©Naturwissenschaftlich-Medizinischen Vereinigung in Salzburg, download unter www.biologiezentrum.at

Ber. nat.-med. Ver. Salzburg	Band 2	S. 7-25	Salzburg, April 1976

DIE STRAHLENBELASTUNG DES ATEMTRAKTS BEI DER INHALATION NATÜRLICH RADIOAKTIVER NUKLIDE

von

W. HOFMANN und F. STEINHÄUSLER

Aus dem Institut für Physik der Universität Salzburg (Vorstand: Univ.-Prof. Dr. E. Pohl) und dem Forschungsinstitut Gastein der Österreichischen Akademie der Wissenschaften

1) Einleitung

Bereits im Jahre 1879 zeigten epidemiologische Untersuchungen an Bergleuten der Uranbergwerke von Schneeberg und Joachimsthal ein gehäuftes Auftreten von Lungenkrebs, der als sogenannte "Schneeberger Krankheit" schon seit langem bekannt war (1, 2). Spätere eingehende Untersuchungen (3) in diesem Gebiet ergaben, daß mit Sicherheit 75 bis 80 % aller Todesfälle von Bergleuten durch Lungenkarzinome verursacht wurden. Als Ursache für dieses gesteigerte Krebsrisiko wurden die in der Grubenluft in hohen Konzentrationen vorkommenden radioaktiven Nuklide Radon und seine Zerfallsprodukte erkannt.

Die in der Natur vorkommenden Edelgase ^{222}Rn (Radon) und ^{220}Rn (Thoron) stammen aus dem im Boden und im Baumaterial unserer Häuser vorkommenden ^{226}Ra, bzw. ^{232}Th und gelangen durch Diffusion in die Luft. Dort zerfallen sie in ihre Tochterprodukte, die sich als Schwermetallatome rasch an das vorhandene Aerosol anlagern.

Tab. 1 gibt einen Überblick über die Zerfallsreihen des Radon und Thoron.

In der Radon-Zerfallsreihe folgt auf die sog. kurzlebigen Zerfallsprodukte RaA - RaC' das langlebige RaD mit etwa 20 Jahren Halbwertszeit. Infolge seiner langen Halbwertszeit kommt dieses Nuklid samt den weiteren Zerfallsprodukten RaE und RaF nur in sehr kleinen Konzentrationen vor, sodaß es für unser Problem nicht mehr berücksichtigt werden muß.

Bei der Atmung werden diese Nuklide in den Körper aufgenommen und liefern so einen wesentlichen Beitrag zur natürlichen Strahlenbelastung des Menschen. Dabei zeigt sich in der Aufnahme und der Verteilung im Körper ein großer Unterschied zwischen dem Edelgas einerseits und den festen Zerfallsprodukten andererseits (4, 5). Während sich für Radon bald ein sogenanntes "Löslichkeitsgleichgewicht" für die verschiedenen Gewebe einstellt,

*) Anschrift der Verfasser:
Univ.-Ass. Dr. W. HOFMANN, Univ.-Ass. Dr. F. STEINHÄUSLER
Institut für Physik, Universität Salzburg, Akademiestr. 26, A-5020 Salzburg

Tab.1: ÜBERSICHT ÜBER DIE RADON- UND THORON-ZERFALLSREIHE

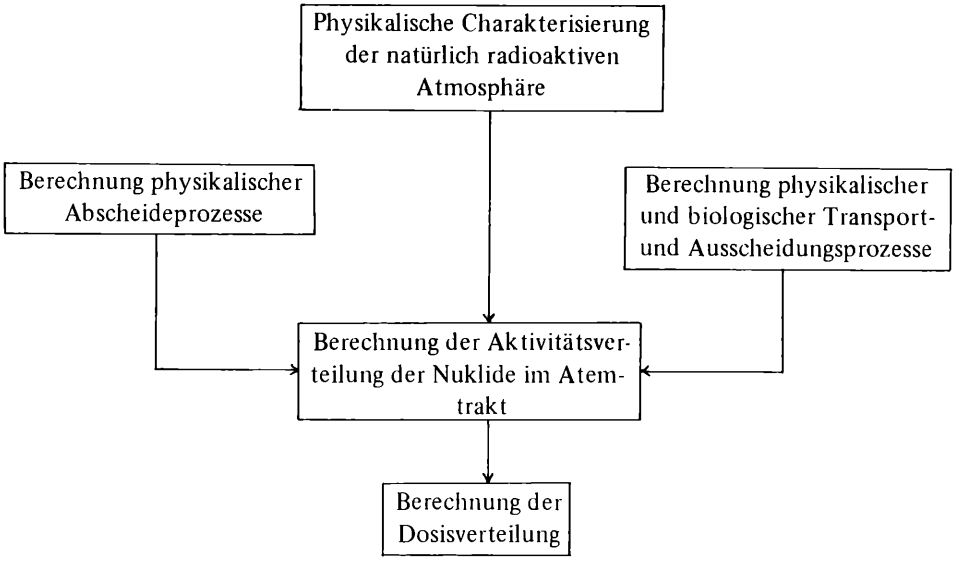
NUKLID	HALBWERTSZEIT	STRAHLUNG
Rn (^{222}Rn)	3.825 d	
RaA (^{218}Po)	3.05 min	
RaB (^{214}Pb)	26.8 min	β, γ
RaC (^{214}Bi)	19.7 min	β, γ
RaC' (^{214}Po)	164 µs	
RaD (^{210}Pb)	19.4 a	β
RaE (^{210}Bi)	5.01 d	β
RaF (^{210}Po)	138.4 d	
Tn (^{220}Rn)	54.5 s	
ThA (^{218}Po)	0.158 s	
ThB (^{212}Pb)	10.64 h	β, γ
ThC (^{212}Bi)	60.5 min	α (36%), γ
		α (64%), γ
ThC' (^{212}Po)	0.3 µs	
ThC'' (^{208}Tl)	3.1 min	β, γ

wirkt der Atemtrakt für die Zerfallsprodukte wie ein Filter, an dem sie abgeschieden und akkumuliert werden. Ihre Konzentration erreicht dort so hohe Werte, daß für die Strahlenbelastung nur die Zerfallsprodukte berücksichtigt werden müssen. Es ist vor allem die α-Strahlung, die infolge ihrer hohen Energie und kurzen Reichweite eine hohe Dosis an das umgebende Gewebe abgibt. Dadurch erhalten bestimmte Teile des Atemtrakts die bei weitem höchste Strahlungsbelastung im Körper, was bei hohen Zerfallsproduktkonzentrationen in der Luft zu einem erhöhten Krebsrisiko führen kann.

Zum Problem der Ablagerung dieser Nuklide im Atemtrakt gibt es eine Vielzahl von experimentellen und theoretischen Untersuchungen. Da es unmöglich ist, die Feinverteilung der abgelagerten Nuklide im menschlichen Atemtrakt experimentell zu bestimmen, verwendet man geeignete theoretische Modelle. Das bedeutet, daß komplexe Vorgänge mit großer

biologischer Variabilität modellmäßig soweit vereinfacht werden, daß alle Vorgänge mathematisch vollständig beschrieben werden können.

