $\text{rem}$ ] nach einer Integrationszeit T [ $\text{d}$ ] für das Organ k, verursacht durch Mutter- bzw. Tochteraktivität
- $f_2$  Bruchteil vom Organ aufgenommener Nuklide aus dem Blut
- $f_w$  Bruchteil vom Blut absorbierter Nuklide aus dem GI-Trakt
- $Q_I$  Zur Zeit  $t = 0$  einmalig inhalierte Aktivität [ $\mu\text{Ci}$ ]

A1.3 PARAMETER

Effektive Energie nach ICRP II /48/

a)  $\beta^-$ -Strahlung /48/

$$E_i = 0.33 E_{\max} \cdot f_i \cdot \left(1 - \frac{Z^{1/2}}{50}\right) \left(1 + \frac{E_{\max}^{1/2}}{4}\right)$$

$E_{\max}$  = maximale Teilchenenergie (MeV)

$f$  = Bruchteil der Zerfälle

$Z$  = Ordnungszahl des  $\beta^-$ -Strahlen emittierenden Radionuklids

$$E_{\text{eff}}^{\beta^-} = n \sum_i E_i \quad (72)$$

RBW = relative biologische Wirksamkeit oder Qualitätsfaktor

- 1 für  $\beta$ -Strahlung

- 10 für  $\alpha$ -Strahlung

- 20 für Rückstoßkerne

$n$  = relativer Schädigungsfaktor oder Verteilungsfaktor

- 5 für Knochen ( $\alpha$ -Strahlung)

- 1 für andere Organe und Gewebe ( $\alpha$ -,  $\beta^-$ -,  $\gamma$ -Strahlung)

b)  $\alpha$ -Strahlung

$$E_{\text{eff}} = n \cdot ((\text{RBW}) + (\text{RBW})_{\text{Rückst.}} \frac{M}{M}) \sum_i E_i \cdot f_i \quad (73)$$

c) Effektive Energie einer Zerfallskette

$$E_{\text{eff}}^{\beta^-} = n \sum_i E_i \cdot F_i \quad (74)$$

$$E_{\text{eff}}^{\alpha} = 10 \cdot n \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{M_{\alpha}}{M}\right) \sum_i E_i \cdot f_i \cdot F_i \quad (75)$$

$$F_i = \frac{\prod_{j=1}^i \frac{T_j}{T_j^{\text{rad}}}}{1 - \exp(-\lambda_0 t)} \cdot \sum_{n=0}^i \frac{(T_n)^i (1 - \exp(-\lambda_n t))}{\prod_{\substack{P=0 \\ P \neq n}} (T_n - T_P)}$$

- $\lambda_0$  = effektive Zerfallskonstante des Ausgangsnuklids  
 $\lambda_i$  = effektive Zerfallskonstante des i-ten Folgeprodukts  
 $T_i$  = effektive Halbwertszeit des i-ten Folgeprodukts  
 $T_i^{\text{rad}}$  = radiologische Halbwertszeit des i-ten Folgeprodukts  
 $t$  = 50 Jahre, Dauer der Strahlenbelastung

Zur Bestimmung der Dose-commitments der untersuchten Aktiniden wurden die effektiven Energien entweder den ICRP-II-Tabellen /48/ entnommen oder nach den Formeln (72), (73) berechnet. Die Berücksichtigung von Zerfallsreihen erfolgte in der Weise, daß die effektive Energie des Mutternuklids nach den Beziehungen (72) und (73) bestimmt wurde. Die effektive Energie des Tochter-nuklids unterlag dagegen dem Einfluß aller Folgeprodukte der Zerfallsreihe nach den Gleichungen (74) und (75). Die Ergebnisse sind in Tabelle A3 dargestellt.

### Aerosolgröße

Activity Median Aerodynamic Diameter

AMAD = 0.3  $\mu\text{m}$

AMAD = 1.0  $\mu\text{m}$

### Depositionswahrscheinlichkeit $D_i$ /44/

AMAD \ $D_i$	0.3 $\mu\text{m}$	1.0 $\mu\text{m}$
$D_3$ :	0.07	0.30
$D_4$ :	0.08	0.08
$D_5$ :	0.36	0.25 <sup>1)</sup>

1)  $D_5 = 0.23$  nach Ref. /44/

	$T_{1/2}$ /72/	$A_{\text{spez.}}$ Ci/g	$E_{\text{eff}}$ [MeV]			
			Lunge	Lymph	Knochen	Leber
Np-236	1.29 (6) a	1.175 (-3)	0.14	0.14	0.70	0.14
Pu-236	2.85 a	5.319 (2)	64.5	64.5	931.5	532.7
Np-237	2.14 (6) a	7.054 (-4)	49.2	49.2	246.2	49.2
Pa-233	27.0 d	2.076 (4)	0.098	0.098	0.534	0.134
Np-238	50.8 h	2.592 (5)	0.22	0.22	1.08	0.22
Pu-238	87.75 a	1.713 (+1)	57	57	284	57
Pu-236	2.85 a	5.319 (2)	59.6	59.6	298	59.6
U-232	71.7 a	2.181 (1)	205.9	205.9	1995.6	1586.1
Pu-238	87.75 a	1.713 (1)	56.7	56.7	283.6	56.7
U-234	2.44 (5) a	6.266 (-3)	49	49	246.1	49
Pu-239	2.43 (4) a	6.137 (-2)	53	53	266	53
U-235	7.04 (8) a	2.162 (-6)	45.6	45.6	228	45.6
Pu-240	6537 a	2.280 (-1)	53	53	266	53
U-236	2.342 (7) a	6.473 (-5)	46	46	232	46
Pu-241	14.89 a	9.970 (1)	0.0057	0.0057	0.0286	0.0057
Am-241	433 a	8.262 (2)	56.6	56.6	283	56.6
Pu-242	3.87 (5) a	3.820 (-3)	51	51	253	51
U-238	4.47 (9) a	3.363 (-7)	0	0	0	0
Am-241	433 a	3.428 (0)	57	57	283	57
Th-228	1.913 a	8.202 (2)	56	56	279	56
Ra-224	3.64 d	1.602 (5)	2.96 (2)	2.96 (2)	1.482 (3)	1.012 (3)

Tab. A3: Halbwertszeiten, spezifische Aktivitäten und effektive Energien

	$T_{1/2}$ /72/	$A_{\text{spez.}}$ Ci/g	$E_{\text{eff}}$ [MeV]			
			Lunge	Lymph	Knochen	Leber
Th-232	1.405(10) a	1.098 (-7)	41	41	205	41
Ra-228	5.75 a	2.729 (2)	1.59 (2)	1.59 (2)	1.88 (3)	1.67(3)
Th-234	24.10 d	2.316 (4)	0.047	0.047	0.245	0.047
Pa-234	6.75 h	1.984 (6)	0.1358	0.1358	0.7073	0.1589
U-232	71.7 a	2.151 (1)	2.06 (2)	2.06 (2)	1.996(3)	1.528(3)
U-233	1.59 (5) a	9.657 (-3)	49.7	49.7	248.7	49.7
Th-229	7340 a	2.128 (-1)	50.4	50.4	252	50.4
U-234	2.44 (5) a	6.266 (-3)	49.2	49.2	246	49.2
Th-230	7.7 (4) a	2.02 (-2)	48.3	48.3	241.7	48.3
U-235	7.04 (8) a	2.162 (-6)	45.6	45.6	228	45.6
Th-231	25.6 h	5.30 (-5)	0.07	0.07	0.33	0.07
U-236	2.342 (7) a	6.473 (-5)	46.3	46.3	232	46.3
Th-232	1.405(10) a	1.098 (-7)	41.5	41.5	207	41.5
U-237	6.75 d	8.163 (4)	0.06	0.06	0.31	0.06
Np-237	2.14 (6) a	7.054 (-4)	49	49	250	49
U-238	4.47 (9) a	3.363 (-7)	43.2	43.2	216	43.2
Np-235	396 d	1.403 (3)	0	0	0	0
U-235	7.04 (8) a	2.162 (-6)	46	46	230	46
Am-242	16 h	8.094 (5)	0.17	0.17	0.84	0.17
Cm-242	163 d	3.310 (3)	64	64	400	78
Am-242m	152 a	9.726 (0)	53.3	53.3	267	53.3

Tab. A3: Halbwertszeiten, spezifische Aktivitäten und effektive Energien (Fortsetzung)

	$T_{1/2}$ /72/	$A_{\text{spez.}}$ Ci/g	$E_{\text{eff}}$ [MeV]			
			Lunge	Lymph	Knochen	Leber
Am-243	7400 a	1.990 (-1)	54.4	54.4	272	54.4
Np-239	2.355 d	2.320 (5)	0.13	0.13	0.67	0.13
Cm-242	163 d	3.310 (3)	63	63	316	63
Pu-238	87.75 a	1.713 (1)	56.7	56.7	283.6	56.7
Cm-243	30 a	4.908 (1)	60	60	300	60
Pu-239	2.439 (4) a	6.137 (-2)	53	53	266	53
Cm-244	18.1 a	8.101 (1)	60	60	300	60
Pu-240	6537 a	2.280 (-1)	53	53	266	53
Cm-245	8532 a	1.712 (-1)	55.5	55.5	277.6	55.5
Pu-241	14.89 a	9.970 (1)	0.053	0.053	14	0.053
Cm-246	4820 a	3.017 (-1)	55.5	55.5	277.6	55.5
Pu-242	3.87 (5) a	3.820 (-3)	51	51	253	51

Tab. A3: Halbwertszeiten, spezifische Aktivitäten und effektive Energien (Fortsetzung)

Atemrate  $A = 30 \text{ l/Minute}$

Aufnahmefaktor  $f_w$  aus dem GI-Trakt in das Blut

$$f_w = 10^{-6}$$

Aufnahmefaktor  $f_2$  von Substanzen aus dem Blut in das Organ

	Skelett	Leber
$f_2$	0.45	0.45

Biologische Halbwertszeit

Nuklid		Skelett	Leber
Th, Np, Pu, Am, Cm	$T_{1/2}$	100 Jahre /19/	40 Jahre /19/
U	$T_{1/2}$	300 Tage /48/	300 Tage

