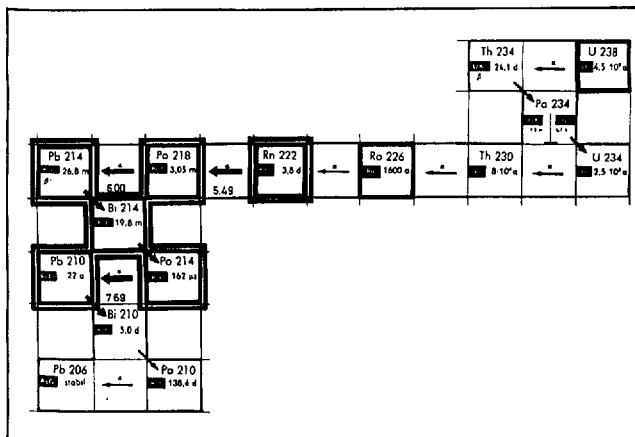


# Strahlenexposition und Risiko durch Radon in der Innenluft schweizerischer Wohnhäuser

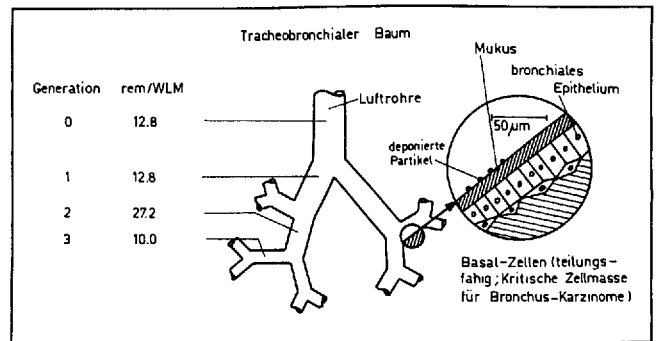
Werner Burkart  
 Biologie und Umwelt, Abt. 81, EIR, CH-5303 Würenlingen

## Einführung

Die Erdkruste enthält in regional stark unterschiedlichen Konzentrationen primordiale Radioaktivität. Mehrere dieser natürlichen Radionuklide liefern durch das von ihnen erzeugte Strahlenfeld (terrestrische Strahlung) oder nach der Aufnahme in den Körper (Kalium-40 im Knochen) wichtige Beiträge zur Strahlenexposition der Bevölkerung. Erst vor wenigen Jahren wurde erkannt, dass auch bei den Innenluftschadstoffen eine durch die terrestrische Radioaktivität bedingte radiologische Komponente von Bedeutung ist. Es handelt sich dabei um Radon und seine kurzlebigen Zerfallsprodukte. In den Zerfallsreihen von Uran und Thorium entstehen nach dem Radium die radioaktiven Radon-Isotope Rn-222 («Radon») und Rn-220 («Thoron»), die als Edelgase aus Baugrund und Gebäudestruktur in die Innenluft von Häusern austreten können. *Abbildung 1* zeigt am Beispiel der Uran-238 Zerfallsreihe Halbwertszeiten und Zerfallsenergie der gebildeten Nuklide. Die sehr kurzlebigen Radonzerfallsprodukte Polonium-218, Blei-214 und Wismut-214 lagern sich als Metallionen an sehr kleine Luftpartikel an (0.1–0.3 µm Durchmesser). Die recht hohe Depositionswahrscheinlichkeit dieser Aerosolfraktion im bronchialen und pulmonären Bereich der Lunge führt zu beachtlichen lokalen Dosen (*Abb. 2*) [2]. Die durch die Innenluftnoxe Radon bedingte Dosis ist in vielen Ländern die wichtigste Komponente der Strahlenexposition der Bevölkerung.



*Abb. 1.* Zerfallsschema von Uran-238, das über mehrere langlebige Zwischenprodukte zum Edelgas Radon führt. Die anschliessenden Zerfälle von Polonium (Po-218, Po-214), Blei-214 und Wismut-214 bis zum relativ stabilen Blei-210 erfolgen sehr rasch (modifiziert von Seelmann et al. [1]).



*Abb. 2.* Strahlendosen durch deponierte Radon-Folgeprodukte in den ersten 4 Generationen des Lungenbaums. Der kreisförmige Ausschnitt zeigt die Lage der kritischen Zellen im Vergleich mit der Reichweite von Alphateilchen (ca. 50–70 Mikrometer). Numerische Werte aus [3]. 1 WLM (working level month) entspricht einem Aufenthalt von 170 Stunden in Luft mit einer Radon- und Radontöchterkonzentration von 100 pCi/l.