Um von einer bestimmten radioaktiven Atmosphäre als Ausgangssituation zu einer Dosisverteilung im Atemtrakt zu gelangen, müssen folgende Schritte durchgeführt werden:



2) Charakterisierung der natürlich radioaktiven Atmosphäre

Die Radon- und Thoronkonzentration in unserer Atemluft ist starken örtlichen und zeitlichen Schwankungen unterworfen (6). In der Freiluft werden die aus dem Boden diffundierten radioaktiven Edelgase in große Höhen transportiert und dadurch stark verdünnt. In Wohnräumen können sich die aus dem Baumaterial stammenden Gase nur in einem relativ kleinen Luftvolumen ausbreiten, was zu erhöhten Konzentrationen führt. Das gilt sinngemäß auch für die Verhältnisse in Bergwerken. Für die zeitlichen Änderungen sind vor allem die verschiedenen meteorologischen Größen, wie Temperatur, Luftdruck usw., sowie die Belüftungsverhältnisse in Räumen verantwortlich (7, 8). Durch Luftaustausch und Abscheidung am Boden und an den Wänden erreichen die Zerfallsprodukte im Mittel nie das radioaktive Gleichgewicht mit ihren gasförmigen Mutternukliden, sondern sind stets in geringen Konzentrationen (gemessen im Aktivitätsmaß) vorhanden.

Für die Berechnung der Strahlenbelastung ist die genaue Kenntnis der Aktivitätskonzentrationen aller inhalierten Nuklide in der eingeatmeten Luft Voraussetzung. Da sich die Menschen unserer Zivilisation vorwiegend in Häusern aufhalten, sind vor allem die Raumluftkonzentrationen von Bedeutung. Tab. 2 zeigt typische Konzentrationen von Radon und Thoron, sowie die Konzentrationsverhältnisse der kurzlebigen Zerfallsprodukte (7, 9).

©Naturwissenschaftlich-Medizinischen Vereinigung in Salzburg; download unter www.biologiezentrum.at

Tab.2: TYPISCHE KONZENTRATIONEN IN DER LUFT AN ORTEN OHNE BESONDERES RADIOAKTIVES MILIEU

MESSTELLEN	^{222}Rn pCi/l	RaB/Rn	Tn (^{220}Rn) pCi/l	ThB/Tn
FREILUFT ÜBER DEM FESTLAND	0.03-0.4	0.3-0.6	0.06-1.0	0.02
WOHN- UND ARBEITS-RÄUME	0.3-3.0	0.3-0.8	0.2-1.1	0.01-0.5

Die beim Zerfall von Radon bzw. Thoron gebildeten Zerfallsprodukte liegen zunächst in Form freier Atome und Ionen vor, ehe sie sich mit einer mittleren Halbwertszeit von etwa einer Minute an das in der Luft stets vorhandene Aerosol anlagern. Die nichtangelagerten Nuklide sind insofern für die Strahlenbelastung von Bedeutung, da sie wegen ihres hohen Diffusionskoeffizienten von etwa 0,05 $cm^2\ s^{-1}$ (angelagerte Atome: $10^{-4} - 10^{-6}$ $cm^2\ s^{-1}$) fast vollständig im oberen Teil des Atemtrakts, dem Tracheobronchialbereich, abgelagert werden. Angegeben wird die Zahl der nichtangelagerten Atome durch den f-Wert, der das Verhältnis der Anzahl der freien Atome eines bestimmten Nuklids zur Gesamtzahl aller Atome dieses Nuklids angibt.

Für natürliches Aerosol in einer Stadt mit einer mittleren Konzentration von 5.10^4 Teilchen/cm^3 können für Radon und seine Zerfallsprodukte folgende Werte angenommen werden (10):

RaA: $f = 0{,}12 - 0{,}27$

RaB: $f = 0{,}002 - 0{,}01$

RaC: $f \leqslant 0{,}001$

Für die am Aerosol angelagerten Atome hängt die Abscheidung im Atemtrakt von der Korngrößenverteilung des Aerosols ab. Je kleiner der Teilchendurchmesser, desto größer ist die Diffusionskonstante und damit auch die Depositionswahrscheinlichkeit. Die Häufigkeitsverteilung der Teilchendurchmesser ist für viele Aerosole eine logarithmisch normale Verteilung. Ein bestimmtes Aerosol kann deshalb durch die beiden Größen AMAD (activi-

ty median aerodynamic diameter) und der geometrischen Standardabweichung σ_g vollständig charakterisiert werden. Für natürliches Aerosol liegt der AMAD im Bereich von 0,05 – 0,2 μm mit einem σ_g von 1,5 bis 4,0 (11).

3) Lungenmodelle

Für die quantitative Beschreibung des Verhaltens radioaktiven Aerosols in der Lunge muß eine genaue Kenntnis der Geometrie und der Dimensionen der Luftwege vorausgesetzt werden. Heute werden im wesentlichen zwei formalisierte Lungenmodelle verwendet, das FINDEISEN-LANDAHL-Modell (12, 13, 14) und das WEIBEL-Modell (15). In beiden Modellen werden die Luftwege als Hohlzylinder dargestellt, die sich stets in zwei weitere Röhren teilen, wobei die Durchmesser immer kleiner werden.

a) *LANDAHL-Modell*

Das von LANDAHL angegebene Lungenmodell teilt den Atemtrakt in 9 Regionen von denen 6 auf den Bronchialbaum und 3 auf den Alveolarbereich entfallen. In Tab. 3 ist die Anzahl der Atemwege und ihre Dimensionen in den einzelnen Regionen während der Inspirationslage entsprechend diesem Modell angegeben.

Tab.3: LUNGENMODELL NACH LANDAHL

REGION	ANZAHL	RADIUS (cm)	LÄNGE (cm)	OBERFL. (cm^2)	M.T.ZEIT +	FUNKTIONS MERKMAL
1. TRACHEA	1	0.8	12	60	8	KONDUKTIVE
2. HAUPTBRONCHIEN	2	0.5	6	40	8	ZONE MIT
3. LOBARE BRONCHIEN	12	0.2	3	45	10	CILIAR-
4. SEGMENTALE BR.	100	0.1	1.5	100	15	EPITHEL
5. SUBSEGMENT. BR.	800	0.075	0.5	200	25	
6. TERMINALE BR.	6.10^4	0.03	0.3	3400	70	
7. RESPIRATOR. BR.	2.10^5	0.025	0.15	4700		RESPIRAT.
8. ALVEOLAR DUCT.	2.10^6	0.02	0.05	30000		ZONE MIT
9. ALVEOLAR SACC.	5.10^7	0.02		250000		ALVEOLEN

+ MUCUS-TRANSIT-ZEIT

b) *WEIBEL-Modell*

senschaftlich-Medizinischen Vereinigung in Salzburg; download unter www.biologiezentrum.at

Neuere morphologische Untersuchungsmethoden machten es E. WEIBEL möglich, die Lungendimensionen viel genauer zu bestimmen. Er teilte den Atemtrakt in 23 Generationen, wobei alle Röhren einer Generation gleiche Länge und Durchmesser haben, und gleichweit vom Ausgangspunkt des Systems entfernt sind. Das von WEIBEL als Modell A bezeichnete nimmt reguläre Dichotomie an, d.h. die beiden Röhren, die zu einem Verzweigungspunkt gehören, haben immer gleiche Länge, Durchmesser und Verzweigungswinkel. Tab. 4 gibt die einzelnen Parameter für die Generationen des WEIBEL-Modells A an.

