

## **Dosisermittlung bei beruflicher, umweltbedingter und medizinischer interner Strahlenexposition: Konzepte, Modelle, Ergebnisse**

A. Kaul

### **Kurzfassung**

Die Berechnung der Strahlendosis durch inkorporierte radioaktive Stoffe – Radionuklide, Radiopharmazeutika – erfolgt auf der Grundlage von dosimetrischen und biokinetischen Modellen. Diese wurden von der International Commission on Radiological Protection ICRP entwickelt und publiziert.

#### ***Dosimetrische Modelle sind:***

Altersabhängige mathematische Organ- und Körperphantome und daraus für Organe und Gewebe rechnerisch abgeleitete absorbierte Bruchteile der beim Zerfall von Radionukliden emittierten Energie. In Vorbereitung ist die Entwicklung alters- und geschlechtsabhängiger Voxelphantome aus den Ergebnissen von computertomographischen Untersuchungen an Patienten.

#### ***Biokinetische Modelle sind das:***

1. Gastro-Intestinaltrakt-Modell,
2. Atemtrakt-Modell,
3. Modell für den systemischen Transport von Radionukliden im Körper,
4. Modell für die Ausscheidung von Radionukliden aus dem Körper,
5. Modell für Embryo und Foetus,
6. Modell für den Transfer von Radionukliden mit der Muttermilch zum gestillten Kleinkind.

Mit den von der ICRP berechneten Inhalations- und Ingestions-Dosiskoeffizienten wurden für beruflich Strahlenexponierte, Einzelne der Allgemeinen Bevölkerung sowie Patienten der nuklearmedizinischen Diagnostik für die wichtigsten Radionuklide bzw. Radiopharmazeutika Werte der effektiven Dosis berechnet und darauf basierend das strahlenbedingte Risiko abgeschätzt. Das höchste, bei beruflicher Exposition zu erwartende Krebsmortalitätsrisiko lag bei etwa 1 : 10 bis 1 : 30 nach Inhalation von 100 kBq Am-241 bzw. Pu-239, im übrigen bei  $10^{-4}$  bis  $10^{-5}$ . Die höchste, aus der nuklearmedizinischen Anwendung von Radiopharmazeutika bei applizierten Aktivitäten in Höhe der jeweiligen Referenzwerte resultierende effektive Dosis des Patienten lag im Bereich der jährlichen natürlichen Strahlendosis von im Mittel 2,4 mSv oder deutlich darunter.

Die effektive Dosis eines Neugeborenen durch Strahlenexposition in utero, ausgedrückt als effektive 70-Jahre-Folgedosis, ist – wie z.B. bei Sr-90 – nur bei Radionukliden nennenswert höher als bei der Mutter, wenn das Radionuklid in foetalem Gewebe in deutlich höherer Konzentration als bei der Mutter vorliegt und die Zufuhr des Radionuklids bei der Mutter erst gegen Ende der Schwangerschaft erfolgt ist.

Die effektive Dosis des gestillten Kleinkindes ist bei Begrenzung der Dosis der Mutter durch Schutzmaßnahmen, z.B. durch Einschränkung der Zufuhr von kontaminierten Lebensmitteln, auf den Wert von 1 mSv höchstens 3 mSv (I-131, Ca-45), im übrigen deutlich unter 1 mSv. Im Bereich der nuklearmedizinischen Anwendung von Radiopharmazeutika ist wegen des etwa 30%igen Transfers von I-131 mit der Muttermilch im Allgemeinen nur bei der prätherapeutischen Anwendung von I-131-Iodid das Stillen abzusetzen, da bei einer der Mutter applizierten Aktivität von 2 MBq die effektive Dosis des gestillten Kleinkindes durchaus den Wert von 100 mSv erreichen kann.

### **Calculation of doses from occupational, environmental and medical internal radiation exposure: Concepts, models, results**

Calculation of doses from incorporated radioactive substances – radionuclides, radiopharmaceuticals – is based on dosimetric and biokinetic models. These were developed and published by the International Commission on Radiological Protection ICRP.

#### ***Dosimetric models are:***

Age-dependent mathematical organ and body phantoms as the basis for calculating fractions of energy absorbed in target organs from emission by decay of radionuclides in source organs. In preparation is the development of age-and gender-dependent voxel phantoms from the results of computer tomographic investigations in patients.

#### ***Biokinetic models are:***

1. the gastrointestinal tract model,
2. the human respiratory tract model,
3. the model for systemic transport of radionuclides within the body,
4. the model for excretion of radionuclides from the body,
5. the model for transfer of radionuclides with mother's milk to the infant.

Based on the inhalation and ingestion dose coefficients of the ICRP the effective doses were calculated and radiation risks derived from these data for professionally exposed workers, members of the public and patients in nuclear diagnostic medicine, for the most relevant radionuclides and radiopharmaceuticals. In professional exposure the maximum expected cancer mortality risk is in the order of 1 : 10 to 1 : 30 for inhalation of 100 kBq Am-241 and Pu-239, respectively. The radiation cancer mortality risk of the remainder radionuclides proved to be in the order of  $10^{-4}$  to  $10^{-5}$ . The effective doses of patients from administration of radiopharmaceuticals at reference activities are generally within the variation width of the annual natural dose of 2.4 mSv or significantly below.

The effective dose of newborn infants from radiation exposure in utero, expressed as the 70-years committed effective dose, is significantly higher than the dose to the mother only in those rare cases, such as Sr-90, where the fetal tissue concentration of a radionuclide is clearly higher than in the mother, and the intake of the radionuclide is at the end of pregnancy.

The maximum effective dose of a breast-fed infant is 3 mSv (I-131, Ca-45) if the dose to the mother is limited to 1 mSv by limiting intake of contaminated foodstuff, and significantly lower than 1 mSv for most other radionuclides. Only if I-131 is administered as iodide to a female patient for pre-therapeutic purposes at an activity of 2 MBq the effective dose to the breast-fed infant will reach about 100 mSv due to the 30% transfer of iodine into the mother's milk.

## Einleitung

Beim beruflichen Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen in bestimmungsgemäßem Betrieb oder unfallbedingt können Radionuklide in den Körper gelangen und damit zu einer internen Strahlenexposition führen. Expositionspfade hierbei sind der Häufigkeit ihres Auftretens nach die Inhalation, die Ingestion sowie die Diffusion durch die intakte Haut als Folge von regional begrenzten Hautkontaminationen oder durch eine Wunde.

Neben natürlichen radioaktiven Stoffen gelangen künstlich erzeugte Radioisotope von Elementen beim bestimmungsgemäßen Betrieb von kerntechnischen Anlagen, gesetzlich geregelt und durch Strahlenschutzmaßnahmen kontrolliert, in die Umwelt oder – wie in der Vergangenheit als Folge von Kernwaffentests bzw. unfallbedingt – mit dem Fall-out in die Luft, in das Wasser und in Nahrungsmittel. Sie bedingen dadurch eine interne Strahlenexposition lokaler, regionaler oder auch globaler Populationen. Bei Unfallgeschehen, wie dem Reaktorunfall von Tschernobyl, ist der Expositionspfad Inhalation in der Frühphase des Unfalls von hervorgehobener Bedeutung für die Strahlenexposition der Bevölkerung vor allem in der unmittelbaren und näheren Umgebung der kerntechnischen Anlage. Bei chronischen Umweltkontaminationen durch bestimmungsgemäße oder unfallbedingte Emissionen von radioaktiven Stoffen aus einer kerntechnischen Anlage sind der Verzehr kontaminierter Nahrungsmittel und damit der Ingestionspfad bevorzugte Quellen einer Strahlenexposition der Bevölkerung von innen.

Bei der nuklearmedizinischen Anwendung von offenen radioaktiven Stoffen – Radiopharmazeutika – an Patienten oder Probanden wird das Radionuklid in der Mehrzahl der Untersuchungen direkt in den Körper des Patienten durch Injektion in das Blut als dem Transportmedium zu Organen, Organsystemen oder Geweben verbracht.

Im Gegensatz zur Messung der Personendosis als individueller Schätzwert für die Körperdosis bei externer Strahlenexposition (direkt durch Messung der Tiefen-Personendosis für Photonen, Neutronen, Elektronen > 3 MeV; bzw. durch Messung der Oberflächen-Personendosis für Elektronen < 3 MeV, Alphateilchen, schwere Ionen) ist die aus der Zufuhr eines Radionuklids in den Körper resultierende Dosis nicht direkt zu messen, sondern, abhängig vom jeweiligen Expositionspfad, den physikalisch-chemischen und Zerfallseigenschaften des Radionuklids und von seinem biokinetischen Verhalten im Organismus, zu berechnen. Hierfür bedarf es biokinetischer und dosimetrischer Modelle, die mathematisch beschreibbar und durch biokinetische Daten

entweder als Referenzwerte für Zwecke des prospektiven Strahlenschutzes (Planung) oder als gemessene Individualwerte bei retrospektiver Dosisermittlung charakterisierbar sind, bzw. die die pro Zerfall an das Gewebe angegebene Energie zu berechnen gestatten.

In dem als state-of-the-art konzipierten Übersichtsartikel werden das Konzept der Dosimetrie inkorporierter radioaktiver Stoffe – im Folgenden kurz: interne Dosimetrie – skizziert, die von der International Commission on Radiological Protection ICRP erarbeiteten biokinetischen und dosimetrischen Modelle vorgestellt, zumindest soweit, wie dies zum Verständnis der Dosisermittlung erforderlich ist. Es werden exemplarisch Referenzwerte der internen Dosis für beruflich Exponierte, Einzelne der Bevölkerung und Patienten der nuklearmedizinischen Diagnostik angegeben und, wo indiziert, das mit der Exposition verbundene strahlenbedingte Risiko genannt. Im Übrigen wird der am Detail interessierte Leser auf die entsprechenden relevanten Publikationen der ICRP [1–16], ausgewählte zusammenfassende Arbeiten zu diesem Thema sowie auf neuere Berichte von Symposien zum Thema interne Dosimetrie [17–24] und Einzelarbeiten [25–36] verwiesen, die im Literaturverzeichnis explizit als solche hervorgehoben sind.

### **Biokinetisches und dosimetrisches Modell: Definition**

Das *biokinetische Modell* beschreibt den zeitabhängigen Transport und die Verteilung eines radioaktiven Stoffes im Organismus sowie dessen Ausscheidung aus dem Organismus mit Hilfe eines mathematischen Formalismus. Im Allgemeinen sind dies Differentialgleichungen erster Ordnung, bei denen die Raten für den Übertritt eines radioaktiven Stoffes von einem Kompartiment in ein anderes als unabhängig von der Zeit nach Zufuhr und von der Masse des Stoffes betrachtet werden. Die Annahme dieser Unabhängigkeit des Betrages der Raten für den Übertritt eines radioaktiven Stoffes von einem Organ zu einem anderen oder aus dem Organismus findet dort seine Einschränkung, wo als Folge der Dosis in einem Organ bereits während der Verweildauer des radioaktiven Stoffes strahlenbedingt in diesem Organ deterministische Effekte auftreten. Dies ist z.B. in Schilddrüsengewebe bei therapeutischer Applikation von Radio-(I-131)iod nicht auszuschließen.

