

Radon: Risiken und Folgen

Ansatz der ICRP

KSR-KomABC-KNS

Bern, 14. Juni 2019

**François Paquet IRSN, ICRP
unter Mitwirkung von E. Cléro, IRSN**

Warum soviel Lärm um Radon?

Ein natürliches Gas, aber...

verantwortlich für den grössten Teil der natürlichen Strahlenbelastung

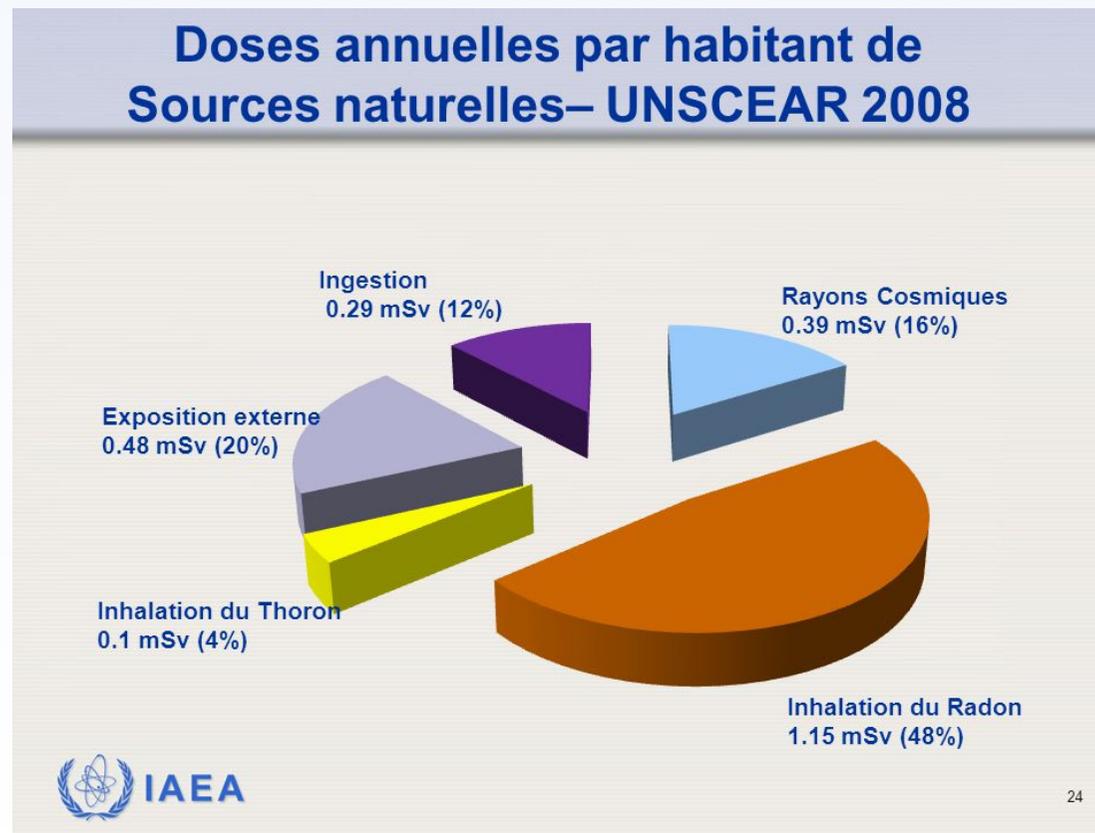
Jahresdosen
pro Person der
Bevölkerung

Natürliche
Strahlenquellen

Ingestion (12%)

Externe Exposition
(20%)

Inhalation von Thoron
(4%)



Kosmische Strahlung
(16%)

Inhalation von Radon
(48%)

Warum soviel Lärm um Radon ?

Ein natürliches Gas, aber...

verantwortlich für den grössten Teil der natürlichen Strahlenbelastung

die zweithäufigste Ursache für Lungenkrebs



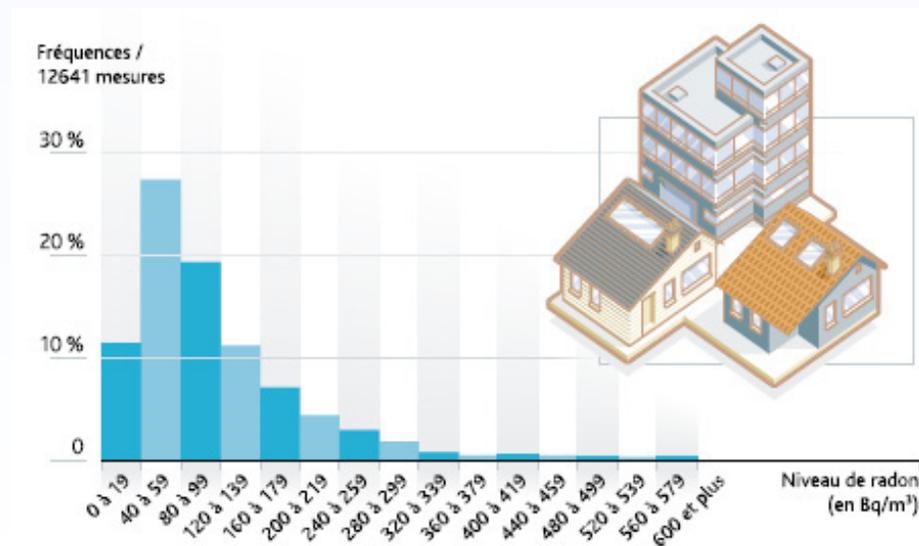
Warum (soviel Lärm um) Radon ?

Ein natürliches Gas, aber...

verantwortlich für den grössten Teil der natürlichen Strahlenbelastung

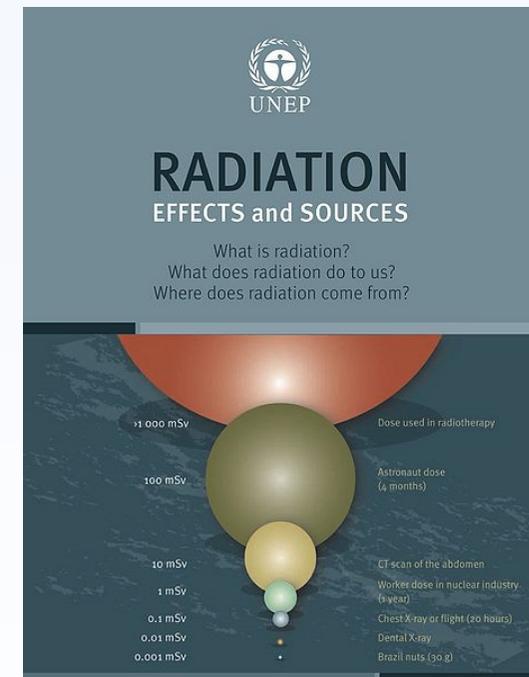
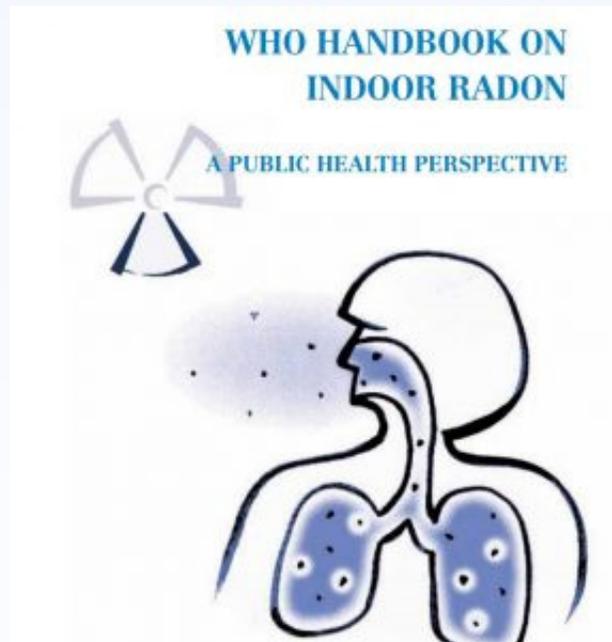
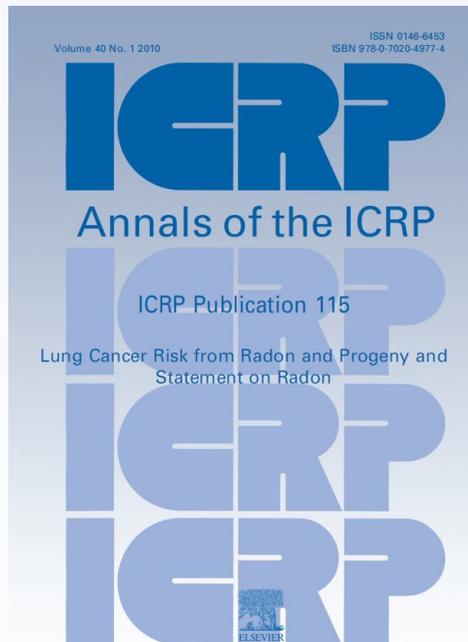
die zweithäufigste Ursache für Lungenkrebs

Konzentrationen in Wohn- und Arbeitsräumen von 10 bis 10 000 Bq/m³



Quelle: IRSN

Internationale Organisationen und Radon



Epidemiologische Studien zu den Risiken der Radon-Exposition

① Bergarbeiter (Uranminen)

(berufliche Exposition)



Kohortenstudien

- ❑ Studien ab den 1960er-Jahren
- ❑ mehr als zwanzig Studien
- ❑ Auswertung der Personendosimetrie der einzelnen Bergarbeiter
- ❑ Auswertung der Mortalität über mehrere Jahrzehnte

② Allgemeine Bevölkerung

(Exposition in Wohnräumen)



Fall-Kontroll-Studien

- ❑ Studien ab den 1990er-Jahren
- ❑ mehr als zwanzig Studien
- ❑ Rekonstruktion der Strahlenexposition durch Radon
- ❑ Fragebogen: detaillierte Rekonstruktion der Rauchergewohnheiten und anderer Risikofaktoren für Lungenkrebs

➡ Schätzung des Risikos von Lungenkrebs im Zusammenhang mit der kumulierten Radonexposition in Minen / Wohnräumen

Individuelle Daten

Zeitlicher Zusammenhang: von der Ursache zur Wirkung

1 Risikofaktor → mehrere Krankheiten

lang und teuer + verlorene Kontakte

ungeeignet für seltene Krankheiten

Individuelle Daten

Zeitlicher Zusammenhang: von der Wirkung zur Ursache

1 Krankheit → mehrere Expositionen

Verzerrung durch Auswahl (Kontrollgruppe)

+ Messung (schwierige Rekonstruktion der Expositionen)

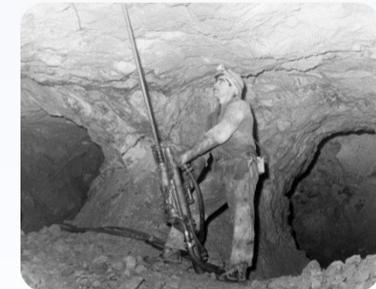
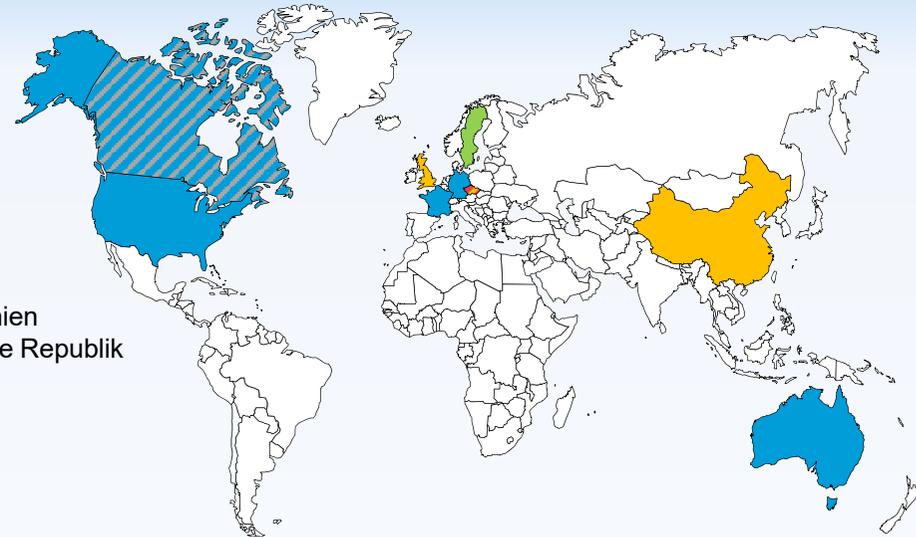
I. Bergarbeiter-Studien

