



**FACHVERBAND FÜR STRAHLENSCHUTZ e.V.**  
Mitgliedsgesellschaft der International Radiation Protection Association (IRPA)

---

**Loseblattsammlung  
Arbeitskreis  
Inkorporationsüberwachung (AKI)**

**Biokinetisches Verhalten von  
radiaktiven Stoffen bei Inkorporation**

**FS-82-22-AKI  
Februar 1982**



Biokinetisches Verhalten von radioaktiven  
Stoffen bei Inkorporation

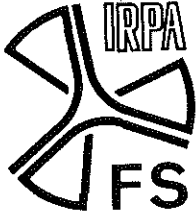
Biokinetik

Inhaltsverzeichnis

	Blatt	Seite
1. Vorbemerkungen	1	1
2. Begriffsbestimmung	2	1/1 bis 1/2
3. Inkorporationswege		
3.1. Schematische Darstellung	3	1
3.2. Atemtrakt	3	2/1 bis 2/7
3.3. Magen-Darm-Trakt	3	3
3.4. Haut und Wunden	3	4
4. Verhalten im Organismus (Entwurf)		
5. Ausscheidungsverhalten		
5.1. Leicht transportable Radionuklidverbindungen	5	1/1 bis 1/2
5.2. Mäßig und schwer transportable Radionuklid- verbindungen	5	2/1 bis 2/2
5.3. Gasförmige Radionuklide	5	3
6. Dekorporationsmaßnahmen	6	1
7. Glossarium	7	1/1 bis 1/2
8. Literatur	8	1/1 bis 1/3

Bearbeiter: H.Schieferdecker  
D.Beyer, B.Glöbel, E.Günther  
K.Henrichs, R.Rose, V.Volf, E.Werner

Stand Februar 1982



Die sich aus einer Inkorporation von radioaktiven Substanzen ergebende Strahlenexposition hängt außer von den kernphysikalischen Eigenschaften auch wesentlich vom biokinetischen Verhalten dieser Stoffe im Körper ab. Für die Wirkung inkorporierter Radionuklide ist daher außer deren Aktivität auch die Verteilung und die Verweilzeit im Organismus von Bedeutung. Die Berechnung der Körperdosis setzt deshalb die Kenntnis dieser Parameter voraus.

Mit dem Eintritt in den Organismus wird das Verhalten der radioaktiven Stoffe wesentlich vom Stoffwechsel des Körpers bestimmt: Sie werden zum Teil vom Eintrittsort in andere Organe umgelagert und zum Teil wieder ausgeschieden. Diese Vorgänge sind abhängig von den physikalischen und chemisch-physiologischen Eigenschaften der Verbindungen und vom Zufuhrweg.

Neben der Bedeutung dieser Einflußgrößen für die Dosisermittlung ist die Kenntnis des biokinetischen Verhaltens auch für die eventuell notwendige Einleitung therapeutischer Maßnahmen wichtig.



Unter Inkorporation ist die Zufuhr\* radioaktiver Stoffe in den Körper zu verstehen. Inkorporationen können über die Nase (Inhalation), über den Mund (Ingestion und Inhalation) oder durch die intakte oder verletzte Haut nach einer Kontamination (Permeation) erfolgen.

Das Verhalten inkorporierter Radionuklidverbindungen im Körper hängt zunächst von deren Transportabilität in den Körperflüssigkeiten ab. Entsprechend der Zeit, die für die Aufnahme der radioaktiven Stoffe in die Körperflüssigkeiten erforderlich ist, unterscheidet man nach Vorschlägen der ICRP /4/, /5/ zwischen leicht, mäßig und schwer transportablen Verbindungen.

Leicht transportable Verbindungen gelangen nach schneller Aufnahme durch die Körperflüssigkeiten in die Ablagerungsorgane. In den Körperflüssigkeiten können leicht lösliche Verbindungen unter Umständen unlöslich oder umgekehrt unlösliche Verbindungen durch Körperflüssigkeiten löslich werden /3/.

Schwer transportable Verbindungen werden nur langsam von den Körperflüssigkeiten aufgenommen und verbleiben daher lange am Eintrittsort (Wunde, Lungengewebe). Ein großer Anteil wird aus Lüngendepots durch Reinigungsmechanismen (Mukociliartransport) unverändert über den Magen-Darm-Trakt ausgeschieden oder nur langsam von den Körperflüssigkeiten aufgenommen.

Häufig müssen mehrere Stoffklassen berücksichtigt werden. Zwischen den Grenzfällen sind die Übergänge fließend, obwohl sich die von der ICRP vorgeschlagene Einteilung für die Praxis als notwendig erwiesen hat. Im Einzelfall muß abgeschätzt werden, welche Transportabilitätsart überwiegt.

---

\*In der Strahlenschutzverordnung /2/ als *Aufnahme* bezeichnet. Der AKI wird im folgenden konsequent den Ausdruck Zufuhr im Einklang mit der ICRP benutzen.

folgt Seite 1/2



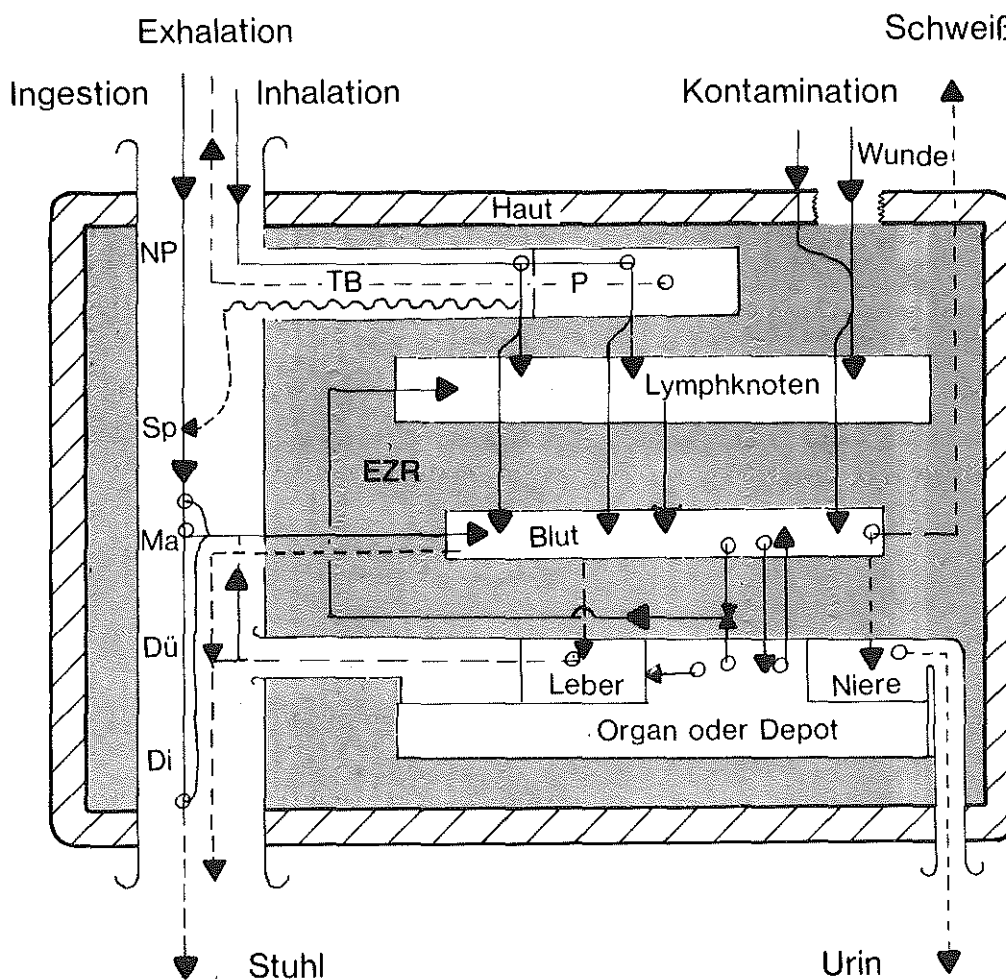
Für die quantitative Betrachtung des zeitlichen Verhaltens eines radioaktiven Stoffes im Organismus ist die dem Körper zugeführte Aktivität streng von der durch den Körper aufgenommenen Aktivität zu unterscheiden (s. Glossarium Kap. 7).