Organmasse in Gramm

Lunge	Lymphgewebe	Skelett	Leber
1000 /49/	1000 /16/	5000 /49/	1800 /49/

A N H A N G 2

Berechnete Dose-commitments und Dosisfaktoren

THORIUM-228-KETTE

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION (ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT (JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	1.2D+00	6.1D+02	2.5D+02	1.2D+05	1.6D+03	8.1D+05
LUNGE	0.3	70.	1.2D+00	6.1D+02	2.5D+02	1.2D+05	1.6D+03	8.1D+05
LYMPHGeweBE	0.3	50.	2.3D-01	1.2D+02	4.4D+00	2.2D+03	6.0D+01	3.0D+04
LYMPHGeweBE	0.3	70.	2.3D-01	1.2D+02	4.4D+00	2.2D+03	6.0D+01	3.0D+04
KNOCHEN	0.3	50.	3.8D+03	1.9D+06	9.2D+02	4.6D+05	1.9D+02	9.5D+04
KNOCHEN	0.3	70.	3.8D+03	1.9D+06	9.2D+02	4.6D+05	1.9D+02	9.5D+04
LEBER	0.3	50.	6.2D+03	3.1D+06	1.5D+03	7.5D+05	3.1D+02	1.6D+05
LEBER	0.3	70.	6.2D+03	3.1D+06	1.5D+03	7.5D+05	3.1D+02	1.6D+05

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT (JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	8.5D-01	4.3D+02	1.7D+02	8.7D+04	1.1D+03	5.7D+05
LUNGE	1.0	70.	8.5D-01	4.3D+02	1.7D+02	8.7D+04	1.1D+03	5.7D+05
LYMPHGeweBE	1.0	50.	1.6D-01	8.1D+01	3.1D+00	1.5D+03	4.1D+01	2.1D+04
LYMPHGeweBE	1.0	70.	1.6D-01	8.1D+01	3.1D+00	1.5D+03	4.1D+01	2.1D+04
KNOCHEN	1.0	50.	3.8D+03	1.9D+06	9.4D+02	4.7D+05	1.5D+02	7.7D+04
KNOCHEN	1.0	70.	3.8D+03	1.9D+06	9.4D+02	4.7D+05	1.5D+02	7.7D+04
LEBER	1.0	50.	6.3D+03	3.1D+06	1.5D+03	7.7D+05	2.5D+02	1.3D+05
LEBER	1.0	70.	6.3D+03	3.1D+06	1.5D+03	7.7D+05	2.5D+02	1.3D+05

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	7.8D-03
KNOCHEN	70.Y	7.8D-03
LEBER	50.Y	1.3D-02
LEBER	70.Y	1.3D-02

THORIUM-232-KETTE

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION(ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	5.5D-01	2.8D+02	3.6D+01	1.8D+04	5.7D+02	2.9D+05
LUNGE	0.3	70.	5.5D-01	2.8D+02	3.6D+01	1.8D+04	5.7D+02	2.9D+05
LYMPHGeweBE	0.3	50.	1.1D-01	5.5D+01	3.0D+00	1.5D+03	4.5D+02	2.2D+05
LYMPHGeweBE	0.3	70.	1.1D-01	5.5D+01	3.0D+00	1.5D+03	5.3D+02	2.7D+05
KNOCHEN	0.3	50.	5.8D+04	2.9D+07	1.5D+04	7.3D+06	7.6D+03	3.8D+06
KNOCHEN	0.3	70.	8.0D+04	4.0D+07	2.0D+04	1.0D+07	1.1D+04	5.4D+06
LEBER	0.3	50.	9.9D+04	4.9D+07	2.5D+04	1.2D+07	1.3D+04	6.6D+06
LEBER	0.3	70.	1.3D+05	6.3D+07	3.2D+04	1.6D+07	1.7D+04	8.7D+06

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	3.8D-01	1.9D+02	2.5D+01	1.3D+04	4.0D+02	2.0D+05
LUNGE	1.0	70.	3.8D-01	1.9D+02	2.5D+01	1.3D+04	4.0D+02	2.0D+05
LYMPHGeweBE	1.0	50.	7.6D-02	3.8D+01	2.1D+00	1.0D+03	3.1D+02	1.6D+05
LYMPHGeweBE	1.0	70.	7.6D-02	3.8D+01	2.1D+00	1.0D+03	3.7D+02	1.8D+05
KNOCHEN	1.0	50.	5.9D+04	2.9D+07	1.5D+04	7.4D+06	5.6D+03	2.8D+06
KNOCHEN	1.0	70.	8.1D+04	4.0D+07	2.0D+04	1.0D+07	8.0D+03	4.0D+06
LEBER	1.0	50.	1.0D+05	5.0D+07	2.5D+04	1.3D+07	9.7D+03	4.9D+06
LEBER	1.0	70.	1.3D+05	6.3D+07	3.2D+04	1.6D+07	1.3D+04	6.4D+06

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	1.2D-01
KNOCHEN	70.Y	1.7D-01
LEBER	50.Y	2.1D-01
LEBER	70.Y	2.7D-01

1  
88  
1

THORIUM-234-KETTE

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION (ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	1.6D-03	7.8D-01	1.1D-02	5.4D+00	1.2D-02	5.8D+00
LUNGE	0.3	70.	1.6D-03	7.8D-01	1.1D-02	5.4D+00	1.2D-02	5.8D+00
LYMPHGEWEBE	0.3	50.	1.7D-04	8.5D-02	1.7D-05	8.5D-03	5.7D-06	2.9D-03
LYMPHGEWEBE	0.3	70.	1.7D-04	8.5D-02	1.7D-05	8.5D-03	5.7D-06	2.9D-03
KNOCHEN	0.3	50.	9.3D-03	4.6D+00	1.4D-03	7.2D-01	3.6D-05	1.8D-02
KNOCHEN	0.3	70.	9.3D-03	4.6D+00	1.4D-03	7.2D-01	3.6D-05	1.8D-02
LEBER	0.3	50.	5.6D-03	2.8D+00	8.7D-04	4.4D-01	2.2D-05	1.1D-02
LEBER	0.3	70.	5.6D-03	2.8D+00	8.7D-04	4.4D-01	2.2D-05	1.1D-02

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	1.1D-03	5.4D-01	7.6D-03	3.8D+00	8.0D-03	4.0D+00
LUNGE	1.0	70.	1.1D-03	5.4D-01	7.6D-03	3.8D+00	8.0D-03	4.0D+00
LYMPHGEWEBE	1.0	50.	1.2D-04	5.9D-02	1.2D-05	5.9D-03	4.0D-06	2.0D-03
LYMPHGEWEBE	1.0	70.	1.2D-04	5.9D-02	1.2D-05	5.9D-03	4.0D-06	2.0D-03
KNOCHEN	1.0	50.	9.8D-03	4.9D+00	1.8D-03	9.2D-01	8.7D-05	4.4D-02
KNOCHEN	1.0	70.	9.8D-03	4.9D+00	1.8D-03	9.2D-01	8.7D-05	4.4D-02
LEBER	1.0	50.	5.9D-03	2.9D+00	1.1D-03	5.5D-01	5.2D-05	2.6D-02
LEBER	1.0	70.	5.9D-03	2.9D+00	1.1D-03	5.5D-01	5.2D-05	2.6D-02

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	3.1D-09
KNOCHEN	70.Y	3.1D-09
LEBER	50.Y	1.8D-09
LEBER	70.Y	1.8D-09

URAN-232-KETTE

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*H\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION(ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	7.4D-01	3.7D+02	5.7D+01	2.9D+04	1.2D+03	6.1D+05
LUNGE	0.3	70.	7.4D-01	3.7D+02	5.7D+01	2.9D+04	1.2D+03	6.1D+05
LYMPHGeweBE	0.3	50.	1.5D-01	7.3D+01	4.7D+00	2.3D+03	5.7D+02	2.8D+05
LYMPHGeweBE	0.3	70.	1.5D-01	7.3D+01	4.7D+00	2.3D+03	6.3D+02	3.1D+05
KNOCHEN	0.3	50.	3.0D+02	1.5D+05	8.1D+01	4.1D+04	4.1D+01	2.0D+04
KNOCHEN	0.3	70.	3.0D+02	1.5D+05	8.1D+01	4.1D+04	4.1D+01	2.0D+04
LEBER	0.3	50.	1.9D+02	9.2D+04	4.8D+01	2.4D+04	2.6D+01	1.3D+04
LEBER	0.3	70.	1.9D+02	9.2D+04	4.8D+01	2.4D+04	2.6D+01	1.3D+04

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	5.1D-01	2.6D+02	4.0D+01	2.0D+04	8.4D+02	4.2D+05
LUNGE	1.0	70.	5.1D-01	2.6D+02	4.0D+01	2.0D+04	8.4D+02	4.2D+05
LYMPHGeweBE	1.0	50.	1.0D-01	5.1D+01	3.2D+00	1.6D+03	3.9D+02	2.0D+05
LYMPHGeweBE	1.0	70.	1.0D-01	5.1D+01	3.2D+00	1.6D+03	4.4D+02	2.2D+05
KNOCHEN	1.0	50.	3.0D+02	1.5D+05	8.0D+01	4.0D+04	3.0D+01	1.5D+04
KNOCHEN	1.0	70.	3.0D+02	1.5D+05	8.0D+01	4.0D+04	3.0D+01	1.5D+04
LEBER	1.0	50.	1.9D+02	9.3D+04	4.8D+01	2.4D+04	1.9D+01	9.4D+03
LEBER	1.0	70.	1.9D+02	9.3D+04	4.8D+01	2.4D+04	1.9D+01	9.4D+03

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	6.3D-04
KNOCHEN	70.Y	6.3D-04
LEBER	50.Y	4.0D-04
LEBER	70.Y	4.0D-04

URAN-233

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION (ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT (JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	6.6D-01	3.3D+02	4.0D+01	2.0D+04	4.0D+02	2.0D+05
LUNGE	0.3	70.	6.6D-01	3.3D+02	4.0D+01	2.0D+04	4.0D+02	2.0D+05
LYMPHGEBE	0.3	50.	1.3D-01	6.6D+01	3.3D+00	1.7D+03	4.2D+02	2.1D+05
LYMPHGEBE	0.3	70.	1.3D-01	6.6D+01	3.3D+00	1.7D+03	5.2D+02	2.6D+05
KNOCHEN	0.3	50.	2.3D+02	1.2D+05	6.1D+01	3.1D+04	3.4D+01	1.7D+04
KNOCHEN	0.3	70.	2.3D+02	1.2D+05	6.1D+01	3.1D+04	3.4D+01	1.7D+04
LEBER	0.3	50.	1.3D+02	6.5D+04	3.4D+01	1.7D+04	1.9D+01	9.4D+03
LEBER	0.3	70.	1.3D+02	6.5D+04	3.4D+01	1.7D+04	1.9D+01	9.4D+03

