Fachverband für Strahlenschutz e.V.
Mitgliedsgesellschaft der International Radiation Protection Association (IRPA)
für die Bundesrepublik Deutschland und die Schweiz

Publikationsreihe
FORTSCHRITTE IM STRAHLENSCHUTZ

Publication Series
PROGRESS IN RADIATION PROTECTION

FS-93-69-AKI **ISSN 1013-4506**

Inkorporationsüberwachung auf Thorium

Monitoring of Thorium Incorporation

Loseblattsammlung des Arbeitskreises Inkorporationsüberwachung (AKI)

November 1993

FS-93-69-AKI

zu beziehen über:

Dr. A. Dalheimer
Institut für Strahlenhygiene, Bundesamt für Strahlenschutz
Ingolstädter Landstraße 1, D-85764 Oberschleißheim/Neuherberg

Fachverband für Strahlenschutz e. V.
Mitgliedsgesellschaft der International Radiation Protection Association (IRPA)

Loseblattsammlung Arbeitskreis Inkorporationsüberwachung (AKI)

Inkorporationsüberwachung auf Thorium

W. Riedel, D. Beyer, A. Dalheimer, H. Doerfel,
K. Henrichs, R. Scheler

FS-93-69-AKI
November 1993

Inhaltsverzeichnis

		Blatt	Seite
1	Einleitung	1	1
2	Quellen der Inkorporation	2	1/1
2.1	Vorkommen in der Geosphäre	2	1/1
2.2	Aufnahme durch den Menschen	2	2/1
2.3	Anwendung in der Technik	2	3/1
3	Eigenschaften	3	1/1
3.1	Zerfallsdaten und Isotopenzusammensetzung	3	1/1
3.2	Chemische Eigenschaften	3	2/1
3.2.1	Eigenschaften von Thorium in wässriger Lösung	3	2/1
3.2.2	Mitfällung	3	2/1
3.2.3	Komplexbildung mit anorganischen Liganden	3	2/2
3.2.4	Komplexbildung mit organischen Liganden	3	2/2
3.2.5	Verhalten an Ionenaustauschern	3	2/3
3.3	Biokinetische Eigenschaften	3	3/1
4	Meßverfahren	4	1/1
4.1	Ganzkörper- und Teilkörpermessung	4	1/1
4.1.1	Meßprinzip	4	1/1
4.1.2	Meßgeometrie	4	1/3
4.1.3	Kalibrierung	4	1/3
4.1.4	Auswahl des Meßverfahrens	4	1/4
4.2	Ausscheidungsanalyse	4	2/1
4.2.1	Präparation und Veraschung der Proben	4	2/1
4.2.2	Chemische Abtrennung	4	2/2
4.2.3	Herstellung und Messung der Proben	4	2/5
4.3	Exhalationsmessung	4	3/1
4.3.1	Annahmen zur Interpretation	4	3/1
4.3.2	Meßprinzip	4	3/1
4.4	Raumluftmessung	4	4/1
4.4.1	Aerosolsammler	4	4/1
4.4.2	Aerosolmonitore	4	4/2

Inhaltsverzeichnis

		Blatt	Seite
5	Überwachungsprogramm	5	1/1
5.1	Grenzwerte	5	1/1
5.2	Eignung der Meßverfahren	5	2/1
5.2.1	In-vivo-Verfahren	5	2/2
5.2.2	In-vitro-Verfahren	5	2/4
5.2.3	Raumluft-Überwachung	5	2/7
5.3	Durchführung der Überwachung	5	3/1
5.3.1	Regelmäßige Überwachung	5	3/1
5.3.2	Überwachung aus besonderem Anlaß	5	3/1
5.4	Interpretation von Überwachungsergebnissen	5	4/1
6	Auswertung der Meßergebnisse	6	1/1
6.1	Ermittlung der Aktivitätszufuhr	6	1/1
6.1.1	Ingestion	6	1/1
6.1.2	Inhalation	6	1/2
6.2	Ermittlung der Körperdosis	6	2/1
6.2.1	Ermittlung von Dosiswerten aus der zugeführten Aktivität	6	2/1
6.2.2	Dosisberechnung bei wiederholten Inkorporationen	6	2/1
7	Literatur	7	1/1
8	Anhang	8	1/1
8.1	Arbeitsvorschriften	8	1/1
8.1.1	Bestimmung von Thorium im Urin und Stuhl durch Trilaurylamin (Tridodecylamin, TLA); nach H. Schieferdecker	8	1/1
8.1.2	Bestimmung von Thorium im Urin und Stuhl durch Mineralisierung, Mitfällung an Calciumoxalat, Anionenaustausch, Elektrodeposition und Alpha-Spektrometrie; nach R. Biehl	8	1/2

		Blatt	Seite
8.1.3	Bestimmung von Thorium im Urin durch Mitfällung an Calciumoxalat und Eisenhydroxid und nachfolgendem Ionenaustausch; nach W. Riedel	8	1/4
8.1.4	Bestimmung von Thorium in Urin und Stuhl durch Gamma-Spektrometrie nach Neutronenaktivierung; nach K. Pock und F. Steger	8	1/6
8.1.5	Bestimmung von Thorium im Urin durch Gamma-Spektrometrie nach Neutronenaktivierung; nach H.S. Dang	8	1/8
8.2	Retentionswerte und Ausscheidungsraten (Tabellen)	8	2/1
8.3	Dosiskoeffizienten (Tabellen)	8	3/1

1 Einleitung

Thorium ist ein natürlich vorkommendes, in der Technik vielseitig verwendetes Element, dessen Isotope ohne Ausnahme instabil sind. Die am häufigsten vorkommenden Thoriumisotope sind Th-228 und Th-232 aus der Th-232-Zerfallsreihe und Th-230 aus der U-238-Zerfallsreihe. Als physikalisch langlebige Alphastrahler kommen ihre hohen radiotoxischen Gefährdungspotentiale insbesondere dann zur Wirkung, wenn sie nach Inhalation bzw. über die Wunde in den Körper gelangen und durch Stoffwechselvorgänge in Körperorganen langfristig deponiert werden. Durch Ingestion zugeführtes Thorium wird nur zu einem sehr geringen Anteil aus dem Magen-Darm-Trakt resorbiert und innerhalb weniger Tage zu nahezu 100 % über den Stuhl ausgeschieden. Bei beruflichem Umgang ist die Aktivitätszufuhr durch Inhalation der wahrscheinlichste Inkorporationsweg.

Die Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr (ALI bzw. GJAZ) in den internationalen Empfehlungen und nationalen Verordnungen berücksichtigen dieses hohe Strahlenrisiko. In der deutschen Strahlenschutzverordnung (STRL 89) betragen z.B. für beruflich thoriumexponierte Personen die GJAZ-Werte (Inhalation) für Th-232 je nach Verbindung nur 30 Bq bzw. 60 Bq.

Der Nachweis von inkorporiertem Thorium ist, insbesondere wenn entsprechend dem Entwurf der Richtlinie "Physikalische Strahlenschutzkontrolle" (AKI 92a) noch Bruchteile der Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr nachgewiesen werden sollen, problematisch. Zum einen sind auch bei aufwendiger Meß- und Analysentechnik die Nachweisgrenzen mancher Überwachungsverfahren zu hoch, zum anderen wird die Eignung meßtechnisch ausreichend empfindlicher Verfahren durch den Einfluß des natürlich aufgenommenen Thoriums erheblich eingeschränkt.

Unzureichend fundierte biokinetische Modelle erschweren zusätzlich die Bestimmung von Aktivitätszufuhren und Körperdosen.

Eine umfassende Darstellung der für die Inkorporationsüberwachung auf Thorium zur Verfügung stehenden Verfahren, die vergleichende Diskussion der Grenzen ihrer Anwendbarkeit sowie daraus abgeleitete Vorschläge für Überwachungsprogramme fehlen bisher. Daher wird mit dieser Loseblattsammlung versucht für die Durchführung der Inkorporationsüberwachung auf Thorium praktische Lösungen anzubieten.

Soweit Thorium-Isotope nicht speziell genannt werden, beziehen sich alle Aktivitätsangaben auf Th-232.

Für die Beurteilung beruflich bedingter Thorium-Inkorporationen sind sowohl für die Quantifizierung der Höhe der Inkorporationen als auch zur Festlegung der minimal noch feststellbaren Aktivitäten Kenntnisse über die Aufnahme von natürlich vorkommendem Thorium erforderlich. Zwischen der Verteilung des Thoriums und seiner Folgeprodukte in der Ökosphäre, in den Lebensmitteln und im Körper besteht ein von Dalheimer et al. (Dal 94) näher erläuterter Zusammenhang.

2.1 Vorkommen in der Geosphäre

Als prämordiales Element kommt Thorium in der Lithosphäre der Erdkruste sowohl im Eruptiv- als auch im Sedimentgestein je nach Gesteinsart mit einem Massenanteil von $2 \cdot 10^{-4}$ bis $8 \cdot 10^{-4}$ % weit verbreitet vor. Da Thorium fast immer in Begleitung des Urans vorkommt, besteht es in der Regel aus einem Gemisch der Isotope Th-232, Th-228 (Mutter- bzw. Tochternuklid der Th-232-Zerfallsreihe) sowie Th-230 (Folgeprodukt der U-238-Zerfallsreihe).

Entsprechend weit verbreitet, jedoch mit einem um 25 % reduzierten Anteil, kommt es infolge Verwitterung in Böden vor (Osb 65). Die Aktivitätskonzentration des Th-232 ist nach UNSCEAR (UNSC 82) mit derjenigen des Urans vergleichbar und beträgt weltweit im Mittel 25 Bq/kg mit Schwankungen je nach Bodenzusammensetzung von 7 - 50 Bq/kg Th-232 bzw. 10 - 50 Bq/kg U-238. Das Aktivitätsverhältnis Th-230/Th-232 sollte daher mit ungefähr 1 anzunehmen sein, was durch Meßwerte in den USA bestätigt wurde (Ibr 83). Vergleicht man diese Angaben mit den Aktivitätsanteilen dieser beiden Isotope in Thoriumpräparaten verschiedener Herkunft, so können sich zum Teil beträchtliche Abweichungen vom Aktivitätsverhältnis 1 ergeben (Sch 84). Von Awwal et al. (Aww 65) und Reichelt (Rei 93) werden die lagerstättenbedingten Aktivitätsverhältnisse Th-230/Th-232 zwischen 0,1 und 1 angegeben, die Extremwerte können bei 0,02 und 15 liegen (Waz 89).

Die Konzentration des Th-232 in Böden innerhalb der Bundesrepublik Deutschland wird im Bereich 2 - 60 Bq/kg angegeben (Rob 87).

In höheren Konzentrationen kommt Thorium hauptsächlich in dem weit verbreiteten Mineral Monazit vor, das jedoch nur in wenigen Gebieten auf der Erdoberfläche als abbauwürdige Lagerstätte zu finden ist.

2.2 Aufnahme durch den Menschen

Der Thoriumgehalt in der Atemluft (Resuspension von Bodenstaub), im Trinkwasser und in den Nahrungsmitteln sind die natürlichen Quellen des Thoriums im Menschen. Die wenigen vorliegenden Meßdaten sind in Tabelle 2/1 zusammengefaßt.

Tab. 2/1: Thoriumgehalt der Atemluft, des Trinkwassers und der Nahrungsmittel

Herkunft	**Thoriumgehalt**			**Zitat**
	Th-232	**Th-228**	**Th-230**	
Luft (μBq/m^3)				
New York City	0,41	1,04	0,56	Fis 87
Berlin	1,2	-	1,7	Kol 85
Wasser (mBq/l)				
Jugoslawien	0,9	-	-	Pic 68
Leitungswasser (mBq/l)				
New York City	0,05	0,11	0,13	Fis 87
Mineralwasser (mBq/l)				
Bundesrep. Deutschland	-	1 - 56	-	Fri 84
Nahrungsmittel (mBq/kg FG)[1]				
New York City	0 - 30	-	0,12 - 32	Fis 87

[1] Untersuchung von 19 verschiedenen Nahrungsmitteln (FG = Frischgewicht)

Auf der Basis dieser Meßergebnisse wurde die natürliche Thoriumaufnahme des Menschen abgeschätzt (Tabelle 2/2).

Tab. 2/2: Natürliche Thoriumzufuhr des Menschen, bezogen auf den Standardmenschen nach ICRP-Publikation 23 (ICRP 23)

Ort	Thoriumaufnahme (mBq/d)			Zitat
	Th-232	Th-228	Th-230	
Nahrungsmittel				
Bombay	8,3	-	-	Dan 86
Karlsruhe	5,9	46	9,4	Fri 83
New York City	4,1	-	6,1	Fis 87
Trinkwasser				
Bombay	0,12	-	-	Dan 86
New York City	0,07	0,15	0,18	Fis 87
Atemluft				
Berlin	0,024	-	0,034	Kol 85
Bombay	0,08	-	-	Dan 86
New York City	0,0082	0,021	0,011	Fis 87
Nahrung/Wasser/Luft[1]				
Bombay	8,5	-	-	Dan 86
Jülich	6,9	19	4,0	Bey 89
New York State	2,2	17	7,4	Lin 86
UdSSR	12	-	-	Paw 66
ICRP-Publikation 23	12	-	-	ICRP 23

[1] abgeleitet aus Messungen der natürlichen Thoriumausscheidungen mit dem Stuhl

Aus der Tabelle 2/2 ist ersichtlich, daß, soweit in den Zufuhrquellen neben Th-232 auch Th-228 gemessen wurde, das Aktivitätsverhältnis Th-228/Th-232 deutlich größer 1 ist. Als Grund hierfür ist die als "wash out" bezeichnete höhere Mobilität des Ra-228 gegenüber dem Thorium von der Geosphäre in die Hydrosphäre anzunehmen, da Radium im Gegensatz zum Thorium im neutralen wässrigen Medium als Kation in nicht kondensierter

Form vorliegt. Bestätigung findet diese Annahme durch die Tatsache, daß das Th-228/Th-232-Aktivitätsverhältnis in frisch abgetrennten Thoriumpräparaten unterhalb 1 ist. Dieser Anreicherungstrend setzt sich in der Biosphäre fort und führt letztlich zu der beobachteten höheren Th-228-Aufnahme durch den Menschen.

Als Folge hiervon ergibt sich sowohl im Stuhl als auch im Urin eine durch die Nahrungszufuhr bedingte Thoriumausscheidung, in der das Th-228 oberhalb des Gleichgewichts zum Th-232 zu finden ist, da ein erheblicher Teil der Th-228-Aktivität durch den Zerfall des zugeführten Ra-228 im Körper entsteht.

Auch das Th-230/Th-232-Aktivitätsverhältnis ist nach den bisherigen Ergebnissen von Stuhl- und Lebensmittelmessungen häufig, jedoch nicht immer, größer 1, entsprechend der überwiegend höheren U-238- bzw. U-234-Aktivität gegenüber der Th-232-Aktivität in den Lebensmitteln. Dagegen erwies sich das Aktivitätsverhältnis Th-230/Th-232 im Urin aus den vorliegenden Messungen als deutlich größer 1, was wahrscheinlich auf die höhere Darmresorption des Uran gegenüber dem Thorium zurückgeführt werden kann.

Höhe und Streubreite der Ausscheidung von Thorium aus natürlichen Quellen (natürliche Ausscheidung) sind bisher nur durch wenige Meßergebnisse belegt. Die Ergebnisse von Stuhluntersuchungen (Tabelle 2/2) konnten zur Abschätzung der natürlichen Thoriumzufuhr benutzt werden, da seine Zufuhr über die Atemluft vernachlässigbar und der im Darm resorbierte Anteil des ingestierten Thoriums sehr klein ist.

Die ICRP empfiehlt für den Referenzmenschen von einer täglichen Zufuhr bzw. Stuhlausscheidung von 3 µg/d (12 mBq Th-232/d) auszugehen (Paw 66/ICRP 23).

Die natürliche Thoriumausscheidung über den Urin beträgt nach ICRP-Angaben 0,4 mBq Th-232 pro Tag (0,1 µg/d; Paw 66/ICRP 23). Dieser Wert wird durch spätere Untersuchungen nur zum Teil bestätigt (Pic 68) und kann als oberer Grenzwert der erheblichen individuellen und lokalen Schwankungen betrachtet werden.

Von Dang et al. sowie Hewson et al. wurden für Personen der allgemeinen Bevölkerung mittels Neutronenaktivierungsanalyse Urinkonzentrationen von 4 bis 80 µBq Th-232/l ermittelt (Dan 89, Hew 93). Untersuchungen mittels alphaspektrometrischer Langzeitmessungen (10.000 min Meßzeit) der Meßpräparate von 48-h-Urinproben von sieben beruflich nicht exponierten Personen aus Berlin ergaben Mittelwerte von 0,03 mBq Th-232/d, 0,7 mBq Th-230/d und 0,3 mBq Th-228/d (Rie 93).

Die Ausscheidungsraten dieser Isotope aus natürlicher Zufuhr sind bei der Interpretation von Ausscheidungsdaten beruflich exponierter Personen zu beachten. Die dabei zur Zeit bestehenden Probleme werden in Kapitel 6.1 aufgeführt.

2.3 Anwendung in der Technik

Ausgangsmaterial für die meisten Thoriumverbindungen ist das Nitrat, das aus Monazitsand hergestellt wird. Dieser wird zunächst durch mechanische Aufbereitungsprozesse stark angereichert. Der Sand wird dann mit konzentrierter Schwefelsäure unter Erwärmen aufgeschlossen. Danach wird das Thorium zusammen mit den seltenen Erdmetallen durch Neutralisation als Phosphat gefällt. Die Phosphate werden in konzentrierter Salzsäure gelöst und mit Oxalsäure erneut gefällt. Thorium wird dann mit warmer Sodalösung als lösliches, komplexes Carbonat extrahiert. Die Reinigung erfolgt durch mehrmalige Umkristallisation als Sulfat. Dieses wird nach Fällung als Hydroxid mittels Salpetersäure in das Nitrat überführt.

Nicht-nukleare Anwendung (Pem 88 u.a.)

Gaslampen mit Thorium-Glühstrümpfen als Lichtquelle finden immer noch Anwendung, z.B. in tragbaren Campinglampen, dekorativen oder Notbeleuchtungseinrichtungen. Schätzungen zufolge werden in den USA noch jährlich 25 Millionen Glühstrümpfe mit Thoriumgehalten von je 0,2 - 2 kBq Th-232 vertrieben (Odo 81). Sie werden durch Imprägnierung von Natur- und Synthetikfasern mit einer Lösung aus Thoriumnitrat, -sulfat und Cernitrat hergestellt. Nach Behandeln mit Ammoniak werden die Salze in Hydroxide überführt. Bei der ersten Benutzung werden die Hydroxide dehydratisiert, und das dadurch gebildete Thoriumoxid erzeugt bei weiterer Verwendung ein brillantes weißes Licht.

Bis 1950 wurden mehr als 90 % des verbrauchten Thoriums für die Glühstrumpf-Fabrikation eingesetzt. Danach gewannen andere Verwendungsbereiche rasch größere Bedeutung.

Mg/Th-Legierungen zeichnen sich durch geringes Gewicht und hochtemperaturbeständige mechanische Eigenschaften aus und werden daher in der Flugzeug- und Raumfahrtindustrie bevorzugt eingesetzt.

Feuerfestes Material aus Thoriumdioxid hat wegen seines hohen Schmelzpunktes im Vergleich zu anderen kommerziell verwendeten Metalloxiden eine ausgezeichnete thermische Stabilität, einen niedrigen Dampfdruck und eine geringe Reaktivität gegenüber Metallen. Es wird daher bevorzugt als Tiegelmaterial zum Metallschmelzen eingesetzt.
Die Verwendung dieses Materials bleibt wegen der hohen Kosten, der Radioaktivität und der geringen thermischen Schockresistenz sehr speziellen Zwecken vorbehalten.

Als **Kathode in Magnetron-Röhren** wird Thoriumdioxid in Verbindung mit keramischem Material eingesetzt.

Beim **Nernst-Glower**, einer Infrarotlampe, wird die mit steigender Temperatur steigende elektrische Leitfähigkeit genutzt. Er wird durch Sintern einer Mischung von Zirkonium-, Yttrium-, Thorium- und anderen Oxiden hergestellt.

Widerstandsschmelzöfen mit Heizanordnungen aus 95 Gew.% Thoriumoxid und 5 Gew.% Yttrium- und Lanthanoxid können auch unter oxidierenden Bedingungen bei Temperaturen von mehr als 2000 °C betrieben werden.

Thermistoren, unter Verwendung von Thoriumoxid hergestellt, eignen sich sehr gut für Temperaturbereiche zwischen 400 °C und 1000 °C.

Als **Katalysator** finden Thorium und seine Verbindungen, insbesondere als Oxid, für viele Reaktionen steigendes Interesse. Seinen ersten Einsatz fand Thoriumoxid als Katalysator bei der Dehydratation und Dehydrierung von Alkoholen, insbesondere von Ethanol zu Ethen und von 2,3-Butandiol zu Butadien. Ein weiteres großes Anwendungsgebiet ist die Fischer-Tropsch-Kohlenwasserstoffsynthese. Bei der Kohlenmonoxid- und Stickoxid-Abgasreinigung bleihaltiger Kraftstoffe wird seine katalytische Wirkung bei Oxidationsreaktionen nutzbar gemacht.

Optische Instrumentengläser (z.B. vergütete Kameraobjektive) enthalten zur Erzeugung bestimmter optischer Eigenschaften einen erheblichen Anteil an Thorium (NCRP 95, Tay 83, Lew 85, Wal 85).

In der **Schweißtechnik** verwendete Wolframelektroden enthalten einen 2 %igen Thoriumanteil. Schätzungen zufolge werden in den USA jährlich 1350 - 1500 kg Thoriumdioxid für die Produktion derartiger Elektroden verarbeitet (NCRP 95).

Starter von Fluoreszenzlampen enthalten ca. 200 mBq Thorium. In den USA werden pro Jahr ca. 6 Millionen solcher Starter verkauft (NCRP 95).

Weitere nicht-nukleare Anwendungsgebiete für Thorium und seine Verbindungen:

- Verwendung als Katalysator bei Detektoren für brennbare Gase, wie Methan und Kohlenmonoxid,
- Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von elektrischen Glühdrähten,
- Verbesserung der thermoionischen Emission bei Elektronenröhren,
- Einsatz als Gasfänger zur Vakuumverbesserung in Elektronenröhren,
- Verwendung als Kathodenmaterial bei Photozellen.

2.3 Anwendung in der Technik

Nukleare Anwendung (Vie 88)

Nicht spaltbares Th-233 kann nach der Reaktion von Th-232 mit Neutronen in spaltbares U-233 umgewandelt werden:

$$Th\text{-}232\ (n,\gamma)\ Th\text{-}233 \xrightarrow{\beta^-} Pa\text{-}233 \xrightarrow{\beta^-} U\text{-}233$$

Damit steht neben dem einzig natürlich vorkommenden, leicht spaltbaren Uranisotop U-235 noch ein weiteres spaltbares Nuklid, das U-233, zur Verfügung. Während Pu-239 nur in schnellen Brütern gewonnen werden kann, kann U-233 auch in thermischen Reaktoren erzeugt werden. Im letzteren Fall wird nicht mehr Spaltstoff erzeugt als verbraucht. Praktische Anwendung findet dieser Prozeß in der Linie der gasgekühlten Hochtemperaturreaktoren.

3.1 Zerfallsdaten und Isotopenzusammensetzung

Bisher sind 25 Thorium-Isotope nachgewiesen, die alle instabil sind und lückenlos die Massenzahlen 212 - 236 umfassen.

Für die Inkorporationsüberwachung relevant sind die natürlich vorkommenden Isotope Th-232 und Th-228 aus der Th-232-Zerfallsreihe sowie Th-230 aus der U-238-Zerfallsreihe. Eine untergeordnete Rolle spielen Th-234 (U-238-Zerfallsreihe), Th-231 und Th-227 (U-235-Zerfallsreihe) sowie das künstlich erzeugte Isotop Th-229 (Np-237-Zerfallsreihe). Die drei letztgenannten Isotope werden bei der radiochemischen Bestimmung von Thorium häufig als Tracer verwendet.

Die Zerfallsdaten der für die Inkorporationsüberwachung wichtigsten Thoriumisotope sind in Tabelle 3/1 (ICRP 38) zusammengefaßt.

Die meßtechnisch wichtigsten Daten zur Thorium-232-Zerfallsreihe sind in Tabelle 3/2 (ICRP 38) aufgeführt.

Eine kompakte Zusammenstellung der Zerfallsdaten ist auch in dem PTB-Bericht von Schötzig et al. zu finden (Söt 89).

3.1 Zerfallsdaten und Isotopenzusammensetzung

Tab. 3/1: Zerfallsdaten der für die Inkorporationsüberwachung wichtigsten Thorium-Isotope (ICRP 38)

Nuklid	Halbwertzeit	spez. Aktivität (Bq/g)	Hauptenergien (MeV) mit Emissionswahrscheinlichkeit (%)		
			α	β[1]	γ
Th-232	1,405 E10 a	4,1 E03	3,952 (23,0) 4,010 (76,8)	-	0,059 (0,2)
Th-228	1,9131E00 a	3,0 E13	5,340 (26,7) 5,423 (72,7)	-	0,084 (1,2)
Th-230	7,700 E04 a	7,2 E08	4,621 (23,4) 4,688 (76,2)	-	0,068 (0,4)
Th-234	2,410 E01 d	8,6 E14	-	0,019 (2,7) 0,025 (6,2) 0,025 (18,6) 0,051 (72,5)	0,063 (3,8) 0,092 (2,7) 0,093 (2,7)
Th-231	2,552 E01 h	2,0 E16	-	0,056 (12,6) 0,080 (11,8) 0,080 (36,3) 0,085 (34,3)	0,026 (14,8) 0,084 (6,5)
Th-227	1,872 E01 d	1,1 E15	5,668 (2,1) 5,694 (1,5) 5,701 (3,6) 5,710 (8,2) 5,714 (4,9) 5,757 (20,2) 5,807 (1,3) 5,867 (2,4) 5,960 (3,0) 5,978 (23,3) 6,009 (2,9) 6,038 (24,4)	-	0,050 (8,5) 0,080 (2,1) 0,094 (1,4) 0,211 (1,1) 0,236 (11,2) 0,256 (6,8) 0,286 (1,6) 0,300 (2,0) 0,304 (1,1) 0,330 (2,7)
Th-229	7,340 E03 a	7,8 E09	4,799 (1,3) 4,815 (9,3) 4,839 (4,8) 4,846 (56,3) 4,902 (10,2) 4,969 (6,0) 4,979 (3,2) 5,052 (5,2) 5,053 (1,6)	-	0.031 (4,1) 0,086 (3,1) 0,125 (1,2) 0,137 (1,6) 0,148 (1,4) 0,157 (1,1) 0,194 (4,6) 0,211 (3,3)

[1] mittlere Beta-Energie

Tab. 3/2: Meßtechnisch wichtige Daten zur Th-232-Zerfallsreihe (ICRP 38)

Nuklid	Histor. Name	Halbwertzeit	Hauptenergien (MeV) mit Emissionswahrscheinlichkeit (%)		
			α	β[1]	γ
Th-232	Thorium	1,405 E10 a	3,952 (23,0) 4,010 (76,8)	-	0,059 (0,2)
Ra-228	Mesothorium I	5,75 E00 a	-	0,010 (100)	-
Ac-228	Mesothorium II	6,13 E00 h	-	0,182 (7,6) 0,328 (5,9) 0,386 (40,4) 0,611 (11,4) 0,748 (8,2)	0,338 (12,0) 0,911 (29,0) 0,965 (5,5) 0,969 (17,5)
Th-228	Radiothorium	1,9131E00 a	5,340 (26,7) 5,423 (72,7)	-	0,084 (1,2)
Ra-224	Thorium X	3,66 E00 d	5,449 (4,9) 5,686 (95,1)	-	0,241 (3,9)
Rn-220	Emanation (Thoron)	5,56 E01 s	6,288 (99,9)	-	-
Po-216	Thorium A	1,5 E-01 s	6,779 (100)	-	-
Pb-212	Thorium B	1,064 E01 h	-	0,042 (5,2) 0,094 (84,9) 0,173 (9,9)	0,239 (44,6)
Bi-212 (0,36)[2]	Thorium C	6,055 E01 m	6,051 (25,2) 6,090 (9,6)	0,531 (7,9) 0,832 (48,2)	0,727 (11,8)
Po-212 (0,64)[2]	Thorium C'	3,05 E-07 s	8,785 (100)	-	-
Tl-208	Thorium C''	3,07 E00 m	-	0,439 (22,8) 0,533 (22,0) 0,647 (50,9)	0,277 (6,8) 0,511 (21,6) 0,583 (85,8) 0,860 (12,0) 2,615 (99,8)

1) mittlere Beta-Energie
2) Verzweigungsfaktor

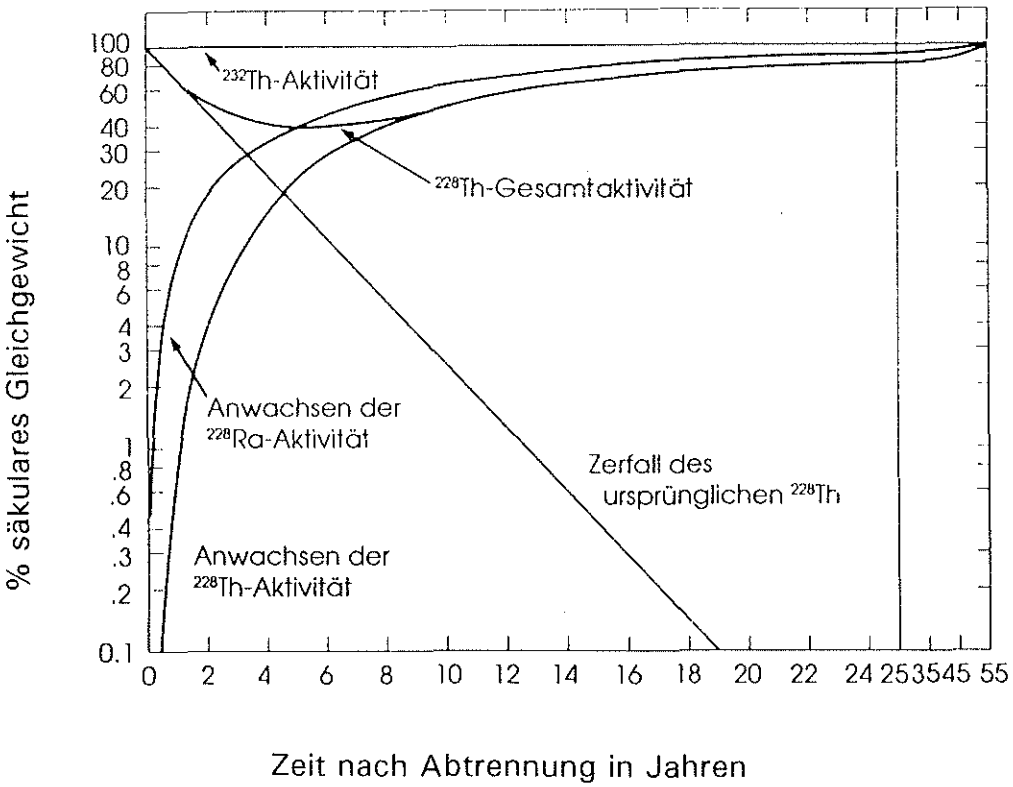
3.1 Zerfallsdaten und Isotopenzusammensetzung

Ausgehend von einem radioaktiven Gleichgewicht zwischen Th-232 und seinen Tochterprodukten entwickeln sich nach einer chemischen Trennung die Isotopenverhältnisse entsprechend dem in Abbildung 3/1 gezeigten Verlauf. Das säkulare Gleichgewicht würde erst nach ca. 60 Jahren (ungefähr zehnfache HWZ_{phys} des Ra-228) wieder erreicht werden.

Neben der in Kapitel 2.1 diskutierten Zusammensetzung trägt auch der Zeitpunkt der Abtrennung zu verschiedenen Isotopenzusammensetzungen bei.

Ferner kann infolge biokinetischer Vorgänge die Isotopenzusammensetzung in-vivo verschoben sein.

Abb. 3/1: Änderung der Aktivität im natürlichem Thorium nach einer Abtrennung (schematische Darstellung)



Schwerpunkt dieses Kapitels sind die chemischen Eigenschaften von Thorium, soweit sie seine Abtrennung in Ausscheidungsproben betreffen. Einer Einführung über das Verhalten von Thoriumionen in wässriger Lösung mit spezieller Berücksichtigung der Hydrolyseeigenschaften folgen Mitfällungsreaktionen, Komplexbildungen mit anorganischen Liganden für Ionenaustauscherchromatographie und Komplexbildung mit organischen Liganden bei Flüssigextraktion.

3.2.1 Eigenschaften von Thorium in wässriger Lösung

Im Gegensatz zu Uran und den Transuranen existiert Thorium nur im vierwertigen Oxidationszustand. Thorium bildet keine Oxokationen. Die hohe Ionenladungsdichte des Th^{4+}-Ions bedingt große Kristallenergien. Demzufolge sind viele binäre Verbindungen, wie Fluorid, Jodat, Phosphat, Peroxid und Oxalat, schwer löslich. Bemerkenswert ist die Tendenz des Th^{4+}-Ions zur Hydrolyse. Die hydrolytischen Eigenschaften des Thoriums und die Schwerlöslichkeit des $Th(OH)_4$ sind Ursache für die vom pH-Wert und vom anionischen Medium abhängige Instabilität wässriger Thoriumlösungen. Als Folge der Hydrolyse bilden sich mehrkernige komplexe Kationen von zum Teil kolloidaler Größe. Im Tracerkonzentrationsbereich ist die Hydrolyse verzögert. Nicht hydrolysierte Thoriumkationen liegen, soweit sie keine Komplexe mit Anionen hoher Ladungsdichte bilden, hydratisiert vor (Ahr 88).

3.2.2 Mitfällung

Die in der Spurenanalytik des Thoriums am häufigsten eingesetzten Mitfällungsträger sind Calciumoxalat, Eisenhydroxid und Lanthanfluorid.

Calciumoxalat wird bei pH-Werten oberhalb von 1 mit 100 %iger Ausbeute gefällt (Yam 82) und eignet sich daher hervorragend als Mitfällungsträger zur Abtrennung von Thorium (quantitative Fällung bei pH 1 - 2), anderen Aktiniden und Lanthaniden von den relativ häufigen Ionen wie Fe^{3+}, Al^{3+}, Ti^{4+} und PO_4^{3+}. Eisen- und primäres Calciumphosphat werden erst oberhalb von pH 1,5 bzw. 3 mit nennenswerter Ausbeute gefällt.

Die Mitfällung des Thoriums an Eisenhydroxid erfolgt im wesentlichen durch Adsorption und ist unabhängig von der Thoriumkonzentration. Vollständige Mitfällung erfolgt ab pH 4 (Mar 88).

Aus stark saurem ammoniumfluoridhaltigen Medium wird Thorium quantitativ an Lanthanfluorid mitgefällt. Es kann z.B. dadurch von Zr, Fe und Ti abgetrennt werden.

3.2.3 Komplexbildung mit anorganischen Liganden

Anorganische Liganden bilden mit Thorium je nach Ligand und Medium kationische oder anionische Komplexe, die zur analytischen Abtrennung des Thoriums durch Ionenaustausch geeignet sind. Die größte Bedeutung haben hierbei die Nitratokomplexe.

In reinen konzentrierten salpetersauren Lösungen (5 - 10 m HNO_3) bildet Th-IV den stabilen Nitratokomplex $[Th(NO_3)_6]^{2-}$, der gut an Anionenaustauschern adsorbiert wird und so die Abtrennung des Thoriums mit hoher Selektivität gestattet (Far 64).

Im Gegensatz zu den Aktiniden U-IV, Np-IV und Pu-IV bildet Th-IV keine anionischen Chlorokomplexe, die an Anionenaustauschern adsorbiert werden.

3.2.4 Komplexbildung mit organischen Liganden

Die Komplexbildung mit organischen Liganden (Koa 85) ist für die analytische Abtrennung des Thoriums durch Flüssigextraktion von wesentlicher Bedeutung. Dagegen finden Farbreaktionen des Thoriums mit Heterocyclen (z.B. Cupferron und Arsenazo-III) zur spektralphotometrischen Bestimmung für Strahlenschutzzwecke nur noch selten Anwendung.

Thorium reagiert in flüssigen Zweiphasensystemen mit einer Vielzahl organischer Reagentien, die sich nach Art der entstehenden Komplexverbindungen wie folgt klassifizieren lassen:

Zu den Liganden, die mit Thorium **Anlagerungskomplexe** bilden, gehören Verbindungen mit kohlenstoffgebundenen Sauerstoffatomen in Alkoholen, Estern, Aldehyden und Ketonen und mit phosphorgebundenen Sauerstoffatomen in vollständig veresterten Organophosphorsäuren. Wesentliche Vertreter dieser Gruppe sind Tributylphosphat (TBP) und Tri-n-octylphosphinoxid (TOPO). Beide Verbindungen werden bevorzugt bei der großtechnischen Abtrennung des Thoriums aus Erzen eingesetzt.

Ebenfalls bevorzugt großtechnisch werden die wesentlichen Vertreter der mit Thorium **Durchdringungskomplexe** bildenden Verbindungen, wie Dibutylphosphorsäure (DBP) und Di(2-ethylhexyl)phosphorsäure (HDEHP), eingesetzt. Vorzüge des HDEHP sind seine chemische Stabilität, geringe Löslichkeit in Wasser und leichte kommerzielle Verfügbarkeit. Es gehört zu den am besten untersuchten Extraktionsmitteln.