Das *dosimetrische Modell* erlaubt die Berechnung der mittleren in Körperorganen und Geweben absorbierten Energie aus der Gesamtzahl der in den Organen und Geweben stattfindenden Zerfälle unter Berücksichtigung der beim Zerfall der unterschiedlichen Strahlenarten emittierten Energie und dem Bruchteil der in den Organen und Geweben absorbierten Energie. Dieser sog. absorbierte Bruchteil wird für mathematisch formulierte Organ- und Körperphantome oder für in realen computertomographischen Untersuchungen abgeleitete Voxel-Phantome mit Hilfe der Monte-Carlo-Technik berechnet und alters- und energieabhängig als sog. Spezifische Effektive Energie SEE für unterschiedliche Source-Target-Paare angegeben.

### **Konzept der internen Dosimetrie**

Das Konzept der Ermittlung der Strahlenexposition durch in den Körper aufgenommene radioaktive Stoffe besteht derzeit noch ausschließlich aus der Berechnung der Äquivalentdosis aus den Werten der Energiedosis in Organen mit Hilfe der Strahlungswichtungsfaktoren bzw. der effektiven Dosis aus den Werten der Äquivalentdosis in

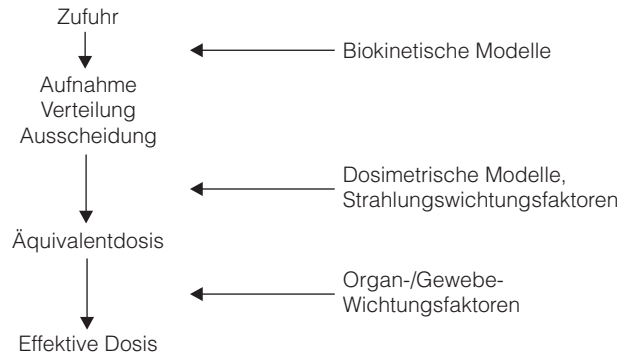


Abb. 1: Ermittlung der effektiven Dosis aus der Zufuhr.

den Organen und den Organ-/Gewebewichtungsfaktoren der ICRP. Ist die Zufuhr eines radioaktiven Stoffes bekannt, kann je nach Expositionspfad (Inhalation, Ingestion, Injektion) und den Expositionsbedingungen (Größe des inhalierten radioaktiven Aerosols und dessen chemische Verbindung, chemische Verbindung des in den Gastro-Intestinal-Trakt aufgenommenen radioaktiven Stoffes, Radiopharmazeutikum) die Äquivalentdosis in einzelnen Organen und/oder die effektive Dosis mit Hilfe der von der ICRP berechneten Inhalations- oder Ingestions-Dosiskoeffizienten ggf. für die sog. Referenzperson altersabhängig pro Einheit zugeführter Aktivität ( $\text{Sv Bq}^{-1}$ ) angegeben werden (Abb. 1).

Ist der Betrag der dem Körper zugeführten Aktivität nicht bekannt – was mit Ausnahme der nuklearmedizinischen Anwendung radioaktiver Stoffe beim Patienten oder Probanden im Allgemeinen der Fall ist – wird aus der zeitabhängigen Messung der Organ- oder Körperaktivität bzw. der ausgeschiedenen Aktivität mit Hilfe entsprechender biokinetischer Modelle durch Rückextrapolation auf den tatsächlichen oder vermuteten Zeitpunkt der Inkorporation die Aufnahme eines radioaktiven Stoffes und daraus dessen Zufuhr berechnet [12]. Anschließend werden – wie oben beschrieben – mit den entsprechenden Dosiskoeffizienten die Äquivalentdosen bzw. die effektive Dosis ermittelt (s. Abb. 2).

Die Rekonstruktion der Aufnahme eines radioaktiven Stoffes durch Inhalation im Rahmen der retrospektiven Dosimetrie kann durchaus schwierig sein: Gründe hierfür sind die Unsicherheit der Kenntnis der Zufuhr des Radionuklids, der chemischen Form und der Größe des radioaktiven Aerosols. Deshalb und für Zwecke des praktischen Strahlenschutzes bei der beruflichen Strahlenexposition wurde in einer kürzlich publizierten Arbeit von Berkovski et al. [25] der Vorschlag einer direkten Dosisrekonstruktion auf der Grundlage einer sog. aggregierten zeitabhängigen Funktion „Dosis pro Einheit Organ- oder Körperaktivität“ oder „Dosis pro Einheit täglicher Ausscheidungsrate“ gemacht. Mit Hilfe dieser Referenzfunktionen, die invariant sind hinsichtlich des aerodynamischen Durchmessers des Aerosols und auf die jeweiligen Expositionsbedingungen angepasst werden können, ist es möglich, die Dosis direkt zu rekonstruieren und dabei die Unsicherheit des Betrages der so berechneten Dosis anzugeben. Die Anwendbarkeit dieses Verfahrens in der Strahlenschutzpraxis muss jedoch noch untersucht und belegt werden.

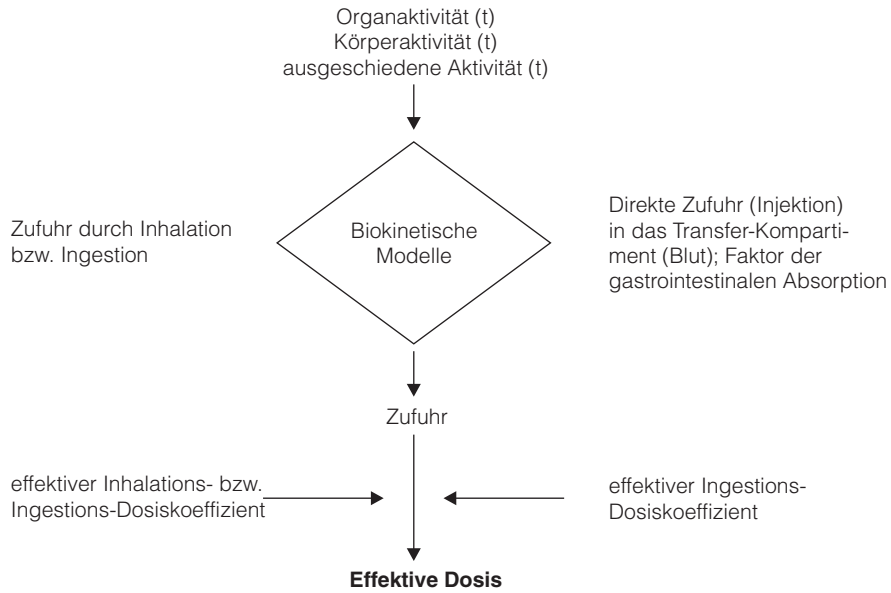


Abb. 2: Ermittlung der Zufuhr und der daraus resultierenden effektiven Dosis aus der gemessenen Aktivität.

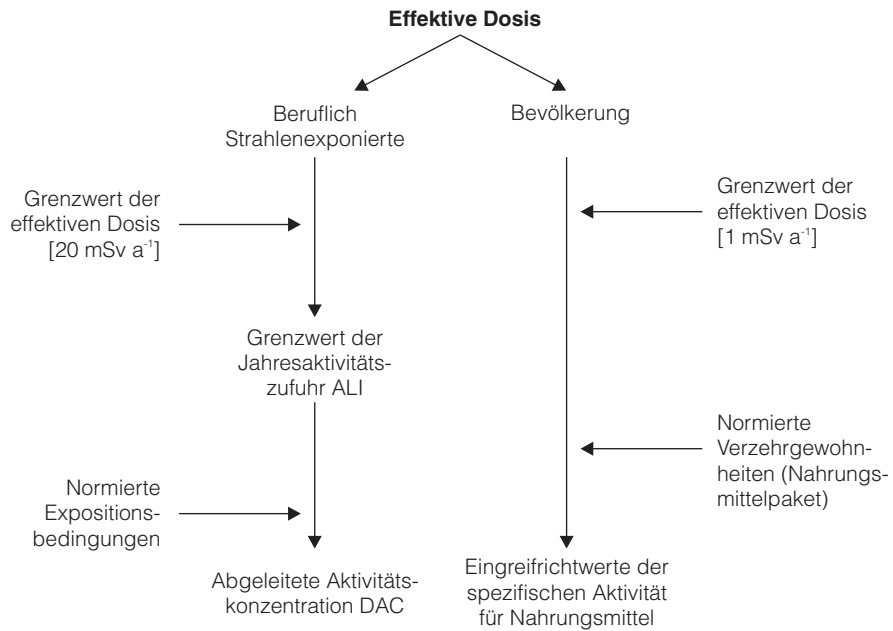


Abb. 3: Ermittlung abgeleiteter Größen aus der effektiven Dosis.

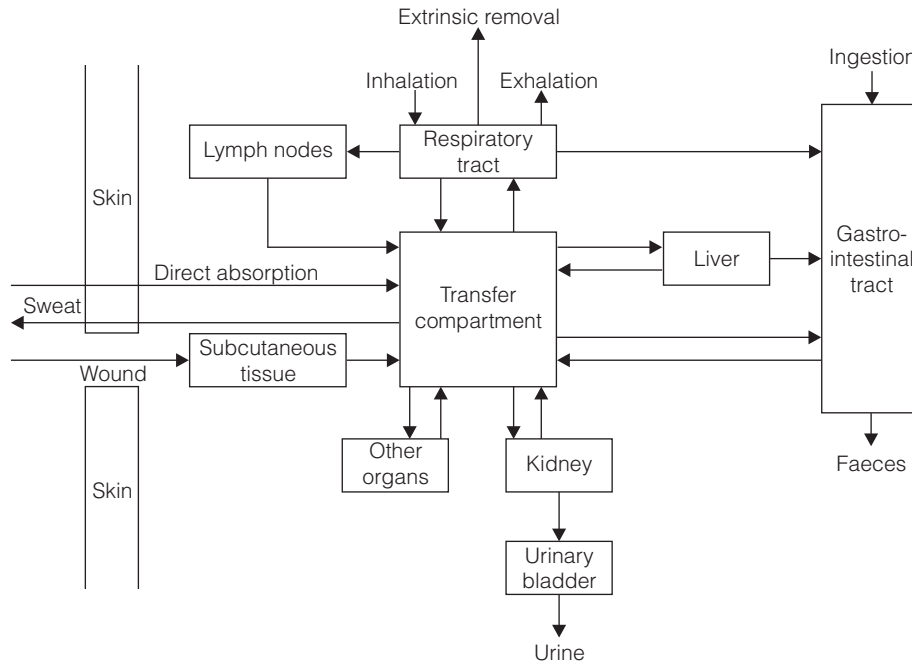


Abb. 4: Allgemein gültiges Modell für die Beschreibung der Transportwege für radioaktive Stoffe im Organismus (ICRP [12]).