Studien bei Bergarbeitern überall auf der Welt

Epidemiologische Bergarbeiter-Studien:

- Uran**
Kanada (Ontario, Port Radium, Beaverlodge)
USA (Colorado, New Mexico)
Tschechische Republik (Böhmen)
Frankreich, Deutschland, Australien
- Fluorit** - Kanada (Neufundland)

- Zinn**
China
Grossbritannien
Tschechische Republik
- Eisen** -
Schweden



Französische Kohorte von Uran-Bergarbeitern (1/5)



Epidemiologische Studie

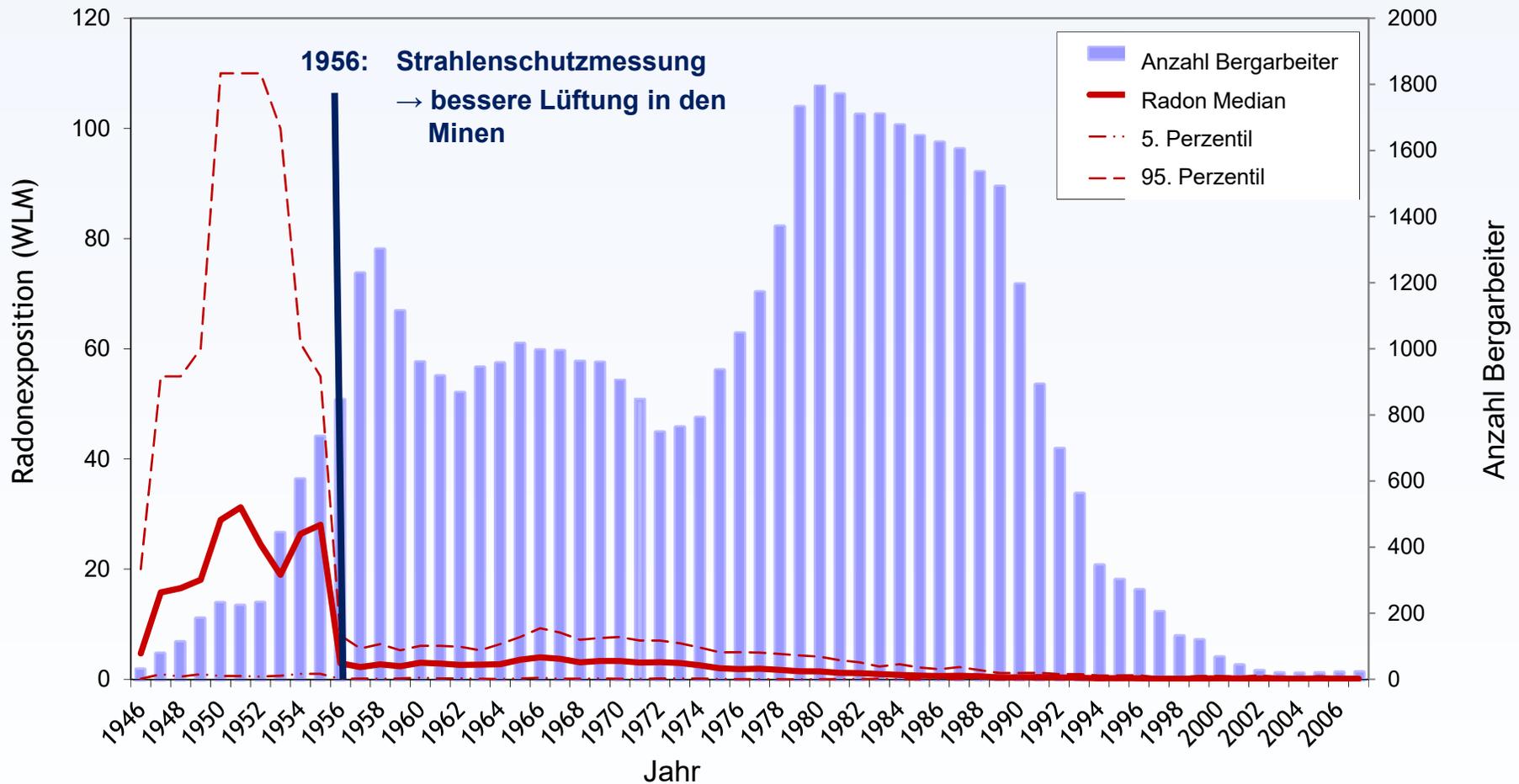
- ❑ Durchführung ab 1982 (durch IPSN und COGEMA)
- ❑ Einschluss von Männern mit dem Status Bergarbeiter
- ❑ Angestellt bei CEA-COGEMA zwischen 1946 und 1990

- ❑ Bis Ende 2007 rekonstruierte Beobachtung (neue laufende Beobachtung → 2015)
- ❑ Erfassung des Vitalstatus und der Todesursachen
- ❑ Schätzung der individuellen jährlichen Radonexposition (+ andere ionisierende Strahlen: Gamma, Uranstaub)



Französische Kohorte von Uran-Bergarbeitern (2/5)

Verteilung der jährlichen Radonexposition (WLM)
in der Gesamtkohorte über den Zeitraum 1946-2007



Working Level Month: Einheit für Radonexposition (Konzentration × Arbeitszeit), 5 WLM ⇔ 1 mSv (Bergarbeiter)

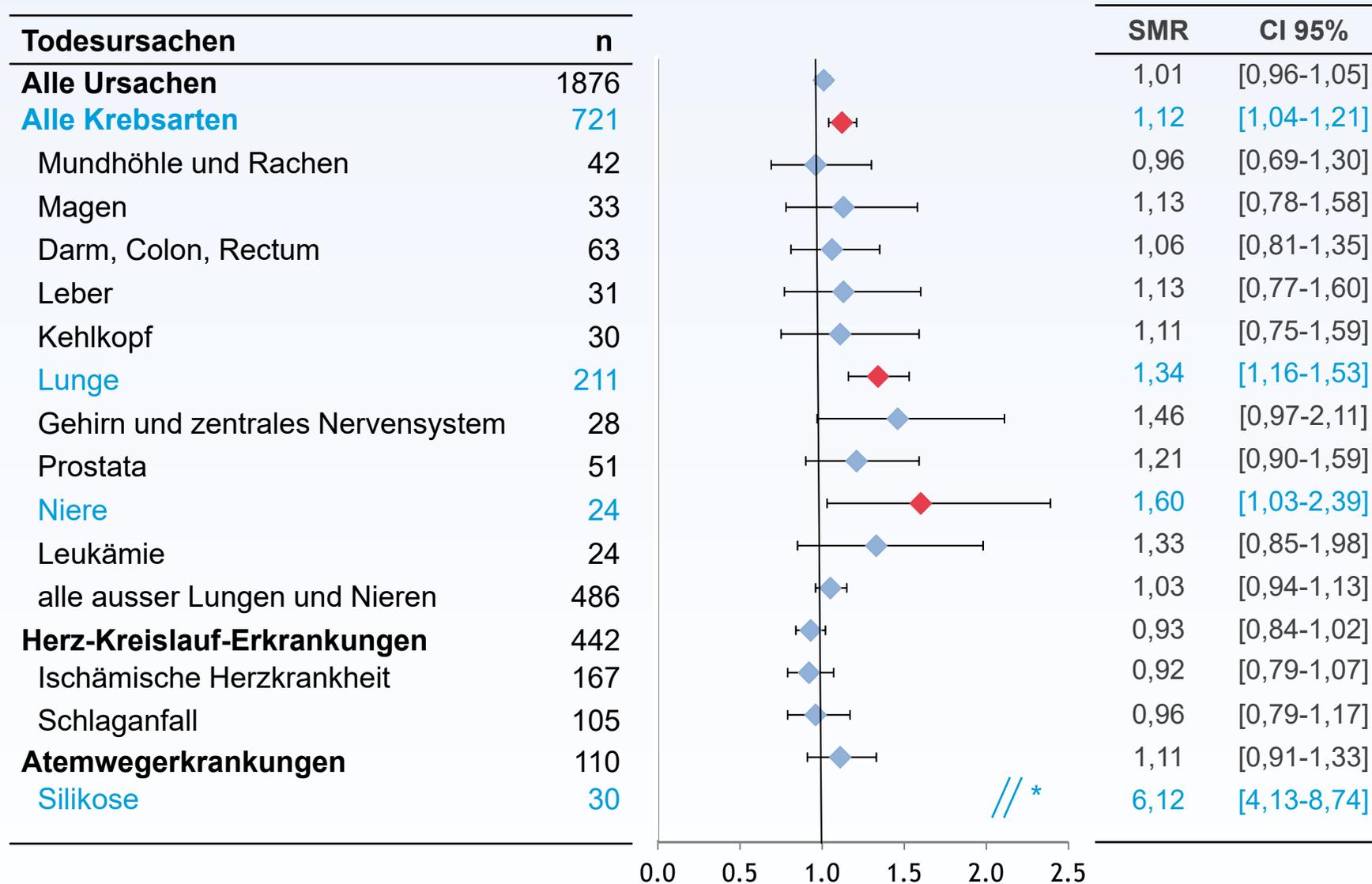
Französische Kohorte von Uran-Bergarbeitern (3/5)

Merkmale der französischen Kohorte

Anzahl Bergarbeiter, n	5 086	
Beobachtungszeitraum	1946 - 2007	
Personenjahre, n	179 955	
Vitalstatus, n (%)		
Überlebende am Studienende	2 924 (57,5 %)	
Todesfälle	1 935 (38,0 %)	
<i>Todesfälle bekannter Ursachen</i>	1 876	→ 3 % der Daten zu den Todesursachen fehlen
<i>Todesfälle durch Lungenkrebs</i>	211	
Kontakt verloren	40 (0,8 %)	
Alter > 85 Jahre	187 (3,7 %)	
Beobachtung, Mittelwert (min-max)		
Alter bei Studienende (Jahre)	64,2 (20 - 85)	
Dauer der Beobachtung (Jahre)	35,4 (0,1 - 61)	

(Rage et al. Intern Arch Occup Envir Health 2015)