Viele organische Verbindungen (z.B. Diketone, Derivate von cyclischen Carbonylverbindungen, Ketophosphonate und Chinolinderivate) bilden intramolekulare **Chelatringe** mit dem Thoriumion, welche aus wässriger Lösung mit organischen Solventien extrahiert werden können. In früheren Jahren fanden für analytische Zwecke insbesondere die β-Diketo-

ne, speziell das Thenoyltrifluoroaceton (TTA) weiteste Anwendung.

Für die Extraktion des Thoriums haben die hochmolekularen chemisch stabilen Amine als **Ionenpaarbildner** die größte Bedeutung gefunden. Es sind meistens Gemische aus primären, sekundären und tertiären Aminen sowie quaternären Ammoniumsalzen, die in der Regel unter kommerziellen Namen ohne Aussage über die chemische Struktur vertrieben werden. Breite analytische Anwendung finden z.B.:

- Trioctylamin (TOA),
- "Primen JM-T" (Mischung aus primären und tertiären Aminen mit C_{15}-C_{21}-Alkylen),
- "Adogen 363", Trilaurylamin (TLA) und
- "Aliquat 336" (Mischung von Methyltrialkyl-(C_8-C_{10})-Ammoniumverbindungen).

Viele Amine extrahieren Thorium aus sulfathaltigen Lösungen, wodurch sie für industrielle Anwendungen besonders geeignet sind.

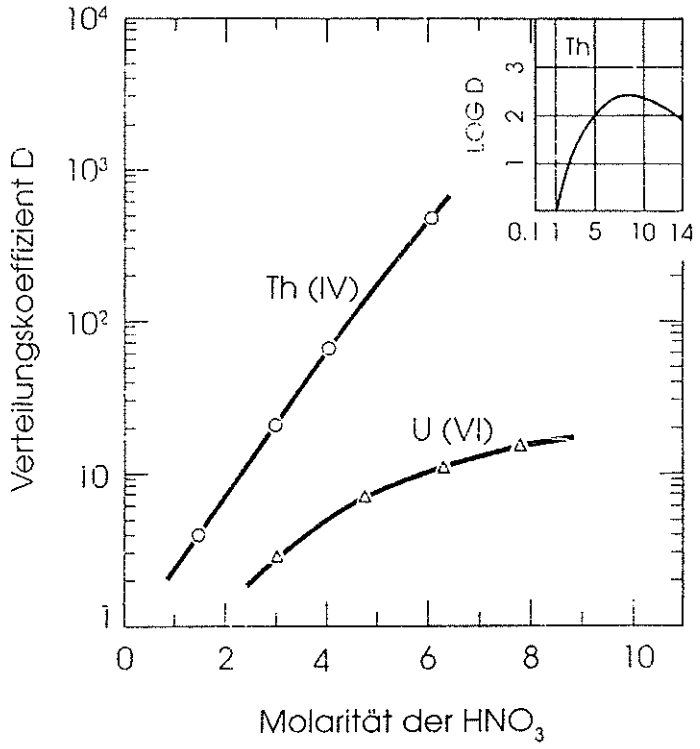
3.2.5 Verhalten an Ionenaustauschern

Kationenaustauscher werden häufig großtechnisch zur Abtrennung des Thoriums von Ionen der Alkalimetalle, Erdalkalien und der Seltenen Erden eingesetzt. Die größte Bedeutung haben beim Thorium die stark saurem Kationenaustauscher mit der funktionellen Sulfonsäure in einem Styrol-Divinylbenzolpolymer.

Ein wichtiges Verfahren zur analytischen Abtrennung des Thoriums mittels Anionenaustauscher beruht auf seiner Fähigkeit zur Bildung des in stark salpetersauren Lösungen stabilen komplexen Anions $[Th(NO_3)_6]^{2-}$. Aus 5 - 10 m salpetersaurer Lösung werden neben Thorium lediglich Np-IV und Pu-IV stark und Pa-V, Np-V, U-VI, Ce-IV und Bi-III weniger stark adsorbiert. Der Verteilungskoeffizient in 8 m Salpetersäure von Th-IV beträgt ca. 300 (Far 64, Kor 73).

Eingesetzt werden meistens stark basische Austauscher auf Polystyrolbasis, die unter kommerziellen Namen vertrieben werden. Beispielhaft sind die Verteilungsverhältnisse von U-IV und Th-IV in 1 - 10 m Salpetersäure in Abbildung 3/2 dargestellt (Hau 90). Durch Elution mit HCl wird der Trennvorgang komplettiert.

Abb. 3/2: Verteilungskoeffizienten von U-VI und Th-IV in Salpetersäure (Krs 58, Hau 90)



3.3 Biokinetische Eigenschaften

Aufgrund des natürlichen Vorkommens und der technischen Bedeutung von Thorium gibt es eine Vielzahl von Untersuchungen und Publikationen zur Biokinetik des Thoriums (Mensch, Tier). Zusammenfassungen solcher Studien sind in den Arbeiten von Schieferdekker et al. sowie Dalheimer et al. zu finden (Sch 90, Dal 94).

Generell zeigt sich eine große Variabilität der Untersuchungsergebnisse, teilweise sind die publizierten Daten widersprüchlich. Offene Fragen betreffen u.a. die Aufnahme von Thorium aus dem Darm (Joh 89) sowie den Einfluß von Alter und Expositionsdauer (Luc 70, Cli 71). Bei der Verteilung von Thorium im Organismus steht die Frage nach dem Anteil an inkorporiertem Thorium, der im Muskelgewebe gespeichert wird, im Vordergrund (Sto 60, Sto 65, Sun 87).

Die am Menschen gewonnenen Daten sind nicht ausreichend zuverlässig, um trotz dieser ungeklärten Fragen ein gegenüber der ICRP-Publikation 54 verbessertes Modell ableiten zu können (ICRP 54, Sch 82). Das ICRP-Modell beschreibt:

- die Aufnahme von Thorium aus dem Darm durch einen f_1-Wert von 0,02 % für alle Thorium-Verbindungen,
- die Retention von inhaliertem Thorium in der Lunge durch die Stoffklasse Y für Thorium-Oxide und -Hydroxide bzw. durch die Stoffklasse W für alle anderen Verbindungen und
- die anteilige Retention von Thorium nach der Aufnahme ins Blut durch folgende Retentionsfunktionen R(t) in Tagen:

  für das Skelett:

$$R(t) = 0{,}7 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t}{8000}\right)$$

  für die Leber:

$$R(t) = 0{,}04 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t}{700}\right)$$

  für den Restkörper:

$$R(t) = 0{,}16 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t}{700}\right) + 0{,}1 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t}{0{,}5}\right)$$

4.1.1 Meßprinzip

Die in-vivo Messung basiert auf dem Nachweis der aus dem Körper austretenden Gamma- und Röntgen-Strahlung der inkorporierten Radionuklide. Die Thoriumisotope Th-228, Th-230 und Th-232 selbst emittieren nur eine niederenergetische Photonenstrahlung mit geringer Emissionswahrscheinlichkeit (Tabelle 3/1). Zum Nachweis dieser Strahlung benötigt man sehr aufwendige Detektorsysteme, die ein hohes Ansprechvermögen, einen sehr niedrigen Nulleffekt und außerdem auch ein sehr gutes Auflösungsvermögen haben müssen. Mit den besten zur Zeit verfügbaren Detektorsystemen (Feldanordnungen von sechs bis zwölf planaren Reinst-Germanium-Detektoren) können nur relativ hohe Thorium-Aktivitäten nachgewiesen werden. Die Nachweisgrenzen variieren je nach Meßzeit, Aktivitätsverteilung und Hintergrundstrahlungsbedingungen zwischen 0,1 und 0,2 kBq Th-228 bzw. zwischen 0,3 und 0,6 kBq Th-230 oder zwischen 0,5 und 1 kBq Th-232. Für die Inkorporationsüberwachung ist daher die direkte gammaspektrometrische Messung der Thorium-Isotope zu unempfindlich.

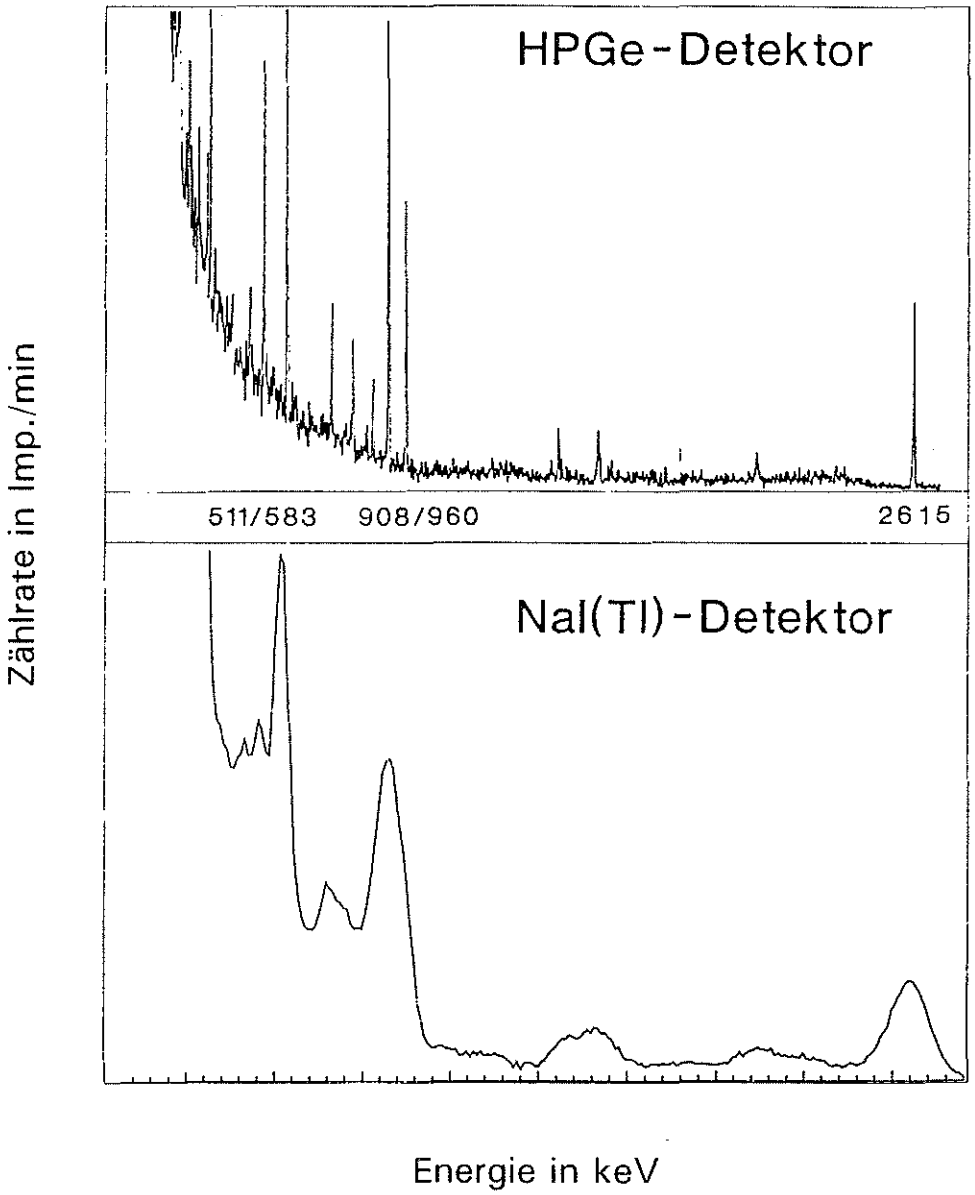
Wesentlich empfindlicher ist die Messung von Thorium über dessen Folgeprodukte Ac-228 und Tl-208 (Tabelle 3/2). Bei Kenntnis der Aktivitätsverhältnisse kann die Aktivität von Ac-228 als Maß für die Th-232-Aktivität dienen und die Aktivität von Tl-208 als Maß für die Th-228-Aktivität.

Abbildung 4/1 zeigt die mit einem Halbleiterdetektor (HPGe) und mit einem Szintillationsdetektor (NaI(Tl)) aufgenommenen Spektren eines Th-232-Standardpräparates, das sich im radioaktiven Gleichgewicht mit seinen Folgeprodukten befindet. Die Bestimmung der Aktivität von Ac-228 sollte sich auf die 911/969 keV Linien abstützen und die der Aktivität von Tl-208 auf die 2615 keV Linie. Diese Linien können bei Verwendung von Halbleiterdetektoren gut vom Untergrund separiert werden. Bei Verwendung von Szintillationsdetektoren können dagegen erhebliche Probleme bei der Separierung des 911/969 keV Peaks des Ac-228 von dem durch die Umgebungsstrahlung bedingten Untergrund auftreten. Die Hauptursache für diese Schwierigkeiten liegt in der wechselnden Aktivität der Radon-Folgeprodukte in der Raumluft; die Compton-Kante der 1120 keV Linie von Bi-214 liegt bei 911 keV und somit unter der 911/969 keV Linie.

Insgesamt gesehen sind beide Detektorsysteme etwa gleich gut geeignet, allerdings ergeben sich bei der Messung von Ac-228, bedingt durch das bessere Energieauflösungsvermögen, gewisse Vorteile zugunsten der Halbleiterdetektoren; während bei der Messung von Tl-208, bedingt durch den höheren Wirkungsgrad, Vorteile zugunsten der Szintillationsdetektoren zu verzeichnen sind.

Zur Reduzierung von Hintergrundstrahlung kann die Abschirmkammer, in der das Meßsystem untergebracht ist, mit einem gut gefilterten Ventilationssystem ausgerüstet werden.

Abb. 4/1: Gamma-Spektren von Th-232 im radioaktiven Gleichgewicht mit seinen Folgeprodukten, gemessen mit Reinst-Germanium-Detektoren (HPGe) bzw. NaI(Tl)-Szintillationsdetektoren (Doe 92)



In Gegenden mit höheren Radon-Konzentrationen in der Luft ist eine Aktivkohlefilterung oder eine Belüftung mit gealterter Luft hilfreich.

4.1.2 Meßgeometrie

Zur Erzielung eines möglichst hohen Wirkungsgrades ist es erforderlich, die Detektoren so nahe wie möglich an das Thoriumdepot heranzubringen. Das heißt, bei zeitlich kurz zurückliegenden Inkorporationen empfiehlt sich im allgemeinen eine Lungenmessung, während bei länger zurückliegenden Inkorporationen eine Ganzkörpermessung angezeigt ist.

Für die **Lungenmessung** verwendet man je nach Detektorgröße zwei bis zwölf Detektoren, die in direktem Körperkontakt über dem Thorax, in einigen Fällen auch unter dem Thorax, des Probanden angeordnet werden. Wegen der erforderlichen Meßzeiten von etwa 30 min bis 60 min sollte der Proband in liegender oder in halbliegender Position gemessen werden. Im Sitzen können sich Probleme mit der Reproduzierbarkeit der Meßgeometrie ergeben.

Bei der **Ganzkörpermessung** befindet sich der Proband in liegender Position. Die Detektoren sind im Abstand von etwa 20 bis 30 cm oberhalb und unterhalb des Probanden angeordnet. Zur Erzielung einer möglichst homogenen Empfindlichkeit sind die Detektoren längs der Körperachse gegeneinander versetzt. Einen vergleichbaren Effekt erzielt man auch dadurch, daß man die Detektoren während der Messung längs der Körperachse verschiebt (Scanning).

4.1.3 Kalibrierung

Zur Kalibrierung bei einer **homogenen Verteilung** der Nuklide im Körper genügen, wegen der relativ geringen Absorption der Strahlung von Ac-228 und Tl-208 im Körper, relativ einfache Flaschenphantome, z.B. das Flaschenphantom nach H. Schmier. Dasselbe gilt für quasi-homogene Verteilungen, wie z.B. bei Muskel- oder Knochendepots.

Bei bestimmten **Organdepots** (inhomogene Verteilung) können geometrische Effekte eine größere Rolle spielen. Diese Effekte fallen umso mehr ins Gewicht, je näher man mit den Detektoren an das Nukliddepot herangeht. Aus diesem Grund benötigt man für genauere Organkalibrierungen antropomorphe Phantome, die zumindest im Hinblick auf die Aktivitätsverteilung in den betrachteten Organen repräsentativ für die zu untersuchenden Personen sind. Ein Beispiel für ein solches organspezifisches Phantom stellt das vom Lawrence-Livermore-National-Laboratory entwickelte Brustphantom dar (Grf 79). Dieses besteht aus einem Brusttorso aus gewebeäquivalentem Kunststoff, in den ein menschliches Thorax-Skelett eingebettet ist. In dem Torso befinden sich Nachbildungen von Lunge, Leber sowie der tracheo-bronchialen Lymphknoten, die jeweils durch radioaktive

Komponenten ersetzt werden können. Die Brustwand des Phantoms kann mit verschiedenen Overlays in ihrer Dicke variiert werden. Auf diese Weise können praktisch alle vorkommenden Körperproportionen simuliert werden.

Das Phantom stellt damit einen außerordentlich guten Standard zur Kalibrierung der Meßanordnungen für Lungenmessungen dar. Besonders vorteilhaft ist, daß mit dem Phantom auch eine explizite Kalibrierung für die tracheo-bronchialen Lymphknoten möglich ist. Dies ist insbesondere für die in-vivo-Messung schwer transportierbarer Thorium-Verbindungen (ICRP-Stoffklasse Y) von Bedeutung.

4.1.4 Auswahl des Meßverfahrens

In Tabelle 4/1 sind die wichtigsten Kenngrößen von verschiedenen Verfahren zur in-vivo-Messung von Thorium anhand von Messungen des Kernforschungszentrums Karlsruhe zusammengestellt worden (Doe 92). Die Daten beziehen sich jeweils auf eine 50 minütige Messung mit vier Detektoren. Von besonderer Bedeutung ist die durch die Umgebungsstrahlung vorgetäuschte Thorium-Körperaktivität. Im Fall des Ac-228 ist dies auf geringfügige Thorium-Verunreinigungen in den verwendeten Baumaterialien zurückzuführen. Im Fall des Tl-208 wird sie zusätzlich auch von der luftgetragenen Rn-220-Aktivität verursacht. Demzufolge ist der durch die Umgebungsstrahlung vorgetäuschte Beitrag zur Thorium-Körperaktivität bei den Tl-208-Messungen zwei- bis dreimal so groß wie bei den Ac-228-Messungen.

Zum Vergleich der verschiedenen Verfahren sollte die Nachweisgrenze nach DIN 25482 (DIN 89) herangezogen werden. Bei Zugrundelegung des jeweils günstigsten Auswerteverfahrens ergeben sich nach dieser Norm die in der letzten Spalte der Tabelle 4/1 aufgeführten Nachweisgrenzen unter Annahme eines radioaktiven Gleichgewichts zwischen Th-232 und seinen Folgeprodukten.

Wie aus Tabelle 4/1 hervorgeht, ist das mit Hilfe einer Ganzkörpermessung kleinste nachweisbare Ganzkörperdepot etwa dreimal so groß wie das mittels einer Lungenmessung nachweisbare Lungendepot. Dies gilt allerdings nur für den Fall, daß es sich jeweils um ein reines Ganzkörper- bzw. Lungendepot handelt und bei beiden Messungen die gleiche Anzahl von Detektoren verwendet wird. Bei Szintillationsdetektoren kann man aus geometrischen Gründen nur zwei Detektoren in unmittelbaren Körperkontakt über dem Thorax anordnen, so daß hier die Lungenmessung nur etwa doppelt so empfindlich wie die Ganzkörpermessung ist.

Tab. 4/1: Zusammenstellung der wichtigsten Kenngrößen von verschiedenen Verfahren für die in-vivo-Messung von Thorium (Doe 92)

Art der Messung	Detektor-system	Linie (Nuklid)	vorgetäuschte Aktivität	Nachweis-grenze[1)]
GK-Messung	NaI(Tl)	2615 keV (Tl-208)	24 Bq Th-232	27 Bq Th-232
GK-Messung	HPGe	2615 keV (Tl-208)	36 Bq Th-232	94 Bq Th-232
GK-Messung	HPGe	911 keV (Ac-228)	14 Bq Th-232	70 Bq Th-232
TK-Messung (Lunge)	NaI(Tl)	2615 keV (Tl-208)	8 Bq Th-232	10 Bq Th-232
TK-Messung (Lunge)	HPGe	911 keV (Ac-228)	4,5 Bq Th-232	23 Bq Th-232

1) Nachweisgrenze nach DIN 25482 (DIN 89) bezogen auf eine Meßzeit von 50 min unter der Annahme radioaktiven Gleichgewichts

Wegen der relativ hohen Empfindlichkeit werden bei der regelmäßigen Überwachung bevorzugt NaI(Tl)-Detektoren eingesetzt. Bei Annahme von radioaktivem Gleichgewicht zwischen Thorium und seinen Folgeprodukten können über die Tl-208-Aktivität je nach Anzahl und Größe der verwendeten Detektoren Ganzkörperaktivitäten von 20 bis 40 Bq Th-232 nachgewiesen werden. Im Normalfall liegt jedoch kein radioaktives Gleichgewicht im Körper vor. So könnten beispielsweise bei hohen Tl-208/Th-232-Aktivitätsverhältnissen im Knochen (Thorotrast: > 1; Kai 84) mit einem geeigneten Detektorsystem Th-232-Aktivitäten nachgewiesen werden, die etwa eine Größenordnung unter den in Tabelle 4/1 angegebenen Werten liegen. Bei einem Leberdepot ist das Tl-208/Th-232-Aktivitätsverhältnis dagegen stets < 1, so daß hier die nachweisbaren Th-232-Aktivitäten je nach verwendeten Detektorsystem erheblich über den angegebenen Werten liegen können.

4.1 Ganzkörper- und Teilkörpermessung

Bei Überwachungen aus besonderem Anlaß werden wegen der hohen Meßempfindlichkeit und insbesondere auch wegen der stets gegebenen Einsatzbereitschaft ebenfalls bevorzugt NaI(Tl)-Detektoren eingesetzt. Bei Inhalationsverdacht werden Lungenmessungen der Tl-208-Aktivität durchgeführt, mit denen bei Annahme von radioaktivem Gleichgewicht je nach Größe der verwendeten Detektoren ein Lungendepot von ungefähr 10 bis 20 Bq Th-232 nachgewiesen werden kann.

Wurde bei den vorgenannten Messungen eine Tl-208-Aktivität nachgewiesen, so sollte zur Gewinnung von Informationen über die Isotopenverhältnisse auch die Aktivität von Ac-228 ermittelt werden. Hierzu empfehlen sich ergänzende Messungen mit Halbleiterdetektoren. Außerdem sollten weitere organspezifische Messungen zur genaueren Lokalisierung des Aktivitätsdepots durchgeführt werden.

Als indirekte individuelle Meßmethoden sind nach dem Entwurf der Richtlinie "Physikalische Strahlenschutzkontrolle" (AKI 92a) Ausscheidungsanalysen mittels Untersuchungen von

- 24-h-Urin- und
- 24-h-Stuhlproben

durchzuführen. Voraussetzung für verläßliche Ausscheidungsanalysen sind die lückenlose und kontaminationsfreie Sammlung der Ausscheidungsproben.

Für die Analyse dieser Probenmaterialien mit hohem Anteil organischer Bestandteile sind üblicherweise die folgenden Arbeitsschritte erforderlich (Eak 84):

- Präparation und Veraschung der Proben,
- chemische Abtrennung,
- Herstellung der Meßproben und Messung des Thoriumgehalts.

Da die im folgenden beschriebenen Methoden gleichermaßen für die in seltenen Fällen im Zusammenhang mit Wundkontaminationen durchzuführenden Biopsien anzuwenden sind, wird die Veraschung von Gewebeproben ebenfalls beschrieben.

4.2.1 Präparation und Veraschung der Proben

Die Präparation schließt Haltbarmachung, Aliqoutierung und Zugabe von Tracer ein. Unter Haltbarmachung wird die Konservierung von Urinproben mittels Salpetersäure zur Verminderung bzw. Vermeidung einer möglichen Absorption von Thorium an der Gefäßwand sowie die Lagerung, falls erforderlich, der Ausscheidungsproben in geeigneten Kühlräumen verstanden.

Die Veraschung ist als einleitender Schritt der chemischen Trennung zu betrachten. Ihr Ziel ist eine weitgehende Volumenverminderung durch Naß- bzw. Trockenveraschung, bei der eine teilweise bzw. völlige Zerstörung der organischen Bestandteile erzielt wird.

<u>Urinproben</u>

Die Naßveraschung von Urinproben wird üblicherweise mittels HNO_3 durchgeführt. Darüber hinaus ist auch die Zugabe von H_2O_2 üblich (But 68, Tes 70).

Die Urinproben werden mit 10 - 20 Vol. % HNO_3 versetzt und gegebenenfalls unter erneuter Zugabe von HNO_3 solange erhitzt, bis sie eine deutlich gelblich-braune Färbung angenommen haben. Zuletzt wird die Probenlösung bis fast zur Trockne eingeengt.

Zwecks Schnellveraschung wird die Verwendung von rauchender HNO_3 empfohlen (Kra 80).

Gewebeproben

Die Veraschung von Gewebeproben erfolgt zweckmäßigerweise ebenfalls mit HNO_3, gegebenenfalls unter tropfenweiser Zugabe von H_2O_2 zur Beschleunigung des Prozesses. Wenn eine klare Lösung erreicht ist, erfolgt die Zugabe eines 1:1 Gemisches von HNO_3 und H_2SO_4. Die Lösung wird noch solange kräftig erhitzt, bis die HNO_3 abgeraucht ist. Danach wird durch Erhöhung der Temperatur der größte Teil der H_2SO_4 abgeraucht, ohne daß völlige Trockne erreicht werden darf (Sin 79).

Stuhlproben

Die Trockenveraschung von Stuhlproben erfolgt durch Erhitzen im Muffelofen. Über Temperatur und Dauer der Veraschung werden in der Literatur verschiedene Angaben gemacht, z.B. nach Trocknung der Proben 24 h bei 450 °C (Lin 86).

Bleibt die Veraschungstemperatur unterhalb 500 °C, reduziert sich der unlösliche Anteil bei der Auflösung des Rückstandes in HNO_3 (Bru 63).

Wird ein Aufschluß des in HNO_3 unlöslichen Teils der Asche für erforderlich gehalten, kann dieser mit 20 - 25 ml 8 n HNO_3, 0,5 ml konz. H_2SO_4 und 0,5 ml $HClO_4$ (bezogen jeweils auf 1 g Asche) aufgenommen werden. Zur Entfernung der Kieselsäure werden 20 ml Flußsäure zugesetzt und im Platingefäß zur Trockne abgeraucht. Der Rückstand wird mit 40 ml 8 n HNO_3 aufgenommen und weitgehends gelöst. Der ungelöste Rest wird mit 7 g $K_2S_2O_7$ unter Zugabe von 1 ml H_3BO_3 (25:1) durch Schmelzen aufgeschlossen und danach ebenfalls in ca. 50 ml 8 n HNO_3 gelöst. Vor der weiteren Verarbeitung werden beide salpetersauren Lösungen vereinigt (Bey 89).

4.2.2 Chemische Abtrennung

Die chemische Abtrennung schließt sowohl die Separierung des Thoriums von anorganischen Verbindungen stabiler Elemente (nach der ICRP-Publikation 23 enthält eine 24-h-Urinprobe des Standard-Menschen 33 g mineralische Asche aus ca. 50 Elementen) als gegebenenfalls auch die Abtrennung von anderen störenden Aktiniden ein. Zur Durchführung der Abtrennung ist der nach der Veraschung verbleibende Probenrückstand zu lösen und auf den erforderlichen pH-Wert einzustellen. Als Abtrennungsmethode kommt eines der nachstehenden Verfahren oder eine Kombination mehrerer in Betracht (Eak 68, Eak 84):

- Mitfällung,
- Flüssigextraktion,
- Anionenaustauscher-Chromatographie,
- Extraktions-Chromatographie und
- Adsorption an Glasfiberfiltern.

Die **Mitfällung** an inaktiven Masseträgern wird üblicherweise bei allen in der Literatur beschriebenen Verfahren als erster unspezifischer Abtrennungsschritt durchgeführt.

Als Mitfällungsträger werden verwendet:

- Eisenoxidhydrat durch Fällung in ammoniakalischer Lösung (Sin 87a, Sin 87b, Fis 86, Tor 67),
- Calciumoxalat durch Fällung mittels Oxalsäure in schwach saurer Lösung (Fis 86, Paw 66, Lin 86),
- Lanthanoxalat (Lie 68),
- Lanthanfluorid (Per 56, Lie 68) und
- Calciumphosphat (Eak 68).

Die Verwendung von Eisenoxidhydrat empfiehlt sich immer dann, wenn eine Parallelbestimmung von Radium erforderlich ist.

Die Mitfällung am Calciumoxalat ist besonders in den Fällen geeignet, in denen eine Entfernung von Phosphorsäure erforderlich wird, z.B. wenn eine Ionenaustauscher-Chromatographie zur selektiven Abtrennung gewünscht wird. Eisenphosphat und sekundäres Calciumphosphat werden erst bei pH-Werten über 1,5 bzw. 2,5 gefällt, während Calciumoxalat bereits bei einem pH-Wert von 1,0 mit 100 % Ausbeute gefällt wird (Yam 82).

Die **Flüssigextraktion** bietet neben dem Vorteil einer schnellen Ausführbarkeit durch geeignete Auswahl von Extraktions- bzw. Rückextraktionsmitteln die Möglichkeit einer selektiven, sequentiellen Trennung mehrerer Aktinide, z.B. des Thoriums von Plutonium und Uran (Sin 87a, Sin 87b).

Als Extraktionsmittel zur Abtrennung von Thorium aus biologischen Proben sind Theonyltrifluoraceton (TTA), Di(2-ethylhexyl)phosphorsäure (HDEHP) und Tridodecylamin oder Trilaurylamin (TLA) eingesetzt worden.

Thorium läßt sich nach zwei Mitfällungen an Lanthanfluorid aus 0,2 n HNO_3-Lösungen vom Lanthan beispielsweise durch Extraktion in 0,45 m TTA (10 g pro 100 ml Benzol) abtrennen. Die Rückextraktion kann mit 2 n HNO_3 erfolgen (Per 56).

Petrow et al. (Pew 67) extrahieren Thorium aus 1,5 m salpetersauren, stark phosphathaltigen Proben, z.B. Knochenasche, mittels 1,5 m HDEHP in n-Heptan. Die Rückextraktion läßt sich in zwei Schritten durchführen:

Nach Neutralisation des HDEHP durch Zugabe von 4,0 m NaOH und Toluol wird zweimal mit 2,5 m $(NH_4)_2CO_3$ rückextrahiert. Aus dieser Lösung wird das Carbonat durch konz. HNO_3 entfernt und aus der verbleibenden Lösung Thorium nochmals mittels Aliquat 336 extrahiert und daraus mittels 6 n HCl rückextrahiert (Sat 68).

TLA wurde als Extraktionsmittel für eine sequentielle Trennung von Plutonium, Uran und Thorium beschrieben (Sin 87b).

Soll nur Thorium bestimmt werden, wird es aus einer 4 m HNO_3-Lösung des Veraschungsrückstandes bzw. einer Mitfällung in 20 % TLA in Xylol extrahiert, aus der es in eine 10 m HCl rückextrahiert wird.

Plutonium wird unter diesen Bedingungen ebenfalls extrahiert und kann nach dem Thorium-Stripping in 0,1 m HCl rückextrahiert werden.

Uran wird aus salpetersauren Lösungen nicht extrahiert.

Die **Austauscher-Chromatographie** an stark basischen Anionen-Austauschern in der Nitratform basiert auf der Bildung von komplexen Anionen in stark salpetersaurer Lösung. Wie bereits in Kapitel 3.2 ausgeführt, werden aus diesem Medium im Vergleich mit Th-IV nur Pu-IV und Np-IV besser sowie U-VI und einige andere Elemente geringer adsorbiert.

Nach Beschicken der Säule mit der das Thorium enthaltenden Lösung wird diese mit dem zwanzigfachen Säulenvolumen einer 8 n HNO_3 gespült (Kra 80). Die Elution kann mit 1 n HNO_3 erfolgen (HASL 300); soll Thorium von den anderen adsorbierten Elementen getrennt werden, ist mit 8 m HCl zu eluieren (Kra 80). Die Abtrennung des Thoriums ist daher hochselektiv.

Die **Extraktions-Chromatographie** unter Verwendung von Kel-F (Polytrifluorchlorethylen; Tes 64) oder Microthene 710 (mikroporöses Polyethylen, 50 - 100 mesh; Tes 70) als Trägermaterial, das vorher mit 0,5 m Tri-n-octylphosphinoxid (TOPO) in Cyclohexan konditioniert wurde, eignet sich als Methode zur Abtrennung von Thorium aus Lösungen veraschter Urinproben in 4 n HNO_3.

Die Elution des Thoriums von der Säule (10 mm Durchmesser, 50 mm Höhe) aus 2 g Microthene 710, das mit 2 ml 0,5 m TOPO vorbehandelt wurde, erfolgt mit 40 ml 0,3 m H_2SO_4 bei einer Flußrate von 1 ml pro min (Tes 70).

Durch **Adsorption an Glasfiberfiltern** kann Thorium, wie auch andere Aktinide, aus schwach salpetersauren, Calciumphosphat enthaltenden Lösungen abgetrennt werden. Das Calciumphosphat wird als Mitfällungsträger (300 mg) zusätzlich zum natürlich ausgeschiedenen Calcium einer salpetersauren 24-h-Urinprobe zugesetzt und mit Ammoniak gefällt. Der Mitfällungsniederschlag wird bei 500 °C geglüht. Der Rückstand wird in 100 ml 1 n HNO_3 gelöst und die Lösung dann noch 20 min unter Sieden erhitzt. Zur Optimierung der Adsorptionsbedingungen wird die Lösung auf 500 ml verdünnt und auf pH 5 eingestellt. Das adsorbierte Thorium wird mittels 6 n HCl wieder abgelöst (Eak 68).

4.2.3 Herstellung und Messung der Proben

Als Meßverfahren kommen in Betracht:

- Radiometrische Analyse mittels Alpha-Spektrometrie,
- Radiometrische Analyse mittels Gamma-Spektrometrie nach Neutronenaktivierung und
- Spektrophotometrie.

Die **Alpha-Spektrometrie** ist das Standardmeßverfahren, da sie:

- die isotopenspezifische Aktivitätsbestimmung,
- die parallele Bestimmung anderer Aktinide innerhalb einer Analyse aus derselben Ausscheidungsprobe,
- durch Verwendung des Th-229-Tracers (Sin 81) die chemische Ausbeutebestimmung jeder einzelnen Analysenprobe und
- wegen des geringen Untergrundes von $2 - 8 \cdot 10^{-4}$ Ipm im Energiebereich des Th-232 auch Aktivitäten bis in den Bereich der natürlichen Ausscheidung im Urin zu messen

gestattet.

Als Detektoren finden dabei Oberflächensperrschicht-Detektoren, ionenimplantierte Detektoren und Großflächen-Gitterionisationskammern Anwendung (Höt 78, Kno 79, Bor 84, Gob 93).

Die Oberflächensperrschicht-Detektoren (SSB - silicon surface barrier) wurden bereits in den sechziger Jahren entwickelt. Sie zeichnen sich durch gute Energieauflösung aus, sind jedoch aufgrund ihres dünnen Gold-Fensters sehr empfindlich gegen mechanische Beanspruchung, Kontamination und Lichteinwirkung. Die reinigbaren Oberflächensperrschicht-Detektoren (ruggedized SSB) wurden mit einem stärkeren Aluminium-Fenster versehen, was zu Lasten der Energieauflösung geht.

Die ionenimplantierten Detektoren (IPS) sind dagegen robuster und besitzen einen 50- bis 100-fach niedrigeren Leckstrom. Die Energieauflösung ist der der SSB-Detektoren vergleichbar.

Die Großflächen-Gitterionisationskammer (GIK) besitzt gegenüber den oben erwähnten Halbleiterdetektoren eine große effektive Zählfläche und eine große Zählausbeute (Höt 78). Sie wird daher bevorzugt zur direkten alphaspektrometrischen Überwachung langlebiger Alphastrahler in der Luft nach elektrostatischer Aerosolsammlung eingesetzt.

Zur **Herstellung von Zählpräparaten**, die eine ausreichende Energieauflösung ermöglichen (z.B. Trennung von Th-230 und Th-229), wird die Aktivität entweder elektrolytisch auf ein Edelstahlplättchen oder mit Hilfe eines Mitfällungsträgers auf ein Membranfilter abgeschieden.

Über die Zusammensetzung und Konzentration der Leitelektrolytlösung, aus der Thorium elektrolytisch abgeschieden wird, gibt es zahlreiche Literaturhinweise. Verbreitet ist die Abscheidung aus $(NH_4)_2SO_4$-haltigen Lösungen, z.B. der Konzentration 0,5 m (Mor 71) oder 1 m (Bereich 0,5 - 1 m) bei einem pH-Wert von 2 - 3 (Tal 72).

Tab. 4/2: Typische Daten einiger häufig eingesetzter Detektoren

Detektor	Eintrittsfenster	Zählfläche	Energieauflösung
Au-SSB	ca. 80 nm	450 mm^2	ca. 20 keV[1)]
Al-SSB	ca. 200 nm	450 mm^2	ca. 24 keV[2)]
IPS	ca. 50 nm	450 mm^2	ca. 20 keV
GIK	Zählgas Argon/Methan	300 cm^2	ca. 25 keV

1) für die Am-241-Linie von 5,486 MeV
2) für Alpha-Strahler im Bereich 4 - 6 MeV

Zur Einstellung auf diese Bedingungen wird die Lösung, die das abgetrennte Thorium enthält, bis zur Trockne eingedampft und zur Entfernung organischer Reste mit HNO_3 (Sin 81), HNO_3 und $HClO_4$ (Tal 72) oder Königswasser (Mor 71) abgeraucht.

Der Rückstand wird mit 0,5 ml H_2SO_4 aufgenommen und bis zum Erscheinen weißer Nebel abgeraucht. Nach dem Erkalten wird mit H_2O verdünnt und in die Elektrolysezelle überspült. Der erforderliche pH-Wert wird durch Neutralisation mit NH_4OH gegen Thymolblau eingestellt, wobei ein Überschuß an NH_3 zu vermeiden ist (Sin 79).

