

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

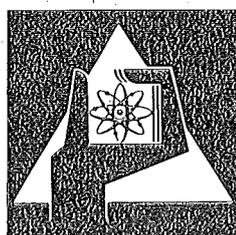
Dezember 1972

KFK 1615

Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit

Berechnung der Dosisfaktoren radiologisch wichtiger Nuklide

W. Comper



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

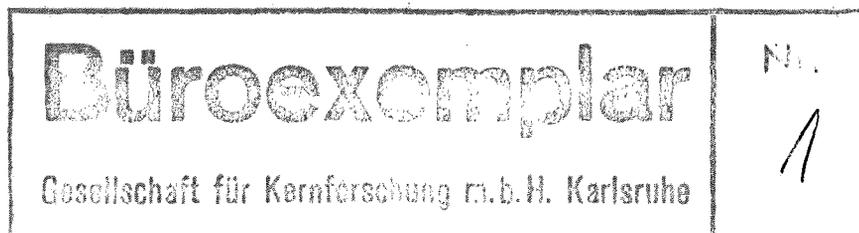
KFK 1615

Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit

Berechnung der Dosisfaktoren radiologisch
wichtiger Nuklide

von

W. Comper



Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

Zusammenfassung

In dem vorliegenden Bericht werden die Dosisfaktoren für die radiologisch wichtigsten Nuklide berechnet. Mit diesen Faktoren können bei Inkorporation von radioaktiven Stoffen die Organbelastungen einfach abgeschätzt werden. Die Submersionsdosisfaktoren erlauben eine Abschätzung der Ganzkörperbestrahlung.

Das zur Dosisberechnung angewandte Rechenverfahren sowie die dabei vorgenommenen vereinfachenden Annahmen werden dargestellt. Die Eingabedaten, die als Parameter in den Formalismus eingehen, werden kurz diskutiert.

Abstract

Calculation of the dose factor for the most important radionuclides

In the report, the dose factors are computed for the most important radionuclides. These factors can be used to estimate the radiation exposure doses to single organs caused by incorporation of radioactive materials. The submersion dose factor permits an estimate of the external dose to be made.

The equations employed for the dose calculation and the simplified assumptions are presented. The input data are briefly discussed.

28. September 1972

1. Einleitung

Bei Sicherheitsuntersuchungen für den Schutz der Bevölkerung wird die Strahlenbelastung unter Zuhilfenahme von Dosisfaktoren berechnet. Der Dosisfaktor stellt eine Beziehung her zwischen der Organdosis und dem Zeitintegral der Konzentration.

Bei Inkorporation von Radionukliden verteilen sich diese im allgemeinen auf mehrere Organe und führen so zu einer Organbelastung. Die Menge der in den Organen abgelagerten Aktivität wird durch das metabolische Verhalten der radioaktiven Stoffe bestimmt; von der Strahlungseigenschaft der Radionuklide hängt dann die Dosis ab.

Die biologischen und radiologischen Daten sind die Größen, die den Dosisfaktor bestimmen. Die Genauigkeit, mit der diese Größen bekannt sind, bestimmt die Güte des Dosisfaktors. Da die biologischen Daten altersabhängig sind, besteht auch eine Altersabhängigkeit des Dosisfaktors.

Da umfangreiche Versuche zur Erlangung von biologischen Daten durchgeführt werden, ist zu erwarten, daß die Zahlenwerte einiger biologischer Größen modifiziert werden müssen.

Im Gegensatz zu den unsicheren biologischen Eingabedaten sind die Rechenverfahren zur Dosisberechnung physikalisch gut fundiert. In diesem Bericht wird die Methode aufgezeigt, mit der die Dosisfaktoren bestimmt wurden. Die dabei angenommenen Vereinfachungen, wie z.B. homogene Aktivitätsverteilung im Organ sowie die Annahme einer effektiven Energie und Halbwertszeit, sind gute Approximationen.

2. Aktivitätsaufnahme in den Körper

Die Inkorporation radioaktiver Substanzen kann

- a) durch Inhalation
- b) durch Ingestion und
- c) durch Aufnahme über die Haut

erfolgen.

Zu a)

Die Resorption über den Atemtrakt ist vorwiegend bei Inhalation der Aerosole gegeben. Die Aufnahme radioaktiver Stoffe durch die Lunge ist von der Größe, Form und Dichte der Teilchen abhängig. Je nach Löslichkeit der inhalierten Substanz werden für die Rechnungen - nach den Empfehlungen der ICRP*-allgemeine Annahmen über die Verteilung der eingeatmeten radioaktiven Stoffe gemacht. Näheres über die Verteilung inhalierter radioaktiver Substanzen erfolgt in Abschnitt 5.

Zu b)

Die Resorption über den Magen-Darm-Trakt ist abhängig von der Löslichkeit der inkorporierten Substanz. Nach der Resorption kann eine Aufnahme durch die Körperflüssigkeit erfolgen. Die Verweilzeit im Blut ist kurz. Die unlöslichen Isotope belasten hauptsächlich den Magen-Darm-Trakt.

Zu c)

Die Aufnahme über die Haut ist gering¹⁾; bei β -Strahlern dürfte die direkte Bestrahlung an der Hautoberfläche der wichtige Faktor sein.

* ICRP International Commission on Radiological Protection

¹⁾ Mit Ausnahme von HTO

3. Verteilung der radioaktiven Stoffe im Körper

Während sich einige Nuklide fast gleichmässig im gesamten Körper verteilen, gibt es Nuklide, die sich bevorzugt in einzelnen Organen absetzen /1/. Eine selektive Anreicherung von Jod-Isotopen erfolgt z.B. in der Schilddrüse, während sich andere Nuklide bevorzugt in den Knochen ablagern.

Für ein bestimmtes radioaktives Nuklid wird dasjenige Organ, das infolge der Strahleneinwirkung die größte Schädigung des gesamten Organismus verursachen kann, als kritisches Organ bezeichnet; dies ist in fast allen Fällen das Organ, in dem die Konzentration des Nuklids am größten ist. Das metabolische Verhalten von löslichen und unlöslichen Verbindungen ist so verschieden, daß es notwendig ist, sie streng zu unterscheiden.

Der Transfer eines Radionuklids von einem Organ in die extrazelluläre Flüssigkeit und von da in ein anderes Organ oder Gewebe ist sehr von der Löslichkeit in wässrigen Substanzen abhängig. Abb. 1 zeigt ein Schema für den Metabolismus der inkorporierten Radionuklide.

3.1 Inhalation

Wasserlösliche Gase werden rasch aus der inhalierten Luft absorbiert und erscheinen innerhalb weniger Sekunden in der extrazellulären Flüssigkeit. Flüssige oder feste als Aerosole inhalierte Verbindungen zeigen entsprechend ihres physikalischen oder chemischen Verhaltens unterschiedliche Eigenschaften. Unlösliche Verbindungen werden viel langsamer aufgenommen und absorbiert; die Partikelgröße spielt hierbei eine wichtige Rolle.

Das inhalierte Material führt zu einer Strahlenbelastung

- 1.) der oberen Atemwege und der Lunge,
- 2.) des Magen-Darm-Traktes (MDT);
- 3.) der Organe, in welche die Nuklide durch den Blutstrom transportiert und abgelagert werden.

Tabelle 1 zeigt die Verteilung inhalierter radioaktiver Substanzen.

Tabelle 1 Verteilung inhalierter radioaktiver Substanzen

Verteilung	leicht lösliche Verbindungen	andere Verbindungen
ausgeatmet	25 %	25 %
abgelagert in oberen Atemwegen und später verschluckt	50 %	50 %
abgelagert in der Lunge	25 ^{a)} %	25 ^{b)} %

a) Diese 25 % werden in den Körper aufgenommen.

b) Von den 25 % wird die Hälfte von den Lungen abgeschieden und in den ersten 24 Stunden verschluckt. Damit werden 62,5 % verschluckt. Die verbleibenden 12,5 % werden in den Lungen mit einer Halbwertszeit von ca. 120 d festgehalten. Es wird angenommen, daß dieser Teil vom Körperwasser aufgenommen und zu den einzelnen Organen transportiert wird.

Die Tabelle 1 zeigt, daß lösliche Verbindungen nach der Inhalation entweder von der Lunge oder dem Darm in die extrazelluläre Flüssigkeit gelangen; unlösliche Verbindungen gehen nicht gleich in die extrazelluläre Flüssigkeit, sondern bleiben entweder lange in den Lungenalveolen oder gehen in den MDT und werden dort absorbiert oder ausgeschieden. Unlösliche Verbindungen gehen teilweise von den Alveolen in die Lymphknoten, verbleiben da lange Zeit oder werden sogar deponiert.

Eine besondere Belastung einzelner Organe ist dadurch gegeben, daß inkorporierte radioaktive Substanzen an bestimmten Stellen im Organ abgelagert werden. Beispiele davon sind die Bronchialepithel im Lungenbereich und die Osteoblasten bei den Knochen. Die Osteoblasten werden besonders stark be-

lastet, da die "knochensuchenden" Nuklide sehr oft α -Strahler sind. Die Schleimhäute der Bronchien und des MDT gelten ebenfalls als besonders strahlengefährdete Gewebeteile. Für die Berechnung der Inhalationsbelastung gilt, daß nur für β - und γ -Strahler die Dosis innerhalb der Grenzen des gesamten Lymphsystems gemittelt wird; bei α -Strahlern wird die Belastungsgrenze durch die lokale Belastung der Lymphknoten, Knochen und Schleimhäute festgelegt.

Als Regel für die Berechnung der Strahlenbelastung gilt, daß die Gesamtdosis eines kritischen Organs durch die resultierende Strahlung von allen im Körper abgelagerten Nukliden bestimmt wird.