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT (JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	4.6D-01	2.3D+02	2.8D+01	1.4D+04	2.8D+02	1.4D+05
LUNGE	1.0	70.	4.6D-01	2.3D+02	2.8D+01	1.4D+04	2.8D+02	1.4D+05
LYMPHGEBE	1.0	50.	9.2D-02	4.6D+01	2.3D+00	1.2D+03	2.9D+02	1.5D+05
LYMPHGEBE	1.0	70.	9.2D-02	4.6D+01	2.3D+00	1.2D+03	3.6D+02	1.8D+05
KNOCHEN	1.0	50.	2.4D+02	1.2D+05	6.1D+01	3.1D+04	2.5D+01	1.2D+04
KNOCHEN	1.0	70.	2.4D+02	1.2D+05	6.1D+01	3.1D+04	2.5D+01	1.2D+04
LEBER	1.0	50.	1.3D+02	6.5D+04	3.4D+01	1.7D+04	1.4D+01	6.9D+03
LEBER	1.0	70.	1.3D+02	6.5D+04	3.4D+01	1.7D+04	1.4D+01	6.9D+03

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	5.0D-04
KNOCHEN	70.Y	5.0D-04
LEBER	50.Y	2.8D-04
LEBER	70.Y	2.8D-04

URAN-234

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION(AEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	6.6D-01	3.3D+02	4.0D+01	2.0D+04	3.9D+02	2.0D+05
LUNGE	0.3	70.	6.6D-01	3.3D+02	4.0D+01	2.0D+04	3.9D+02	2.0D+05
LYMPHGEBE	0.3	50.	1.3D-01	6.6D+01	3.3D+00	1.6D+03	4.2D+02	2.1D+05
LYMPHGEBE	0.3	70.	1.3D-01	6.6D+01	3.3D+00	1.6D+03	5.1D+02	2.6D+05
KNOCHEN	0.3	50.	2.3D+02	1.2D+05	6.1D+01	3.1D+04	3.3D+01	1.7D+04
KNOCHEN	0.3	70.	2.3D+02	1.2D+05	6.1D+01	3.1D+04	3.3D+01	1.7D+04
LEBER	0.3	50.	1.3D+02	6.4D+04	3.4D+01	1.7D+04	1.9D+01	9.3D+03
LEBER	0.3	70.	1.3D+02	6.4D+04	3.4D+01	1.7D+04	1.9D+01	9.3D+03

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	4.6D-01	2.3D+02	2.8D+01	1.4D+04	2.7D+02	1.4D+05
LUNGE	1.0	70.	4.6D-01	2.3D+02	2.8D+01	1.4D+04	2.7D+02	1.4D+05
LYMPHGEBE	1.0	50.	9.1D-02	4.6D+01	2.3D+00	1.1D+03	2.9D+02	1.4D+05
LYMPHGEBE	1.0	70.	9.1D-02	4.6D+01	2.3D+00	1.1D+03	3.6D+02	1.8D+05
KNOCHEN	1.0	50.	2.3D+02	1.2D+05	6.1D+01	3.0D+04	2.5D+01	1.2D+04
KNOCHEN	1.0	70.	2.3D+02	1.2D+05	6.1D+01	3.0D+04	2.5D+01	1.2D+04
LEBER	1.0	50.	1.3D+02	6.5D+04	3.4D+01	1.7D+04	1.4D+01	6.8D+03
LEBER	1.0	70.	1.3D+02	6.5D+04	3.4D+01	1.7D+04	1.4D+01	6.8D+03

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	4.9D-04
KNOCHEN	70.Y	4.9D-04
LEBER	50.Y	2.7D-04
LEBER	70.Y	2.7D-04

URAN-235

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION (ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	6.1D-01	3.0D+02	3.7D+01	1.9D+04	3.6D+02	1.8D+05
LUNGE	0.3	70.	6.1D-01	3.0D+02	3.7D+01	1.9D+04	3.6D+02	1.8D+05
LYMPHGEWEBE	0.3	50.	1.2D-01	6.1D+01	3.0D+00	1.5D+03	3.8D+02	1.9D+05
LYMPHGEWEBE	0.3	70.	1.2D-01	6.1D+01	3.0D+00	1.5D+03	4.8D+02	2.4D+05
KNOCHEN	0.3	50.	2.1D+02	1.1D+05	5.4D+01	2.7D+04	3.1D+01	1.5D+04
KNOCHEN	0.3	70.	2.1D+02	1.1D+05	5.4D+01	2.7D+04	3.1D+01	1.5D+04
LEBER	0.3	50.	1.2D+02	5.9D+04	3.0D+01	1.5D+04	1.7D+01	8.5D+03
LEBER	0.3	70.	1.2D+02	5.9D+04	3.0D+01	1.5D+04	1.7D+01	8.5D+03

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	4.2D-01	2.1D+02	2.6D+01	1.3D+04	2.5D+02	1.3D+05
LUNGE	1.0	70.	4.2D-01	2.1D+02	2.6D+01	1.3D+04	2.5D+02	1.3D+05
LYMPHGEWEBE	1.0	50.	8.5D-02	4.2D+01	2.1D+00	1.1D+03	2.7D+02	1.3D+05
LYMPHGEWEBE	1.0	70.	8.5D-02	4.2D+01	2.1D+00	1.1D+03	3.3D+02	1.7D+05
KNOCHEN	1.0	50.	2.2D+02	1.1D+05	5.5D+01	2.7D+04	2.3D+01	1.1D+04
KNOCHEN	1.0	70.	2.2D+02	1.1D+05	5.5D+01	2.7D+04	2.3D+01	1.1D+04
LEBER	1.0	50.	1.2D+02	5.9D+04	3.0D+01	1.5D+04	1.2D+01	6.2D+03
LEBER	1.0	70.	1.2D+02	5.9D+04	3.0D+01	1.5D+04	1.2D+01	6.2D+03

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	4.6D-04
KNOCHEN	70.Y	4.6D-04
LEBER	50.Y	2.5D-04
LEBER	70.Y	2.5D-04

URAN-236

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION(ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	6.2D-01	3.1D+02	3.8D+01	1.9D+04	3.7D+02	1.8D+05
LUNGE	0.3	70.	6.2D-01	3.1D+02	3.8D+01	1.9D+04	3.7D+02	1.8D+05
LYMPHGEBE	0.3	50.	1.2D-01	6.2D+01	3.1D+00	1.5D+03	3.9D+02	2.0D+05
LYMPHGEBE	0.3	70.	1.2D-01	6.2D+01	3.1D+00	1.5D+03	4.8D+02	2.4D+05
KNOCHEN	0.3	50.	2.2D+02	1.1D+05	5.5D+01	2.8D+04	3.2D+01	1.6D+04
KNOCHEN	0.3	70.	2.2D+02	1.1D+05	5.5D+01	2.8D+04	3.2D+01	1.6D+04
LEBER	0.3	50.	1.2D+02	6.0D+04	3.1D+01	1.5D+04	1.7D+01	8.7D+03
LEBER	0.3	70.	1.2D+02	6.0D+04	3.1D+01	1.5D+04	1.7D+01	8.7D+03

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	4.3D-01	2.1D+02	2.6D+01	1.3D+04	2.6D+02	1.3D+05
LUNGE	1.0	70.	4.3D-01	2.1D+02	2.6D+01	1.3D+04	2.6D+02	1.3D+05
LYMPHGEBE	1.0	50.	8.6D-02	4.3D+01	2.1D+00	1.1D+03	2.7D+02	1.4D+05
LYMPHGEBE	1.0	70.	8.6D-02	4.3D+01	2.1D+00	1.1D+03	3.4D+02	1.7D+05
KNOCHEN	1.0	50.	2.2D+02	1.1D+05	5.6D+01	2.8D+04	2.3D+01	1.2D+04
KNOCHEN	1.0	70.	2.2D+02	1.1D+05	5.6D+01	2.8D+04	2.3D+01	1.2D+04
LEBER	1.0	50.	1.2D+02	6.1D+04	3.1D+01	1.5D+04	1.3D+01	6.4D+03
LEBER	1.0	70.	1.2D+02	6.1D+04	3.1D+01	1.5D+04	1.3D+01	6.4D+03

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	4.6D-04
KNOCHEN	70.Y	4.6D-04
LEBER	50.Y	2.6D-04
LEBER	70.Y	2.6D-04

URAN-237

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION(ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	2.9D-04	1.4D-01	4.1D-04	2.0D-01	4.1D-04	2.0D-01
LUNGE	0.3	70.	2.9D-04	1.4D-01	4.1D-04	2.0D-01	4.1D-04	2.0D-01
LYMPHGEWEBE	0.3	50.	2.1D-05	1.0D-02	1.3D-07	6.3D-05	1.9D-07	9.3D-05
LYMPHGEWEBE	0.3	70.	2.1D-05	1.0D-02	1.3D-07	6.3D-05	2.2D-07	1.1D-04
KNOCHEN	0.3	50.	1.3D-04	6.4D-02	2.6D-05	1.3D-02	8.4D-07	4.2D-04
KNOCHEN	0.3	70.	1.3D-04	6.4D-02	2.6D-05	1.3D-02	8.4D-07	4.2D-04
LEBER	0.3	50.	6.8D-05	3.4D-02	1.4D-05	7.1D-03	4.5D-07	2.3D-04
LEBER	0.3	70.	6.8D-05	3.4D-02	1.4D-05	7.1D-03	4.5D-07	2.3D-04

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	2.0D-04	1.0D-01	2.8D-04	1.4D-01	2.8D-04	1.4D-01
LUNGE	1.0	70.	2.0D-04	1.0D-01	2.8D-04	1.4D-01	2.8D-04	1.4D-01
LYMPHGEWEBE	1.0	50.	1.4D-05	7.2D-03	8.7D-08	4.4D-05	1.3D-07	6.5D-05
LYMPHGEWEBE	1.0	70.	1.4D-05	7.2D-03	8.7D-08	4.4D-05	1.5D-07	7.7D-05
KNOCHEN	1.0	50.	1.7D-04	8.6D-02	3.9D-05	2.0D-02	2.1D-06	1.1D-03
KNOCHEN	1.0	70.	1.7D-04	8.6D-02	3.9D-05	2.0D-02	2.1D-06	1.1D-03
LEBER	1.0	50.	9.2D-05	4.6D-02	2.1D-05	1.1D-02	1.1D-06	5.7D-04
LEBER	1.0	70.	9.2D-05	4.6D-02	2.1D-05	1.1D-02	1.1D-06	5.7D-04