Eine einfache Methode, um einen Überschuß an NH_3 zu vermeiden, ist die Verwendung eines vorbereiteten Elektrolyten mit dem erforderlichen pH-Wert. Hierzu werden zum Rückstand neben 0,5 ml H_2SO_4 zusätzlich 100 mg $NaHSO_4$ zugegeben und die H_2SO_4 bis zur Trockne abgeraucht. Dieser Rückstand ergibt, mit einer 0,75 m $(NH_4)_2SO_4$-Lösung in die Zelle überspült, den pH-Bereich zwischen 2,0 und 2,5, in dem Thorium mit optimaler Ausbeute abgeschieden wird (Tal 72).

Andere Autoren empfehlen die Abscheidung aus Ammoniumsulfat/-oxalat (Kra 80) bzw. aus Ammoniumchlorid/-oxalat enthaltenden Lösungen (Pup 72).

Nach Abschluß der Abscheidung soll die Lösung durch Zugabe von 2 ml konz. NH_4OH ammoniakalisch gemacht werden (Mor 71) und noch ca. 1 min elektrolysiert werden, ehe die Elektrolyse, z.B. durch Heben der Anode oder bei fest installierten Elektroden durch Abstellen der Spannungsversorgung, beendet wird. Danach wird die Zelle mit 1:99 NH_4OH gespült (Tal 72).

Ein Elektrolysestrom von 1,2 A (Tal 72, Sin 79) ermöglicht die Einstellung einer Temperatur innerhalb des Elektrolyten von 75 - 80 °C, die für eine effektive Abscheidung erforderlich erscheint (Tal 72).

So aus einer 24-h-Urinprobe hergestellte Zählpräparate gestatten bei einer Meßzeit von 1000 min und einer Zählausbeute von 35 % eine Nachweisgrenze nach DIN 25482 (DIN 93) von 0,4 mBq.

Zur Abscheidung von Thorium durch Mitfällung an einem LaF_3-Träger wird die zur Trockne eingeengte Thorium enthaltende Lösung mit 2 ml 3 n HCl aufgenommen, mit 1 ml eines Lanthanträgers (0,1 mg La^{3+}/ml), 5 ml H_2O und 1 ml 5 % HF-Lösung versetzt. Nach 30 min kann der Niederschlag auf ein 0,45 μm Membranfilter filtriert, mit Wasser gewaschen, mit Alkohol gespült und dann getrocknet werden (Lie 68).

Die **Gamma-Spektrometrie** als empfindlichste Methode (0,1 - 1 ng bzw. 0,4 - 4 μBq Th-232; Cli 71, Dan 89) basiert auf der Aktivierung von Th-232 durch thermische Reaktorneutronen entsprechend der in Kapitel 2.3 genannten Aktivierungsgleichung.

Zur Messung gelangt üblicherweise das Pa-233 (T_{phys} = 27 d, E = 313 keV mit 80 % Emissionswahrscheinlichkeit; Cli 71, Pic 68, Dan 89), gelegentlich aber auch das Th-233 selbst (T_{phys} = 23 min., E = 86,9 keV mit 2,7 % Emissionswahrscheinlichkeit; Twi 70).

Vergleichsstandards mit Thorium-Gehalten derselben Größenordnung wie in der Analysenprobe werden zur Ausbeute-Bestimmung mitbestrahlt.

Da bestimmte Nuklide anderer Elemente, wie Na-23, Cl-37, Fe-56, Fe-58 und P-31, mitaktiviert werden, sind vor der Bestrahlung eine völlige Zerstörung der organischen Matrix und eine Abtrennung der entsprechenden Elemente erforderlich.

Die Entfernung der organischen Bestandteile erfolgt durch Trockenveraschung. Hierzu kann die zur Trockne eingeengte Tagesurinprobe direkt bei 500 °C 16 h (Cli 71) oder der Calciumphosphat-Niederschlag nach Mitfällung bei 300 - 400 °C (Dan 89) geglüht werden.

Die weitgehende Entfernung des Phosphates erfolgt bei der Mitfällung des Thoriums an Calciumoxalat nach Auflösung des Glührückstandes in HCl (Cli 71, Dan 89). Aus dem Niederschlag werden die Bestrahlungsproben hergestellt.

Nach Bestrahlung muß das gebildete Pa-233 zur Erreichung der erforderlichen Nachweisgrenze abgetrennt werden. Die hierfür in der Literatur beschriebenen Methoden werden im folgenden beispielhaft skizziert:

- Austauscherchromatographie (Cli 71),
  - Lösen des Bestrahlungsproduktes in 10 n HCl,
  - Adsorption des Pa-233 an 2 g Kationenaustauscher
  - Spülen der Säule mit 10 m HCl und
  - direkte Messung des am Harz gebundenen Pa-233;

- Säulenchromatographie-Flüssigextraktion-Säulenchromatographie (Pic 68),
  - Lösen der bestrahlten Probe in 6 n HNO_3,
  - Passieren einer Silica-Gel-Säule zur Vorreinigung,

- Elution des Pa-233 mittels 50 ml 0,5 m Oxalsäure,
- Oxidation der Oxalsäure mit 10 ml HNO_3 und 5 ml 30 % H_2O_2,
- Einengen zur Trockne, Aufnahme mit 20 ml konz. HCl, Einengen auf wenige ml,
- zweimalige Extraktion mit Methylethylketon,
- Rückextraktion mit 1 n HCl,
- erneute Säulenchromatographie an Silica-Gel,
- Elution des Pa-233 mittels 15 ml 0,5 m Oxalsäure und
- Herstellung der Meßproben;

- Aufeinanderfolgende Mitfällung an den Trägern MnO_2 und $BaSO_4$ (Dan 89),
  - Mitfällung des Pa-233 an MnO_2 in 40 %iger HNO_3 aus 40 mg Mn-II-Träger durch Oxidation mittels 50 mg $KBrO_3$,
  - Lösen des MnO_2 in HNO_3/H_2O_2,
  - Mitfällung des Pa-233 mit 40 mg $BaCl_2$, 50 mg K_2SO_4 und 15 ml H_2SO_4,
  - Lösen des $BaSO_4$ in H_2SO_4,
  - Wiederausfällung durch Verdünnen und
  - Filtrieren auf Whatman-Filter und
  - Messung der Proben.

Bei der **Spektrophotometrie** wird ebenso wie bei der Neutronenaktivierung die Masse des Elements Thorium (Th-232) bestimmt. Über die Isotopenzusammensetzung können auch hier keine Angaben gemacht werden.

Spektralphotometrische Absorptionsmessungen können nur an Lösungen durchgeführt werden, in denen das Thorium in Form eines Farbkomplexes gebunden ist. Als solche komplexbildenden Substanzen wurden seinerzeit für Thoriumuntersuchungen in Urin Morin in $HClO_4$-haltiger Lösung (Per 56) bzw. Arsenazo III in 7 - 8 n HCl-haltiger Lösung (Baz 67) eingesetzt. Mit diesen Verfahren ist eine Nachweisgrenze von entsprechend 0,4 mBq (Per 56, Baz 67) erreichbar.

Die Messung von exhaliertem Rn-220 bzw. von Folgeprodukten als indirekte Methode zur Bestimmung des Thoriumgehaltes im Körper wird derzeit im Strahlenschutz für die Inkorporationsüberwachung noch nicht praktiziert. Daher werden im weiteren lediglich die erforderlichen Annahmen zur Interpretation und die allgemeinen meßtechnischen Prinzipien dargestellt.

4.3.1 Annahmen zur Interpretation

Die Bestimmung des Thorium-Körpergehaltes basiert auf der Messung der Aktivitätskonzentration des Rn-220 bzw. von Folgeprodukten in der Ausatemluft, setzt aber für die Interpretation der Meßdaten Kenntnisse bzw. Annahmen zur Exhalationsrate und zu den Aktivitätsverhältnissen zwischen den Thoriumisotopen und Rn-220 am Bildungsort im Körper voraus. Aus Untersuchungen an Patienten, die mit dem Röntgenkontrastmittel Thorotrast behandelt wurden, sind Exhalationsraten zwischen 4 und 13 % des gebildeten Rn-220 bekannt (Hur 67).

Mit Hilfe eines Konversionsfaktors (exhalierte Rn-220-Aktivität in mBq/l pro Bq Th-232-Körperaktivität) kann der Thorium-Körpergehalt von untersuchten Personen ermittelt werden. Dieser Konversionsfaktor wurde durch Ganzkörper- und Exhalationsmessungen unter Berücksichtigung des Atemminutenvolumens ermittelt. Für Thorium-Inkorporationen, die vergleichbar sind mit der Thorium-Exposition infolge Thorotrast-Injektion, beträgt die pro Minute exhalierte Rn-220-Aktivität etwa 3 % der Thorium-Körperaktivität; daraus wird als Mittelwert für den Konversionsfaktor 2,24 mBq/l (Gri 64) bzw. 2,26 mBq/l (Kat 92) angegeben.

Bei Ablagerung von Thoriumverbindungen im Atemtrakt sind aufgrund der kurzen Transportwege vom Bildungsort des Rn-220 bis zu seiner Ausatmung höhere Exhalationsraten zu erwarten.

Die Konversionsfaktoren werden maßgeblich durch die Isotopenzusammensetzung des inkorporierten Thoriums und die unterschiedliche Verteilung von Thorium und der Folgeprodukte im Körper bestimmt. Bei der Interpretation der Meßdaten von beruflich exponierten Personen ist der Rn-220-Anteil zu berücksichtigen, der aus dem über die Nahrung zugeführten Ra-228 gebildet wird.

4.3.2 Meßprinzip

Die Meßverfahren zur Bestimmung der Rn-220-Aktivitätskonzentration basieren entweder auf der direkten Messung der Alpha-Aktivität des Rn-220 und der kurzlebigen Tochter Po-216 oder der Messung der Gamma- bzw. Alpha-Aktivität der Folgeprodukte Pb-212, Bi-

212 und Po-212. Im letzteren Fall werden vor der Messung das mit 10,6 Stunden Halbwertszeit relativ langlebige Pb-212 und dessen Folgeprodukte Bi-212 und Po-212 auf Filtermaterialien abgeschieden oder an gekühlter Aktivkohle adsorbiert. Bei der direkten Messung der Rn-220-Aktivitätskonzentration durchströmt die Ausatemluft die Meßkammer im Durchflußbetrieb oder sie wird in eine vorher evakuierte großvolumige Meßkammer eingeleitet.

In der Meßkammer wird die Alpha-Aktivität entweder über Ionisationsstrommessungen (Ionisationskammer) oder über Teilchenzählung mittels ZnS(Ag)-Detektor bestimmt. Zur Aktivitätsmessung der adsorbierten bzw. abgeschiedenen Folgeprodukte werden neben ZnS-Detektoren insbesondere zur Spektrometrie der Gamma- bzw. Alpha-Strahlung der Folgeprodukte geeignete Kristall- und Halbleiterdetektoren bevorzugt eingesetzt.

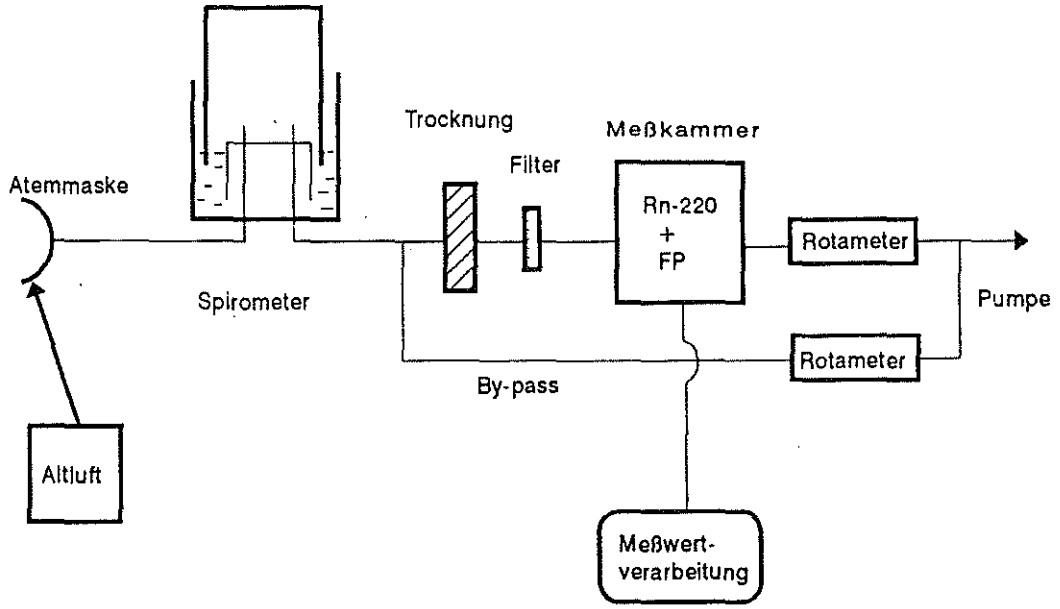
Aus der Vielzahl der bekannten technischen Lösungen, die vor allem zu Exhalationsmessungen an Thorotrastpatienten eingesetzt wurden, werden einige typische Methoden genannt:

- Sammlung der exhalierten Luft in einem Plastiksack mit anschließender Messung der Alpha-Aktivität des Rn-220 und seiner Folgeprodukte mittels einer großvolumigen Ionisationskammer (Run 58);
- Adsorption des exhalierten Rn-220 an gekühlter Aktivkohle und Messung der Alpha-Aktivität des Rn-220 und seiner Folgeprodukte mittels ZnS-Detektor (Hur 63);
- Sammlung der Rn-220-Folgeprodukte in einem Filtersystem (Doppelfilter) mit kontinuierlicher Messung der Alpha-Aktivität (Jac 64);
- Passage des Rn-220 durch eine Meßkammer mit ZnS-Detektor zur Messung der Alpha-Aktivität des Rn-220 und seiner Folgeprodukte (Tai 69);
- Elektrostatische Sammlung der Rn-220-Folgeprodukte und Messung der Alpha-Aktivität der Folgeprodukte Bi-212 und Po-212 (Pet 85).

Bei der Probennahme ist auf gute atemphysiologische Bedingungen zu achten. Die zu untersuchende Person sollte während der Abatmung der zur Messung gelangenden Luft unbeeinflußt von der Apparatur und ohne Anstrengung ein- und ausatmen können. Zweckmäßigerweise geschieht das über eine Maske mit einem Zwei-Wege-Ventil, wobei die freie Abatmung in die Sammel- bzw. Meßkammer durch eine Vakuumpumpe unterstützt wird. Die Nachweisgrenzen des Meßverfahrens können verbessert werden, wenn während der Probennahme radonfreie Luft eingeatmet wird. Der schematische Aufbau eines Rn-220-Monitors ist in Abbildung 4/2 skizziert.

Unter Berücksichtigung der Nachweisgrenzen der empfindlichsten Meßverfahren zur Bestimmung der Rn-220-Aktivitätskonzentration von etwa 1 mBq/l bis einige mBq/l läßt sich unter idealisierten Annahmen mittels Exhalationsmessungen eine deponierte Thoriumkörperaktivität in der Größenordnung von etwa 1 Bq nachweisen.

Abb. 4/2: Schematischer Aufbau eines Radon-220-Monitors



Zur Überwachung der Raumluftaktivität am Arbeitsplatz stehen, je nach Zielsetzung, prinzipiell zwei Verfahren zur Verfügung (Dil 92):

- Erfassung der mittleren Aktivitätskonzentration durch Langzeitüberwachung mit **Aerosolsammlern** (diskontinuierliche Auswertung) und
- Überwachung mit direktanzeigenden und alarmgebenden **Aerosolmonitoren** (sofortige Erfassung des Zeitpunkts einer Aktivitätsfreisetzung).

4.4.1 Aerosolsammler

Die vom Aerosolsammler erfaßte Aktivitätskonzentration der Raumlauft muß nachweislich repräsentativ für die zu überwachende Atemluft am Arbeitsplatz sein. Dabei sind die Parameter Abstand des Sammlers von den Arbeitsplätzen und von der Abluftöffnung des Raumes sowie die Luftdurchsatzrate des Sammlers und die Luftwechselrate im Raum zu berücksichtigen. Außerdem spielen die Korngröße der Aerosolteilchen sowie die Geometrie der Anlageninstallation eine Rolle. Bei einem aktivitätsbezogenen mittleren aerodynamischen Durchmesser (AMAD) der Aerosole von einigen Mikrometern erfolgt schon im Umkreis von wenigen Metern eine merkliche Sedimentation der Aerosole. Da die Abluftöffnungen üblicherweise weiter als ein paar Meter von den Arbeitsplätzen entfernt sind, tritt bei einer Messung vor den Abluftöffnungen sowohl durch die Sedimentation als auch durch die Vermischung mit der übrigen Raumluft eine Erniedrigung der gesammelten Aktivitätskonzentration ein.

Bei den stationären Aerosolsammlern wird im allgemeinen mit Luftdurchsatzraten von 20 bis 50 m^3/h gearbeitet. Die Raumluftaktivität wird auf Glasfaserfiltern von 20 cm Durchmesser gesammelt und arbeitstäglich ausgewertet. Dazu stehen Großflächenproportionalzählrohre zur Verfügung, die nach dem Pseudokoinzidenzverfahren eine Diskriminierung der stets vorhandenen Aktivität der natürlichen Rn-222-Folgeprodukte ermöglichen. Die Nachweisgrenze dieses Verfahrens ist von den Schwankungen der natürlichen Rn-222-Aktivität, der Durchsatzrate und der Meßzeit abhängig. Nach einer Abklingzeit von einigen Stunden ist bei einer Sammelzeit von wenigen Minuten eine Nachweisgrenze für die gesamte Alpha-Aktivität von 1 Bq/m^3, bei einer Sammelzeit von einigen Stunden Werte von 60 mBq/m^3 erreichbar. Nach einer Abklingzeit von ca. 1 Woche ist bei einem Sammelvolumen von mindestens 750 m^3 eine Nachweisgrenze von 0,4 mBq/m^3 erreichbar.

Sind Inkorporationen oberhalb der Nachforschungsschwelle (AKI 92a) nicht auszuschließen und gelingt es nicht nachzuweisen, daß die von stationären Aerosolsammleren ermittelte Aktivitätskonzentration für die tatsächliche Aktivitätszufuhr repräsentativ ist, sind zur individuellen Überwachung personengetragene Aerosolsammler zu verwenden. Der Luftdurchsatz dieser Geräte beträgt nur wenige Liter pro Stunde und ist damit wesentlich kleiner als die durchschnittliche Atemrate von 1,2 m^3/h. Für den Nachweis von Aktivitätskon-

zentrationen in Höhe der Interpretationsschwelle muß daher über mehrere Tage hinweg gesammelt werden.

4.4.2 Aerosolmonitore

Diese Geräte arbeiten mit Luftdurchsatzraten von 40 bis 60 m^3/h und sammeln die Aktivität wie die stationären Sammler auf einem Glasfaserfilter von 20 cm Durchmesser. Über dem Filter sind Großflächenproportionalzählrohre angeordnet, die ebenfalls nach dem Pseudokoinzidenzverfahren eine Diskriminierung der Aktivität der natürlichen Rn-222-Folgeprodukte ermöglichen. In Räumen mit gefilterter Zuluft läßt sich nach einer Sammelzeit von 10 min eine Alpha-Aktivitätskonzentration von etwa 1 Bq/m^3 nachweisen. Beim Überschreiten einer einstellbaren Schwelle, z.B. der Nachforschungsschwelle, geben die Geräte optischen und akustischen Alarm. Für genauere Untersuchungen können die Filter aus dem Monitor entfernt und extern bei längerer Meßzeit ausgewertet werden.

5.1 Grenzwerte

Zur Begrenzung des gesundheitlichen Risikos beim beruflichen Umgang mit radioaktiven Stoffen sind in internationalen Empfehlungen und nationalen Verordnungen Grenzwerte für Körperdosen festgelegt (Tabelle 5/1).

Für die praktische Umsetzung werden hieraus für interne Expositionen Grenzwerte für die Jahresaktivitätszufuhr (GJAZ) abgeleitet.

Die GJAZ in der Strahlenschutzverordnung (STRL 89) beruhen auf den biokinetischen und dosimetrischen Modellen der ICRP-Publikation 30 (ICRP 30). Gegenüber der vorher gültigen Strahlenschutzverordnung von 1976 (STRL 76), die noch auf der ICRP-Publikation 2 (ICRP 2) beruhte, wurden insbesondere die GJAZ für Inhalation von Th-232-Verbindungen drastisch gesenkt. Damit ist die Strahlenschutzverordnung in der Einschätzung der Toxizität des Thoriums erst 1989 dem Wandel gefolgt, den die ICRP schon 1979 mit Erscheinen von ICRP 30 vollzogen hatte und dem die Europäische Gemeinschaft bereits ab 1980 in ihren Richtlinien (EG 80, EG 84) Rechnung getragen hatte.

Der Grund für die aus heutiger Sicht früher zu niedrig eingeschätzte Toxizität des Th-232 ist in ICRP 2, Tabelle 1, in einer Fußnote nachzulesen "Obwohl Berechnungen und Tierversuche darauf hindeuten, daß natürliches Thorium bei intravenöser Injektion vermutlich ebenso gefährlich ist wie Plutonium ..., hat die bisherige Erfahrung gezeigt, daß die Gefährdung ... unter industriellen Bedingungen nicht viel größer ist als durch natürliches Uran". Für Th-232 wurde eine "vorläufige" maximal zulässige Luftkonzentration festgelegt, die einem GJAZ von 2800 Bq entspricht. Dieser Wert wurde, auf 3000 Bq aufgerundet, 1976 in die bis 1989 gültige Strahlenschutzverordnung aufgenommen.

1990 revidierte die ICRP ihre Grundsatzempfehlung (ICRP 60) und, im wesentlichen wegen herabgesetzter Dosisgrenzwerte sowie geänderter Strahlen- und Gewebewichtungsfaktoren, im Jahre 1991 auch ihre "Annual Limits on Intakes" (ALI; ICRP 61). Die Europäische Gemeinschaft wird in ihrer für 1993 zu erwartenden Richtlinie (EG 92) die niedrigeren Dosisgrenzwerte aus ICRP 60 übernehmen. Mit der Empfehlung neuerer GJAZ will die EG wegen in Kürze absehbarer Änderungen der biokinetischen Modelle noch abwarten.

Die für die Thoriumisotope Th-228, Th-230 und Th-232 früher und derzeit geltenden GJAZ sind in Tabelle 5/2 zusammengestellt.

Tab. 5/1: Grenzwerte der Körperdosen für beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie A, soweit für die interne Exposition relevant

Quelle	Effektive Dosis	Teilkörperdosis
StrlSchV 1976	(Ganzkörper: 50 mSv/a)	Gonaden, Knochenmark, Uterus: 50 mSv/a Knochen, Schilddrüse: 300 mSv/a andere Organe und Gewebe: 150 mSv/a
StrlSchV 1989	50 mSv/a	Keimdrüsen, Gebärmutter, rotes Knochenmark: 50 mSv/a Schilddrüse, Knochenoberfläche: 300 mSv/a andere Organe und Gewebe: 150 mSv/a
ICRP 26, 1977 EG-Richtlinie, 1980 EG-Richtlinie, 1984	50 mSv/a	alle Organe und Gewebe: 500 mSv/a
ICRP 60, 1991 EG-Richtlinie (Entwurf), 1992	20 mSv/a*)	-

*) Durchschnittswert von 5 Jahren, maximal jedoch 50 mSv/a

Tab. 5/2: Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr (GJAZ) für beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie A

Quelle	Verbd. ICRP-Klasse	Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr (GJAZ)/Bq Inhalation Th-228	Th-230	Th-232	Ingestion Th-228	Th-230	Th-232
StrlSchV 1976[1]	-	5,5 E2	2,0 E2	3,0 E3	2,2 E6	5,2 E5	4,5 E5
StrlSchV 1989[2]	**W**	**2,0 E2**	**1,0 E2**	**3,0 E1**	**1,0 E5**	**9,0 E4**	**2,0 E4**
	Y	**2,0 E2**	**4,0 E2**	**6,0 E1**			
ICRP 30, 1979[3] EG-Richtlinie, 1980[3] EG-Richtlinie, 1984[3]	W	4,0 E2	2,0 E2	4,0 E1	2,0 E5	1,0 E5	3,0 E4
	Y	6,0 E2*	6,0 E2	1,0 E2			
ICRP 61, 1991[4]	W	5,0 E2	4,0 E2	9,0 E1	3,0 E5	3,0 E5	5,0 E4
	Y	2,0 E2	4,0 E2	9,0 E1			

Bemerkungen zur Festlegung der GJAZ:

1) vermutlich gemäß ICRP 2, aufgrund des Vergleichs mit Ra-226; bei Th-232: siehe Text

2) Begrenzung durch Dosisgrenzwert für Teilkörper Knochenoberfläche (300 mSv/a)

3) Begrenzung durch Dosisgrenzwert für Teilkörper Knochenoberfläche (500 mSv/a); bei dem mit "*" gekennzeichnetem Wert Begrenzung durch Grenzwert für die effektive Dosis (50 mSv/a)

4) Begrenzung durch den durchschnittlichen Grenzwert für die effektive Dosis (20 mSv/a)

5.2 Eignung der Meßverfahren

Zur Inkorporationsüberwachung auf Thorium stehen prinzipiell die in Kapitel 4 beschriebenen Meßverfahren zur Verfügung. Diese werden im folgenden im Hinblick auf ihre Vor- und Nachteile sowie ihre Eignung für ein Überwachungsprogramm diskutiert.

Tab. 5/3: Zusammenfassung der Nachweisgrenzen der in Kapitel 4 beschriebenen Meßverfahren

Analyse-Verfahren	Nachweisgrenze der Untersuchungsmethode (für Th-232)			
	Methode	NWG_t	Natürlicher Gehalt	NWG_G
TK-Messung (Lunge)	Gamma-Spektrometrie	10- 30 Bq	-	10- 30 Bq
GK-Messung	Gamma-Spektrometrie	30-100 Bq	80 mBq[5]	30-100 Bq
Urinanalyse	Alpha-Spektrometrie NAA[1]	0,3-1,5 mBq/d 0,004 mBq/d	0,03 mBq/d[6]	0,3-1,5 mBq/d 0,06 mBq/d
Stuhlanalyse	Alpha-Spektrometrie NAA[1]	0,3-1,5 mBq/d 0,004 mBq/d	12 mBq/d[7]	20 mBq/d 20 mBq/d
Stationäre Aerosolsammler[3]	Großflächenproportionalzählrohr[2]	0,4 mBq/m³	1,2 µBq/m³ [8]	0,4 mBq/m³
Persönliche Aerosolsammler[4]	Großflächenproportionalzählrohr[2]	2 mBq/m³	1,2 µBq/m³ [8]	2 mBq/m³

1) Neutronenaktivierungsanalyse
2) Alpha-Beta-Pseudokoinzidenzverfahren, 100 min Meßzeit, 1 Woche Abklingzeit
3) Durchsatzrate ≥ 20 m³/h, Sammelvolumen ≥ 750 m³
4) Durchsatzrate 0,2 m³/h, Sammelvolumen 10 m³
5) nach UNSCEAR von 1988 (UNSC 88)
6) Mittelwert, beruht auf 8 Messungen (Rie 93)
7) Mittelwert, beruht auf 10 Messungen (Bey 89)
8) nach Kolb (Kol 85), siehe auch Tabelle 2/1, Kapitel 2.1

In der Tabelle 5/3 sind dazu die Nachweisgrenzen der Meßverfahren unter Routinebedingungen zusammengefaßt. Für die vergleichende Bewertung verschiedener Verfahren im Hinblick auf ihre Eignung zur Inkorporationsüberwachung ist nicht alleine die verfahrensbedingte Nachweisgrenze (NWG_t) ausschlaggebend, sondern auch der Einfluß der durch die natürliche Zufuhr bedingten Beiträge zur Ausscheidung (siehe Tabelle 5/3). Diese unterliegen erheblichen individuellen und geographischen Schwankungen. Die NWG_t ist anzuwenden bei der Frage nach der insgesamt nachweisbaren Aktivität, während NWG_G die Frage nach der nachweisbaren Aktivität beantwortet, die durch berufliche Exposition zusätzlich ausgeschieden wird.

Die in den Tabellen 5/4 bis 5/8 aufgeführten Zufuhrwerte erlauben durch Vergleich mit den GJAZ-Werten aus der Strahlenschutzverordnung (STRL 89) die Bewertung der angebenen Meßverfahren. Dieser Vergleich ist bei kontinuierlicher Zufuhr erst möglich, wenn die mit Hilfe der Tabellen in Kapitel 8.2 errechneten Tages-Zufuhrwerte (Bq/d) in Jahres-Zufuhrwerte (Bq/a) umgerechnet wurden.

5.2.1 **In-vivo-Verfahren**

Lungenmessung

Vorteile:

- Die Aktivität kann direkt in den dosisrelevanten Geweben erfaßt werden.
- Es ist möglich, zwischen Inhalation und Ingestion zu unterscheiden.
- Das Ergebnis steht schnell zur Verfügung und ermöglicht daher auch eine rechtzeitige Entscheidung über eventuell notwendige Dekorporationsmaßnahmen.
- Die Akzeptanz der zu überwachenden Person ist bei diesem Verfahren höher als gegenüber dem Sammeln von Ausscheidungsproben.

Nachteile:

- Es sind Annahmen notwendig zum quantitativen Verhältnis des bei der Messung erfaßten Tochternuklids zum interessierenden Thorium-Nuklid.
- Th-230 ist praktisch nicht nachweisbar.

Eignung zur Überwachung:

Siehe Tabelle 5/4.

Tab. 5/4: Zufuhren (Bq) bzw. Zufuhrraten (Bq/a), die zur Zeit t nach einer einmaligen Inhalation bzw. nach Beginn einer kontinuierlichen Inhalation von Th-232-Aerosolen mit 1 μm AMAD bei einer NWG_G von 10 bis 30 Bq durch eine **Lungenmessung** nachgewiesen werden können

t	Akut		Chronisch	
	W	Y	W	Y
1 d	40 - 100	40 - 100	10000 - 40000	10000 - 40000
20 d	100 - 300	70 - 200	1000 - 4000	1000 - 4000
30 d	100 - 300	70 - 200	1000 - 3000	800 - 2000
60 d	100 - 400	70 - 200	600 - 2000	400 - 1000
90 d	200 - 600	70 - 200	500 - 1000	300 - 800
180 d	700 - 2000	100 - 300	300 - 1000	200 - 500
1 a	10000 - 20000	100 - 400	300 - 900	100 - 300
10 a	-	-	300 - 900	50 - 200

Ganzkörpermessung

Vorteile:

- Die Aktivität kann prinzipiell in den dosisrelevanten Geweben erfaßt werden.
- Das Ergebnis steht schnell zur Verfügung und ermöglicht daher auch eine rechtzeitige Entscheidung über eventuell notwendige Dekorporationsmaßnahmen.
- Die Akzeptanz der zu überwachenden Person ist bei diesem Verfahren höher als gegenüber dem Sammeln von Ausscheidungsproben.

Nachteile:

- Es sind Annahmen notwendig zum quantitativen Verhältnis des bei der Messung erfaßten Tochternuklids zum interessierenden Thorium-Nuklid.
- Th-230 ist praktisch nicht nachweisbar.

Eignung zur Überwachung:

Siehe Tabelle 5/5.

Tab. 5/5: Zufuhren (Bq) bzw. Zufuhrraten (Bq/a), die zur Zeit t nach einer einmaligen Inhalation bzw. nach Beginn einer kontinuierlichen Inhalation von Th-232-Aerosolen mit 1 μm AMAD bei einer NWG_G von 30 bis 100 Bq durch eine **Ganzkörpermessung** nachgewiesen werden können

t	Akut		Chronisch	
	W	Y	W	Y
1 d	50 - 200	50 - 200	20000 - 60000	20000 - 60000
20 d	200 - 500	200 - 700	2000 - 8000	3000 - 9000
30 d	200 - 600	200 - 700	2000 - 6000	2000 - 7000
60 d	200 - 700	200 - 700	1000 - 3000	1000 - 4000
90 d	200 - 700	200 - 800	700 - 2000	800 - 3000
180 d	300 - 900	300 - 900	400 - 1000	400 - 1000
1 a	300 - 1000	400 - 1000	300 - 900	300 - 900
10 a	-	-	100 - 400	100 - 400

5.2.2 **In-vitro-Verfahren**

Urinanalyse

Vorteile:

- Es werden nicht Aktivitäten von Folgeprodukten, sondern von den Thorium-Isotopen selbst gemessen.
- Mit der Alpha-Spektrometrie ist die simultane Erfassung und Identifizierung der inkorporierten Thoriumisotope möglich.
- Die Erfassung der systemisch aufgenommenen Thorium-Aktivität ist möglich.

Nachteile:

- Wegen der aufwendigen Probenaufbereitung und der langen Meßzeit steht das Meßergebnis erst nach einigen Tagen zur Verfügung.
- Wegen der Variabilität der täglichen Ausscheidungsraten ist für die Erfassung repräsentativer Raten die mehrtägige Probensammlung wünschenswert.
- Die Ermittlung der Zufuhr erfordert die Verwendung eines biokinetischen Modells, das derzeit nicht ausreichend verifiziert ist (siehe Kapitel 3.3).
- Die Neutronenaktivierungsanalyse erfordert die Verfügbarkeit eines Reaktors.

Eignung zur Überwachung:

Siehe Tabellen 5/6 und 5/7.

Tab. 5/6: Zufuhren (Bq) bzw. Zufuhrraten (Bq/a), die zur Zeit t nach einer einmaligen Inhalation bzw. nach Beginn einer kontinuierlichen Inhalation von Th-232-Aerosolen mit 1 μm AMAD bei einer NWG_G von 0,3 bis 1,5 mBq/d durch eine **alphaspektrometrische Urinmessung** nachgewiesen werden können

t	Akut		Chronisch	
	W	Y	W	Y
1 d	0,06 - 0,3	1 - 5	20 - 100	400 - 2000
20 d	5 - 20	100 - 500	10 - 60	200 - 1000
30 d	5 - 20	100 - 500	10 - 50	200 - 1000
60 d	6 - 30	100 - 500	10 - 50	200 - 900
90 d	7 - 30	100 - 500	9 - 50	200 - 800
180 d	9 - 50	90 - 500	7 - 40	100 - 600
1 a	10 - 60	70 - 400	5 - 30	70 - 300
10 a	-	-	2 - 10	7 - 30

Tab. 5/7: Zufuhren (Bq) bzw. Zufuhrraten (Bq/a), die zur Zeit t nach einer einmaligen Inhalation bzw. nach Beginn einer kontinuierlichen Inhalation von Th-232-Aerosolen mit 1 μm AMAD bei einer NWG_G von 0,06 mBq/d durch eine **Urinmessung über Neutronenaktivierungsanalyse** nachgewiesen werden können

t	Akut		Chronisch	
	W	Y	W	Y
1 d	0,01	0,2	4	80
20 d	1	20	2	40
30 d	1	20	2	40
60 d	1	20	2	40
90 d	1	20	2	40
180 d	2	20	1	20
1 a	4	20	1	10
10 a	-	-	0,5	1

Stuhlanalyse

Vorteile:

- Es werden nicht die Aktivitäten von Folgeprodukten, sondern von den Thorium-Isotopen selbst gemessen.
- Mit der Alpha-Spektrometrie ist die simultane Erfassung und Identifizierung der inkorporierten Thoriumisotope möglich.

Nachteile:

- Aufgrund der aufwendigen Probenaufbereitung und der langen Meßzeit steht das Meßergebnis erst nach einigen Tagen zur Verfügung.
- Wegen der beträchtlichen Variabilität der täglichen Ausscheidungsraten ist für die Erfassung repräsentativer Raten die mehrtägige Probensammlung erforderlich.
- Die Akzeptanz der Probensammlung durch die zu überwachende Person ist gering.

Eignung zur Überwachung:

Siehe Tabelle 5/8.

Tab. 5/8: Zufuhren (Bq) bzw. Zufuhrraten (Bq/a), die zur Zeit t nach einer einmaligen Inhalation bzw. nach Beginn einer kontinuierlichen Inhalation von Th-232-Aerosolen mit 1 μm AMAD bei einer NWG_G von 20 mBq/d durch eine **Stuhlmessung** nachgewiesen werden können

t	Akut		Chronisch	
	W	Y	W	Y
1 d	0,5	0,3	200	100
20 d	20	100	20	20
30 d	20	200	20	20
60 d	30	200	20	20
90 d	50	200	10	10
180 d	300	200	10	10
1 a	-	-	10	10
10 a	-	-	10	10

5.2.3 **Raumluft-Überwachung**

Stationäre Aerosolsammler/-monitore

Nachweisgrenzen:

1 Bq/m^3 nach 10 Minuten Sammelzeit,
60 mBq/m^3 nach einigen Stunden Sammelzeit,
0,4 mBq/m^3 nach einigen Tagen Sammelzeit und einer Abklingzeit von 1 Woche.

Vorteile:

- Hohe Akzeptanz.
- Schnelle Verfügbarkeit bei kontinuierlicher Überwachung mit Monitoren.
- Die Messung der Alpha-Aktivitätskonzentration ist ohne chemische Aufarbeitung möglich; nach chemischer Aufarbeitung und Alpha-Spektrometrie ist Nuklid-Identifizierung möglich.
- Ausreichende Repräsentativität vorausgesetzt, gibt das Meßergebnis direkt die Zufuhr an, ohne daß ein biokinetisches Modell angewendet werden muß.

Nachteile:

- Möglicherweise mangelnde Repräsentativität der Luftproben für die Atemluft am Arbeitsplatz.
- Es werden nur luft-getragene Aktivitäten, jedoch nicht beispielsweise kontaminationsbedingte Inkorporationen erfaßt.