3.2 Ingestion

Von den löslichen Substanzen diffundiert ein Großteil während der Passage durch den MDT in die extrazelluläre Flüssigkeit. Ein Bruchteil davon geht in das Blut über; der Faktor f_1 im Abschnitt 4.1 gibt den Anteil an.

Der nichtlösliche Anteil der radioaktiven Substanz wird über den MDT ausgeschieden. Das verschiedene individuelle Verhalten im Stoffwechsel des MDT erschwert die Dosisabschätzung in den einzelnen Bereichen des MDT.

3.3 Zeitliches Verhalten der Nuklide

Voraussetzung für die Abschätzung der Dosis im Organ ist die Kenntnis über die zeitliche Änderung der Aktivität A im Gewebe dieses Organs. Physikalische und biologische Prozesse bedingen den Aktivitätsgehalt im Organ.

$$(1) \quad \int_{t=0}^t A \, dt = A_0 \int_{t=0}^t f_R(t) f_B(t) \, dt$$

A_0 ist die Aktivität im Organ zur Zeit $t=0$.

Die Funktionen f_R und f_B beschreiben die radiologischen und biologischen Änderungen des Stoffes im Organ.

$f_R(t)$ ist für ein bestimmtes Nuklid eine Exponentialfunktion; für ein Gemisch von Nukliden kann man eine Summe von Exponentialfunktionen oder eine Potenzfunktion - wie z.B. die Way-Wigner-Gleichung - annehmen.

Für viele Radionuklide wird der biologische Abbau durch eine Serie von Exponentialfunktionen beschrieben, um verschiedene Komponenten des Abscheidens berücksichtigen zu können /2/. Meist wird der Hauptteil der Strahlenbelastung aber nur durch eine Komponente bedingt, und dies ist meistens der "long-term", der auch relativ genau festzustellen ist.

Für die Berechnung der zeitlichen Änderung der Belastung des kritischen Organs wird angenommen, daß die biologische Absonderung einem Exponentialgesetz gehorcht und die zugeführte Aktivität zeitlich konstant ist. Für die zeitliche Änderung der Aktivität im Organ gilt dann angenähert die Beziehung:

$$(2) \quad \frac{d(q f_2)}{dt} + \lambda_{\text{eff}}(q f_2) - P = 0$$

$q f_2$ ist die Belastung des kritischen Organs [Ci];

f_2 ist der Anteil der Belastung des kritischen Organs an der Belastung des gesamten Körpers;

λ_{eff} ist die effektive Zerfallskonstante [d^{-1}];

P ist die pro Zeiteinheit dem kritischen Organ zugeführte Aktivität. (Mit $A = (q f_2)$ und der Annahme, daß für $t=0$ auch $A=0$ ist, wird bei einer angenommenen konstanten Dauerzufuhr $P = \text{const}$) [Ci/d] .

$$(3) \quad A(t) = \frac{P}{\lambda_{\text{eff}}} (1 - e^{-\lambda_{\text{eff}} t})$$

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_R + \lambda_B$$

λ_R radioaktive Zerfallskonstante,
 λ_B biologische Ausscheidkonstante.

4. Berechnung der Organbelastung bei Inkorporation

Inkorporierte radioaktive Substanzen können sich entsprechend ihren chemischen Eigenschaften im Körper verschieden verteilen. Einzelne radioaktive Isotope werden in bestimmte Organe transportiert und dort bevorzugt abgelagert. Die emittierte α - oder β -Strahlung wird vollständig in diesen Organen absorbiert und führt in einem kleinen Bereich zu einer starken Belastung. Die Dosis der γ -Strahlung ist geringer, da die Reichweite der Strahlung und folglich auch das absorbierende Volumen größer ist.

Die Strahlenbelastung in einem Organ ist von folgenden Faktoren abhängig:

- 1.) Menge des aufgenommenen Nuklids,
- 2.) Art der emittierten Strahlung,
- 3.) Energie der Strahlung,
- 4.) effektive Halbwertszeit des Nuklids im Organ und Selektionsfaktor des Organs,
- 5.) Masse und Form des Organs,
- 6.) Verteilung der Aktivität im Körperorgan,
- 7.) chemische Zusammensetzung des inkorporierten Stoffes.

Bei einer Aktivität von A (in Ci) beträgt die Dosisleistung im Organ

$$(4) \quad \dot{D} = F \frac{A E_{\text{eff}}}{m} \quad \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

F = $5,92 \cdot 10^2 \frac{\text{g rad}}{\text{Ci MeV s}}$ (Umrechnungsfaktor)

m Masse des kritischen Organs in g;

E_{eff} effektive Energie in MeV;

$$E_{\text{eff}} = \sum_i E_i F_i Q^F$$

- E_i gesamte Energie, die pro Zerfall im kritischen Organ absorbiert wird;
- F_i Verhältnis der Zerfallsakte der Folgeprodukte i zu jenen des Mutternuklids;
- QF Qualitätsfaktor, der die Wirksamkeit der Strahlung charakterisiert.

Richtwerte für die effektive Energie findet man in /3/. In E_{eff} gehen Korrekturwerte ein, die die nichtvollständige Absorption von Strahlung in dem kritischen Organ sowie die ungleichmässige Verteilung des Nuklids im Organ berücksichtigen. Die Dosisleistung im kritischen Organ zur Zeit t bestimmt man bei einmaliger Aufnahme der Aktivität A (in Ci) in den Körper zur Zeit $t=0$ wie folgt:

$$(5) \quad \frac{dD}{dt} = 5,92 \cdot 10^2 \frac{f A E_{\text{eff}}}{m} e^{-\lambda_{\text{eff}} t} \quad \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

f Selektionsfaktor

Wird vom Zeitpunkt $t=0$ an dem Körper ständig Aktivität zugeführt, so berechnet man die Dosisleistung im kritischen Organ nach der Zeit t aus der Beziehung:

$$(6) \quad \frac{dD}{dt} = 5,92 \cdot 10^2 \frac{P E_{\text{eff}}}{m \lambda_{\text{eff}}} Z \quad \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

$$Z = 1 - e^{-\lambda_{\text{eff}} t};$$

$$T_{\text{eff}} = \frac{0,693}{\lambda_{\text{eff}}} \quad [\text{d}]$$

Bereits nach einer Zeit von ca. $3 T_{\text{eff}}$ werden 90 % des Maximalwertes der Dosisleistung erreicht, die im Gleichgewicht zu erwarten ist. Bei einem mittleren Lebensalter von 70 a ist nur für wenige Nuklide der altersabhängige Faktor Z zu berücksichtigen. Für Nuklide, bei denen $\lambda_{\text{eff}} t \gg 1$ ist, wird $Z=1$; die Belastung des kritischen Organs fällt dabei schon zu Lebzeiten der bestrahlten Person auf vernachlässigbar kleine Werte. Bei einigen knochensuchenden langlebigen Nukliden kann man aber annehmen, daß die im Körper aufgenommene Aktivität während des Lebens nicht abnimmt.

Die Aufnahmegeschwindigkeit der Aktivität in das kritische Organ ist durch die Gleichung (7) gegeben.

$$(7) \quad P = f S C(t)$$

$C(t)$ Konzentration des Nuklids in der Atemluft (Ci/m^3) bzw. in der dem Körper zugeführten Flüssigkeit oder der Nahrung (Ci/g);

S das tägliche Atemvolumen (m^3/d) bzw. der tägliche Flüssigkeitsbedarf oder die Nahrungsaufnahme pro Tag (g/d);

f der relative Anteil der Aktivität in der Atemluft bzw. der aufgenommenen Flüssigkeit oder Nahrung, der dem kritischen Organ zugeführt wird.

Erfolgt die Zufuhr der Aktivität mit konstanter Aufnahmegeschwindigkeit P , dann beträgt die Belastung des kritischen Organs nach einer Zeit t :

$$(8) \quad D = g \int_0^t C dt \quad [\text{rem}]$$

$$(9) \quad g = 8,55 \cdot 10^2 \frac{E_{\text{eff}} S f T_{\text{eff}}}{m} Z \quad \left[\frac{\text{rem m}^3}{\text{Ci sec}} \right]$$

Der Unterschied zwischen rem und rad ist für das folgende bedeutungslos.

4.1 Inhalation

Bei einem Standardmenschen von 70 kg Gewicht beträgt das mittlere Atemvolumen S_L 20 m³/d.

f_L ist der Bruchteil des inhalierten Radionuklids, der das kritische Organ erreicht.

Für unlösliche Stoffe setzt man für die Lunge $f_L = 0,12$.

Für lösliche Stoffe wird f_L in der Form

$f_L = (0,25 + 0,5 f_1) f_2'$ geschrieben (s. dazu die Erläuterungen in Abschnitt 5).

f_1 Bruchteil der Radionuklide, die vom Magen-Darm-Trakt zum Blut gehen;

f_2' Bruchteil der Radionuklide, die vom Blut zum kritischen Organ gehen;

Wenn f_2' nicht bekannt ist, wird f_2' durch f_2 ersetzt.

f_2 Verhältnis der Aktivität im Bezugsorgan zu derjenigen im Gesamtkörper.

Ist der Magen-Darm-Trakt das kritische Organ, dann wird für lösliche Substanzen $f_L = 0,5$ und für unlösliche Stoffe $f_L = 0,62$ gesetzt.

4.2 Ingestion (dargestellt für Wasseraufnahme)

Die tägliche Wasseraufnahme für den Standardmenschen beträgt etwa

$$S_W = 2 \text{ l/d.}$$

f_W Bruchteil des durch Wasseraufnahme inkorporierten Nuklids, der das kritische Organ erreicht.