Ebenfalls für den praktischen Strahlenschutz (s. Abb. 3) können für beruflich Strahlenexponierte aus den Inhalations- bzw. Ingestions-Dosiskoeffizienten und dem Grenzwert der effektiven Jahresdosis von 20 mSv der Grenzwert der Jahresaktivitätszufuhr ALI (Annual Limit of Intake) bzw. für normierte Expositionsbedingungen sog. Abgeleitete Aktivitätskonzentrationen in Luft DAC (Derived Activity Concentrations) bestimmt werden. Für die Bevölkerung können aus den entsprechenden altersabhängigen Ingestions-Dosiskoeffizienten mit dem Grenzwert der effektiven Jahresdosis von 1 mSv und normierte Verzehrsgewohnheiten (Nahrungsmittelpaket) radionuklidabhängige Eingreifrichtwerte der spezifischen Aktivität (in Richtlinien häufig fälschlicherweise auch „Grenzwerte“ der Radioaktivität für Nahrungsmittel genannt) abgeleitet werden.

## Biokinetische Modelle und Daten

Der Transport eines radioaktiven Stoffes im Körper nach dessen Zufuhr durch Inhalation, Ingestion, Diffusion durch die intakte Haut bzw. durch Wunden kann vereinfacht mit einem allgemein gültigen Kompartiment-Modell beschrieben werden. Nach ICRP [12] sieht dies gemäß Abbildung 4 den direkten Transfer eines durch Inhalation dem Körper zugeführten Aerosols aus dem Atemtrakt bzw. eines durch Ingestion vom Gastro-Intestinal-Trakt aufgenommenen radioaktiven Stoffes in das Transfer-Kompartiment oder indirekt über Lymphknoten bzw. über den Gastro-Intestinal-Trakt (Inhalation) sowie über die Leber (Ingestion) vor. Bei Hautkontaminationen diffundiert der radioak-

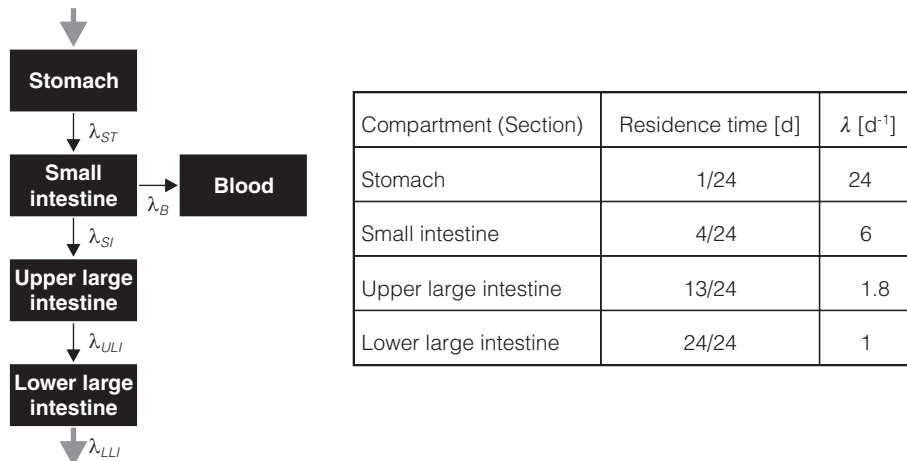


Abb. 5: Gastro-Intestinal-Trakt-Modell (ICRP [1]).

tive Stoff direkt durch die ungeschädigte Haut in das Transfer-Kompartiment bzw. bei geschädigter Haut durch eine Wunde über subkutanes Gewebe dorthin. Vom Transfer-Kompartiment aus findet ein Austausch mit Organen statt, wobei grundsätzlich das Rezyklieren des Radionuklids vorgesehen ist. Über die Niere bzw. aus dem Gastro-Intestinal-Trakt wird der nicht resorbierte Anteil des dem Körper zugeführten Radionuklids ausgeschieden.

Die ICRP hat folgende biokinetischen Modelle entwickelt und hierzu die für die Berechnung der internen Dosiskoeffizienten erforderlichen biokinetischen Daten als Referenzwerte angegeben:

- Gastro-Intestinal-Trakt-Modell für beruflich Strahlenexponierte, die Bevölkerung und die medizinische Anwendung von Radiopharmazeutika;
- Atemtrakt-Modell für beruflich Strahlenexponierte unter unterschiedlicher körperlicher Belastung, alters- und geschlechtsabhängig für die Bevölkerung sowie für die medizinische Anwendung bei der Inhalation von Aerosolen bzw. Gasen und Dämpfen;
- Modell für den systemischen Transport mit und ohne Rezyklierung des Radionuklids zwischen Organen, für alle Anwendungsfälle, und
- Modell für die Ausscheidung, ebenfalls für alle Expositionsbedingungen, bevorzugt jedoch für die berufliche Exposition, allerdings nicht altersabhängig.

### Gastro-Intestinal-Trakt-Modell

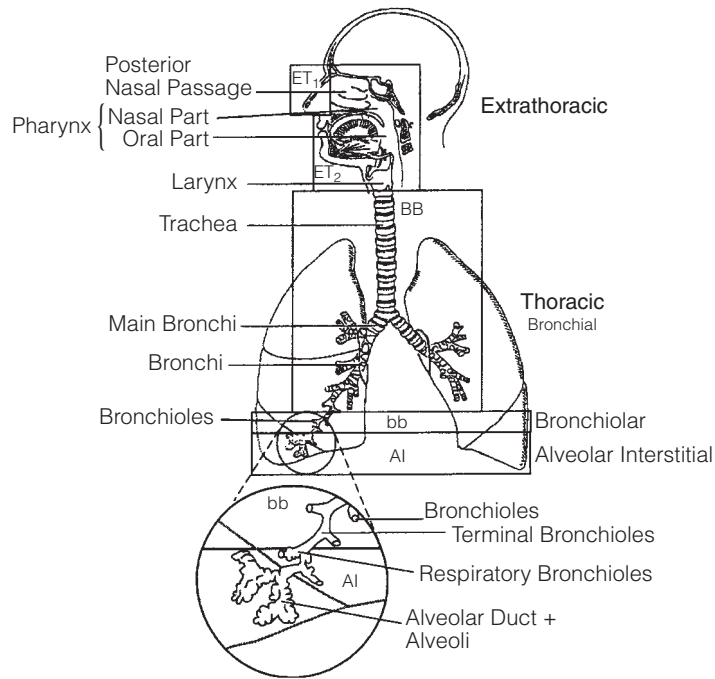
Das die gastro-intestinale Absorption von radioaktiven Stoffen beschreibende Modell der ICRP wurde von Evans bereits 1966 entwickelt [1] und ist Grundlage der seit der ICRP 30 Publikation veröffentlichten Dosiskoeffizienten, die entweder die Dosis aus der unmittelbaren Absorption von radioaktiven Stoffen aus dem Gastro-Intestinal-Trakt beschreiben oder aus deren Absorption nach Inhalation und partiellem Transfer vom



Tab. 1: Beispiele für die gastro-intestinale Absorption von Elementverbindungen ( $1 \times 10^{-5} \leq f_1 \leq 1$ ) (ICRP [1–3, 8]).

Element	Chemische Verbindung	Gastro-intestinale Absorption $f_1$ (Klasse)
Tritium	$^3\text{H}_2\text{O}$	
Iod	alle Verbindungen	$f_1 = 1$
Caesium	alle Verbindungen	
Strontium	nicht spezifizierte Verbindungen	
Plutonium	alle Verbindungen	$0,1 \leq f_1 \leq 0,5$
Radium	alle Verbindungen	
Ruthenium	alle Verbindungen	
Strontium	Titanat	
Uran	nicht spezifizierte Verbindungen	$0,002 \leq f_1 \leq 0,05$
Niob	die meisten tetravalenten Verb. alle Verbindungen	
Cer	alle Verbindungen	
Plutonium	nicht spezifizierte Verbindungen	
Americium	alle Verbindungen	$1 \times 10^{-5} \leq f_1 \leq 5 \times 10^{-4}$
Curium	alle Verbindungen	
Thorium	Oxide, Hydroxide	
Plutonium	Nitrate, unlösliche Oxide	

Atemtrakt in den Gastro-Intestinal-Trakt. Das Modell besteht aus den vier Kompartimenten Magen, Dünndarm, oberer Dickdarm und unterer Dickdarm (s. Abb. 5), durch die die radioaktiven Stoffe abhängig von den für das Modell angenommenen normierten Aufenthaltsdauern unidirektional, d.h. ohne Rezyklierung, transportiert werden. Charakteristikum des Modells ist, dass ein Bruchteil des aufgenommenen radioaktiven Stoffes abhängig von seinen physikalisch-chemischen Eigenschaften aus dem Dünndarm in das Transfer-Kompartiment – das Blut – übertritt und anschließend dem systemischen Transport unterliegt. Das Modell vermag das altersabhängige Verhalten eines in den Gastro-Intestinal-Trakt aufgenommenen radioaktiven Stoffes nur bedingt, d.h. nur durch altersabhängige Werte der gastro-intestinalen Absorption, zu beschreiben und berücksichtigt nicht andere Komponenten des gesamten Vorganges der Aufnahme und Verdauung. Deshalb wird z.Z. vom Komitee 2 der ICRP ein neues Modell des Verdauungstraktes entwickelt, das auch die anderen an der Biokinetik gastro-intestinal aufgenommenener radioaktiver Stoffe beteiligten Organe und Gewebe an dem Transport zum Transfer-Kompartiment bzw. an der Ausscheidung betrachtet. Es sind dies die Mundhöhle mit den Zähnen, den Speicheldrüsen und dem Pharynx, der Oesophagus, der Magen, der Dünndarm einschließlich Duodenum, Jejunum und Ileum, alle Abschnitte des Dickdarms, das Rektum und der Analkanal, sowie die biokinetischen Daten, die den Transport der radioaktiven Stoffe durch die einzelnen Kompartimente



Generation	Anatomy	Region	
		New	Old
	Nose, Mouth, Pharynx, Larynx, Esophagus	ET <sub>1</sub>	
		ET <sub>2</sub>	LN <sub>ET</sub> (N P)
0	Trachea		
1	Main Bronchi		
2-8	Bronchi	BB	(T B)
9-14	Bronchioles		
15	Terminal Bronchioles	bb	LN <sub>TH(c)</sub>
16-18	Respiratory Bronchioles		P
(c)	Alveolar Ducts	AI	
(c)	Alveolar Sacs		
	Lymphatics		L

Abb. 6: Atemtrakt-Modell: Morphometrisches Modell (ICRP [6]).

Tab. 2: Atemparameter als Funktion der körperlichen Betätigung (ICRP [6, 16]).