Eignung zur Überwachung:

Bei einer Nachweisgrenze von 0,4 mBq/m^3 ist eine Jahresaktivitätszufuhr von 1 bis 2 Bq erkennbar.

Persönliche Aerosolsammler

Nachweisgrenzen:

ca. 2 mBq/m^3 nach einer Woche Sammelzeit und einer Woche Abklingzeit,
ca. 0,4 mBq/m^3 nach einem Monat Sammelzeit.

Vorteile:

- Die Messung der Alpha-Aktivitätskonzentration ist ohne chemische Aufarbeitung möglich; nach chemischer Aufarbeitung und Alpha-Spektrometrie ist Nuklid-Identifizierung möglich.
- Das Meßergebnis gibt direkt die individuelle Zufuhr an, ohne daß ein biokinetisches Modell angewendet werden muß.

Nachteile:

- Es werden nur luft-getragene Aktivitäten, jedoch nicht beispielsweise kontaminationsbedingte Inkorporationen erfaßt.

- Es treten bei sehr kleinen Aktivitätsbelegungen Unsicherheiten im Hinblick auf die Zählstatistik und die Interpretation auf (das Teilchen, das auf dem Sammler ist, kann nicht eingeatmet werden).
- Geringe Akzeptanz.
- Wenn bei einer langen Sammelzeit das Filter stark durch konventionellen Staub belegt ist, kann eine Aussage über die gesammelte Aktivität nicht mehr gemacht werden.

Eignung zur Überwachung:

Bei einer Nachweisgrenze von 2 mBq/m^3 (nach einer Sammelzeit von 1 Woche) ist eine Jahresaktivitätszufuhr von ca. 5 Bq erkennbar.

Die Inkorporationsüberwachung wird als regelmäßige Überwachung und als Überwachung aus besonderem Anlaß durchgeführt (AKI 92a, ICRP 54, BAG 93). Die regelmäßige Inkorporationsüberwachung ist bei zeitlich nicht eingrenzbarem Inkorporationsrisko erforderlich, während Überwachungen aus besonderem Anlaß bei Abweichungen vom üblichen Arbeitsablauf notwendig sind. Quantitative Bedingungen zur Notwendigkeit von Überwachungen sind in dem Entwurf der Richtlinie "Physikalische Strahlenschutzkontrolle" (AKI 92a) festgelegt.

5.3.1 Regelmäßige Überwachung

Die Werte der Tabellen in Kapitel 5.2 zeigen, daß keines der angegebenen individuellen Verfahren eine Zufuhr in Höhe der Interpretationsschwelle (3 % GJAZ) nachzuweisen erlaubt, wie es in der Richtlinie zur physikalischen Strahlenschutzkontrolle gefordert ist. Dieser Forderung entsprechend ist die Inkorporations-Überwachung für alle Thoriumverbindungen mittels Raumluft-Überwachung durchzuführen. Diese ist durch mindestens jährliche individuelle Stuhl- und Urin-Analysen zu ergänzen. Die Urinanalysen erlauben es, Depots, die sich nach langjähriger Tätigkeit eventuell aufbauen können, zu erkennen. Die Stuhlanalysen sollen der Kontrolle der Raumluft-Überwachung dienen; bei der Interpretation der Meßwerte sind jedoch Beiträge aus natürlichen Quellen zu berücksichtigen. Die Stuhlanalysen können durch Messungen mit einem Lungenzähler, ausreichende Empfindlichkeit vorausgesetzt, ersetzt werden.

Für die Ausscheidungsanalysen sind Proben über 24 Stunden zu sammeln; wegen der erheblichen Schwankungen der Ausscheidungsraten empfiehlt sich im Falle der Stuhl-Analyse die Sammlung der Proben möglichst über drei aufeinanderfolgende Tage.

Um eine möglichst kontinuierliche Kontrolle der Raumluft-Überwachung zu gewährleisten, wird empfohlen, für Personengruppen mit gleichem Inkorporations-Risiko die individuellen Überwachungen gleichmäßig über das Kalenderjahr zu verteilen ("roulierendes Verfahren").

5.3.2 Überwachung aus besonderem Anlaß

Im Falle einer Überwachung aus besonderem Anlaß stehen die individuellen Überwachungs-Maßnahmen im Vordergrund. Es sind folgende Maßnahmen durchzuführen:

- Feststellung der Ursachen,
- Überprüfung weiterer möglicherweise betroffener Personen,
- Ermittlung weiterer Daten und Beschaffung erforderlicher Informationen zur individuellen Dosisbestimmung:

* Festlegung des Inkorporationszeitpunktes bzw. -zeitraumes sowie des Inkorporationsweges,
* Durchführung von weiteren individuellen Messungen: Ausscheidungssraten in Stuhl und Urin, Lungenaktivität und gegebenenfalls Schneuz- und Abstrichproben,
* im Fall einer kontaminierten Wunde: Messung von Aktivitäten in Blut- und Gewebeproben,
* Ermittlung der physikalischen und chemischen Eigenschaften des inkorporierten Radionuklids (AMAD, chemische Verbindung, Isotopenanteile).

Der Aufwand bei Messungen aus besonderem Anlaß orientiert sich an der Höhe der zu erwartenden bzw. festgestellten Zufuhr.

Kann eine Zufuhr oberhalb der Nachforschungsschwelle nicht ausgeschlossen werden, sollte unverzüglich mit den Messungen begonnen und die Sammlung der Ausscheidungsproben möglichst vollständig über einen Zeitraum von 3 Tagen durchgeführt werden.

Die Abbildung 5/1 stellt für die Thorium-Überwachung das durch den Entwurf der "Richtlinie für die Ermittlung der Körperdosis bei innerer Strahlenexposition (Berechnungsgrundlage)" (AKI 92b) festgelegte Verfahren für die Interpretation von Überwachungsergebnissen dar.

Demzufolge ist bei der regelmäßigen Überwachung zunächst das Ergebnis der Raumluft-Überwachung mit der Interpretationsschwelle (siehe Tabelle 5/9) zu vergleichen. Solange diese nicht überschritten ist, wird lediglich das Meßergebnis aufgezeichnet.

Tab. 5/9: Interpretationsschwelle für die Raumluft-Überwachung auf Thorium

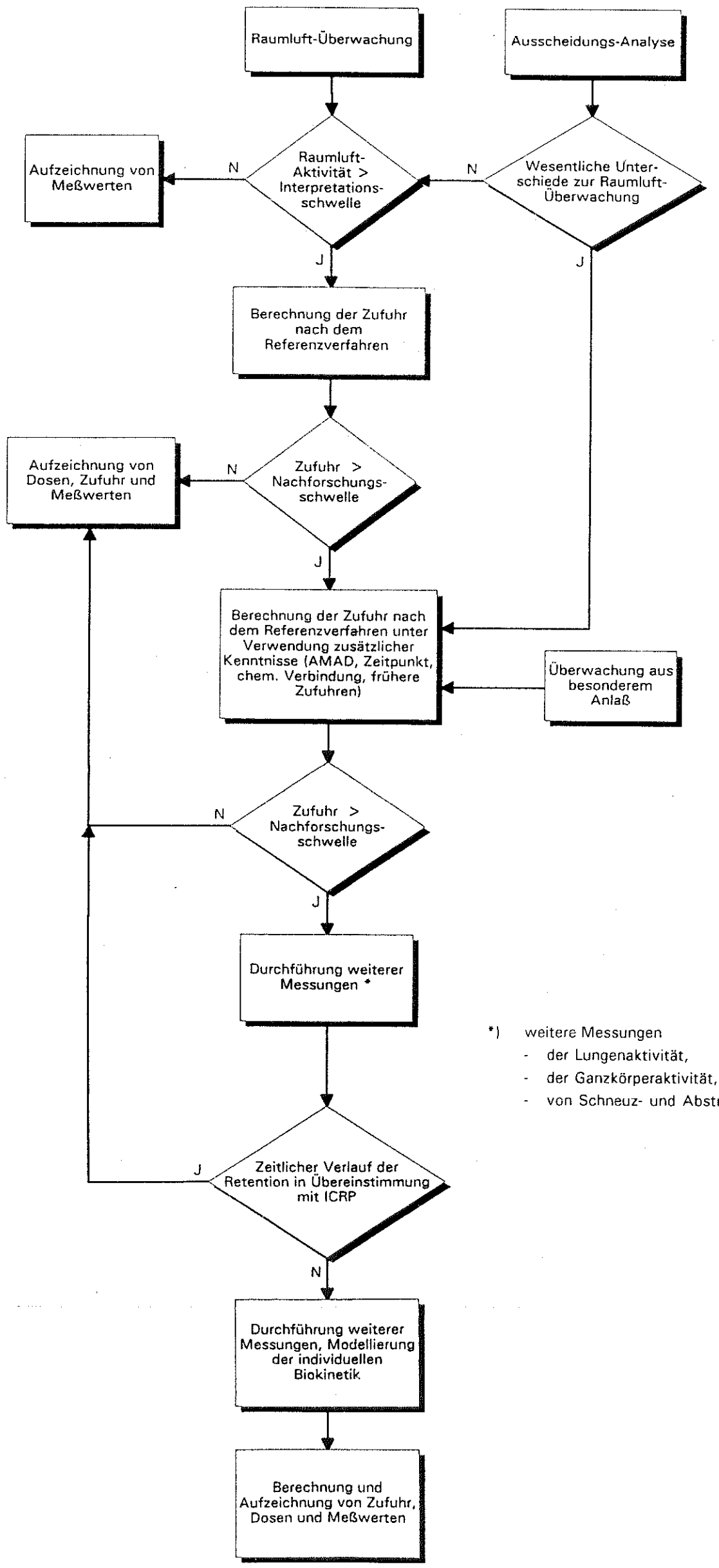
Nuklid	**Stoffklasse**	
	W	**Y**
Th-228	3 mBq/m³	3 mBq/m³
Th-230	1 mBq/m³	5 mBq/m³
Th-232	0,4 mBq/m³	0,8 mBq/m³

Bei einer Überschreitung der Interpretationsschwelle werden mit Hilfe des Referenzverfahrens (siehe Kapitel 6) die Zufuhr und die entsprechende Dosis (effektive Dosis, Dosis des höchstbelasteten Organs, siehe Fettdruck in den Tabellen 8/33 bis 8/38 in Kapitel 8.3) ermittelt. Solange die Zufuhr die Nachforschungsschwelle (30 % der Werte in Tabelle 5/2, Kapitel 5.1) nicht überschreitet, sind neben dem Meßwert Zufuhr und Dosen aufzuzeichnen. Bei einer Überschreitung der Nachforschungsschwelle sowie bei einer Überwachung aus besonderem Anlaß ist zunächst unter Verwendung verfügbarer Informationen zum Zeitpunkt der Inkorporation, zur chemischen Verbindung, zum aerodynamischen Durchmesser sowie zu früheren Zufuhren eine erneute Zufuhr- und Dosisberechnung durchzuführen. Liegt das Ergebnis dieser Berechnung weiterhin oberhalb der Nachforschungsschwelle, ist durch individuelle Messungen (Lungen- und Ganzkörperzähler, Ausscheidungsanalyse) zu prüfen, ob der beobachtete zeitliche Verlauf mit dem ICRP-Modell (siehe Tabellen in Kapitel 8.2) übereinstimmt. Ist dies der Fall, werden die Ergebnisse des Referenzverfahrens aufgezeichnet. Andernfalls ist die individuelle Retention zu verfolgen und

mittels eines mit dieser Beobachtung konsistenten Modells sind Zufuhr, individuelle Dosiskoeffizienten und Dosen zu ermitteln.

Zur Interpretation der bei der regelmäßigen Inkorporations-Überwachung zur Kontrolle der Raumluft-Überwachung durchgeführten Ausscheidungsanalysen ist zu prüfen, ob die sich hieraus ergebende Zufuhr signifikant von dem Ergebnis der Raumluft-Überwachung abweicht. Solange dies nicht der Fall ist, ist die Zufuhr und Dosisermittlung auf die Raumluft-Überwachung zu stützen. Bei einer Abweichung ist wie bei einer Überschreitung der Nachforschungsschwelle vorzugehen.

Abb. 5/1: Verfahren für die Interpretation von Ergebnissen der Inkorporations-Überwachung auf Thorium, nach AKI 92b



*) weitere Messungen
- der Lungenaktivität,
- der Ganzkörperaktivität,
- von Schneuz- und Abstrichproben

Stuhlausscheidung sowie die große Variablilität dieses Beitrages zu beachten (siehe Kapitel 6.1).

Durch Ingestion aufgenommenes Thorium wird nur zu etwa 0,02 % aus dem Darm in das Blut aufgenommen, das heißt, nahezu 100 % der inkorporierten Aktivität wird im Stuhl ausgeschieden. Diese Ausscheidung beginnt unter normalen physiologischen Bedingungen nach etwa 12 Stunden und ist nach etwa drei Tagen beendet. Somit läßt eine vollständige Sammlung der Stuhlausscheidungen über einen Zeitraum von drei Tagen nach einer Inkorporation eine zuverlässige Bestimmung der durch Ingestion inkorporierten Aktivität zu. Länger anhaltende Thorium-Ausscheidungen im Stuhl oberhalb der natürlichen Ausscheidungsrate deuten bei Überwachung aus besonderm Anlaß auf Lungendepots nach Inhalation hin und sollten weitere Überwachungen auslösen.

Die zugeführte Aktivität Z kann aus einer zur Zeit t nach Inkorporation gemessenen Ausscheidungsrate M(t, gem.) unter Berücksichtigung der entsprechenden relativen Stuhl-Ausscheidungsrate $E_S(t)$ errechnet werden:

$$Z = \frac{M(t, gem.)}{E_S(t)}$$

Mit der Zeit t in Tagen und M(t, gem.) in Bq/d ergibt sich Z in Bq; Werte der auf eine Zufuhr von 1 Bq bezogenen Ausscheidungsrate $E_S(t)$ in 1/d für Stuhlausscheidungen sind sowohl für eine einmalige Zufuhr als auch für eine konstante Dauerzufuhr (t = Zeit nach Beginn der Inkorporation) in den Tabellen in Kapitel 8.2 zusammengestellt.

6.1.2 Inhalation

Bestimmung der Zufuhr aus der gemessenen Raumluftaktivität

Aus der gemessenen Aktivitätskonzentration in der Raumluft C (in Bq/m³), gemittelt über die Arbeitszeit t (in Stunden), wird die Zufuhr Z (in Bq) während dieses Zeitraums bestimmt durch

$$Z = C \cdot v \cdot t,$$

wobei v die Atemrate (in m³/h) ist. Die Strahlenschutzverordnung (STRL 89) gibt für v und t die Standardwerte 1,2 m³/h bzw. 2000 h pro Jahr vor.

Bestimmung der Zufuhr aus individuellen Messungen

Für die Interpretation von Meßergebnissen sind Kenntnisse des zeitlichen Verhaltens des Thoriums im Organismus Voraussetzung für die Rückextrapolation auf den Zeitpunkt der Inhalation und damit für die Bestimmung der inhalierten Aktivität. Ausgangspunkt ist hier das Lungenmodell der ICRP-Publikation 30 (ICRP 30). Thorium wird hierbei den Lungenretentionsklassen Y (Oxide, Hydroxide) und W (alle anderen Verbindungen) zugeordnet.

Aus einer zur Zeit t nach der Inkorporation gemessenen Ausscheidungsrate M(t, gem.) in Urin oder Stuhl wird mit Hilfe der entsprechenden auf eine Zufuhr von 1 Bq bezogene Ausscheidungsraten E(t) in 1/d (siehe Tabellen in Kapitel 8.2) die insgesamt inhalierte Aktivität Z in Bq berechnet nach:

$$Z = \frac{M_{U,S}(t, gem.)}{E_{U,S}(t)}$$

Analog gilt für die Berechnung der inhalierten Aktivität auf der Grundlage zur Zeit t nach der Inhalation gemessenen Lungenaktivität M_L(t, gem.) in Bq und dem dimensionslosen Tabellenwert R_L(t) der relativen Lungenaktivität:

$$Z = \frac{M_L(t, gem.)}{R_L(t)}$$

Die Tabellenwerte $E_{u,s}$(t) und R_L(t) sind in den genannten Tabellen für einmalige Zufuhr und konstante Dauerzufuhr (mit entsprechenden Maßeinheiten), für die Inhalation von Aerosolen mit einer Partikelgröße von 0,2 μm, 1 μm und 10 μm zusammengestellt. In der Regel sind die Werte für die Inhalation eines Aerosols mit einem AMAD = 1 μm zu verwenden. In Fällen, in denen nachweislich andere Teilchengrößen vorliegen, können bei Überschreitung der Nachforschungsschwelle die entsprechenden Tabellenwerte verwendet werden. Bei einer regelmäßigen Inkorporations-Überwachung ist für die Festlegung von t, den Berechnungsgrundlagen (AKI 92b) entsprechend, zunächst davon auszugehen, daß die Inkorporation in der Mitte des Überwachungsintervalls stattgefunden hat. Im Falle einer Überwachung aus besonderem Anlaß und bei Überschreitung der Nachforschungsschwelle bei der regelmäßigen Überwachung ist der tatsächliche Inkorporationszeitpunkt zu verwenden.

6.2.1 Ermittlung von Dosiswerten aus der zugeführten Aktivität

Die Bestimmung von Dosiswerten aus der zugeführten Aktivität Z geschieht mit Hilfe von Dosiskoeffizienten (früher Dosisfaktoren genannt):

$$Dosis = Z \cdot Dosiskoeffizient$$

Die Dosiskoeffizienten für die 50-Jahre-Folge-Äquivalentdosis relevanter Körperbereiche sowie für die effektive Äquivalentdosis Erwachsener sind für die Inkorporationswege Inhalation, Ingestion und direkte Aufnahme ins Blut, z.B. über eine Wunde, für einmalige Inkorporation in den Tabellen im Kapitel 8.3 zusammengestellt. Die Berechnung der effektiven Dosis bezieht sich dabei auf die ICRP-Publikation 26 (ICRP 26), die die Grundlage für die derzeit geltende Strahlenschutzverordnung (STRL 89) bildet.

Für einen AMAD von 1 μm wurden die Dosiskoeffizienten dem Bundesanzeiger (BUN 89) entnommen. Zur Verdeutlichung des Einflusses dieses Parameters auf die Dosiskoeffizienten sind in den Tabellen ergänzend die Dosiskoeffizienten für die AMAD-Werte 0,2 μm und 10 μm aufgeführt (Noß 93). Letztere sind nur dann zu verwenden, wenn von 1 μm abweichende AMAD-Werte nachgewiesen werden.

6.2.2 Dosisberechnungen bei wiederholten Inkorporationen

Bei wiederholten Inkorporationen wird die Gesamtdosis aus der Summe der einzelnen Zufuhren Z_j und dem Dosiskoeffizienten bestimmt:

$$Dosis = Dosiskoeffizient \cdot \sum_j Z$$

Die lange physikalische Halbwertszeit von Th-232 und Th-230 sowie die lange Retention von Thorium führt zu einer nahezu konstanten Dosisleistung im Skelett. Das bedeutet, daß die jährliche Dosis in diesem Organ mit ausreichender Zuverlässigkeit errechnet werden kann, indem die Folgeäquivalentdosis durch 50 geteilt wird.

7 Literatur

Ahr 88 S. Ahrland; Hydrolysis of Thorium; **in:** Gmelin Handbook of Inorganic Chemistry, Thorium, Suppl. Vol. D 1; 1988, 41

AKI 92a Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle zur Ermittlung der Körperdosis, **Entwurf**; Arbeitskreis Inkorporationsüberwachung, Fachverband für Strahlenschutz e.V.; 09.1992

AKI 92b Richtlinie für die Ermittlung der Körperdosis bei innerer Strahlenexposition (Berechnungsgrundlage), **Entwurf**; Arbeitskreis Inkorporationsüberwachung, Fachverband für Strahlenschutz e.V.; 05.1992

Aww 65 M.A. Awwal, D.J. Carswell, S. Chorlton; Thorium-230 content of South Alligator River pitchblende; J. Inorg. Nucl. Chem. 27 (9); 1965, 2125

BAG 93 Konzept für die Personendosimetrie bei innerer Bestrahlung, **Entwurf**; **Hrsg.**: Bundesamt für Gesundheitswesen, Bern; 05.07.1993

Baz 67 E. Bazzano, G. Ghersini; A rapid colorimetric method for the determination of Thorium in human urine; Anal. Chim. Acta 38; 1967, 457

Bey 89 D. Beyer, R. Biehl; The significance of natural faecal Thorium excretions for the surveillance of inhaled Thorium class Y compounds; Fachverband für Strahlenschutz e.V., FS-89-48-T; 1989, 82

Bor 84 G. Bortels, G.A. Brinkman, W.B. Mann; Alpha-particle-spectrometry, techniques and applications; Int. J. Appl. Radiat. Isot. 35(4); 1984, 1

Bru 63 F.W. Bruenger, D.R. Atherton, B.J. Stover; Determination of Sr-90 and Th-228 in biological materials; Health Phys. 9; 1963, 232

BUN 89 Bekanntmachung der Dosisfaktoren, Äußere Exposition - Erwachsene und Kleinkinder (1 Jahr), Ingestion und Inhalation - Kleinkinder (1 Jahr), Ingestion und Inhalation - Erwachsene; vom 05. September 1989; Bundesanzeiger 41, Nr. 185a; 30.09.1989, 475

But 68 F.E. Butler; Rapid bioassay method for Plutonium, Neptunium and Uranium; Health Phys. 15; 1963, 19

Cli 71 R.J. Clifton, M. Farrow, E.I. Hamilton; Measurements of Th-232 in normal and industrially exposed humans; Ann. Occup. Hyg. 14; 1971, 14

Dal 94 A. Dalheimer, K. Henrichs, S. Hornik, D. Noßke; Biokinetische Daten für die Überwachung auf Thorium-Inkorporation; in Vorbereitung

Dan 86 H.S. Dang, D.D. Jaiswal, C.M. Sunta; Daily intake of Thorium by an Indian population; The Science of the Total Environment 57; 1986, 73

Dan 89 H.S. Dang, D.D. Jaiswal, C.M. Sunta, S.D: Soman; A sensitive method for the determination of the body fluids; Health Phys. 57; 1989, 393

Dil 92 H. Dilger; persönliche Mitteilung

DIN 89 Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN 25482, Nachweisgrenze und Erkennungsgrenze bei Kernstrahlungsmessungen, Teil 1; 1989

DIN 93 Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN 25482, Nachweisgrenze und Erkennungsgrenze bei Kernstrahlungsmessungen, Teil 6; 02.1993

Doe 92 H. Doerfel; persönliche Mitteilung

7 Literatur

Eak 68 J.D. Eakins, P.J. Gomm; The determination of cross alpha activity in urine by absorption on glass fibre filter paper; Health Phys. 14; 1968, 461

Eak 84 J.D. Eakins; The application of radiochemical separation procedures to environmental and biological materials; Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 233; 1984, 194

Far 64 J.P. Faris, R.F. Buchanan; Anion exchange characteristics of elements in nitric acid medium; Anal. Chem. 36; 1964, 1157

EG 80 Richtlinie 80/836/EURATOM des Rates vom 15.07.1980 zur Änderung der Richtlinien, mit denen die Grundnormen für den Gesundheitsschutz der Bevölkerung und der Arbeitskräfte gegen die Gefahren ionisierender Strahlungen festgelegt wurden (ABl. L 246 vom 17.09. 1980, S. 1)

EG 84 Richtlinie 84/467/EURATOM des Rates vom 03.09.1984 zur Änderung der Richtlinie 80/836/EURATOM hinsichtlich der Grundnormen für den Gesundheitsschutz der Bevölkerung und der Arbeitskräfte gegen die Gefahren ionisierender Strahlungen (ABl. L 265 vom 05.10.1984, S. 4)

EG 92 **Entwurf** des Vorschlags für eine Richtlinie zur Festlegung der Grundnormen für den Gesundheitsschutz der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlungen, Dok. Nr. 4057/1/92 DE, 1992

Fis 86 I.M. Fisenne, P.N. Demoleas, N.H. Harley; Thorium excretion from a Thorotrast patient; Strahlentherapie 80 (Suppl.); 1986, 151

Fis 87 I.M. Fisenne, P.M. Perry, K.M. Decker, H.W. Keller; The daily intake of U-238, U-235, U-234, Th-232, Th-230, Th-228 and Ra-228, Ra-226 by New York City residents; Health Phys. 53(4); 1987, 357

Fri 83 O. Frindik; Essentielle und toxische Inhaltsstoffe in der täglichen Gesamtnahrung; Bundesforschungsanstalt für Ernährung, BFE-Bericht R-83-02; 1983, 313

Fri 84 O. Frindik, E. Fischer; Uran und Thorium in einigen Mineralwässern der Bundesrepublik Deutschland; Z. Lebensmitteluntersuchung und Forschung 179; 1984, 30

Gob 93 M.K. Gober; Entwicklung und Anwendung von HPLC-Trennungen zum Studium von Schwerionenreaktionen und von chemischen Eigenschaften des Elements 105; Dissertation, Universität Mainz; 1993

Gri 64 R. Grillmaier, H. Muth, E. Oberhausen; Measurement of Thoron in the breath of Thorotrast patients and evaluation of the results; **in:** Assessment of Radioactivity in Man, Vol. II, IAEA; 1964, 473

Grf 79 R.V. Griffith, P.N. Dean, A.L. Anderson, J.C. Fisher; A tissue equivalent torso phantom for intercalibration of in-vivo transuranic nuclide counting facilities; **in:** Advances in Radiation Protection Monitoring, IAEA; 1979, 493

HASL 300 EML Procedures Manual; Health and Safety Laboratory, U.S. Energy Research & Developement Administration; 1977

Hau 90 H.O. Haug; Anion exchange of Thorium; **in:** Gmelin Handbook of Inorganic Chemistry, Thorium, Suppl. Vol. D 3; 1990, 1

7 Literatur

Hen 92 K. Henrichs; persönliche Mitteilung

Hew 93 G.S. Hewson, J.J. Fardy; Thorium metabolism and bioassay of mineral sand workers; Health Phys. 64(2); 1993, 147

Höt 78 H. Hötzl, R. Winkler; Eine Grossflächen-Gitterionisationskammer mit hohem Auflösungsvermögen zur Messung von Alphastrahlern in Proben mit niedriger spezifischer Aktivität; Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GSF-Bericht S-474; 06.1978, 1

Hur 63 J.B. Hursh, A. Lovaas; A device for measurement of Thoron in breath; Health Phys. 9; 1963, 621

Hur 67 J.B. Hursh; Loss of Thorium daughters by Thorium dioxide patients; Annals New York Academy of Sciences 145(3); 1967, 634

Ibr 83 S.A. Ibrahim, M.E. Wrenn, N.P. Singh, N. Cohen, G. Saccomano; Thorium concentration in human tissues from two U.S. populations; Health Phys. 44 (Suppl.); 1983, 213

ICRP 2 International Commission on Radiological Protection; Recommendations of the International Commission on Radiological Protection; Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation, Publication 2; 1959

ICRP 23 International Commission on Radiological Protection; Report of the Task Group on Reference Man; ICRP Publication 23, 1975

ICRP 26 International Commission on Radiological Protection; Recommendations of the International Commission on Radiological Protection; Annals of the ICRP; Publication 26, Vol. 1(3); 1977

ICRP 30 International Commission on Radiological Protection; Limits for intake of radionuclides by workers; Annals of the ICRP, Publication 30, Vol. 2-8; 1979

ICRP 38 International Commission on Radiological Protection; Radionuclide transformations, energy and intensity of emissions; Annals of the ICRP, Publication 38, Vol. 11-13; 1983

ICRP 54 International Commission on Radiological Protection; Individual monitoring for intakes of radionuclides by workers: design and interpretation; Annals of the ICRP, Publication 54, Vol. 19; 1988

ICRP 60 International Commission on Radiological Protection; 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection; Annals of the ICRP, Publication 60, Vol. 21(1-3); 1991

ICRP 61 International Commission on Radiological Protection; Annual limits on intake of radionuclides by workers based on the 1990 recommendations; Annals of the ICRP, Publication 61, Vol. 21(4); 1991

Jac 64 W. Jacobi; A double-filter device to measure Radon and Thoron in the breath; Symposium on the Assessment of Radioactivity in Man, IAEA; Heidelberg, 05.1964

Joh 89 J.R. Johnson, E.S. Lamothe; A review of the dietary uptake of Th; Health Phys. 56(2); 1989, 165

7 Literatur

Kai 84 G. van Kaick, H. Muth, A. Kaul (Edts.); The German Thorotrast Study; Commission of the European Communities, Report EUR 9504 en; 1984

Kat 92 Y. Kato, Y. Ishikawa; Portable Rn-220 detector used to asses Thorotrast exposure; Health Phys. 63(1); 1992, 119

Kno 79 G.F. Knoll; Radiation detection and measurement; John Wiley & Sons, New York; 1979

Koa 85 Z. Kolarik; Solvent extraction of Thorium; **in:** Gmelin Handbook of Inorganic Chemistry, Thorium, Suppl. Vol. D 2; 1985, 1

Kol 85 W. Kolb; Jahreszeitliche Schwankungen des Uran- und Thoriumgehalts in Aerosolen der bodennahen Luft; Fachverband für Strahlenschutz e.V., FS-85-37-T; 1985, 11

Kor 73 J. Korkisch, D. Dimitriadis; Anion-exchange separation and spectrophotometric determination of Thorium in geological samples; Talanta 20; 1973, 1199

Kra 80 G.H. Kramer; Sequential analysis of selected actinides in urine, part I; AECL-6879; 1980

Krs 58 K.A. Kraus, F.Nelson; Metal separation by anion exchange; **in:** Symposium on Ion Exchange and Chromatography in Analytical Chemistry, ASTM Special Technical Publication No. 195; 1958, 27

Lew 85 B. Lewinsky; Th-232 in TV camera lenses; Rad. Prot. Dosim. 11; 1985, 65

Lie 68 R. Liebermann, H.A. Moghissi; Coprecipetation technique for alpha spectroscopic determination of Uranium, Thorium and Plutonium; Health Phys. 15; 1968, 359

Lin 86 P. Linsalata, M. Eisenbud, E. Penna.Franca; Ingestion estimates of Th and high rare earth elements based on measurements of human feces; Health Phys. 50(1); 1986, 163

Luc 70 H.F. Lucas jr., D.N. Edgington, F. Markun; Natural Thorium in human bone; Health Phys. 19; 1970, 739

Mar 88 G. Marx; Precipitation and coprecipitation of Thorium; **in:** Gmelin Handbook of Inorganic Chemistry, Thorium, Suppl. Vol. D 1; 1988, 144

Mor 71 J.W. Morgan; Electrodeposition of Thorium, Uranium and Neptunium from ammoniumsulfat solutions; Radiochim. Acta 15; 1971, 190

NCRP 95 National Council on Radiation Protection and Measurements; Radiation exposure of the U.S. population from consumer products and miscellaneous sources; Report 95; 1987

Noß 93 D. Noßke; persönliche Mitteilung

Odo 81 F.R. O'Donnell, E.L. Etnier; An assessment of radiation dosis from incandescent gas mantles that contain Thorium; NUREG/CR-1910, ORNL-5815; 1981

Osb 65 W.S. Osborn; Primordial radionuclides: their distribution, movement, and possible effect within terrestrial ecosystems; Health Phys. 11 (12); 1965, 1275

7 Literatur

Paw 66 N.A. Pawlowskaja; Natural content and distribution of Thorium in the human organism; Med. Radiol. 11; 1966, 28

Per 56 R.W. Perkins, D.R. Kalkwarf; Determination of Thorium in urine; Anal. Chem. 28; 1956, 1989

Pem 88 D.R. Pemberton, J.R. Allen; Non-nuclear uses of Thorium; **in:** Gmelin Handbook of Inorganic Chemistry, Thorium, Suppl. Vol. A 3; 1988, 62

Pet 85 B.F. Peterman; Thoron-in-breath monitoring at CRNL; Chalk River Nuclear Laboratories, AECL-8706; 04.1985

Pew 67 H.G. Petrow, C.D. Strehlow; Spectrophotometric determination of Thorium in bone ash using Arsenazo III; Anal. Chem. 39; 1967, 265

Pic 68 M. Picer, P. Strohal; Determination of Thorium and Uranium in biological materials; Analyt. Chem. Acta 40; 1968, 131

Pup 72 K.W. Puphal, D.R. Olson; Electrodeposition of alpha-emitting nuclides from a mixed oxalate-chloride electrolyte; Anal. Chem. 44(2); 1972, 284

Rei 93 A. Reichelt; Thorium-Anwendungen und Umgang; **in:** Thorium, Probleme der Inkorporationsüberwachung, Hrsg. A. Dalheimer, K. Henrichs; ISH-Bericht BfS-ISH-161/93; 09.1993, 7

Rie 93 W. Riedel; persönliche Mitteilung

Rob 87 H. Robotham, G.C. Lalor, A. Mattis, R. Rattray, C. Thompson; Trace elements in Jamaican sails; J. Radioanalyt. Nucl. Chem., Articles 116; 1987, 27

Run 58 J. Rundo, A.H. Ward, P.G. Jensen; Measurement of Thoron in the breath; Phys. Med. Biol. 3; 1958, 101

Sat 68 T. Sato; The extraction of Thorium from hydrochloric acid solutions by di-(2-ethylhexyl)-phosphoric acid; Z. anorg. allg. Chem. 358; 1968, 296

Sch 82 H. Schieferdecker, D. Beyer, B. Glöbel, E. Günther, K. Henrichs, R. Rose, V. Volf, E. Werner; Biokinetisches Verhalten von radioaktiven Stoffen bei Inkorporation; Fachverband für Strahlenschutz e.V., FS-82-22-AKI; 1982, 1

Sch 84 H. Schieferdecker; persönliche Mitteilung

Sch 90 H. Schieferdecker, R. Sommer-Ballat; Health physics and safety control; **in:** Gmelin Handbook of Inorganic Chemistry, Thorium, Suppl. Vol. A 5; 1990, 238

Sin 79 N.P. Singh, S.A. Ibrahim; N. Cohen, M.E. Wrenn; Solvent extraction method for determination of Thorium in soft tissues; Anal. Chem. 51; 1979, 207

Sin 81 N.P. Singh, M.E. Wrenn; Tracers and methods for determining Thorium and Uranium in biological samples; **in:** Actinides in man and animals, Hrsg. M.E. Wrenn; RD Press; 1981, 53

Sin 87a N.P. Singh, D.D. Bennet, M.E. Wrenn; Concentrations of the alpha-emitting isotopes of U and Th in Uranium miners and millers tissues; Health Phys. 53; 1987, 261

7 Literatur

Sin 87b N.P. Singh; Amines as extracting agents for the quantitive determinations of actinides in biological samples; Radioanalyt. Nucl. Chem., Articles 115; 1987, 203

Söt 89 U. Schötzig, H. Schrader; Halbwertszeiten und Photonen-Emissionswahrscheinlichkeiten von häufig verwendeten Radionukliden; PTB-Bericht Ra-16/3; 09.1989

Sto 60 B.J. Stover, D.R. Atherton, N. Keller, D. Buster; Metabolism of the Th-228 decay series in adult beagle dogs, I. Th-228 (RdTh); Radiat. Res. 12; 1960, 657

Sto 65 B.J. Stover, D.R. Atherton, D.S. Buster, F.W. Bruenger; The Th-228 decay series in adult beagles: Ra-224, Pb-212 and Bi-212 in selected bones and soft tissues; Radiat. Res. 26; 1965, 132

STRL 76 Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 13.10.1976;Bundesgesetzblatt Teil I, Nr. 125; 20.10.1976

STRL 89 Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 30.06.1989;Bundesgesetzblatt Teil I, Nr. 34; 12.07.1989

Sun 87 C.M. Sunta, H.S. Dang, D.D. Jaiswal; Thorium in man and environment uptake and clearance; J. Radioanalyt. Nucl. Chem., Articles 115; 1987, 149

Tai 69 J. Tai-Pow; Measurements of Thoron in the breath of Thorotrast subjects; Health Phys. 16; 1969, 269

Tal 72 M.A. Talvitie; Electrodeposition of actinides for alpha spectrometric determination; Anal. Chem. 44; 1972, 280

Tay 83 H.W. Tayler, W.A. Gribbons, J Svobody; Gamma radiation from camera lenses; Radiat. Prot. Dosim. 5; 1983, 187

Tes 64 C. Testa; Determination of Thorium in urine by means of Kel-F column supporting tri-n-octylphosphine oxide; **in:** Radiological Health and Safety in Mining and Milling of Nuclear Material, Vol. II, IAEA; 1964, 489

Tes 70 C. Testa; Column reversed-phase partition chromatography for the isolation of some radionuclides from biological materials; Anal. Chim. Acta 50; 1970, 447

Tor 67 T.Y. Toribara, L. Koval; Isolation of Thorium in biological samples; Health Phys. 14; 1967, 403

Twi 70 B.L. Twitty, M.W. Boback; Rapid determination of Thorium in urine by thermal neutron activation analysis; Anal. Chim. Acta 49; 1970, 19

UNSC 82 Ionizing radiation sources and biological effects; United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; New York, 1982

UNSC 88 Sources, effects and risks of ionizing radiation; United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; New York, 1988

Vie 88 H. Vietzke; Uses of Th as nuclear fuel; **in:** Gmelin Handbook of Inorganic Chemistry, Thorium, Suppl. Vol. A 3; 1988, 48

7 Literatur

Wal 85 M.P. Waligorski, M. Jasinska, J. Schwabenthan; Enhanced nuclear radiation from camera lenses; Health Phys. 49; 1985, 491

Waz 89 K.F. Walz, U. Schötzig; Natürlich radioaktive Substanzen als Aktivitätsnormale; PTB-Bericht Ra-23; 11.1989

Yam 82 A. Yamato; An anion exchange method for the determination of Am-241 and Plutonium in environmental and biological samples; J. Radioanalyt. Chem. 75; 1982, 265

8.1.1 Bestimmung von Thorium im Urin und Stuhl durch Trilaurylamin (Tridodecylamin, TLA); nach H. Schieferdecker, KfK Karlsruhe

1. Zu jeder Probe wird als Tracer ca. 80 mBq Th-229 und als Zusatz 1 ml $FeCl_3$-Lösung (1 mg/ml) gegeben.
2. Stuhlproben werden eine Stunde bei 480 °C verascht, dann mit HNO_3 (konzentriert) aufgekocht und die Veraschung wiederholt, bis kein Kohlenstoff mehr vorhanden ist.
3. Urinproben werden mit ca. 100 ml HNO_3 (konz.) und einigen ml Octylalkohol eingedampft und ca. 1 Stunde bei 480 °C geglüht.
4. Rückstand mit ca. 130 ml HNO_3 (4 m) lösen (10 Minuten bei mäßiger Temperatur erhitzen).
5. Lösung in 250 ml-Schütteltrichter überführen, Schalen mit 50 ml HNO_3 (4 m) nachspülen.
6. Mit ca. 75 ml TLA (25 %ig in Cyclohexan) versetzen und 5 bis 10 Minuten mit einer Schüttelmaschine schütteln.
7. Die Phasen trennen, wässrige Phase weiterverarbeiten, organische Phase sammeln.
8. Wässrige Phase gemäß Pkt. 6. und 7. erneut mit TLA extrahieren und die organischen TLA-Phasen vereinen.
9. Die organischen Phasen werden dreimal mit je 100 ml HNO_3 (4 m) gewaschen; Waschwasser verwerfen.
10. Zweimalige Rückextraktion des Thoriums mit je 20 ml HCl (10 m), die organischen Phasen zur Regenerierung sammeln.
11. Zur salzsauren Phase 10 ml Wasser zugeben (dadurch erniedrigt sich die Konzentration von 10 m auf 8 m).
12. Zur Entfernung des Eisens wird eine Extraktion mit zweimal 50 ml Diisopropyläther durchgeführt; der Äther wird verworfen.
13. Die salzsaure Phase wird zur Trockne eingedampft, der Rückstand mit 1 ml HNO_3 (konz.) oxidiert und erneut zur Trockne eingedampft.
14. Nach Zugabe von 0,6 ml H_2SO_4 (konz.) solange erhitzen, bis SO_3-Dämpfe entstehen und abkühlen lassen.
15. Die Lösung wird in das Elektrolysegefäß überführt; dazu werden 10 ml Wasser zum Spülen verwendet.
16. Die Lösung wird mit NH_4OH (konz.) und mit Methylrot als Indikator auf einen pH-Wert von ca. 4 (rot) eingestellt.
17. Die Elektrolyse erfolgt innerhalb von 2 Stunden bei 1,2 A auf gereinigten Edelstahlplättchen.
18. Die Elektrolyse wird durch Zugabe von NH_4OH (konz.) unterbrochen, das Gefäß bei noch eingeschaltetem Strom entleert.
19. Messung des Thoriums durch Alpha-Spektrometrie im Vakuum bei 15 Stunden Meßzeit.
    Nachweisgrenze: 1,5 mBq Th (Alpha-Aktivität ohne Th-229)

8.1.2 Bestimmung von Thorium im Urin und Stuhl durch Mineralisierung, Mitfällung an Calciumoxalat, Anionenaustausch, Elektrodeposition und Alpha-Spektrometrie; nach R. Biehl, KFA Jülich

1. Trennsäule

Die Trennsäule besteht aus einer Minisäule aus Polypropylen mit aufgesetztem Trichter und PTFE-Hahn und ist mit 7 ml Austauscher Dowex 1X8, 50 - 100 mesh, Nitratform gefüllt.
Vor Aufgabe der Probe wird die Säule mit 125 ml 8 n HNO_3 konditioniert, gegebenenfalls Eluat auf Cl^- mit $AgNO_3$ prüfen.
Bei voll geöffnetem Hahn beträgt die Durchlaufgeschwindigkeit im Mittel ca. 1,5 ml/min. Durch die vorgegebenen Durchfluß-Bedingungen läuft die Säule nicht leer.
Nach Beendigung der Thorium-Elution die Säule mit ca. 30 ml 0,36 n HCl + 0,01 n HF reinigen, abschließend mit ca. 100 ml Wasser spülen und mit Wasser gefüllt bis zum Konditionieren vor dem nächsten Trennungsgang aufbewahren.