Für lösliche Verbindungen ist

$$f_W = f_1 f_2'$$

$$f_2' \sim f_2.$$

Für Ingestion von unlöslichen Verbindungen ist ein Teil des Magen-Darm-Traktes (MDT) das kritische Organ.

Die Inkorporation über die Nahrungskette begrenzt bei einigen Nukliden die zulässige Aktivitätsabgabe.

Die Aufnahme durch die Nahrung infolge Ablagerung auf Gras und Gemüse und nachfolgender Inkorporation über die Milch oder andere Nahrungsmittel ist bei den Spaltprodukten Sr-90, J-131 und Cs-137 von besonderer Bedeutung.

Am Beispiel von J-131 soll aufgezeigt werden, daß die Organbelastung durch Ingestion um einige Zehnerpotenzen höher liegen kann als bei Inhalation. An diesem Beispiel wird zugleich dargestellt, daß der g-Faktor für Ingestion mit vielen unsicheren Faktoren behaftet ist und es deshalb zweckmäßig erscheint, je nach Bedarf die Belastung individuell zu berechnen.

Aus Messungen des Jodgehaltes in der Luft und in der Milch wird gefolgert, daß eine Luftkonzentration von 1 pCi/m^3 zu einer Milchkonzentration von 1200 pCi/l führen kann. Die Aufnahme dieser Milch durch Kleinkinder, die den kritischen Bevölkerungsteil für diese Belastung darstellen, führt dann zu einer erhöhten Belastung der Schilddrüse.

Ein Vergleich der Inhalationsdosis für Erwachsene und der Ingestionsdosis für Kleinkinder zeigt folgendes:

Inhalationsdosis für Erwachsene

$$(10) \quad \dot{D}_{\text{INH}} = \text{const.} \cdot \frac{E_{\text{eff}} \cdot S_{\text{L}} f_{\text{L}} \cdot T_{\text{eff}}}{m_{\text{E}}} C_{\text{L}}$$

Ingestionsdosis für Kleinkinder

$$(11) \quad \dot{D}_{\text{ING}} = \text{const.} \cdot \frac{E_{\text{eff}} \cdot S_{\text{ING}} f_{\text{N}} \cdot T_{\text{eff}}}{m_{\text{K}}} C_{\text{ING}}$$

C_L	Luftkonzentration	$[Ci/m^3]$
S_L	Atemrate	$[m^3/d]$
C_{ING}	Milchkonzentration	$[Ci/l]$
S_{ING}	Aufnahmerate der Milch	$[l/d]$
$m_E; m_K$	Masse der Schilddrüse für Erwachsene und Kinder	$[g]$

Es werden folgende Werte verwendet:

$$m_E = 20 \text{ g}$$

$$m_K = 1,8 \text{ g}$$

$$S_L = 20 \text{ m}^3/d$$

$$S_{ING} = 1 \text{ l/d}$$

$$C_L \cong 1200 C_{ING} \text{ (aus Messungen)}$$

$$f_L \cong f_N$$

Mit diesen Werten erhält man für das Verhältnis der Strahlenbelastung durch Ingestion (Kleinkinder) zu Inhalation (Erwachsene)

$$D_{ING} = 670 D_{INH}.$$

Die Organbelastung über die Nahrungskette ist also wesentlich höher als die über Inhalation.

Mit anderen Werten aus der Literatur kommt man zu Verhältnissen $\frac{D_{ING}}{D_{INH}}$ bis maximal 10^3 .

Ähnlich wie J-131 führen auch Sr-90 und Cs-137 bei Aufnahme über die Nahrungskette zu wesentlich höheren Organbelastungen als bei Inhalation.

Da die Ablagerungsprozesse der radioaktiven Stoffe aus der Atmosphäre sowie die chemischen und biologischen Vorgänge

in der Nahrungskette noch zu wenig erforscht sind, müssen die Rechnungen mit Daten durchgeführt werden, die mit großer Unsicherheit behaftet sind.

Es ist noch festzuhalten, daß die für die Berechnung der Ingestionsbelastung notwendigen Einzelfaktoren wegen der Altersabhängigkeit und der örtlich verschiedenen Ernährungsgewohnheiten zusätzlichen starken Streuungen unterworfen sind.

5. Äußere Ganzkörperbestrahlung

Bei Berechnung der äußeren Bestrahlung bedient man sich in erster Näherung des Submersionsmodells. Dabei wird angenommen, daß die umgebende Wolke im Halbraum unendlich ausgeht ist. In diesem Fall entspricht die in der Volumeneinheit absorbierte Energie der von diesem Volumen emittierten Energie. Die Gesamtkörperdosis (hier als Oberflächendosis verstanden) berechnet man aus der Gleichung:

$$D = 0,5 \cdot 0,540 \cdot E_{\text{eff}} \int C \, dt = g \int C \, dt$$

$$E_{\text{eff}} = E_{\text{eff}}^{\beta} + E_{\text{eff}}^{\gamma}$$

$$E_{\text{eff}}^{\beta} = \sum_K p_{\beta k} \cdot \overline{E_{\beta k}}$$

$$E_{\text{eff}}^{\gamma} = \sum_L p_{\gamma L} \cdot E_{\gamma L}$$

Der Faktor 0,5 berücksichtigt, daß die Strahlung nur aus dem Halbraum kommt; die Abschirmung der Körperteile ist dabei vernachlässigt.

$p_{\beta k}$; $p_{\gamma L}$ Zahl der pro Zerfall emittierten
 β - und γ -Teilchen

$\overline{E_{\beta k}}$ mittlere β -Energie der Energie K [MeV/Zerfall]

$E_{\gamma L}$ γ -Energie der Energie L [MeV/Zerfall]

$0,540 \left[\frac{\text{rad m}^3}{\text{Ci s}} \right]$ ist ein Umrechnungsfaktor.

$$g \cong 0,27 E_{\text{eff}}$$

Bei Berechnung der äußeren β -Belastung ist für E_{eff} nur der Wert für die β -Energie einzusetzen.

6. Diskussion der Eingabedaten

Die wesentlichen Berechnungsunterlagen für die Tabellen 4 und 5 waren die ICRP-Publikationen /3/. Die physikalischen Informationen entstammen im wesentlichen der Datensammlung des Reports von Coates und Horton /4/ sowie den Tabellen in /5/. Die in den Berichten /3/ angeführten biologischen und radiologischen Daten entsprechen zwar nicht mehr dem neuesten Stand; sie weisen aber eine sonst nirgends zu findende Vollständigkeit auf.

Die meisten hier benutzten biologischen Daten entstammen Tierversuchen, die dann auf den Menschen übertragen wurden, da das metabolische Verhalten für einige wesentliche Organe beim Menschen ähnlich ist. Neuere Untersuchungen /6/ zeigen zwar, daß biologische Faktoren wie z.B. Selektionsfaktoren und biologische Halbwertszeiten bei einigen radiologisch wesentlichen Nukliden einer Revision unterworfen werden sollten; aber diese Einzeluntersuchungen sind noch nicht allgemein anerkannt und müssen deshalb unberücksichtigt bleiben; so zeigen z.B. Experimente, daß für die radiologisch so wichtigen Elemente wie Jod und Strontium die Selektionsfaktoren um Faktoren zwischen 1,4 und 2 größer sind, als bisher angenommen wurde. Unterschiedlich festgelegte Atemraten bedingen weiter eine Streuung der g-Faktoren um etwa den Faktor 1,5; neuere Untersuchungen zeigen auch, daß bei Inhalation für unlösliche Stoffe der Lungenwert f_L bei 0,2 statt bei 0,12 liegt. Es gibt noch einige weitere Größen, die einer Revision bedürfen. Da die neuen Werte aber von der ICRP noch nicht akzeptiert sind, wurde in diesem Bericht mit den bisher empfohlenen Werten gerechnet.

Die zur Berechnung der Submersions-Dosisfaktoren benötigten β - und γ -Energien wurden aus /5/ entnommen, und für Edelgase und Halogene wurden daraus die effektiven Energien bestimmt; die so berechneten Energien unterscheiden sich bis zu 70 % von denen in /3/.

7. Ergebnisse

Die hier berechneten Dosisfaktoren wurden für die Altersgruppe der Erwachsenen bestimmt; für andere Altersklassen läßt sich durch Variation der Parameter m und S (m = Masse des Organs, S = Atemrate) der jeweilige Dosisfaktor leicht bestimmen. In der Tabelle 2 sind die dafür notwendigen Daten zusammengestellt.

Tabelle 2

Altersgruppe Organ	Erwachsene	Kleinkinder		
		1 Jahr	1/2 Jahr	neugeboren
	Masse des Organs in kg			
Fett	10	1,4	1,3	0,53
Knochen	7,0	0,7	0,46	0,23
Schilddrüse	0,02	0,0022	0,0018	0,0018
Körperwasser	43	6,2	5,4	2,3
gesamter Körper	70	10	8,8	3,7
Atemrate in m ³ /d	20	7,9	6,0	2,4

In Tabelle 3 sind für die einzelnen Nuklide der Selektionsfaktor f_a , die effektive Energie sowie die effektive Halbwertszeit für die verschiedenen Organe zusammengestellt.

In dieser Tabelle sind die Energien für die einzelnen Nuklide wie auch für die gesamte Zerfallskette angeführt. (Symbol E bezieht sich auf die Energie des Einzelnuklids; EK bezieht sich auf die Energie der gesamten Zerfallskette). Wenn einzelne Nuklide verzweigt zerfallen, dann sind für diese Nuklide die Kettenenergien für beide Zerfallsarten angegeben.