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	6.9D-12
KNOCHEN	70.Y	6.9D-12
LEBER	50.Y	3.7D-12
LEBER	70.Y	3.7D-12

URAN-238

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION(ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	5.8D-01	2.9D+02	3.5D+01	1.8D+04	3.5D+02	1.7D+05
LUNGE	0.3	70.	5.8D-01	2.9D+02	3.5D+01	1.8D+04	3.5D+02	1.7D+05
LYMPHGeweBE	0.3	50.	1.2D-01	5.8D+01	2.9D+00	1.4D+03	3.6D+02	1.8D+05
LYMPHGeweBE	0.3	70.	1.2D-01	5.8D+01	2.9D+00	1.4D+03	4.5D+02	2.3D+05
KNOCHEN	0.3	50.	2.0D+02	1.0D+05	5.1D+01	2.6D+04	2.9D+01	1.5D+04
KNOCHEN	0.3	70.	2.0D+02	1.0D+05	5.1D+01	2.6D+04	2.9D+01	1.5D+04
LEBER	0.3	50.	1.1D+02	5.6D+04	2.8D+01	1.4D+04	1.6D+01	8.1D+03
LEBER	0.3	70.	1.1D+02	5.6D+04	2.8D+01	1.4D+04	1.6D+01	8.1D+03

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	4.0D-01	2.0D+02	2.4D+01	1.2D+04	2.4D+02	1.2D+05
LUNGE	1.0	70.	4.0D-01	2.0D+02	2.4D+01	1.2D+04	2.4D+02	1.2D+05
LYMPHGeweBE	1.0	50.	8.0D-02	4.0D+01	2.0D+00	1.0D+03	2.5D+02	1.3D+05
LYMPHGeweBE	1.0	70.	8.0D-02	4.0D+01	2.0D+00	1.0D+03	3.1D+02	1.6D+05
KNOCHEN	1.0	50.	2.1D+02	1.0D+05	5.2D+01	2.6D+04	2.2D+01	1.1D+04
KNOCHEN	1.0	70.	2.1D+02	1.0D+05	5.2D+01	2.6D+04	2.2D+01	1.1D+04
LEBER	1.0	50.	1.1D+02	5.7D+04	2.9D+01	1.4D+04	1.2D+01	6.0D+03
LEBER	1.0	70.	1.1D+02	5.7D+04	2.9D+01	1.4D+04	1.2D+01	6.0D+03

- 96 -

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	4.3D-04
KNOCHEN	70.Y	4.3D-04
LEBER	50.Y	2.4D-04
LEBER	70.Y	2.4D-04

NEPTUNIUM-235-KETTE

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*H\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION (ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	1.2D-12	6.0D-10	6.4D-09	3.2D-06	3.2D-07	1.6D-04
LUNGE	0.3	70.	1.2D-12	6.0D-10	6.4D-09	3.2D-06	3.2D-07	1.6D-04
LYMPHGEBE	0.3	50.	2.4D-13	1.2D-10	5.3D-10	2.7D-07	3.3D-07	1.6D-04
LYMPHGEBE	0.3	70.	2.4D-13	1.2D-10	5.3D-10	2.7D-07	4.1D-07	2.0D-04
KNOCHEN	0.3	50.	1.1D-05	5.7D-03	2.6D-06	1.3D-03	3.7D-07	1.8D-04
KNOCHEN	0.3	70.	1.5D-05	7.6D-03	3.4D-06	1.7D-03	4.9D-07	2.5D-04
LEBER	0.3	50.	5.0D-06	2.5D-03	1.1D-06	5.6D-04	1.6D-07	8.1D-05
LEBER	0.3	70.	6.1D-06	3.0D-03	1.4D-06	6.9D-04	2.0D-07	9.9D-05

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	8.3D-13	4.2D-10	4.4D-09	2.2D-06	2.2D-07	1.1D-04
LUNGE	1.0	70.	8.3D-13	4.2D-10	4.4D-09	2.2D-06	2.2D-07	1.1D-04
LYMPHGEBE	1.0	50.	1.7D-13	8.3D-11	3.7D-10	1.8D-07	2.3D-07	1.1D-04
LYMPHGEBE	1.0	70.	1.7D-13	8.3D-11	3.7D-10	1.8D-07	2.8D-07	1.4D-04
KNOCHEN	1.0	50.	1.2D-05	5.8D-03	2.7D-06	1.4D-03	3.2D-07	1.6D-04
KNOCHEN	1.0	70.	1.5D-05	7.6D-03	3.6D-06	1.8D-03	4.3D-07	2.2D-04
LEBER	1.0	50.	5.0D-06	2.5D-03	1.2D-06	5.9D-04	1.4D-07	7.1D-05
LEBER	1.0	70.	6.1D-06	3.1D-03	1.4D-06	7.2D-04	1.7D-07	8.7D-05

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	2.3D-11
KNOCHEN	70.Y	3.0D-11
LEBER	50.Y	1.1D-11
LEBER	70.Y	1.3D-11

NEPTUNIUM-236-KETTE

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION(ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	2.3D-03	1.1D+00	2.5D+00	1.2D+03	1.7D+02	8.4D+04
LUNGE	0.3	70.	2.3D-03	1.1D+00	2.5D+00	1.2D+03	1.7D+02	8.4D+04
LYMPHGeweBE	0.3	50.	4.6D-04	2.3D-01	2.0D-01	9.9D+01	4.8D+01	2.4D+04
LYMPHGeweBE	0.3	70.	4.6D-04	2.3D-01	2.0D-01	9.9D+01	4.8D+01	2.4D+04
KNOCHEN	0.3	50.	2.8D+04	1.4D+07	7.1D+03	3.6D+06	3.7D+03	1.9D+06
KNOCHEN	0.3	70.	3.8D+04	1.9D+07	9.6D+03	4.8D+06	5.2D+03	2.6D+06
LEBER	0.3	50.	3.5D+04	1.7D+07	8.8D+03	4.4D+06	4.7D+03	2.3D+06
LEBER	0.3	70.	4.3D+04	2.2D+07	1.1D+04	5.4D+06	6.0D+03	3.0D+06

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	1.6D-03	7.9D-01	1.7D+00	8.7D+02	1.2D+02	5.8D+04
LUNGE	1.0	70.	1.6D-03	7.9D-01	1.7D+00	8.7D+02	1.2D+02	5.8D+04
LYMPHGeweBE	1.0	50.	3.2D-04	1.6D-01	1.4D-01	6.9D+01	3.3D+01	1.7D+04
LYMPHGeweBE	1.0	70.	3.2D-04	1.6D-01	1.4D-01	6.9D+01	3.4D+01	1.7D+04
KNOCHEN	1.0	50.	2.9D+04	1.4D+07	7.2D+03	3.6D+06	2.7D+03	1.4D+06
KNOCHEN	1.0	70.	3.8D+04	1.9D+07	9.7D+03	4.8D+06	3.8D+03	1.9D+06
LEBER	1.0	50.	3.5D+04	1.8D+07	8.8D+03	4.4D+06	3.4D+03	1.7D+06
LEBER	1.0	70.	4.4D+04	2.2D+07	1.1D+04	5.5D+06	4.4D+03	2.2D+06

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	6.0D-02
KNOCHEN	70.Y	8.1D-02
LEBER	50.Y	7.4D-02
LEBER	70.Y	9.2D-02

NEPTUNIUM-237-KETTE

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION (ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	6.6D-01	3.3D+02	4.0D+01	2.0D+04	3.9D+02	2.0D+05
LUNGE	0.3	70.	6.6D-01	3.3D+02	4.0D+01	2.0D+04	3.9D+02	2.0D+05
LYMPHGeweBE	0.3	50.	1.3D-01	6.6D+01	3.3D+00	1.6D+03	4.2D+02	2.1D+05
LYMPHGeweBE	0.3	70.	1.3D-01	6.6D+01	3.3D+00	1.6D+03	5.1D+02	2.6D+05
KNOCHEN	0.3	50.	8.3D+03	4.1D+06	2.1D+03	1.0D+06	1.1D+03	5.5D+05
KNOCHEN	0.3	70.	1.1D+04	5.4D+06	2.7D+03	1.4D+06	1.5D+03	7.4D+05
LEBER	0.3	50.	3.6D+03	1.8D+06	9.2D+02	4.6D+05	4.9D+02	2.5D+05
LEBER	0.3	70.	4.4D+03	2.2D+06	1.1D+03	5.5D+05	6.1D+02	3.1D+05

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	4.6D-01	2.3D+02	2.8D+01	1.4D+04	2.7D+02	1.4D+05
LUNGE	1.0	70.	4.6D-01	2.3D+02	2.8D+01	1.4D+04	2.7D+02	1.4D+05
LYMPHGeweBE	1.0	50.	9.1D-02	4.6D+01	2.3D+00	1.1D+03	2.9D+02	1.4D+05
LYMPHGeweBE	1.0	70.	9.1D-02	4.6D+01	2.3D+00	1.1D+03	3.6D+02	1.8D+05
KNOCHEN	1.0	50.	8.3D+03	4.2D+06	2.1D+03	1.0D+06	8.1D+02	4.0D+05
KNOCHEN	1.0	70.	1.1D+04	5.5D+06	2.8D+03	1.4D+06	1.1D+03	5.5D+05
LEBER	1.0	50.	3.7D+03	1.8D+06	9.2D+02	4.6D+05	3.6D+02	1.8D+05
LEBER	1.0	70.	4.4D+03	2.2D+06	1.1D+03	5.6D+05	4.5D+02	2.3D+05

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	1.8D-02
KNOCHEN	70.Y	2.3D-02
LEBER	50.Y	7.7D-03
LEBER	70.Y	9.3D-03

NEPTUNIUM-237

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION(ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	7.6D-01	3.8D+02	4.6D+01	2.3D+04	4.6D+02	2.3D+05
LUNGE	0.3	70.	7.6D-01	3.8D+02	4.6D+01	2.3D+04	4.6D+02	2.3D+05
LYMPHGEBE	0.3	50.	1.5D-01	7.6D+01	3.8D+00	1.9D+03	4.8D+02	2.4D+05
LYMPHGEBE	0.3	70.	1.5D-01	7.6D+01	3.8D+00	1.9D+03	6.0D+02	3.0D+05
KNOCHEN	0.3	50.	9.5D+03	4.7D+06	2.4D+03	1.2D+06	1.3D+03	6.3D+05
KNOCHEN	0.3	70.	1.2D+04	6.2D+06	3.1D+03	1.6D+06	1.7D+03	8.5D+05
LEBER	0.3	50.	4.2D+03	2.1D+06	1.1D+03	5.3D+05	5.7D+02	2.8D+05
LEBER	0.3	70.	5.1D+03	2.5D+06	1.3D+03	6.4D+05	7.1D+02	3.5D+05