In Anlage IV der StrlSchV /2/ sind ausschließlich Zufuhrwerte, und zwar Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr, angegeben. Sie ergeben sich aus den Grenzwerten der Körperdosis (Anlage X StrlSchV) unter Berücksichtigung der Abnahme der Aktivität durch physikalischen Zerfall und durch Ausscheidung, jedoch ohne Berücksichtigung des unterschiedlichen Stoffwechselverhaltens verschieden transportabler Stoffe und ohne Berücksichtigung der Korngröße der Aerosole. Es ist daher im Einzelfall zu überprüfen, ob die angegebenen Werte zutreffen oder dem Einzelfall entsprechend korrigiert werden müssen.

Anmerkung: Zur Bestimmung einer zugeführten Aktivität aus Ergebnissen der Ganzkörper- oder Ausscheidungsüberwachung ist die zwischen dem Zufuhrzeitpunkt und Meßzeitpunkt verflossene Zeit zu berücksichtigen (Extrapolation mittels Retentions- oder Ausscheidungsfunktion). Diese Extrapolation ist mit einer großen Unsicherheit behaftet (unbekannter Zufuhrzeitpunkt, Inkorporationsweg oder Retentionsfunktion der aufgenommenen Verbindung).

3.1. Schematische Darstellung

Die Wege der zugeführten Radionuklide im Körper sind in Abb. 3/1 vereinfachend schematisch dargestellt. Diese Darstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit oder allgemeine Richtigkeit und soll nur einen Überblick zum Verständnis der in den folgenden Blättern aufgeführten Darstellungen geben.