Die nach Gleichung (9) berechneten Inhalationsdosisfaktoren sind in Tabelle 4 zu finden; bei langlebigen Nukliden* sind diese Werte noch mit dem Faktor Z zu multiplizieren.

$$Z = 1 - e^{-\lambda_{\text{eff}} T}$$

$$T \cong 50 \text{ a}$$

Die Dosisfaktoren wurden für radiologisch wichtige Nuklide sowohl für das einzelne Nuklid wie auch für die gesamte Zerfallskette berechnet. Bei mehreren Zerfallsmöglichkeiten sind für ein Nuklid mehrere Dosisfaktoren in Tabelle 4 angeführt. Der resultierende Dosisfaktor für alle Zerfallsketten setzt sich dann aus den prozentualen Anteilen der einzelnen Faktoren zusammen. Am Beispiel von Sr-91 sei dies erläutert.

Der Dosisfaktor von Sr-91 z.B. für Knochen setzt sich aus den beiden Zerfallsketten, die je mit einer Häufigkeit von 59 % und 41 % auftreten, wie folgt zusammen:

$$1,47 \cdot 0,59 + 2,01 \cdot 0,41 = 1,693 \quad \left[\frac{\text{rem m}^3}{\text{Ci s}} \right]$$

Diese umständliche Darstellung ist notwendig, um aus den Werten in Tabelle 4 fallweise die Belastung von Organen berechnen zu können, in denen die kurze Verweildauer der radioaktiven Stoffe zu berücksichtigen ist.

Der Ingestionsdosisfaktor ist nicht in der Tabelle angeführt; man berechnet den Faktor nach der in Punkt 4.2 dargestellten Gleichung (11). Die in diese Gleichung eingehenden Parameter sind nur mit großer Unsicherheit bekannt und führen deshalb zu einer breiten Streuung der Dosisfaktoren; es ist deshalb zweckmäßig, sie für den einzelnen Fall gesondert zu berechnen.

* $T > 15 \text{ a}$

Der Submersionsdosisfaktor ist für Edelgase und Halogene in Tabelle 5 angeführt; in dieser Tabelle findet man auch die effektiven β - und γ -Energien für die einzelnen Nuklide; es ist daraus der Anteil der β - und γ -Strahlung an der Ganzkörperbelastung zu ersehen.

Literatur

- /1/ Report prepared for Committee II of the ICRP by the Task Group on Lung Dynamics Deposition and Retention Models for Internal Dosimetry.
Health Physics 12, 212 (1966)
- /2/ Health Physics Division Annual Progress Report 1966
Minoru Fujita, Health Phys. 22, 125 (1972)
- /3/ ICRP Publication 2, Report of Committee II 1959
ICRP Publication 10, Report of Committee IV 1968
ICRP Recommendations, Health Phys. 10, 363 (1968)
- /4/ Coates R.L. and N.R. Horton, A Radiological Safety
Analyses IDO - 17, 151 (1966)
- /5/ Lederer C.M. et. al., Table of Isotopes, John Wiley
and Sons, Inc. New York 1967
Morgan K.Z. et. al., Bibliography for Biological,
Mathematical and Physical Data.
Health Phys. 3, 115,(1960)
- /6/ Dolphin G.W. and I.S. Eve, Phys. in Med. Biol. 8, 193
(1963)
Snyder W.S., M.J. Cook et. al.
Health Phys. 10, 171 (1964)
Stara I.P. and N.S. Nelson, Health Phys. 20, 113 (1971)

Tabelle 3 Halbwertszeiten T_{eff} [d] und Energien E_{eff} [MeV] der Nuklide

Organ		Ganzk.	Knochen	Lunge		Leber	Nieren	Milz
Gew. (kg)		70	7	lösll.	unlösll.	1,7	0,3	0,15
Wasserstoff	f_a	1						
H-3	T	12						
	E	0,01						
Kohlenstoff	f_a	0,75	0,02					
C-14	T	10	40					
	E	0,054	0,27					
Phosphor	f_a	0,63	0,32			0,04		
P-32	T	13,5	14,1			8		
	E	0,069	3,5		0,69	0,69		
Mangan	f_a	0,3			0,12	0,07	0,02	
Mn-52	T	2,8			5,5	4,5	3,1	
	E	2,1			0,96	0,96		
Mn-54	T	16,1			86	23	6,6	
	E	0,51			0,23	0,23		
Mn-56	T	0,11			0,11	0,11	0,11	
	E	1,9			1,3	1,3	1,3	
Eisen	f_a	0,3	0,03	0,006	0,006	0,04		0,006
Fe-55	T	463	665	819	819	368		388
	E	0,0065	0,0065	0,0065	0,0065	0,0065		0,0065
Fe-59	T	42,7	43,9	44,5	44,5	41,7		41,9
	E	0,81		0,42	0,42	0,42		0,34
Kobalt	f_a	0,4			0,12	0,02		0,0005
Co-57	T	9,2			8,25	9,2		9,2
	E	0,09			0,053	0,053	0,045	0,045
Co-58M	T	0,37			0,38	0,37		0,37
	E	0,026			0,024	0,024	0,022	0,022
	EK	0,099			0,2	0,059	0,048	
Co-58	T	8,4			44,8	8,4		8,4
	E	0,073			0,18	0,035	0,026	0,026
Co-60	T	9,5			118	9,5		9,5
	E	1,5			0,72	0,72	0,56	0,56
Nickel	f_a	0,4	0,2		0,12	0,03		
Ni-59	T	667	800		120	500		
	E	0,0077	0,0077		0,0077	0,0077		
Ni-63	T	652	492		120	492		
	E	0,021	0,11		0,021	0,021		
Ni-65	T	0,11	0,11		0,11	0,11		
	E	1,4	5,3		1,2	1,2		

Tabelle 3 Fortsetzung

Organ	Gew. (kg)	Ganzk. 70	Knochen 7	Lunge		Leber 1,7	Nieren 0,3	Milz 0,15	Muskeln 30
				lösli. 1	unlösli.				
Brom	f _a	0,75			0,12				
Br-82	T	1,3			1,5				
	E	1,8			0,85				
Rubidium	f _a	0,75			0,12	0,04		0,03	0,34
Rb-86	T	13,2	15,1		16,6	14,4		13,2	
	E	0,7			0,66	0,66		0,66	0,7
Rb-87	T	45			120	63		45	80
	E	0,09			0,09	0,09		0,09	0,09
Strontium	f _a	0,4	0,28		0,12			0,62	
Sr-85M	T	0,049	0,049		0,049				
	E	0,14	0,039		0,051				
	EK	0,47	0,13		0,17				
Sr-85	T	64,7	64,8		42				
	E	0,33	0,091		0,16				
Sr-89	T	50,3	50,4		35,3			0,74	
	E	0,55	2,8		0,55			0,55	
Sr-90	T	5700	6400		120			0,75	
	E	0,21	1,1		0,21			0,21	
	EK	1,1	5,5		1,1			1,1	
Sr-91	T	0,4	0,4		0,4				
	E	0,98	2,4		0,68				
Sr-91	T	0,4	0,4		0,4				
	E	1,8	4,5		1,6				
	EK	1,9	5,4		1,2				
	EK	2,4	7,4		2				
Sr-92	T	0,11	0,11		0,11				
	E	0,96	1,1		0,45				
	EK	2,6	8		2				
Yttrium	f _a	0,25	0,19		0,12				
Y-90	T	2,68	2,68		2,7				
	E	0,89	4,4		0,89				
Y-91M	T	0,035	0,035		0,035				
	E	0,34	0,082		0,15				
	EK	0,93	3		0,55				
Y-91	T	58	58		38				
	E	0,59	2,9		0,59				
Y-92	T	0,15	0,15		0,15				
	E	1,6	6,9		1,5				

Tabelle 3 Fortsetzung

Organ		Ganzk.	Knochen	Lunge		Leber	Nieren	Milz
		70	7	lösli.	unlösli.	1,7	0,3	0,15
Gew. (kg)				1				
Y-93	T	0,42	0,42		0,42			
	E	1,7	6,5		1,5			
	EK	1,7	6,5		1,5			
	EK	1,7	6,5		1,5			
Zirkonium	f _a	0,25	0,09		0,12	0,02	0,005	0,0015
Zr-93	T	450	1000		120	320	900	900
	E	0,019	0,095		0,019	0,019	0,019	0,019
	EK	0,024	0,11		0,02	0,025	0,024	0,025
Zr-95	T	55,5	59,5		41	53	59	59
	E	0,57	0,77		0,32	0,32	0,27	0,27
	EK	1,1	1,1		0,52	0,57	0,46	0,46
Zr-97	T	0,71	0,71		0,71	0,71	0,71	0,71
	E	1,2	3,8		0,94	0,94	0,88	0,88
	EK	2,1	6,2		1,6	1,6	1,5	1,5
Niob	f _a	0,25	0,1		0,12	0,02	0,005	0,002
Nb-93M	T	630	787		120	688	640	756
	E	0,038	0,12		0,038	0,038	0,038	0,038
Nb-95	T	33,5	33,8		27	33,6	33,5	33,8
	E	0,49	0,36		0,20	0,25	0,19	0,19
Nb-97	T	0,051	0,051		0,051	0,051	0,051	0,051
	E	0,87	2,4		0,64	0,64	0,6	0,6
Molybdän	f _a	0,65			0,12	0,065	0,05	
Mo-99	T	1,8			2,79	2,66	1,5	
	E	0,45			0,45	0,45	0,45	
	E _k	0,51			0,49	0,48	0,48	
Mo-99	T	1,8			2,79	2,66	1,5	
	E	0,71			0,4	0,4	0,34	
	E _k	0,71			0,4	0,4	0,34	
Technetium	f _a	0,5	0,001	0,00045	0,12	0,0015	0,005	
Tc-96M	T	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	
	E	0,034	0,089	0,034	0,034	0,034	0,034	
	E _k	0,3	0,39	0,38	0,66	0,6	0,42	
Tc-96	T	0,08	3,7	2,3	2,3	3,8	3,5	
	E	1,4	0,35	0,64	0,64	0,64	0,47	
Tc-97M	T	0,99	20	4,7	4,7	23	16	
	E	0,09	0,37		0,09	0,09	0,09	
	E _k	0,09	0,37	0,09	0,09	0,09	0,09	
Tc-97	T	1	25	5	5	30	20	
	E	0,02	0,019	0,02	0,02	0,02	0,02	
Tc-99M	T	0,2	0,25	0,24	0,24	0,25	0,25	
	E	0,08	0,02	0,035	0,035	0,035	0,026	
	E _k	0,08	0,02	0,035	0,035	0,035	0,026	