Tab.4: LUNGENMODELL NACH WEIBEL (MODELL A)

REGION	GENERATION	ANZAHL	RADIUS (cm)	LÄNGE (cm)	OBERFL. (cm^2)	M.T.ZEIT +
1. TRACHEA	0	1	0.9000	12.0	67.8	8
2. HAUPTBRONCHIEN	1	2	0.6100	4.76	36.5	6
3. LOBARE BRONCHIEN	2	4	0.4150	1.90	19.8	8
	3	8	0.2800	0.76	10.7	3
4. SEGMENTALE BR.	4	16	0.2250	1.27	28.7	14
	5	32	0.1750	1.07	37.6	12
	6	64	0.1400	0.90	50.7	10
5. SUBSEGMENT. BR.	7	128	0.1150	0.76	70.3	32
	8	256	0.0930	0.64	95.7	27
	9	512	0.0770	0.54	134	23
6. TERMINALE BR.	10	$1.02.10^3$	0.0650	0.46	192	445
	11	$2.05.10^3$	0.0545	0.39	274	378
	12	$4.09.10^3$	0.0475	0.33	403	320
	13	$8.19.10^4$	0.0410	0.27	570	261
	14	$1.63.10^4$	0.0370	0.23	876	223
	15	$3.27.10^4$	0.0330	0.20	1360	194
	16	$6.55.10^4$	0.0300	0.165	2040	160
7. RESPIRATOR. BR.	17	$1.31.10^5$	0.0270	0.141		
	18	$2.62.10^5$	0.0250	0.117		
	19	$5.24.10^5$	0.0235	0.099		
8. ALVEOL. DUCT.	20	$1.05.10^6$	0.0225	0.083		
	21	$2.09.10^6$	0.0215	0.070		
	22	$4.19.10^6$	0.0205	0.059		
9. ALVEOL. SACC.	23	$8.39.10^6$	0.0205	0.050		
10. ALVEOLEN		≈0.02				

+ MUCUS-TRANSIT-ZEIT

4) Physikalische Mechanismen der Abscheidung von Aerosolen im Atemtrakt

Für die Abscheidung von Aerosolteilchen im Atemtrakt sind im wesentlichen 3 physikalische Prozesse verantwortlich:

a) Sedimentation (Abscheidung durch die Schwerkraft)

b) Impaktion (Abscheidung durch Trägheitskräfte in Krümmungen)

c) Diffusion (Abscheidung durch die Wärmebewegung)

Die einzelnen Prozesse hängen dabei sehr stark vom Teilchenradius ab. Oberhalb etwa 1 μm überwiegt die Abscheidung durch Sedimentation und Impaktion. Bei Teilchengrößen unterhalb 1 μm ist hingegen die Diffusion der vorherrschende Prozeß. Für die Abscheidung der kurzlebigen natürlichen Zerfallsprodukte, angelagert am natürlichen Aerosol, spielt daher nur die Diffusionsabscheidung eine Rolle, die nach GORMLEY und KENNEDY (16) für zylindrische Röhren mit laminarer Strömung berechnet werden kann. Das Minimum der Abscheidung unlöslicher Teilchen wird bei Teilchengrößen von etwa 0,3 - 0,5 μm erreicht.

Neben der Teilchengröße hängt die Abscheidewahrscheinlichkeit an einem bestimmten Ort außerdem noch von Form, Dichte und Löslichkeit des Teilchens, sowie von den Strömungsverhältnissen im Atemtrakt ab. Außerdem kommt es beim Einatmen zu einem Wachstum der Aerosolteilchen in der feuchten Luft der Atemwege durch Wasserdampfkondensation.

Die meisten experimentellen Untersuchungen auf diesem Gebiet befassen sich mit der Bestimmung der Gesamtabscheidung im Atemtrakt, die aus dem Verhältnis der gemessenen Teilchenkonzentrationen in Aus- und Einatmungsluft ermittelt werden kann. In Anbetracht der Vielfalt der die Abscheidung bestimmenden Größen und der biologischen Variabilität hinsichtlich der Geometrie des Atemtrakts zeigen die experimentellen Ergebnisse erwartungsgemäß große Streuungen (17 - 23).

Unter Verwendung der Lungenmodelle von LANDAHL oder WEIBEL und unter Annahme einer bestimmten Atmungscharakteristik kann man die gesamte Abscheidewahrscheinlichkeit in einer Region durch die Kombination der einzelnen Abscheidewahrscheinlichkeiten für Diffusion, Sedimentation und Impaktion berechnen. Daraus läßt sich dann die Abscheiderate R_i in der Region i, das ist die Anzahl der in dieser Region abgeschiedenen Teilchen, im Verhältnis zur Gesamtzahl der eingeatmeten Teilchen, bestimmen.

Abb. 1 zeigt die berechneten Abscheideraten in Abhängigkeit von der Teilchengröße für den Tracheobronchialbereich (Region 1 - 6) und den Alveolarbereich (Region 7 - 9) unter Verwendung des LANDAHLschen Lungenmodells (24).

©Naturwissenschaftlich-Medizinischer Verein in Salzburg; download unter www.biologiezentrum.at

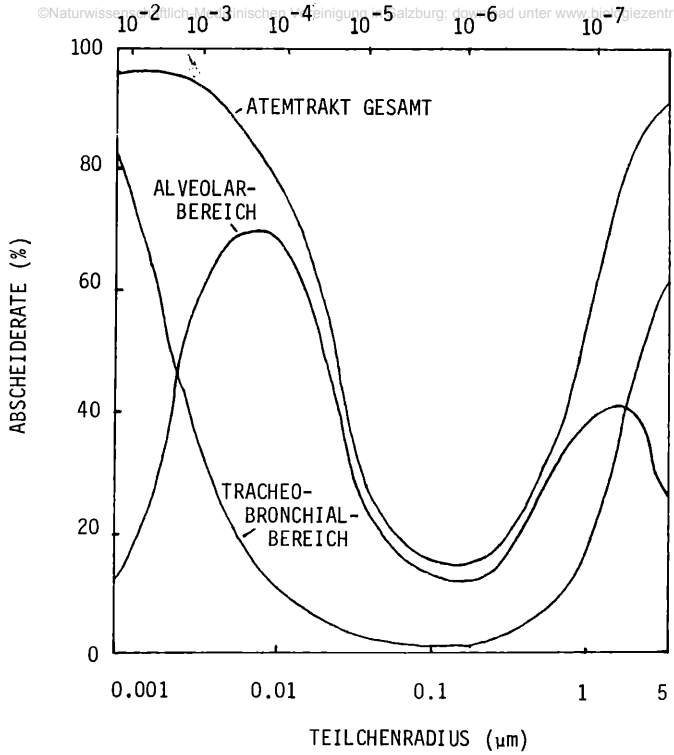


Abb.1: ABSCHEIDERATE VON AEROSOLEN IM MENSCHLICHEN ATEMTRAKT IN ABHÄNGIGKEIT VON DER TEILCHENGRÖSSE
(LANDAHL-MODELL: ATEMVOLUMEN = 1l, MINUTENVOLUMEN = 15l/min, ATEMPERIODE = 4s)

In beiden Bereichen sinkt die Abscheidung mit zunehmender Teilchengröße infolge der Abnahme der Diffusionsabscheidung zunächst ab und steigt dann infolge der zunehmenden Abscheidung durch Trägheit und Sedimentation wieder stark an.

In Tab. 5 ist die resultierende Abscheiderate der Zerfallsprodukte angegeben (24).