Grosse Teile der Schweizer Alpen enthalten an der Oberfläche kristalline Gesteine mit erhöhtem Uran- und Thoriumgehalt. Messungen unseres Institutes in den Winterhalbjahren seit 81/82 in Einfamilienhäusern dieser Regionen erbrachten denn auch gegenüber dem schweizerischen Mittelland stark erhöhte Radonmesswerte mit Spitzenresultaten in Keller und Wohnräumen von 12.2 kBq/m<sup>3</sup> (330 pCi/l) bzw. 3 kBq/m<sup>3</sup> (80 pCi/l). Da die Abschätzung der Strahlenexposition der schweizerischen Bevölkerung in den Aufgabenbereich der Eidg. Kommission für die Überwachung der Radioaktivität fällt, konzentrieren sich unsere Bemühungen auf die Erfassung und Quantifizierung der für den Radontransport relevanten Parameter. Die dabei zu gewinnenden Erkenntnisse sollen eine Basis für die Sanierung von kritischen Häusern ergeben, da sich skandinavische und nordamerikanische Resultate infolge der stark unterschiedlichen Bautechniken und Klimafaktoren nur begrenzt auf Mitteleuropa übertragen lassen. Aus Vorversuchen, Literatur und theoretischen Überlegungen stufen wir die in Tabelle I aufgeführten Parameter für den Radontransport in und um Gebäude als relevant ein.

In *Abbildung 3* sind einige sich mit den Jahreszeiten verändernde Faktoren, die auf den Radoninnenluftpegel einwirken, graphisch dargestellt. Es wird klar ersichtlich, dass das Lüftungsverhalten nur eine von vielen Einflussgrössen ist und deshalb in vielen Fällen die Radonpegel im Winter gegenüber den Sommerwerten nur unbedeutend erhöht sind.

Radiumquellen	Boden Trinkwasser (Erdgas) Baumaterialien
Porosität von	Untergrund Barrieren Baumaterialien
Diffusion und Konvektion im Untergrund	Bodenfeuchtigkeit Temperaturgradienten
Druckdifferenzen an der Gebäudehülle	Windgeschwindigkeit Windrichtung Kamineffekt
Dichtheit der Gebäudehülle/ Benutzerverhalten	Passives Lüften Ventilatoren

Tabelle 1. Wichtige Einflussgrößen für Radontransport und -verweildauer in Bauuntergrund und Gebäuden

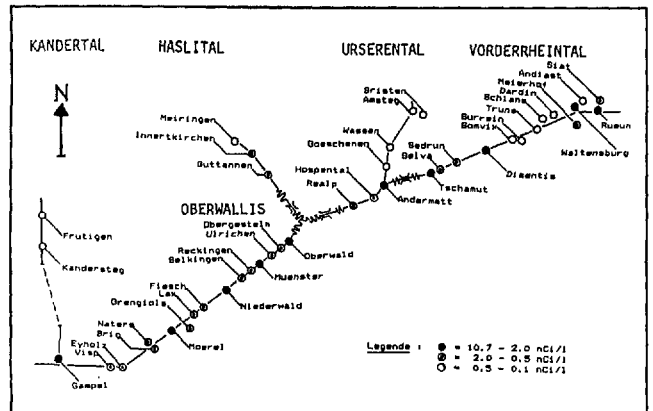


Abb. 4. Radonpegel im Wasser der kommunalen Verteilnetze in den Zentralalpen.

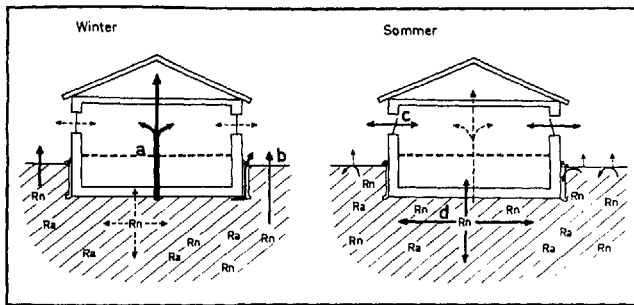


Abb. 3. Von der Jahreszeit abhängige Parameter, die den Radonpegel in der Innenluft beeinflussen  
 a) Kamineffekt in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz innen/ausen  
 b) Radonübergang von der Lithosphäre in die Atmosphäre  
 c) Lüftungsverhalten  
 d) Vom Wassergehalt des Bodens abhängige Radondiffusion und -konvektion im Untergrund.