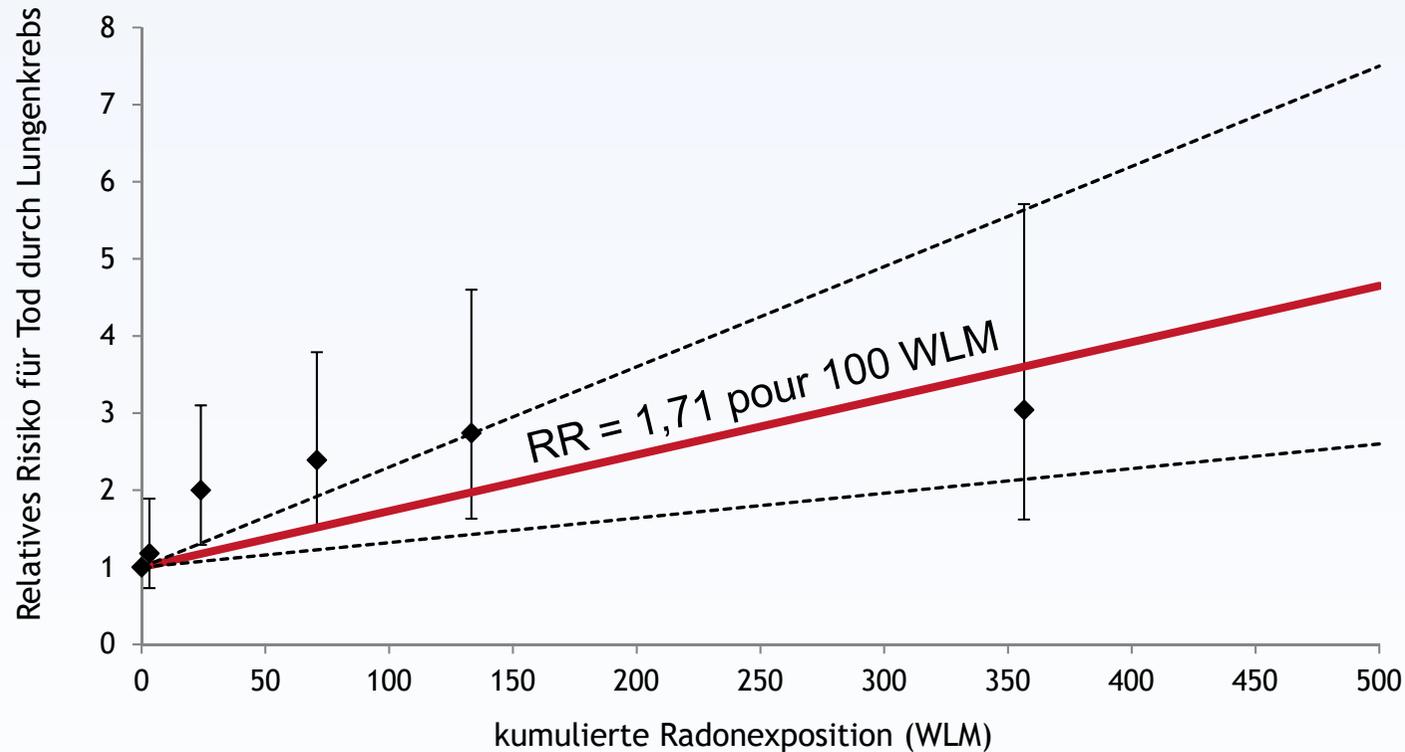
Mortalität durch Lungenkrebs (im Vergleich zur Allgemeinbevölkerung)



➔ ↗ signifikant höhere Mortalität durch Lungenkrebs

Französische Kohorte von Uran-Bergarbeitern (5/5)

Beziehung zwischen Radonexposition und Risiko für Tod durch Lungenkrebs



➔ ERR = 0,71 [0,31 - 1,30]

↗ signifikant höheres Risiko für Lungenkrebs im Zusammenhang mit der kumulierten Radonexposition

Gemeinsame internationale Studie mit 11 Kohorten von Bergarbeitern

Place	Country	Type of mine	Follow-up period	No. of miners	Cumulative exposure WLM	Person-years ^a	ERR per 100 WLM	SE
Yunnan	China	Tin	1976–1987	13,649	286.0	134,842	0.17	
W-Bohemia	Czech Republic	Uranium	1952–1990	4320	196.8	102,650	0.67	
Colorado	USA	Uranium	1950–1990	3347	578.6	79,556	0.44	
Ontario	Canada	Uranium	1955–1986	21,346	31.0	300,608	0.82	
Newfoundland	Canada	Fluorspar	1950–1984	1751	388.4	33,795	0.82	
Malmberget	Sweden	Iron	1951–1991	1294	80.6	32,452	1.04	
New Mexico	USA	Uranium	1943–1985	3457	110.9	46,800	1.58	
Beaverlodge	Canada	Uranium	1950–1980	6895	21.2	67,080	2.33	
Port Radium	Canada	Uranium	1950–1980	1420	243.0	31,454	0.24	
Radium Hill	Australia	Uranium	1948–1987	1457	7.6	24,138	2.75	
CEA-COGEMA	France	Uranium	1948–1986	1769	59.4	39,172	0.51	
Total				60,606	164.4	888,906	0.59	1.32

WLM, working level month; ERR, excess relative risk; SE, multiplicative standard error.

^a Among exposed.

(BEIR VI, 1999)

Uran-Bergarbeiter-Studien: mit Radon und Rauchen verbundenes Risiko



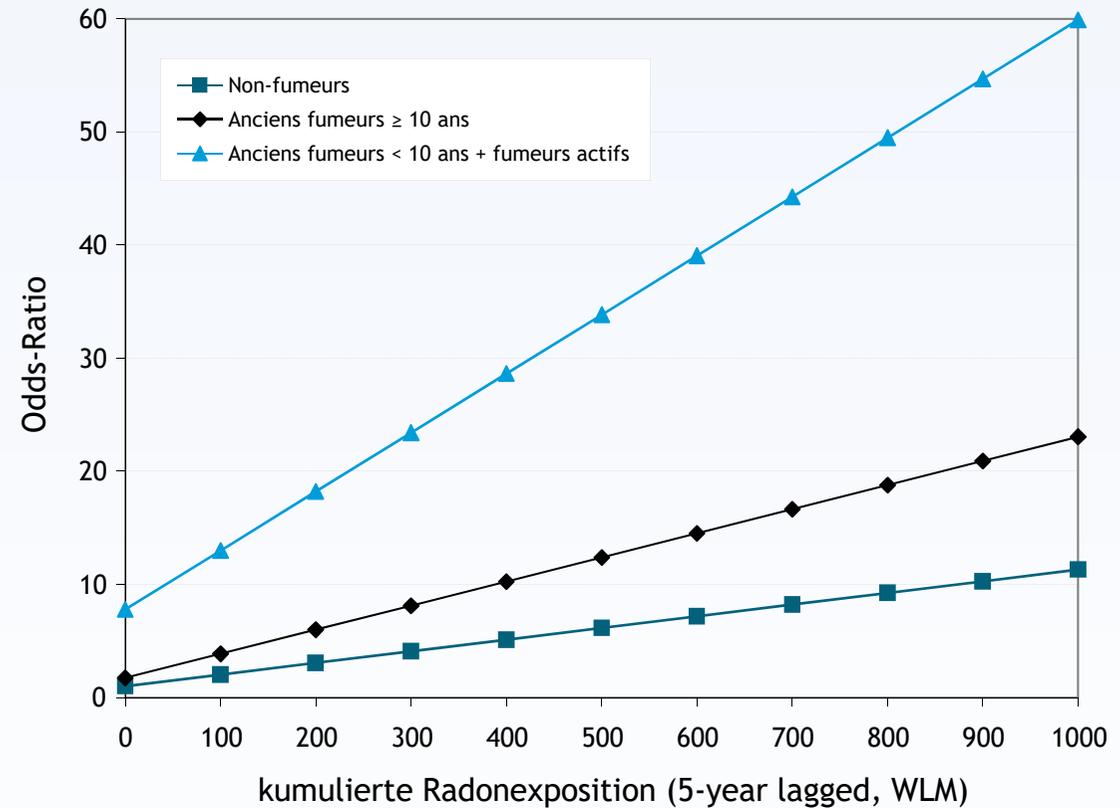
■ Rauchgewohnheiten Gemeinsame europäische Studie

Eingebettete Fall-Kontroll- Studie

- Frankreich
- Deutschland
- Tschechische Republik

1 236 Fälle (Lungenkrebs)

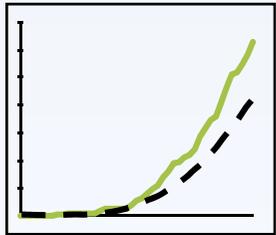
2 678 Kontrollen



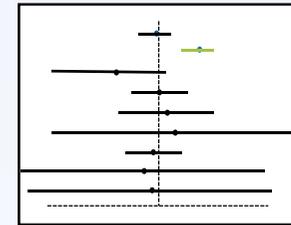
- ➡ Zusammenhang mit Radon auch nach Berücksichtigung der Rauchgewohnheiten sichtbar
Erhöhtes Risiko in allen Raucher kategorien
Submultiplikative Interaktion

(Leuraud et al. Radiat Res 2011)

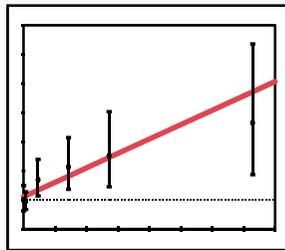
Bergarbeiter-Studien: wichtigste Ergebnisse



zusätzliche Mortalität durch Lungenkrebs



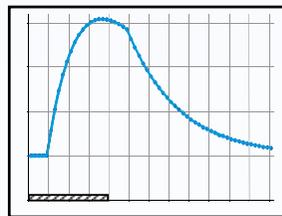
Unklare Ergebnisse zu den Krebsrisiken abgesehen von Lungenkrebs (Leukämie, Nieren, Magen, Herz-Kreislauf...)



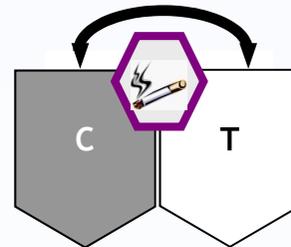
Zusammenhang Radonexposition - Lungenkrebsrisiko

Persistenz bei schwach exponierten Bergarbeitern

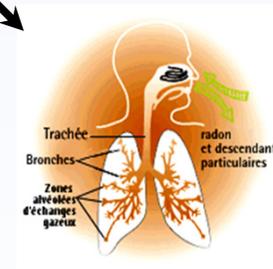
Persistenz nach Berücksichtigung von Messfehlern



Verminderung des Risikos mit zunehmender Dauer seit der Exposition



Persistenz des Risikos nach Berücksichtigung der Rauchgewohnheiten



Wichtigster Beitrag von Radon zur Lungendosis (Gamma, Uranstaub)

I. Bergarbeiter-Studien

II. Studien zur Allgemeinbevölkerung

Europäische Fall-Kontroll-Studien (1/3)

Aus 3 Kontinenten zusammengeführte Studien

Gruppe		Studien <i>n</i>	Fälle <i>n</i>	Kontrollen <i>n</i>	RR / 100 Bq.m ⁻³ (CI 95%)
Europa	<i>Darby 2005</i>	13	7 148	14 208	1,08 (1,03 - 1,16)
Nordamerika	<i>Krewski 2006</i>	7	3 662	4 966	1,10 (0,99 - 1,26)
China	<i>Lubin 2004</i>	2	1 050	1 995	1,13 (1,01 - 1,36)

➔ ↗ relatives Risiko von rund 10 % pro 100 Bq.m⁻³

Zusammengeführte europäische Studie zur Allgemeinbevölkerung

- ❑ 13 Studien aus 9 Ländern: Belgien, Deutschland, Finnland, Frankreich, Grossbritannien, Italien, Schweden, Spanien Tschechische Republik,
- ❑ Standardisiertes Protokoll:
 - ✓ identische Einschlusskriterien
 - ✓ gemeinsamer Fragebogen
 - ✓ Rekonstruktion der Exposition in den Wohnräumen über 30 Jahre
 - ✓ Vergleich der Messmethoden
 - ✓ gemeinsame Analyse der individuellen Daten
- ❑ Studienpopulation: 7 148 Fälle / 14 208 Kontrollen

Europäische Fall-Kontroll-Studien (2/3)

(Darby et al. BMJ 2005)