Daraus sieht man, daß für trägerfreie Atome (ThA) die Abscheiderate im Bronchialbaum etwa 80 %, im Alveolarbereich jedoch infolge der Vorfilterung nur noch etwa 3 % beträgt. Demgegenüber werden von den angelagerten Atomen (RaC, ThB, ThC) nur etwa 4 % im Bronchialbaum abgeschieden, jedoch etwa 30 % im Alveolarbereich. Die Gesamtabscheidung im Atemtrakt beträgt mit Ausnahme des ThA etwa 40 %.

Tab.5: MITTLERE ABSCHEIDERATEN DER KURZLEBIGEN Rn- UND Tn-ZERFALLSPRODUKTE IN DEN EINZELNEN REGIONEN DES ATEMTRAKTS (LANDAHL-MODELL)

REGION	ABSCHEIDERATE R (%)			
	ThA +	RaA	RaB	RaC ThB ThC + +
1. TRACHEA	6	1.5	0.1	0.05
2. HAUPTBRONCHIEN	4	1	0.06	0.03
3. LOBARE BR.	8	2	0.15	0.07
4. SEGMENTALE BR.	13	3	0.3	0.15
5. SUBSEGMENTALE BR.	20	5	0.5	0.4
6. TERMINALE BR.	35	10	3	3
7.-9. ALVEOL.-BEREICH	3	25	30	30
1.-9. GES. ATEMTRAKT	89	47	34	34

+ 100% trägerfreie Atome

++ 100% angelagerte Atome

5) Transport- und Ausscheidungsprozesse

Nach ihrer Abscheidung auf dem Bronchial- und Alveolarepithel werden die Zerfallsprodukte von den im Atemtrakt ablaufenden Transportprozessen erfaßt und zum Teil aus dem Atemtrakt abtransportiert. Die im Alveolarraum abgeschiedene Aktivität kann durch direkte Resorption oder durch Diffusion sehr rasch in den Blutkreislauf gelangen (4, 5). Voraussetzung dafür ist, daß die Zerfallsprodukte in löslicher Form * vorliegen. Ein weiterer Teil der Zerfallsprodukte wird unter Mitwirkung phagozytativer Prozesse zu den terminalen Bronchien transportiert, wo sie dann von der Ciliarbewegung erfaßt werden. Ein dritter Ausscheidungsweg aus dem Alveolarbereich führt in das Lymphsystem und in weiterer Folge in das Blut.

Die im Bronchialbaum abgeschiedene Aktivität wird mit der Mucusschicht auf dem Bronchialepithel durch die Ciliarbewegung den Bronchialbereich hinauftransportiert. Während dieses Transportes zerfällt ein Teil der radioaktiven Nuklide. Die restlichen Zerfalls-

produkte erreichen entweder den Rachenraum und gelangen durch Verschlucken in den Magen-Darm-Trakt oder diffundieren durch das Bronchialepithel in das Blut.

Somit ist die im stationären Zustand sich einstellende Aktivitätsverteilung im Atemtrakt verschieden von der primären Verteilung bei der Abscheidung und wird bestimmt durch die Geschwindigkeit der einzelnen Transportprozesse.

6) Aktivitätsverteilung im Atemtrakt

Die Aktivitätsverteilung für ein bestimmtes Nuklid in den einzelnen Bereichen des Atemtrakts ergibt sich aus der Bilanz zwischen zugeführter Aktivität (Abscheidung, Ciliartransport, radioaktive Nachbildung) und abtransportierter Aktivität (Ciliartransport, Ausscheidung, radioaktiver Zerfall). Im Gegensatz zum pulmonären Bereich ist zu erwarten, daß im Bronchialbereich infolge der Inhomogenität der Abscheidung und der Ciliargeschwindigkeit die im Gleichgewichtszustand entstehende Aktivitätsverteilung ebenfalls inhomogen ist. Die durch Überlagerung der einzelnen Prozesse entstehende Gleichgewichtsaktivität kann mathematisch durch ein System linearer Differentialgleichungen dargestellt werden. Als Lösungen des Gleichungssystems erhält man die in der Mucusschicht vorhandene Aktivität pro Flächeneinheit. Die dünne, mit Zerfallsprodukten durchmischte Mucusschicht stellt eine praktisch flächenförmige Strahlenquelle dar, die das darunterliegende strahlenempfindliche Epithelgewebe bestrahlt.

7) Bestimmung der Dosisverteilung

Bei der Inhalation der Rn- und Tn-Zerfallsprodukte ist die β- und γ-Dosis vernachlässigbar gegenüber der α-Dosis. Deshalb wird die Strahlenbelastung des Atemtrakts allein durch die Aktivitätsverteilung der α-strahlenden Nuklide bestimmt.

a) *Mittlere Dosis im bronchialen und pulmonären Bereich*

Die bei der Inhalation der Zerfallsprodukte absorbierte Energie im bronchialen und pulmonären Bereich des Atemtrakts kann für einen Referenz-Menschen (ICRP Reference Man mit 70 kg Körpergewicht) (25), für den alle physiologischen Größen bekannt sind, berechnet werden. Abb. 2 zeigt das Ergebnis einer solchen Berechnung, wobei folgende mittlere Konzentrationen angenommen wurden:

Rn: 0,41 pCi/l

Tn: 0,18 pCi/l

Rn	RaA	RaB	RaC	=	1	0,9	0,6	0,4
Tn	ThA	ThB	ThC	=	1	1	0,02	0,01.

Diese Aktivitäten entsprechen den Mittelwerten, die wir in Salzburger Wohnräumen gemessen haben (9).

Das ist auch dann der Fall, wenn das an ein Aerosol gebundene Schwermetallatom von diesem abgelöst wird.

Strahlenschutz-Tagung Medizinische Physik Salzburg in Salzburg, download unter www.biologiezentrum.at