Tabelle 3 Fortsetzung

Organ		Ganzkörper Gewicht (kg)	Knochen 7	Lunge		Leber 1,7	Nieren 0,3	Milz 0,15
				lösl. 1	unlösl.			
		70						
Tc-99	T	1	25	5	5	30	20	
	E	0,094	0,47	0,094	0,094	0,094	0,094	
Ruthenium	f _a	0,27	0,02		0,12		0,05	
Ru-97	T	2	2,4		2,8		1,3	
	E	0,15	0,05		0,078		0,062	
	E _k	0,15	0,13		0,13		0,077	
Ru-103	T	6,2	12		30,4		2,4	
	E	0,38	0,43		0,21		0,17	
	E _k	0,44	0,62		0,27		0,22	
Ru-105	T	0,19	0,19		0,19		0,18	
	E	0,98	2,6		0,72		0,66	
	E _k	1,20	3,50		0,91		0,84	
Ru-106	T	7,2	15		90		2,48	
	E	1,4	6,5		1,4		1,3	
Rhodium	f _a	0,35	0,02		0,12	0,014	0,01	0,0035
Rh-103M	T	0,038	0,038		0,038	0,038	0,038	0,038
	E	0,055	0,19		0,055	0,055	0,054	0,054
Rh-105	T	1,33	1,39		1,52	1,4	1,44	1,42
	E	0,2	0,95		0,19	0,19	0,19	0,19

Organ		Ganzkörper Gewicht (kg)	Knochen 7	Lunge		Leber 1,7	Nieren 0,3	Milz 0,15	Schilddrüse 0,02
				lösl. 1	unlösl.				
		70							
Palladium	f _a	0,35			0,12	0,03	0,03	0,0035	
Pd-103	T	3,9			15	9	8	8	
	E	0,023			0,022	0,022	0,021	0,021	
	E _k	0,064			0,063	0,063	0,0610	0,0610	
Pd-109	T	0,51			0,57	0,55	0,56	0,55	
	E	0,42			0,42	0,42	0,42	0,42	
Zinn	f _a	0,28	0,08		0,12	0,0028			0,00003
Sn-113	T	27	53		58	43			43
	E	0,028	0,018		0,024	0,024			0,0023
	E _k	0,32	0,7		0,23	0,23			0,16
Sn-125	T	7,5	8,7		9,5	8,4			8,4
	E	0,93	4,7		0,93	0,93			0,93
	E _k	0,94	4,8		0,96	0,94			0,93
	E _k	0,95	4,7		0,96	0,94			0,93
Antimon	f _a	0,27	0,03	0,008	0,008	0,0005			0,00001
Sb-122	T	2,6	2,7	2,7	2,7	2,6			1,6
	E	0,82	2,7	0,67	0,67	0,67			0,59
Sb-124	T	23	38	38	38	23			3,8
	E	1,6	2,3	0,92	0,92	0,92			0,57

Tabelle 3 Fortsetzung

Organ	Gewicht (kg)		Ganzkörper 70	Knochen 7	Lunge		Leber 1,7	Nieren 0,3	Milz 0,15	Schilddrüse 0,02
					lösl.	unlösl.				
					1					
Sb-125	T		36	90	90	90	36			4
	E		0,32	0,62	0,21	0,21	0,21			0,14
	E _k		0,34	0,69	0,23	0,24	0,23			0,15
Tellur	f _a		0,38	0,034		0,12	0,02	0,03	0,0038	0,00038
	Te-125M	T	12	20		38	20	20	20	7,8
		E	0,15	0,51		0,14	0,14	0,14	0,14	0,11
Te-127M	T	13	23		56,2	23	23	23	8,3	
	E	0,089	0,31		0,083	0,083	0,079	0,079	0,07	
	E _k	0,32	1,5		0,32	0,32	0,32	0,32	0,3	
Te-127	T	0,38	0,39		0,39	0,39	0,39	0,39	0,37	
	E	0,24	1,2		0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	
Te-129M	T	10	16		26	16	16	16	7,1	
	E	0,11	0,4		0,1	0,1	0,096	0,096	0,087	
	E _k	1,1	3,2		0,83	0,83	0,78	0,78	0,68	
Te-129	T	0,051	0,051		0,051	0,051	0,051	0,051	0,051	
	E	0,98	2,8		0,73	0,73	0,68	0,68	0,6	
	E _k	0,98	2,8		0,73	0,73	0,68	0,68	0,6	
Te-131M	T	1,15	1,2		1,25	1,2	1,2	1,2	1,1	
	E	1,2	1,9		0,73	0,73	0,63	0,63	0,47	
	E _k	1,6	2,6		1	0,97	0,81	0,8	0,69	
Te-132	T	2,6	2,9		3,2	2,9	2,9	2,9	2,4	
	E	0,21	0,38		0,13	0,13	0,11	0,11	0,089	
	E _k	1,9	3,1		1,1	1,1	0,96	0,96	0,74	
Jod	f _a		0,75	0,053		0,12	0,09	0,03	0,004	0,23
	J-126	T	12,1	6,8			4,58	4,58	4,58	12,1
		E	0,23			0,18				0,16
J-129	T	138	14		120	7	7	7	138	
	E	0,089			0,082				0,068	
J-131	T	7,6	5,1		7,5	3,73	3,73	3,73	7,6	
	E	0,44			0,3			0,25	0,23	
J-132	T	0,097	0,096		0,097	0,096	0,096	0,086	0,097	
	E	1,7			1			0,76	0,65	
J-133	T	0,87	0,82		0,866	0,77	0,77	0,773	0,87	
	E	0,84			0,64			0,54	0,54	
	E _k	0,84			0,64				0,54	
J-134	T	0,036	0,036		0,036	0,035	0,035	0,035	0,036	
	E	1,5			1,1				0,82	
J-135	T	0,28	0,27		0,279	0,27	0,27	0,204	0,28	
	E	1,2			0,7			0,52	0,46	
	E _k	1,3			0,77			0,54	0,52	

Tabelle 3 Fortsetzung

Organ	Gewicht (kg)	Ganzkörper 70	Knochen 7	Lunge		Leber 1,7	Nieren 0,3	Milz 0,15	Muskeln 30
				lösli. 1	unlösli.				
Cäsium	f _a	0,75	0,03	0,0023	0,12	0,05	0,0075	0,0038	0,3
Cs-131	T	8,75	9,3	9,3	9,3	9	8	9,1	9,3
	E	0,029	0,017	0,024	0,024	0,024	0,021	0,021	0,029
Cs-134M	T	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
	E	0,11	0,35	0,092	0,092	0,092	0,087	0,087	0,11
	E _k	0,19	0,49	0,17	0,17	0,15	0,11	0,13	0,26
Cs-134	T	65	120	120	105	81	40	88	120
	E	1,1	0,99	0,57	0,57	0,57	0,46	0,46	1,1
Cs-135	T	70	140	140	140	90	42	98	140
	E	0,066	0,33	0,066	0,066	0,066	0,066	0,066	0,066
Cs-136	T	11	11,9	11,9	11,9	11,4	10	11,5	11,9
	E	0,65	0,72	0,35	0,35	0,35	0,29	0,29	0,65
Cs-137	T	70	138	138	138	89	42,5	97	138
	E	0,59	1,4	0,41	0,41	0,41	0,37	0,37	0,59
Barium	f _a	0,28	0,19	0,00006	0,1206	0,00017	0,00003	0,00010	0,00083
Ba-131	T	9,8	9,8	11,6	11,6	11,5	4,9	6,1	11,5
	E	0,35	0,093	0,17	0,17	0,17	0,12	0,12	0,35
	E _k	0,38	0,11	0,19	0,19	0,19	0,14	0,14	0,38
Ba-140	T	10,7	10,7	12,8	12,8	1,26	5,1	6,1	12,7
	E	0,4	1,5	0,34	0,34	0,34	0,33	0,33	0,4
	E _k	2,3	4,2	1,4	1,4	1,4	1,2	1,2	2,3

Organ	Gewicht (kg)	Ganzkörper 70	Knochen 7	Lunge		Leber 1,7	Nieren 0,3	Milz 0,15
				lösli. 1	unlösli.			
Lanthan	f _a	0,25	0,1		0,12	0,04		0,0001
La-140	T	1,68	1,68		1,68	1,68		0,71
	E	1,9	2,7		1,1	1,1		1,1
Cer	f _a	0,25	0,075		0,12	0,06	0,005	0,62
Ce-141	T	30	31		26	29	30	
	E	0,21	0,81		0,18	0,18	0,18	
	E _k	0,97	3,8		0,83	0,85	0,82	
Ce-143	T	1,33	1,33		1,33	1,32	1,33	
	E	0,66	2,2		0,54	0,54	0,51	
	E _k	0,97	3,8		0,83	0,85	0,82	
Ce-144	T	191	243		87,2	146	191	0,75
	E	1,3	6,3		1,3	1,3	1,3	1,3
	E _k	1,3	6,3		1,3	1,3	1,3	1,1
Praseodym	f _a	0,25	0,1		0,12	0,05	0,005	
Pr-142	T	0,8	0,8		0,8	0,8	0,8	
	E	0,85	3,9		0,81	0,81	0,81	
Pr-143	T	13,5	13,6		12,3	13,2	13,5	
	E	0,32	1,6		0,32	0,32	0,32	
Neodym	f _a	0,25	0,09		0,12	0,13	0,01	
Nd-144	T	656	1500		120	131	656	
	E	20	100		20	20	20	