2. Elektrolysezelle

Die Elektrolysezelle besteht aus einem Glas-Gewinderohr, einer Schraubverbindungs-Kappe, einem Vitan-O-Ring, einer Anode aus Platindraht, der durch einen PE-Schliffstopfen geführt ist und einem Kathoden-Kontakt aus VA-Stahl.
Die mit Analysen-Lösungen in Berührung kommenden Einzelteile sowie der Vorrat an Kathoden (VA-Stahlplättchen mit 15 mm Durchmesser) werden in einer ca. 10 %igen Lösung eines Laborreinigers (RBS o.ä.) aufbewahrt und unmittelbar vor dem Einsatz gründlich mit Wasser gespült.

3. Analysengang

1. Zugabe des internen Standards: für Urin ca. 25 mBq Th-229, für Stuhl ca. 75 mBq Th-229.
2. 24-h-Urinprobe mit HNO_3 und H_2O_2 naßveraschen; 24-h-Stuhlprobe einschließlich des Sammelbehälters trocken veraschen ($\leq$ 500 °C).
3. Einsatz zur Analyse: bei Urin die gesamte 24-h-Probe, bei Stuhl 1/3 der 24-h-Asche.
4. Die 1/3 24-h-Stuhl-Asche mit HCl lösen, gegebenenfalls Unlösliches nach Abrauchen von SiF_4 mit $K_2S_2O_7$ aufschließen, Schmelze mit HCl lösen, Lösungen vereinigen. Die 24-h-Urin-Asche mit HCl lösen. 40 ml Oxalsäure (80 g/l) zugeben, mit konz. NH_4OH pH-Wert auf ca. 2,0 einstellen (Fällung von $Th(C_2O_4)_2 \cdot x\ H_2O$ zusammen mit $CaC_2O_4 \cdot x\ H_2O$, Calcium ist in der Probenmatrix in genügendem Überschuß vor-handen). Niederschlag abzentrifugieren.

5. Oxalate mit HNO_3 und H_2O_2 zerstören, zur Trockne eindampfen. Rückstand mit 10 ml 8 n HNO_3 lösen, kurz aufkochen, abkühlen lassen und auf vorbereitete Säule geben.
6. Säule mit ca. 80 ml 8 n HNO_3 von mitgefällten und gegebenenfalls durchgeschleppten Metallen (Erdalkalien, Seltene Erden usw.) freiwaschen. Neben Thorium bleiben Protaktinium (V), Plutonium (IV), Neptunium (IV) und zu einem geringen Anteil Uran (VI) am Harz gebunden. Verteilungskoeffizienten in gleicher Größenordnung wie Thorium zeigt darüberhinaus nur Gold (III).
7. Thorium mit 100 ml 8 n HCl eluieren. Eluat in einem Quarzbecher sammeln; alle anderen nach Waschen mit 8 n HNO_3 noch absorbierten Metalle verbleiben weiterhin auf der Säule.
8. Eluat nach Zugabe von 50 mg $NaHSO_4$ zur Trockne eindampfen, mit 0,8 ml konz. H_2SO_4 zum Rauchen erhitzen, mit einigen Tropfen H_2O_2 gegebenenfalls vorhandenen organischen Rückstand zerstören, abkühlen lassen.
9. Mit konz. NH_4OH, 1 n H_2SO_4 und Methylrot als Indikator den pH-Wert auf ca. 2,0 einstellen, mit Wasser in Elektrolysenzelle spülen, Elektrodeposition über mindestens 2,5 h mit 400 mA/cm^2 durchführen.
10. Ca. 2 min nach Zugabe von 1 ml konz. NH_4OH Elektrodeposition beenden, Kathode entnehmen, mit Wasser und Ethanol spülen, trocknen.
11. Alpha-Spektrometrie durchführen, Meßzeit: 22 h.

Bei einer mittleren chemischen Ausbeute von 0,75 für Urin bzw. 0,65 für Stuhl, einer Zählausbeute von 0,25, einem Nulleffekt von 1,35 · E-05 pro s (Th-232-Region) und einer Fehlerwahrscheinlichkeit von 0,05 ergeben sich nach DIN 25482 (DIN 89) Erkennungsgrenzen von:

0,2 mBq Th-232 für 24-h-Urin,
0,6 mBq Th-232 für 24-h-Stuhl.

8.1.3 Bestimmung von Thorium im Urin durch Mitfällung an Calciumoxalat und Eisenhydroxid und nachfolgendem Ionenaustausch; nach W. Riedel, Klinikum Steglitz der FU Berlin

1. Zugabe von Th 229-Tracer zum 24-h-Urin.
2. Naßveraschung mit konz. HNO_3 (10 - 20 % des Urinvolumens) und Eindampfen bis zu einem kleinen Volumen bzw. bis zur Trockne; Naßveraschung so oft wiederholen, bis keine Reaktion mehr nach Zugabe von HNO_3 erfolgt.
3. Auflösen des Rückstandes in ca. 300 ml 1 n HNO_3, anschließend die Lösung kurz aufkochen (Schale mit Uhrglas abdecken).
4. Zugabe von 100 mg Calcium-Träger und 1 g Oxalsäure (12,5 ml einer 8 %igen Lösung).
5. Einstellen des pH-Wertes auf etwa 2,0 - 2,5 mit konz. NH_4OH.
6. Niederschlag absetzen lassen (über Nacht), dekantieren des Überstandes, in ein 250 ml Zentrifugenglas überführen (evtl. in mehreren Portionen), 10 Minuten bei 2700 U/min zentrifugieren und Überstand verwerfen.
7. Niederschlag in 5 ml konz. HNO_3 lösen und zur Zerstörung der Oxalsäure 5 ml 30 %iger H_2O_2 zugeben; Eindampfen bis zur Trockne; erneutes Auflösen des Rückstandes in 5 ml konz. HNO_3, Zugabe von 5 ml 30 %iger H_2O_2 und Eindampfen bis zur Trockne.
8. Rückstand auflösen in 5 ml konz. HNO_3 und verdünnen mit aqua dest., Zugabe von 50 mg $FeCl_3$ 6 H_2O als Träger.
9. Erhöhung des pH-Wertes auf 3,3 mittels konz. NH_4OH; der $Fe(OH)_3$-Niederschlag wird erwärmt, abgekühlt, zentrifugiert und der Überstand verworfen.
10. Auflösen des Niederschlages in 5 ml HNO_3; nach zweimaligem Umfällen ist das Ca entfernt.
11. Den Niederschlag mit aqua dest. waschen, zentrifugieren, Überstand dekantieren und Niederschlag trocknen lassen (NH_4OH entweicht).
12. Vorbereitung der Ionenaustauschersäule:
    14 g Ionenaustauscherharz in der Chloridform (Dowex 1x4, 100 - 200 mesh) in 8 n HNO_3 quellen lassen (über Nacht). Die Säule (1,5 cm Durchmesser) damit beschicken; mit 100 - 200 ml 8 n HNO_3 die Säule chloridfrei spülen; anschließend ist mit Silbernitrat zu prüfen, ob die Waschlösung chloridfrei ist.
13. Den trockenen Niederschlag in 40 ml 8 n HNO_3 lösen und auf die Ionenaustauschersäule geben, mit einer Tropfgeschwindigkeit von max. 1 - 2 ml/min.
14. Zur Entfernung des Eisens von der Säule wird mit 200 ml 8 n HNO_3 gespült.
15. Eluieren des Thoriums mit 200 ml 1 n HNO_3, Tropfgeschwindigkeit 1 ml/ min.
16. Eindampfen des Eluats bis zur Trockne.
17. Aufnahme des Rückstandes mit 0,5 ml konz. H_2SO_4 und 100 mg $NaHSO_4$ und erhitzen bis zur Bildung von SO_3-Nebeln; danach die Temperatur reduzieren und Rückstand bis zur Trockne abrauchen (24 Stunden).

18. Auflösen des Rückstandes in wenig 0,75 m $(NH_4)_2SO_4$-Lösung und Zugabe eines Tropfens 30 %iger H_2O_2; überspülen der Lösung in eine Elektrolysezelle; mehrmaliges Nachspülen mit 0,75 m $(NH_4)_2SO_4$; der pH-Wert soll bei 2,0 - 2,5 liegen (Indikatorstäbchen oder Thymolblau).
19. Elektrolytische Abscheidung des Thoriums auf einem Edelstahlplättchen bei 0,8 A und einer Elektrolysedauer von 3 Stunden.

Bei einer Meßzeit von 1000 min, einer mittleren chemischen Ausbeute von 60 %, einer Zählausbeute von 35 %, einem Erwartungswert der Umgebungsstrahlung $5 \cdot 10^{-6}$ pro s im Energiebereich des Th-232 und einer Fehlerwahrscheinlichkeit von 0,05 ergeben sich nach DIN 25482, Teil 6 (DIN 93) als

Erkennungsgrenze:	0,2 mBq/24-h-Urin und
Nachweisgrenze:	0,4 mBq/24-h-Urin.

8.1.4 Bestimmung von Thorium in Urin und Stuhl durch Gamma-Spektrometrie nach Neutronenaktivierung; nach K. Pock und F. Steger, Forschungszentrum Seibersdorf

Urin

1. Aus einer Tagesausscheidung Urin wird Thorium mit Calciumoxalat mitgefällt: Zugabe von 100 mg Ca (in Form von 0,25 g $CaCO_3$), 3,125 g Oxalsäure (beide in wenig verdünnter HNO_3 gelöst) und konz. NH_3 bis pH 3-4.
2. Es wird eine Stunde am Magnetrührer gerührt, man läßt absitzen und dekantiert.
3. Der Bodensatz wird suspendiert und zentrifugiert, der Niederschlag mit oxalsäurehaltigem Wasser gewaschen.
4. Der abzentrifugierte Niederschlag wird im selben Zentrifugenbecher im Trockenschrank bei 110 °C getrocknet.
5. Das Calciumoxalat wird dann in einem Porzellantiegel bei Rotglut ca. 3 Stunden zum Oxid verglüht und anschließend in das Quarzbestrahlungsgefäß (siehe Bestrahlung) transferiert.

Stuhl

1. Ca. 1,5 g Fäkalienasche werden in einem Teflonbecher eingewogen und durch wiederholtes Abrauchen mit 30 ml konz. HNO_3 + 0,5 ml $HClO_4$ (72 %) aufgeschlossen, bis die Braunfärbung der Lösung verschwindet.
2. Der nach dem letzten Abrauchen erhaltene Rückstand wird durch Zugabe von zwei Portionen dest. Wasser (30 bzw. 20 ml) in ein 150-200 ml Becherglas transferiert.
3. Die weitere Vorgangsweise entspricht der für die Calciumoxalatfällung an Urin (siehe oben, 1.- 5.), jedoch aufgrund des Ca-Gehalts der Fäkalienasche ohne Ca-Zugabe.

Vergleichsproben

Herstellung zweier Vergleichsproben:
1. Pipettieren von 0,5 ml einer Th-Nitrat-Lösung bekannter Konzentration (ca. 50 µg/ml) auf Calciumoxid in die Bestrahlungskapsel (Kontrolle der Th-Zugabe durch Wägung).
2. Th-Zugabe zu salpetersaurem dest. Wasser vor der Calciumoxalatfällung, die wie für Urin beschrieben durchgeführt wird (siehe oben, 1.- 5.). Diese kann nach der Bestrahlung aus aus der Kapsel geleert werden und dient als Vergleichsprobe für die außerhalb der Bestrahlungskapsel gemessenen Proben.

Bestrahlung

Bei einem Fluß thermischer Neutronen von 5 - 8 · 10^{13} n/(cm^2 · s) werden alle Proben und Standards im gleichen Aluminiumbehälter rotierend bestrahlt, Bestrahlungsdauer ca. 24 Stunden. Nach der Bestrahlung werden die Proben bis zur Messung ca. eine Woche abklingen gelassen.

Steht Quarz mit sehr geringem Th-Gehalt zur Verfügung (< 5 ng Th/g Quarz), so wird die für Ausscheidungsanalysen genügende Empfindlichkeit durch gammaspektrometrische Messung an der Bestrahlungskapsel erzielt. Bei größeren Th-Gehalten in Quarz (jedenfalls wenn dieser Gehalt größer 10 ng Th/g Quarz ist) sind die Bestrahlungskapseln zu öffnen, die Proben in geeignete Meßgefäße überzuführen und die Gammaspektren am entnommenen Calciumoxid aufzunehmen.

8.1.5 Bestimmung von Thorium im Urin durch Gamma-Spektrometrie nach Neutronenaktivierung; nach H.S. Dang (Dan 86)

1. Naßveraschung von 1 l eines 24-h-Urins mit 10 ml HNO_3.
2. Mitfällung nach Zugabe von 0,5 ml H_3PO_4 und 20 ml konz. NH_3-Lösung an Calciumphosphat.
3. Dekantieren des Überstandes und Zentrifugieren des Niederschlages; lösen desselben in 10 ml HNO_3.
4. Lösung zur Trockne einengen und Rückstand zur Zerstörung organischer Reste glühen bei 300 - 400 °C.
5. Glührückstand in 2 ml 12 n HCl lösen und die Lösung mit 20 ml aqua dest. verdünnen.
6. Mitfällung des Thoriums an Calciumoxalat nach Zugabe von konz. Oxalsäurelösung und Einstellung des pH-Wertes auf 4.
7. Trocknen des abzentrifugierten Oxalates und Präparation der Bestrahlungsproben.
8. Bestrahlung der Proben bei einer Flußdichte von 10^{13} n/cm^2 · s.
9. Auflösen der Proben nach Ablauf einer Wartezeit von ca. 1 Woche bis zum Abklingen der kurzlebigen Aktivierungsprodukte (Na-24, K-42, Cl-38 usw.) in HNO_3 unter Zugabe von 40 mg Mangan-Träger und Einstellung der Säurekonzentration auf 40 %.
10. Mitfällung des Pa-233 nach Oxidation des Mn-II mittels $KBrO_3$ (50 mg) am entstandenen MnO_2.
11. Auflösung des MnO_2 in HNO_3/H_2O_2 und versetzen mit 8 ml Ba^{2+}-Trägerlösung der Konzentration 5 mg Ba je ml $BaCl_2$-Lösung.
12. Mitfällung des Pa-233 am $BaSO_4$ nach Zugabe von 50 mg K_2SO_4 und 15 ml H_2SO_4.
13. Lösen des $BaSO_4$-Niederschlages durch Abrauchen bis zur Bildung von SO_3-Nebeln; abkühlen lassen und Umfällung des $BaSO_4$ durch Verdünnen mit 50 ml H_2O, nachdem nochmals 20 mg Ba-Träger zugesetzt wurden.
14. Abfiltrieren des $BaSO_4$-Niederschlages auf einem Whatman 42-Filter und Messung im Gamma-Spektrometer.

Nachweisgrenze: 0,1 - 1 ng Th-232 (0,4 - 4 μBq Th-232)

Die folgenden Tabellen enthalten Retentionswerte (Lunge, Ganzkörper, Knochen und Leber) sowie Ausscheidungsraten (Urin und Stuhl) für

- Inhalation (einmalige bzw. chronische Zufuhr),
- Ingestion (einmalige Zufuhr) und
- direkte Aufnahme ins Blut ("Injektion"), z.B. durch eine Wunde (einmalige Zufuhr)

von Th-232 bzw. Th-230 und Th-228 (Hen 92). Die Werte sind für die ICRP-Stoffklassen

- Y (Oxide, Hydroxide) und
- W (alle anderen Verbindungen)

angegeben. Für den Zufuhrweg 'Inhalation' wurden die Werte für die AMAD-Größen 0,2 μm, 1 μm und 10 μm berechnet.

Die Tabellen mit den Retentionswerten und Ausscheidungsraten schlüsseln sich wie folgt auf:

Tab. 8/1 - 8/6:	Inhalation von **Th-232**, Stoffklassen Y und W, AMAD: 0,2 μm, 1 μm und 10 μm, einmalige Zufuhr von 1 Bq;
Tab. 8/7 -8/12:	Inhalation von **Th-232**, Stoffklassen Y und W, AMAD: 0,2 μm, 1 μm und 10μm, konstante Dauerzufuhr von 1 Bq/d;
Tab. 8/13-8/14:	Ingestion von **Th-232**, Stoffklassen Y und W, einmalige Zufuhr von 1 Bq;
Tab. 8/15-8/16:	Direkte Aufnahme von **Th-232** ins Blut (z.B. über eine Wunde), Stoffklassen Y und W, einmalige Zufuhr von 1 Bq;
Tab. 8/17-8/22:	Inhalation von **Th-228**, Stoffklassen Y und W, AMAD: 0,2 μm, 1 μm und 10 μm, einmalige Zufuhr von 1 Bq;
Tab. 8/23-8/28:	Inhalation von **Th-228**, Stoffklassen Y und W, AMAD: 0,2 μm, 1 μm und 10 μm, konstante Dauerzufuhr von 1 Bq/d;
Tab. 8/29-8/30:	Ingestion von **Th-228**, Stoffklassen Y und W, einmalige Zufuhr von 1 Bq;
Tab. 8/31-8/32:	Direkte Aufnahme von **Th-228** ins Blut (z.B. über eine Wunde), Stoffklassen Y und W, einmalige Zufuhr von 1 Bq.

Tab. 8/1: Ausscheidungsraten in 1/d und Retentionswerte nach Inhalation von Th-232, Stoffklasse Y, AMAD: 0,2 μm, einmalige Zufuhr von 1 Bq, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	1.0E-04	4.1E-01	3.0E-02	6.0E-01	9.6E-04	5.5E-05
2	3.1E-05	3.5E-01	9.5E-02	5.0E-01	1.0E-03	5.7E-05
3	1.1E-05	3.2E-01	8.5E-02	4.2E-01	1.0E-03	5.8E-05
4	6.0E-06	3.1E-01	5.4E-02	3.7E-01	1.1E-03	6.0E-05
5	4.6E-06	3.0E-01	3.1E-02	3.3E-01	1.1E-03	6.1E-05
6	4.1E-06	3.0E-01	1.7E-02	3.2E-01	1.1E-03	6.3E-05
7	4.0E-06	3.0E-01	8.9E-03	3.1E-01	1.1E-03	6.4E-05
8	3.9E-06	3.0E-01	4.7E-03	3.0E-01	1.1E-03	6.5E-05
9	3.9E-06	3.0E-01	2.6E-03	3.0E-01	1.2E-03	6.7E-05
10	3.9E-06	3.0E-01	1.4E-03	3.0E-01	1.2E-03	6.8E-05
20	4.0E-06	2.9E-01	2.7E-04	3.0E-01	1.4E-03	8.1E-05
30	4.1E-06	2.9E-01	2.7E-04	2.9E-01	1.7E-03	9.4E-05
40	4.2E-06	2.9E-01	2.6E-04	2.9E-01	1.9E-03	1.1E-04
50	4.3E-06	2.8E-01	2.6E-04	2.9E-01	2.2E-03	1.2E-04
60	4.4E-06	2.8E-01	2.6E-04	2.9E-01	2.4E-03	1.3E-04
70	4.5E-06	2.8E-01	2.5E-04	2.8E-01	2.7E-03	1.5E-04
80	4.6E-06	2.8E-01	2.5E-04	2.8E-01	2.9E-03	1.6E-04
90	4.7E-06	2.7E-01	2.5E-04	2.8E-01	3.2E-03	1.7E-04
100	4.8E-06	2.7E-01	2.4E-04	2.8E-01	3.4E-03	1.8E-04
200	5.7E-06	2.4E-01	2.1E-04	2.5E-01	5.9E-03	3.1E-04
300	6.5E-06	2.2E-01	1.8E-04	2.3E-01	8.5E-03	4.2E-04
400	7.2E-06	2.0E-01	1.6E-04	2.1E-01	1.1E-02	5.2E-04
500	7.9E-06	1.8E-01	1.4E-04	2.0E-01	1.3E-02	6.1E-04
600	8.4E-06	1.7E-01	1.2E-04	1.8E-01	1.6E-02	6.9E-04
700	8.9E-06	1.5E-01	1.1E-04	1.7E-01	1.8E-02	7.6E-04
800	9.3E-06	1.4E-01	9.2E-05	1.6E-01	2.1E-02	8.2E-04
900	9.6E-06	1.3E-01	8.0E-05	1.5E-01	2.3E-02	8.8E-04
1000	9.9E-06	1.1E-01	7.0E-05	1.4E-01	2.5E-02	9.2E-04
2000	1.0E-05	5.1E-02	1.7E-05	9.6E-02	4.0E-02	9.7E-04
4000	7.0E-06	1.7E-02	1.1E-06	6.7E-02	4.8E-02	4.6E-04
6000	4.7E-06	9.6E-03	6.8E-08	5.5E-02	4.4E-02	1.5E-04
8000	3.6E-06	8.0E-03	4.2E-09	4.6E-02	3.8E-02	4.3E-05
10000	2.9E-06	7.6E-03	2.7E-10	4.0E-02	3.2E-02	1.1E-05

Tab. 8/2: Ausscheidungsraten in 1/d und Retentionswerte nach Inhalation von Th-232, Stoffklasse Y, AMAD: 1 μm, einmalige Zufuhr von 1 Bq, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	3.0E-04	2.6E-01	5.4E-02	5.9E-01	2.8E-03	1.6E-04
2	8.1E-05	1.8E-01	1.6E-01	4.2E-01	2.8E-03	1.6E-04
3	2.3E-05	1.6E-01	1.3E-01	2.9E-01	2.8E-03	1.6E-04
4	8.1E-06	1.6E-01	7.2E-02	2.2E-01	2.8E-03	1.6E-04
5	4.2E-06	1.5E-01	3.5E-02	1.8E-01	2.9E-03	1.6E-04
6	3.2E-06	1.5E-01	1.6E-02	1.7E-01	2.9E-03	1.6E-04
7	2.9E-06	1.5E-01	7.5E-03	1.6E-01	2.9E-03	1.6E-04
8	2.8E-06	1.5E-01	3.5E-03	1.6E-01	2.9E-03	1.6E-04
9	2.8E-06	1.5E-01	1.7E-03	1.5E-01	2.9E-03	1.6E-04
10	2.8E-06	1.5E-01	8.7E-04	1.5E-01	2.9E-03	1.7E-04
20	2.9E-06	1.5E-01	1.4E-04	1.5E-01	3.0E-03	1.7E-04
30	2.9E-06	1.5E-01	1.3E-04	1.5E-01	3.2E-03	1.8E-04
40	2.9E-06	1.4E-01	1.3E-04	1.5E-01	3.3E-03	1.8E-04
50	3.0E-06	1.4E-01	1.3E-04	1.5E-01	3.4E-03	1.9E-04
60	3.0E-06	1.4E-01	1.3E-04	1.5E-01	3.5E-03	1.9E-04
70	3.1E-06	1.4E-01	1.3E-04	1.4E-01	3.6E-03	2.0E-04
80	3.1E-06	1.4E-01	1.2E-04	1.4E-01	3.8E-03	2.0E-04
90	3.2E-06	1.4E-01	1.2E-04	1.4E-01	3.9E-03	2.1E-04
100	3.2E-06	1.4E-01	1.2E-04	1.4E-01	4.0E-03	2.1E-04
200	3.6E-06	1.2E-01	1.1E-04	1.3E-01	5.2E-03	2.6E-04
300	3.9E-06	1.1E-01	9.2E-05	1.2E-01	6.5E-03	3.1E-04
400	4.3E-06	1.0E-01	8.0E-05	1.1E-01	7.7E-03	3.5E-04
500	4.5E-06	9.1E-02	7.0E-05	1.0E-01	9.0E-03	3.9E-04
600	4.8E-06	8.3E-02	6.1E-05	9.5E-02	1.0E-02	4.2E-04
700	5.0E-06	7.5E-02	5.3E-05	8.9E-02	1.1E-02	4.5E-04
800	5.1E-06	6.8E-02	4.6E-05	8.3E-02	1.2E-02	4.7E-04
900	5.3E-06	6.3E-02	4.0E-05	7.9E-02	1.3E-02	4.9E-04
1000	5.4E-06	5.7E-02	3.5E-05	7.4E-02	1.5E-02	5.1E-04
2000	5.4E-06	2.6E-02	8.7E-06	5.0E-02	2.2E-02	5.0E-04
4000	3.7E-06	8.3E-03	5.4E-07	3.5E-02	2.6E-02	2.3E-04
6000	2.5E-06	4.8E-03	3.4E-08	2.9E-02	2.4E-02	7.5E-05
8000	1.9E-06	4.0E-03	2.1E-09	2.4E-02	2.0E-02	2.1E-05
10000	1.5E-06	3.8E-03	1.3E-10	2.1E-02	1.7E-02	5.7E-06

Tab. 8/3: Ausscheidungsraten in 1/d und Retentionswerte nach Inhalation von Th-232, Stoffklasse Y, AMAD: 10 μm, einmalige Zufuhr von 1 Bq, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	7.4E-04	1.9E-01	1.1E-01	8.9E-01	6.8E-03	3.9E-04
2	1.9E-04	6.2E-02	3.4E-01	5.4E-01	6.8E-03	3.9E-04
3	5.1E-05	3.7E-02	2.7E-01	2.8E-01	6.8E-03	3.9E-04
4	1.5E-05	3.2E-02	1.4E-01	1.4E-01	6.8E-03	3.9E-04
5	6.0E-06	3.1E-02	6.1E-02	7.9E-02	6.8E-03	3.9E-04
6	3.6E-06	3.0E-02	2.5E-02	5.5E-02	6.8E-03	3.9E-04
7	3.1E-06	3.0E-02	9.8E-03	4.5E-02	6.8E-03	3.9E-04
8	2.9E-06	3.0E-02	3.8E-03	4.1E-02	6.8E-03	3.9E-04
9	2.9E-06	3.0E-02	1.5E-03	3.9E-02	6.8E-03	3.9E-04
10	2.8E-06	3.0E-02	6.1E-04	3.9E-02	6.8E-03	3.9E-04
20	2.8E-06	2.9E-02	2.7E-05	3.8E-02	6.8E-03	3.8E-04
30	2.8E-06	2.9E-02	2.7E-05	3.8E-02	6.8E-03	3.8E-04
40	2.8E-06	2.9E-02	2.6E-05	3.8E-02	6.9E-03	3.8E-04
50	2.8E-06	2.8E-02	2.6E-05	3.7E-02	6.9E-03	3.8E-04
60	2.8E-06	2.8E-02	2.6E-05	3.7E-02	6.9E-03	3.7E-04
70	2.8E-06	2.8E-02	2.5E-05	3.7E-02	6.9E-03	3.7E-04
80	2.8E-06	2.8E-02	2.5E-05	3.6E-02	6.9E-03	3.7E-04
90	2.8E-06	2.7E-02	2.5E-05	3.6E-02	7.0E-03	3.7E-04
100	2.8E-06	2.7E-02	2.4E-05	3.6E-02	7.0E-03	3.6E-04
200	2.7E-06	2.4E-02	2.1E-05	3.3E-02	7.2E-03	3.4E-04
300	2.6E-06	2.2E-02	1.8E-05	3.1E-02	7.4E-03	3.3E-04
400	2.6E-06	2.0E-02	1.6E-05	2.9E-02	7.6E-03	3.1E-04
500	2.5E-06	1.8E-02	1.4E-05	2.7E-02	7.8E-03	2.9E-04
600	2.4E-06	1.7E-02	1.2E-05	2.6E-02	7.9E-03	2.8E-04
700	2.4E-06	1.5E-02	1.1E-05	2.5E-02	8.1E-03	2.7E-04
800	2.3E-06	1.4E-02	9.2E-06	2.3E-02	8.3E-03	2.6E-04
900	2.3E-06	1.3E-02	8.0E-06	2.2E-02	8.5E-03	2.4E-04
1000	2.2E-06	1.1E-02	7.0E-06	2.1E-02	8.6E-03	2.3E-04
2000	1.8E-06	5.1E-03	1.7E-06	1.5E-02	9.6E-03	1.5E-04
4000	1.1E-06	1.7E-03	1.1E-07	1.1E-02	9.5E-03	5.3E-05
6000	8.2E-07	9.6E-04	6.8E-09	9.4E-03	8.4E-03	1.6E-05
8000	6.5E-07	8.0E-04	4.2E-10	8.0E-03	7.2E-03	4.4E-06
10000	5.3E-07	7.6E-04	2.7E-11	6.8E-03	6.0E-03	1.2E-06

Tab. 8/4: Ausscheidungsraten in 1/d und Retentionswerte nach Inhalation von Th-232, Stoffklasse W, AMAD: 0,2 μm, einmalige Zufuhr von 1 Bq, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	3.5E-03	4.1E-01	2.3E-02	6.0E-01	3.2E-02	1.8E-03
2	9.6E-04	3.4E-01	7.9E-02	5.2E-01	3.3E-02	1.9E-03
3	3.3E-04	3.1E-01	7.6E-02	4.5E-01	3.4E-02	1.9E-03
4	1.7E-04	3.0E-01	5.1E-02	4.0E-01	3.4E-02	2.0E-03
5	1.3E-04	2.9E-01	3.1E-02	3.6E-01	3.5E-02	2.0E-03
6	1.2E-04	2.8E-01	1.8E-02	3.5E-01	3.6E-02	2.0E-03
7	1.1E-04	2.8E-01	1.1E-02	3.3E-01	3.6E-02	2.1E-03
8	1.1E-04	2.7E-01	6.9E-03	3.3E-01	3.7E-02	2.1E-03
9	1.1E-04	2.7E-01	4.8E-03	3.2E-01	3.8E-02	2.1E-03
10	1.1E-04	2.6E-01	3.6E-03	3.2E-01	3.8E-02	2.2E-03
20	1.0E-04	2.3E-01	2.2E-03	2.9E-01	4.5E-02	2.5E-03
30	9.7E-05	2.0E-01	1.9E-03	2.7E-01	5.0E-02	2.8E-03
40	9.2E-05	1.8E-01	1.6E-03	2.5E-01	5.6E-02	3.1E-03
50	8.6E-05	1.6E-01	1.4E-03	2.4E-01	6.0E-02	3.3E-03
60	8.2E-05	1.4E-01	1.2E-03	2.2E-01	6.5E-02	3.5E-03
70	7.7E-05	1.2E-01	1.1E-03	2.1E-01	6.8E-02	3.7E-03
80	7.3E-05	1.1E-01	9.4E-04	2.0E-01	7.2E-02	3.9E-03
90	6.9E-05	9.5E-02	8.2E-04	1.9E-01	7.5E-02	4.0E-03
100	6.6E-05	8.4E-02	7.2E-04	1.8E-01	7.8E-02	4.1E-03
200	4.4E-05	2.3E-02	1.8E-04	1.4E-01	9.3E-02	4.6E-03
300	3.4E-05	6.3E-03	4.5E-05	1.3E-01	9.7E-02	4.5E-03
400	3.0E-05	1.7E-03	1.1E-05	1.2E-01	9.8E-02	4.1E-03
500	2.7E-05	4.6E-04	2.8E-06	1.2E-01	9.8E-02	3.8E-03
600	2.5E-05	1.2E-04	7.0E-07	1.1E-01	9.7E-02	3.4E-03
700	2.4E-05	3.3E-05	1.7E-07	1.1E-01	9.6E-02	3.1E-03
800	2.2E-05	8.7E-06	4.4E-08	1.1E-01	9.5E-02	2.8E-03
900	2.1E-05	2.3E-06	1.1E-08	1.1E-01	9.4E-02	2.5E-03
1000	2.0E-05	6.1E-07	2.7E-09	1.1E-01	9.4E-02	2.3E-03
2000	1.2E-05	8.6E-13	2.6E-15	9.0E-02	8.6E-02	8.5E-04
4000	6.8E-06	0.0E+00	0.0E+00	7.3E-02	7.2E-02	1.2E-04
6000	5.3E-06	0.0E+00	0.0E+00	6.1E-02	6.1E-02	1.6E-05
8000	4.4E-06	0.0E+00	0.0E+00	5.1E-02	5.1E-02	2.2E-06
10000	3.7E-06	0.0E+00	0.0E+00	4.3E-02	4.3E-02	3.1E-07