- Durchschnittliche Konzentration in Wohnräumen

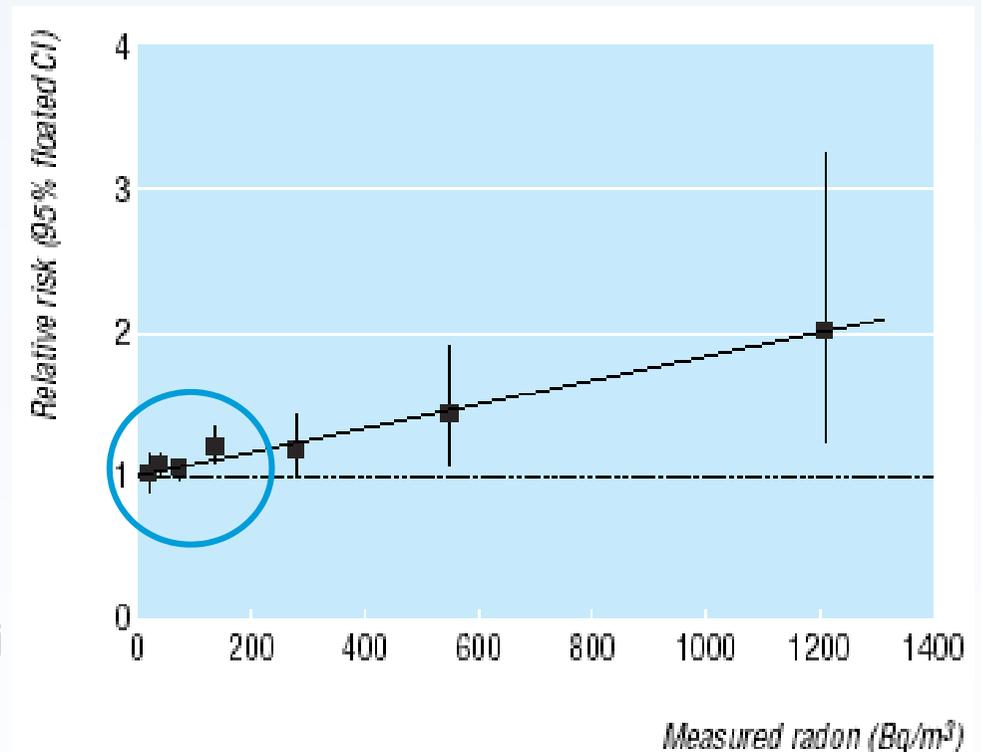
Fall = 104 Bq.m⁻³

Kontrolle = 97 Bq.m⁻³

- ↗ mit der Radonkonzentration steigendes Lungenkrebsrisiko

RR = 1,08 pro 100 Bq.m⁻³ [1,03 - 1,16]

RR = 1,16 pro 100 Bq.m⁻³ [1,05 - 1,31]
nach Berücksichtigung der Unsicherheiten bei den Schätzungen der Radonkonzentrationen

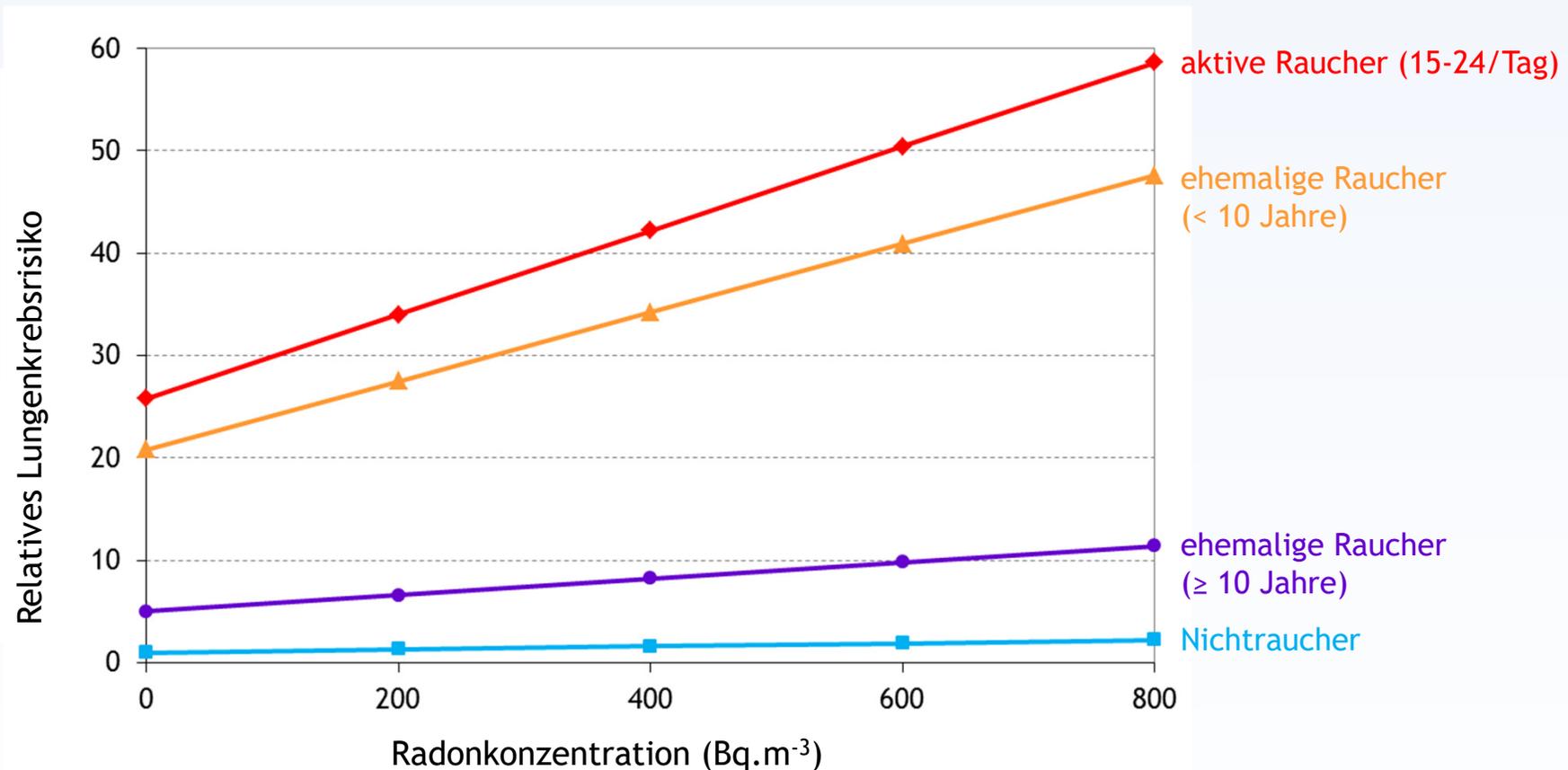


- signifikanter Zusammenhang bei Expositionen < 200 Bq.m⁻³

Europäische Fall-Kontroll-Studien (3/3)

(Darby et al.
Scand J Work Environ Health 2006)

□ Gemeinsame Wirkung von Radon und Rauchen



➔ persistierend signifikantes Risiko sowohl bei Rauchern als auch bei Nichtrauchern

Fall-Kontroll-Studien zur Radonexposition in Wohnräumen und Lungenkrebsrisiko: Schlussfolgerungen

- ❑ Rund zwanzig epidemiologische Studien seit 1990
- ❑ Statistische Trennschärfe der einzelnen Studien im Allgemeinen ungenügend, um signifikanten Zusammenhang nachzuweisen
- ❑ Drei zusammengeführte Analysen:
 - ✓ Klarer Nachweis des Zusammenhangs:
Höheres Lungenkrebsrisiko mit zunehmender kumulierter Radonexposition in Wohnräumen, bei detaillierter Schichtung nach Rauchgewohnheiten
 - ✓ Die Dosis-Wirkungsbeziehung scheint linear zu sein, kein Nachweis eines Schwellenwerts

Anteile in Zusammenhang mit Radon: Inzidenz und Mortalität von Lungenkrebs

■ Lungenkrebs in Zusammenhang mit Radonexposition, in Frankreich pro Jahr

Inzidenz	Mortalität
4 000 neue Fälle d.h. 10 % der neuen Lungenkrebsfälle	3 000 Todesfälle d.h. 10 % der Todesfälle aufgrund von Lungenkrebs

Centre international de Recherche sur le Cancer



Marant-Micallef et al.
Les cancers attribuables au mode de vie et à l'environnement en France en 2015. *BEH* 2018

IARC-Bericht, publiziert im Juni 2018

IRSN
INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE



Ajrouche et al.
Quantitative health impact of indoor radon in France. *Radiat Environ Biophys* 2018

Gaskin et al.
Global estimate of lung cancer mortality attributable to residential radon. *Environ Health Physics* 2018

Anteile im Zusammenhang mit Radon, weltweit

Land	Radonexp. (Bq.m ⁻³)	Anteile in Zusammenhang mit Radon in Wohnräumen (%)				
		BEIR VI ^a	Hunter ^b	Kreuzer ^c	Krewski ^d	Darby ^e
Kuba	5	4,3	2,3	2,1	1,6	1,2
Australien	9	4,7	3,7	3,5	2,1	1,6
Vereinigtes Königr.	14	8,0	5,8	5,4	4,1	3,1
Algerien	22	15,8	9,0	8,3	6,4	4,8
China	34	15,9	13,1	12,4	9,5	7,2
Kanada	42	16,3	15,5	14,6	11,2	8,6
Südkorea	49	16,8	17,5	16,6	12,8	9,9
Frankreich	50	19,4	17,8	16,9	13,0	10,0
Schweiz	51	19,6	18,2	17,2	13,2	10,3
Schweden	67	19,2	22,4	21,2	16,3	13,0
Mexiko	82	26,7	25,9	24,9	19,3	15,4
Tschechische Rep.	94	24,3	28,9	27,5	21,4	17,3
Polen	133	28,4	36,1	34,8	27,3	22,6
66 Länder (Median)	38	16,5	14,4	13,6	10,4	8,4

Radonexposition: geometrisches Mittel des Landes

^a EAC-Modell (exposure-age-concentration), gemeinsame Analyse von 11 Bergarbeiter-Kohorten, BEIR VI (NRC 1999)

^b Gemeinsame Analyse von 3 europäischen Bergarbeiter-Studien (Hunter et al. 2013)

^c Deutsche Uran-Bergarbeiter-Kohorte (Kreuzer et al. 2015)

^d Zusammengeführte nordamerikanische Analyse zur Allgemeinbevölkerung (Krewski et al. 2003)

^e Zusammengeführte europäische Analyse zur Allgemeinbevölkerung (Darby et al. 2006)

(Gaskin et al. *Environ Health Physics* 2018)

➔ Wissensstand zu den Risiken im Zusammenhang mit Radon

- ❑ **Lungenkrebs**: gegenwärtig die einzige nachgewiesene Wirkung von Radon
(Studien zu Leukämie, Hautkrebs, Hirntumoren, Magenkarzinomen)
- ❑ Gute **Kohärenz der Ergebnisse** zu Bergarbeitern und zur Allgemeinbevölkerung
- ❑ Erhöhung des **relativen Risikos** $\approx 16\%$ pro $\nearrow 100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
(durchschnittliche Konzentration in Wohnräumen über einen Zeitraum von 25 Jahren)
- ❑ **Latenzzeit** zwischen 5 und 30 Jahre
- ❑ Zunahme des Risikos sowohl bei Rauchern als auch bei **Nichtrauchern**
- ❑ **Gemeinsame Wirkung Rauchen/Radon** zwischen additiver und multiplikativer Wirkung
- ❑ Mangelndes Wissen zu den Auswirkungen einer **Exposition in der Kindheit**