Tabelle 3 Fortsetzung

Organ		Ganzkörper	Knochen	Lunge lösli.	Lunge unlösli.	Leber	Niere	Milz
Gewicht (kg)		70	7	1		1,7	0,3	0,15
Nd-147	T	11,1	11,2		10,5	10	11,1	
	E	0,37	1,2		0,29	0,29	0,28	
	E _k	0,4	1,4		0,3	0,32	0,31	
Nd-149	T	0,083	0,083		0,083	0,083	0,083	
	E	0,55	2,8		0,55	0,55	0,55	
	E _k	1,1	4,7		0,99	0,99	0,97	
Uran	f _a	0,25	0,083		0,12		0,028	
U-230	T	14,7	19,5		17,1		8,7	
	E	348	1740		348		348	
	E _k	350	1800		350		350	
U-232	T	100	300		120		15	
	E	55	274		55		55	
	E _k	280	1200		210		110	
U-233	T	100	300		120		15	
	E	50	250		50		50	
U-234	T	100	300		120		15	
	E	49	240		49		49	
U-235	T	100	300		120		15	
	E	46	228		46		46	
	E _k	46	230		46		46	
U-236	T	100	300		120		15	
	E	47	230		47		47	
U-238	T	100	300		120		15	
	E	43	220		43		43	
Neptunium	f _a	0,25	0,11		0,12	0,013	0,0075	
Np-237	T	39000	73000			54000	64000	
	E	49	247		49	49	49	
	E _k	49	250		49	49	49	
Np-239	T	2,33	2,33		2,33	2,33	2,33	
	E	0,22	0,63		0,16	0,16	0,15	
	E _k	0,29	0,98		0,16	0,22	0,21	
Plutonium	f _a	0,25	0,2		0,12	0,038	0,005	
Pu-238	T	22000	23000			16000	16000	
	E	57	280		57	57	57	
Pu-239	T	64000	72000		360	30000	32000	
	E	53	270		53	53	53	
Pu-240	T	63000	71000		360	30000	32000	
	E	53	270		53	53	53	

Tabelle 3 Fortsetzung

Organ		Ganzkörper 70	Knochen 7	Lunge		Leber 1,7	Nieren 0,3	Milz 0,15	
				lösli. 1	unlösli.				
Pu-241	T	4500	4500		360	4100	4200		
	E	0,014	0,048		0,013	0,013	0,012		
	E _k	2,3	14		0,053	1	2,5		
Pu-242	T	65000	73000		360	30000	32000		
	E	51	250		51	51	51		
Americium	f _a	0,25	0,063		0,12	0,088	0,0075		
	Am-241	T	18000	51000		120	3400	23000	
		E	57	280		57	57	57	
Am-243	T	20000	71000		120	3500	27000		
	E	54	272		54	54	54		
	E _k	54	270		54	54	54		
Curium	f _a	0,25	0,075		0,12	0,1	0,005		
	Cm-242	T	161,4	162,1		69	154,3	161,4	
		E	63	315		63	63	63	
E _k		80	400		64	78	78		
Cm-243	T	8400	11000		120	2500	8400		
	E	60	299		60	60	60		
	E _k	60	300		60	60	60		
Cm-244	T	5200	6100		120	2100	5200		
	E	60	299		60	60	60		
	E _k	60	300		60	60	60		
Cm-245	T	24000	72000		120	3000	24000		
	E	55	277		55	55	55		
	E _k	56	280		55	56	56		
Cm-246	T	24000	71000		120	3000	24000		
	E	56	280		56	56	56		
Berkelium	f _a	0,25	0,20		0,12				
	Bk-249	T	289	289		85			
		E	0,026	0,13		0,026			
E _k		3,8	20		0,069				
Californium	f _a	0,25	0,2		0,12				
	Cf-249	T	47000	51000		120			
		E	60	300		60			
E _k		62	310		62				
Cf-250	T	3500	3500		120				
	E	62	310		62				
	E _k	62	310		62				
Cf-252	T	793	794		105				
	E	210	1100		210				

Tabelle 4 Inhalationsdosisfaktoren g in $\frac{rem \cdot m^3}{Ci \cdot s}$

Nuklid	Ganzkörper	Knochen	Lunge		Leber	Nieren	MDT		Milz
			lösli.	unlösli.			lösli.	unlösli.	
H-3	0,0582								
C-14	0,0984	0,53							
P-32	0,143	38,4			2,21		2,50	12,5	
Mn-52	0,428			10,8	3,02		7,14	10,0	
Mn-54	0,598			40,4	3,70		1,67	2,50	
Mn-56	0,0152			0,292	0,100		1,67	2,50	
Fe-55	0,219	0,315	0,543	0,543	0,957		0,083	0,125	1,72
Fe-59	2,52		1,91	1,91	7,01		5,00	5,56	9,69
Co-57	0,0804			0,892	0,0975		0,500	0,714	0,0235
Co-58M	0,0009			0,0186	0,0018		0,083	0,125	0,0005
Co-58M 1,00									
Co-58	0,0036			0,155	0,0044				0,0010
Co-58	0,0596			16,5	0,0588		1,67	2,50	0,0124
Co-60	1,38			173	1,37		5,00	8,33	0,302
Ni-59	0,499	2,99		1,89	1,16		0,083	0,167	
Ni-63	1,33	26,3		5,14	3,10		0,250	0,500	
Ni-65	0,0150	0,283		0,269	0,0396		1,67	2,50	

Nuklid	Ganzkörper	Knochen	Lunge		Leber	Nieren	MDT		Milz	Muskeln
			lösli.	unlösli.			lösli.	unlösli.		
Br-82	0,426			2,60			0,883	8,33		
Rb-86	1,68			22,4	3,80		0,500	12,5	2,96	
Rb-87	0,738			22,0	2,27		0,063	1,67	1,38	1,39
Sr-85M	0,0007	0,0013		0,0051			0,050	0,050		
Sr-85M 0,86										
Sr-85	0,0022	0,0043		0,0170						
Sr-85	2,07	4,01		13,7			1,00	1,67		
Sr-89	2,69	96,0		39,6			5,56	10,0	28,6	
Sr-90	116	4790		51,4			5,00	8,33	11,1	
Sr-90 1,00										
Y-90	609	24,0 10^3		269					58,0	
Sr-91	0,0381	0,653		0,555						
Sr-91	0,0699	1,22		1,31			2,50	5,56		
Sr-91 0,59										
Y-91M										
Y-91	0,0738	1,47		0,979						

Tabelle 4 Fortsetzung

Nuklid	Ganzkörper	Knochen	Lunge		Leber	Nieren	MDT		Milz
			lösll.	unlösll.			lösll.	unlösll.	
Sr-91 0,41									
Y-91	0,0933	2,01		1,63					
Sr-92 1,00	0,0103	0,0823		0,101			2,50	5,00	
Y-92	0,0278	0,598		0,449					
Y-90	0,145	5,44		4,90			12,5	16,7	
Y-91M 1,00	0,0007	0,0013		0,0107			0,063	0,083	
Y-91	0,0020	0,0484		0,0393					
Y-91	2,08	77,6		45,7			8,33	10,0	
Y-92	0,0146	0,478		0,459			5,00	5,00	
Y-93 0,50	0,0433	1,26		1,29			8,33	10,0	
Zr-93 Nb-93M	0,0433	1,26		1,29					
Y-93 0,50									
Zr-93	0,0433	1,26		1,29					
Zr-93 1,00	0,519	20,8		4,65	1,22	4,85			2,91
Zr-93 Nb-93M	0,656	24,0		4,90	1,60	6,12			3,83
Zr-95 1,00	1,92	10,0		26,8	3,39	4,51			2,71
Zr-95 Nb-95M Nb-95	3,71	14,3		43,5	6,04	7,69			4,61
Zr-97 1,00	0,0517	0,590		1,36	0,134	0,177			0,106
Zr-97 Nb-97M Nb-97	0,0905	0,962		2,32	0,227	0,302			0,181
Nb-93M	1,45	22,9		9,30	5,23	6,89	0,556	0,714	6,51
Nb-95	0,997	2,96		11,0	1,68	1,80	2,50	2,50	1,46
Nb-97	0,0027	0,0297		0,0666	0,0065	0,0087	0,250	0,250	0,0069
Mo-99	0,128			2,56	0,778	1,91			
Mo-99 0,87 Tc-99M Tc-99	0,145			2,79	0,830	2,04			
Mo-99	0,202			2,28	0,692	1,45	1,00	7,14	