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	5.3D-01	2.6D+02	3.2D+01	1.6D+04	3.2D+02	1.6D+05
LUNGE	1.0	70.	5.3D-01	2.6D+02	3.2D+01	1.6D+04	3.2D+02	1.6D+05
LYMPHGEBE	1.0	50.	1.1D-01	5.3D+01	2.6D+00	1.3D+03	3.3D+02	1.7D+05
LYMPHGEBE	1.0	70.	1.1D-01	5.3D+01	2.6D+00	1.3D+03	4.1D+02	2.1D+05
KNOCHEN	1.0	50.	9.6D+03	4.8D+06	2.4D+03	1.2D+06	9.3D+02	4.6D+05
KNOCHEN	1.0	70.	1.3D+04	6.3D+06	3.2D+03	1.6D+06	1.3D+03	6.3D+05
LEBER	1.0	50.	4.2D+03	2.1D+06	1.1D+03	5.3D+05	4.2D+02	2.1D+05
LEBER	1.0	70.	5.1D+03	2.6D+06	1.3D+03	6.5D+05	5.2D+02	2.6D+05

1  
100  
1

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	2.0D-02
KNOCHEN	70.Y	2.6D-02
LEBER	50.Y	8.9D-03
LEBER	70.Y	1.1D-02

NEPTUNIUM-238

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION (ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	2.4D-03	1.2D+00	1.2D-02	5.8D+00	3.8D-02	1.9D+01
LUNGE	0.3	70.	2.4D-03	1.2D+00	1.2D-02	5.8D+00	3.8D-02	1.9D+01
LYMPHGEWEBE	0.3	50.	3.9D-04	1.9D-01	2.6D-04	1.3D-01	2.8D-02	1.4D+01
LYMPHGEWEBE	0.3	70.	3.9D-04	1.9D-01	2.6D-04	1.3D-01	3.2D-02	1.6D+01
KNOCHEN	0.3	50.	4.3D-01	2.1D+02	3.6D-02	1.8D+01	1.8D-03	8.9D-01
KNOCHEN	0.3	70.	5.2D-01	2.6D+02	4.4D-02	2.2D+01	2.2D-03	1.1D+00
LEBER	0.3	50.	1.9D-01	9.6D+01	1.6D-02	8.2D+00	8.0D-04	4.0D-01
LEBER	0.3	70.	2.2D-01	1.1D+02	1.9D-02	9.4D+00	9.2D-04	4.6D-01

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	1.7D-03	8.3D-01	8.1D-03	4.0D+00	2.7D-02	1.3D+01
LUNGE	1.0	70.	1.7D-03	8.3D-01	8.1D-03	4.0D+00	2.7D-02	1.3D+01
LYMPHGEWEBE	1.0	50.	2.7D-04	1.3D-01	1.8D-04	9.2D-02	1.9D-02	9.6D+00
LYMPHGEWEBE	1.0	70.	2.7D-04	1.3D-01	1.8D-04	9.2D-02	2.3D-02	1.1D+01
KNOCHEN	1.0	50.	4.6D-01	2.3D+02	6.7D-02	3.4D+01	4.3D-03	2.2D+00
KNOCHEN	1.0	70.	5.7D-01	2.8D+02	8.3D-02	4.1D+01	5.3D-03	2.7D+00
LEBER	1.0	50.	2.1D-01	1.0D+02	3.0D-02	1.5D+01	2.0D-03	9.7D-01
LEBER	1.0	70.	2.4D-01	1.2D+02	3.5D-02	1.7D+01	2.3D-03	1.1D+00

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	1.0D-06
KNOCHEN	70.Y	1.3D-06
LEBER	50.Y	5.0D-07
LEBER	70.Y	5.8D-07

NEPTUNIUM-239

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION(AEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	1.4D-03	7.1D-01	5.6D-03	2.8D+00	5.8D-03	2.9D+00
LUNGE	0.3	70.	1.4D-03	7.1D-01	5.6D-03	2.8D+00	5.8D-03	2.9D+00
LYMPHGEBE	0.3	50.	2.4D-04	1.2D-01	1.7D-05	8.7D-03	5.7D-06	2.9D-03
LYMPHGEBE	0.3	70.	2.4D-04	1.2D-01	1.7D-05	8.7D-03	5.7D-06	2.9D-03
KNOCHEN	0.3	50.	4.2D-03	2.1D+00	5.2D-04	2.6D-01	1.7D-05	8.3D-03
KNOCHEN	0.3	70.	4.2D-03	2.1D+00	5.2D-04	2.6D-01	1.7D-05	8.3D-03
LEBER	0.3	50.	2.2D-03	1.1D+00	2.8D-04	1.4D-01	8.9D-06	4.5D-03
LEBER	0.3	70.	2.2D-03	1.1D+00	2.8D-04	1.4D-01	8.9D-06	4.5D-03

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	9.9D-04	5.0D-01	3.9D-03	2.0D+00	4.1D-03	2.0D+00
LUNGE	1.0	70.	9.9D-04	5.0D-01	3.9D-03	2.0D+00	4.1D-03	2.0D+00
LYMPHGEBE	1.0	50.	1.6D-04	8.2D-02	1.2D-05	6.0D-03	4.0D-06	2.0D-03
LYMPHGEBE	1.0	70.	1.6D-04	8.2D-02	1.2D-05	6.0D-03	4.0D-06	2.0D-03
KNOCHEN	1.0	50.	4.4D-03	2.2D+00	7.5D-04	3.7D-01	4.0D-05	2.0D-02
KNOCHEN	1.0	70.	4.4D-03	2.2D+00	7.5D-04	3.7D-01	4.0D-05	2.0D-02
LEBER	1.0	50.	2.4D-03	1.2D+00	4.0D-04	2.0D-01	2.2D-05	1.1D-02
LEBER	1.0	70.	2.4D-03	1.2D+00	4.0D-04	2.0D-01	2.2D-05	1.1D-02

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	9.4D-10
KNOCHEN	70.Y	9.4D-10
LEBER	50.Y	5.1D-10
LEBER	70.Y	5.1D-10

PLUTONIUM-236

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION(ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	8.0D-01	4.0D+02	4.6D+01	2.3D+04	3.4D+02	1.7D+05
LUNGE	0.3	70.	8.0D-01	4.0D+02	4.6D+01	2.3D+04	3.4D+02	1.7D+05
LYMPHGeweBE	0.3	50.	1.6D-01	7.9D+01	3.6D+00	1.8D+03	1.1D+02	5.5D+04
LYMPHGeweBE	0.3	70.	1.6D-01	7.9D+01	3.6D+00	1.8D+03	1.1D+02	5.6D+04
KNOCHEN	0.3	50.	2.9D+03	1.5D+06	7.0D+02	3.5D+05	1.8D+02	9.1D+04
KNOCHEN	0.3	70.	3.4D+03	1.7D+06	8.2D+02	4.1D+05	2.2D+02	1.1D+05
LEBER	0.3	50.	3.9D+03	2.0D+06	9.5D+02	4.7D+05	2.5D+02	1.2D+05
LEBER	0.3	70.	4.5D+03	2.2D+06	1.1D+03	5.4D+05	2.9D+02	1.4D+05

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	5.5D-01	2.8D+02	3.2D+01	1.6D+04	2.4D+02	1.2D+05
LUNGE	1.0	70.	5.5D-01	2.8D+02	3.2D+01	1.6D+04	2.4D+02	1.2D+05
LYMPHGeweBE	1.0	50.	1.1D-01	5.5D+01	2.5D+00	1.3D+03	7.6D+01	3.8D+04
LYMPHGeweBE	1.0	70.	1.1D-01	5.5D+01	2.5D+00	1.3D+03	7.8D+01	3.9D+04
KNOCHEN	1.0	50.	2.9D+03	1.5D+06	7.2D+02	3.6D+05	1.4D+02	7.2D+04
KNOCHEN	1.0	70.	3.4D+03	1.7D+06	8.4D+02	4.2D+05	1.7D+02	8.5D+04
LEBER	1.0	50.	4.0D+03	2.0D+06	9.7D+02	4.8D+05	1.9D+02	9.7D+04
LEBER	1.0	70.	4.5D+03	2.3D+06	1.1D+03	5.5D+05	2.3D+02	1.1D+05

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	6.0D-03
KNOCHEN	70.Y	7.0D-03
LEBER	50.Y	8.3D-03
LEBER	70.Y	9.5D-03

PLUTONIUM-238

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*H\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION(ATEHRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	7.6D-01	3.8D+02	4.6D+01	2.3D+04	4.5D+02	2.2D+05
LUNGE	0.3	70.	7.6D-01	3.8D+02	4.6D+01	2.3D+04	4.5D+02	2.2D+05
LYMPHGEWEBE	0.3	50.	1.5D-01	7.6D+01	3.8D+00	1.9D+03	4.2D+02	2.1D+05
LYMPHGEWEBE	0.3	70.	1.5D-01	7.6D+01	3.8D+00	1.9D+03	4.9D+02	2.5D+05
KNOCHEN	0.3	50.	7.9D+03	4.0D+06	2.0D+03	1.0D+06	1.0D+03	5.2D+05
KNOCHEN	0.3	70.	9.8D+03	4.9D+06	2.5D+03	1.2D+06	1.3D+03	6.5D+05
LEBER	0.3	50.	3.6D+03	1.8D+06	9.0D+02	4.5D+05	4.7D+02	2.4D+05
LEBER	0.3	70.	4.1D+03	2.1D+06	1.0D+03	5.2D+05	5.6D+02	2.8D+05

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	5.3D-01	2.6D+02	3.2D+01	1.6D+04	3.1D+02	1.6D+05
LUNGE	1.0	70.	5.3D-01	2.6D+02	3.2D+01	1.6D+04	3.1D+02	1.6D+05
LYMPHGEWEBE	1.0	50.	1.1D-01	5.3D+01	2.6D+00	1.3D+03	2.9D+02	1.5D+05
LYMPHGEWEBE	1.0	70.	1.1D-01	5.3D+01	2.6D+00	1.3D+03	3.4D+02	1.7D+05
KNOCHEN	1.0	50.	8.0D+03	4.0D+06	2.0D+03	1.0D+06	7.6D+02	3.8D+05
KNOCHEN	1.0	70.	9.9D+03	4.9D+06	2.5D+03	1.2D+06	9.7D+02	4.8D+05
LEBER	1.0	50.	3.6D+03	1.8D+06	9.1D+02	4.5D+05	3.5D+02	1.7D+05
LEBER	1.0	70.	4.2D+03	2.1D+06	1.0D+03	5.2D+05	4.1D+02	2.1D+05