Aktivität	Alter					
	1 a			Erwachsener		
	Zeit [h d <sup>-1</sup> ]	Atemfrequenz [min <sup>-1</sup> ]	Atemrate [m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ]	Zeit [h d <sup>-1</sup> ]	Atemfrequenz [min <sup>-1</sup> ]	Atemrate [m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ]
Schlafen	14,0	34	0,15	8,0	12	0,45
Sitzen	3,33	36	0,22	6,0	12	0,54
Leichte Beschäftigung/Arbeit	6,67	46	0,35	9,75	20	1,5
Starke Beschäftigung/Arbeit	–	–	–	0,25	26	3,0

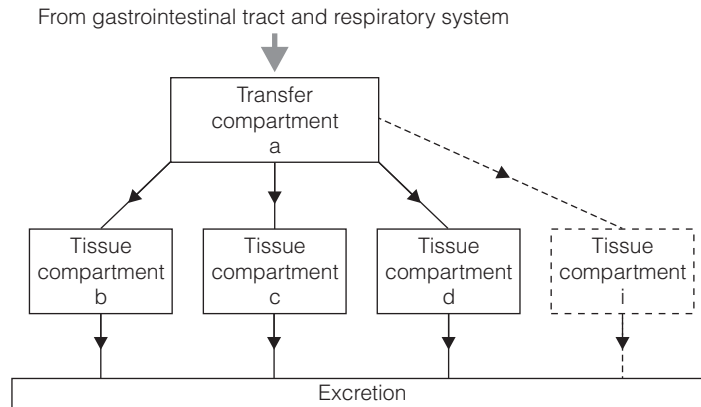
als Funktion der Zeit charakterisieren. Diese Daten beruhen insbesondere auf Ergebnissen nicht-invasiver, vor allem szintigraphischer, Untersuchungen am Menschen und erlauben es, die Alters- und Geschlechtsabhängigkeit der gastro-intestinalen Absorption von radioaktiven Stoffen zu beschreiben. Darüber hinaus fließen in die Berechnungen der Ingestions-Dosiskoeffizienten neuere Erkenntnisse über die Morphologie risikorelevanter Zellen in den verschiedenen Abschnitten des Verdauungstraktes ein.

Das derzeitige Modell des Gastro-Intestinal-Traktes nimmt für die radioaktiven Stoffe, abhängig von ihren chemischen Eigenschaften, Werte der gastro-intestinalen Absorption aus dem Dünndarm zwischen 1 (beispielsweise Verbindungen von H-3, I, Cs) und 10<sup>-5</sup> (wie Verbindungen von Ce, Pu, Am, Cu, Th) an (s. Tab. 1).

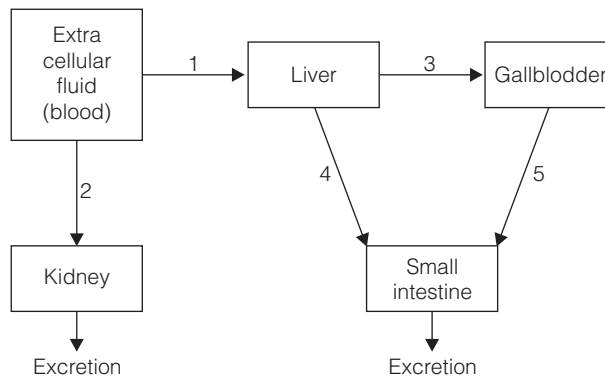
### Atemtrakt-Modell

Das Atemtrakt-Modell der ICRP von 1994 [6] beschreibt die Aufnahme, Deposition, den Transport von Aerosolen, Gasen und Dämpfen im Atemtrakt und deren Ausscheidung aus dem Atemtrakt in andere Körperregionen. Es erlaubt, die aus der Aufnahme der radioaktiven Aerosole, Gase und Dämpfe resultierende Dosis in den Lungen-Kompartimenten und darüber hinaus unter Berücksichtigung des Transports der Radionuklide aus dem Transfer-Kompartiment in andere Organe einschließlich der Ausscheidung alters- und von der körperlichen Aktivität abhängig mit Hilfe von Inhalations-Dosiskoeffizienten zu berechnen [16]. Komponenten des Modells (s. Abb. 6) sind:

- das *Morphometrische Modell*, das die Regionen, die Größe und Formen der Organe und Gewebe,
- das *Physiologische Modell*, das die Atemparameter als Funktion von Alter und körperlicher Aktivität sowie
- das *Depositions-Modell*, das die regionale Deposition inhalierter Aerosole beschreibt;



a) Beispiele: Tritium, Caesium, Cobalt



b) Beispiele: I-131-Bengalrosa, Tc-99m-markierte-IDA-Derivate

Abb. 7: Systemischer Transfer: Unidirektional sequentiell (a) und/oder parallel (b) zwischen Organen/Geweben (ICRP [1, 4]).

- das *Clearance-Modell*, das der Quantifizierung der regionalen Retention deponierter Aerosole und deren Translokation in andere Körperregionen (GI-Trakt, Blut usw.) dient und
- das *Dosimetrische Modell*, das schließlich die Berechnung der Werte der Äquivalentdosis der Organe sowie der effektiven Dosis in Form von Inhalations-Dosiskoeffizienten erlaubt.

Exemplarisch für die Leistungsfähigkeit des Physiologischen Modells zeigt Tabelle 2 die Atemparameter für 1 Jahr alte Kinder sowie Erwachsene der Bevölkerung als Funktion der Dauer der körperlichen Betätigung, ausgedrückt durch die Parameter Atemfrequenz und Atemrate.

### **Modelle für den systemischen Transfer**

Im einfachsten Fall, der gleichförmigen Verteilung von Radionukliden im Organismus wie Tritium, Caesium oder Cobalt, wird von der ICRP wie für die Beschreibung des Transports von radioaktiven Stoffen durch die Kompartimente des Gastro-Intestinal-Trakts angenommen, dass der Transfer von Radionukliden im Organismus aus dem Transfer-Kompartiment in Organe unidirektional, d.h. ohne Annahme einer Rezyklisierung, stattfindet (s. Abb. 7) [1]. Dieses Verhalten charakterisiert auch die Biokinetik von Radiopharmazeutika wie I-131-Bengalrosa oder Tc-99m-markierten IDA-Derivaten, wengleich hier ein unidirektional sequentieller und/oder paralleler Transfer angesetzt wird [4].

Wegen des komplexen Aufbaus von Knochengewebe (organische Matrix aus Kollagen, anorganische Grundsubstanz aus Calciumhydroxidapatit) und des dadurch bedingten komplexen biokinetischen Verhaltens von sog. osteotropen Radionukliden wie Calcium, Strontium und anderen Erdalkalielelementen sowie der Aktiniden hat die ICRP [5, 7, 9] hierfür spezielle biokinetische Modelle entwickelt, die durch den Transfer dieser Radionuklide in die Kompartimente der organischen und mineralischen Matrix des Skeletts und zwischen diesen charakterisiert sind, und hierfür die für die formale Beschreibung der Biokinetik erforderlichen biokinetischen Daten angegeben. Abbildung 8 vermittelt einen Eindruck von der Komplexität dieser Modelle für die Erdalkalielelemente einschließlich Blei und Uran sowie für die Aktiniden und Thorium. Dies bedeutet, dass es sich bei diesen speziellen Modellen um physiologisch begründete Modelle handelt, d.h. um Modelle, die u.a. das Knochenwachstum und den Knochenumbau als Funktion des Alters berücksichtigen. Auch für die biokinetische Beschreibung des Verhaltens von in den Körper aufgenommenem Eisen hat die ICRP ein komplexes Modell entwickelt, das durch rezyklierenden Stofftransport zwischen Organen und Geweben charakterisiert ist [9].

### **Modell zur Beschreibung des Transfers von Radionukliden während der Schwangerschaft**

Abbildung 9 zeigt nach ICRP [14] schematisch das biokinetische Modell, mit dem der Transfer eines Radionuklids im mütterlichen Organismus und von dort in den foetalen Kreislauf zwischen beiden formal beschrieben werden kann, sofern die hierfür erforderlichen biokinetischen Daten verfügbar sind. Dies ist jedoch nur für wenige Radionuklide und fast ausschließlich aus tierexperimentellen Untersuchungen bekannt, sodass die Energiedosis des Embryo als identisch der Uterusdosis angenommen und die Energiedosis des Foetus als Folge der Radionuklidzufuhr bei der Mutter zu verschiedenen Zeiten nach der Konzeption als Näherung aus dem Verhältnis der Aktivitätskonzentrationen des foetalen und mütterlichen Organismus berechnet werden musste. Tabelle 3 fasst in Anlehnung an ICRP [14] diese Konzentrationsverhältnisse für verschiedene Elemente bei Zufuhr vor bzw. während der Schwangerschaft nach Klassen zusammen, die zwischen 1 und 2 – also maximal 2-fache Aktivitätskonzentration des foetalen Gewebes – bzw. 0,01 und 0,2 liegen.

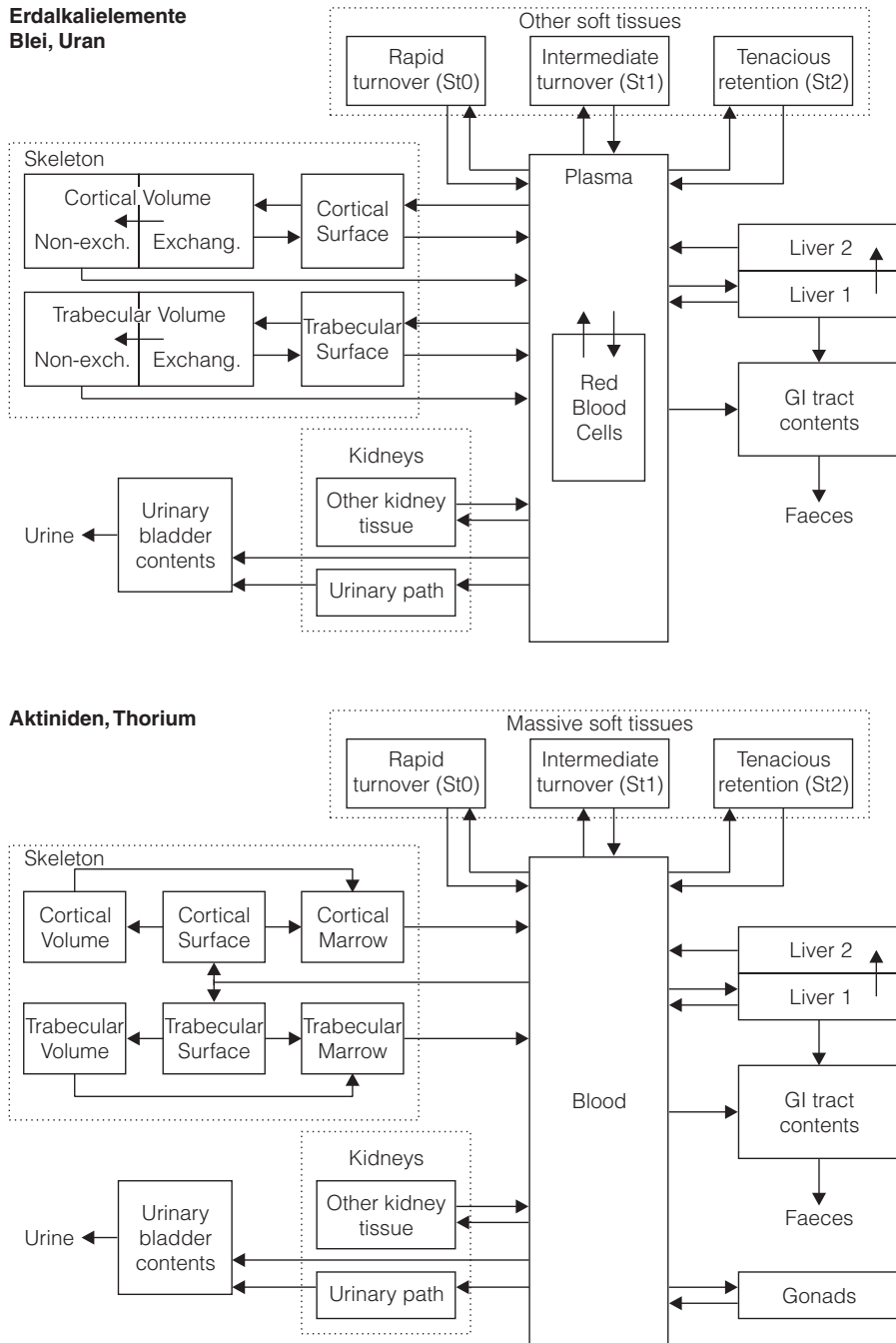


Abb. 8: Systemischer Transfer: Recycling (ICRP [7, 9]).