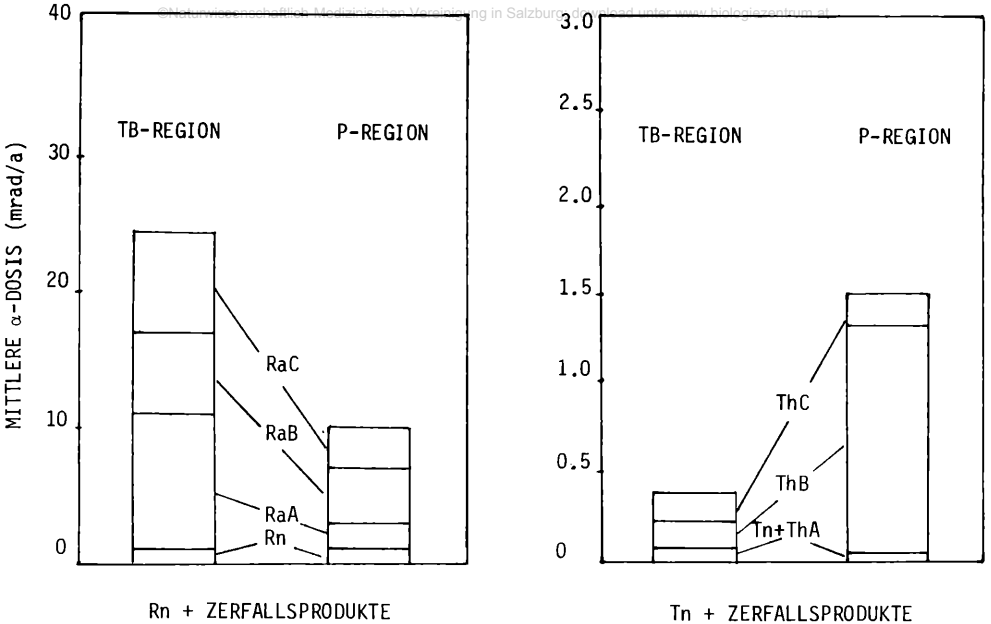


Abb.2: MITTLERE DOSISLEISTUNG IM ATEMTRAKT DURCH INHALATION VON RADON, THORON UND DEREN ZERFALLSPRODUKTEN

Daraus geht hervor, daß die durch die Inhalation von Radon-Zerfallsprodukten bewirkte mittlere Bronchialdosis größer ist als die mittlere Dosis im Pulmonärbereich. Umgekehrt liegt bei der Inhalation von Thoron-Zerfallsprodukten die pulmonäre Dosis – bedingt durch die relativ starke Anreicherung des längerlebigen ThB – deutlich höher als die bronchiale Dosis. Vergleicht man die Dosiswerte der Radon- und Thoron-Zerfallsprodukte miteinander, so zeigt sich, daß im Normalfall die Strahlenbelastung durch Thoron-Zerfallsprodukte erheblich kleiner ist und nur etwa 10 % der Gesamtbelastung beträgt.

b) *Dosis im Bereich der Basalzellen des Bronchialepithels*

Aus vielen Untersuchungen weiß man, daß für die biologische Wirkung der natürlichen Strahlungsbelastung im Atemtrakt – insbesondere für die Krebsentstehung – die Basalzellen des Bronchialepithels als die kritischen Zellen anzusehen sind. Infolge der Absorption in der Schleimschicht, der Energieabhängigkeit des Bremsvermögens und der endlichen Reichweite der α-Teilchen nimmt die α-Dosis im Bronchialepithel mit zunehmender Tiefe im Gewebe stark ab.

Eine der größten Unsicherheitsfaktoren bei der Berechnung der Basalzellendosis ist der Abstand der Basalzellen von der Oberfläche der Schleimschicht auf dem Bronchialepithel, in der die Zerfallsprodukte eingelagert sind. Im Bereich der Trachea und der Hauptbronchien dürfte dieser Abstand etwa 50 - 100 μm betragen. Mit zunehmender Tiefe im Bronchialbaum nimmt der Abstand der Basalzellenschicht ab und erreicht etwa 10 - 20 μm beim Übergang zum Alveolarbereich.

©Naturwissenschaftlich-Medizinischen Vereinigung in Salzburg, download unter www.biologiezentrum.at

In Abb. 3 ist die resultierende mittlere α-Dosisleistung in den Basalzellen der einzelnen Regionen angegeben, die bei der Inhalation der kurzlebigen Radon-Zerfallsprodukte zu erwarten ist (normiert auf eine Konzentration von je 1 pCi/l) (24).

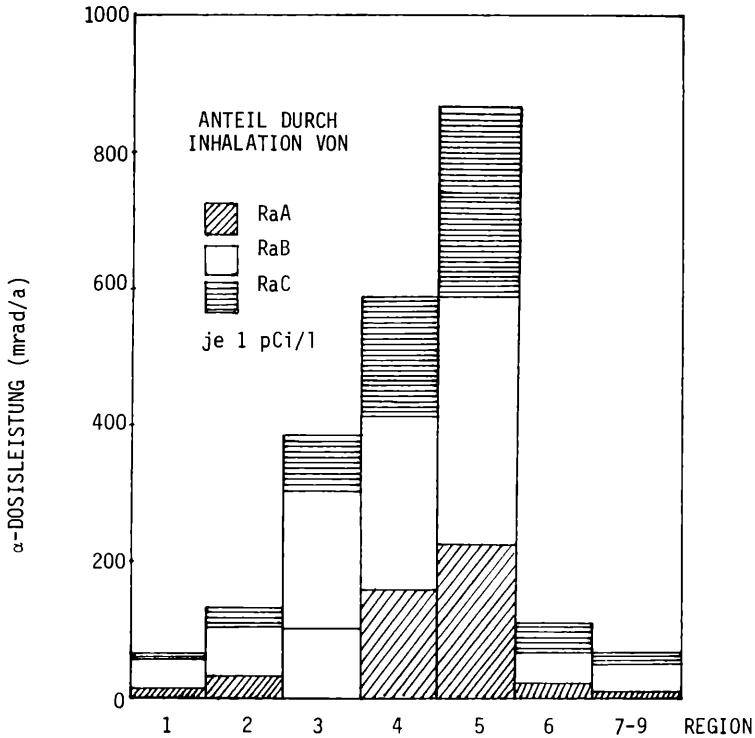


Abb.3: MITTLERE NATÜRLICHE STRAHLENBELASTUNG DES ALVEOLARGEWEBES UND DER BASALZELLEN IN DEN BRONCHIEN DURCH INHALATION VON Rn-ZERFALLSPRODUKTEN

Man sieht, daß im Bereich der mittleren Bronchien ein ausgeprägtes Maximum auftritt. Dies erklärt die Tatsache, daß die meisten Lungenkarzinome von Uranbergarbeitern in diesem Bereich festgestellt wurden.

8) Vergleich von Dosisberechnungen verschiedener Autoren

Dosisberechnungen im Atemtrakt wurden bereits von mehreren Autoren durchgeführt. Die wichtigsten unter ihnen sind: ALTSHULER et al. (26), JACOBI (24, 27), HAQUE et al. (28) und HARLEY et al. (29, 30).

Je nachdem welche Modellannahmen gewählt wurden, ergaben sich Unterschiede zwischen den einzelnen Dosisberechnungen in folgenden Punkten:

a) Referenzatmosphäre (Aerosolverteilung, Anzahl der nichtangelagerten Atome und Aerosolverteilung aus eigenen experimentellen Untersuchungen oder aus Literaturangaben)

b) Wahl des Lungenmodells Medizinischen Vereinigung in Salzburg; download unter www.biologiezentrum.at
c) Annahmen über die Transportgeschwindigkeit der Mucusschicht (Extrapolation aus experimentellen Untersuchungen)
d) Annahmen über die Aktivitätsverteilung in der Mucusschicht und deren Dicke
e) Abbremsung der α-Teilchen im Gewebe (experimentelle Untersuchungen oder Literaturwerte)
f) Annahmen über den Abstand der Basalzellen von der Oberfläche des Bronchialepithels (Extrapolation experimenteller Daten).

Die aus den verschiedenen Modellberechnungen erhaltenen Werte für die Basalzellendosis der einzelnen Bronchialgenerationen sind in Abb. 4 zusammengefaßt.