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	1.7D-02
KNOCHEN	70.Y	2.1D-02
LEBER	50.Y	7.6D-03
LEBER	70.Y	8.7D-03

PLUTONIUM-239

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION(ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	7.1D-01	3.5D+02	4.3D+01	2.1D+04	4.2D+02	2.1D+05
LUNGE	0.3	70.	7.1D-01	3.5D+02	4.3D+01	2.1D+04	4.2D+02	2.1D+05
LYMPHGEBE	0.3	50.	1.4D-01	7.1D+01	3.5D+00	1.8D+03	4.5D+02	2.2D+05
LYMPHGEBE	0.3	70.	1.4D-01	7.1D+01	3.5D+00	1.8D+03	5.5D+02	2.8D+05
KNOCHEN	0.3	50.	9.0D+03	4.5D+06	2.3D+03	1.1D+06	1.2D+03	6.0D+05
KNOCHEN	0.3	70.	1.2D+04	5.9D+06	3.0D+03	1.5D+06	1.6D+03	8.1D+05
LEBER	0.3	50.	3.9D+03	1.9D+06	9.8D+02	4.9D+05	5.3D+02	2.6D+05
LEBER	0.3	70.	4.7D+03	2.4D+06	1.2D+03	6.0D+05	6.6D+02	3.3D+05

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	4.9D-01	2.5D+02	3.0D+01	1.5D+04	2.9D+02	1.5D+05
LUNGE	1.0	70.	4.9D-01	2.5D+02	3.0D+01	1.5D+04	2.9D+02	1.5D+05
LYMPHGEBE	1.0	50.	9.8D-02	4.9D+01	2.5D+00	1.2D+03	3.1D+02	1.6D+05
LYMPHGEBE	1.0	70.	9.8D-02	4.9D+01	2.5D+00	1.2D+03	3.8D+02	1.9D+05
KNOCHEN	1.0	50.	9.1D+03	4.6D+06	2.3D+03	1.1D+06	8.9D+02	4.4D+05
KNOCHEN	1.0	70.	1.2D+04	6.0D+06	3.0D+03	1.5D+06	1.2D+03	6.0D+05
LEBER	1.0	50.	3.9D+03	2.0D+06	9.9D+02	5.0D+05	3.9D+02	1.9D+05
LEBER	1.0	70.	4.8D+03	2.4D+06	1.2D+03	6.0D+05	4.8D+02	2.4D+05

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	1.9D-02
KNOCHEN	70.Y	2.5D-02
LEBER	50.Y	8.3D-03
LEBER	70.Y	1.0D-02

PLUTONIUM-240

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION (ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT (JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	7.1D-01	3.5D+02	4.3D+01	2.1D+04	4.2D+02	2.1D+05
LUNGE	0.3	70.	7.1D-01	3.5D+02	4.3D+01	2.1D+04	4.2D+02	2.1D+05
LYMPHGEBE	0.3	50.	1.4D-01	7.1D+01	3.5D+00	1.8D+03	4.5D+02	2.2D+05
LYMPHGEBE	0.3	70.	1.4D-01	7.1D+01	3.5D+00	1.8D+03	5.5D+02	2.8D+05
KNOCHEN	0.3	50.	9.0D+03	4.5D+06	2.3D+03	1.1D+06	1.2D+03	6.0D+05
KNOCHEN	0.3	70.	1.2D+04	5.9D+06	3.0D+03	1.5D+06	1.6D+03	8.1D+05
LEBER	0.3	50.	3.9D+03	1.9D+06	9.8D+02	4.9D+05	5.3D+02	2.6D+05
LEBER	0.3	70.	4.7D+03	2.4D+06	1.2D+03	5.9D+05	6.6D+02	3.3D+05

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT (JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	4.9D-01	2.5D+02	3.0D+01	1.5D+04	2.9D+02	1.5D+05
LUNGE	1.0	70.	4.9D-01	2.5D+02	3.0D+01	1.5D+04	2.9D+02	1.5D+05
LYMPHGEBE	1.0	50.	9.8D-02	4.9D+01	2.5D+00	1.2D+03	3.1D+02	1.5D+05
LYMPHGEBE	1.0	70.	9.8D-02	4.9D+01	2.5D+00	1.2D+03	3.8D+02	1.9D+05
KNOCHEN	1.0	50.	9.1D+03	4.6D+06	2.3D+03	1.1D+06	8.8D+02	4.4D+05
KNOCHEN	1.0	70.	1.2D+04	6.0D+06	3.0D+03	1.5D+06	1.2D+03	6.0D+05
LEBER	1.0	50.	3.9D+03	2.0D+06	9.9D+02	4.9D+05	3.9D+02	1.9D+05
LEBER	1.0	70.	4.8D+03	2.4D+06	1.2D+03	6.0D+05	4.8D+02	2.4D+05

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	1.9D-02
KNOCHEN	70.Y	2.5D-02
LEBER	50.Y	8.3D-03
LEBER	70.Y	1.0D-02

PLUTONIUM-241

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION (ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	7.9D-05	3.9D-02	1.9D-02	9.4D+00	1.3D+00	6.7D+02
LUNGE	0.3	70.	7.9D-05	3.9D-02	1.9D-02	9.4D+00	1.3D+00	6.7D+02
LYMPHGEBE	0.3	50.	1.6D-05	7.9D-03	1.6D-03	7.8D-01	1.3D+00	6.7D+02
LYMPHGEBE	0.3	70.	1.6D-05	7.9D-03	1.6D-03	7.8D-01	1.6D+00	8.2D+02
KNOCHEN	0.3	50.	1.9D+02	9.3D+04	4.6D+01	2.3D+04	2.0D+01	9.9D+03
KNOCHEN	0.3	70.	2.8D+02	1.4D+05	6.9D+01	3.4D+04	3.0D+01	1.5D+04
LEBER	0.3	50.	7.7D+01	3.8D+04	1.9D+01	9.6D+03	8.3D+00	4.2D+03
LEBER	0.3	70.	1.0D+02	5.2D+04	2.6D+01	1.3D+04	1.2D+01	5.8D+03

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	5.5D-05	2.7D-02	1.3D-02	6.6D+00	9.4D-01	4.7D+02
LUNGE	1.0	70.	5.5D-05	2.7D-02	1.3D-02	6.6D+00	9.4D-01	4.7D+02
LYMPHGEBE	1.0	50.	1.1D-05	5.5D-03	1.1D-03	5.4D-01	9.3D-01	4.7D+02
LYMPHGEBE	1.0	70.	1.1D-05	5.5D-03	1.1D-03	5.4D-01	1.1D+00	5.7D+02
KNOCHEN	1.0	50.	1.9D+02	9.4D+04	4.7D+01	2.3D+04	1.5D+01	7.4D+03
KNOCHEN	1.0	70.	2.6D+02	1.4D+05	7.0D+01	3.5D+04	2.3D+01	1.1D+04
LEBER	1.0	50.	7.8D+01	3.9D+04	1.9D+01	9.7D+03	6.2D+00	3.1D+03
LEBER	1.0	70.	1.0D+02	5.2D+04	2.6D+01	1.3D+04	8.7D+00	4.3D+03

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	3.9D-04
KNOCHEN	70.Y	5.8D-04
LEBER	50.Y	1.6D-04
LEBER	70.Y	2.2D-04

PLUTONIUM-242

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION (ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT (JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	6.8D-01	3.4D+02	4.1D+01	2.1D+04	4.1D+02	2.0D+05
LUNGE	0.3	70.	6.8D-01	3.4D+02	4.1D+01	2.1D+04	4.1D+02	2.0D+05
LYMPHGEBE	0.3	50.	1.4D-01	6.8D+01	3.4D+00	1.7D+03	4.3D+02	2.1D+05
LYMPHGEBE	0.3	70.	1.4D-01	6.8D+01	3.4D+00	1.7D+03	5.3D+02	2.7D+05
KNOCHEN	0.3	50.	8.5D+03	4.2D+06	2.1D+03	1.1D+06	1.1D+03	5.6D+05
KNOCHEN	0.3	70.	1.1D+04	5.6D+06	2.8D+03	1.4D+06	1.5D+03	7.6D+05
LEBER	0.3	50.	3.8D+03	1.9D+06	9.5D+02	4.7D+05	5.1D+02	2.5D+05
LEBER	0.3	70.	4.6D+03	2.3D+06	1.1D+03	5.7D+05	6.3D+02	3.2D+05

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT (JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	4.7D-01	2.4D+02	2.9D+01	1.4D+04	2.8D+02	1.4D+05
LUNGE	1.0	70.	4.7D-01	2.4D+02	2.9D+01	1.4D+04	2.8D+02	1.4D+05
LYMPHGEBE	1.0	50.	9.5D-02	4.7D+01	2.4D+00	1.2D+03	3.0D+02	1.5D+05
LYMPHGEBE	1.0	70.	9.5D-02	4.7D+01	2.4D+00	1.2D+03	3.7D+02	1.8D+05
KNOCHEN	1.0	50.	8.6D+03	4.3D+06	2.2D+03	1.1D+06	8.3D+02	4.1D+05
KNOCHEN	1.0	70.	1.1D+04	5.6D+06	2.8D+03	1.4D+06	1.1D+03	5.6D+05
LEBER	1.0	50.	3.8D+03	1.9D+06	9.5D+02	4.8D+05	3.7D+02	1.9D+05
LEBER	1.0	70.	4.6D+03	2.3D+06	1.2D+03	5.8D+05	4.7D+02	2.3D+05

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	1.8D-02
KNOCHEN	70.Y	2.4D-02
LEBER	50.Y	8.0D-03
LEBER	70.Y	9.7D-03