————> Inkorporationswege  
 - - - - -> Dekorporationswege  
 ~~~~~> Ciliartransportweg  
 NP - Nasopharyngealer Bereich  
 TB - Tracheobronchialer Bereich  
 P - Pulmonaler Bereich

Sp - Speiseröhre  
 Ma - Magen  
 Dü - Dünndarm  
 Di - Dickdarm  
 EZR - extrazellulärer Raum



Bei Inhalation gelangen radioaktive Substanzen gasförmig oder als Aerosol in den Atemtrakt und werden dort zum Teil abgelagert und je nach dem Transportabilitätsgrad in unterschiedlich großen Anteilen von den Körperflüssigkeiten aufgenommen. Ein Teil der zugeführten Aktivität wird sofort wieder ausgeatmet.

Für den Fall, daß keine Information über die chemisch-physikalischen Eigenschaften des inhalierten Aerosols zur Verfügung stehen, kann das von der ICRP /1/ vorgeschlagene vereinfachte Lungenmodell zur Abschätzung der Inkorporation herangezogen werden. Danach gilt:

|                                                                         |       |
|-------------------------------------------------------------------------|-------|
| es werden wieder ausgeatmet:                                            | 25 %  |
| in den oberen Atemwegen werden abgelagert und anschließend verschluckt: | 50 %  |
| in den Lungen (untere Atemwege) werden abgelagert:                      | 25 %* |

\*Bei schwer transportablen Verbindungen wird hiervon die Hälfte nach mukociliarem Abtransport in den ersten 24 Stunden verschluckt, so daß also insgesamt 62,5 % verschluckt werden. Die restlichen 12,5 % bleiben mit einer biologischen Halbwertszeit von 120 Tagen in der Lunge, wobei angenommen wird, daß diese Menge in die Körperflüssigkeiten aufgenommen wird.

folgt Seite 2/2

3.2. Atemtrakt

Bei Kenntnis der chemisch-physikalischen Eigenschaften des inhalierten Aerosols (Verbindungs-kategorie, Korngrößenverteilung) kann neben dem auf Blatt 3 Seite 2/1 beschriebenen Modell ein erweitertes Modell der ICRP /4/ benutzt werden, nach dem der Atemtrakt in drei Bereiche unterteilt wird und zwar:

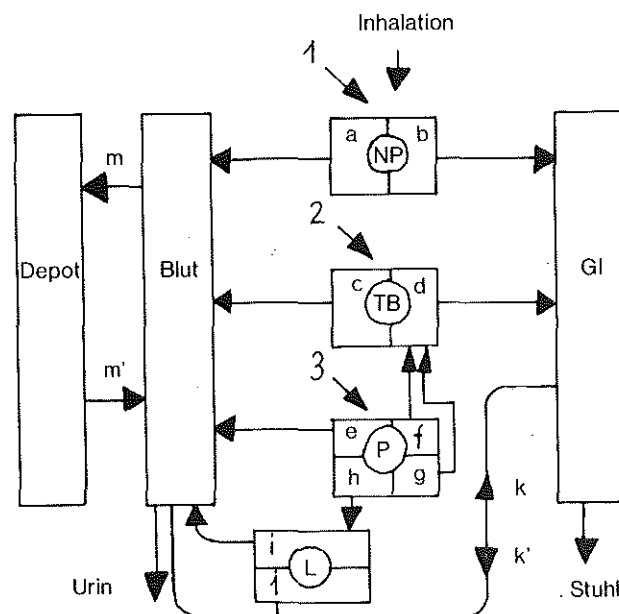


Abb. 3/2-2

NP - Nasopharygealer Teil des Atemweges, der die Nase und den Rachenraum bis zum Kehlkopf umfaßt,

TB - Tracheobronchialbereich, der die Luftröhre und die Bronchien bis zu den endständigen Bronchioli umfaßt,

P - pulmonaler Bereich (Alveolen)

L - Lymphknoten (pulmonale L.)

1 - Ablagerung nach Inhalation im NP-Bereich (entspr. Blatt 3 Seite 2/4)

2 - Ablagerung nach Inhalation im TB-Bereich (entspr. Blatt 3 Seite 2/4)

3 - Ablagerung nach Inhalation im P-Bereich (entspr. Blatt 3 Seite 2/4)

GI - Gastro-Intestinaltrakt (Magen-Darm-Trakt)

Die einzelnen Kompartimente sind durch kleine Buchstaben bezeichnet. Sie sind charakterisiert durch:

folgt Seite 2/3





3.2. Atemtrakt

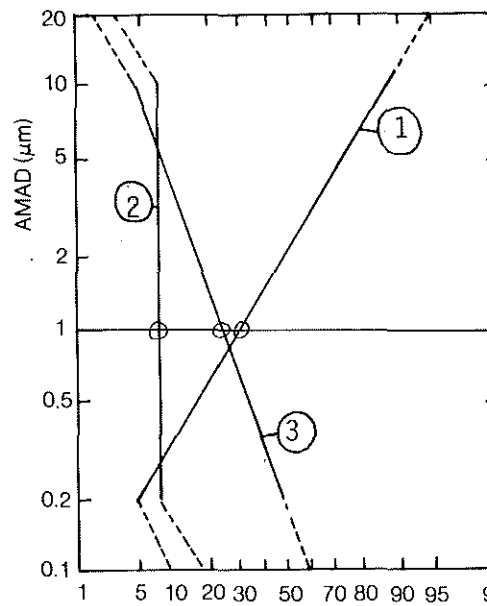
- a - einen schnellen Übergang aus dem NP-Bereich in die Körperflüssigkeiten
- b - einen schnellen Übergang aus dem NP-Bereich in den Verdauungstrakt
- c - einen schnellen Übergang aus dem TB-Bereich in die Körperflüssigkeiten
- d - einen schnellen Übergang durch Mukociliartransport aus dem TB-Bereich in den Verdauungstrakt
- e - einen Übergang aus dem P-Bereich in die Körperflüssigkeiten
- f - einen schnellen Übergang durch alveolare Phagozytose aus dem P-Bereich über den TB-Bereich durch Mukociliartransport in den Verdauungstrakt
- g - einen langsamen Übergang durch alveolare Phagozytose aus dem P-Bereich über den TB-Bereich durch Mukociliartransport in den Verdauungstrakt
- h - einen langsamen Übergang durch alveolare Phagozytose und Lymphdrainage aus dem P-Bereich in das Lymphsystem
- i - einen Übergang aus den pulmonalen Lymphknoten in die Körperflüssigkeiten
- j - Ablagerung in den pulmonalen Lymphknoten
- k,k' - einen Übergang aus den Körperflüssigkeiten in den Verdauungstrakt und umgekehrt
- m,m' - einen Übergang aus den Körperflüssigkeiten in ein oder mehrere Depots und umgekehrt

In diesen Bereichen (NP, TB, P) lagert sich das inhalierte Aerosol zu unterschiedlichen Anteilen in verschiedenen Kompartimenten ab, die von der physikalischen Form des Aerosols (Korngrößenverteilung und Dichte) abhängig sind. Diese Ablagerung wird als unabhängig von der Atemfrequenz und Atemtiefe angenommen.

folgt Seite 2/4

3.2. Atemtrakt

Die Anteile, zu denen sich ein Aerosol in den drei Bereichen NP, TB und P in Abhängigkeit von der Partikelgröße (AMAD) ablagert, sind in Abb. 3/2-4 dargestellt.



- Ablagerung im:
- 1 Nasopharyngealen Bereich NP
  - 2 Tracheobronchialen Bereich TB
  - 3 Pulmonalen Bereich

Abb. 3/2-4

Die Aufenthaltsdauer des abgelagerten Aerosols in den drei Bereichen des Atemtrakts ist von der Art der chemischen Verbindung abhängig. In dem beschriebenen Lungenmodell /4/ werden drei verschiedene Verbindungsklassen (Lungenretentionsklassen) angenommen, die sich durch eine unterschiedliche Aufenthaltsdauer des Aerosols im Atemtrakt unterscheiden. Es wird angenommen, daß die abgelagerten Aerosole mit den Körperflüssigkeiten des Atemtrakts unterschiedlich schnell abtransportiert werden, wobei als Maß für die Transportabilität der Begriff der biologischen Halbwertszeit des Aerosols im Bereich P benutzt wird. Es bedeuten

- D - Verbindungen der Lungenretentions-Klasse D (days) werden mit einer durchschnittlichen biologischen Halbwertszeit von  $T_b = 0,5$  Tagen,
  - W - Verbindungen der Lungenretentionsklasse W (weeks) mit  $T_b = 50$  Tagen,
  - Y - Verbindungen der Lungenretentionsklasse Y (years) mit einer Halbwertszeit von  $T_b = 500$  Tagen
- aus dem pulmonalen Bereich abtransportiert.

folgt Seite 2/5



3.2. Atemtrakt

Auf welchem Wege und zu welchem Anteil dieser Transport vor sich geht, zeigt Tabelle 3/2-5 für die drei Lungenretentionsklassen D, W und Y und eine normierte Teilchengrößenverteilung von 1  $\mu\text{m}$  AMAD

Tabelle 3/2-5

| Bereich      | Kompartiment | Lungenretentionsklasse |      |       |      |          |      |
|--------------|--------------|------------------------|------|-------|------|----------|------|
|              |              | D                      |      | W     |      | Y        |      |
|              |              | $T_b$                  | F    | $T_b$ | F    | $T_b$    | F    |
| NP<br>(0.30) | a            | 0.01                   | 0.5  | 0.01  | 0.1  | 0.01     | 0.01 |