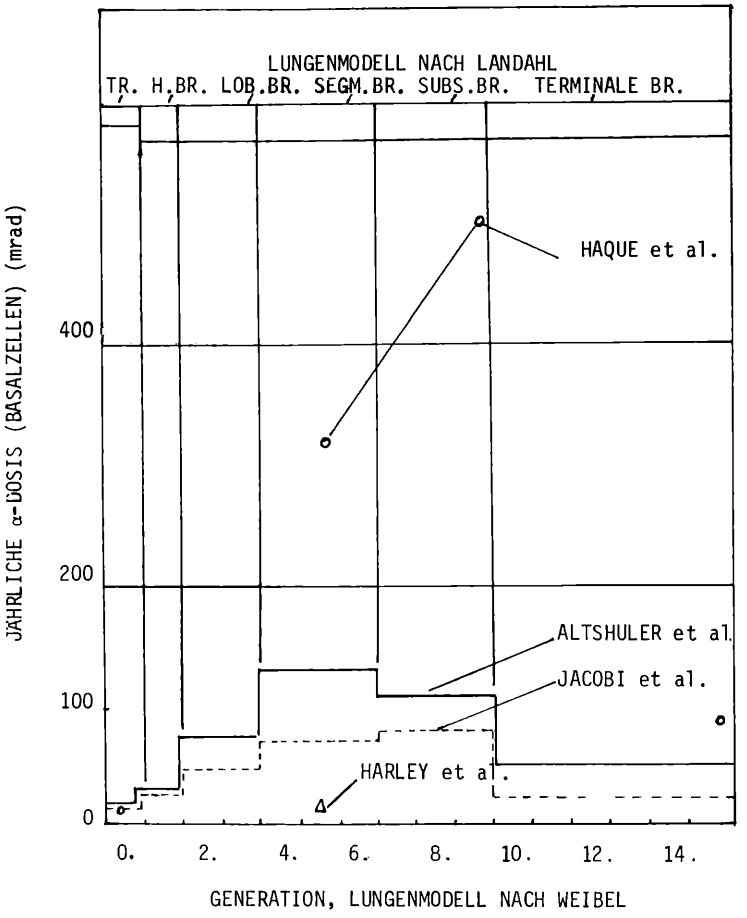


Abb.4: NACH VERSCHIEDENEN DOSIMETRISCHEN MODELLEN ABGESCHÄTZTE MITTLERE NATÜRLICHE STRAHLENEXPOSITION DER BASALZELLSCHICHT DES BRONCHIALEPITHELS

Die Dosiswerte beziehen sich auf die bereits in Abb. 2 verwendeten Aktivitätskonzentrationen als Referenzatmosphäre mit einem Atemminutenvolumen von 15, 2 l/min. Während ALTSHULER und JACOBI die Dosisleistung für die Basalzellen in allen Bronchialregionen berechnet haben, liegen von HAQUE et al. nur die Werte für die 0., 5., 9. und 16. Generation, und von HARLEY et al. nur für die segmentalen Bronchien vor.

Übereinstimmend zeigt sich bei allen vier Modellberechnungen, daß die Basalzellen in den segmentalen und subsegmentalen Bronchien (nach LANDAHL) bzw. in der 4.-9. Generation (nach WEIBEL) der höchsten Strahlenbelastung ausgesetzt sind. Die einzelnen Dosiswerte in diesem Bereich zeigen aber deutliche Unterschiede, deren Ursache allein in den verschiedenen Modellannahmen liegt, von denen sich die Wahl des Lungenmodells am stärksten auswirkt.

9) Das Depositions- und Retentionsmodell der ICRP Lung Task Group

Um für Strahlenschutzzwecke bestimmte Grenzwerte der inhalierten Radionuklide angeben zu können, hat die ICRP (International Comission on Radiological Protection) die Lung Task Group beauftragt, ein vereinfachtes und allgemein verbindliches Modell zu erstellen (31, 32, 33). Damit kann sowohl die Aktivitätsverteilung im Atemtrakt, als auch die Zeitabhängigkeit der Verteilung im Restkörper bestimmt werden. Zu diesem Zweck wurde der Atemtrakt in drei Bereiche, sog. Kompartments, unterteilt, die sich hinsichtlich ihrer anatomischen und funktionellen Eigenschaften unterscheiden:

1) Nasaler bzw. nasopharyngealer Bereich (N-P), der sich vom Nasen-Rachenraum bis zum Kehlkopf erstreckt.
2) Tracheobronchialer Bereich (T-B), bestehend aus der Trachea und dem mit einem Ciliarepithel versehenen Teil des Bronchialbaums.
3) Pulmonärer Bereich (P), der die respiratorischen Bronchioli und die gesamte Alveolarregion erfaßt.

a) *Depositionsmodell*

Die Depositionswahrscheinlichkeit in den drei Kompartments wurde unter Verwendung des LANDAHL-Modells berechnet. Abb. 5 zeigt die abgeschiedenen Aktivitätsanteile bei Nasenatmung für den Referenz-Mensch in Abhängigkeit vom AMAD des radioaktiven Aerosols für den Bereich der Standardabweichung von 1,2-4,5.

Für den Bronchialbereich kann in 1. Näherung eine konstante Depositionswahrscheinlichkeit von etwa 8 % angenommen werden. Die Ablagerung im N-P-Bereich steigt mit zunehmenden AMAD monoton an, während sie im pulmonären Bereich infolge der Vorfilterung im nasalen und bronchialen Teil monoton abnimmt.

b) *Ausscheidungs(Clearence)-Modell*

Bei der Kinetik der Ausscheidung muß die chemische Verbindung des Radionuklids berücksichtigt werden, da davon die Art und Geschwindigkeit der Ausscheidungsprozesse entscheidend abhängen. Deshalb unterscheidet man 3 Klassen von Verbindungen, die sich hinsichtlich ihrer Retention im Atemtrakt unterscheiden:

Klasse D für gut lösliche Verbindungen

Klasse W für mäßig lösliche Verbindungen

Klasse Y für schwerlösliche Verbindungen.

©Naturwissenschaftlich-Mathematischen Gesellschaft in Salzburg, download unter www.biologiezentrum.at

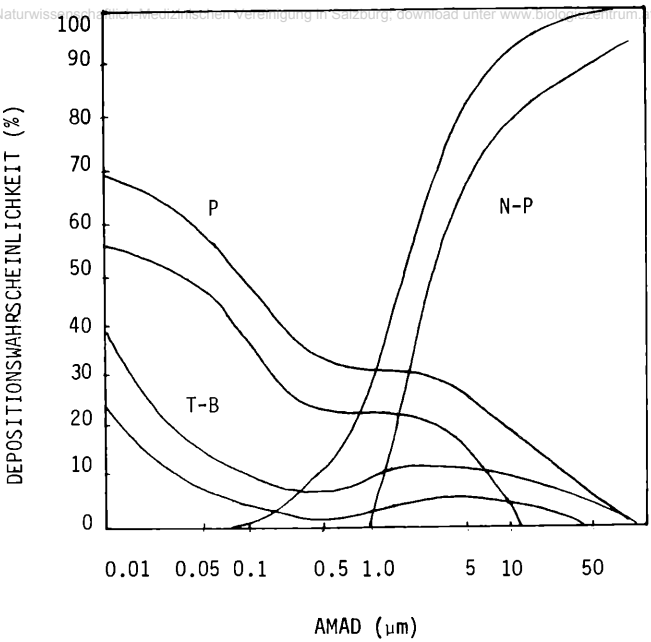


Abb.5: AEROSOLABLAGERUNG IN DEN EINZELNEN KOMPARTMENTS DES ATEMTRAKTS

(σ_g 1.2 - 4.5)

Die natürlich radioaktiven Nuklide, angelagert an das natürliche Aerosol zählen zu den gut löslichen Verbindungen und werden deshalb der Klasse D zugeordnet. In Abb. 6 ist das ICRP-Lungenmodell in seiner revidierten Form für Aerosole der Klasse D dargestellt (33).