Tab. 8/5: Ausscheidungsraten in 1/d und Retentionswerte nach Inhalation von Th-232, Stoffklasse W, AMAD: 1 μm, einmalige Zufuhr von 1 Bq, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	5.5E-03	2.5E-01	4.4E-02	5.9E-01	5.0E-02	2.9E-03
2	1.4E-03	1.8E-01	1.4E-01	4.5E-01	5.0E-02	2.9E-03
3	4.1E-04	1.6E-01	1.1E-01	3.4E-01	5.1E-02	2.9E-03
4	1.5E-04	1.5E-01	6.5E-02	2.7E-01	5.1E-02	2.9E-03
5	9.0E-05	1.4E-01	3.3E-02	2.4E-01	5.2E-02	2.9E-03
6	7.4E-05	1.4E-01	1.6E-02	2.2E-01	5.2E-02	2.9E-03
7	7.0E-05	1.4E-01	8.1E-03	2.1E-01	5.2E-02	3.0E-03
8	6.8E-05	1.4E-01	4.5E-03	2.1E-01	5.3E-02	3.0E-03
9	6.8E-05	1.3E-01	2.8E-03	2.1E-01	5.3E-02	3.0E-03
10	6.7E-05	1.3E-01	2.0E-03	2.0E-01	5.3E-02	3.0E-03
20	6.4E-05	1.2E-01	1.1E-03	1.9E-01	5.6E-02	3.2E-03
30	6.1E-05	1.0E-01	9.4E-04	1.8E-01	5.9E-02	3.3E-03
40	5.8E-05	9.0E-02	8.2E-04	1.7E-01	6.2E-02	3.4E-03
50	5.5E-05	7.9E-02	7.2E-04	1.6E-01	6.4E-02	3.5E-03
60	5.3E-05	7.0E-02	6.2E-04	1.5E-01	6.6E-02	3.6E-03
70	5.0E-05	6.1E-02	5.4E-04	1.5E-01	6.8E-02	3.7E-03
80	4.8E-05	5.4E-02	4.7E-04	1.4E-01	7.0E-02	3.7E-03
90	4.6E-05	4.8E-02	4.1E-04	1.4E-01	7.1E-02	3.8E-03
100	4.4E-05	4.2E-02	3.6E-04	1.3E-01	7.2E-02	3.8E-03
200	3.3E-05	1.2E-02	8.9E-05	1.1E-01	8.0E-02	3.9E-03
300	2.7E-05	3.1E-03	2.2E-05	1.0E-01	8.2E-02	3.7E-03
400	2.4E-05	8.5E-04	5.6E-06	1.0E-01	8.2E-02	3.4E-03
500	2.2E-05	2.3E-04	1.4E-06	9.7E-02	8.1E-02	3.1E-03
600	2.1E-05	6.1E-05	3.5E-07	9.5E-02	8.1E-02	2.8E-03
700	1.9E-05	1.6E-05	8.7E-08	9.3E-02	8.0E-02	2.5E-03
800	1.8E-05	4.3E-06	2.2E-08	9.1E-02	7.9E-02	2.3E-03
900	1.7E-05	1.1E-06	5.5E-09	8.9E-02	7.9E-02	2.1E-03
1000	1.6E-05	3.0E-07	1.4E-09	8.7E-02	7.8E-02	1.9E-03
2000	9.6E-06	4.3E-13	1.3E-15	7.5E-02	7.2E-02	7.0E-04
4000	5.7E-06	0.0E+00	0.0E+00	6.1E-02	6.0E-02	9.6E-05
6000	4.4E-06	0.0E+00	0.0E+00	5.1E-02	5.1E-02	1.3E-05
8000	3.7E-06	0.0E+00	0.0E+00	4.3E-02	4.3E-02	1.8E-06
10000	3.1E-06	0.0E+00	0.0E+00	3.6E-02	3.6E-02	2.5E-07

Tab. 8/6: Ausscheidungsraten in 1/d und Retentionswerte nach Inhalation von Th-232, Stoffklasse W, AMAD: 10 μm, einmalige Zufuhr von 1 Bq, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	9.8E-03	1.8E-01	9.7E-02	8.9E-01	8.9E-02	5.1E-03
2	2.5E-03	5.9E-02	3.0E-01	5.9E-01	8.9E-02	5.1E-03
3	6.5E-04	3.6E-02	2.3E-01	3.6E-01	8.9E-02	5.1E-03
4	2.0E-04	3.1E-02	1.2E-01	2.3E-01	8.9E-02	5.1E-03
5	8.1E-05	2.9E-02	5.4E-02	1.8E-01	8.9E-02	5.1E-03
6	5.2E-05	2.8E-02	2.2E-02	1.6E-01	8.9E-02	5.1E-03
7	4.5E-05	2.8E-02	9.0E-03	1.5E-01	8.9E-02	5.1E-03
8	4.3E-05	2.7E-02	3.7E-03	1.4E-01	9.0E-02	5.1E-03
9	4.3E-05	2.7E-02	1.6E-03	1.4E-01	9.0E-02	5.1E-03
10	4.3E-05	2.6E-02	7.8E-04	1.4E-01	9.0E-02	5.1E-03
20	4.2E-05	2.3E-02	2.2E-04	1.4E-01	9.0E-02	5.1E-03
30	4.1E-05	2.0E-02	1.9E-04	1.4E-01	9.1E-02	5.0E-03
40	4.0E-05	1.8E-02	1.6E-04	1.3E-01	9.1E-02	5.0E-03
50	3.9E-05	1.6E-02	1.4E-04	1.3E-01	9.2E-02	5.0E-03
60	3.8E-05	1.4E-02	1.2E-04	1.3E-01	9.2E-02	5.0E-03
70	3.8E-05	1.2E-02	1.1E-04	1.3E-01	9.2E-02	5.0E-03
80	3.7E-05	1.1E-02	9.4E-05	1.3E-01	9.2E-02	4.9E-03
90	3.7E-05	9.5E-03	8.2E-05	1.3E-01	9.3E-02	4.9E-03
100	3.6E-05	8.4E-03	7.2E-05	1.3E-01	9.3E-02	4.9E-03
200	3.2E-05	2.3E-03	1.8E-05	1.2E-01	9.4E-02	4.5E-03
300	2.9E-05	6.3E-04	4.5E-06	1.1E-01	9.3E-02	4.1E-03
400	2.7E-05	1.7E-04	1.1E-06	1.1E-01	9.3E-02	3.7E-03
500	2.5E-05	4.6E-05	2.8E-07	1.1E-01	9.2E-02	3.4E-03
600	2.3E-05	1.2E-05	7.0E-08	1.1E-01	9.1E-02	3.1E-03
700	2.2E-05	3.3E-06	1.7E-08	1.0E-01	9.0E-02	2.8E-03
800	2.0E-05	8.7E-07	4.4E-09	1.0E-01	9.0E-02	2.5E-03
900	1.9E-05	2.3E-07	1.1E-09	1.0E-01	8.9E-02	2.3E-03
1000	1.8E-05	6.1E-08	2.7E-10	9.8E-02	8.8E-02	2.1E-03
2000	1.1E-05	8.6E-14	2.6E-16	8.5E-02	8.1E-02	7.6E-04
4000	6.4E-06	0.0E+00	0.0E+00	6.8E-02	6.8E-02	1.1E-04
6000	5.0E-06	0.0E+00	0.0E+00	5.7E-02	5.7E-02	1.5E-05
8000	4.2E-06	0.0E+00	0.0E+00	4.8E-02	4.8E-02	2.0E-06
10000	3.5E-06	0.0E+00	0.0E+00	4.0E-02	4.0E-02	2.8E-07

Tab. 8/7: Retentionswerte in d und Ausscheidungsraten nach Inhalation von Th-232, Stoffklasse Y, AMAD: 0,2 μm, konstante Dauerzufuhr von 1 Bq/d, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	1.0E-04	4.1E-01	3.0E-02	6.0E-01	9.6E-04	5.5E-05
2	1.3E-04	7.6E-01	1.3E-01	1.1E+00	2.0E-03	1.1E-04
3	1.4E-04	1.1E+00	2.1E-01	1.5E+00	3.0E-03	1.7E-04
4	1.5E-04	1.4E+00	2.6E-01	1.9E+00	4.0E-03	2.3E-04
5	1.6E-04	1.7E+00	3.0E-01	2.2E+00	5.1E-03	2.9E-04
6	1.6E-04	2.0E+00	3.1E-01	2.5E+00	6.2E-03	3.5E-04
7	1.6E-04	2.3E+00	3.2E-01	2.8E+00	7.3E-03	4.2E-04
8	1.7E-04	2.6E+00	3.3E-01	3.2E+00	8.5E-03	4.8E-04
9	1.7E-04	2.9E+00	3.3E-01	3.5E+00	9.7E-03	5.5E-04
10	1.8E-04	3.2E+00	3.3E-01	3.8E+00	1.1E-02	6.2E-04
20	2.2E-04	6.1E+00	3.3E-01	6.7E+00	2.4E-02	1.4E-03
30	2.6E-04	9.1E+00	3.4E-01	9.7E+00	4.0E-02	2.3E-03
40	3.0E-04	1.2E+01	3.4E-01	1.3E+01	5.8E-02	3.3E-03
50	3.4E-04	1.5E+01	3.4E-01	1.5E+01	7.9E-02	4.4E-03
60	3.8E-04	1.8E+01	3.4E-01	1.8E+01	1.0E-01	5.7E-03
70	4.3E-04	2.0E+01	3.5E-01	2.1E+01	1.3E-01	7.1E-03
80	4.8E-04	2.3E+01	3.5E-01	2.4E+01	1.6E-01	8.6E-03
90	5.2E-04	2.6E+01	3.5E-01	2.7E+01	1.9E-01	1.0E-02
100	5.7E-04	2.9E+01	3.5E-01	3.0E+01	2.2E-01	1.2E-02
200	1.1E-03	5.4E+01	3.8E-01	5.6E+01	6.9E-01	3.7E-02
300	1.7E-03	7.8E+01	4.0E-01	8.0E+01	1.4E+00	7.3E-02
400	2.4E-03	9.9E+01	4.1E-01	1.0E+02	2.4E+00	1.2E-01
500	3.2E-03	1.2E+02	4.3E-01	1.2E+02	3.6E+00	1.8E-01
600	4.0E-03	1.4E+02	4.4E-01	1.4E+02	5.1E+00	2.4E-01
700	4.8E-03	1.5E+02	4.5E-01	1.6E+02	6.8E+00	3.2E-01
800	5.7E-03	1.7E+02	4.6E-01	1.8E+02	8.7E+00	3.9E-01
900	6.7E-03	1.8E+02	4.7E-01	1.9E+02	1.1E+01	4.8E-01
1000	7.7E-03	1.9E+02	4.8E-01	2.1E+02	1.3E+01	5.7E-01
2000	1.8E-02	2.7E+02	5.2E-01	3.2E+02	4.6E+01	1.6E+00
4000	3.5E-02	3.3E+02	5.3E-01	4.8E+02	1.4E+02	3.0E+00
6000	4.7E-02	3.5E+02	5.3E-01	6.0E+02	2.3E+02	3.6E+00
8000	5.5E-02	3.7E+02	5.3E-01	7.0E+02	3.1E+02	3.7E+00
10000	6.1E-02	3.8E+02	5.3E-01	7.9E+02	3.8E+02	3.8E+00

Tab. 8/8: Retentionswerte in d und Ausscheidungsraten nach Inhalation von Th-232, Stoffklasse Y, AMAD: 1 μm, konstante Dauerzufuhr von 1 Bq/d, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	3.0E-04	2.6E-01	5.4E-02	5.9E-01	2.8E-03	1.6E-04
2	3.8E-04	4.4E-01	2.2E-01	1.0E+00	5.6E-03	3.2E-04
3	4.1E-04	6.0E-01	3.5E-01	1.3E+00	8.4E-03	4.8E-04
4	4.2E-04	7.6E-01	4.2E-01	1.5E+00	1.1E-02	6.4E-04
5	4.2E-04	9.1E-01	4.6E-01	1.7E+00	1.4E-02	8.1E-04
6	4.2E-04	1.1E+00	4.7E-01	1.9E+00	1.7E-02	9.7E-04
7	4.3E-04	1.2E+00	4.8E-01	2.0E+00	2.0E-02	1.1E-03
8	4.3E-04	1.4E+00	4.8E-01	2.2E+00	2.3E-02	1.3E-03
9	4.3E-04	1.5E+00	4.9E-01	2.3E+00	2.6E-02	1.5E-03
10	4.3E-04	1.7E+00	4.9E-01	2.5E+00	2.9E-02	1.6E-03
20	4.6E-04	3.1E+00	4.9E-01	4.0E+00	5.8E-02	3.3E-03
30	4.9E-04	4.6E+00	4.9E-01	5.5E+00	8.9E-02	5.0E-03
40	5.2E-04	6.0E+00	4.9E-01	7.0E+00	1.2E-01	6.8E-03
50	5.5E-04	7.5E+00	4.9E-01	8.5E+00	1.6E-01	8.7E-03
60	5.8E-04	8.9E+00	4.9E-01	9.9E+00	1.9E-01	1.1E-02
70	6.1E-04	1.0E+01	5.0E-01	1.1E+01	2.3E-01	1.3E-02
80	6.4E-04	1.2E+01	5.0E-01	1.3E+01	2.6E-01	1.5E-02
90	6.7E-04	1.3E+01	5.0E-01	1.4E+01	3.0E-01	1.7E-02
100	7.1E-04	1.4E+01	5.0E-01	1.6E+01	3.4E-01	1.9E-02
200	1.0E-03	2.7E+01	5.1E-01	2.9E+01	8.0E-01	4.2E-02
300	1.4E-03	3.9E+01	5.2E-01	4.1E+01	1.4E+00	7.1E-02
400	1.8E-03	4.9E+01	5.3E-01	5.3E+01	2.1E+00	1.0E-01
500	2.3E-03	5.9E+01	5.4E-01	6.3E+01	2.9E+00	1.4E-01
600	2.7E-03	6.8E+01	5.4E-01	7.3E+01	3.9E+00	1.8E-01
700	3.2E-03	7.5E+01	5.5E-01	8.2E+01	5.0E+00	2.2E-01
800	3.7E-03	8.3E+01	5.5E-01	9.1E+01	6.2E+00	2.7E-01
900	4.2E-03	8.9E+01	5.6E-01	9.9E+01	7.5E+00	3.2E-01
1000	4.8E-03	9.5E+01	5.6E-01	1.1E+02	8.9E+00	3.7E-01
2000	1.0E-02	1.3E+02	5.8E-01	1.7E+02	2.7E+01	8.9E-01
4000	1.9E-02	1.6E+02	5.9E-01	2.5E+02	7.7E+01	1.6E+00
6000	2.5E-02	1.8E+02	5.9E-01	3.1E+02	1.3E+02	1.9E+00
8000	3.0E-02	1.8E+02	5.9E-01	3.6E+02	1.7E+02	2.0E+00
10000	3.3E-02	1.9E+02	5.9E-01	4.1E+02	2.1E+02	2.0E+00

Tab. 8/9: Retentionswerte in d und Ausscheidungsraten nach Inhalation von Th-232, Stoffklasse Y, AMAD: 10 μm, konstante Dauerzufuhr von 1 Bq/d, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	7.4E-04	1.9E-01	1.1E-01	8.9E-01	6.8E-03	3.9E-04
2	9.3E-04	2.6E-01	4.6E-01	1.4E+00	1.4E-02	7.7E-04
3	9.8E-04	2.9E-01	7.2E-01	1.7E+00	2.0E-02	1.2E-03
4	1.0E-03	3.3E-01	8.6E-01	1.8E+00	2.7E-02	1.5E-03
5	1.0E-03	3.6E-01	9.2E-01	1.9E+00	3.4E-02	1.9E-03
6	1.0E-03	3.9E-01	9.4E-01	2.0E+00	4.1E-02	2.3E-03
7	1.0E-03	4.2E-01	9.5E-01	2.0E+00	4.7E-02	2.7E-03
8	1.0E-03	4.5E-01	9.6E-01	2.1E+00	5.4E-02	3.1E-03
9	1.0E-03	4.8E-01	9.6E-01	2.1E+00	6.1E-02	3.5E-03
10	1.0E-03	5.1E-01	9.6E-01	2.1E+00	6.8E-02	3.9E-03
20	1.0E-03	8.0E-01	9.6E-01	2.5E+00	1.4E-01	7.7E-03
30	1.1E-03	1.1E+00	9.6E-01	2.9E+00	2.0E-01	1.2E-02
40	1.1E-03	1.4E+00	9.6E-01	3.3E+00	2.7E-01	1.5E-02
50	1.1E-03	1.7E+00	9.6E-01	3.7E+00	3.4E-01	1.9E-02
60	1.2E-03	2.0E+00	9.6E-01	4.0E+00	4.1E-01	2.3E-02
70	1.2E-03	2.2E+00	9.6E-01	4.4E+00	4.8E-01	2.7E-02
80	1.2E-03	2.5E+00	9.6E-01	4.8E+00	5.5E-01	3.0E-02
90	1.2E-03	2.8E+00	9.6E-01	5.1E+00	6.2E-01	3.4E-02
100	1.3E-03	3.1E+00	9.6E-01	5.5E+00	6.9E-01	3.8E-02
200	1.5E-03	5.6E+00	9.7E-01	8.9E+00	1.4E+00	7.3E-02
300	1.8E-03	8.0E+00	9.7E-01	1.2E+01	2.1E+00	1.1E-01
400	2.1E-03	1.0E+01	9.7E-01	1.5E+01	2.9E+00	1.4E-01
500	2.3E-03	1.2E+01	9.7E-01	1.8E+01	3.6E+00	1.7E-01
600	2.6E-03	1.4E+01	9.7E-01	2.1E+01	4.4E+00	2.0E-01
700	2.8E-03	1.5E+01	9.7E-01	2.3E+01	5.2E+00	2.2E-01
800	3.0E-03	1.7E+01	9.7E-01	2.6E+01	6.0E+00	2.5E-01
900	3.3E-03	1.8E+01	9.7E-01	2.8E+01	6.9E+00	2.8E-01
1000	3.5E-03	1.9E+01	9.8E-01	3.0E+01	7.7E+00	3.0E-01
2000	5.5E-03	2.7E+01	9.8E-01	4.8E+01	1.7E+01	4.9E-01
4000	8.3E-03	3.3E+01	9.8E-01	7.4E+01	3.6E+01	6.8E-01
6000	1.0E-02	3.5E+01	9.8E-01	9.5E+01	5.4E+01	7.4E-01
8000	1.2E-02	3.7E+01	9.8E-01	1.1E+02	7.0E+01	7.6E-01
10000	1.3E-02	3.9E+01	9.8E-01	1.3E+02	8.3E+01	7.6E-01

Tab. 8/10: Retentionswerte in d und Ausscheidungsraten nach Inhalation von Th-232, Stoffklasse W, AMAD: 0,2 μm, konstante Dauerzufuhr von 1 Bq/d, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	3.5E-03	4.1E-01	2.3E-02	6.0E-01	3.2E-02	1.8E-03
2	4.5E-03	7.5E-01	1.0E-01	1.1E+00	6.5E-02	3.7E-03
3	4.8E-03	1.1E+00	1.8E-01	1.6E+00	9.9E-02	5.6E-03
4	5.0E-03	1.4E+00	2.3E-01	2.0E+00	1.3E-01	7.6E-03
5	5.1E-03	1.6E+00	2.6E-01	2.3E+00	1.7E-01	9.6E-03
6	5.2E-03	1.9E+00	2.8E-01	2.7E+00	2.0E-01	1.2E-02
7	5.3E-03	2.2E+00	2.9E-01	3.0E+00	2.4E-01	1.4E-02
8	5.4E-03	2.5E+00	3.0E-01	3.3E+00	2.8E-01	1.6E-02
9	5.5E-03	2.7E+00	3.0E-01	3.7E+00	3.2E-01	1.8E-02
10	5.7E-03	3.0E+00	3.1E-01	4.0E+00	3.5E-01	2.0E-02
20	6.7E-03	5.5E+00	3.3E-01	7.0E+00	7.7E-01	4.4E-02
30	7.7E-03	7.6E+00	3.5E-01	9.8E+00	1.3E+00	7.1E-02
40	8.7E-03	9.6E+00	3.7E-01	1.2E+01	1.8E+00	1.0E-01
50	9.5E-03	1.1E+01	3.8E-01	1.5E+01	2.4E+00	1.3E-01
60	1.0E-02	1.3E+01	4.0E-01	1.7E+01	3.0E+00	1.7E-01
70	1.1E-02	1.4E+01	4.1E-01	1.9E+01	3.7E+00	2.0E-01
80	1.2E-02	1.5E+01	4.2E-01	2.1E+01	4.4E+00	2.4E-01
90	1.3E-02	1.6E+01	4.3E-01	2.3E+01	5.1E+00	2.8E-01
100	1.3E-02	1.7E+01	4.3E-01	2.5E+01	5.9E+00	3.2E-01
200	1.9E-02	2.2E+01	4.7E-01	4.1E+01	1.5E+01	7.7E-01
300	2.2E-02	2.3E+01	4.8E-01	5.4E+01	2.4E+01	1.2E+00
400	2.6E-02	2.3E+01	4.8E-01	6.6E+01	3.4E+01	1.7E+00
500	2.9E-02	2.3E+01	4.8E-01	7.8E+01	4.4E+01	2.1E+00
600	3.1E-02	2.3E+01	4.8E-01	9.0E+01	5.3E+01	2.4E+00
700	3.4E-02	2.3E+01	4.8E-01	1.0E+02	6.3E+01	2.7E+00
800	3.6E-02	2.3E+01	4.8E-01	1.1E+02	7.3E+01	3.0E+00
900	3.8E-02	2.3E+01	4.8E-01	1.2E+02	8.2E+01	3.3E+00
1000	4.0E-02	2.3E+01	4.8E-01	1.3E+02	9.1E+01	3.5E+00
2000	5.5E-02	2.3E+01	4.8E-01	2.3E+02	1.8E+02	5.0E+00
4000	7.2E-02	2.3E+01	4.8E-01	3.9E+02	3.4E+02	5.7E+00
6000	8.4E-02	2.3E+01	4.8E-01	5.3E+02	4.7E+02	5.8E+00
8000	9.4E-02	2.3E+01	4.8E-01	6.4E+02	5.8E+02	5.9E+00
10000	1.0E-01	2.3E+01	4.8E-01	7.3E+02	6.8E+02	5.9E+00

Tab. 8/11: Retentionswerte in d und Ausscheidungsraten nach Inhalation von Th-232, Stoffklasse W, AMAD: 1 μm, konstante Dauerzufuhr von 1 Bq/d, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	5.5E-03	2.5E-01	4.4E-02	5.9E-01	5.0E-02	2.9E-03
2	6.9E-03	4.3E-01	1.8E-01	1.0E+00	1.0E-01	5.7E-03
3	7.3E-03	5.9E-01	3.0E-01	1.4E+00	1.5E-01	8.6E-03
4	7.5E-03	7.4E-01	3.6E-01	1.6E+00	2.0E-01	1.2E-02
5	7.6E-03	8.8E-01	4.0E-01	1.9E+00	2.5E-01	1.4E-02
6	7.6E-03	1.0E+00	4.1E-01	2.1E+00	3.1E-01	1.7E-02
7	7.7E-03	1.2E+00	4.2E-01	2.3E+00	3.6E-01	2.0E-02
8	7.8E-03	1.3E+00	4.2E-01	2.5E+00	4.1E-01	2.3E-02
9	7.8E-03	1.4E+00	4.3E-01	2.7E+00	4.6E-01	2.6E-02
10	7.9E-03	1.6E+00	4.3E-01	2.9E+00	5.2E-01	2.9E-02
20	8.6E-03	2.8E+00	4.4E-01	4.9E+00	1.1E+00	6.0E-02
30	9.2E-03	3.9E+00	4.5E-01	6.7E+00	1.6E+00	9.3E-02
40	9.8E-03	4.8E+00	4.6E-01	8.5E+00	2.3E+00	1.3E-01
50	1.0E-02	5.7E+00	4.7E-01	1.0E+01	2.9E+00	1.6E-01
60	1.1E-02	6.4E+00	4.7E-01	1.2E+01	3.5E+00	2.0E-01
70	1.1E-02	7.1E+00	4.8E-01	1.3E+01	4.2E+00	2.3E-01
80	1.2E-02	7.6E+00	4.9E-01	1.5E+01	4.9E+00	2.7E-01
90	1.2E-02	8.1E+00	4.9E-01	1.6E+01	5.6E+00	3.1E-01
100	1.3E-02	8.6E+00	4.9E-01	1.7E+01	6.3E+00	3.5E-01
200	1.7E-02	1.1E+01	5.1E-01	2.9E+01	1.4E+01	7.4E-01
300	2.0E-02	1.2E+01	5.2E-01	4.0E+01	2.2E+01	1.1E+00
400	2.2E-02	1.2E+01	5.2E-01	5.0E+01	3.0E+01	1.5E+00
500	2.4E-02	1.2E+01	5.2E-01	6.0E+01	3.8E+01	1.8E+00
600	2.7E-02	1.2E+01	5.2E-01	7.0E+01	4.7E+01	2.1E+00
700	2.9E-02	1.2E+01	5.2E-01	7.9E+01	5.5E+01	2.3E+00
800	3.0E-02	1.2E+01	5.2E-01	8.8E+01	6.3E+01	2.6E+00
900	3.2E-02	1.2E+01	5.2E-01	9.7E+01	7.0E+01	2.8E+00
1000	3.4E-02	1.2E+01	5.2E-01	1.1E+02	7.8E+01	3.0E+00
2000	4.6E-02	1.2E+01	5.2E-01	1.9E+02	1.5E+02	4.2E+00
4000	6.1E-02	1.2E+01	5.2E-01	3.2E+02	2.8E+02	4.8E+00
6000	7.1E-02	1.2E+01	5.2E-01	4.3E+02	3.9E+02	4.9E+00
8000	7.9E-02	1.2E+01	5.2E-01	5.2E+02	4.9E+02	4.9E+00
10000	8.5E-02	1.2E+01	5.2E-01	6.0E+02	5.7E+02	4.9E+00

Tab. 8/12: Retentionswerte in d und Ausscheidungsraten nach Inhalation von Th-232, Stoffklasse W, AMAD: 10 μm, konstante Dauerzufuhr von 1 Bq/d, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	9.8E-03	1.8E-01	9.7E-02	8.9E-01	8.9E-02	5.1E-03
2	1.2E-02	2.4E-01	4.0E-01	1.5E+00	1.8E-01	1.0E-02
3	1.3E-02	2.7E-01	6.3E-01	1.8E+00	2.7E-01	1.5E-02
4	1.3E-02	3.0E-01	7.5E-01	2.1E+00	3.6E-01	2.0E-02
5	1.3E-02	3.3E-01	8.1E-01	2.3E+00	4.5E-01	2.5E-02
6	1.3E-02	3.6E-01	8.3E-01	2.4E+00	5.4E-01	3.0E-02
7	1.3E-02	3.9E-01	8.4E-01	2.6E+00	6.2E-01	3.6E-02
8	1.3E-02	4.2E-01	8.4E-01	2.7E+00	7.1E-01	4.1E-02
9	1.3E-02	4.4E-01	8.4E-01	2.8E+00	8.0E-01	4.6E-02
10	1.3E-02	4.7E-01	8.4E-01	3.0E+00	8.9E-01	5.1E-02
20	1.4E-02	7.2E-01	8.5E-01	4.4E+00	1.8E+00	1.0E-01
30	1.4E-02	9.3E-01	8.5E-01	5.8E+00	2.7E+00	1.5E-01
40	1.5E-02	1.1E+00	8.5E-01	7.1E+00	3.6E+00	2.0E-01
50	1.5E-02	1.3E+00	8.5E-01	8.5E+00	4.5E+00	2.5E-01
60	1.5E-02	1.4E+00	8.5E-01	9.8E+00	5.4E+00	3.0E-01
70	1.6E-02	1.6E+00	8.6E-01	1.1E+01	6.4E+00	3.5E-01
80	1.6E-02	1.7E+00	8.6E-01	1.2E+01	7.3E+00	4.0E-01
90	1.7E-02	1.8E+00	8.6E-01	1.4E+01	8.2E+00	4.5E-01
100	1.7E-02	1.9E+00	8.6E-01	1.5E+01	9.1E+00	5.0E-01
200	2.0E-02	2.3E+00	8.6E-01	2.7E+01	1.8E+01	9.7E-01
300	2.3E-02	2.5E+00	8.6E-01	3.9E+01	2.8E+01	1.4E+00
400	2.6E-02	2.5E+00	8.6E-01	5.0E+01	3.7E+01	1.8E+00
500	2.9E-02	2.5E+00	8.6E-01	6.1E+01	4.6E+01	2.1E+00
600	3.1E-02	2.5E+00	8.6E-01	7.2E+01	5.6E+01	2.5E+00
700	3.3E-02	2.5E+00	8.6E-01	8.2E+01	6.5E+01	2.7E+00
800	3.5E-02	2.5E+00	8.6E-01	9.3E+01	7.4E+01	3.0E+00
900	3.7E-02	2.5E+00	8.6E-01	1.0E+02	8.3E+01	3.3E+00
1000	3.9E-02	2.5E+00	8.6E-01	1.1E+02	9.1E+01	3.5E+00
2000	5.3E-02	2.5E+00	8.6E-01	2.0E+02	1.8E+02	4.8E+00
4000	6.9E-02	2.5E+00	8.6E-01	3.6E+02	3.2E+02	5.4E+00
6000	8.0E-02	2.5E+00	8.6E-01	4.8E+02	4.5E+02	5.5E+00
8000	8.9E-02	2.5E+00	8.6E-01	5.9E+02	5.5E+02	5.5E+00
10000	9.7E-02	2.5E+00	8.6E-01	6.7E+02	6.4E+02	5.5E+00

Tab. 8/13: Ausscheidungsraten in 1/d und Retentionswerte nach Ingestion von Th-232, Stoffklasse Y, einmalige Zufuhr von 1 Bq, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	1.3E-05	0.0E+00	2.8E-01	7.2E-01	1.4E-04	8.0E-06
2	5.2E-06	0.0E+00	3.9E-01	3.3E-01	1.4E-04	8.0E-06
3	1.3E-06	0.0E+00	2.0E-01	1.3E-01	1.4E-04	8.0E-06
4	3.7E-07	0.0E+00	8.2E-02	5.0E-02	1.4E-04	8.0E-06
5	1.3E-07	0.0E+00	3.1E-02	1.9E-02	1.4E-04	8.0E-06
6	7.1E-08	0.0E+00	1.2E-02	7.1E-03	1.4E-04	8.0E-06
7	5.6E-08	0.0E+00	4.4E-03	2.7E-03	1.4E-04	7.9E-06
8	5.3E-08	0.0E+00	1.6E-03	1.1E-03	1.4E-04	7.9E-06
9	5.2E-08	0.0E+00	6.0E-04	5.3E-04	1.4E-04	7.9E-06
10	5.1E-08	0.0E+00	2.2E-04	3.1E-04	1.4E-04	7.9E-06
20	5.1E-08	0.0E+00	1.0E-08	1.8E-04	1.4E-04	7.8E-06
30	5.1E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.8E-04	1.4E-04	7.8E-06
40	5.0E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.8E-04	1.4E-04	7.7E-06
50	5.0E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.8E-04	1.4E-04	7.6E-06
60	4.9E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.8E-04	1.4E-04	7.5E-06
70	4.9E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.8E-04	1.4E-04	7.5E-06
80	4.9E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.8E-04	1.4E-04	7.4E-06
90	4.8E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.8E-04	1.4E-04	7.3E-06
100	4.8E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.8E-04	1.4E-04	7.2E-06
200	4.4E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.7E-04	1.4E-04	6.6E-06
300	4.1E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.7E-04	1.4E-04	5.9E-06
400	3.8E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.6E-04	1.4E-04	5.4E-06
500	3.6E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.6E-04	1.3E-04	4.9E-06
600	3.3E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.5E-04	1.3E-04	4.4E-06
700	3.1E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.5E-04	1.3E-04	4.0E-06
800	2.9E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.5E-04	1.3E-04	3.6E-06
900	2.7E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.5E-04	1.3E-04	3.3E-06
1000	2.6E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.4E-04	1.3E-04	3.0E-06
2000	1.6E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.2E-04	1.2E-04	1.1E-06
4000	9.3E-09	0.0E+00	0.0E+00	1.0E-04	9.9E-05	1.5E-07
6000	7.3E-09	0.0E+00	0.0E+00	8.3E-05	8.3E-05	2.1E-08
8000	6.1E-09	0.0E+00	0.0E+00	7.0E-05	7.0E-05	2.9E-09
10000	5.1E-09	0.0E+00	0.0E+00	5.9E-05	5.9E-05	4.0E-10

Tab. 8/14: Ausscheidungsraten in 1/d und Retentionswerte nach Ingestion von Th-232, Stoffklasse W, einmalige Zufuhr von 1 Bq, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	1.3E-05	0.0E+00	2.8E-01	7.2E-01	1.4E-04	8.0E-06
2	5.2E-06	0.0E+00	3.9E-01	3.3E-01	1.4E-04	8.0E-06
3	1.3E-06	0.0E+00	2.0E-01	1.3E-01	1.4E-04	8.0E-06
4	3.7E-07	0.0E+00	8.2E-02	5.0E-02	1.4E-04	8.0E-06
5	1.3E-07	0.0E+00	3.1E-02	1.9E-02	1.4E-04	8.0E-06
6	7.1E-08	0.0E+00	1.2E-02	7.1E-03	1.4E-04	8.0E-06
7	5.6E-08	0.0E+00	4.4E-03	2.7E-03	1.4E-04	7.9E-06
8	5.3E-08	0.0E+00	1.6E-03	1.1E-03	1.4E-04	7.9E-06
9	5.2E-08	0.0E+00	6.0E-04	5.3E-04	1.4E-04	7.9E-06
10	5.1E-08	0.0E+00	2.2E-04	3.1E-04	1.4E-04	7.9E-06
20	5.1E-08	0.0E+00	1.0E-08	1.8E-04	1.4E-04	7.8E-06
30	5.1E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.8E-04	1.4E-04	7.8E-06
40	5.0E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.8E-04	1.4E-04	7.7E-06
50	5.0E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.8E-04	1.4E-04	7.6E-06
60	4.9E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.8E-04	1.4E-04	7.5E-06
70	4.9E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.8E-04	1.4E-04	7.5E-06
80	4.9E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.8E-04	1.4E-04	7.4E-06
90	4.8E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.8E-04	1.4E-04	7.3E-06
100	4.8E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.8E-04	1.4E-04	7.2E-06
200	4.4E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.7E-04	1.4E-04	6.6E-06
300	4.1E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.7E-04	1.4E-04	5.9E-06
400	3.8E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.6E-04	1.4E-04	5.4E-06
500	3.6E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.6E-04	1.3E-04	4.9E-06
600	3.3E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.5E-04	1.3E-04	4.4E-06
700	3.1E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.5E-04	1.3E-04	4.0E-06
800	2.9E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.5E-04	1.3E-04	3.6E-06
900	2.7E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.5E-04	1.3E-04	3.3E-06
1000	2.6E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.4E-04	1.3E-04	3.0E-06
2000	1.6E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.2E-04	1.2E-04	1.1E-06
4000	9.3E-09	0.0E+00	0.0E+00	1.0E-04	9.9E-05	1.5E-07
6000	7.3E-09	0.0E+00	0.0E+00	8.3E-05	8.3E-05	2.1E-08
8000	6.1E-09	0.0E+00	0.0E+00	7.0E-05	7.0E-05	2.9E-09
10000	5.1E-09	0.0E+00	0.0E+00	5.9E-05	5.9E-05	4.0E-10

Tab. 8/15: Ausscheidungsraten in 1/d und Retentionswerte nach direkter Aufnahme von Th-232 ins Blut, Stoffklasse Y, einmalige Zufuhr von 1 Bq, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	7.7E-02	0.0E+00	0.0E+00	9.2E-01	7.0E-01	4.0E-02
2	1.9E-02	0.0E+00	0.0E+00	9.1E-01	7.0E-01	4.0E-02
3	4.9E-03	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-01	7.0E-01	4.0E-02
4	1.4E-03	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-01	7.0E-01	4.0E-02
5	5.4E-04	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-01	7.0E-01	4.0E-02
6	3.3E-04	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-01	7.0E-01	4.0E-02
7	2.7E-04	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-01	7.0E-01	4.0E-02
8	2.6E-04	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-01	7.0E-01	4.0E-02
9	2.6E-04	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-01	7.0E-01	4.0E-02
10	2.6E-04	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-01	7.0E-01	4.0E-02
20	2.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.9E-01	7.0E-01	3.9E-02
30	2.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.9E-01	7.0E-01	3.9E-02
40	2.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.9E-01	7.0E-01	3.8E-02
50	2.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.9E-01	7.0E-01	3.8E-02
60	2.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.8E-01	7.0E-01	3.8E-02
70	2.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.8E-01	7.0E-01	3.7E-02
80	2.4E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.8E-01	7.0E-01	3.7E-02
90	2.4E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.8E-01	6.9E-01	3.7E-02
100	2.4E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.8E-01	6.9E-01	3.6E-02
200	2.2E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.5E-01	6.9E-01	3.3E-02
300	2.1E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.3E-01	6.8E-01	3.0E-02
400	1.9E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.1E-01	6.8E-01	2.7E-02
500	1.8E-04	0.0E+00	0.0E+00	7.9E-01	6.7E-01	2.4E-02
600	1.7E-04	0.0E+00	0.0E+00	7.7E-01	6.6E-01	2.2E-02
700	1.6E-04	0.0E+00	0.0E+00	7.6E-01	6.6E-01	2.0E-02
800	1.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	7.4E-01	6.5E-01	1.8E-02
900	1.4E-04	0.0E+00	0.0E+00	7.3E-01	6.5E-01	1.6E-02
1000	1.3E-04	0.0E+00	0.0E+00	7.2E-01	6.4E-01	1.5E-02
2000	7.8E-05	0.0E+00	0.0E+00	6.2E-01	5.9E-01	5.5E-03
4000	4.7E-05	0.0E+00	0.0E+00	5.0E-01	4.9E-01	7.6E-04
6000	3.7E-05	0.0E+00	0.0E+00	4.2E-01	4.2E-01	1.1E-04
8000	3.0E-05	0.0E+00	0.0E+00	3.5E-01	3.5E-01	1.5E-05
10000	2.6E-05	0.0E+00	0.0E+00	2.9E-01	2.9E-01	2.0E-06