Management der Risiken und der Radonexpositionen

Verschiedene Ansätze im Laufe der Zeit

Arbeiten der ICRP zu diesem Thema

24 Jahre



- | | |
|------------------------|---|
| Publication 65 (1993) | Protection against Radon-222 at home and at work |
| Publication 103 (2007) | Recommendations |
| Publication 115 (2010) | Lung Cancer Risk from Radon and Progeny
+ Statement on Radon |
| Publication 126 (2014) | Radiological Protection
against Radon Exposure |
| Publication 137 (2017) | Occupational Intakes of Radionuclides, Part 3 |

Arbeiten der ICRP zu diesem Thema

Publication 65 Protection against Radon-222 at home and at work (1993)

Publikation von Konversionskoeffizienten, auf der Grundlage von epidemiologischen Daten

Vergleich des Risikos pro WLM mit einem Risiko (oder sog. Detriment) pro Sv

ergibt Sv pro WLM

Die Dosis-Konversionskoeffizienten nach ICRP 65 (1993)

Vergleich des Krebsrisikos von Bergarbeitern (LEAR)

2.83×10^{-4} pro WLM

Gesamt-Detriment (Krebsfälle und vererbare Erkrankungen)
nach ICRP 60 (1991):

- berufl. Exposition 5.6×10^{-2} pro Sv **5 mSv pro WLM**
- Bevölkerung 7.3×10^{-2} pro Sv **4 mSv pro WLM**

Arbeiten der ICRP zu diesem Thema

- Publication 65 (1993) Protection against Radon-222 at home and at work
- **Publication 103 (2007) Recommendations**

Entwicklung des Detriments pro Sv von den Publikationen 60 zu 103

Publication 60 (1991)

	Cancer Lung	Total	Hereditary	Total
Workers	0.6	4.8	0.8	5.6
Public	0.8	6.0	1.3	7.3

Publication 103 (2007)

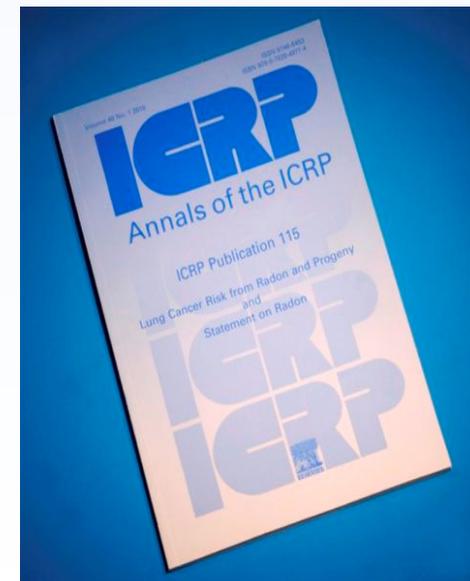
Workers	1.2	4.1	0.1	4.2
Public	0.9	5.5	0.2	5.7



**Der Koeffizient in Sv pro WLM steigt
(um etwa 30%)**

Arbeiten der ICRP zu diesem Thema

- Publication 65 (1993) Protection against Radon-222 at home and at work
- Publication 103 (2007) Recommendations
- **Publication 115 (2010) Lung Cancer Risk from Radon and Progeny + Statement on Radon**



Neue Evaluation des Radonrisikos

ICRP-Publikation 115 (2010)

- ❑ Aktualisierung des Überblicks über die wissenschaftliche Literatur seit der ICRP-Publikation 65 (1993)
- ❑ Gute Übereinstimmung der Schätzungen des Risikos für wenig exponierte Bergarbeiter und für die Allgemeinbevölkerung
- ❑ Abgesehen von Lungenkrebs kein Nachweis eines Risikos im Zusammenhang mit Radon
- ❑ Berechnung des Detriments über das gesamte Leben durch Lungenkrebs, der auf Radon oder dessen Zerfallsprodukte zurückzuführen ist

Dosis-Konversionsfaktoren für Radon

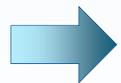


«Epidemiologischer Ansatz» für berufliche Exposition

	Lungenkrebs- Lebenszeitrisiko (WLM ⁻¹)	Detriment (Sv ⁻¹)	Effektive Dosis (mSv.WLM ⁻¹)
1993	2,8.10 ⁻⁴ (ICRP 65)	5,6.10 ⁻² (ICRP 60)	5
2010	5.10 ⁻⁴ (ICRP 115)	4,2.10 ⁻² (ICRP 103)	12



(Marsh et al. Health Phys 2010)



Erhöhung des Lebenszeitrisikos in der ICRP-Publikation 115 im Vergleich zur ICRP-Publikation 65



Wert des Konversionsfaktors: 3,3 mSv pro mJ.h.m⁻³ (≈ 12 mSv.WLM⁻¹)
ICRP-Publikation 137 (2018)

Schlussfolgerungen des “Statement on Radon” (ICRP-Publikation 115)

Senkung des hohen Referenzwerts für Wohnräume von $600 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ auf $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$

Wert von $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ als Auslöser für die Anwendung von Regeln zum Schutz der beruflich strahlenexponierten Personen

Entwicklung von Dosiskoeffizienten mit einem dosimetrischen Ansatz (wie für alle anderen RN)

Arbeiten der ICRP zu diesem Thema

- Publication 65 (1993) Protection against Radon-222 at home and at work
- Publication 103 (2007) Recommendations
- Publication 115 (2010) Lung Cancer Risk from Radon and Progeny + Statement on Radon
- **Publication 126 (2014) Radiological Protection against Radon Exposure**

Radiological Protection against Radon Exposure Publication 126 (2014)

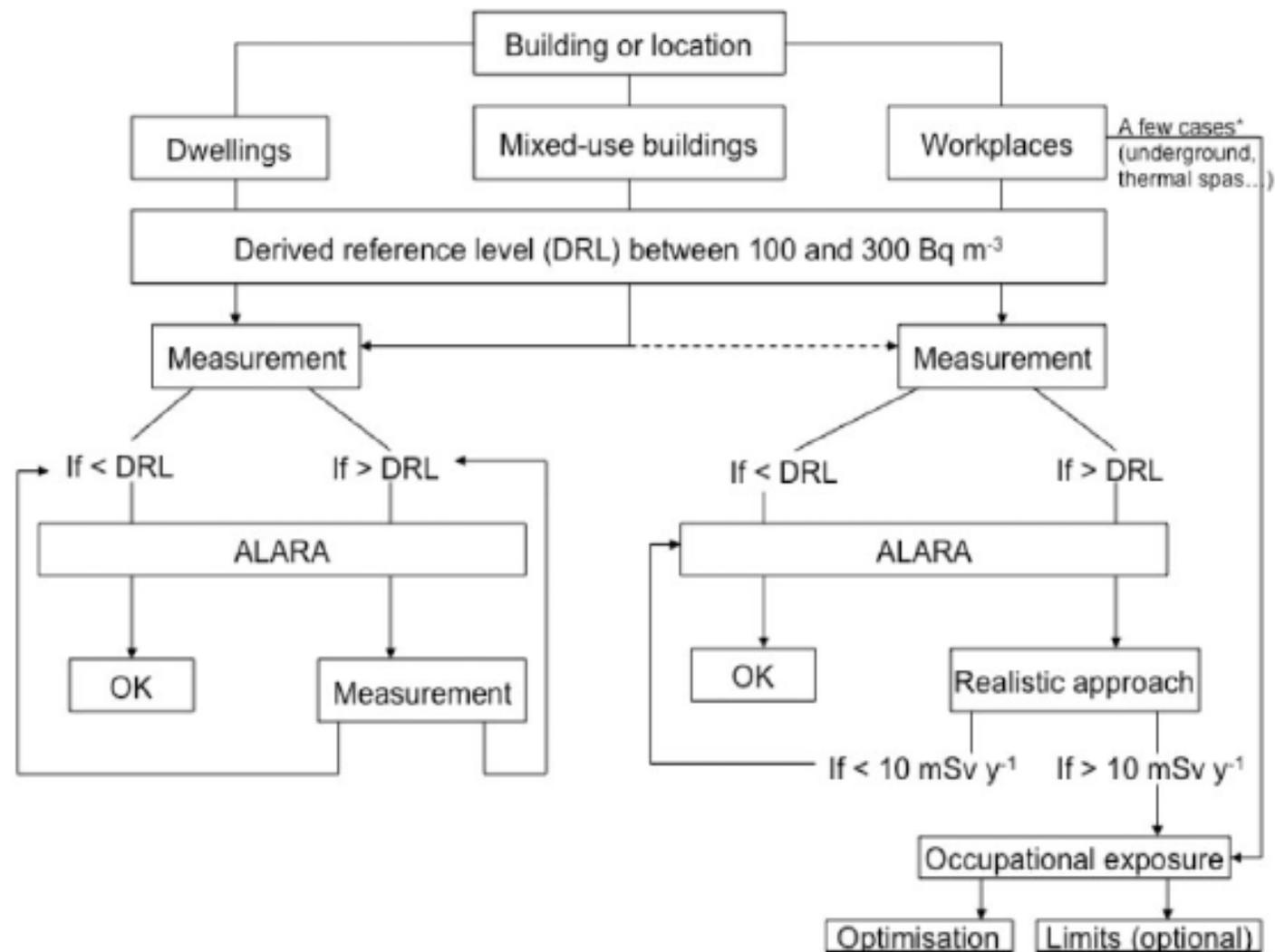
Anwendung des Schutzsystems bei
Radonexpositionen in Wohnräumen und am
Arbeitsplatz

Regeln basierend auf der Optimierung mit einem
Referenzwert ($300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ in Wohnräumen)

Umfassender Ansatz unabhängig vom Ort

Auf den Arbeitsplatz abgestimmter Ansatz

Publication 126: Radiological Protection against Radon Exposure



Arbeiten der ICRP zu diesem Thema

- Publication 65 (1993) Protection against Radon-222 at home and at work
- Publication 103 (2007) Recommendations
- Publication 115 (2010) Lung Cancer Risk from Radon and Progeny + Statement on Radon
- Publication 126 (2014) Radiological Protection against Radon Exposure
- **Publication 137 (2017) Occupational Intakes of Radionuclides, Part 3**

Occupational Intakes of Radionuclides, Part 3 (ICRP Publication 137)

3. Band einer Reihe mit dem Ziel einer Revision aller Dosiskoeffizienten für beruflich strahlenexponierte Personen nach Exposition durch Inhalation und Ingestion