D^{N-P}, D^{T-B} und D^{P} sind die Depositionswahrscheinlichkeiten in den drei Kompartments des Atemtrakts. Die Buchstaben a-j kennzeichnen die verschiedenen Transportwege in das Blut, den Magen-Darm-Trakt und das Lymphsystem. Für jeden Weg ist die biologische Halbwertszeit T und derjenige Teil f des im Kompartment abgelagerten Materials, der über diesen Weg abtransportiert wird, angegeben. Die beiden Transportwege f und g vom P-Bereich über den T-B-Bereich in den Magen-Darm-Trakt können für Aerosole der Klasse D vernachlässigt werden.

Die experimentellen Befunde von POHL und POHL-RÜLING (4, 5) zeigten jedoch, daß rund ein Drittel des im Alveolarraum abgelagerten Depots sehr rasch in den Blutkreislauf gelangt. Die im ICRP-Modell angegebene biologische Halbwertszeit für den Weg e von 0.5 Tagen ist deshalb nach unserer Ansicht falsch. Der wahre Wert muß bei wenigen Minuten liegen.

©Naturwissenschaftlich-Medizinischen Vereinigung in Salzburg; download unter www.biologiezentrum.at

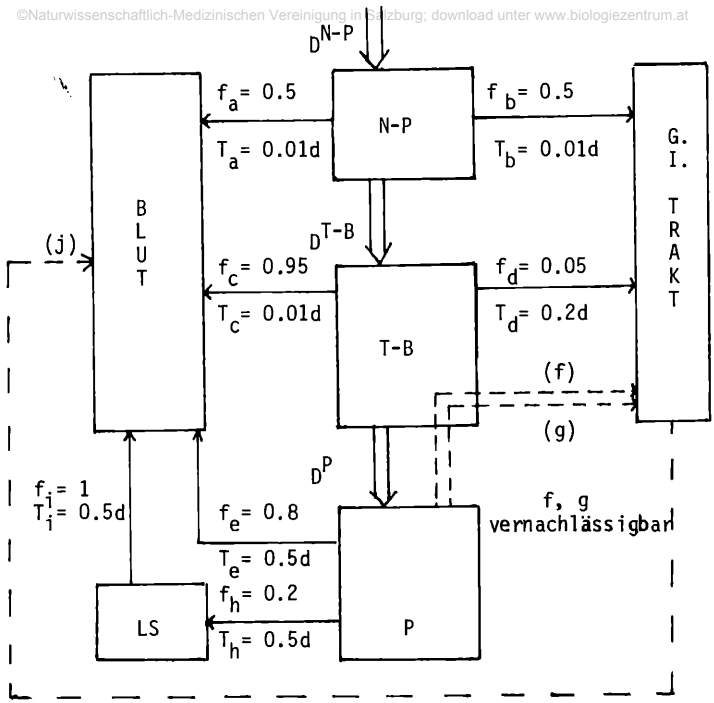


Abb.6: ICRP-LUNGENMODELL FÜR AEROSOLE DER KLASSE D

10) Einfluß des Lebensalters und der Tätigkeit auf die Strahlungsbelastung im Atemtrakt

Als Grundlage für die Berechnung der Strahlenbelastung durch natürlich radioaktive Nuklide werden heute das ICRP-Lungenmodell und die physiologischen Daten des ICRP-Reference Man verwendet. Beide beziehen sich auf den erwachsenen Referenz-Menschen und berücksichtigen weder die verschiedenen Veränderungen des wachsenden Organismus, noch die jeweilige körperliche Tätigkeit, von der das Atemminutenvolumen entscheidend abhängt. Dadurch ändern sich nicht nur die absoluten Dosiswerte, sondern auch die Form ihrer Verteilung im Atemtrakt. Infolge der Unterschiede in der Geometrie des Atemtrakts (Länge und Durchmesser der Generationen) zwischen Kindern und Erwachsenen ändern sich auch die Strömungsverhältnisse und damit die Depositionswahrscheinlichkeiten in den einzelnen Regionen. Weitere altersabhängige Faktoren sind u.a. das Gewicht des Atemtrakts, das Atemminutenvolumen und die Atemfrequenz. Mit Ausnahme der neuen Ergebnisse von HÖTTER (34) gibt es nur wenige Daten über die Altersabhängigkeit der eben angeführten Parameter, die überdies noch große Unterschiede zeigen.

Das ICRP-Lungenmodell kann mathematisch durch ein System linearer Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten, die den einzelnen Übergangsparametern zwischen den Kompartments entsprechen, beschrieben werden. Werden die konstanten Koef-

fizienten durch zeitabhängige ersetzt, so kann man damit die Altersabhängigkeit des Lungenmodells studieren.

Eine an unserem Institut von W. HOFMANN in Angriff genommene Untersuchung machte es sich zur Aufgabe, die Altersabhängigkeit mit einem Hybridrechner zu simulieren. Vorläufige Ergebnisse haben gezeigt, daß die Strahlenbelastung im Alter zwischen 5 und 10 Jahren ihr Maximum erreicht und die entsprechenden Werte für den Erwachsenen um einen Faktor 2 und noch mehr übertrifft (35).

Zusammenfassung

Durch die Inhalation der überall in der Luft vorkommenden radioaktiven Nuklide Radon, Thoron und deren Zerfallsprodukte erhalten Teile des Atemtrakts die höchste, durch natürliche Strahlenquellen verursachte Strahlenbelastung im menschlichen Körper. Die bei der Inhalation im Atemtrakt ablaufenden Vorgänge sind: Ablagerung des Aerosols, Transport der abgelagerten Aktivität in andere Regionen und letztlich die Ausscheidung aus dem Atemtrakt. Durch Überlagerung dieser Prozesse stellt sich in den einzelnen Regionen ein dynamisches Gleichgewicht ein. Da es experimentell nicht möglich ist, die resultierende Aktivitätsverteilung im menschlichen Atemtrakt zu bestimmen, verwendet man theoretische Modelle, die soweit vereinfacht sind, daß sie eine mathematische Beschreibung der physikalischen Vorgänge gestatten. Je nach den gewählten Modellen und ihrer Parameter erhalten die einzelnen Autoren stark unterschiedliche Ergebnisse, vor allem in der Größe der errechneten Dosiswerte. Alle Berechnungen zeigen jedoch, daß die Basalzellen der segmentalen und subsegmentalen Bronchien die höchsten Dosen erhalten. Sie sind daher als das "kritische Organ" bei der Inhalation natürlich radioaktiver Nuklide anzusehen. Bei Kindern und Jugendlichen sind sowohl hinsichtlich der Nuklidverteilung als auch der absoluten Dosiswerte starke Abweichungen von den bei Erwachsenen berechneten Werte zu erwarten. Zur Klärung dieser Frage ist am Institut eine Studie unter Benützung eines Hybridrechners zur Simulierung der verschiedenen Parameter im Gange.

Summary

Everywhere the atmosphere contains the radionuclides radon, thoron and their decay-products. Due to the inhalation of these nuclides parts of the respiratory tract receive the highest radiation burden from natural radiation sources in the human body. The following processes occur in the resperatory tract during inhalation: aerosol deposition, transport of the activity deposited into other parts and finally, clearance from the respiratory system. As a result of the superposition of these processes dynamic equilibrium conditions are reached in the individual regions. Since it is difficult to determine experimentally the resulting activity distribution within the respiratory system, theoretical models are used. These models are simplified to an extent, so they permit a mathematical description of the physical events involved. Depending on the model chosen and their parameters, the results from different authors show large discrepancies, especially for the dose values calculated. However, all calculations show that the basal cells of the segmental and subsegmental bronchials receive the highest dose values. Therefore they represent the "critical organ" für the inhalation of natural radioactive nuclides. For children and youths large deviations from the calculated values are to be expected as far as the nuclide distribution

©Naturwissenschaftlich-Medizinischen Vereinigung in Salzburg; download unter www.biologiezentrum.at
and the absolute dose values are concerned. This problem, as part of the current research program, is being investigated at the institute using a hybrid computer to simulate the various parameters involved.