AMERICIUM-241

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION(ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	7.6D-01	3.8D+02	4.6D+01	2.3D+04	4.5D+02	2.3D+05
LUNGE	0.3	70.	7.6D-01	3.8D+02	4.6D+01	2.3D+04	4.5D+02	2.3D+05
LYMPHGEBE	0.3	50.	1.5D-01	7.6D+01	3.8D+00	1.9D+03	4.7D+02	2.3D+05
LYMPHGEBE	0.3	70.	1.5D-01	7.6D+01	3.8D+00	1.9D+03	5.7D+02	2.8D+05
KNOCHEN	0.3	50.	9.1D+03	4.6D+06	2.3D+03	1.1D+06	1.2D+03	6.0D+05
KNOCHEN	0.3	70.	1.2D+04	5.9D+06	3.0D+03	1.5D+06	1.6D+03	8.0D+05
LEBER	0.3	50.	4.0D+03	2.0D+06	1.0D+03	5.1D+05	5.4D+02	2.7D+05
LEBER	0.3	70.	4.8D+03	2.4D+06	1.2D+03	6.1D+05	6.7D+02	3.4D+05

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	5.3D-01	2.6D+02	3.2D+01	1.6D+04	3.1D+02	1.6D+05
LUNGE	1.0	70.	5.3D-01	2.6D+02	3.2D+01	1.6D+04	3.1D+02	1.6D+05
LYMPHGEBE	1.0	50.	1.1D-01	5.3D+01	2.6D+00	1.3D+03	3.2D+02	1.6D+05
LYMPHGEBE	1.0	70.	1.1D-01	5.3D+01	2.6D+00	1.3D+03	4.0D+02	2.0D+05
KNOCHEN	1.0	50.	9.2D+03	4.6D+06	2.3D+03	1.2D+06	8.9D+02	4.5D+05
KNOCHEN	1.0	70.	1.2D+04	6.0D+06	3.0D+03	1.5D+06	1.2D+03	5.9D+05
LEBER	1.0	50.	4.1D+03	2.0D+06	1.0D+03	5.1D+05	4.0D+02	2.0D+05
LEBER	1.0	70.	4.9D+03	2.4D+06	1.2D+03	6.2D+05	4.9D+02	2.5D+05

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	1.9D-02
KNOCHEN	70.Y	2.5D-02
LEBER	50.Y	8.6D-03
LEBER	70.Y	1.0D-02

AMERICIUM-242

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION (ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	2.8D-03	1.4D+00	1.6D-01	8.1D+01	5.2D-01	2.6D+02
LUNGE	0.3	70.	2.8D-03	1.4D+00	1.6D-01	8.1D+01	5.2D-01	2.6D+02
LYMPHGEBE	0.3	50.	4.5D-04	2.2D-01	1.0D-02	5.0D+00	3.6D-02	1.8D+01
LYMPHGEBE	0.3	70.	4.5D-04	2.2D-01	1.0D-02	5.0D+00	3.6D-02	1.8D+01
KNOCHEN	0.3	50.	4.7D-01	2.4D+02	6.5D-02	3.2D+01	2.7D-03	1.3D+00
KNOCHEN	0.3	70.	4.7D-01	2.4D+02	6.5D-02	3.2D+01	2.7D-03	1.3D+00
LEBER	0.3	50.	2.5D-01	1.3D+02	3.5D-02	1.7D+01	1.4D-03	7.1D-01
LEBER	0.3	70.	2.5D-01	1.3D+02	3.5D-02	1.7D+01	1.4D-03	7.1D-01

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	1.9D-03	9.7D-01	1.1D-01	5.6D+01	3.6D-01	1.8D+02
LUNGE	1.0	70.	1.9D-03	9.7D-01	1.1D-01	5.6D+01	3.6D-01	1.8D+02
LYMPHGEBE	1.0	50.	3.1D-04	1.5D-01	7.0D-03	3.5D+00	2.5D-02	1.3D+01
LYMPHGEBE	1.0	70.	3.1D-04	1.5D-01	7.0D-03	3.5D+00	2.5D-02	1.3D+01
KNOCHEN	1.0	50.	5.9D-01	2.9D+02	1.1D-01	5.5D+01	6.6D-03	3.3D+00
KNOCHEN	1.0	70.	5.9D-01	2.9D+02	1.1D-01	5.5D+01	6.6D-03	3.3D+00
LEBER	1.0	50.	3.2D-01	1.6D+02	5.9D-02	3.0D+01	3.6D-03	1.8D+00
LEBER	1.0	70.	3.2D-01	1.6D+02	5.9D-02	3.0D+01	3.6D-03	1.8D+00

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	1.5D-06
KNOCHEN	70.Y	1.5D-06
LEBER	50.Y	8.3D-07
LEBER	70.Y	8.3D-07

AMERICIUM-242M

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION(ATEHRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	7.1D-01	3.6D+02	4.3D+01	2.2D+04	4.2D+02	2.1D+05
LUNGE	0.3	70.	7.1D-01	3.6D+02	4.3D+01	2.2D+04	4.2D+02	2.1D+05
LYMPHGEBE	0.3	50.	1.4D-01	7.1D+01	3.6D+00	1.8D+03	4.2D+02	2.1D+05
LYMPHGEBE	0.3	70.	1.4D-01	7.1D+01	3.6D+00	1.8D+03	5.0D+02	2.5D+05
KNOCHEN	0.3	50.	8.0D+03	4.0D+06	2.0D+03	1.0D+06	1.1D+03	5.3D+05
KNOCHEN	0.3	70.	1.0D+04	5.1D+06	2.6D+03	1.3D+06	1.4D+03	6.9D+05
LEBER	0.3	50.	3.6D+03	1.8D+06	9.0D+02	4.5D+05	4.8D+02	2.4D+05
LEBER	0.3	70.	4.2D+03	2.1D+06	1.1D+03	5.3D+05	5.8D+02	2.9D+05

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	4.9D-01	2.5D+02	3.0D+01	1.5D+04	2.9D+02	1.5D+05
LUNGE	1.0	70.	4.9D-01	2.5D+02	3.0D+01	1.5D+04	2.9D+02	1.5D+05
LYMPHGEBE	1.0	50.	9.9D-02	4.9D+01	2.5D+00	1.2D+03	2.9D+02	1.4D+05
LYMPHGEBE	1.0	70.	9.9D-02	4.9D+01	2.5D+00	1.2D+03	3.5D+02	1.7D+05
KNOCHEN	1.0	50.	8.1D+03	4.1D+06	2.0D+03	1.0D+06	7.8D+02	3.9D+05
KNOCHEN	1.0	70.	1.0D+04	5.1D+06	2.6D+03	1.3D+06	1.0D+03	5.1D+05
LEBER	1.0	50.	3.6D+03	1.8D+06	9.1D+02	4.5D+05	3.5D+02	1.8D+05
LEBER	1.0	70.	4.2D+03	2.1D+06	1.1D+03	5.3D+05	4.2D+02	2.1D+05

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	1.7D-02
KNOCHEN	70.Y	2.2D-02
LEBER	50.Y	7.6D-03
LEBER	70.Y	8.9D-03

AMERICIUM-243

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION(ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	7.3D-01	3.6D+02	4.4D+01	2.2D+04	4.4D+02	2.2D+05
LUNGE	0.3	70.	7.3D-01	3.6D+02	4.4D+01	2.2D+04	4.4D+02	2.2D+05
LYMPHGeweBE	0.3	50.	1.5D-01	7.3D+01	3.6D+00	1.8D+03	4.6D+02	2.3D+05
LYMPHGeweBE	0.3	70.	1.5D-01	7.3D+01	3.6D+00	1.8D+03	5.7D+02	2.8D+05
KNOCHEN	0.3	50.	9.1D+03	4.5D+06	2.3D+03	1.1D+06	1.2D+03	6.0D+05
KNOCHEN	0.3	70.	1.2D+04	6.0D+06	3.0D+03	1.5D+06	1.6D+03	8.2D+05
LEBER	0.3	50.	4.0D+03	2.0D+06	1.0D+03	5.0D+05	5.4D+02	2.7D+05
LEBER	0.3	70.	4.9D+03	2.4D+06	1.2D+03	6.1D+05	6.8D+02	3.4D+05

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	5.0D-01	2.5D+02	3.1D+01	1.5D+04	3.0D+02	1.5D+05
LUNGE	1.0	70.	5.0D-01	2.5D+02	3.1D+01	1.5D+04	3.0D+02	1.5D+05
LYMPHGeweBE	1.0	50.	1.0D-01	5.0D+01	2.5D+00	1.3D+03	3.2D+02	1.6D+05
LYMPHGeweBE	1.0	70.	1.0D-01	5.0D+01	2.5D+00	1.3D+03	3.9D+02	2.0D+05
KNOCHEN	1.0	50.	9.2D+03	4.6D+06	2.3D+03	1.2D+06	8.9D+02	4.5D+05
KNOCHEN	1.0	70.	1.2D+04	6.0D+06	3.0D+03	1.5D+06	1.2D+03	6.0D+05
LEBER	1.0	50.	4.0D+03	2.0D+06	1.0D+03	5.1D+05	4.0D+02	2.0D+05
LEBER	1.0	70.	4.9D+03	2.4D+06	1.2D+03	6.2D+05	5.0D+02	2.5D+05

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	1.9D-02
KNOCHEN	70.Y	2.5D-02
LEBER	50.Y	8.5D-03
LEBER	70.Y	1.0D-02

CURIUM-242

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION (ATEMRADE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	8.4D-01	4.2D+02	3.9D+01	2.0D+04	1.3D+02	6.3D+04
LUNGE	0.3	70.	8.4D-01	4.2D+02	3.9D+01	2.0D+04	1.3D+02	6.3D+04
LYMPHGEWEBE	0.3	50.	1.7D-01	8.4D+01	2.5D+00	1.2D+03	1.0D+01	5.2D+03
LYMPHGEWEBE	0.3	70.	1.7D-01	8.4D+01	2.5D+00	1.2D+03	1.1D+01	5.3D+03
KNOCHEN	0.3	50.	2.0D+02	1.0D+05	4.2D+01	2.1D+04	3.2D+00	1.6D+03
KNOCHEN	0.3	70.	2.1D+02	1.0D+05	4.4D+01	2.2D+04	3.4D+00	1.7D+03
LEBER	0.3	50.	1.1D+02	5.3D+04	2.2D+01	1.1D+04	1.7D+00	8.6D+02
LEBER	0.3	70.	1.1D+02	5.4D+04	2.3D+01	1.1D+04	1.8D+00	8.8D+02