|              | b            | 0.01                   | 0.5  | 0.40  | 0.9  | 0.40     | 0.99 |
| TB<br>(0.08) | c            | 0.01                   | 0.95 | 0.01  | 0.5  | 0.01     | 0.01 |
|              | d            | 0.2                    | 0.05 | 0.2   | 0.5  | 0.2      | 0.99 |
| P<br>(0.25)  | e            | 0.5                    | 0.8  | 50    | 0.15 | 500      | 0.05 |
|              | f            | n.a.                   |      | 1.0   | 0.4  | 1.0      | 0.4  |
|              | g            | n.a.                   |      | 50    | 0.4  | 500      | 0.4  |
|              | h            | 0.5                    | 0.2  | 50    | 0.05 | 500      | 0.15 |
| L            | i            | 0.5                    | 1.0  | 50    | 1.0  | 1000     | 0.9  |
|              | j            | n.a.                   |      | n.a.  |      | $\infty$ | 0.1  |

$T_b$  - biologische Halbwertszeit in Tagen

F - Anteil des Kompartiments

(in Klammern) - Anteil der Ablagerung bei 1  $\mu\text{m}$  AMAD

n.a. - nicht anwendbar

Durch Multiplikation von F mit dem im gesamten NP-, TB- oder P-Bereich abgelagerten Anteil (s. Abb. 3/2-4) eines radioaktiven Stoffes der Lungenretentionsklasse D, W oder Y erhält man den auf die Zufuhr bezogenen Anteil der in einem bestimmten Kompartiment abgelagerten Aktivität.

folgt Seite 2/6



3.2. Atemtrakt

Für die verschiedenen Stoffklassen D, W und Y und verschiedene AMAD-Werte ist der zeitliche Verlauf der Aktivität im Brustraum nach einer Inhalation berechnet worden /8/ und in Tabelle 3/2-7 aufgeführt.

Diese Tabelle dient bei Bestimmung der Lungenaktivität der Berechnung der inhalierten Aktivität  $A_{inh}$ . Sie ergibt sich aus der Beziehung

$$A_{inh} = \frac{A_L(t)}{k(t)} \exp \frac{\ln 2}{T_p} \cdot t \quad (1)$$

$A_L(t)$  - die zur Zeit nach der Inhalation gemessene Lungenaktivität

$k(t)$  - Tabellenwert (s. Tabelle 3/2-7)

$T_p$  - physikalische Halbwertszeit

$t$  - Zeit nach der Inhalation

Der Faktor  $k(t)$  bedeutet das Verhältnis der Aktivität  $A_L(t)$  im Brustraum (TB- und P-Bereich sowie pulmonale Lymphknoten) zur inhalierten Aktivität  $A_{inh}$  für drei verschiedene Lungenretentionsklassen in Abhängigkeit von der Zeit nach der Inhalation und des AMAD-Wertes (der radioaktive Zerfall ist in diesen Tabellen nicht berücksichtigt).

Eine Anleitung zur Ermittlung der Körperdosis nach Inkorporation von Radionukliden ist in /17/ zu finden.

folgt Seite 2/7



3.2. Atemtrakt

| Lungenretentions-<br>klasse | ZEIT<br>TAGE | k(t) für AMAD in $\mu\text{m}$ |          |          |          |          |          |
|-----------------------------|--------------|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                             |              | .2                             | .5       | 1        | 2        | 5        | 10       |
| D                           | 0.0          | .580E+00                       | .430E+00 | .330E+00 | .260E+00 | .170E+00 | .130E+00 |
|                             | 0.1          | .202E+00                       | .142E+00 | .102E+00 | .745E-01 | .387E-01 | .228E-01 |
|                             | 0.5          | .857E-01                       | .602E-01 | .432E-01 | .313E-01 | .160E-01 | .921E-02 |
|                             | 1.0          | .597E-01                       | .418E-01 | .299E-01 | .216E-01 | .108E-01 | .609E-02 |
|                             | 2.0          | .235E-01                       | .165E-01 | .117E-01 | .849E-02 | .424E-02 | .236E-02 |
|                             | 3.0          | .806E-02                       | .564E-02 | .403E-02 | .290E-02 | .145E-02 | .806E-03 |
|                             | 4.0          | .255E-02                       | .178E-02 | .127E-02 | .920E-03 | .460E-03 | .255E-03 |
|                             | 5.0          | .774E-03                       | .542E-03 | .387E-03 | .278E-03 | .139E-03 | .774E-04 |
|                             | 6.0          | .227E-03                       | .159E-03 | .113E-03 | .818E-04 | .409E-04 | .227E-04 |
|                             | 7.0          | .653E-04                       | .457E-04 | .326E-04 | .235E-04 | .117E-04 | .653E-05 |
|                             | 8.0          | .184E-04                       | .129E-04 | .922E-05 | .664E-05 | .332E-05 | .184E-05 |
|                             | 9.0          | .514E-05                       | .359E-05 | .257E-05 | .185E-05 | .925E-06 | .514E-06 |
|                             | 10.0         | .141E-05                       | .992E-06 | .708E-06 | .510E-06 | .255E-06 | .141E-06 |
| 20.0                        | .261E-11     | .182E-11                       | .130E-11 | .940E-12 | .470E-12 | .261E-12 |          |
| W                           | 0.0          | .580E+00                       | .430E+00 | .330E+00 | .260E+00 | .170E+00 | .130E+00 |
|                             | 1.0          | .395E+00                       | .277E+00 | .198E+00 | .143E+00 | .723E-01 | .407E-01 |
|                             | 10.0         | .264E+00                       | .185E+00 | .132E+00 | .951E-01 | .475E-01 | .264E-01 |
|                             | 50.0         | .158E+00                       | .111E+00 | .793E-01 | .571E-01 | .285E-01 | .158E-01 |
|                             | 100.0        | .836E-01                       | .585E-01 | .418E-01 | .301E-01 | .150E-01 | .836E-02 |
|                             | 200.0        | .230E-01                       | .161E-01 | .115E-01 | .830E-02 | .415E-02 | .230E-02 |
|                             | 300.0        | .631E-02                       | .441E-02 | .315E-02 | .227E-02 | .113E-02 | .631E-03 |
|                             | 400.0        | .171E-02                       | .119E-02 | .856E-03 | .616E-03 | .308E-03 | .171E-03 |
|                             | 500.0        | .462E-03                       | .323E-03 | .231E-03 | .166E-03 | .831E-04 | .462E-04 |
|                             | 600.0        | .124E-03                       | .868E-04 | .620E-04 | .446E-04 | .223E-04 | .124E-04 |
|                             | 700.0        | .331E-04                       | .231E-04 | .165E-04 | .119E-04 | .596E-05 | .331E-05 |