Tabelle 4 Fortsetzung

Nuklid	Ganzkörper	Knochen	Lunge		Leber	Nieren	MDT		Milz
			lösll.	unlösll.			lösll.	unlösll.	
Mo-99 0,13 Tc-99	0,202			2,28	0,692	1,45			
Tc-96M	0,0001					0,0003	0,017	0,025	
Tc-96M 1,00 Tc-96	0,0013		0,0001	0,06 2	0,0003	0,0043			
Tc-96	0,0136	0,0031	0,0113	3,41	0,0365	0,466	2,50	6,25	
Tc-97M	0,0108	0,0180		0,92	0,0310	0,408	0,625	1,67	
Tc-97M 1,00 Tc-97	0,0108	0,0180	0,0032	0,92	0,0310	0,408			
Tc-97	0,0024	0,0012	0,0008	0,24	0,0090	0,113	0,125	0,500	
Tc-99M	0,0019		0,0001	0,03	0,0001	0,0018	0,714	1,67	
Tc-99M 1,00 Tc-99	0,0019		0,0001	0,03	0,0001	0,0018			
Tc-99	0,0114	0,0285	0,0036	0,98	0,0423	0,533			
Ru-97	0,0197	0,0058		0,446		0,228	0,625	0,833	
Ru-97 1,00 Tc-97M Tc-97	0,0197	0,0152		0,743		0,284			
Ru-103	0,155	0,251		13,0		1,16			
Ru-103 1,00 Rh-103M	0,179	0,361		16,7		1,50			
Ru-105	0,0122	0,0240		0,279		0,337			
Ru-105 1,00 Rh-105M Rh-105	0,0152	0,0328		0,353		0,428			
Ru-106	0,661	4,74		257		9,13			
Rh-103M	0,0002	0,0004		0,0043	0,0003	0,0012	0,017	0,025	0,0008
Rh-105	0,0226	0,0641		0,589	0,0372	0,155	1,67	2,50	0,107
Pd-103	0,0076			0,673	0,0594	0,286	0,625	1,00	0,0666
Pd-103 1,00 Rh-103M	0,0212			1,93	0,170	0,830			0,194
Pd-109	0,0182			0,488	0,0693	0,400			0,0916

Tabelle 4 Fortsetzung

Nuklid	Ganzkörper	Knochen	Lunge		Leber	Nieren	MDT		Milz	Schilddrüse
			lösl.	unlösl.			lösl.	unlösl.		
Sn-113	0,0514	0,185		2,840	0,0289					0,0025
Sn-113 1,00 In-113M	0,588	7,21		27,2	0,277					0,175
Sn-125	0,474	7,94		18,0	0,219		12,5	16,7		0,199
Sn-125 0,83 Sb-125 Te-125M	0,479	8,11		18,6	0,221					0,199
Sn-125 0,17 Sb-125	0,485	7,94		18,6	0,221					0,199
Sb-122	0,140	0,531	0,246	0,246	0,0087		8,33	10,0		0,0080
Sb-124	2,41	6,37	4,75	4,75	0,106		10,0	12,5		0,0184
Sb-125	0,755	4,07	2,57	2,57	0,0378					0,0048
Sb-125 0,83 Te-125M	0,803	4,52	2,82	2,94	0,0414					0,0051
Te-125M	0,166	0,842		10,9	0,560	4,76	1,25	2,5	1,21	0,277
Te-127M	0,107	0,589		9,52	0,382	3,09	2,50	5,56	0,783	0,188
Te-127M 1,00 Te-127	0,384	2,85		36,7	1,47	12,5			3,17	0,804
Te-127	0,0084	0,0386		0,191	0,0187	0,159	0,833	1,67	0,0403	0,0287
Te-129M	0,10	0,529		5,30	0,320	2,61	7,14	12,5	0,662	0,200
Te-129M 1,00 Te-129 J-129	1,02	4,23		44,0	2,66	21,2			5,37	1,56
Te-129	0,0046	0,0118		0,0759	0,0074	0,0590	0,250	0,500	0,0149	0,0099
Te-129 1,00 J-129	0,0046	0,0118		0,0759	0,0074	0,0590			0,0149	0,0099
Te-131M	0,127	0,188		1,86	0,175	1,29	5,00	8,33	0,326	0,167
Te-131M 1,00 Te-131 J-131 Xe-131M	0,170	0,258		2,55	0,233	1,65			0,413	0,245
Te-132	0,0504	0,0910		0,849	0,0754	0,542	7,14	12,5	0,137	0,0690
Te-132 1,00 J-132	0,456	0,742		7,18	0,638	4,73			1,20	0,574
J-126	0,507						0,125	2,50		378
J-129	2,24			20,1			0,056	1,25		1830
J-131	0,609			4,59					0,423	342

Tabelle 4 Fortsetzung

Nuklid	Ganzkörper	Knochen	Lunge		Leber	Nieren	MDT		Milz	Schilddrüse
			lösll.	unlösll.			lösll.	unlösll.		
J-132	0,0300			0,198			0,556	1,67	0,0296	12,3
J-133	0,133			1,13					0,189	91,8
J-133 1,00 Xe-133M Xe-133	0,133			1,13						91,8
J-134	0,0098			0,0808			0,500	0,500		5,77
J-135	0,0612			0,398					0,0481	25,2
J-135 1,00 Xe-135M Xe-135 Cs-135M Cs-135	0,0663			0,438					0,0499	28,5

Nuklid	Ganzkörper	Knochen	Lunge		Leber	Nieren	MDT		Milz	Muskeln
			lösll.	unlösll.			lösll.	unlösll.		
Cs-131	0,0462	0,0115	0,0087	0,455	0,108	0,0714	0,012	0,250	0,0823	0,0458
Cs-134M	0,0026	0,0033	0,0005	0,0244	0,0060	0,0048	0,050	0,250	0,0049	0,0024
Cs-134M 1,00 Cs-134	0,0045	0,0046	0,0009	0,0451	0,0097	0,0061			0,0073	0,0057
Cs-134	13,0	8,66	2,67	122	23,1	7,82	0,500	7,14	17,4	22,4
Cs-135	0,842	3,37	0,361	18,9	2,97	1,18	0,050	1,25	2,79	1,57
Cs-136	1,30	0,624	0,163	8,50	2,00	1,23	0,250	5,00	1,44	1,31
Cs-137	7,52	14,1	2,21	115	18,2	6,68			15,5	13,8
Ba-131	0,233	0,421	0,0020	4,04	0,0033	0,0010	1,25	1,67	0,0083	0,0019
Ba-131 1,00 Cs-131	0,253	0,497	0,0022	4,52	0,0037	0,0012			0,0097	0,0021
Ba-140	0,291	7,41	0,0044	8,92	0,0073	0,0029	8,33	12,5	0,0228	0,0024
Ba-140 1,00 La-140	1,67	20,7	0,0183	36,7	0,0300	0,0104			0,0830	0,0137
La-140	0,194	1,10		3,77	0,739		10,0	12,5	0,0089	
Ce-141	0,383	4,57		9,55	3,13	1,53	2,50	2,50		
Ce-143	0,0533	0,533		1,47	0,428	0,192	5,56	7,14		

Tabelle 4 Fortsetzung

Nuklid	Ganzkörper	Knochen	Lunge		Leber	Nieren	MDT		Milz
			lösll.	unlösll.			lösll.	unlösll.	
Ce-143 1,00 Pr-143	0,0783	0,921		2,25	0,673	0,309			
Ce-144 15,1	279		231		114	70,4	16,7	25,0	68,5
Ce-144 1,00 Pr-144 Nd-144	15,1	279	231		114	70,4			58,0
Pr-142	0,0413	0,758		1,32	0,324	0,184	7,14	10,0	
Pr-143	0,262	5,28		8,2	2,11	1,22	5,00	5,56	
Nd-144	797	32,8 10 ³		4900	3410	7430	2,50	5,00	
Nd-147	0,249	2,94		6,5	3,77	1,76	5,00	5,00	
Nd-147 1,00 Pm-147 Sm-147	0,270	3,43		74,7	4,16	1,95			
Nd-149	0,0028	0,0508		0,0931	0,0593	0,0259	0,833	1,00	
Nd-149 1,00 Pm-149	0,0055	0,0853		0,168	0,107	0,0456			
U-230	311	6,84 10 ³		12,1 10 ³		4804			

Nuklid	Ganzkörper	Knochen	Lunge		Nieren	MDT	
			lösll.	unlösll.		lösll.	unlösll.
U-230 1,00 Th-226 Ra-222 Rn-218 Po-214 Pb-210 Bi-210 Tl-206 Po-210	312	7075		12,2 10 ³	4831		
U-232	334	16,6 10 ³		13,5 10 ³	1309	8,33	10,0
U-232 1,00 Th-228 Ra-224 Rn-220 Po-216 Pb-212 Bi-212 Po-212 Tl-208	1700	72,6 10 ³		51,4 10 ³	2618		
U-233	304	15,1 10 ³		12,2 10 ³	1190	7,14	8,33
U-234	297	14,5 10 ³		12,0 10 ³	1166	7,14	8,33
U-235	279	13,8 10 ³		11,3 10 ³	1095	8,33	10,0
U-235 1,00 Th-231	279	13,9 10 ³		11,3 10 ³	1095		
U-236	285	13,9 10 ³		11,5 10 ³	1119	7,14	8,33
U-238	261	13,3 10 ³		10,5 10 ³	1023	6,25	8,33