Literatur

1. HÄRTING F.H., HESSE W.: Der Lungenkrebs, die Bergkrankheit in den Schneeberger Gruben. Vjschr. gericht. Med. öff. Sanitwes. 30: 296 (1879), 31: 102 und 313 (1879)
2. LORENZ E.: Radioactivity and lung cancer: critical review of lung cancer in miners of Schneeberg and Joachimsthal. J. Natn. Cancer Inst. 5: 1 (1944)
3. RAJEWSKY B.: Naturforschung und Medizin in Deutschland. Bd 21/I, Biophysik (1939)
4. POHL E.: Biophysikalische Untersuchungen über die Inkorporation der natürlich radioaktiven Emanationen und deren Zerfallsprodukte. Sitz.-Ber. Österr. Akad. Wiss. II, 174: 309 (1965)
5. POHL E., POHL-RÜLING J.: Die Strahlenbelastung bei der Inhalation von Radon, Thoron und deren Zerfallsprodukte. Strahlentherapie 136/6: 738 (1968)
6. POHL E., STEINHÄUSLER F., HOFMANN W., POHL-RÜLING J.: Methodology of measurement and statistical evaluation of radiation burden to various population groups from all internal and external natural sources. Proc. Symp. on Radiological and Environmental Effects of Low-Level Radiation IAEA, Vol. II: 305 (1976)
7. STEINHÄUSLER F.: Long-term measurements of ^{222}Rn, ^{220}Rn, ^{214}Pb and ^{212}Pb concentrations in the air of private and public buildings and their dependence on meteorological parameters. Health Physics, 29: 705 (1975)
8. STEINHÄUSLER, F.: Die natürliche Radioaktivität der Luft in Wohn- und Arbeitsräumen in Abhängigkeit von Ort, Baumaterial und meteorologischen Faktoren. Dissertation, Univ. Innsbruck (1972)
9. STEINHÄUSLER, F., HOFMANN W., POHL E., POHL-RÜLING J.: Natural radioactivity in an urban environment and the resulting dose frequency distributions of the population for the most important organs. Proc. Health Physics Society Tenth Midyear Topical Symp. on Natural Radioactivity in Man's Environment (1976)
10. PORSTENDÖRFER J.: Die Anlagerungsgeschwindigkeit der elektrisch geladenen und neutralen Emanationsfolgeprodukte an das atmosphärische Aerosol. Pure and Applied Geophysics 77: 175 (1969)
11. JACOBI W., SCHRAUB A.: Interne Strahlenexposition durch ^{222}Rn, ^{220}Rn und ihre kurzlebigen Zerfallsprodukte. Die natürliche Strahlenexposition des Menschen (Ed.: Aurand K. et al.), G. Thieme Verlag: 118 (1974)
12. FINDEISEN W.: Über das Absetzen kleiner, in der Luft suspendierter Teilchen in der menschlichen Lunge bei Atmung. Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. 236: 367 (1935)
13. LANDAHL H.D.: On the removal of air-borne droplets by the human respiratory tract: I. The lung. Bull. Math. Biophys. 12: 43 (1950)
14. LANDAHL H.D.: Particle removal by the respiratory system. Note on the removal of airborne particulates by the human respiratory tract with particular reference to the role of diffusion. Bull. Math. Biophys. 25: 29 (1963)

15. WEIBEL E.R.: Morphometry of the human lung. Springer Verlag (Berlin) 1963
16. GORMLEY P.G., KENNEDY M.: Diffusion from a stream flowing through a cylindrical tube. Proc. roy. Irish Acad. A. 52: 163 (1949)
17. GEORGE A.C., BRESLIN A.J.: Deposition of radon daughters in human exposed to uranium mine atmospheres. Health Physics, 17: 115 (1969)
18. AURAND K., JACOBI W., SCHRAUB A.: Über die Bestimmung der Retention radioaktiver Aerosole im menschlichen Atemtrakt. Naturwiss. 42: 398 (1955)
19. SHAPIRO J.: Radiation dosage from breathing radon and its daughters. Arch. industr. Hlth. 14: 169 (1956)
20. CHAMBERLAIN A.C., DYSON E.D.: The dose to the trachea and bronchi from the decay products of radon and thoron. Brit. J. Radiol. 29: 317 (1956)
21. AURAND K., FEINE U., JACOBI W., SCHRAUB A.: Untersuchungen zur Frage der Strahlenbelastung der Lunge bei Aufenthalt in radonhaltiger Atmosphäre. Strahlentherapie 104: 345 (1957)
22. HOLLEMAN D.F., DOWELL E., MARTZ D.E., SCHIAGER K.J.: Total respiratory deposition of radon daughters from inhalation of uranium mine atmospheres. Health Physics, 17: 187 (1969)
23. GEORGE A.C., BRESLIN A.J.: Deposition of natural radon daughters in human subjects. Health Physics, 13: 375 (1967)
24. JACOBI W.: Die natürliche Strahlenwirkung auf den Atemtrakt. Biophys. 2: 282 (1965)
25. Report of the Task Group on Reference Man, ICRP Publication 23, Pergamon Press (1975)
26. ALTSHULER B., NELSON N., KUSCHNER M.: Estimation of lung tissue dose from the inhalation of radon and daughters. Health Physics, 10: 1137 (1964)
27 JACOBI W.: The dose to the human respiratory tract by inhalation of shortlived ^{222}Rn- and ^{220}Rn-decay products. Health Physics, 10: 1163 (1964)
28. HAQUE A.K.M., COLLINSON A.J.L.: Radiation dose to the respiratory system due to radon and its daughter products. Health Physics, 13: 431 (1967)
29. HARLEY N.H., PASTERNACK B.S.: Alpha absorption measurements applied to lung dose from radon daughters. Health Physics, 23: 771 (1972)
30. HARLEY N.H., PASTERNACK B.S.: Experimental absorption applied to lung dose from thoron daughters. Health Physics, 24: 379 (1973)
31. TASK GROUP ON LUNG DYNAMICS: Deposition and retention models. Health Physics, 12: 173 (1966)
32. TASK GROUP ON LUNG DYNAMICS: Errata and revisions to Health Physics 12: 173 (1966). Health Physics, 13: 1251 (1967)
33. Inhalation risks from radiation contaminants. IAEA: Technical Reports Series No. 142 (1973)
34. HÖTTER G.J.: Die Lungenfunktion unter besonderer Berücksichtigung des wachsenden Organismus, Steinkopff Verlag (1975)
35. HOFMANN W., STEINHÄUSLER F.: Dose calculations for infants and youths due to the inhalation of radon and its decay products in the normal environment. Proc. 4th Int. Congr. on Radiation Protection, Paris (1977)

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Berichte der Naturwissenschaftlich-Medizinischen Vereinigung in Salzburg

Jahr/Year: 1976

Band/Volume: 2

Autor(en)/Author(s): Hofmann W., Steinhäusler Friedrich

Artikel/Article: DIE STRAHLENBELASTUNG DES ATEMTRAKTS BEI DER INHALATION NATÜRLICH RADIOAKTIVER NUKLIDE. 7-25