|                             | 800.0        | .880E-05                       | .616E-05 | .440E-05 | .317E-05 | .158E-05 | .880E-06 |
|                             | 900.0        | .233E-05                       | .163E-05 | .116E-05 | .840E-06 | .420E-06 | .233E-06 |
| 1000.0                      | .616E-06     | .431E-06                       | .308E-06 | .221E-06 | .110E-06 | .616E-07 |          |
| 2000.0                      | .903E-12     | .632E-12                       | .451E-12 | .325E-12 | .162E-12 | .903E-13 |          |
| Y                           | 0.0          | .580E+00                       | .430E+00 | .330E+00 | .260E+00 | .170E+00 | .130E+00 |
|                             | 1.0          | .400E+00                       | .281E+00 | .201E+00 | .145E+00 | .741E-01 | .422E-01 |
|                             | 10.0         | .297E+00                       | .207E+00 | .140E+00 | .106E+00 | .534E-01 | .297E-01 |
|                             | 100.0        | .270E+00                       | .189E+00 | .135E+00 | .974E-01 | .487E-01 | .270E-01 |
|                             | 500.0        | .181E+00                       | .127E+00 | .908E-01 | .654E-01 | .327E-01 | .181E-01 |
|                             | 1000.0       | .114E+00                       | .800E-01 | .571E-01 | .411E-01 | .205E-01 | .114E-01 |
|                             | 2000.0       | .510E-01                       | .357E-01 | .255E-01 | .183E-01 | .919E-02 | .510E-02 |
|                             | 3000.0       | .268E-01                       | .187E-01 | .134E-01 | .966E-02 | .483E-02 | .268E-02 |
|                             | 4000.0       | .165E-01                       | .115E-01 | .827E-02 | .595E-02 | .297E-02 | .165E-02 |
|                             | 5000.0       | .118E-01                       | .831E-02 | .593E-02 | .427E-02 | .213E-02 | .118E-02 |
|                             | 6000.0       | .964E-02                       | .675E-02 | .482E-02 | .347E-02 | .173E-02 | .964E-03 |
|                             | 7000.0       | .856E-02                       | .599E-02 | .428E-02 | .308E-02 | .154E-02 | .856E-03 |
|                             | 8000.0       | .802E-02                       | .562E-02 | .401E-02 | .289E-02 | .144E-02 | .802E-03 |
| 9000.0                      | .776E-02     | .543E-02                       | .388E-02 | .279E-02 | .139E-02 | .776E-03 |          |
| 10000.0                     | .763E-02     | .534E-02                       | .381E-02 | .274E-02 | .137E-02 | .763E-03 |          |
| 20000.0                     | .750E-02     | .525E-02                       | .375E-02 | .270E-02 | .135E-02 | .750E-03 |          |
| 30000.0                     | .750E-02     | .525E-02                       | .375E-02 | .270E-02 | .135E-02 | .750E-03 |          |

Tabelle 3/2-7

Zeitliche Abhängigkeit von k(t) für verschiedene Lungenretentions-  
klassen



3.3. Magen-Darm-Trakt

Durch Ingestion gelangt die radioaktive Substanz in den Gastro-Intestinal-Trakt (GI-Trakt) entweder direkt durch die Nahrungsaufnahme oder indirekt durch Verschlucken inhalierter Aerosole (Mukociliar-Transport). Aus dem GI-Trakt (hauptsächlich Dünndarm) können die radioaktiven Substanzen in den Extrazellular-Raum und von dort an die Orte der Ablagerung gelangen. Nicht absorbierbare Verbindungen passieren den GI-Trakt unbeeinflusst und werden mit dem Stuhl wieder ausgeschieden.

Der Anteil des Radionuklids, der während des Aufenthalts im GI-Trakt absorbiert wird ( $f_1$ -Wert), ist in ICRP 2 /1/ für einzelne Radionuklide tabelliert. Diese Werte gelten für die in der Strahlenschutzverordnung /2/ aufgeführten Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr. Neuere Daten für verschiedene Verbindungsklassen befinden sich in der ICRP 30 /5/, die trotz großer individueller Schwankungen mangels besserer Daten als Referenzwerte angewendet werden können. Unberücksichtigt bleibt die Wirkung anderer Nahrungsbestandteile auf die  $f_1$ -Werte.

Die mittlere Aufenthaltsdauer in den einzelnen Abschnitten des GI-Trakts wird nach ICRP 23 /6/ wie folgt angenommen:

|                  |              |
|------------------|--------------|
| Magen            | 1/24 (Tage)  |
| Dünndarm         | 4/24 (Tage)  |
| oberer Dickdarm  | 13/24 (Tage) |
| unterer Dickdarm | 24/24 (Tage) |

Diese Angaben sind großen individuellen Schwankungen unterworfen.



Biokinetisches Verhalten von radioaktiven  
Stoffen bei Inkorporation  
3. Inkorporationswege

Biokinetik  
Blatt 3  
Seite 4

#### 3.4. Haut und Wunden

Bei einer Kontamination der Körperoberfläche weicht das biokinetische Verhalten des radioaktiven Stoffes von dem bei Inkorporationen ab.

Die intakte Haut ist eine wirksame Barriere gegen den Eintritt radioaktiver Stoffe in den Körper. Ausnahmen sind hauptsächlich Gase und gasförmige Radionuklidverbindungen (z.B. Tritium, Jod). Kontaminationen sind daher für Inkorporationen in der Regel ohne größere Bedeutung, solange die schützende Funktion der Haut nicht gestört wird, z.B. durch die Anwesenheit von Lösungsmitteln oder durch zu intensive Dekontaminationsmaßnahmen. Kontaminationen sind jedoch bei Ganzkörpermessungen meßtechnisch nur schwierig von Inkorporationen zu unterscheiden.

Bei Riß-, Stich- und Schürfwunden der Haut können radioaktive Stoffe in das subkutane Gewebe gelangen und von dort mit der extrazellulären Flüssigkeit an die Orte der Ablagerung gelangen.

Leicht transportable Radionuklide werden schnell mit dem Blut in andere Organe transportiert. Mäßig oder schwer transportable Verbindungen oder Stoffe, die an der Eintrittsstelle hydrolysieren oder polymerisieren, können ein Depot bilden, aus dem sie langsam durch Phagozytose in die regionalen Lymphknoten transportiert werden. Dort können sie für längere Zeit verbleiben. Aus den regionalen Lymphknoten kann ein Transport mit der extrazellulären Flüssigkeit in andere Organe erfolgen.

Bei einer Wundkontamination kann eine Abschätzung der im Körper abgelagerten Mengen dadurch vorgenommen werden, daß der Wundbereich exzidiert und die Aktivität des Gewebeerzidats bestimmt wird. Aus der Aufenthaltsdauer des Radionuklids in der Wunde und seiner Löslichkeit kann auf den Anteil geschlossen werden, der inzwischen andere Organe erreicht haben kann.