Tabelle 4 Fortsetzung

Nuklid	Ganzkörper	Knochen	Lunge		Leber	Nieren	MDT	
			lösll.	unlösll.			lösll.	unlösll.
Np-237	116,0 10 ³	4,82 10 ⁶			344 10 ³	1,33 10 ⁶	7,14	10,0
Np-237 1,00 Pa-233	116 10 ³	4,88 10 ⁶			344 10 ³	1,33 10 ⁶		
Np-239	0,0311	0,3921		0,761	0,0485	0,1485		
Np-239 1,00 Pu-239M Pu-239	0,0410	0,610		0,761	0,0666	0,208		
Pu-238	76,1 10 ³	3,13 10 ⁶			347 10 ³	258 10 ³	8,33	10,0
Pu-239	206 10 ³	9,44 10 ⁶		38,9 10 ³	604 10 ³	481 10 ³	8,33	10,0
Pu-240	203 10 ³	9,31 10 ⁶		38,9 10 ³	604 10 ³	481 10 ³	8,33	10,0
Pu-241	3,83	105		9,55	20,3	14,3	0,167	0,250
Pu-241 1,00 Am-241 Np-237M	628	30,6 10 ³		38,9	1558	2975		
Pu-242	201 10 ³	8,86 10 ⁶		37,5 10 ³	581 10 ³	462 10 ³	7,14	10,0
Am-241	62,3 10 ³	2,18 10 ⁶		14,0 10 ³	171 10 ³	557 10 ³		
Am-243	65,6 10 ³	2,95 10 ⁶		13,2 10 ³	166 10 ³	620 10 ³	8,33	10,0
Am-243 1,00 Np-239 Pu-239M Pu-239	65,6 10 ³	2,93 10 ⁶		13,2 10 ³	166 10 ³	620 10 ³		
Cm-242	617	9300		8868	9721	2881	10,0	12,5
Cm-242 1,00 Pu-238	784	11,8 10 ³		9009	12,0 10 ³	3567		
Cm-243	30,6 10 ³	599 10 ³		14,7 10 ³	150 10 ³	143 10 ³		
Cm-243 1,00 Pu-239M Pu-239	30,6 10 ³	601 10 ³		14,7 10 ³	150 10 ³	143 10 ³		
Cm-244	18,9 10 ³	332 10 ³		14,7 10 ³	126 10 ³	88,4 10 ³	8,33	10,0
Cm-244 1,00 Pu-240	18,9 10 ³	333 10 ³		14,7 10 ³	126 10 ³	88,4 10 ³		
Cm-245	80,1 10 ³	3,63 10 ⁶		13,5 10 ³	165 10 ³	374 10 ³	8,33	10,0
Cm-245 1,00 Pu-241 Am-241 Np-237M	81,6 10 ³	3,67 10 ⁶		13,5 10 ³	168 10 ³	381 10 ³		
Cm-246	81,6 10 ³	3,62 10 ⁶		13,7 10 ³	168 10 ³	381 10 ³	8,33	10,0
Bk-249	0,456	18,2		4,51			0,500	0,500
Bk-249 1,00 Cf-249	66,7	2807		12,0				
Cf-249	171 10 ³	7,43 10 ⁶		14,7 10 ³				
Cf-250	13,2 10 ³	527 10 ³		15,2 10 ³				
Cf-250 1,00 Cm-246	13,2 10 ³	527 10 ³		15,2 10 ³				
Cf-252	10,1 10 ³	424 10 ³		45,0 10 ³				

Tabelle 5 Submersionsdosiskonstante für Halogene und Edelgase

Nuklid	E_{eff}^{β} MeV	E_{eff}^{γ} MeV	E_{eff} MeV	g $\frac{\text{rem m}^3}{\text{Ci s}}$
<u>Halogene</u>				
Cl-38	1,651	1,628	3,279	0,886
Cl-38M	0,0	0,660	0,660	0,178
Cl-39	0,891	1,382	2,273	0,614
Br-80	0,791	0,075	0,866	0,234
Br-80M	0,0	0,013	0,013	0,004
Br-82	0,172	2,556	2,728	0,751
Br-83	0,381	0,007	0,388	0,105
Br-84	1,002	1,722	2,724	0,751
Br-84M	0,681	2,357	3,038	0,833
Br-85	1,151	0,0	1,151	0,311
Br-87	2,195	3,441	5,636	1,520
*Br-88	4,988	0,0	4,988	1,341
*Br-89	3,904	0,0	3,904	1,052
J-126	0,160	0,350	0,511	0,140
J-128	0,0	0,074	0,074	0,020
J-129	0,054	0,004	0,058	0,016
J-130	0,331	2,133	2,464	0,665
J-131	0,225	0,371	0,596	0,161
J-132	0,592	2,397	2,990	0,805
J-133	0,515	0,588	1,103	0,298
J-134	0,608	1,936	2,544	0,683
J-135	0,383	1,775	2,158	0,583
J-136	0,231	2,485	2,716	0,738
*J-137	0,219	0,0	0,219	0,059
*J-138	4,297	0,0	4,297	1,161
*J-139	3,500	0,0	3,500	0,945
At-206	0,0	0,007	0,007	0,002
At-208	0,0	0,705	0,705	0,191
At-209	0,0	1,116	1,116	0,301

Tabelle 5 Fortsetzung

Nuklid	E_{eff}^{β} MeV	E_{eff}^{γ} MeV	E_{eff} MeV	g $\frac{\text{rem m}^3}{\text{Ci s}}$
<u>Edelgase</u>				
He-8	0,0	0,862	0,862	0,233
Ne-23	0,200	0,159	0,359	0,097
Ne-24	0,181	0,542	0,723	0,195
Ar-41	0,511	1,305	1,816	0,491
Kr-83M	0,0	0,031	0,031	0,008
Kr-85	0,266	0,002	0,268	0,073
Kr-85M	0,256	0,151	0,406	0,111
Kr-87	1,523	1,374	2,897	0,785
Kr-88	0,444	1,743	2,187	0,590
Kr-89	1,980	2,310	4,290	1,160
*Kr-90	1,311	1,539	2,849	0,766
*Kr-91	1,752	0,0	1,752	0,475
*Kr-92	2,572	0,0	2,572	0,695
*Kr-93	4,507	0,0	4,507	1,220
*Kr-94	3,448	0,0	3,448	0,931
*Kr-95	5,409	0,0	5,409	1,462
Xe-129M	0,0	0,015	0,015	0,004
Xe-131M	0,160	0,003	0,163	0,044
Xe-133	0,132	0,030	0,162	0,044
Xe-133M	0,053	0,033	0,086	0,023
Xe-135	0,367	0,246	0,613	0,165
Xe-135M	0,0	0,422	0,422	0,114
Xe-137	1,365	0,150	1,516	0,406
Xe-138	1,099	1,195	2,294	0,620
*Xe-139	2,664	0,0	2,664	0,721
*Xe-140	1,963	0,0	1,963	0,530

Tabelle 5 Fortsetzung

Nuklid	E_{eff}^{β} MeV	E_{eff}^{γ} MeV	E_{eff} MeV	\dot{g} $\frac{\text{rem m}^3}{\text{Ci s}}$
*Xe-141	3,237	0,0	3,237	0,871
*Xe-143	3,805	0,0	3,805	1,030

Die Berechnung der mittleren β -Energie \bar{E}_{β} erfolgt nach der Beziehung:

$$\bar{E}_{\beta} = 0,33 E_{\text{max}} \left(1 - \frac{\sqrt{Z}}{50}\right) \left(1 + \frac{\sqrt{E_{\text{max}}}}{4}\right)$$

Z = Ordnungszahl

Für markierte Nuklide (*) wurde die β -Energie über den Q-Wert bestimmt.

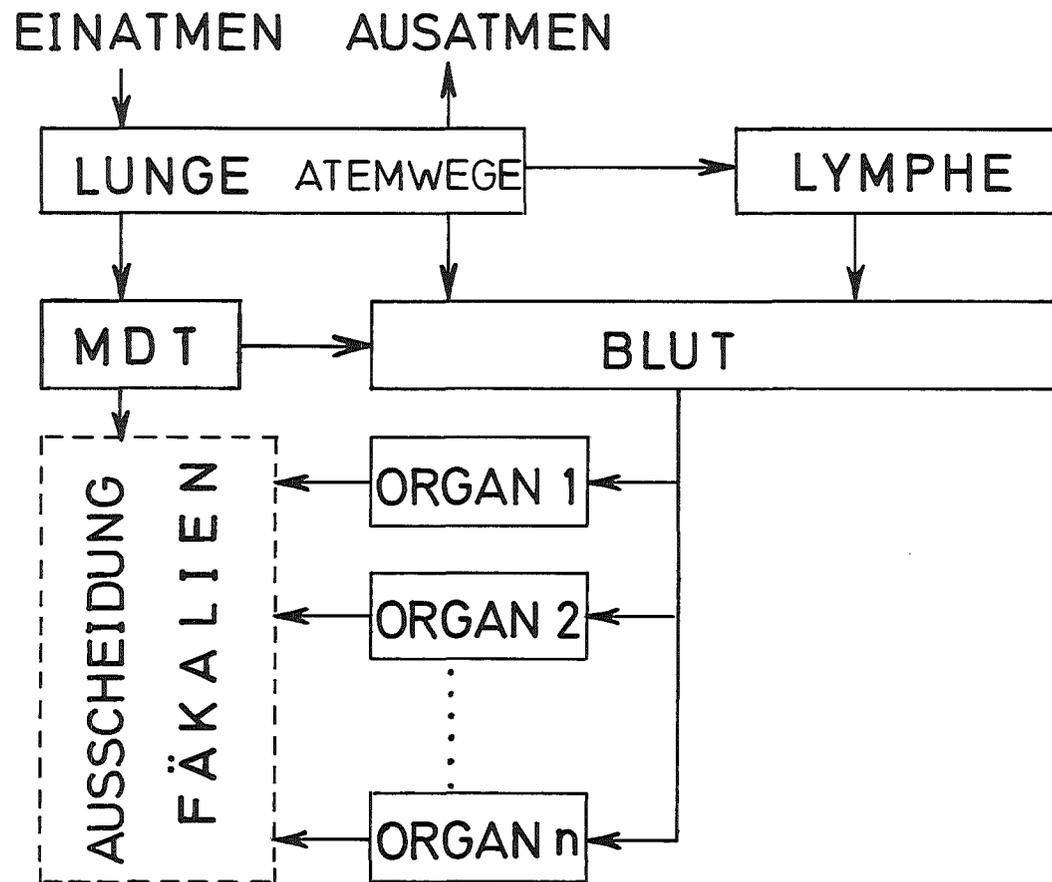


Abb. 1 MODELL FÜR DEN METABOLISMUS RADIOAKTIVER STOFFE nach /3/