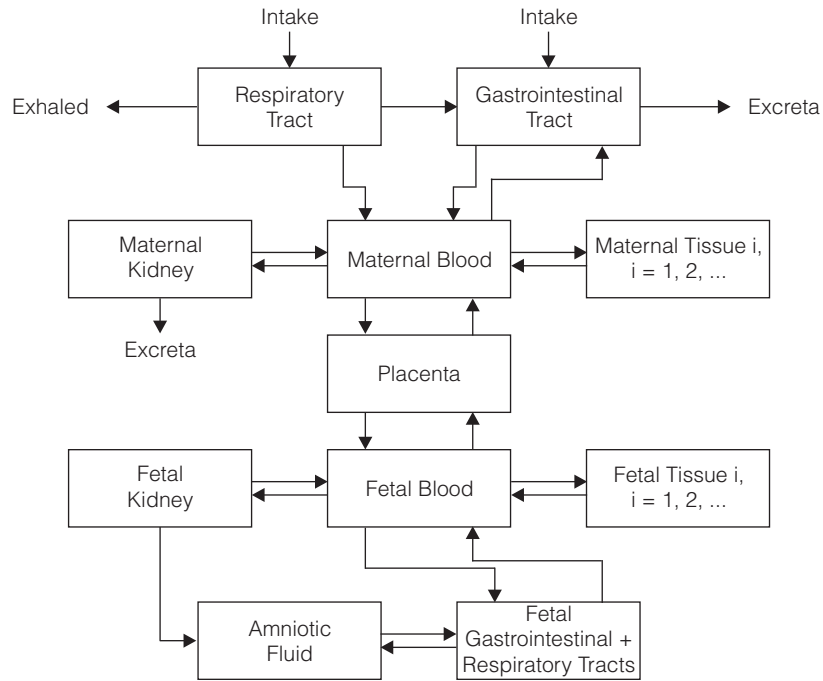


Abb. 9: Maternal-foetaler Transfer von Radionukliden (ICRP [14]). Quellen embryonaler/foetaler Strahlenexposition: maternales/foetales Blut; maternale/foetale Gewebe; Placenta.

Tab. 3: Beispiele für das Konzentrationsverhältnis von Elementen im Foetus (F) und in der Mutter (M) ( $0,01 \leq C \leq 2$ ) (nach ICRP [14]).

Element	Konzentrationsverhältnis $C = C_F : C_M$ (Klasse) bei Zufuhr vor/während der Schwangerschaft
Schwefel	
Zink	
Tritium ( $^3\text{H}_2\text{O}$ )	$1 \leq C \leq 2$
organischer Kohlenstoff	
Caesium	
Plutonium (1. und Ende des 2./3. Trimesters)	
Zirkonium	
Ruthenium	
Americium	$0,01 \leq C \leq 0,2$
Cer	

## Dosimetrische Modelle

Die Äquivalentdosisleistung  $\dot{H}_T$  zum Zeitpunkt  $t$  in einem Organ oder Gewebe (Target T) als Folge des Zerfalls eines Radionuklids in einem Source-Organ oder Source-Gewebe (Source S) ist direkt proportional der in dem Source-Organ oder Source-Gewebe zu dieser Zeit vorhandenen Aktivität des Radionuklids und der pro Zerfall aus einem Source-Organ/ -Gewebe emittierten und im Target absorbierten Energie, ausgedrückt durch die sog. Spezifische Effektive Energie SEE:

$$\dot{H}_T(t, t_0)_j = c \times \sum_S \sum_i q_{S,j}(t) \times SEE(T \leftarrow S; t)_i$$

$$SEE(T \leftarrow S; t)_i = \sum_i \frac{w_{R,i} \times y_i \times E_i \times AF(T \leftarrow S; t)_i}{M_T(t)}$$

$t_0$	Alter zum Zeitpunkt der Radionuklidzufuhr $j$
$q_{S,j}(t)$	Aktivität im Source-Organ S zur Zeit $t$
$SEE(T \leftarrow S; t)$	Spezifische Effektive Energie im Target-Organ T pro Kernumwandlung im Source-Organ S
$w_R$	Strahlungswichtungsfaktor einer Strahlungsart $i$
$y_i$	Emissionswahrscheinlichkeit einer Strahlungsart $i$
$E_i$	Energie einer Strahlungsart $i$ pro Zerfall
$AF(T \leftarrow S; t)$	Absorbierter Bruchteil einer Strahlungsart $i$
$M_T(t)$	Masse des Target-Organs T

Außer von dem Betrag des Strahlungswichtungsfaktors, der beim Zerfall eines Radionuklids emittierten Strahlung und von deren Energie und Emissionswahrscheinlichkeit hängt die Spezifische Effektive Energie von dem Körperphantom, den im Phantom vorhandenen Organphantomen und Organgeweben, von der effektiven Ordnungszahl der Organe bzw. Gewebe, von deren Anordnung zueinander sowie von deren Form und Masse ab. Form sowie Anordnung der Organe und Gewebe im Phantom und das Körperphantom selbst wurden vom Medical Internal Radiation Dose Committee MIRD [31] mathematisch beschrieben bzw. werden aus computertomographisch an Patienten gewonnenen Voxel-Phantomen [36] mathematisch abgeleitet (s. Abb.10). Auf der Grundlage dieser Körper- und Organphantome wurden bzw. werden alters- und energieabhängige Werte der Spezifischen Effektiven Energie mit Hilfe der Monte-Carlo-Technik berechnet.

Die effektive Dosis des beruflich Strahlenexponierten pro Einheit zugeführte Aktivität und damit die effektiven Dosiskoeffizienten für Inhalation und Ingestion wurden als Folgedosen durch Integration der Äquivalentdosisleistung über eine Zeitdauer von 50 Jahren unter Berücksichtigung der Organ- und Gewebewichtungsfaktoren der ICRP ermittelt [8]. Entsprechend wurden die Dosiskoeffizienten für die Bevölkerung berechnet, allerdings altersabhängig und durch Integration der jeweiligen Äquivalentdosisleistung über die Dauer vom Zeitpunkt der Zufuhr des radioaktiven Stoffes bis zum Alter von 70 Jahren (effektive 70-Jahre-Folgedosis) [5, 7, 9–11]. Bei der nuklearmedizinischen Anwendung von Radiopharmazeutika handelt es sich immer um Verbindungen



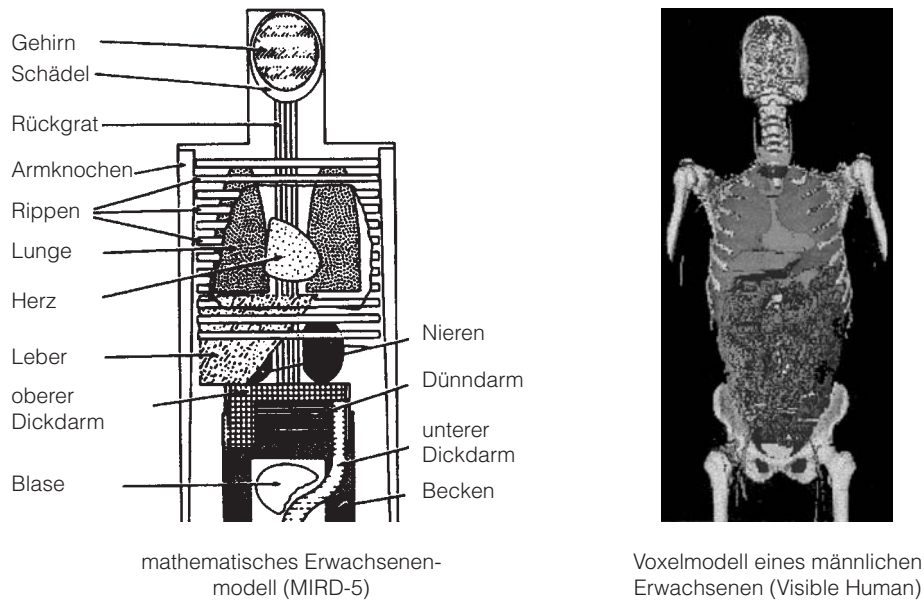


Abb. 10: Ansicht ausgewählter Organe von Rechen- (MIRD [31]) und Voxelmodellen [36] des menschlichen Körpers zur Berechnung Spezifischer Effektiver Energien SEE.

mit Radionukliden mit vergleichsweise kurzer physikalischer Halbwertszeit, sodass die Integration der Äquivalentdosisleistung bis zum vollständigen physikalischen Zerfall, d.h. zum Zeitpunkt „unendlich“, erfolgt. Die effektiven Dosiskoeffizienten wurden – wie für die Bevölkerung – altersabhängig berechnet [4, 13].

Das dosimetrische Modell der ICRP [14] zur Berechnung der aus der Strahlenexposition einer Mutter während der Schwangerschaft resultierenden effektiven Dosis des Neugeborenen bis zum 70. Lebensjahr berücksichtigt den Zeitpunkt der Zufuhr eines Radionuklids vor und während der Schwangerschaft, die Zeitdauer der embryonalen Strahlenexposition vom Zeitpunkt der Konzeption bis zum Zeitpunkt 8 Wochen danach, die Zeitdauer der foetalen Entwicklung zwischen der 8. und 38. Woche nach Konzeption sowie die postnatale Zeitdauer bis zum 70. Lebensjahr des Neugeborenen:

$$H_T = \int_0^{8 \text{ w}} \dot{H}_{\text{Uterus}}(t) dt + \int_{8 \text{ w}}^{38 \text{ w}} \dot{H}_{\text{T, Foetus}}(t) dt + \int_{t_0}^{70 \text{ a}} \dot{H}_{\text{T, post natal}}(t) dt$$

0	Zeitpunkt der Konzeption
8 w	Zeitpunkt des Endes der Embryonalperiode
38 w	Zeitpunkt des Schwangerschaftsendes
$t_0$	Zeitpunkt der Geburt
70 a	Obergrenze für die Integration zur Berechnung der Folgedosis bei Exposition von Einzelnen der allgemeinen Bevölkerung

Tab. 4: Effektive Inhalations-Dosiskoeffizienten beruflich Exponierter für ausgewählte radioaktive Aerosole (5  $\mu\text{m}$  AMAD) (ICRP [8]).