Bei unklaren Fällen ist es zweckmäßig, möglichst umgehend eine Blutprobe (ca. 20 ml) zu entnehmen, um festzustellen, ob radioaktive Stoffe in das Blut gelangt sind. Eine quantitative Aussage über die im Körper deponierte Menge kann allerdings nur bedingt gemacht werden, da die Übergangsraten vom Depot in das Blut meist nicht genau bekannt sind, sie ist nur durch Ausscheidungsanalysen oder Direktmessungen möglich.



Vorläufiger Entwurf

Außer von den Inkorporationswegen hängt das biokinetische Verhalten der radioaktiven Stoffe von deren charakteristischen biochemischen Eigenschaften ab. Dabei sind für Strahlenschutz Zwecke folgende Klassifikationen vorgenommen worden:

#### 4.1. Knochensuchende radioaktive Stoffe

Bei Inkorporation knochensuchender radioaktiver Stoffe ist die Verteilung wegen bevorzugter Ablagerung an wachsenden Stellen des Skeletts in der Regel ungleichmäßig, wobei für einzelne Radionuklide weitere Unterschiede zu beachten sind:

##### 4.1.1. Calciumähnliche Stoffe

Stoffe, die dem Calcium ähnlich sind (Sr, Ba, Ra), verteilen sich im Knochenvolumen. Für die Biokinetik beträgt in allen Fällen die Langzeitkomponente  $T_B \approx 20 - 30$  a. Altersbedingte Umlagerungen sind dabei zu beachten.

Es ergeben sich wesentliche Unterschiede in der Dosisberechnung gegenüber Stoffen nach 4.1.2.

##### 4.1.2. Nichtcalciumähnliche Stoffe

Knochensuchende Stoffe, die dem Calcium nicht ähnlich sind (Pu, Am, F), werden meistens auf Knochenoberflächen abgelagert. Hierdurch ergeben sich insbesondere bei  $\alpha$ - und weichen  $\beta$ -Strahlern Besonderheiten bei der Dosismittlung.

Das biokinetische Verhalten ist z.T. sehr unterschiedlich, was bei der Ausscheidungsanalyse zu berücksichtigen ist.

#### 4.2. Weichteilsuchende Stoffe

##### 4.2.1. Homogene Verteilung

Wasserstoff (in Form von Wasser), Kalium, Natrium sowie Stoffe, die ihnen ähnlich sind (Cäsium, Rubidium), verteilen sich relativ gleichmäßig im Weichteilgewebe. Die Biokinetik folgt dem Stoffwechselverhalten der Vergleichsstoffe.

folgt Seite 0/2





Vorläufiger Entwurf

#### 4.2.2. Inhomogene Verteilung

Einige Elemente, die keine Knochensucher sind (z.B. Fe, Co, J, U), werden in einzelnen Organen so stark angereichert, daß nicht mehr von homogener Strahlenexposition ausgegangen werden kann und spezielle Stoffwechselmodelle angewandt werden müssen (z.B. Jod in der Schilddrüse).

#### 4.3. Stabile organische Verbindungen

Organische Verbindungen weichen in der Biokinetik zum Teil so stark vom Verhalten der Elemente ab, aus denen sie bestehen, daß in jedem Einzelfall eine gesonderte Behandlung angebracht ist (Fe, J, Co, Cr, Te, In u.a.). Zu beachten sind Unterschiede z.B. zwischen Kobalt in ionogener Form oder Cyanocobalamin.

#### 4.4. Partikel

Als Partikel sind in Körperflüssigkeiten relativ unlösliche Teilchen im Größenbereich von ca. 0,01 bis 100  $\mu\text{m}$  anzusehen (z.B. Thorotrast, Latex, Ionenaustauscher).

Nach Inkorporation lagern sie sich bevorzugt im retikulo-endothelialen System (Leber, Milz, Knochenmark, Lunge) ab und verbleiben dort; ein biologischer Abbau kann in den meisten Fällen vernachlässigt werden.



### 5.1. Leicht transportable Radionuklidverbindungen

Leicht transportable Radionuklide gelangen nach einer Zufuhr schnell in die Körperflüssigkeiten und werden von diesen im Körper verteilt (vergl. Abb. 3/1). Die Ausscheidung kann über gastro-intestinale Sekretion, über die Niere, über den Leber-Gallen-Weg, über die Lunge und über die Haut erfolgen. Davon haben für die meisten Nuklide die Urin- und Stuhlausscheidung die größte Bedeutung. Die Bestimmung des von den Körperflüssigkeiten aufgenommenen Aktivitätsanteil erfolgt durch element- und verbindungsspezifische Ausscheidungs- bzw. Retentionsfunktionen, die den Zusammenhang zwischen der Zeit und den in bestimmten Zeitintervallen ausgeschiedenen Aktivitätsanteil bzw. der noch vorhandenen Aktivität angeben. Diese Funktionen können Exponential- oder Potenzfunktionen oder Kombinationen von beiden sein /3/.

Bei Direktmessungen der Körperaktivität mit dem Ganzkörperzähler sind die Retentionsfunktionen zu benutzen. Aus einem Meßwert  $A_G(t)$  der Ganzkörperaktivität zur Zeit (t) nach der Inkorporation kann die Zufuhr Z nach der Beziehung

$$Z = \frac{1}{f_1} \cdot \frac{A_G(t)}{R(t)} \cdot \exp \frac{\ln 2}{T_p} \cdot t \quad (2)$$

bestimmt werden, wobei R(t) die Retention bezeichnet, die aus ICRP 30 /5/ zu entnehmen ist. Dies gilt jedoch erst 1 bis 3 Tage nach der Ingestion, wenn der radioaktive Stoff den Magen-Darm-Trakt durchlaufen hat.

$f_1$  - der im GI-Trakt absorbierte Anteil

$T_p$  - physikalische Halbwertszeit

folgt Seite 1/2



5.1. Leicht transportable Radionuklidverbindungen

Die Berechnung der von den Körperflüssigkeiten aufgenommenen Aktivität aus den Ergebnissen von Ausscheidungsanalysen erfolgt unter Anwendung der Ausscheidungsfunktionen mit Hilfe der folgenden Gleichung

$$Z_U = \frac{A_U(t)}{Y_U(t)} \cdot \exp \frac{\ln 2}{T_p} \cdot t \quad \text{bzw.} \quad Z_F = \frac{A_S(t)}{Y_S(t)} \cdot \exp \frac{\ln 2}{T_p} \cdot t \quad (3)$$

$A_U(t)$  bzw.  $A_S(t)$  - zum Zeitpunkt  $t$  im Urin bzw. im Stuhl ermittelte Aktivität

$Y_U(t)$  bzw.  $Y_S(t)$  - spezifische Ausscheidungsfunktion der Radionuklidverbindung für Urin bzw. Stuhl → Blatt 5 Seite 2/2

$T_p$  - physikalische Halbwertszeit

$t$  - Zeit zwischen Zufuhr und Untersuchung

Die Gesamtzufuhr wird unter Berücksichtigung auch des nicht von den Körperflüssigkeiten aufgenommenen Aktivitätsanteils berechnet (s. Kapitel 3). Das Verhältnis der Urin- zur Stuhlausscheidung ist von den physiologischen Eigenschaften des Nuklids bzw. dessen Verbindung und der Korngrößenverteilung abhängig.



5.2. Mäßig und schwer transportable Radionuklidverbindungen

| Tag nach<br>Inhalation | Anteil der täglichen Ausscheidung<br>für Lungenretentionsklasse |         |         |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------|---------|
|                        | D                                                               | W       | Y       |
| 1                      | 1,5 E-1                                                         | 3,0 E-1 | 3,6 E-1 |
| 2                      | 1,2 E-4                                                         | 7,2 E-2 | 7,6 E-2 |