Tab. 8/16: Ausscheidungsraten in 1/d und Retentionswerte nach direkter Aufnahme von Th-232 ins Blut, Stoffklasse W, einmalige Zufuhr von 1 Bq, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	7.7E-02	0.0E+00	0.0E+00	9.2E-01	7.0E-01	4.0E-02
2	1.9E-02	0.0E+00	0.0E+00	9.1E-01	7.0E-01	4.0E-02
3	4.9E-03	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-01	7.0E-01	4.0E-02
4	1.4E-03	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-01	7.0E-01	4.0E-02
5	5.4E-04	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-01	7.0E-01	4.0E-02
6	3.3E-04	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-01	7.0E-01	4.0E-02
7	2.7E-04	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-01	7.0E-01	4.0E-02
8	2.6E-04	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-01	7.0E-01	4.0E-02
9	2.6E-04	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-01	7.0E-01	4.0E-02
10	2.6E-04	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-01	7.0E-01	4.0E-02
20	2.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.9E-01	7.0E-01	3.9E-02
30	2.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.9E-01	7.0E-01	3.9E-02
40	2.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.9E-01	7.0E-01	3.8E-02
50	2.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.9E-01	7.0E-01	3.8E-02
60	2.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.8E-01	7.0E-01	3.8E-02
70	2.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.8E-01	7.0E-01	3.7E-02
80	2.4E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.8E-01	7.0E-01	3.7E-02
90	2.4E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.8E-01	6.9E-01	3.7E-02
100	2.4E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.8E-01	6.9E-01	3.6E-02
200	2.2E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.5E-01	6.9E-01	3.3E-02
300	2.1E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.3E-01	6.8E-01	3.0E-02
400	1.9E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.1E-01	6.8E-01	2.7E-02
500	1.8E-04	0.0E+00	0.0E+00	7.9E-01	6.7E-01	2.4E-02
600	1.7E-04	0.0E+00	0.0E+00	7.7E-01	6.6E-01	2.2E-02
700	1.6E-04	0.0E+00	0.0E+00	7.6E-01	6.6E-01	2.0E-02
800	1.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	7.4E-01	6.5E-01	1.8E-02
900	1.4E-04	0.0E+00	0.0E+00	7.3E-01	6.5E-01	1.6E-02
1000	1.3E-04	0.0E+00	0.0E+00	7.2E-01	6.4E-01	1.5E-02
2000	7.8E-05	0.0E+00	0.0E+00	6.2E-01	5.9E-01	5.5E-03
4000	4.7E-05	0.0E+00	0.0E+00	5.0E-01	4.9E-01	7.6E-04
6000	3.7E-05	0.0E+00	0.0E+00	4.2E-01	4.2E-01	1.1E-04
8000	3.0E-05	0.0E+00	0.0E+00	3.5E-01	3.5E-01	1.5E-05
10000	2.6E-05	0.0E+00	0.0E+00	2.9E-01	2.9E-01	2.0E-06

Tab. 8/17: Ausscheidungsraten in 1/d und Retentionswerte nach Inhalation von Th-228, Stoffklasse Y, AMAD: 0,2 μm, einmalige Zufuhr von 1 Bq, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	9.4E-05	4.1E-01	3.0E-02	6.0E-01	9.6E-04	5.5E-05
2	3.4E-05	3.5E-01	9.5E-02	5.0E-01	9.9E-04	5.7E-05
3	1.4E-05	3.2E-01	8.4E-02	4.2E-01	1.0E-03	5.8E-05
4	7.3E-06	3.1E-01	5.4E-02	3.6E-01	1.0E-03	6.0E-05
5	5.1E-06	3.0E-01	3.1E-02	3.3E-01	1.1E-03	6.1E-05
6	4.3E-06	3.0E-01	1.7E-02	3.2E-01	1.1E-03	6.2E-05
7	4.0E-06	3.0E-01	8.8E-03	3.1E-01	1.1E-03	6.3E-05
8	3.9E-06	3.0E-01	4.7E-03	3.0E-01	1.1E-03	6.5E-05
9	3.9E-06	2.9E-01	2.5E-03	3.0E-01	1.2E-03	6.6E-05
10	3.9E-06	2.9E-01	1.4E-03	3.0E-01	1.2E-03	6.7E-05
20	3.9E-06	2.9E-01	2.7E-04	2.9E-01	1.4E-03	8.0E-05
30	4.0E-06	2.8E-01	2.6E-04	2.8E-01	1.6E-03	9.2E-05
40	4.1E-06	2.8E-01	2.5E-04	2.8E-01	1.9E-03	1.0E-04
50	4.1E-06	2.7E-01	2.5E-04	2.7E-01	2.1E-03	1.1E-04
60	4.2E-06	2.7E-01	2.4E-04	2.7E-01	2.3E-03	1.3E-04
70	4.2E-06	2.6E-01	2.4E-04	2.6E-01	2.5E-03	1.4E-04
80	4.3E-06	2.5E-01	2.3E-04	2.6E-01	2.7E-03	1.5E-04
90	4.3E-06	2.5E-01	2.2E-04	2.5E-01	2.9E-03	1.6E-04
100	4.4E-06	2.4E-01	2.2E-04	2.5E-01	3.1E-03	1.7E-04
200	4.7E-06	2.0E-01	1.7E-04	2.1E-01	4.9E-03	2.5E-04
300	4.8E-06	1.6E-01	1.4E-04	1.7E-01	6.3E-03	3.1E-04
400	4.9E-06	1.3E-01	1.1E-04	1.4E-01	7.4E-03	3.5E-04
500	4.8E-06	1.1E-01	8.4E-05	1.2E-01	8.2E-03	3.7E-04
600	4.6E-06	9.1E-02	6.7E-05	1.0E-01	8.7E-03	3.8E-04
700	4.4E-06	7.5E-02	5.2E-05	8.6E-02	9.1E-03	3.8E-04
800	4.2E-06	6.2E-02	4.1E-05	7.3E-02	9.2E-03	3.7E-04
900	3.9E-06	5.1E-02	3.3E-05	6.2E-02	9.2E-03	3.6E-04
1000	3.6E-06	4.2E-02	2.6E-05	5.3E-02	9.1E-03	3.4E-04
2000	1.4E-06	6.9E-03	2.4E-06	1.3E-02	5.4E-03	1.3E-04
4000	1.3E-07	3.0E-04	2.0E-08	1.2E-03	8.8E-04	8.4E-06
6000	1.2E-08	2.4E-05	1.7E-10	1.4E-04	1.1E-04	3.7E-07
8000	1.2E-09	2.7E-06	1.4E-12	1.6E-05	1.3E-05	1.4E-08
10000	1.3E-10	3.5E-07	1.2E-14	1.8E-06	1.5E-06	5.2E-10

Tab. 8/18: Ausscheidungsraten in 1/d und Retentionswerte nach Inhalation von Th-228, Stoffklasse Y, AMAD: 1 μm, einmalige Zufuhr von 1 Bq, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	2.8E-04	2.6E-01	5.4E-02	5.9E-01	2.8E-03	1.6E-04
2	9.2E-05	1.8E-01	1.6E-01	4.2E-01	2.8E-03	1.6E-04
3	3.1E-05	1.6E-01	1.3E-01	2.9E-01	2.8E-03	1.6E-04
4	1.2E-05	1.6E-01	7.2E-02	2.2E-01	2.8E-03	1.6E-04
5	5.8E-06	1.5E-01	3.5E-02	1.8E-01	2.8E-03	1.6E-04
6	3.7E-06	1.5E-01	1.6E-02	1.7E-01	2.9E-03	1.6E-04
7	3.1E-06	1.5E-01	7.4E-03	1.6E-01	2.9E-03	1.6E-04
8	2.9E-06	1.5E-01	3.5E-03	1.5E-01	2.9E-03	1.6E-04
9	2.8E-06	1.5E-01	1.7E-03	1.5E-01	2.9E-03	1.6E-04
10	2.8E-06	1.5E-01	8.6E-04	1.5E-01	2.9E-03	1.6E-04
20	2.8E-06	1.4E-01	1.3E-04	1.5E-01	3.0E-03	1.7E-04
30	2.8E-06	1.4E-01	1.3E-04	1.5E-01	3.1E-03	1.7E-04
40	2.8E-06	1.4E-01	1.3E-04	1.4E-01	3.1E-03	1.7E-04
50	2.8E-06	1.4E-01	1.2E-04	1.4E-01	3.2E-03	1.8E-04
60	2.9E-06	1.3E-01	1.2E-04	1.4E-01	3.3E-03	1.8E-04
70	2.9E-06	1.3E-01	1.2E-04	1.3E-01	3.4E-03	1.8E-04
80	2.9E-06	1.3E-01	1.1E-04	1.3E-01	3.5E-03	1.9E-04
90	2.9E-06	1.2E-01	1.1E-04	1.3E-01	3.6E-03	1.9E-04
100	2.9E-06	1.2E-01	1.1E-04	1.3E-01	3.6E-03	1.9E-04
200	2.9E-06	1.0E-01	8.6E-05	1.1E-01	4.3E-03	2.1E-04
300	2.9E-06	8.2E-02	6.8E-05	8.8E-02	4.8E-03	2.3E-04
400	2.9E-06	6.7E-02	5.4E-05	7.4E-02	5.2E-03	2.3E-04
500	2.7E-06	5.5E-02	4.2E-05	6.2E-02	5.4E-03	2.3E-04
600	2.6E-06	4.5E-02	3.3E-05	5.2E-02	5.6E-03	2.3E-04
700	2.5E-06	3.7E-02	2.6E-05	4.4E-02	5.6E-03	2.2E-04
800	2.3E-06	3.1E-02	2.1E-05	3.7E-02	5.6E-03	2.1E-04
900	2.1E-06	2.5E-02	1.6E-05	3.2E-02	5.5E-03	2.0E-04
1000	2.0E-06	2.1E-02	1.3E-05	2.7E-02	5.3E-03	1.9E-04
2000	7.3E-07	3.5E-03	1.2E-06	6.8E-03	3.0E-03	6.8E-05
4000	6.7E-08	1.5E-04	1.0E-08	6.5E-04	4.7E-04	4.3E-06
6000	6.2E-09	1.2E-05	8.5E-11	7.2E-05	5.9E-05	1.9E-07
8000	6.4E-10	1.4E-06	7.2E-13	8.3E-06	6.9E-06	7.2E-09
10000	7.0E-11	1.8E-07	6.1E-15	9.7E-07	7.9E-07	2.6E-10

Tab. 8/19: Ausscheidungsraten in 1/d und Retentionswerte nach Inhalation von Th-228, Stoffklasse Y, AMAD: 10 μm, einmalige Zufuhr von 1 Bq, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	6.7E-04	1.9E-01	1.1E-01	8.9E-01	6.7E-03	3.9E-04
2	2.2E-04	6.2E-02	3.4E-01	5.4E-01	6.8E-03	3.9E-04
3	7.2E-05	3.7E-02	2.7E-01	2.8E-01	6.8E-03	3.9E-04
4	2.5E-05	3.2E-02	1.4E-01	1.4E-01	6.8E-03	3.9E-04
5	9.8E-06	3.0E-02	6.0E-02	7.9E-02	6.8E-03	3.8E-04
6	5.0E-06	3.0E-02	2.5E-02	5.4E-02	6.8E-03	3.8E-04
7	3.5E-06	3.0E-02	9.7E-03	4.4E-02	6.8E-03	3.8E-04
8	3.0E-06	3.0E-02	3.8E-03	4.1E-02	6.7E-03	3.8E-04
9	2.9E-06	2.9E-02	1.5E-03	3.9E-02	6.7E-03	3.8E-04
10	2.8E-06	2.9E-02	6.0E-04	3.8E-02	6.7E-03	3.8E-04
20	2.8E-06	2.9E-02	2.7E-05	3.7E-02	6.7E-03	3.8E-04
30	2.7E-06	2.8E-02	2.6E-05	3.7E-02	6.6E-03	3.7E-04
40	2.7E-06	2.8E-02	2.5E-05	3.6E-02	6.6E-03	3.6E-04
50	2.7E-06	2.7E-02	2.5E-05	3.5E-02	6.5E-03	3.6E-04
60	2.6E-06	2.7E-02	2.4E-05	3.5E-02	6.5E-03	3.5E-04
70	2.6E-06	2.6E-02	2.4E-05	3.4E-02	6.4E-03	3.5E-04
80	2.6E-06	2.5E-02	2.3E-05	3.4E-02	6.4E-03	3.4E-04
90	2.5E-06	2.5E-02	2.2E-05	3.3E-02	6.4E-03	3.4E-04
100	2.5E-06	2.4E-02	2.2E-05	3.2E-02	6.3E-03	3.3E-04
200	2.2E-06	2.0E-02	1.7E-05	2.7E-02	5.9E-03	2.8E-04
300	1.9E-06	1.6E-02	1.4E-05	2.3E-02	5.5E-03	2.4E-04
400	1.7E-06	1.3E-02	1.1E-05	2.0E-02	5.1E-03	2.1E-04
500	1.5E-06	1.1E-02	8.4E-06	1.7E-02	4.7E-03	1.8E-04
600	1.3E-06	9.1E-03	6.7E-06	1.4E-02	4.4E-03	1.5E-04
700	1.2E-06	7.5E-03	5.2E-06	1.2E-02	4.0E-03	1.3E-04
800	1.0E-06	6.2E-03	4.1E-06	1.0E-02	3.7E-03	1.1E-04
900	9.3E-07	5.1E-03	3.3E-06	9.0E-03	3.4E-03	9.9E-05
1000	8.2E-07	4.2E-03	2.6E-06	7.8E-03	3.2E-03	8.6E-05
2000	2.4E-07	6.9E-04	2.4E-07	2.1E-03	1.3E-03	2.0E-05
4000	2.1E-08	3.0E-05	2.0E-09	2.1E-04	1.8E-04	9.8E-07
6000	2.1E-09	2.4E-06	1.7E-11	2.4E-05	2.1E-05	4.0E-08
8000	2.2E-10	2.7E-07	1.4E-13	2.7E-06	2.4E-06	1.5E-09
10000	2.4E-11	3.5E-08	1.2E-15	3.1E-07	2.8E-07	5.3E-11

Tab. 8/20: Ausscheidungsraten in 1/d und Retentionswerte nach Inhalation von Th-228, Stoffklasse W, AMAD: 0,2 μm, einmalige Zufuhr von 1 Bq, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	3.5E-03	4.1E-01	2.3E-02	6.0E-01	3.2E-02	1.8E-03
2	9.6E-04	3.4E-01	7.9E-02	5.2E-01	3.3E-02	1.9E-03
3	3.3E-04	3.1E-01	7.5E-02	4.5E-01	3.4E-02	1.9E-03
4	1.7E-04	3.0E-01	5.1E-02	3.9E-01	3.4E-02	2.0E-03
5	1.3E-04	2.9E-01	3.1E-02	3.6E-01	3.5E-02	2.0E-03
6	1.2E-04	2.8E-01	1.8E-02	3.4E-01	3.6E-02	2.0E-03
7	1.1E-04	2.7E-01	1.1E-02	3.3E-01	3.6E-02	2.1E-03
8	1.1E-04	2.7E-01	6.9E-03	3.3E-01	3.7E-02	2.1E-03
9	1.1E-04	2.7E-01	4.7E-03	3.2E-01	3.7E-02	2.1E-03
10	1.1E-04	2.6E-01	3.6E-03	3.2E-01	3.8E-02	2.2E-03
20	1.0E-04	2.3E-01	2.1E-03	2.9E-01	4.4E-02	2.5E-03
30	9.5E-05	2.0E-01	1.8E-03	2.6E-01	4.9E-02	2.7E-03
40	8.8E-05	1.7E-01	1.6E-03	2.4E-01	5.3E-02	3.0E-03
50	8.2E-05	1.5E-01	1.4E-03	2.3E-01	5.7E-02	3.2E-03
60	7.7E-05	1.3E-01	1.2E-03	2.1E-01	6.1E-02	3.3E-03
70	7.2E-05	1.1E-01	1.0E-03	2.0E-01	6.4E-02	3.5E-03
80	6.7E-05	1.0E-01	8.7E-04	1.9E-01	6.6E-02	3.6E-03
90	6.3E-05	8.7E-02	7.5E-04	1.7E-01	6.8E-02	3.7E-03
100	5.9E-05	7.6E-02	6.5E-04	1.7E-01	7.0E-02	3.7E-03
200	3.6E-05	1.9E-02	1.5E-04	1.1E-01	7.6E-02	3.8E-03
300	2.6E-05	4.7E-03	3.3E-05	9.3E-02	7.2E-02	3.3E-03
400	2.0E-05	1.1E-03	7.5E-06	8.1E-02	6.6E-02	2.8E-03
500	1.7E-05	2.8E-04	1.7E-06	7.1E-02	5.9E-02	2.3E-03
600	1.4E-05	6.8E-05	3.8E-07	6.3E-02	5.3E-02	1.9E-03
700	1.2E-05	1.6E-05	8.7E-08	5.5E-02	4.8E-02	1.5E-03
800	1.0E-05	3.9E-06	2.0E-08	4.9E-02	4.3E-02	1.3E-03
900	8.5E-06	9.4E-07	4.4E-09	4.4E-02	3.8E-02	1.0E-03
1000	7.2E-06	2.2E-07	1.0E-09	3.9E-02	3.4E-02	8.5E-04
2000	1.6E-06	1.2E-13	3.5E-16	1.2E-02	1.2E-02	1.2E-04
4000	1.3E-07	0.0E+00	0.0E+00	1.3E-03	1.3E-03	2.2E-06
6000	1.3E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.5E-04	1.5E-04	4.1E-08
8000	1.5E-09	0.0E+00	0.0E+00	1.7E-05	1.7E-05	7.6E-10
10000	1.7E-10	0.0E+00	0.0E+00	2.0E-06	2.0E-06	1.4E-11

Tab. 8/21: Ausscheidungsraten in 1/d und Retentionswerte nach Inhalation von Th-228, Stoffklasse W, AMAD: 1 μm, einmalige Zufuhr von 1 Bq, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	5.5E-03	2.5E-01	4.4E-02	5.9E-01	5.0E-02	2.9E-03
2	1.4E-03	1.8E-01	1.4E-01	4.5E-01	5.0E-02	2.9E-03
3	4.1E-04	1.6E-01	1.1E-01	3.3E-01	5.1E-02	2.9E-03
4	1.5E-04	1.5E-01	6.5E-02	2.7E-01	5.1E-02	2.9E-03
5	9.0E-05	1.4E-01	3.3E-02	2.4E-01	5.1E-02	2.9E-03
6	7.4E-05	1.4E-01	1.6E-02	2.2E-01	5.2E-02	2.9E-03
7	6.9E-05	1.4E-01	8.1E-03	2.1E-01	5.2E-02	2.9E-03
8	6.8E-05	1.3E-01	4.4E-03	2.1E-01	5.2E-02	3.0E-03
9	6.7E-05	1.3E-01	2.7E-03	2.0E-01	5.2E-02	3.0E-03
10	6.7E-05	1.3E-01	1.9E-03	2.0E-01	5.3E-02	3.0E-03
20	6.3E-05	1.1E-01	1.1E-03	1.9E-01	5.5E-02	3.1E-03
30	5.9E-05	9.9E-02	9.2E-04	1.7E-01	5.7E-02	3.2E-03
40	5.6E-05	8.7E-02	7.9E-04	1.6E-01	5.9E-02	3.3E-03
50	5.3E-05	7.5E-02	6.8E-04	1.5E-01	6.1E-02	3.3E-03
60	5.0E-05	6.6E-02	5.9E-04	1.5E-01	6.2E-02	3.4E-03
70	4.7E-05	5.7E-02	5.1E-04	1.4E-01	6.3E-02	3.4E-03
80	4.5E-05	5.0E-02	4.4E-04	1.3E-01	6.4E-02	3.4E-03
90	4.2E-05	4.3E-02	3.8E-04	1.3E-01	6.5E-02	3.5E-03
100	4.0E-05	3.8E-02	3.2E-04	1.2E-01	6.6E-02	3.5E-03
200	2.7E-05	9.4E-03	7.3E-05	9.1E-02	6.5E-02	3.2E-03
300	2.0E-05	2.3E-03	1.7E-05	7.7E-02	6.1E-02	2.7E-03
400	1.6E-05	5.7E-04	3.7E-06	6.7E-02	5.5E-02	2.3E-03
500	1.4E-05	1.4E-04	8.5E-07	5.9E-02	4.9E-02	1.9E-03
600	1.1E-05	3.4E-05	1.9E-07	5.2E-02	4.4E-02	1.5E-03
700	9.7E-06	8.1E-06	4.3E-08	4.6E-02	4.0E-02	1.3E-03
800	8.2E-06	2.0E-06	9.8E-09	4.1E-02	3.6E-02	1.0E-03
900	6.9E-06	4.7E-07	2.2E-09	3.6E-02	3.2E-02	8.4E-04
1000	5.9E-06	1.1E-07	5.0E-10	3.2E-02	2.9E-02	6.9E-04
2000	1.3E-06	5.8E-14	1.8E-16	1.0E-02	9.7E-03	9.4E-05
4000	1.0E-07	0.0E+00	0.0E+00	1.1E-03	1.1E-03	1.8E-06
6000	1.1E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.3E-04	1.3E-04	3.3E-08
8000	1.3E-09	0.0E+00	0.0E+00	1.4E-05	1.4E-05	6.2E-10
10000	1.4E-10	0.0E+00	0.0E+00	1.6E-06	1.6E-06	1.2E-11

Tab. 8/22: Ausscheidungsraten in 1/d und Retentionswerte nach Inhalation von Th-228, Stoffklasse W, AMAD: 10 μm, einmalige Zufuhr von 1 Bq, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	9.8E-03	1.8E-01	9.7E-02	8.9E-01	8.9E-02	5.1E-03
2	2.5E-03	5.9E-02	3.0E-01	5.9E-01	8.9E-02	5.1E-03
3	6.5E-04	3.6E-02	2.3E-01	3.6E-01	8.9E-02	5.1E-03
4	2.0E-04	3.0E-02	1.2E-01	2.3E-01	8.9E-02	5.1E-03
5	8.1E-05	2.9E-02	5.4E-02	1.8E-01	8.9E-02	5.1E-03
6	5.2E-05	2.8E-02	2.2E-02	1.6E-01	8.9E-02	5.1E-03
7	4.5E-05	2.7E-02	9.0E-03	1.5E-01	8.9E-02	5.0E-03
8	4.3E-05	2.7E-02	3.7E-03	1.4E-01	8.9E-02	5.0E-03
9	4.2E-05	2.7E-02	1.6E-03	1.4E-01	8.9E-02	5.0E-03
10	4.2E-05	2.6E-02	7.7E-04	1.4E-01	8.9E-02	5.0E-03
20	4.1E-05	2.3E-02	2.1E-04	1.4E-01	8.8E-02	5.0E-03
30	4.0E-05	2.0E-02	1.8E-04	1.3E-01	8.8E-02	4.9E-03
40	3.8E-05	1.7E-02	1.6E-04	1.3E-01	8.8E-02	4.8E-03
50	3.7E-05	1.5E-02	1.4E-04	1.3E-01	8.7E-02	4.8E-03
60	3.6E-05	1.3E-02	1.2E-04	1.2E-01	8.7E-02	4.7E-03
70	3.5E-05	1.1E-02	1.0E-04	1.2E-01	8.6E-02	4.6E-03
80	3.4E-05	1.0E-02	8.7E-05	1.2E-01	8.5E-02	4.5E-03
90	3.3E-05	8.7E-03	7.5E-05	1.2E-01	8.5E-02	4.5E-03
100	3.3E-05	7.6E-03	6.5E-05	1.1E-01	8.4E-02	4.4E-03
200	2.6E-05	1.9E-03	1.5E-05	9.7E-02	7.7E-02	3.7E-03
300	2.1E-05	4.7E-04	3.3E-06	8.5E-02	6.9E-02	3.0E-03
400	1.8E-05	1.1E-04	7.5E-07	7.5E-02	6.2E-02	2.5E-03
500	1.5E-05	2.8E-05	1.7E-07	6.6E-02	5.6E-02	2.0E-03
600	1.3E-05	6.8E-06	3.8E-08	5.8E-02	5.0E-02	1.7E-03
700	1.1E-05	1.6E-06	8.7E-09	5.2E-02	4.5E-02	1.4E-03
800	9.1E-06	3.9E-07	2.0E-09	4.6E-02	4.0E-02	1.1E-03
900	7.7E-06	9.4E-08	4.4E-10	4.1E-02	3.6E-02	9.2E-04
1000	6.6E-06	2.2E-08	1.0E-10	3.6E-02	3.2E-02	7.6E-04
2000	1.5E-06	1.2E-14	3.5E-17	1.1E-02	1.1E-02	1.0E-04
4000	1.2E-07	0.0E+00	0.0E+00	1.3E-03	1.3E-03	1.9E-06
6000	1.3E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.4E-04	1.4E-04	3.6E-08
8000	1.4E-09	0.0E+00	0.0E+00	1.6E-05	1.6E-05	6.8E-10
10000	1.6E-10	0.0E+00	0.0E+00	1.9E-06	1.9E-06	1.3E-11

Tab. 8/23: Retentionswerte in d und Ausscheidungsraten nach Inhalation von Th-228, Stoffklasse Y, AMAD: 0,2 μm, konstante Dauerzufuhr von 1 Bq/d, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	9.4E-05	4.1E-01	3.0E-02	6.0E-01	9.6E-04	5.5E-05
2	1.3E-04	7.6E-01	1.3E-01	1.1E+00	2.0E-03	1.1E-04
3	1.4E-04	1.1E+00	2.1E-01	1.5E+00	3.0E-03	1.7E-04
4	1.5E-04	1.4E+00	2.6E-01	1.9E+00	4.0E-03	2.3E-04
5	1.5E-04	1.7E+00	2.9E-01	2.2E+00	5.1E-03	2.9E-04
6	1.6E-04	2.0E+00	3.1E-01	2.5E+00	6.2E-03	3.5E-04
7	1.6E-04	2.3E+00	3.2E-01	2.8E+00	7.3E-03	4.2E-04
8	1.7E-04	2.6E+00	3.2E-01	3.1E+00	8.4E-03	4.8E-04
9	1.7E-04	2.9E+00	3.3E-01	3.4E+00	9.6E-03	5.5E-04
10	1.7E-04	3.2E+00	3.3E-01	3.7E+00	1.1E-02	6.1E-04
20	2.1E-04	6.1E+00	3.3E-01	6.7E+00	2.4E-02	1.4E-03
30	2.5E-04	8.9E+00	3.4E-01	9.5E+00	3.9E-02	2.2E-03
40	2.9E-04	1.2E+01	3.4E-01	1.2E+01	5.7E-02	3.2E-03
50	3.3E-04	1.4E+01	3.4E-01	1.5E+01	7.7E-02	4.3E-03
60	3.8E-04	1.7E+01	3.4E-01	1.8E+01	9.8E-02	5.5E-03
70	4.2E-04	2.0E+01	3.5E-01	2.0E+01	1.2E-01	6.8E-03
80	4.6E-04	2.2E+01	3.5E-01	2.3E+01	1.5E-01	8.2E-03
90	5.0E-04	2.5E+01	3.5E-01	2.6E+01	1.8E-01	9.8E-03
100	5.5E-04	2.7E+01	3.5E-01	2.8E+01	2.1E-01	1.1E-02
200	1.0E-03	4.9E+01	3.7E-01	5.1E+01	6.1E-01	3.3E-02
300	1.5E-03	6.8E+01	3.9E-01	7.0E+01	1.2E+00	6.1E-02
400	2.0E-03	8.2E+01	4.0E-01	8.5E+01	1.9E+00	9.4E-02
500	2.4E-03	9.5E+01	4.1E-01	9.9E+01	2.6E+00	1.3E-01
600	2.9E-03	1.0E+02	4.2E-01	1.1E+02	3.5E+00	1.7E-01
700	3.4E-03	1.1E+02	4.2E-01	1.2E+02	4.4E+00	2.1E-01
800	3.8E-03	1.2E+02	4.3E-01	1.3E+02	5.3E+00	2.4E-01
900	4.2E-03	1.3E+02	4.3E-01	1.3E+02	6.2E+00	2.8E-01
1000	4.6E-03	1.3E+02	4.3E-01	1.4E+02	7.1E+00	3.1E-01
2000	7.0E-03	1.5E+02	4.4E-01	1.7E+02	1.5E+01	5.4E-01
4000	8.1E-03	1.5E+02	4.4E-01	1.8E+02	2.0E+01	6.4E-01
6000	8.2E-03	1.5E+02	4.4E-01	1.8E+02	2.1E+01	6.4E-01
8000	8.2E-03	1.5E+02	4.4E-01	1.8E+02	2.1E+01	6.4E-01
10000	8.2E-03	1.5E+02	4.4E-01	1.8E+02	2.1E+01	6.4E-01

Tab. 8/24: Retentionswerte in d und Ausscheidungsraten nach Inhalation von Th-228, Stoffklasse Y, AMAD: 1 μm, konstante Dauerzufuhr von 1 Bq/d, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	2.8E-04	2.6E-01	5.4E-02	5.9E-01	2.8E-03	1.6E-04
2	3.7E-04	4.4E-01	2.2E-01	1.0E+00	5.6E-03	3.2E-04
3	4.0E-04	6.0E-01	3.5E-01	1.3E+00	8.4E-03	4.8E-04
4	4.1E-04	7.6E-01	4.2E-01	1.5E+00	1.1E-02	6.4E-04
5	4.2E-04	9.1E-01	4.6E-01	1.7E+00	1.4E-02	8.0E-04
6	4.2E-04	1.1E+00	4.7E-01	1.9E+00	1.7E-02	9.7E-04
7	4.2E-04	1.2E+00	4.8E-01	2.0E+00	2.0E-02	1.1E-03
8	4.3E-04	1.4E+00	4.8E-01	2.2E+00	2.3E-02	1.3E-03
9	4.3E-04	1.5E+00	4.8E-01	2.3E+00	2.6E-02	1.5E-03
10	4.3E-04	1.7E+00	4.9E-01	2.5E+00	2.8E-02	1.6E-03
20	4.6E-04	3.1E+00	4.9E-01	4.0E+00	5.8E-02	3.3E-03
30	4.9E-04	4.5E+00	4.9E-01	5.4E+00	8.8E-02	5.0E-03
40	5.2E-04	5.9E+00	4.9E-01	6.9E+00	1.2E-01	6.7E-03
50	5.4E-04	7.3E+00	4.9E-01	8.3E+00	1.5E-01	8.4E-03
60	5.7E-04	8.6E+00	4.9E-01	9.7E+00	1.8E-01	1.0E-02
70	6.0E-04	9.9E+00	4.9E-01	1.1E+01	2.2E-01	1.2E-02
80	6.3E-04	1.1E+01	4.9E-01	1.2E+01	2.5E-01	1.4E-02
90	6.6E-04	1.2E+01	5.0E-01	1.4E+01	2.9E-01	1.6E-02
100	6.9E-04	1.4E+01	5.0E-01	1.5E+01	3.2E-01	1.8E-02
200	9.8E-04	2.5E+01	5.1E-01	2.7E+01	7.2E-01	3.8E-02
300	1.3E-03	3.4E+01	5.1E-01	3.6E+01	1.2E+00	6.0E-02
400	1.6E-03	4.1E+01	5.2E-01	4.4E+01	1.7E+00	8.3E-02
500	1.8E-03	4.7E+01	5.3E-01	5.1E+01	2.2E+00	1.1E-01
600	2.1E-03	5.2E+01	5.3E-01	5.7E+01	2.8E+00	1.3E-01
700	2.4E-03	5.6E+01	5.3E-01	6.1E+01	3.3E+00	1.5E-01
800	2.6E-03	6.0E+01	5.3E-01	6.6E+01	3.9E+00	1.7E-01
900	2.8E-03	6.3E+01	5.4E-01	6.9E+01	4.4E+00	2.0E-01
1000	3.0E-03	6.5E+01	5.4E-01	7.2E+01	5.0E+00	2.1E-01
2000	4.3E-03	7.5E+01	5.4E-01	8.6E+01	9.2E+00	3.4E-01
4000	4.9E-03	7.7E+01	5.4E-01	9.1E+01	1.2E+01	3.9E-01
6000	4.9E-03	7.7E+01	5.4E-01	9.2E+01	1.2E+01	3.9E-01
8000	4.9E-03	7.7E+01	5.4E-01	9.2E+01	1.2E+01	3.9E-01
10000	4.9E-03	7.7E+01	5.4E-01	9.2E+01	1.2E+01	3.9E-01

Tab. 8/25: Retentionswerte in d und Ausscheidungsraten nach Inhalation von Th-228, Stoffklasse Y, AMAD: 10 μm, konstante Dauerzufuhr von 1 Bq/d, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	6.7E-04	1.9E-01	1.1E-01	8.9E-01	6.7E-03	3.9E-04
2	8.9E-04	2.6E-01	4.5E-01	1.4E+00	1.4E-02	7.7E-04
3	9.6E-04	2.9E-01	7.2E-01	1.7E+00	2.0E-02	1.2E-03
4	9.9E-04	3.3E-01	8.6E-01	1.8E+00	2.7E-02	1.5E-03
5	1.0E-03	3.6E-01	9.2E-01	1.9E+00	3.4E-02	1.9E-03
6	1.0E-03	3.9E-01	9.4E-01	2.0E+00	4.1E-02	2.3E-03
7	1.0E-03	4.2E-01	9.5E-01	2.0E+00	4.7E-02	2.7E-03
8	1.0E-03	4.4E-01	9.6E-01	2.1E+00	5.4E-02	3.1E-03
9	1.0E-03	4.7E-01	9.6E-01	2.1E+00	6.1E-02	3.5E-03
10	1.0E-03	5.0E-01	9.6E-01	2.1E+00	6.8E-02	3.8E-03
20	1.0E-03	7.9E-01	9.6E-01	2.5E+00	1.3E-01	7.6E-03
30	1.1E-03	1.1E+00	9.6E-01	2.9E+00	2.0E-01	1.1E-02
40	1.1E-03	1.4E+00	9.6E-01	3.3E+00	2.7E-01	1.5E-02
50	1.1E-03	1.6E+00	9.6E-01	3.6E+00	3.3E-01	1.9E-02
60	1.1E-03	1.9E+00	9.6E-01	4.0E+00	4.0E-01	2.2E-02
70	1.2E-03	2.2E+00	9.6E-01	4.3E+00	4.6E-01	2.6E-02
80	1.2E-03	2.4E+00	9.6E-01	4.6E+00	5.3E-01	2.9E-02
90	1.2E-03	2.7E+00	9.6E-01	5.0E+00	5.9E-01	3.2E-02
100	1.3E-03	2.9E+00	9.6E-01	5.3E+00	6.5E-01	3.6E-02
200	1.5E-03	5.1E+00	9.6E-01	8.3E+00	1.3E+00	6.6E-02
300	1.7E-03	6.9E+00	9.6E-01	1.1E+01	1.8E+00	9.2E-02
400	1.9E-03	8.4E+00	9.7E-01	1.3E+01	2.4E+00	1.1E-01
500	2.0E-03	9.6E+00	9.7E-01	1.5E+01	2.8E+00	1.3E-01
600	2.2E-03	1.1E+01	9.7E-01	1.6E+01	3.3E+00	1.5E-01
700	2.3E-03	1.1E+01	9.7E-01	1.8E+01	3.7E+00	1.6E-01
800	2.4E-03	1.2E+01	9.7E-01	1.9E+01	4.1E+00	1.8E-01
900	2.5E-03	1.3E+01	9.7E-01	2.0E+01	4.5E+00	1.9E-01
1000	2.6E-03	1.3E+01	9.7E-01	2.1E+01	4.8E+00	2.0E-01
2000	3.1E-03	1.5E+01	9.7E-01	2.5E+01	6.9E+00	2.4E-01
4000	3.3E-03	1.6E+01	9.7E-01	2.6E+01	8.1E+00	2.6E-01
6000	3.3E-03	1.6E+01	9.7E-01	2.7E+01	8.2E+00	2.6E-01
8000	3.3E-03	1.6E+01	9.7E-01	2.7E+01	8.2E+00	2.6E-01
10000	3.3E-03	1.6E+01	9.7E-01	2.7E+01	8.2E+00	2.6E-01

Tab. 8/26: Retentionswerte in d und Ausscheidungsraten nach Inhalation von Th-228, Stoffklasse W, AMAD: 0,2 μm, konstante Dauerzufuhr von 1 Bq/d, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	3.5E-03	4.1E-01	2.3E-02	6.0E-01	3.2E-02	1.8E-03
2	4.5E-03	7.5E-01	1.0E-01	1.1E+00	6.5E-02	3.7E-03
3	4.8E-03	1.1E+00	1.8E-01	1.6E+00	9.9E-02	5.6E-03
4	5.0E-03	1.4E+00	2.3E-01	2.0E+00	1.3E-01	7.6E-03
5	5.1E-03	1.6E+00	2.6E-01	2.3E+00	1.7E-01	9.6E-03
6	5.2E-03	1.9E+00	2.8E-01	2.7E+00	2.0E-01	1.2E-02
7	5.3E-03	2.2E+00	2.9E-01	3.0E+00	2.4E-01	1.4E-02
8	5.4E-03	2.5E+00	3.0E-01	3.3E+00	2.8E-01	1.6E-02
9	5.5E-03	2.7E+00	3.0E-01	3.6E+00	3.1E-01	1.8E-02
10	5.6E-03	3.0E+00	3.0E-01	4.0E+00	3.5E-01	2.0E-02
20	6.7E-03	5.4E+00	3.3E-01	7.0E+00	7.7E-01	4.3E-02
30	7.7E-03	7.5E+00	3.5E-01	9.7E+00	1.2E+00	7.0E-02
40	8.6E-03	9.4E+00	3.6E-01	1.2E+01	1.7E+00	9.8E-02
50	9.4E-03	1.1E+01	3.8E-01	1.5E+01	2.3E+00	1.3E-01
60	1.0E-02	1.2E+01	3.9E-01	1.7E+01	2.9E+00	1.6E-01
70	1.1E-02	1.4E+01	4.0E-01	1.9E+01	3.5E+00	2.0E-01
80	1.2E-02	1.5E+01	4.1E-01	2.1E+01	4.2E+00	2.3E-01
90	1.2E-02	1.6E+01	4.2E-01	2.3E+01	4.8E+00	2.7E-01
100	1.3E-02	1.6E+01	4.3E-01	2.4E+01	5.5E+00	3.0E-01
200	1.7E-02	2.0E+01	4.6E-01	3.8E+01	1.3E+01	6.9E-01
300	2.0E-02	2.1E+01	4.7E-01	4.8E+01	2.0E+01	1.0E+00
400	2.3E-02	2.2E+01	4.7E-01	5.7E+01	2.7E+01	1.3E+00
500	2.5E-02	2.2E+01	4.7E-01	6.4E+01	3.4E+01	1.6E+00
600	2.6E-02	2.2E+01	4.7E-01	7.1E+01	3.9E+01	1.8E+00
700	2.7E-02	2.2E+01	4.7E-01	7.7E+01	4.4E+01	2.0E+00
800	2.8E-02	2.2E+01	4.7E-01	8.2E+01	4.9E+01	2.1E+00
900	2.9E-02	2.2E+01	4.7E-01	8.7E+01	5.3E+01	2.2E+00
1000	3.0E-02	2.2E+01	4.7E-01	9.1E+01	5.6E+01	2.3E+00
2000	3.4E-02	2.2E+01	4.7E-01	1.1E+02	7.7E+01	2.7E+00
4000	3.5E-02	2.2E+01	4.7E-01	1.2E+02	8.7E+01	2.7E+00
6000	3.5E-02	2.2E+01	4.7E-01	1.2E+02	8.8E+01	2.8E+00
8000	3.5E-02	2.2E+01	4.7E-01	1.2E+02	8.8E+01	2.8E+00
10000	3.5E-02	2.2E+01	4.7E-01	1.2E+02	8.8E+01	2.8E+00