Radionuklid	Inhalationstyp	Effektiver Dosiskoeffizient [Sv Bq <sup>-1</sup> ]
<sup>3</sup> H <sub>2</sub> O		1,8 x 10 <sup>-11</sup>
Cs-137	F	6,7 x 10 <sup>-9</sup>
Co-60	M	7,1 x 10 <sup>-9</sup>
I-131	F	1,1 x 10 <sup>-8</sup>
Ce-144	M	2,3 x 10 <sup>-8</sup>
Sr-90	F	3,0 x 10 <sup>-8</sup>
U-235	M	1,8 x 10 <sup>-6</sup>
Pu-239	S	8,3 x 10 <sup>-6</sup>
Am-241	M	2,7 x 10 <sup>-5</sup>

## Ergebnisse

### Beruflich Strahlenexponierte

Auf der Grundlage der oben beschriebenen biokinetischen Modelle und von Referenzwerten für biokinetische Daten wurden von der ICRP Inhalations- und Ingestions-Dosiskoeffizienten berechnet und in der Publikation 68 als Effektivdosiswerte in Sv pro Bq tabellarisch angegeben [8]. Exemplarisch und für den bei beruflicher Strahlenexposition wichtigsten Expositionspfad Inhalation sind in Tabelle 4 für ausgewählte Radionuklide in Form von Aerosolen mit einem Aktivitätsmedianwert des aerodynamischen Durchmessers AMAD von 5  $\mu\text{m}$  die effektiven Dosiskoeffizienten für verschiedene die Absorption im Atemtrakt beschreibende Inhalationstypen (F: fast; M: moderate; S: slow) zusammengestellt. Danach liegt der Betrag der effektiven Dosis pro Einheit zugeführter Aktivität zwischen 10<sup>-11</sup> (<sup>3</sup>H<sub>2</sub>O) und 10<sup>-5</sup> (Am-241) Sv pro Bq.

Das entsprechende strahlenbedingte Krebsmortalitätsrisiko beträgt mit einem Risikofaktor für berufliche Strahlenexposition von 5 x 10<sup>-4</sup> und bei Zufuhr von 100 kBq durch Inhalation etwa 1 : 10 bis 1 : 10<sup>7</sup>, d.h. die Inhalation von 100 kBq der Transurane Am-241 und Pu-239 ist mit einem rechnerischen Krebsmortalitätsrisiko 1. Ordnung, das der übrigen genannten Radionuklide mit einem Risiko 4. (Sr-90 bis I-131) bis 7. Ordnung (<sup>3</sup>H<sub>2</sub>O) verbunden (s. Tab. 5) [32].

### Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung

Entsprechend dem für berufliche Exposition Gesagten wurden von der ICRP Referenzwerte für Ingestions- und Inhalations-Dosiskoeffizienten berechnet und altersabhängig (3 Monate alte als repräsentativ für Neugeborene, 1, 10, 15 Jahre alte und Erwachsene) als Organdosen und effektive Dosen pro Einheit zugeführter Aktivität publiziert [5, 7, 9–11]. Wiederum exemplarisch für die wichtigsten, möglicherweise unfallbedingt in die Umwelt gelangenden und mit der Nahrung aufgenommenen Radionuklide sind in

Tab. 5: Rechnerisches Krebsmortalitätsrisiko nach Inhalation verschiedener radioaktiver Aerosole ( $5 \mu\text{m AMAD}$ ) durch beruflich Strahlenexponierte [32].

Radionuklid	Inhalationstyp	Krebsmortalitätsrisiko pro 100 kBq inhaliert
Am-241	M	1 : 12
Pu-239	S	1 : 26
Sr-90	F	1 : 9.300
Ce-144	M	1 : 9.600
Cs-137	F	1 : 37.000
I-131	F	1 : 78.000
$^3\text{H}_2\text{O}$	vollständige Absorption in der Lunge	1 : $10^7$

Tab. 6: Effektive Ingestions-Dosiskoeffizienten für Erwachsene der Bevölkerung (ICRP [11]).

Radionuklid	Effektiver Dosiskoeffizient [ $\text{Sv Bq}^{-1}$ ]
Nb-95	$5,8 \times 10^{-10}$
Zr-95	$9,5 \times 10^{-10}$
Co-60	$3,4 \times 10^{-9}$
Ce-144	$5,2 \times 10^{-9}$
Ru-106	$7,0 \times 10^{-9}$
Cs-137	$1,3 \times 10^{-8}$
Cs-134	$1,9 \times 10^{-8}$
I-131	$2,2 \times 10^{-8}$
Sr-90	$2,8 \times 10^{-8}$
Am-241	$2,0 \times 10^{-7}$
Pu-239	$2,5 \times 10^{-7}$

Tabelle 6 effektive Ingestions-Dosiskoeffizienten für den Erwachsenen zusammengestellt. Danach liegt der Betrag der effektiven Dosis zwischen etwa  $10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1}$  (Nb-95, Zr-95, Co-60, Ce-144, Ru-106) und etwa  $10^{-7} \text{ Sv Bq}^{-1}$  (Am-241 und Pu-239). In praktischer Anwendung auf die Begrenzung der Zufuhr von mit Cs-137 unfallbedingt kontaminierten Nahrungsmitteln auf  $600 \text{ Bq kg}^{-1}$  gemäß den Richtlinien der Europäischen Gemeinschaften vom 30. Mai 1986 als Folge des Reaktorunfalls von Tschernobyl [29] ergibt sich mit dem Ingestions-Dosiskoeffizienten von  $1,3 \times 10^{-8} \text{ Sv Bq}^{-1}$  für Cs-137 die Gesamtmasse entsprechend maximal kontaminierter Lebensmittel zu etwa 130 kg, bei deren Zufuhr der Grenzwert der Dosis von 1 mSv für Einzelne der Bevölkerung nicht überschritten wird.

Tab. 7: Effektiver Dosiskoeffizient der Kinder von Müttern nach akuter Zufuhr von Cs-137 per Ingestion vor bzw. während der Schwangerschaft (ICRP [14]).

Zeitpunkt der Zufuhr bei der Mutter	Effektiver Dosiskoeffizient [Sv Bq <sup>-1</sup> ]			
	in utero	post natal	70-Jahre	relativ *
2,5 Jahre vor Konzeption	$2,0 \times 10^{-12}$	$3,1 \times 10^{-14}$	$2,0 \times 10^{-12}$	$1,5 \times 10^{-4}$
0,5 Jahre vor Konzeption	$1,8 \times 10^{-9}$	$2,8 \times 10^{-11}$	$1,8 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-1}$
zum Zeitpunkt der Konzeption	$7,2 \times 10^{-9}$	$4,5 \times 10^{-11}$	$7,2 \times 10^{-9}$	0,5
in der Mitte der Schwangerschaft	$6,3 \times 10^{-9}$	$1,9 \times 10^{-10}$	$6,5 \times 10^{-9}$	0,5
am Ende der Schwangerschaft	$1,8 \times 10^{-9}$	$1,4 \times 10^{-9}$	$3,2 \times 10^{-9}$	0,2

\* effektive 70-Jahre-Folgedosis bezogen auf die Referenzdosis des Erwachsenen ( $1,3 \times 10^{-8}$  Sv Bq<sup>-1</sup>).

### Strahlenexposition in utero und post natal

Anhand von zwei Beispielen wird die effektive Dosis in utero und post natal sowie als effektive 70-Jahre-Folgedosis des Neugeborenen bei gastro-intestinaler Zufuhr durch die Mutter von 1 Bq für die Inkorporationszeitpunkte 2,5 und 0,5 Jahre vor Konzeption, zum Zeitpunkt der Konzeption, in der Mitte der Schwangerschaft und an deren Ende berechnet und relativ, d.h. auf die Referenzdosis des Erwachsenen bezogen, angegeben [14]. Beispiele sind Cs-137, das während der Entwicklung des Kindes in utero immer gleichverteilt und in identischer Konzentration bei Mutter und Kind vorliegt, sowie Sr-90, bei dem abhängig vom Alter des Foeten bei Zufuhr durch die Mutter am Ende der Schwangerschaft Strontium in foetalem Gewebe gegenüber mütterlichem Gewebe in achtmal höherer Konzentration vorhanden ist. Die Ergebnisse in den Tabellen 7 und 8 machen deutlich, dass die relative effektive 70-Jahre-Folgedosis bei Zufuhr von Cs-137 durch die Mutter maximal 50% der der Mutter beträgt, während die effektive 70-Jahre-Folgedosis des Neugeborenen bei Zufuhr von Sr-90 durch die Mutter am Ende der Schwangerschaft um den Faktor 2,5 höher ist.

### Strahlenexposition des Neugeborenen als Folge des Stillens durch eine radioaktiv kontaminierte Mutter

Nach Untersuchungen von Harrison et al. [27] beträgt der gesamte Transfer von Radionukliden nach deren Aufnahme durch die Mutter in die Milch eines gestillten Kleinkindes bis zu 30% (I-131), bei den Transuranen Pu-239 und Am-241 weniger als 0,01%. Tabelle 9 stellt für die wichtigsten Radionuklide bei unfallbedingten Umweltkontaminationen bzw. für I-131, das auch bei der prätherapeutischen Applikation im Rahmen der Therapie der Hyperthyreose Anwendung findet, Werte des Transfers dieser Radionuklide in Prozent der Gesamtaufnahme eines Radionuklids durch die Mutter während der Stillperiode zusammen.

Tab. 8: Effektiver Dosiskoeffizient der Kinder von Müttern nach akuter Zufuhr von Sr-90 per Ingestion vor bzw. während der Schwangerschaft (ICRP [14]).

Zeitpunkt der Zufuhr bei der Mutter	Effektiver Dosiskoeffizient [Sv Bq <sup>-1</sup> ]			
	in utero	post natal	70-Jahre	relativ *
2,5 Jahre vor Konzeption	$1,9 \times 10^{-10}$	$9,6 \times 10^{-11}$	$2,9 \times 10^{-10}$	0,01
0,5 Jahre vor Konzeption	$6,4 \times 10^{-10}$	$2,2 \times 10^{-10}$	$8,6 \times 10^{-10}$	0,3
zum Zeitpunkt der Konzeption	$2,1 \times 10^{-9}$	$4,5 \times 10^{-10}$	$2,5 \times 10^{-9}$	0,1
in der Mitte der Schwangerschaft	$3,6 \times 10^{-8}$	$3,1 \times 10^{-9}$	$3,9 \times 10^{-8}$	1,4
am Ende der Schwangerschaft	$2,3 \times 10^{-8}$	$4,7 \times 10^{-8}$	$7,0 \times 10^{-8}$	2,5

\* effektive 70-Jahre-Folgedosis bezogen auf die Referenzdosis des Erwachsenen ( $2,8 \times 10^{-8}$  Sv Bq<sup>-1</sup>).

Tab. 9: Transfer von Radionukliden in die Muttermilch (nach Harrison et al. [27]).