| 3                      | 3,8 E-6                                                         | 2,4 E-2 | 2,3 E-2 |
| 4                      | 1,2 E-7                                                         | 1,0 E-2 | 9,3 E-3 |
| 5                      | 3,7 E-9                                                         | 5,4 E-3 | 4,3 E-3 |
| 6                      | < 1,0 E-9                                                       | 3,3 E-3 | 2,1 E-3 |
| 7                      |                                                                 | 2,3 E-3 | 1,1 E-3 |
| 8                      |                                                                 | 1,7 E-3 | 6,3 E-4 |
| 9                      |                                                                 | 1,5 E-3 | 3,8 E-4 |
| 10                     |                                                                 | 1,3 E-3 | 2,6 E-4 |
| 11                     |                                                                 | 1,3 E-3 | 2,0 E-4 |
| 12                     |                                                                 | 1,2 E-3 | 1,7 E-4 |
| 13                     |                                                                 | 1,2 E-3 | 1,5 E-4 |
| 14                     |                                                                 | 1,2 E-3 | 1,5 E-4 |
| 15                     |                                                                 | 1,1 E-3 | 1,4 E-4 |
| 16                     |                                                                 | 1,1 E-3 | 1,4 E-4 |
| 17                     |                                                                 | 1,1 E-3 | 1,4 E-4 |
| 18                     |                                                                 | 1,1 E-3 | 1,4 E-4 |
| 19                     |                                                                 | 1,1 E-3 | 1,4 E-4 |
| 20                     |                                                                 | 1,1 E-3 | 1,4 E-4 |
| 25                     |                                                                 | 9,9 E-4 | 1,4 E-4 |
| 30                     |                                                                 | 9,3 E-4 | 1,3 E-4 |
| 40                     |                                                                 | 8,1 E-4 | 1,3 E-4 |
| 50                     |                                                                 | 7,0 E-4 | 1,3 E-4 |
| 60                     |                                                                 | 6,1 E-4 | 1,3 E-4 |

Tabelle 5/2-2

Tägliche Ausscheidung im Stuhl nach Inhalation (für eine  
Aerosolverteilung von 1  $\mu\text{m}$  AMAD) nach /9/ und /10/ für  $f_1 \ll 1$



Biokinetisches Verhalten von radioaktiven  
Stoffen bei Inkorporation

5. Ausscheidungsverhalten

Biokinetik

Blatt 5

Seite 3

5.3. Gasförmige Radionuklide

Radioaktive Stoffe, die gasförmig vorliegen oder beim Stoffwechsel in gasförmige Produkte umgewandelt werden, lassen sich durch Exhalationsmessungen in der Atemluft nachweisen. Dies ist z.B. bei Tritium, Kohlenstoff (als  $\text{CO}_2$ ), Edelgasen (Rn) und Jod der Fall.

Für die Beurteilung der ausgeschiedenen Mengen ist dabei auch eine Ausscheidung durch Transpiration und der übrigen Ausscheidungswege zu berücksichtigen.



Das Verhalten der Radionuklide im Stoffwechsel kann völlig verändert werden, wenn therapeutische Maßnahmen eingeleitet werden. Diese Änderungen müssen dann im Einzelfall berücksichtigt werden. Der Versuch einer Dekorporation kann nach bestehenden Richtlinien /12/ eingeleitet werden. Die endgültige Durchführung sollte nur von einem erfahrenen Arzt vorgenommen werden. Als Maßnahmen kommen vor allem in Frage : /11/

- Dekontamination der Haut mit speziellen Reinigungsmitteln
- Excision eines Wunddepots
- Hemmung der Darmabsorption
- Beschleunigung der Magen-Darm-Passage
- Isotopenverdünnung mit stabilen Elementen
- Einsatz von Komplexbildnern zur Ausscheidungsintensivierung
- Hormone zur Stoffwechselsteuerung
- Einsatz von Medikamenten zur Beschleunigung der Ausscheidung (Diuretika)

Im allgemeinen sind Dekorporationsmaßnahmen dann am wirkungsvollsten, wenn sie unmittelbar nach einer Inkorporation erfolgen. Die dabei auftretenden Veränderungen der Ausscheidungsfunktion (s.Blatt 5) sind zu beachten. Bei der Anwendung von Chelatbildnern ist damit zu rechnen, daß eine Ausscheidungsintensivierung um den Faktor 50 bis 100 am ersten Tag nach der Applikation möglich ist. In diesen Fällen ist eine Anwendung der Ausscheidungsfunktion erst nach Abklingen der therapeutischen Wirkung möglich, wobei noch nach Wochen eine geringfügig erhöhte Ausscheidung festgestellt werden kann.

Für nähere Angaben wird auf Übersichtsarbeiten verwiesen /13/ bis /16/.



|                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ablagerung               | - Speicherung radioaktiver Stoffe mit unterschiedlicher Verweilzeit in Körperbereichen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Aktivitätszufuhr         | - Inkorporation<br>Vorgang der Aufnahme eines radioaktiven Stoffes in den Körper durch Inhalation, Ingestion, durch die Haut oder durch Wunden                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| AMAD                     | - <u>Aktivitäts-Medianwert</u> des <u>aerodynamischen Durchmessers</u><br>Durchmesser einer Kugel der Dichte $1 \text{ g/cm}^3$ , die dieselbe End-Sinkgeschwindigkeit in Luft aufweist wie das Aerosolpartikel, dessen Aktivität dem Medianwert für das gesamte Aerosol entspricht                                                                                                                                                                                |