Occupational Intakes of Radionuclides

OIR1 (P130) Einführung und allgemeine Modelle

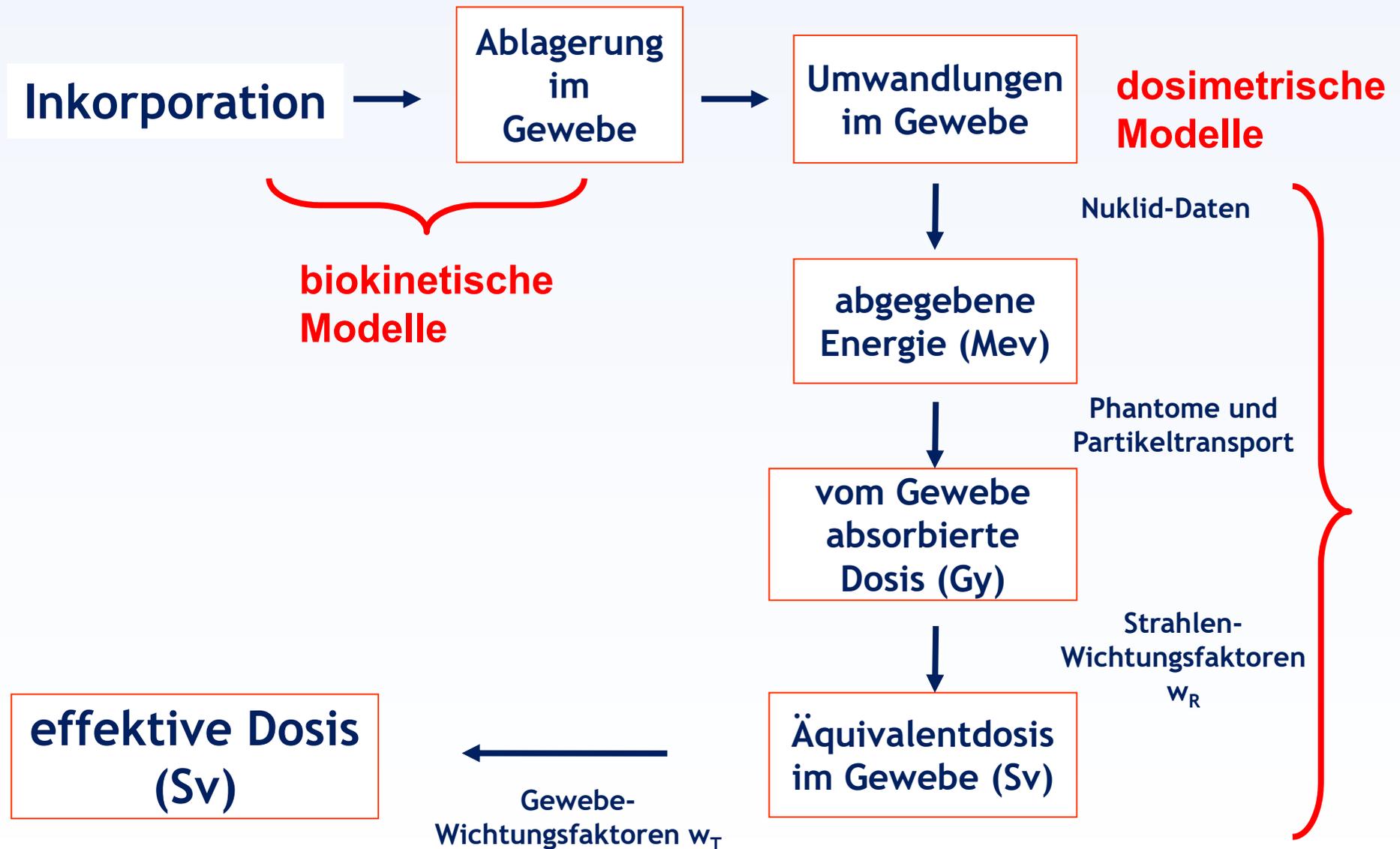
OIR2 (P134) H, C, P, S, Ca, Fe, Co, Zn, Sr, Y, Zr, Nb

OIR3 (P137) Ru, Sb, Te, I, Cs, Ba, Ir, Pb, Bi, Po, **Rn**,
Ra, Th, U

OIR4 Lanthanoide und Actinoide

OIR5 alle anderen Radionuklide

Berechnung der Äquivalentdosen und der effektiven Dosen



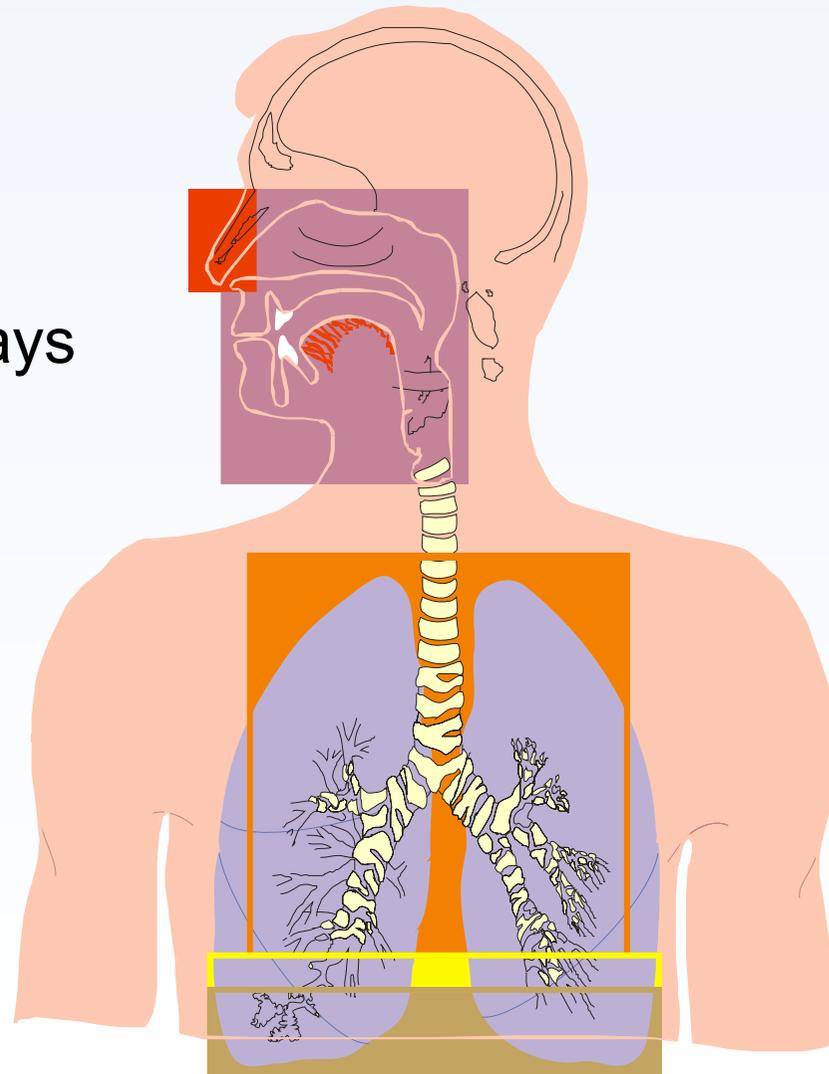
Human Respiratory Tract Model, Publication 66 (1994), revidiert in OIR P1

Extrathoracic airways

Bronchial

Bronchiolar

Alveolar interstitial



ET₁

ET₂

BB

bb

AI

Eigenschaften von Radon

1. Radon ist ein chemisch inertes Gas
2. Mit Radon werden auch dessen Zerfallsprodukte eingeatmet
3. Die Konzentrationen von Radon und seiner Zerfallsprodukte sind sehr unterschiedlich
4. Die Radon-Exposition wird auf verschiedene Arten ausgedrückt

Folglich werden Dosiskoeffizienten für Rn angegeben:

- für Radongas und für Radon + Zerfallsprodukte
- für typische Umweltbedingungen (mit F und Referenz-Zerfallsreihen) (z.B. Mine, Büro, Spa, Höhle, Haus..)

1. Fall: Radongas

Biokinetisches Modell der Radonaufnahme

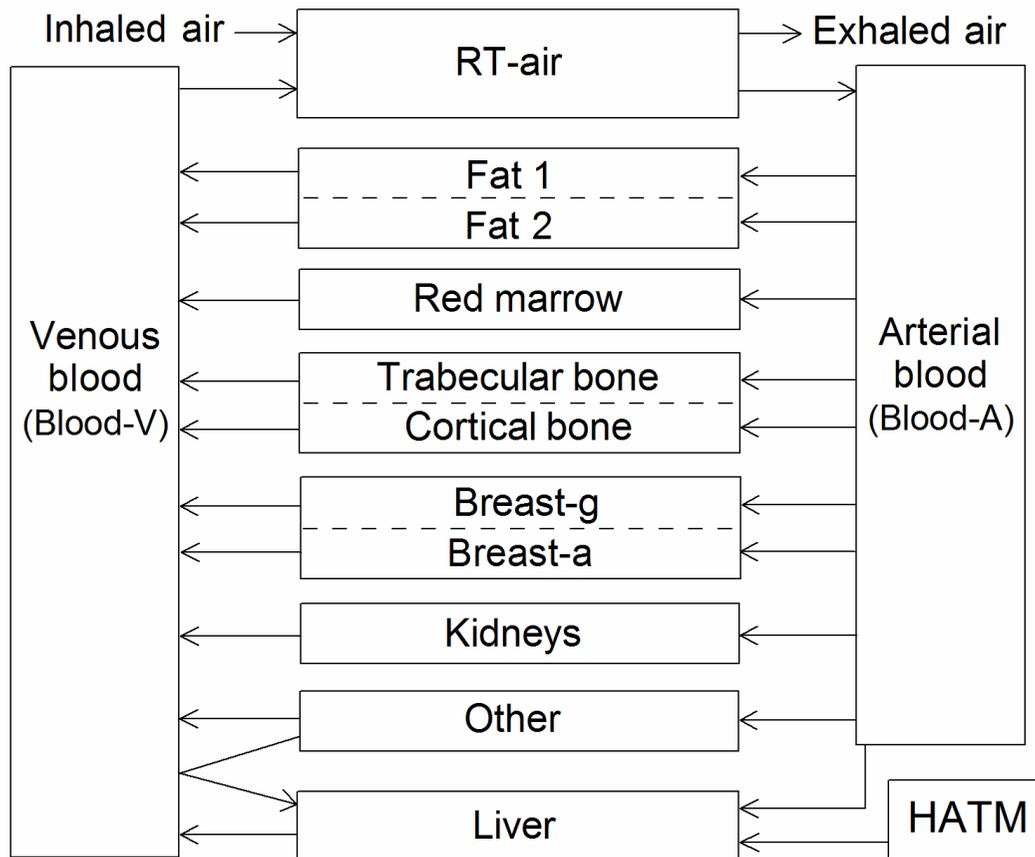


Fig 12.2. Structure of the biokinetic model for systemic radon.
Abbreviations: RT-air = respiratory tract air; Blood-A = arterial blood;
Blood-V = venous blood; Breast_g = glandular breast tissue;
Breast_a = adipose tissue in breast;

Dosiskoeffizienten für Radongas

Inhalation oder Ingestion

Radon-222 (Radon)

effektive Dosis

Radon-220 (Thoron)

Organdosis

Radon-219 (Actinon)

Nuklid	Halbwertszeit $T_{1/2}$	effektive Dosis	
		Sv pro Bq	mSv pro Bq h m ⁻³ a
Rn-222 (Radon)	3.8 d	4.4E-10	1.8E-7
Rn-220 (Thoron)	56 s	1.8E-10	-
Rn-219 (Actinon)	4.0 s	4.8E-11	-

Tabelle 12.5 Koeffizienten für die effektive Dosis nach Inhalation von Radongas (ohne Zerfallsprodukte).

^a Rate für die effektive Dosis nach chronischer Exposition pro Radon-Konzentrationseinheit nach Erreichen der Radon-Sättigung in Organen und Gewebe (d.h. im Gleichgewicht).