Radionuklid	Gesamter Transfer in die Muttermilch [% der Gesamtaufnahme des Radionuklids durch die Mutter während des Stillens]
I-131	30
Ca-45	20
Cs-137	20
Sr-90	10
Po-210	1
Pu-239	< 0,01
Am-241	< 0,01

Für den Verzehr von Nahrungsmitteln mit dem bereits oben angegebenen Eingreifrichtwert der EG für Cs-137 von  $600 \text{ Bq kg}^{-1}$  und dem Ingestions-Dosiskoeffizienten von  $2,1 \times 10^{-8} \text{ Sv Bq}^{-1}$  für das drei Monate alte Kleinkind ist die Ingestion von derartig kontaminierten Nahrungsmitteln durch die Mutter auf  $400 \text{ kg}$  beschränkt, um die effektive 70-Jahre-Folgedosis des gestillten Kleinkindes von  $1 \text{ mSv}$  nicht zu überschreiten. Bei Ingestion durch eine stillende Mutter von Kuhmilch mit einer spezifischen Aktivität von maximal  $500 \text{ Bq l}^{-1}$  I-131 entsprechend dem Eingreifrichtwert des nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl für den Strahlenschutz zuständigen Bundesumweltministers vom 2. Mai 1986 [26] wäre der Grenzwert von  $1 \text{ mSv}$  des gestillten Kleinkindes erreicht, wenn die Mutter etwa  $40 \text{ l}$  der entsprechend kontaminierten Milch getrunken hätte.

In Tabelle 10 sind Werte der effektiven 70-Jahre-Folgedosis des gestillten Kleinkindes für die wichtigsten Radionuklide mit nennenswertem Transfer in die Muttermilch zusam-

Tab. 10: Effektive Dosis des gestillten Kleinkindes bei Zufuhr von Radionukliden durch die Mutter, begrenzt auf 1 mSv effektive 70-Jahre-Folgedosis der Mutter.

Radionuklid	Relative Zufuhr durch die Mutter [Bq mSv <sup>-1</sup> ]	Effektive Dosis des gestillten Kleinkindes [mSv]
I-131	4,6 x 10 <sup>4</sup>	2,7
Ca-45	140 x 10 <sup>4</sup>	3,1
Cs-137	7,7 x 10 <sup>4</sup>	0,3
Sr-90	3,5 x 10 <sup>4</sup>	0,8
Pu-239	0,4 x 10 <sup>4</sup>	< 0,2
Am-241	0,5 x 10 <sup>4</sup>	< 0,2

mengestellt mit der Voraussetzung, dass durch die Zufuhr durch die Mutter der Grenzwert der effektiven Jahresdosis von 1 mSv nicht überschritten wird. Die Werte machen deutlich, dass außer bei Ingestion von I-131 und Ca-45 die effektive Dosis des Kleinkindes unter 1 mSv bleibt, und dass die Überschreitung dieses Wertes bei Ingestion von I-131 und Ca-45 mit Lebensmitteln durch die Mutter nur maximal den Faktor 3 erreicht und damit im Bereich der Variationsbreite der jährlichen natürlichen Strahlendosis liegt.

Bei der bereits o.g. prätherapeutischen Applikation von 2 MBq I-131 im Rahmen der Planung der Radioiod-Therapie der Hyperthyreose überschreitet der Wert der effektiven Dosis des gestillten Kleinkindes von 100 mSv bei dem Ingestions-Dosiskoeffizienten von  $1,8 \times 10^{-7} \text{ Sv Bq}^{-1}$  für das drei Monate alte Kind und 30% Transfer von I-131 in die Muttermilch den Jahresgrenzwert von 1 mSv um den Faktor 100. Dies bedeutet, dass der behandelnde Arzt der Mutter dringend zu empfehlen hat, das Stillen nach Applikation von Radioiod abzusetzen.

### Nuklearmedizinisch bedingte Strahlenexposition

In Tabelle 11 sind für verschiedene untersuchte Organe und nuklearmedizinische Untersuchungsverfahren mit den hierfür angewandten Radiopharmazeutika Referenzwerte der applizierten Aktivität [28] und die daraus resultierenden Werte der effektiven Äquivalentdosis des erwachsenen Patienten zusammengestellt. Die Dosiswerte wurden für die Referenzwerte der applizierten Aktivität aus den von der ICRP angegebenen Dosiskoeffizienten [4, 13] berechnet und durch Werte der relativen, d.h. auf den Jahreswert der natürlichen Strahlendosis von 2,4 mSv bezogenen effektiven Dosis ergänzt. Mit etwa 50 mSv effektive Dosis ist die Obergrenze der nuklearmedizinisch bedingten Strahlendosis als Folge der prätherapeutischen Applikation von 2 MBq I-131 erreicht entsprechend einer relativen effektiven Dosis von 20. Nur bei wenigen Untersuchungen, vor allem des Herzens – Perfusion/Vitalität, RNV mit Tc-99m- bzw. Tl-201-markierten Radiopharmazeutika – liegt die relative effektive Dosis beim zwei- bis siebenfachen der mittleren Jahresdosis natürlichen Ursprungs. Dies bedeutet, dass mit einem Risikofaktor von  $5 \times 10^{-4} \text{ Sv}^{-1}$  das rechnerische Krebsmortalitätsrisiko für nuklearmedizinische Untersuchungen in der Größenordnung von einigen  $10^{-6}$  liegt und nur für die prätherapeutische Applikation von I-131-Iodid um den Faktor 10 höher ist.

Tab. 11: Referenzwerte der Aktivität und mittlere effektive Dosis für häufig durchgeführte nuklearmedizinische Untersuchungen im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition.

Untersuchtes Organ, Verfahren	Art der Untersuchung	Radiopharmakon	Referenzwert d. appl. Aktivität* [MBq]	Effektive Dosis Erwachsener* [mSv]	Relative effektive Dosis**
Schilddrüse	Szintigraphie	[Tc-99m]Pertechnetat	75	0,9	0,4
	Uptake, Therapieplanung (präther. Appl.)	[I-131]Iodid	(2)	48	20
Skelett	Szintigraphie – benigne Erkrankungen – maligne Erkrankungen	[Tc-99m]MDP [Tc-99m]DPD [Tc-99m]HDP	500	2,9	1,2
			700	4,0	1,7
Herz	Perfusion/Vitalität	[Tc-99m]Sestamibi, Tc-99m]Tetrofosmin – Zweitagesprot. – Eintagesprot.	600 1.000	5,1/4,4 8,7/7,5	2,1/1,8 3,6/3,1
		[Tl-201]Chlorid	75	17	7,1
		RNV	[Tc-99m]Erythrozyten	750	5,3
Nieren	Funktionsszintigraphie	[Tc-99m]MAG3 [Tc-99m]DTPA	100 150	0,7 0,74	0,3 0,3
		Szintigraphie	[Tc-99m]DMSA	70	0,62
	Lunge	Perfusion	[Tc-99m]MAA – planar – SPECT	100 200	1,1 2,2
Ventilation			[Tc-99m]Aerosol	1.000	< 1
Gehirn	Perfusion	[Tc-99m]HMPAO [Tc-99m]ECD	550 550	5,1 4,1	2,1 1,7
		PET	Glukose-Uptake	[F-18]FDG	
	– 2D Modus	370		7,0	2,9
	– 3D Modus	200	3,8	1,6	

\* nach D. Noßke et al., 2003 [28];

\*\* bezogen auf die jährliche natürliche Strahlendosis von 2,4 mSv;

( ) nach UNSCEAR 2000 [35].

## Zusammenfassung

### **Biokinetische und dosimetrische Modelle**

Für die Berechnung der internen Strahlendosis hat die ICRP biokinetische und dosimetrische Modelle entwickelt, hierfür aus publizierten Ergebnissen biokinetischer Untersuchungen Referenzwerte biokinetischer Daten abgeleitet und auf deren Grundlage Dosiskoeffizienten für die prospektive Ermittlung der Organ-Äquivalent-Dosis und effektiven Dosis bei Inhalation bzw. Ingestion z.T. alters- und geschlechtsabhängig berechnet. Biokinetische Modelle und Daten wurden auch für die Ermittlung der beruflich bedingten Inkorporation von radioaktiven Stoffen aus den Ergebnissen von Ausscheidungsmessungen mit Faeces, Urin und der Exhalationsluft erarbeitet und zwar ebenfalls für Referenzbedingungen. Diese Dosiskoeffizienten ermöglichen es, aus der bekannten Zufuhr eines Radionuklids oder – vor allem bei beruflicher Strahlenexposition – nach Berechnung der Zufuhr aus Ganz-, Teilkörper- oder Ausscheidungsmessungen die Organdosis und die effektive Dosis zu berechnen. Die Dosis von nuklearmedizinisch durch Injektion eines Radiopharmazeutikums untersuchten Patienten kann zwar grundsätzlich aus den Ingestions-Dosiskoeffizienten für Einzelne der Bevölkerung und unter Berücksichtigung der Faktoren für die gastro-intestinale Absorption, d.h. für den direkten Transfer eines Radiopharmazeutikums in das Transfer-Kompartiment Blut, ermittelt werden, die ICRP hat aber auch für die praktische Anwendung der internen Dosimetrie in der Nuklearmedizin für eine Vielzahl von Radiopharmazeutika Dosiskoeffizienten berechnet und publiziert.

Von der ICRP wurden die folgenden biokinetischen und dosimetrischen Modelle entwickelt und entsprechende Referenzwerte für prospektive Dosisberechnungen angegeben:

### ***Biokinetische Modelle***

- Gastro-Intestinal-Trakt (in Vorbereitung: Modell für den Verdauungstrakt),
- Atemtrakt,
- Systemischer Transport,
- Ausscheidung,
- Embryo/Foetus.

### ***Dosimetrische Modelle***

- Altersabhängige mathematische Organ- und Körperphantome (in Vorbereitung: alters- und geschlechtsabhängige Organ- und Körperphantome auf der Basis computertomographischer Untersuchungen an Patienten und daraus abgeleiteter Voxel-Phantome),
- alters- und geschlechtsabhängige Werte der Spezifischen Effektiven Energie SEE,
- spezielle Werte der Spezifischen Effektiven Energie für Embryo und Foetus.



### **Berufliche interne Strahlenexposition**

Die Referenzwerte der effektiven Dosis beruflich Exponierter pro Einheit zugeführter Aktivität durch Inhalation eines 5 µm Aerosols liegen für die wichtigsten Radionuklide und deren Inhalationstypen zwischen  $10^{-11}$  Sv Bq<sup>-1</sup> (<sup>3</sup>H<sub>2</sub>O) und  $10^{-5}$  Sv Bq<sup>-1</sup> (Pu-239 bzw. Am-241) entsprechend einem strahlenbedingten Krebsmortalitätsrisiko von etwa 1 :  $10^7$  und 1 : 10 bei Zufuhr von 100 kBq der jeweiligen Radionuklide.

### **Interne Strahlenexposition Einzelner der allgemeinen Bevölkerung**

Für die wichtigsten bei bestimmungsgemäßem Betrieb kerntechnischer Anlagen möglicherweise oder unfallbedingt in die Umwelt gelangenden Radionuklide und deren Aufnahme durch Einzelne der Bevölkerung liegt der Referenzwert der effektiven Dosis pro Einheit durch Ingestion zugeführter Aktivität zwischen  $10^{-9}$  Sv Bq<sup>-1</sup> (Nb-95, Zr-95, Co-60, Ce-144) und  $10^{-7}$  Sv Bq<sup>-1</sup> (Am-241, Pu-239).