| Aufnahme                 | - derjenige Teil der zugeführten Aktivität, der in die extrazelluläre Flüssigkeit eingeht (uptake)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Ausscheidungsrate $a(t)$ | - ausgeschiedene Aktivität pro Zeiteinheit zum Zeitpunkt $t$ nach Aktivitätszufuhr                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Dekorporation            | - die Entfernung radioaktiver Stoffe aus dem Körper                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Deposition               | - das relative zeitliche Maximum der gespeicherten Aktivität in den einzelnen Organen bzw. am Eintrittsort bezogen auf die Zufuhr                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| $f_1$                    | - Anteil des Radionuklids, der während des Aufenthalts im Verdauungstrakt absorbiert wird                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| $f_2$                    | - Anteil der im Ganzkörper vorhandenen Aktivität, der sich in einem bestimmten Körperbereich befindet                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Körperaktivität $A(t)$   | - Sammelbegriff für Ganzkörper- oder Teilkörperaktivität: Zur Zeit $t$ nach Aktivitätszufuhr im Körper oder Teilkörper vorhandene Aktivität                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Kompartiment             | - mathematischer Ausdruck für einen Teil eines Verteilungsraumes (hier: der einzelnen Bereiche des Atemtrakts) der radioaktiven Substanz, in denen die Substanz eine homogene Konzentration aufweist.<br>Der Kompartiment-Begriff ist eine Zusammenfassung aller Strukturen mit gleicher Anreicherungs- oder Austauschgeschwindigkeit für die jeweilige Substanz, wobei Kompartimente oft anatomisch nicht definierbar sind und nicht zusammenhängend sein müssen. |

folgt Seite 1/2



Lungenretentionsklasse - Schema zur Klassifizierung eingeatmeter Stoffe  
entsprechend ihrer Ausscheidungsrate aus dem  
pulmonalen Abschnitt des Respirationstraktes

Klasse D: Biologische Halbwertszeit < 10 Tage

Klasse W: Biologische Halbwertszeit 10-100 Tage

Klasse Y: Biologische Halbwertszeit > 100 Tage

Relative Ausscheidungs-  
rate  $Y(t)$

- Ausscheidungsrate bezogen auf die aus der Zufuhr  
resultierende Aktivität

Retention

- der zeitliche Aktivitätsverlauf in den einzelnen  
Organen bezogen auf die Aufnahme

Zugeführte Aktivität

- Gesamte, in den Körper gelangte Aktivität





Biokinetisches Verhalten von radioaktiven  
Stoffen bei Inkorporation

8. Literatur

Biokinetik

Blatt 8

Seite 1/1

- / 1/ Recommendations of the International Commission on Radiological Protection ICRP Publ. 2 (1960)
- / 2/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 13.10.1976, Bundesgesetzblatt Teil 1, Nr. 125, ausgegeben am 20.10.1976, Seiten 2905 - 2995  
mit Berichtigung vom 21.1.1977, Bundesgesetzblatt Teil 1, Nr. 6, ausgegeben am 26.1.1977, Seiten 184-195  
und Berichtigung vom 1.2.1977, Bundesgesetzblatt Teil 1, Nr. 9, ausgegeben am 9.2.1977, Seite 269
- / 3/ Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP Publ. 10), Report of Committee IV, Pergamon Press (1968)  
Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP Publ. 10 A)  
Pergamon Press (1971)  
Deutsche Übersetzung (herausgegeben vom Bundesgesundheitsamt, Berlin):  
Ermittlung der Körperdosis bei beruflich strahlenexponierten Personen nach Inkorporation radioaktiver Stoffe  
Abschätzung der Körperdosis nach sich wiederholenden oder länger andauernden Aufnahmen radioaktiver Stoffe  
G. Fischer Verlag, Stuttgart (1978)
- / 4/ Task Group on lung dynamics (Comm.II), Deposition and retention models for internal dosimetry of the human respiratory tract,  
Health Physics 12 (1966) 173-207  
Inhalation risk from radioactive contaminants,  
(Rep. Panel Vienna, 1970), Technical Reports Series No.142,  
IAEA, Vienna (1973)
- / 5/ Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP Publ. 30)  
Pergamon Press (1979)
- / 6/ Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP Publ. 23)  
Pergamon Press (1975)

folgt Seite 1/2



- / 7/ Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle  
(§§ 62 und 63 StrISchV)  
Gemeinsames Ministerialblatt 1978, Nr.22, S.348-354
- / 8/ K.Henrichs, A.Kaul  
Anwendung des ICRP-Lungen-Clearance Modells zur Berechnung  
der Aktivität inhalierter radioaktiver Aerosole in der Lunge  
Med.Phys.,(1979) S.319-324, Hrsg. H.Reich
- / 9/ H.Schieferdecker  
Probleme bei der Abschätzung der Körperbelastung infolge  
Inhalation von Radionukliden  
8.Jahrestagung des FS am 23.-28.9.1974 Helgoland  
Tagungsbericht S.124-146
- /10/ H.Dilger  
Vorschlag für Änderungen der Richtlinie "Berechnungsgrundlagen  
für die Ermittlung der Körperdosis bei innerer Strahlenexposition"  
(Richtlinie zu § 63 StrISchV) GMBI 1981, Nr.23, S.321-336  
KfK 3259 B Feb. 1982
- /11/ A.Catsch  
Dekorporierung radioaktiver und stabiler Metallionen  
K.Thiemig Verlag, München (1968)
- /12/ Merkblatt - Erste Hilfe bei erhöhter Einwirkung ionisierender  
Strahlen  
Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften,  
Zentralstelle für Unfallverhütung und Arbeitsmedizin  
Ausschuß Strahlenschutzmedizin  
Okt.1981
- /13/ V.Volf, G.Möhrle  
Strahlenschutzkurs für ermächtigte Ärzte  
Kurslehrbuch über die Aufgaben des ermächtigten Arztes  
Hrsg. F.E.Stieve, G.Möhrle  
Verlag Hildegard Hoffmann Berlin (1979) S.228-242
- /14/ V.Volf  
Treatment of Incorporated Transuranium Elements  
Technical Report Series No 184 IAEA Vienna 1978
- /15/ J.C.Nenot, C.C.Lushbaugh, T.A.Lincoln  
Manual on early medical treatment of possible radiation injury  
with an appendix on sodium burns  
Safety Series No.47  
IAEA Vienna 1978, 141 p.

folgt Seite 1/3



Biokinetisches Verhalten von radioaktiven  
Stoffen bei Inkorporation  
8. Literatur

Biokinetik  
Blatt 8  
Seite 1/3

- /16/ Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements  
Management of Persons Accidentally Contaminated with Radionuclides  
NCRP Report No 65 (1980)
- /17/ Berechnungsgrundlagen für die Ermittlung der Körperdosis bei innerer Strahlenexposition (Richtlinie zu § 63 StrISchV)  
GMBI 1981, Nr.23, S.321-336

*Der vorliegende Teil der Loseblattsammlung ist mit dem Ziel entstanden, allgemeine Probleme des Strahlenschutzes einem größeren Interessentenkreis zugänglich zu machen. Zu diesem Zweck ist es notwendig, die Kenntnisse auf diesem Gebiet auf dem neuesten Stand zu halten.*

*Änderungswünsche und Verbesserungsvorschläge sind an den Sekretär des Arbeitskreises "Inkorporationsüberwachung", Dr.H.Schieferdecker, Med.Abt./Tox.Labor, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Postfach 3640, 7500 Karlsruhe, zu richten.*