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	5.8D-01	2.9D+02	2.7D+01	1.4D+04	8.8D+01	4.4D+04
LUNGE	1.0	70.	5.8D-01	2.9D+02	2.7D+01	1.4D+04	8.8D+01	4.4D+04
LYMPHGEWEBE	1.0	50.	1.2D-01	5.8D+01	1.7D+00	8.6D+02	7.2D+00	3.6D+03
LYMPHGEWEBE	1.0	70.	1.2D-01	5.8D+01	1.7D+00	8.6D+02	7.4D+00	3.7D+03
KNOCHEN	1.0	50.	2.0D+02	1.0D+05	4.5D+01	2.2D+04	3.4D+00	1.7D+03
KNOCHEN	1.0	70.	2.1D+02	1.1D+05	4.7D+01	2.3D+04	3.6D+00	1.8D+03
LEBER	1.0	50.	1.1D+02	5.4D+04	2.4D+01	1.2D+04	1.8D+00	9.1D+02
LEBER	1.0	70.	1.1D+02	5.5D+04	2.4D+01	1.2D+04	1.9D+00	9.3D+02

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	3.7D-04
KNOCHEN	70.Y	3.9D-04
LEBER	50.Y	2.0D-04
LEBER	70.Y	2.1D-04

CURIUM-243

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION (ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	8.00-01	4.00+02	4.90+01	2.40+04	4.60+02	2.30+05
LUNGE	0.3	70.	8.00-01	4.00+02	4.90+01	2.40+04	4.60+02	2.30+05
LYMPHGEBE	0.3	50.	1.60-01	8.00+01	4.00+00	2.00+03	3.60+02	1.80+05
LYMPHGEBE	0.3	70.	1.60-01	8.00+01	4.00+00	2.00+03	3.90+02	1.90+05
KNOCHEN	0.3	50.	6.20+03	3.10+06	1.50+03	7.70+05	7.70+02	3.80+05
KNOCHEN	0.3	70.	7.00+03	3.50+06	1.70+03	8.70+05	8.90+02	4.40+05
LEBER	0.3	50.	2.80+03	1.40+06	7.10+02	3.60+05	3.60+02	1.80+05
LEBER	0.3	70.	3.10+03	1.50+06	7.70+02	3.90+05	3.90+02	2.00+05

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	5.60-01	2.80+02	3.40+01	1.70+04	3.20+02	1.60+05
LUNGE	1.0	70.	5.60-01	2.80+02	3.40+01	1.70+04	3.20+02	1.60+05
LYMPHGEBE	1.0	50.	1.10-01	5.60+01	2.80+00	1.40+03	2.50+02	1.20+05
LYMPHGEBE	1.0	70.	1.10-01	5.60+01	2.80+00	1.40+03	2.70+02	1.30+05
KNOCHEN	1.0	50.	6.20+03	3.10+06	1.60+03	7.80+05	5.70+02	2.80+05
KNOCHEN	1.0	70.	7.00+03	3.50+06	1.80+03	8.80+05	6.60+02	3.30+05
LEBER	1.0	50.	2.90+03	1.40+06	7.20+02	3.60+05	2.60+02	1.30+05
LEBER	1.0	70.	3.10+03	1.60+06	7.80+02	3.90+05	2.90+02	1.50+05

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	1.30-02
KNOCHEN	70.Y	1.50-02
LEBER	50.Y	6.00-03
LEBER	70.Y	6.50-03

CURIUM-244

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION (ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	8.0D-01	4.0D+02	4.8D+01	2.4D+04	4.5D+02	2.2D+05
LUNGE	0.3	70.	8.0D-01	4.0D+02	4.8D+01	2.4D+04	4.5D+02	2.2D+05
LYMPHGEBE	0.3	50.	1.6D-01	8.0D+01	3.9D+00	2.0D+03	3.0D+02	1.5D+05
LYMPHGEBE	0.3	70.	1.6D-01	8.0D+01	3.9D+00	2.0D+03	3.1D+02	1.5D+05
KNOCHEN	0.3	50.	4.7D+03	2.4D+06	1.2D+03	5.9D+05	5.6D+02	2.8D+05
KNOCHEN	0.3	70.	5.1D+03	2.5D+06	1.3D+03	6.3D+05	6.1D+02	3.0D+05
LEBER	0.3	50.	2.2D+03	1.1D+06	5.6D+02	2.8D+05	2.7D+02	1.3D+05
LEBER	0.3	70.	2.3D+03	1.2D+06	5.9D+02	2.9D+05	2.8D+02	1.4D+05

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	5.6D-01	2.8D+02	3.4D+01	1.7D+04	3.1D+02	1.5D+05
LUNGE	1.0	70.	5.6D-01	2.8D+02	3.4D+01	1.7D+04	3.1D+02	1.5D+05
LYMPHGEBE	1.0	50.	1.1D-01	5.6D+01	2.7D+00	1.4D+03	2.1D+02	1.0D+05
LYMPHGEBE	1.0	70.	1.1D-01	5.6D+01	2.7D+00	1.4D+03	2.2D+02	1.1D+05
KNOCHEN	1.0	50.	4.8D+03	2.4D+06	1.2D+03	6.0D+05	4.2D+02	2.1D+05
KNOCHEN	1.0	70.	5.1D+03	2.6D+06	1.3D+03	6.4D+05	4.5D+02	2.3D+05
LEBER	1.0	50.	2.3D+03	1.1D+06	5.7D+02	2.8D+05	2.0D+02	9.9D+04
LEBER	1.0	70.	2.4D+03	1.2D+06	5.9D+02	3.0D+05	2.1D+02	1.0D+05

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	1.0D-02
KNOCHEN	70.Y	1.1D-02
LEBER	50.Y	4.7D-03
LEBER	70.Y	4.9D-03

CURIUM-245

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION(ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	7.4D-01	3.7D+02	4.5D+01	2.3D+04	4.4D+02	2.2D+05
LUNGE	0.3	70.	7.4D-01	3.7D+02	4.5D+01	2.3D+04	4.4D+02	2.2D+05
LYMPHGEBE	0.3	50.	1.5D-01	7.4D+01	3.7D+00	1.9D+03	4.7D+02	2.3D+05
LYMPHGEBE	0.3	70.	1.5D-01	7.4D+01	3.7D+00	1.9D+03	5.8D+02	2.9D+05
KNOCHEN	0.3	50.	9.5D+03	4.8D+06	2.4D+03	1.2D+06	1.3D+03	6.3D+05
KNOCHEN	0.3	70.	1.3D+04	6.3D+06	3.2D+03	1.6D+06	1.7D+03	8.6D+05
LEBER	0.3	50.	4.1D+03	2.0D+06	1.0D+03	5.1D+05	5.5D+02	2.8D+05
LEBER	0.3	70.	4.9D+03	2.5D+06	1.2D+03	6.2D+05	6.9D+02	3.4D+05

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	5.1D-01	2.6D+02	3.1D+01	1.6D+04	3.1D+02	1.5D+05
LUNGE	1.0	70.	5.1D-01	2.6D+02	3.1D+01	1.6D+04	3.1D+02	1.5D+05
LYMPHGEBE	1.0	50.	1.0D-01	5.1D+01	2.6D+00	1.3D+03	3.2D+02	1.6D+05
LYMPHGEBE	1.0	70.	1.0D-01	5.1D+01	2.6D+00	1.3D+03	4.0D+02	2.0D+05
KNOCHEN	1.0	50.	9.7D+03	4.8D+06	2.4D+03	1.2D+06	9.3D+02	4.7D+05
KNOCHEN	1.0	70.	1.3D+04	6.3D+06	3.2D+03	1.6D+06	1.3D+03	6.3D+05
LEBER	1.0	50.	4.1D+03	2.1D+06	1.0D+03	5.2D+05	4.1D+02	2.0D+05
LEBER	1.0	70.	5.0D+03	2.5D+06	1.3D+03	6.3D+05	5.1D+02	2.5D+05

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	2.0D-02
KNOCHEN	70.Y	2.7D-02
LEBER	50.Y	8.7D-03
LEBER	70.Y	1.0D-02

CURIUM-246

DOSE-COMMITMENTS IN REM/MIKRO-CURIE UND G-FAKTOREN IN REM\*M\*\*3/CURIE\*SEC BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INHALATION (ATEMRATE=0.5 LITER/SEC)

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	0.3	50.	7.4D-01	3.7D+02	4.5D+01	2.3D+04	4.4D+02	2.2D+05
LUNGE	0.3	70.	7.4D-01	3.7D+02	4.5D+01	2.3D+04	4.4D+02	2.2D+05
LYMPHGEBE	0.3	50.	1.5D-01	7.4D+01	3.7D+00	1.9D+03	4.7D+02	2.3D+05
LYMPHGEBE	0.3	70.	1.5D-01	7.4D+01	3.7D+00	1.9D+03	5.8D+02	2.9D+05
KNOCHEN	0.3	50.	9.3D+03	4.6D+06	2.3D+03	1.2D+06	1.2D+03	6.1D+05
KNOCHEN	0.3	70.	1.2D+04	6.1D+06	3.1D+03	1.5D+06	1.7D+03	8.3D+05
LEBER	0.3	50.	4.1D+03	2.0D+06	1.0D+03	5.1D+05	5.5D+02	2.7D+05
LEBER	0.3	70.	4.9D+03	2.5D+06	1.2D+03	6.2D+05	6.9D+02	3.4D+05

ORGAN	AMAD (MIKRON)	INTEGRATIONS- ZEIT(JAHRE)	CLASS D		CLASS W		CLASS Y	
			DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR	DC	G-FAKTOR
LUNGE	1.0	50.	5.1D-01	2.6D+02	3.1D+01	1.6D+04	3.1D+02	1.5D+05
LUNGE	1.0	70.	5.1D-01	2.6D+02	3.1D+01	1.6D+04	3.1D+02	1.5D+05
LYMPHGEWEBE	1.0	50.	1.0D-01	5.1D+01	2.6D+00	1.3D+03	3.2D+02	1.6D+05
LYMPHGEWEBE	1.0	70.	1.0D-01	5.1D+01	2.6D+00	1.3D+03	4.0D+02	2.0D+05
KNOCHEN	1.0	50.	9.4D+03	4.7D+06	2.4D+03	1.2D+06	9.1D+02	4.5D+05
KNOCHEN	1.0	70.	1.2D+04	6.1D+06	3.1D+03	1.5D+06	1.2D+03	6.1D+05
LEBER	1.0	50.	4.1D+03	2.1D+06	1.0D+03	5.2D+05	4.1D+02	2.0D+05
LEBER	1.0	70.	5.0D+03	2.5D+06	1.3D+03	6.3D+05	5.1D+02	2.5D+05

DOSE-COMMITMENTS BEI EINMALIGER AUFNAHME DURCH INGESTION

ORGAN	ZEIT	DC
KNOCHEN	50.Y	2.0D-02
KNOCHEN	70.Y	2.6D-02
LEBER	50.Y	8.6D-03
LEBER	70.Y	1.0D-02