Die effektive Dosis eines Neugeborenen, resultierend aus der Strahlenexposition durch die gastro-intestinale Aufnahme eines Radionuklids von 1 Bq durch die Mutter 2,5 Jahre vor und zu verschiedenen Zeiten während der Schwangerschaft, beträgt ausgedrückt als effektive 70-Jahre-Folgedosis unter Berücksichtigung der Exposition während der Embryonal- und Foetalperiode für Cs-137 als Beispiel eines während der Schwangerschaft gleichförmig in maternalem und foetalem Gewebe verteilten Radionuklids maximal 50% der Dosis der Mutter. Sie liegt bei einem Radionuklid, das stoffwechselspezifisch wie Sr-90 als osteotropes Element abhängig von der Entwicklung des Knochengewebes während der Foetalperiode kalziumäquivalent in das foetale Skelett eingelagert wird, im ungünstigsten Fall der Zufuhr von Sr-90 bei der Mutter am Ende der Schwangerschaft beim 2,5-fachen der effektiven Dosis der Mutter.

Außer für I-131 und Ca-45 liegt die effektive Dosis eines gestillten Kleinkindes durch eine Mutter nach Zufuhr von Radionukliden entsprechend einer effektiven Folgedosis von 1 mSv unter diesem Grenzwert der effektiven Dosis für Einzelne der Bevölkerung, bei Pu-239 und Am-241 sogar bei weniger als einem Fünftel. Bei I-131 und Ca-45 beträgt die effektive Dosis unter den vorstehend gemachten Annahmen maximal das 3-fache und liegt damit in der Variationsbreite der jährlichen natürlichen Strahlendosis.

### **Nuklearmedizinisch bedingte Strahlenexposition**

Für häufig durchgeführte nuklearmedizinische Untersuchungen und den dabei empfohlenen Referenzwerten der applizierten Aktivität liegt die effektive Dosis des untersuchten Patienten mit Ausnahme der Skelettszintigraphie mit Tc-99m-markierten Radiopharmazeutika und Herzuntersuchungen mit ebenfalls Tc-99m-markierten sowie mit Tl-201-markierten Radiopharmazeutika deutlich unter dem Jahreswert der effektiven Dosis natürlichen Ursprungs. Bei der Skelettszintigraphie und Herzuntersuchungen liegen die entsprechenden relativen effektiven Dosen maximal beim 7-fachen.

Ausnahme bildet die prätherapeutische Applikation von I-131-Iodid im Rahmen der Therapie der Hyperthyreose in einer Aktivität von 2 MBq, die zu einer effektiven Dosis des Patienten von etwa 50 mSv entsprechend dem 20-fachen der natürlichen Jahresdosis führt.

In diesem Fall ist es deshalb dringend indiziert, einer eventuell stillenden Mutter zu empfehlen, das Stillen nach der Radioiodzufuhr abubrechen, da durch den Übertritt von I-131 in die Muttermilch von insgesamt bis zu 30% der von der Mutter aufgenommenen Aktivität an Radioiod die effektive Dosis des Kleinkindes bis zu 100 mSv betragen kann. Dies bedeutet das 100-fache des Grenzwertes für Einzelne der Bevölkerung.

## Literatur

### ICRP-Publikationen

- [1] ICRP Publication 30, Part 1: Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. Annals of the ICRP 2, No. 3/4, Pergamon Press, 1979
- [2] ICRP Publication 30, Part 2: Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. Annals of the ICRP 4, No. 3/4, Pergamon Press, 1980
- [3] ICRP Publication 30, Part 3: Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. Annals of the ICRP 6, No. 2/3, Pergamon Press, 1981
- [4] ICRP Publication 53: Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals. Annals of the ICRP 18, No. 1–4, Pergamon Press, 1987
- [5] ICRP Publication 56: Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 1. Annals of the ICRP 20, No. 2, Pergamon Press, 1989
- [6] ICRP Publication 66: Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. Annals of the ICRP 24, No. 1–3, Pergamon Press, 1994
- [7] ICRP Publication 67: Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 2, Ingestion Dose Coefficients. Annals of the ICRP 23, Vol. 3/4, Pergamon Press, 1993
- [8] ICRP Publication 68: Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers. Annals of the ICRP 24, No. 4, Pergamon Press, 1994
- [9] ICRP Publication 69: Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 3, Ingestion Dose Coefficients. Annals of the ICRP 25, No. 1, Pergamon Press, 1995
- [10] ICRP Publication 71: Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4, Inhalation Dose Coefficients. Annals of the ICRP 25, No. 3–4, Pergamon Press, 1995
- [11] ICRP Publication 72: Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5, Compilation of Ingestion Dose Coefficients. Annals of the ICRP 26, No. 1, Pergamon Press, 1996
- [12] ICRP Publication 78: Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers; Replacement of ICRP Publication 54. Annals of the ICRP 27, No. 3/4, Pergamon Press, 1997
- [13] ICRP Publication 80: Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals Addendum to ICRP 53. Annals of the ICRP 38, No. 3, Pergamon Press, 1998

- [14] ICRP Publication 88: Doses to the Embryo and Fetus from Intakes of Radionuclides by the Mother; Corrected Version, May 2002. Annals of the ICRP 31, No. 1–3, Pergamon Press, 2001
- [15] ICRP Publication 89: Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values. Annals of the ICRP 32, No. 3–4, Pergamon Press, 2002
- [16] ICRP Supporting Guidance 3: Guide for the Practical Application of the ICRP Human Respiratory Tract Model. Annals of the ICRP 32, No. 1–2, Pergamon Press, 2002

### **Übersichtsarbeiten und spezielle Tagungsberichte**

- [17] Fueger, G.F.; Schreiner, W.: Dosimetrie offener Radionuklide: Prinzipien zur Ermittlung der Strahlenbelastung nach Inkorporation offener radioaktiver Stoffe. Informatica Wien, 1985
- [18] Gerber, G.B.; Métivier, H.; Smith, H. (eds.): Age-related Factors in Radionuclide Metabolism and Dosimetry. Developments in Nuclear Medicine. Martinus Nijhoff Publishers, 1987
- [19] Kaul, A.: Assessment of Internal Dose from Radionuclides: Dosimetric and Biokinetic Models. Kerntechnik 60 (1) (1995) 7–15
- [20] Kaul, A.; Henrichs, K.; Roedler, H.D.: Aufnahme und Verteilung radioaktiver Stoffe im Körper: Grundlagen und Ergebnisse von Dosisberechnungen für Patienten und beruflich Strahlenexponierte. bga Schriften 4/84, 1984. MMV Medizin Verlag München
- [21] Métivier, H.; Kaul, A.; Menzel, H.-G.; Stather, J.W. (eds.): Intakes of Radionuclides, Occupational and Public Exposure. Radiation Protection Dosimetry 79 (1–4) (1998). Nuclear Technology Publishing
- [22] Stather, J.W.; Baily, M.R.; Harrison, J.D.; Menzel, H.-G.; Métivier, H. (eds.): Internal Dosimetry, Occupational, Public and Medical Exposure. Radiation Protection Dosimetry 105 (1–4) (2003). Nuclear Technology Publishing
- [23] Stather, J.W.; Karaoglou, A. (eds.): Intakes of Radionuclides: Detection, Assessment and Limitation of Occupational Exposure. Radiation Protection Dosimetry 53 (1–4) (1994). Nuclear Technology Publishing
- [24] Taylor, D.M.; Gerber, G.B.; Stather, J.W. (eds.): Age-dependent Factors in the Biokinetics and Dosimetry of Radionuclides. Radiation Protection Dosimetry 41 (2–4) (1992). Nuclear Technology Publishing

### **Einzelarbeiten**

- [25] Berkovski, V.; Bouchuck, Y.; Ratia, G.: “Dose per Unit Content” Functions: A robust Tool for the Interpretation of Bioassay Data. Internal Dosimetry, Occupational, Public and Medical Exposure. Radiation Protection Dosimetry 105 (1–4) (2003) 399–402. Nuclear Technology Publishing

- [26] Erste Empfehlung der Strahlenschutzkommission SSK zu den möglichen Auswirkungen des Unfalls im Kernreaktor Tschernobyl (UdSSR) auf die Bundesrepublik Deutschland, verabschiedet anlässlich der 66. Sitzung der SSK am 2. Mai 1986. In: Auswirkungen des Reaktorunfalls in Tschernobyl in der Bundesrepublik Deutschland. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 5, Gustav Fischer Verlag Stuttgart, New York (1986)
- [27] Harrison, J.D.; Smith, T.J.; Phips, A.W.: Infant Doses from the Transfer of Radionuclides in Mother's Milk. In: Internal Dosimetry, Occupational, Public and Medical Exposure. Radiation Protection Dosimetry 105 (1–4) (2003) 251–256. Nuclear Technology Publishing
- [28] Noßke, D.: Persönliche Mitteilung an den Autor; September 2003
- [29] Rat der Europäischen Gemeinschaften: Verordnung (EURATOM) Nr. 3954/87 und Nr. 2218/89 des Rates vom 22. Dezember 1987 bzw. 18. Juli 1989 zur Festlegung von Höchstwerten an Radioaktivität in Nahrungsmitteln und Futtermitteln im Falle eines nuklearen Unfalls oder einer anderen radiologischen Notstandssituation. Amtsblatt der EG Nr. L 371, 1987, und L 211/1, 1989
- [30] Smith, T.J.; Phips, A.W.; Fell, T.F.; Harrison, J.D.: Transfer of Alkaline Earth Elements Ca-45, Sr-90 and Ra-226. In: Internal Dosimetry, Occupational, Public and Medical Exposure. Radiation Protection Dosimetry 105 (1–4) (2003) 273–277. Nuclear Technology Publishing
- [31] Snyder, W.S.; Ford, M.R.; Warner, G.G.; Fisher, H.L.: Estimates of Absorbed Fractions for Monoenergetic Photon Sources uniformly distributed in various Organs of a Heterogeneous Phantom. (a) Medical Internal Radiation Dose Committee (MIRD) Pamphlet No. 5. J. Nucl. Med. 10 (3) (1969); (b) (MIRD) Pamphlet 5, Revised; New York, N.Y.: Society of Nuclear Medicine (1978)
- [32] Stather, J.W.: Internal Dosimetry. In: Kaul, A.; Becker, D. (eds.): Radiological Protection. Landolt-Börnstein New Series, 2004; im Druck
- [33] Strahlenschutzkommission: Wissenschaftliche Grundlagen zur Ableitung von Dosiswerten und Kontaminationswerten nach § 6 des Strahlenschutzvorsorgegesetzes. Veröffentlicht im Bundesanzeiger Nr. 210 vom 7.11.1987; in Empfehlungen der Strahlenschutzkommission 1987; Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 10, Gustav Fischer Verlag Stuttgart, New York (1988)
- [34] Strahlenschutzvorsorgegesetz-StrVG: Gesetz zum vorsorgenden Schutz der Bevölkerung gegen Strahlenbelastung vom 19. Dezember 1986. Bundesgesetzblatt Teil I; 1986: 2610
- [35] UNSCEAR: Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly; United Nations, New York 2000
- [36] Zankl, M.; Petoussi-Hennss, N.; Fill, U.; Regulla, D.: The Application of Voxel Phantoms to the Internal Dosimetry of Radionuclides. In: Internal Dosimetry, Occupational, Public and Medical Exposure. Radiation Protection Dosimetry 105 (1–4) (2003) 539–548. Nuclear Technology Publishing