2. Fall: Radon-Zerfallsprodukte

Die Dosiskoeffizienten hängen von sehr zahlreichen Parametern ab

Definition der wichtigsten Parameter

- Atmungsrate

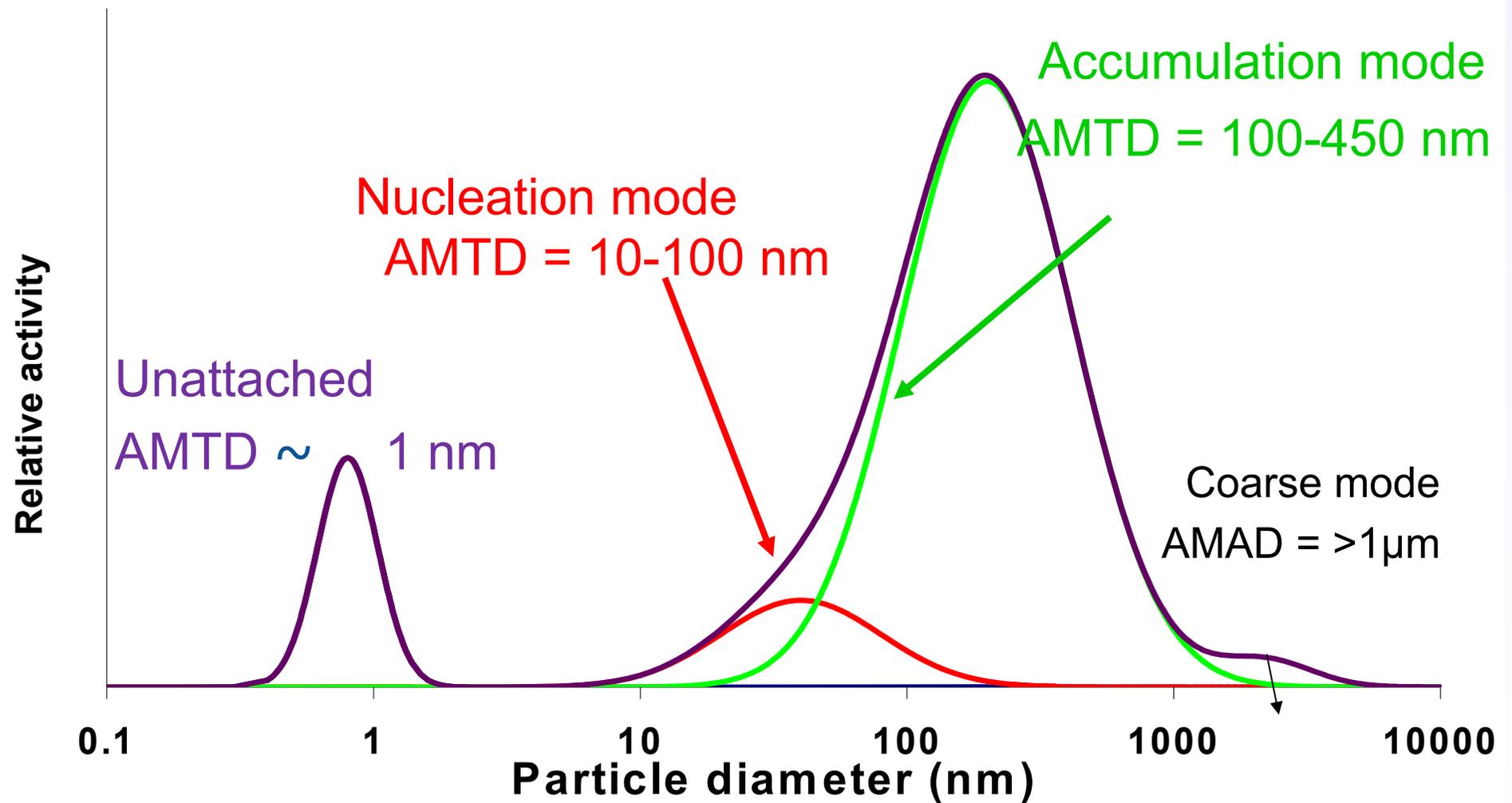
1.2 m³ h⁻¹ bei beruflich
strahlenexponierten Personen

Definition der wichtigsten Parameter

- Atmungsrate
- Eigenschaften von Aerosolen
 - freie Fraktion
 - Grössenverteilung
(beeinflusst Ablagerung in den Lungen)

Die ICRP definiert Referenzsituationen mit Referenz-Aerosolen

Grössenverteilung bei Aerosolen mit Radon-Zerfallsprodukten



Porstendörfer 2001, Marsh *et al* 2002

Referenzeigenschaften von Aerosolen mit Radon-Zerfallsprodukten

Exposure scenario	f_p	F	Attached aerosol characteristics in the ambient air ^c						
			Mode	f_p	AMTD _i (nm)	σ_{gi}	Density, ρ_i (g cm ⁻³)	Shape factor, χ_i	hgf _i
Indoor workplace	0.08	0.4	n	0.2	30	2.0	-	-	2.0
			a	0.8	250	2.0	-	-	2.0
Mine	0.01	0.2	a	1.0	250	2.0	0.7 ^d	1.0 ^d	1.0
Tourist cave	0.15	0.4	a	1.0	200	2.0	1.0	1.0	1.0

Table A.3. Reference aerosol parameter values for different exposure scenarios for ²²²Rn progeny.

Ablagerung von “Referenz”-Aerosolen in den Bronchien

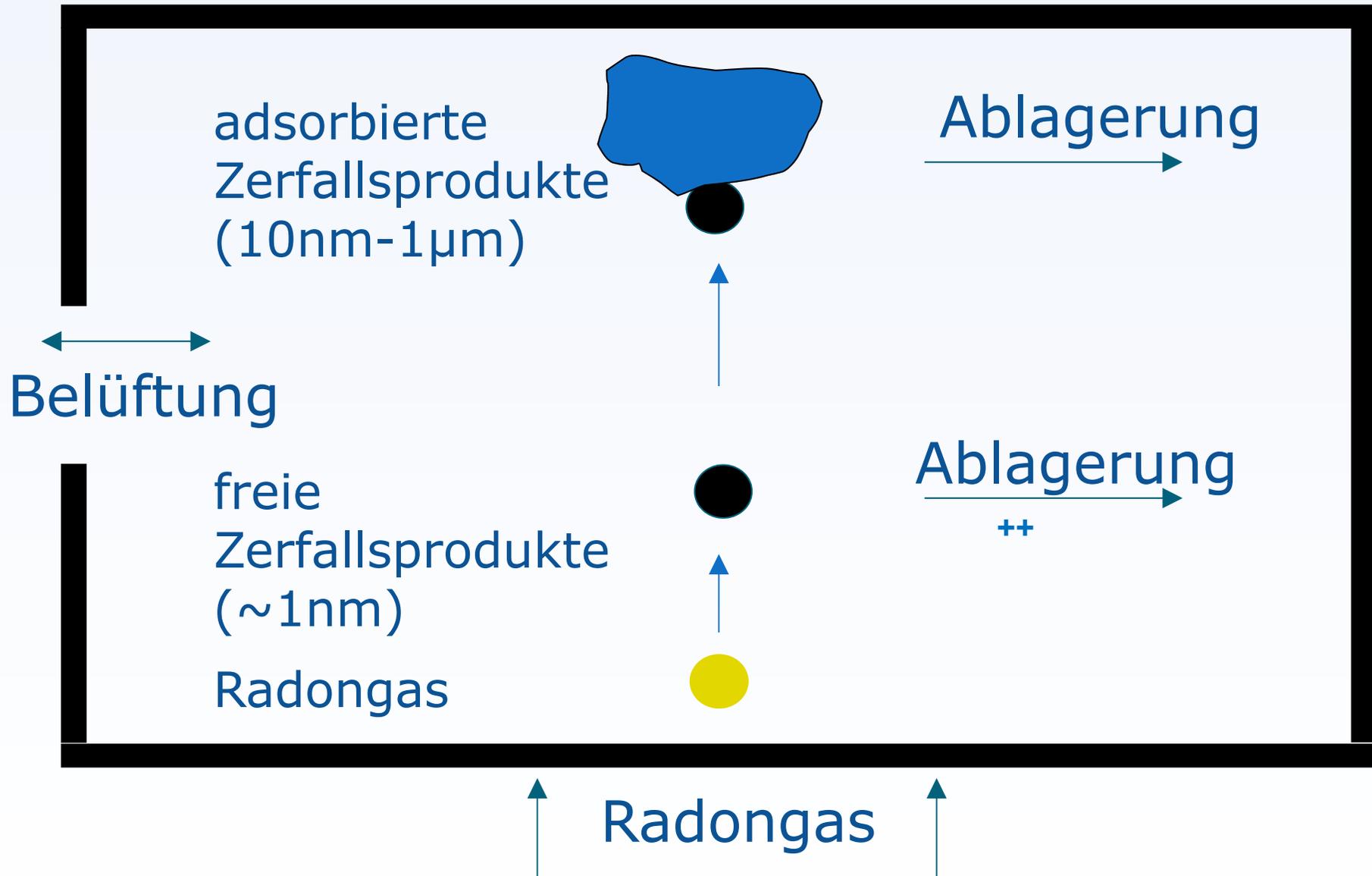
Exposure scenario	Mode	Deposition in regions (%)					
		ET ₁	ET ₂	BB	bb	Al	Total
All	u	51.91	27.96	7.93	10.05	0.59	98.43
Indoor workplace	n	3.85	2.08	0.93	6.53	27.90	41.29
	a	10.68	5.75	0.60	1.42	9.05	27.51
Mine	a	3.16	1.70	0.41	2.16	9.94	17.37
Tourist cave	a	3.42	1.84	0.47	2.61	11.94	20.28

Table A.6. Deposition of inhaled ²²²Rn progeny aerosols in respiratory tract regions. ‘u’ = unattached mode, ‘n’ = nucleation mode, and ‘a’ = accumulation mode.

Definition der wichtigsten Parameter

- Atmungsrate
- Eigenschaften von Aerosolen
 - freie Fraktion
 - Grössenverteilung
- Gleichgewichtsfaktor

Verhalten von Radon-Zerfallsprodukten



Gleichgewichtsfaktor F

F beschreibt das Gleichgewicht zwischen Radongas und Radon-Zerfallsprodukten

F=1		F=0.3	
Nuklid	Bq m ⁻³	Nuklid	Bq m ⁻³
²²² Rn (Gas)	1.0	²²² Rn (Gas)	1.0
²¹⁸ Po	1.0	²¹⁸ Po	0.6
²¹⁴ Pb	1.0	²¹⁴ Pb	0.3
²¹⁴ Bi	1.0	²¹⁴ Bi	0.2

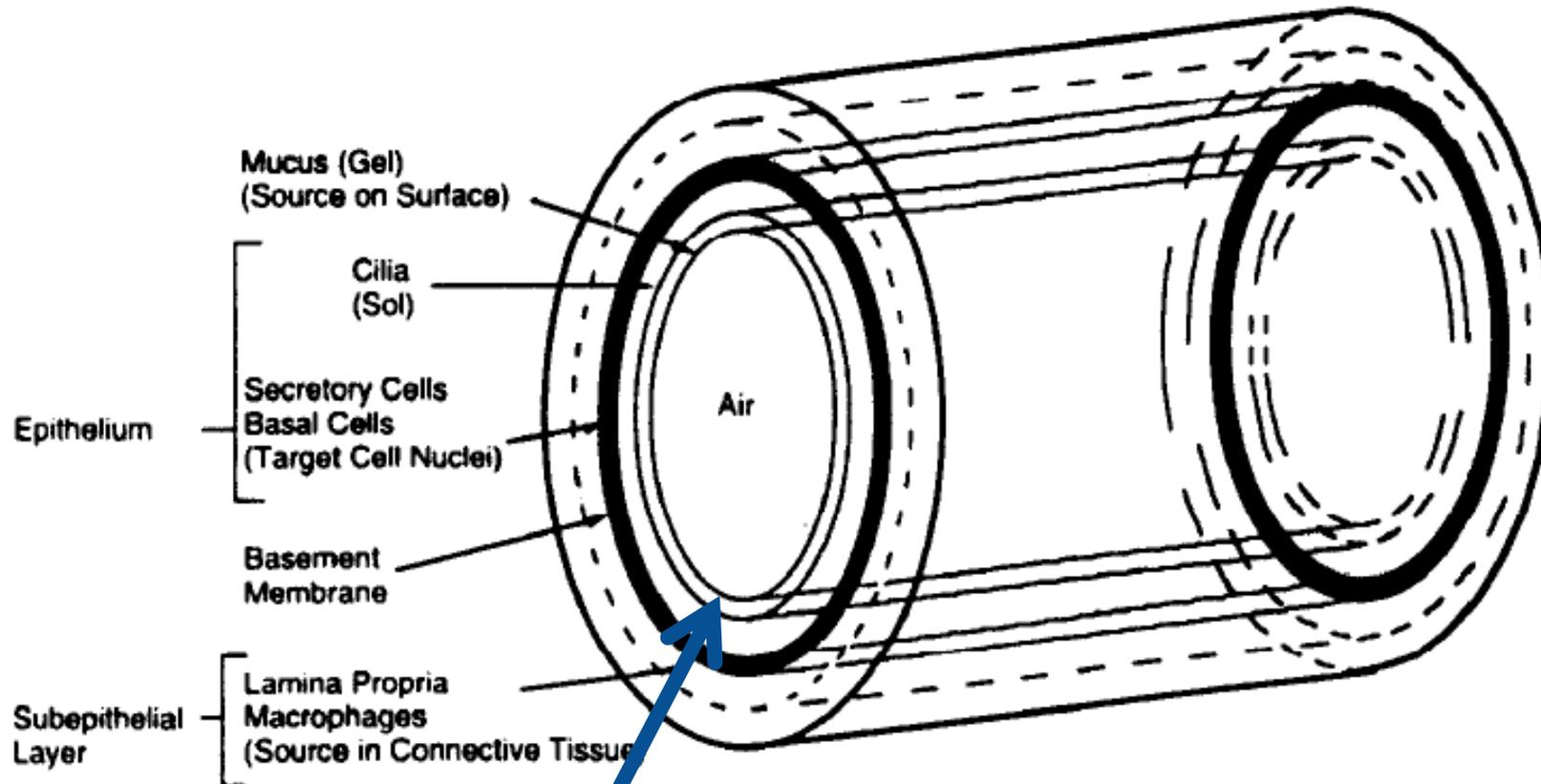
Der Wert von F hängt von der Belüftung ab:

Innenluft:	F ≈ 0.4	natürliche Belüftung
Minen:	F ≈ 0.2	aktive Belüftung

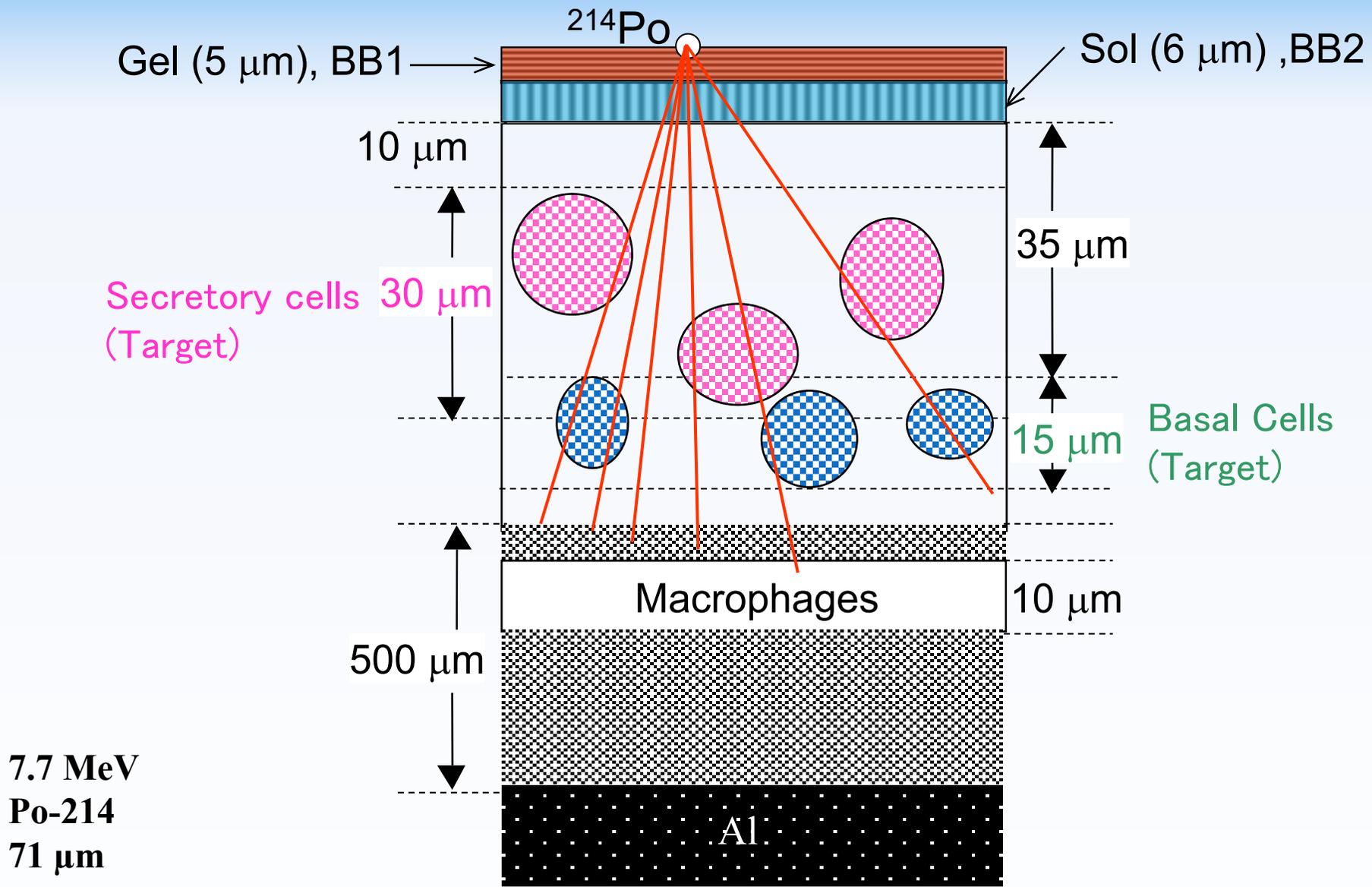
B/ Definition der wichtigsten Parameter

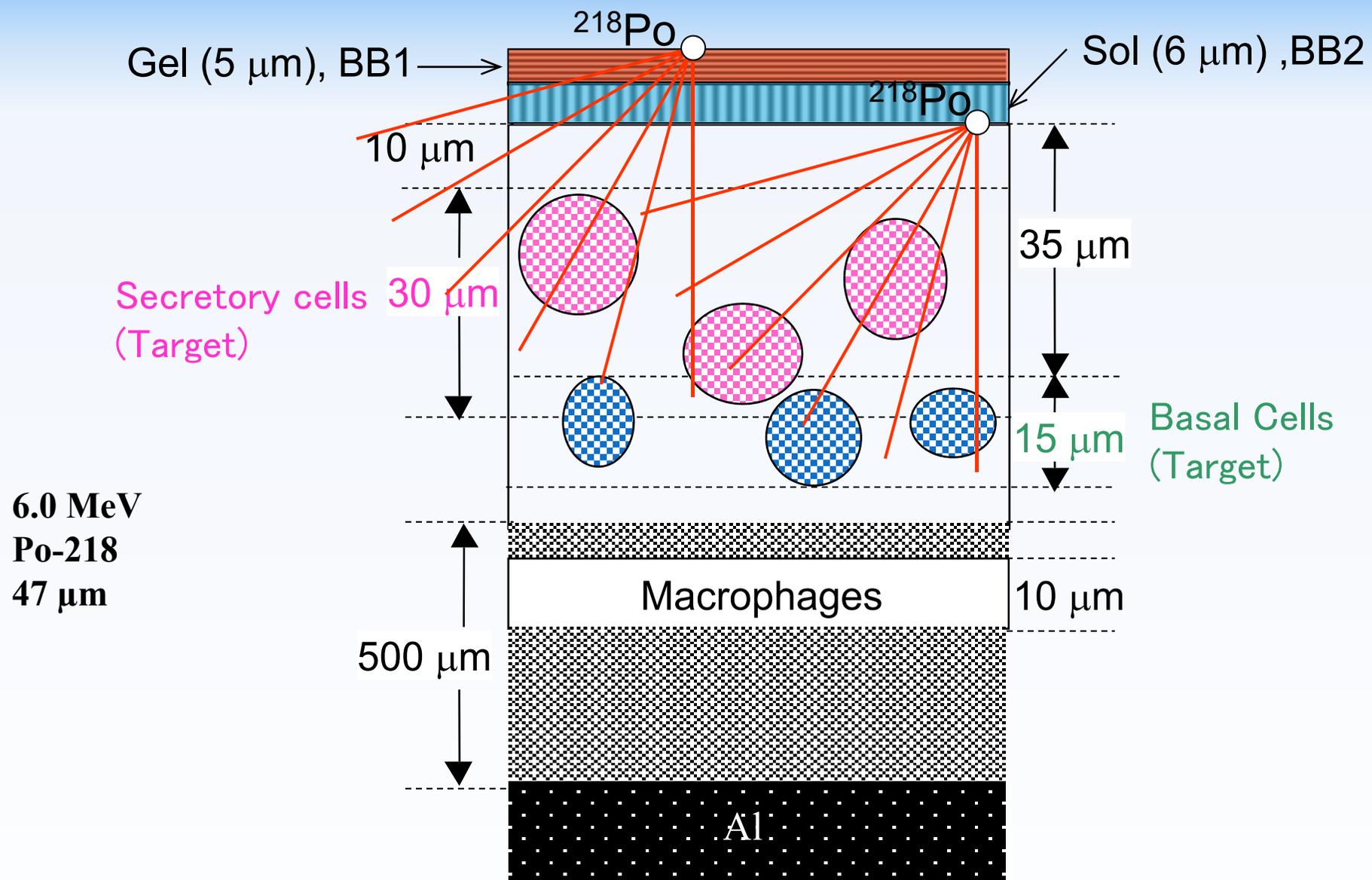
- Atmungsrate
- Eigenschaften von Aerosolen
 - freie Fraktion
 - Grössenverteilung
- Gleichgewichtsfaktor
- **Geometrisches Modell der Atemwege**

Geometrisches Modell der Atemwege (HRTM)



an der Oberfläche abgelagertes Radionuklide





Dosiskoeffizienten von Rn + Zerfallsprodukte

	Gleich- gewichts- faktor	freie Fraktion %	effektive Dosis mSv pro WLM
Büro	0.4	8	20 (a) 14 (b)
Minen	0.2	1	12
Touristische Höhle	0.4	15	24
Wohnraum	0.4	8	13

(a) ICRP reference breathing rate: $1.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ($\frac{1}{3}$ sitzend, $\frac{2}{3}$ leichte Bewegung)

(b) niedriger Atemungsfluss von $0.86 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ($\frac{2}{3}$ sitzend, $\frac{1}{3}$ leichte Bewegung)

Vergleich zwischen dosimetrischem und epidemiologischem Ansatz

	mSv pro WLM	effektive Dosis mSv pro mJ h m ⁻³
<i>Dosimetrie</i>		
Mine	12	3.3
Büro	20	5.7
<i>niedriger Atemungsfluss</i>	14	3.9
Touristische Höhle	24	6.7
Wohnraum	13	3.7
<i>Epidemiologie</i>		
Berufliche Exposition	12	3.4
Bevölkerung	9	2.6

$$1 \text{ WLM} = 3.54 \text{ mJ h m}^{-3}$$

Dosiskoeffizienten von Rn + Zerfallsprodukte

Vorschläge der ICRP

- **3 mSv pro mJ h m⁻³ (ca. 10 mSv pro WLM)**
in den meisten Fällen
- **6 mSv pro mJ h m⁻³ (ca. 20 mSv pro WLM)**
für Höhlen und körperlich anspruchsvolle
Arbeiten

*Alle Einzelheiten der Berechnungen sind im Anhang aufgeführt. Es ist eine Anpassung dieser Koeffizienten möglich (**nach Zustimmung der Aufsichtsbehörde!!!**), wenn genauere Daten zum Gleichgewichtsfaktor und/oder zu den Eigenschaften der Aerosole vorliegen.*

ICRP

www.ICRP.org