Tab. 8/27: Retentionswerte in d und Ausscheidungsraten nach Inhalation von Th-228, Stoffklasse W, AMAD: 1 μm, konstante Dauerzufuhr von 1 Bq/d, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	5.5E-03	2.5E-01	4.4E-02	5.9E-01	5.0E-02	2.9E-03
2	6.9E-03	4.3E-01	1.8E-01	1.0E+00	1.0E-01	5.7E-03
3	7.3E-03	5.9E-01	3.0E-01	1.4E+00	1.5E-01	8.6E-03
4	7.5E-03	7.3E-01	3.6E-01	1.6E+00	2.0E-01	1.2E-02
5	7.6E-03	8.8E-01	3.9E-01	1.9E+00	2.5E-01	1.4E-02
6	7.6E-03	1.0E+00	4.1E-01	2.1E+00	3.0E-01	1.7E-02
7	7.7E-03	1.2E+00	4.2E-01	2.3E+00	3.6E-01	2.0E-02
8	7.8E-03	1.3E+00	4.2E-01	2.5E+00	4.1E-01	2.3E-02
9	7.8E-03	1.4E+00	4.3E-01	2.7E+00	4.6E-01	2.6E-02
10	7.9E-03	1.6E+00	4.3E-01	2.9E+00	5.1E-01	2.9E-02
20	8.5E-03	2.8E+00	4.4E-01	4.8E+00	1.1E+00	6.0E-02
30	9.2E-03	3.8E+00	4.5E-01	6.6E+00	1.6E+00	9.1E-02
40	9.7E-03	4.7E+00	4.6E-01	8.3E+00	2.2E+00	1.2E-01
50	1.0E-02	5.6E+00	4.7E-01	9.9E+00	2.8E+00	1.6E-01
60	1.1E-02	6.3E+00	4.7E-01	1.1E+01	3.4E+00	1.9E-01
70	1.1E-02	6.9E+00	4.8E-01	1.3E+01	4.1E+00	2.2E-01
80	1.2E-02	7.4E+00	4.8E-01	1.4E+01	4.7E+00	2.6E-01
90	1.2E-02	7.9E+00	4.9E-01	1.5E+01	5.3E+00	2.9E-01
100	1.3E-02	8.3E+00	4.9E-01	1.7E+01	6.0E+00	3.3E-01
200	1.6E-02	1.0E+01	5.1E-01	2.7E+01	1.3E+01	6.6E-01
300	1.8E-02	1.1E+01	5.1E-01	3.5E+01	1.9E+01	9.6E-01
400	2.0E-02	1.1E+01	5.1E-01	4.3E+01	2.5E+01	1.2E+00
500	2.1E-02	1.1E+01	5.1E-01	4.9E+01	3.0E+01	1.4E+00
600	2.3E-02	1.1E+01	5.1E-01	5.4E+01	3.5E+01	1.6E+00
700	2.4E-02	1.1E+01	5.1E-01	5.9E+01	3.9E+01	1.7E+00
800	2.5E-02	1.1E+01	5.1E-01	6.4E+01	4.3E+01	1.8E+00
900	2.5E-02	1.1E+01	5.1E-01	6.7E+01	4.6E+01	1.9E+00
1000	2.6E-02	1.1E+01	5.1E-01	7.1E+01	4.9E+01	2.0E+00
2000	2.9E-02	1.1E+01	5.1E-01	9.0E+01	6.6E+01	2.3E+00
4000	3.0E-02	1.1E+01	5.1E-01	9.8E+01	7.4E+01	2.3E+00
6000	3.0E-02	1.1E+01	5.1E-01	9.9E+01	7.5E+01	2.4E+00
8000	3.0E-02	1.1E+01	5.1E-01	9.9E+01	7.5E+01	2.4E+00
10000	3.0E-02	1.1E+01	5.1E-01	9.9E+01	7.5E+01	2.4E+00

Tab. 8/28: Retentionswerte in d und Ausscheidungsraten nach Inhalation von Th-228, Stoffklasse W, AMAD: 10 μm, konstante Dauerzufuhr von 1 Bq/d, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	9.8E-03	1.8E-01	9.7E-02	8.9E-01	8.9E-02	5.1E-03
2	1.2E-02	2.4E-01	4.0E-01	1.5E+00	1.8E-01	1.0E-02
3	1.3E-02	2.7E-01	6.3E-01	1.8E+00	2.7E-01	1.5E-02
4	1.3E-02	3.0E-01	7.5E-01	2.1E+00	3.6E-01	2.0E-02
5	1.3E-02	3.3E-01	8.1E-01	2.3E+00	4.4E-01	2.5E-02
6	1.3E-02	3.6E-01	8.3E-01	2.4E+00	5.3E-01	3.0E-02
7	1.3E-02	3.9E-01	8.4E-01	2.6E+00	6.2E-01	3.5E-02
8	1.3E-02	4.1E-01	8.4E-01	2.7E+00	7.1E-01	4.0E-02
9	1.3E-02	4.4E-01	8.4E-01	2.8E+00	8.0E-01	4.6E-02
10	1.3E-02	4.7E-01	8.4E-01	3.0E+00	8.9E-01	5.1E-02
20	1.4E-02	7.1E-01	8.5E-01	4.4E+00	1.8E+00	1.0E-01
30	1.4E-02	9.2E-01	8.5E-01	5.7E+00	2.7E+00	1.5E-01
40	1.5E-02	1.1E+00	8.5E-01	7.0E+00	3.5E+00	2.0E-01
50	1.5E-02	1.3E+00	8.5E-01	8.3E+00	4.4E+00	2.5E-01
60	1.5E-02	1.4E+00	8.5E-01	9.5E+00	5.3E+00	2.9E-01
70	1.6E-02	1.5E+00	8.5E-01	1.1E+01	6.1E+00	3.4E-01
80	1.6E-02	1.6E+00	8.5E-01	1.2E+01	7.0E+00	3.9E-01
90	1.6E-02	1.7E+00	8.5E-01	1.3E+01	7.8E+00	4.3E-01
100	1.7E-02	1.8E+00	8.6E-01	1.4E+01	8.7E+00	4.7E-01
200	2.0E-02	2.2E+00	8.6E-01	2.5E+01	1.7E+01	8.8E-01
300	2.2E-02	2.3E+00	8.6E-01	3.4E+01	2.4E+01	1.2E+00
400	2.4E-02	2.3E+00	8.6E-01	4.2E+01	3.1E+01	1.5E+00
500	2.6E-02	2.3E+00	8.6E-01	4.9E+01	3.6E+01	1.7E+00
600	2.7E-02	2.3E+00	8.6E-01	5.5E+01	4.2E+01	1.9E+00
700	2.8E-02	2.3E+00	8.6E-01	6.1E+01	4.7E+01	2.0E+00
800	2.9E-02	2.3E+00	8.6E-01	6.5E+01	5.1E+01	2.2E+00
900	3.0E-02	2.3E+00	8.6E-01	7.0E+01	5.5E+01	2.3E+00
1000	3.1E-02	2.3E+00	8.6E-01	7.4E+01	5.8E+01	2.4E+00
2000	3.4E-02	2.3E+00	8.6E-01	9.5E+01	7.8E+01	2.7E+00
4000	3.5E-02	2.3E+00	8.6E-01	1.0E+02	8.7E+01	2.7E+00
6000	3.5E-02	2.3E+00	8.6E-01	1.1E+02	8.8E+01	2.7E+00
8000	3.5E-02	2.3E+00	8.6E-01	1.1E+02	8.8E+01	2.7E+00
10000	3.5E-02	2.3E+00	8.6E-01	1.1E+02	8.8E+01	2.7E+00

Tab. 8/29: Ausscheidungsraten in 1/d und Retentionswerte nach Ingestion von Th-228, Stoffklasse Y, einmalige Zufuhr von 1 Bq, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	1.2E-05	0.0E+00	2.8E-01	7.2E-01	1.4E-04	8.0E-06
2	5.7E-06	0.0E+00	3.9E-01	3.3E-01	1.4E-04	8.0E-06
3	1.8E-06	0.0E+00	2.0E-01	1.3E-01	1.4E-04	8.0E-06
4	6.1E-07	0.0E+00	8.1E-02	5.0E-02	1.4E-04	7.9E-06
5	2.3E-07	0.0E+00	3.1E-02	1.9E-02	1.4E-04	7.9E-06
6	1.1E-07	0.0E+00	1.2E-02	7.1E-03	1.4E-04	7.9E-06
7	6.8E-08	0.0E+00	4.4E-03	2.7E-03	1.4E-04	7.9E-06
8	5.7E-08	0.0E+00	1.6E-03	1.1E-03	1.4E-04	7.9E-06
9	5.3E-08	0.0E+00	5.9E-04	5.2E-04	1.4E-04	7.9E-06
10	5.1E-08	0.0E+00	2.2E-04	3.0E-04	1.4E-04	7.8E-06
20	5.0E-08	0.0E+00	9.8E-09	1.8E-04	1.4E-04	7.7E-06
30	4.9E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.7E-04	1.4E-04	7.5E-06
40	4.8E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.7E-04	1.3E-04	7.4E-06
50	4.7E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.7E-04	1.3E-04	7.2E-06
60	4.7E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.7E-04	1.3E-04	7.1E-06
70	4.6E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.6E-04	1.3E-04	7.0E-06
80	4.5E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.6E-04	1.3E-04	6.8E-06
90	4.4E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.6E-04	1.3E-04	6.7E-06
100	4.3E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.6E-04	1.3E-04	6.6E-06
200	3.6E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.4E-04	1.1E-04	5.4E-06
300	3.1E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.2E-04	1.0E-04	4.4E-06
400	2.6E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.1E-04	9.1E-05	3.6E-06
500	2.2E-08	0.0E+00	0.0E+00	9.6E-05	8.1E-05	3.0E-06
600	1.8E-08	0.0E+00	0.0E+00	8.5E-05	7.3E-05	2.4E-06
700	1.6E-08	0.0E+00	0.0E+00	7.5E-05	6.5E-05	2.0E-06
800	1.3E-08	0.0E+00	0.0E+00	6.7E-05	5.9E-05	1.6E-06
900	1.1E-08	0.0E+00	0.0E+00	5.9E-05	5.3E-05	1.3E-06
1000	9.5E-09	0.0E+00	0.0E+00	5.3E-05	4.7E-05	1.1E-06
2000	2.1E-09	0.0E+00	0.0E+00	1.7E-05	1.6E-05	1.5E-07
4000	1.7E-10	0.0E+00	0.0E+00	1.8E-06	1.8E-06	2.8E-09
6000	1.8E-11	0.0E+00	0.0E+00	2.1E-07	2.1E-07	5.3E-11
8000	2.1E-12	0.0E+00	0.0E+00	2.4E-08	2.4E-08	9.8E-13
10000	2.3E-13	0.0E+00	0.0E+00	2.7E-09	2.7E-09	1.8E-14

Tab. 8/30: Ausscheidungsraten in 1/d und Retentionswerte nach Ingestion von Th-228, Stoffklasse W, einmalige Zufuhr von 1 Bq, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	1.3E-05	0.0E+00	2.8E-01	7.2E-01	1.4E-04	8.0E-06
2	5.2E-06	0.0E+00	3.9E-01	3.3E-01	1.4E-04	8.0E-06
3	1.3E-06	0.0E+00	2.0E-01	1.3E-01	1.4E-04	8.0E-06
4	3.6E-07	0.0E+00	8.1E-02	5.0E-02	1.4E-04	7.9E-06
5	1.3E-07	0.0E+00	3.1E-02	1.9E-02	1.4E-04	7.9E-06
6	7.0E-08	0.0E+00	1.2E-02	7.1E-03	1.4E-04	7.9E-06
7	5.6E-08	0.0E+00	4.4E-03	2.7E-03	1.4E-04	7.9E-06
8	5.2E-08	0.0E+00	1.6E-03	1.1E-03	1.4E-04	7.9E-06
9	5.1E-08	0.0E+00	5.9E-04	5.2E-04	1.4E-04	7.9E-06
10	5.1E-08	0.0E+00	2.2E-04	3.0E-04	1.4E-04	7.8E-06
20	5.0E-08	0.0E+00	9.8E-09	1.8E-04	1.4E-04	7.7E-06
30	4.9E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.7E-04	1.4E-04	7.5E-06
40	4.8E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.7E-04	1.3E-04	7.4E-06
50	4.7E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.7E-04	1.3E-04	7.2E-06
60	4.7E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.7E-04	1.3E-04	7.1E-06
70	4.6E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.6E-04	1.3E-04	7.0E-06
80	4.5E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.6E-04	1.3E-04	6.8E-06
90	4.4E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.6E-04	1.3E-04	6.7E-06
100	4.3E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.6E-04	1.3E-04	6.6E-06
200	3.6E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.4E-04	1.1E-04	5.4E-06
300	3.1E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.2E-04	1.0E-04	4.4E-06
400	2.6E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.1E-04	9.1E-05	3.6E-06
500	2.2E-08	0.0E+00	0.0E+00	9.6E-05	8.1E-05	3.0E-06
600	1.8E-08	0.0E+00	0.0E+00	8.5E-05	7.3E-05	2.4E-06
700	1.6E-08	0.0E+00	0.0E+00	7.5E-05	6.5E-05	2.0E-06
800	1.3E-08	0.0E+00	0.0E+00	6.7E-05	5.9E-05	1.6E-06
900	1.1E-08	0.0E+00	0.0E+00	5.9E-05	5.3E-05	1.3E-06
1000	9.5E-09	0.0E+00	0.0E+00	5.3E-05	4.7E-05	1.1E-06
2000	2.1E-09	0.0E+00	0.0E+00	1.7E-05	1.6E-05	1.5E-07
4000	1.7E-10	0.0E+00	0.0E+00	1.8E-06	1.8E-06	2.8E-09
6000	1.8E-11	0.0E+00	0.0E+00	2.1E-07	2.1E-07	5.3E-11
8000	2.1E-12	0.0E+00	0.0E+00	2.4E-08	2.4E-08	9.8E-13
10000	2.3E-13	0.0E+00	0.0E+00	2.7E-09	2.7E-09	1.8E-14

Tab. 8/31: Ausscheidungsraten in 1/d und Retentionswerte nach direkter Aufnahme von Th-228 ins Blut, Stoffklasse Y, einmalige Zufuhr von 1 Bq, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	7.0E-02	0.0E+00	0.0E+00	9.3E-01	7.0E-01	4.0E-02
2	2.2E-02	0.0E+00	0.0E+00	9.1E-01	7.0E-01	4.0E-02
3	7.2E-03	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-01	7.0E-01	4.0E-02
4	2.4E-03	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-01	7.0E-01	4.0E-02
5	9.4E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.9E-01	7.0E-01	4.0E-02
6	4.7E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.9E-01	7.0E-01	4.0E-02
7	3.2E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.9E-01	6.9E-01	3.9E-02
8	2.8E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.9E-01	6.9E-01	3.9E-02
9	2.6E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.9E-01	6.9E-01	3.9E-02
10	2.6E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.9E-01	6.9E-01	3.9E-02
20	2.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.8E-01	6.8E-01	3.8E-02
30	2.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.7E-01	6.8E-01	3.8E-02
40	2.4E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.5E-01	6.7E-01	3.7E-02
50	2.4E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.4E-01	6.6E-01	3.6E-02
60	2.3E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.3E-01	6.6E-01	3.6E-02
70	2.3E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.2E-01	6.5E-01	3.5E-02
80	2.2E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.1E-01	6.4E-01	3.4E-02
90	2.2E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.0E-01	6.3E-01	3.3E-02
100	2.2E-04	0.0E+00	0.0E+00	7.9E-01	6.3E-01	3.3E-02
200	1.8E-04	0.0E+00	0.0E+00	7.0E-01	5.6E-01	2.7E-02
300	1.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	6.2E-01	5.1E-01	2.2E-02
400	1.3E-04	0.0E+00	0.0E+00	5.4E-01	4.5E-01	1.8E-02
500	1.1E-04	0.0E+00	0.0E+00	4.8E-01	4.1E-01	1.5E-02
600	9.2E-05	0.0E+00	0.0E+00	4.3E-01	3.6E-01	1.2E-02
700	7.8E-05	0.0E+00	0.0E+00	3.8E-01	3.3E-01	9.9E-03
800	6.6E-05	0.0E+00	0.0E+00	3.3E-01	2.9E-01	8.1E-03
900	5.6E-05	0.0E+00	0.0E+00	3.0E-01	2.6E-01	6.7E-03
1000	4.8E-05	0.0E+00	0.0E+00	2.6E-01	2.4E-01	5.5E-03
2000	1.1E-05	0.0E+00	0.0E+00	8.4E-02	8.0E-02	7.5E-04
4000	8.6E-07	0.0E+00	0.0E+00	9.2E-03	9.1E-03	1.4E-05
6000	9.1E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.0E-03	1.0E-03	2.6E-07
8000	1.0E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.2E-04	1.2E-04	4.9E-09
10000	1.2E-09	0.0E+00	0.0E+00	1.4E-05	1.4E-05	9.2E-11

Tab. 8/32: Ausscheidungsraten in 1/d und Retentionswerte nach direkter Aufnahme von Th-228 ins Blut, Stoffklasse W, einmalige Zufuhr von 1 Bq, $f_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Zeit/d	24h Urin	Lunge ges.	24h Stuhl	GK	Knochen	Leber
1	7.7E-02	0.0E+00	0.0E+00	9.2E-01	7.0E-01	4.0E-02
2	1.9E-02	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-01	7.0E-01	4.0E-02
3	4.9E-03	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-01	7.0E-01	4.0E-02
4	1.4E-03	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-01	7.0E-01	4.0E-02
5	5.4E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.9E-01	7.0E-01	4.0E-02
6	3.3E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.9E-01	7.0E-01	4.0E-02
7	2.7E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.9E-01	6.9E-01	3.9E-02
8	2.6E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.9E-01	6.9E-01	3.9E-02
9	2.6E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.9E-01	6.9E-01	3.9E-02
10	2.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.9E-01	6.9E-01	3.9E-02
20	2.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.8E-01	6.8E-01	3.8E-02
30	2.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.7E-01	6.8E-01	3.8E-02
40	2.4E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.5E-01	6.7E-01	3.7E-02
50	2.4E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.4E-01	6.6E-01	3.6E-02
60	2.3E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.3E-01	6.6E-01	3.6E-02
70	2.3E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.2E-01	6.5E-01	3.5E-02
80	2.2E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.1E-01	6.4E-01	3.4E-02
90	2.2E-04	0.0E+00	0.0E+00	8.0E-01	6.3E-01	3.3E-02
100	2.2E-04	0.0E+00	0.0E+00	7.9E-01	6.3E-01	3.3E-02
200	1.8E-04	0.0E+00	0.0E+00	7.0E-01	5.6E-01	2.7E-02
300	1.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	6.2E-01	5.1E-01	2.2E-02
400	1.3E-04	0.0E+00	0.0E+00	5.4E-01	4.5E-01	1.8E-02
500	1.1E-04	0.0E+00	0.0E+00	4.8E-01	4.1E-01	1.5E-02
600	9.2E-05	0.0E+00	0.0E+00	4.3E-01	3.6E-01	1.2E-02
700	7.8E-05	0.0E+00	0.0E+00	3.8E-01	3.3E-01	9.9E-03
800	6.6E-05	0.0E+00	0.0E+00	3.3E-01	2.9E-01	8.1E-03
900	5.6E-05	0.0E+00	0.0E+00	3.0E-01	2.6E-01	6.7E-03
1000	4.8E-05	0.0E+00	0.0E+00	2.6E-01	2.4E-01	5.5E-03
2000	1.1E-05	0.0E+00	0.0E+00	8.4E-02	8.0E-02	7.5E-04
4000	8.6E-07	0.0E+00	0.0E+00	9.2E-03	9.1E-03	1.4E-05
6000	9.1E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.0E-03	1.0E-03	2.6E-07
8000	1.0E-08	0.0E+00	0.0E+00	1.2E-04	1.2E-04	4.9E-09
10000	1.2E-09	0.0E+00	0.0E+00	1.4E-05	1.4E-05	9.2E-11

8.3 Dosiskoeffizienten (Tabellen)

Die folgenden Tabellen enthalten die Dosiskoeffizienten (früher Dosisfaktoren genannt) für verschiedene Organe sowie die effektive Äquivalentdosis für

- Inhalation (einmalige Zufuhr),
- Ingestion (einmalige Zufuhr) und
- direkte Aufnahme ins Blut ("Injektion"), z.B. über eine Wunde (einmalige Zufuhr)

von Th-232, Th-230 und Th-228 (BUN 89, Noß 93). Die Werte sind für die ICRP-Stoffklassen

- Y (Oxide, Hydroxide) und
- W (alle anderen Verbindungen)

angegeben. Die Berechnung der effektiven Dosis bezieht sich auf die ICRP-Publikation 26 (ICRP 26), die die Grundlage für die derzeit geltende Strahlenschutzverordnung (STRL 89) bildet.

Für den Zufuhrweg 'Inhalation' wurden die Werte für die AMAD-Größen 0,2 μm, 1 μm und 10 μm berechnet.

Die Tabellen für die Dosiskoeffizienten schlüsseln sich wie folgt auf:

Tab. 8/33: Äquivalentdosis für **Th-232** nach Inhalation, Stoffklassen W und Y, AMAD: 0,2 μm und 1 μm
Tab. 8/34: Äquivalentdosis für **Th-232** nach Inhalation, Stoffklassen W und Y, AMAD: 10 μm bzw. nach Ingestion oder direkter Aufnahme ins Blut
Tab. 8/35: Äquivalentdosis für **Th-228** nach Inhalation, Stoffklassen W und Y, AMAD: 0,2 μm und 1 μm
Tab. 8/36: Äquivalentdosis für **Th-228** nach Inhalation, Stoffklassen W und Y, AMAD: 10 μm bzw. nach Ingestion oder direkter Aufnahme ins Blut
Tab. 8/37: Äquivalentdosis für **Th-230** nach Inhalation, Stoffklassen W und Y, AMAD: 0,2 μm und 1 μm
Tab. 8/38: Äquivalentdosis für **Th-230** nach Inhalation, Stoffklassen W und Y, AMAD: 10 μm bzw. nach Ingestion oder direkter Aufnahme ins Blut

Der Fettdruck in den Tabellen kennzeichnet das jeweils höchstbelastete Organ (siehe auch Kapitel 5.4).

Tab. 8/33: Äquivalentdosis pro zugeführte Aktivität in Sv/Bq für Th-232 nach Inhalation, Stoffklassen W und Y, AMAD: 0,2 μm und 1 μm

	INHALATION AMAD: **0,2 μm**		**INHALATION** AMAD: **1 μm**	
STOFFKLASSE	W	Y	W	Y
f_1-WERT	2.0E-04	2.0E-04	2.0E-04	2.0E-04
ORGAN				
BLASE	9.1E-07	1.1E-06	7.4E-07	5.9E-07
BRUST	9.4E-07	1.2E-06	7.7E-07	6.1E-07
OBERER DICKDARM	9.2E-07	1.2E-06	7.6E-07	6.0E-07
UNTERER DICKDARM	9.6E-07	1.2E-06	7.9E-07	6.3E-07
DÜNNDARM	9.2E-07	1.2E-06	7.5E-07	6.0E-07
GEHIRN	9.9E-07	1.2E-06	8.1E-07	6.2E-07
HAUT	9.3E-07	1.2E-06	7.6E-07	6.0E-07
HODEN	9.2E-07	1.2E-06	7.5E-07	5.9E-07
KNOCHEN-OBERFLÄCHE	**1.4E-02**	**9.4E-03**	**1.1E-02**	**5.0E-03**
LEBER	7.6E-06	9.8E-06	6.2E-06	5.0E-06
LUNGE	2.8E-05	1.9E-03	1.4E-05	9.4E-04
MAGEN	9.0E-07	1.2E-06	7.4E-07	6.1E-07
MILZ	9.2E-07	1.2E-06	7.5E-07	6.1E-07
NEBENNIEREN	9.8E-07	1.2E-06	8.0E-07	6.3E-07
NIEREN	9.3E-07	1.2E-06	7.6E-07	6.1E-07
OVARIEN	9.3E-07	1.2E-06	7.6E-07	6.0E-07
PANKREAS	9.4E-07	1.2E-06	7.7E-07	6.2E-07
ROTES KNOCHENMARK	1.1E-03	7.5E-04	8.9E-04	4.0E-04
SCHILDDRÜSE	9.1E-07	1.2E-06	7.4E-07	6.0E-07
THYMUS	9.2E-07	1.2E-06	7.5E-07	6.3E-07
UTERUS	9.1E-07	1.1E-06	7.5E-07	5.9E-07
EFFEKTIV	5.4E-04	6.0E-04	4.4E-04	3.1E-04

Tab. 8/34: Äquivalentdosis pro zugeführte Aktivität in Sv/Bq für Th-232 nach Inhalation, Stoffklassen W und Y, AMAD: 10 μm bzw. nach Ingestion oder direkter Aufnahme ins Blut (z.B. über Wunde)

	INHALATION AMAD: **10 μm**		**INGESTION**	**INJEKTION**
STOFFKLASSE	W	Y	-	-
f_1-WERT	2.0E-04	2.0E-04	2.0E-04	2.0E-04
ORGAN				
BLASE	8.3E-07	1.7E-07	1.2E-09	2.9E-06
BRUST	8.6E-07	1.8E-07	1.3E-09	2.9E-06
OBERER DICKDARM	8.5E-07	1.9E-07	1.5E-08	2.9E-06
UNTERER DICKDARM	8.9E-07	2.2E-07	4.3E-08	2.9E-06
DÜNNDARM	8.4E-07	1.8E-07	3.6E-09	2.9E-06
GEHIRN	9.1E-07	1.8E-07	1.3E-09	2.9E-06
HAUT	8.4E-07	1.7E-07	1.2E-09	2.9E-06
HODEN	8.4E-07	1.7E-07	1.2E-09	2.9E-06
KNOCHEN-OBERFLÄCHE	**1.3E-02**	**1.8E-03**	**1.9E-05**	**1.5E-02**
LEBER	7.0E-06	1.5E-06	1.0E-08	2.5E-05
LUNGE	3.6E-06	1.9E-04	1.2E-09	2.9E-06
MAGEN	8.3E-07	1.7E-07	2.1E-09	2.9E-06
MILZ	8.4E-07	1.8E-07	1.2E-09	2.9E-06
NEBENNIEREN	9.0E-07	1.9E-07	1.3E-09	2.9E-06
NIEREN	8.5E-07	1.8E-07	1.2E-09	2.9E-06
OVARIEN	8.5E-07	1.7E-07	1.2E-09	2.9E-06
PANKREAS	8.5E-07	1.8E-07	1.2E-09	2.9E-06
ROTES KNOCHENMARK	1.0E-03	1.4E-04	1.5E-06	1.2E-03
SCHILDDRÜSE	8.3E-07	1.7E-07	1.2E-09	2.9E-06
THYMUS	8.4E-07	1.8E-07	1.2E-09	2.9E-06
UTERUS	8.3E-07	1.7E-07	1.2E-09	2.9E-06
EFFEKTIV	5.0E-04	9.4E-05	7.4E-07	5.9E-04

Tab. 8/35: Äquivalentdosis pro zugeführte Aktivität in Sv/Bq für Th-228 nach Inhalation, Stoffklassen W und Y, AMAD: 0,2 μm und 1 μm

	INHALATION AMAD: **0,2 μm**		**INHALATION** AMAD: **1 μm**	
STOFFKLASSE	W	Y	W	Y
f_1-WERT	2.0E-04	2.0E-04	2.0E-04	2.0E-04
ORGAN				
BLASE	1.6E-06	3.8E-07	1.3E-06	2.2E-07
BRUST	1.6E-06	3.9E-07	1.3E-06	2.3E-07
OBERER DICKDARM	1.6E-06	4.1E-07	1.4E-06	2.5E-07
UNTERER DICKDARM	1.7E-06	4.8E-07	1.4E-06	3.2E-07
DÜNNDARM	1.6E-06	3.8E-07	1.3E-06	2.3E-07
GEHIRN	1.6E-06	3.8E-07	1.3E-06	2.3E-07
HAUT	1.6E-06	3.8E-07	1.3E-06	2.3E-07
HODEN	1.6E-06	3.8E-07	1.3E-06	2.2E-07
KNOCHEN-OBERFLÄCHE	**1.6E-03**	3.8E-04	**1.4E-03**	2.3E-04
LEBER	1.4E-05	3.3E-06	1.2E-05	2.0E-06
LUNGE	1.9E-04	**1.4E-03**	9.5E-05	**6.9E-04**
MAGEN	1.6E-06	4.0E-07	1.3E-06	2.3E-07
MILZ	1.6E-06	4.0E-07	1.3E-06	2.3E-07
NEBENNIEREN	1.6E-06	3.9E-07	1.3E-06	2.3E-07
NIEREN	1.6E-06	3.8E-07	1.3E-06	2.3E-07
OVARIEN	1.6E-06	3.8E-07	1.3E-06	2.3E-07
PANKREAS	1.6E-06	4.0E-07	1.3E-06	2.4E-07
ROTES KNOCHENMARK	1.3E-04	3.1E-05	1.1E-04	1.9E-05
SCHILDDRÜSE	1.6E-06	3.8E-07	1.3E-06	2.3E-07
THYMUS	1.6E-06	4.1E-07	1.3E-06	2.4E-07
UTERUS	1.6E-06	3.8E-07	1.3E-06	2.2E-07
EFFEKTIV	8.9E-05	1.8E-04	6.8E-05	9.2E-05

Tab. 8/36: Äquivalentdosis pro zugeführte Aktivität in Sv/Bq für Th-228 nach Inhalation, Stoffklassen W und Y, AMAD: 10 μm bzw. nach Ingestion oder direkter Aufnahme ins Blut (z.B. über Wunde)

	INHALATION AMAD: **10 μm**		**INGESTION**	**INJEKTION**
STOFFKLASSE	W	Y	-	-
f_1-WERT	2.0E-04	2.0E-04	2.0E-04	2.0E-04
ORGAN				
BLASE	1.6E-06	1.5E-07	2.4E-09	2.0E-06
BRUST	1.6E-06	1.5E-07	2.3E-09	2.0E-06
OBERER DICKDARM	1.6E-06	1.8E-07	3.1E-08	2.0E-06
UNTERER DICKDARM	1.7E-06	3.0E-07	1.3E-07	2.0E-06
DÜNNDARM	1.6E-06	1.5E-07	6.1E-09	2.0E-06
GEHIRN	1.6E-06	1.5E-07	2.3E-09	2.0E-06
HAUT	1.6E-06	1.5E-07	2.3E-09	2.0E-06
HODEN	1.6E-06	1.5E-07	2.3E-09	2.0E-06
KNOCHEN-OBERFLÄCHE	**1.6E-03**	**1.5E-04**	**2.4E-06**	**2.0E-03**
LEBER	1.4E-05	1.3E-06	2.0E-08	1.7E-05
LUNGE	2.0E-05	**1.4E-04**	2.3E-09	2.0E-06
MAGEN	1.6E-06	1.5E-07	3.6E-09	2.0E-06
MILZ	1.6E-06	1.5E-07	2.3E-09	2.0E-06
NEBENNIEREN	1.6E-06	1.5E-07	2.3E-09	2.0E-06
NIEREN	1.6E-06	1.5E-07	2.3E-09	2.0E-06
OVARIEN	1.6E-06	1.5E-07	2.5E-09	2.0E-06
PANKREAS	1.6E-06	1.5E-07	2.3E-09	2.0E-06
ROTES KNOCHENMARK	1.3E-04	1.2E-05	1.9E-07	1.6E-04
SCHILDDRÜSE	1.6E-06	1.5E-07	2.3E-09	2.0E-06
THYMUS	1.6E-06	1.5E-07	2.3E-09	2.0E-06
UTERUS	1.6E-06	1.5E-07	2.4E-09	2.0E-06
EFFEKTIV	6.8E-05	2.3E-05	1.1E-07	8.2E-05

Tab. 8/37: Äquivalentdosis pro zugeführte Aktivität in Sv/Bq für Th-230 nach Inhalation, Stoffklassen W und Y, AMAD: 0,2 μm und 1 μm

	INHALATION AMAD: **0,2 μm**		**INHALATION** AMAD: **1 μm**	
STOFFKLASSE	W	Y	W	Y
f_1-WERT	2.0E-04	2.0E-04	2.0E-04	2.0E-04
ORGAN				
BLASE	4.9E-07	3.2E-07	4.1E-07	1.7E-07
BRUST	4.9E-07	3.2E-07	4.1E-07	1.7E-07
OBERER DICKDARM	5.0E-07	3.3E-07	4.1E-07	1.8E-07
UNTERER DICKDARM	5.2E-07	3.4E-07	4.3E-07	2.0E-07
DÜNNDARM	4.9E-07	3.2E-07	4.1E-07	1.7E-07
GEHIRN	4.9E-07	3.2E-07	4.1E-07	1.7E-07
HAUT	4.9E-07	3.2E-07	4.1E-07	1.7E-07
HODEN	4.9E-07	3.2E-07	4.1E-07	1.7E-07
KNOCHEN-OBERFLÄCHE	**2.6E-03**	**1.6E-03**	**2.1E-03**	**8.5E-04**
LEBER	4.3E-06	2.8E-06	3.5E-06	1.5E-06
LUNGE	3.2E-05	5.9E-04	1.6E-05	2.9E-04
MAGEN	4.9E-07	3.2E-07	4.1E-07	1.7E-07
MILZ	4.9E-07	3.2E-07	4.1E-07	1.7E-07
NEBENNIEREN	4.9E-07	3.2E-07	4.1E-07	1.7E-07
NIEREN	4.9E-07	3.2E-07	4.1E-07	1.7E-07
OVARIEN	4.9E-07	3.2E-07	4.1E-07	1.7E-07
PANKREAS	4.9E-07	3.2E-07	4.1E-07	1.7E-07
ROTES KNOCHENMARK	2.0E-04	1.3E-04	1.7E-04	6.8E-05
SCHILDDRÜSE	4.9E-07	3.2E-07	4.1E-07	1.7E-07
THYMUS	4.9E-07	3.2E-07	4.1E-07	1.7E-07
UTERUS	4.9E-07	3.2E-07	4.1E-07	1.7E-07
EFFEKTIV	1.1E-04	1.3E-04	8.6E-05	6.9E-05

Tab. 8/38: Äquivalentdosis pro zugeführte Aktivität in Sv/Bq für Th-230 nach Inhalation, Stoffklassen W und Y, AMAD: 10 μm bzw. nach Ingestion oder direkter Aufnahme ins Blut (z.B. über Wunde)

	INHALATION AMAD: **10 μm**		**INGESTION**	**INJEKTION**
STOFFKLASSE	W	Y	-	-
f_1-WERT	2.0E-04	2.0E-04	2.0E-04	2.0E-04
ORGAN				
BLASE	4.6E-07	6.4E-08	6.8E-10	3.4E-06
BRUST	4.6E-07	6.4E-08	6.8E-10	3.4E-06
OBERER DICKDARM	4.7E-07	7.9E-08	1.6E-08	3.4E-06
UNTERER DICKDARM	5.0E-07	1.1E-07	4.9E-08	3.4E-06
DÜNNDARM	4.6E-07	6.7E-08	3.4E-09	3.4E-06
GEHIRN	4.6E-07	6.4E-08	6.8E-10	3.4E-06
HAUT	4.6E-07	6.4E-08	6.8E-10	3.4E-06
HODEN	4.6E-07	6.4E-08	6.8E-10	3.4E-06
KNOCHEN-OBERFLÄCHE	**2.4E-03**	**3.2E-04**	**3.5E-06**	**1.7E-02**
LEBER	4.0E-06	5.6E-07	5.9E-09	3.0E-05
LUNGE	3.6E-06	5.9E-05	6.8E-10	3.4E-06
MAGEN	4.6E-07	6.5E-08	1.8E-09	3.4E-06
MILZ	4.6E-07	6.4E-08	6.8E-10	3.4E-06
NEBENNIEREN	4.6E-07	6.4E-08	6.8E-10	3.4E-06
NIEREN	4.6E-07	6.4E-08	6.8E-10	3.4E-06
OVARIEN	4.6E-07	6.4E-08	6.8E-10	3.4E-06
PANKREAS	4.6E-07	6.4E-08	6.8E-10	3.4E-06
ROTES KNOCHENMARK	1.9E-04	2.6E-05	2.8E-07	1.4E-03
SCHILDDRÜSE	4.6E-07	6.4E-08	6.8E-10	3.4E-06
THYMUS	4.6E-07	6.4E-08	6.8E-10	3.4E-06
UTERUS	4.6E-07	6.4E-08	6.8E-10	3.4E-06
EFFEKTIV	9.6E-05	2.0E-05	1.4E-07	6.9E-04