**Methoden**

Radonpegel (Langzeitmittelwerte) wurden mit passiven «track etch»-Dosimetern bestimmt. In den meisten Fällen wurde im Keller (Quellterm Geologie), Wohnzimmer (meist Erdgeschoss) und Schlafzimmer (meist erster Stock) gemessen. Kurzzeitige Schwankungen wie zum Beispiel Tagesverlauf und Einfluss des Lüftens wurden mit aktiven Monitoren (Eberline) erfasst. Diese Geräte sammeln die Radonzerfallsprodukte der Luft durch eine Pumpe auf einem Filter, dessen Radioaktivität kontinuierlich gemessen wird.

**Resultate**

*a) Radonpegel in der Schweiz*

Erste Messungen der Radonkonzentration in der Innenluft schweizerischer Einfamilienhäuser ergaben im Mittelland Durchschnittswerte von etwa 45 Bq/m<sup>3</sup> (1.5 pCi/l) [4]. Bei der Verwendung von UNSCEAR-Konversionsfaktoren ergibt sich daraus eine jährliche Strahlenexposition von 1–2 mSv effektive Äquivalentdosis (100–200 mrem) [5]. Die Radonexposition ist

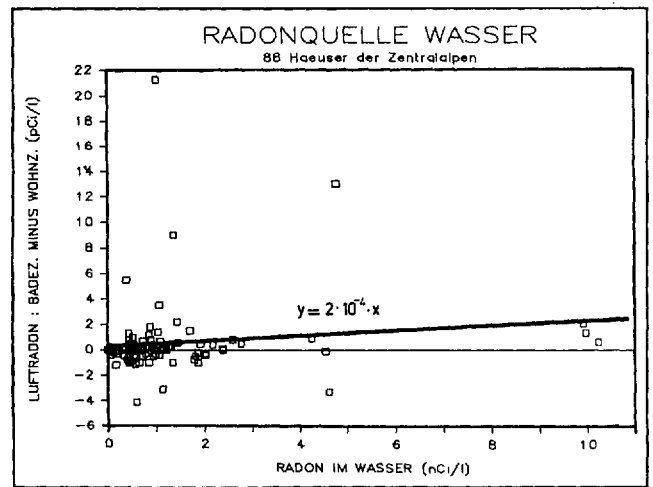


Abb. 5. Beziehung zwischen der Differenz der Radonpegel in Badezimmer und Wohnzimmer und dem Radongehalt des Trinkwassers.

somit auch in der Schweiz die wichtigste Komponente der natürlichen und zivilisatorischen Strahlendosis. In den Regionen der Granit- und Gneisalpen wurden deutlich höhere Durchschnittswerte gemessen. In einem allerdings sehr kleinen Prozentsatz der Häuser fanden sich Radonpegel, die nach UNSCEAR82 [5] sogar zu einer Überschreitung der jährlichen Dosislimite für beruflich strahlenexponierte Personen führen.

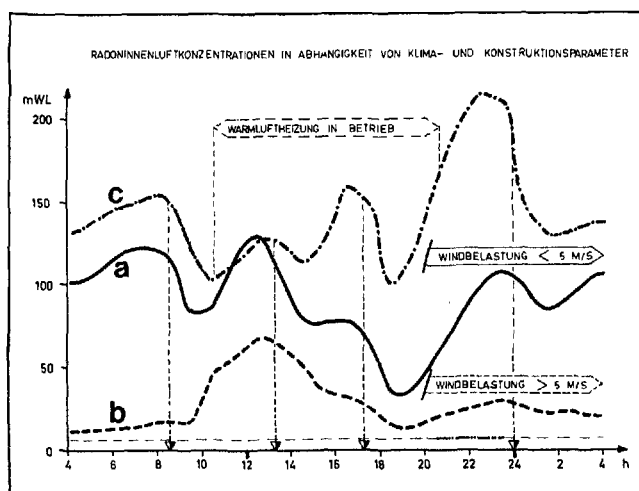
*b) Radon aus dem Trinkwasser*

Neuere Messungen lassen auch einen Beitrag des Trinkwassers zum Radon-Innenluftpegel vermuten. Ein hoher Prozentsatz des Radons des im Hause verwendeten Trinkwassers tritt in die Innenluft über. Beim Duschen und in (Geschirr)Waschmaschinen beträgt dieser Anteil etwa 60 bzw. fast 100%. In Gebieten des Zentralmassivs der Schweizer Alpen wurden in 32% der untersuchten Gemeinden Radonkonzentrationen im Trinkwasser von über 74 kBq/m<sup>3</sup> (2 nCi/l) gemessen (Abb. 4) [6]. Aus der Verdünnung in der Luft lässt sich für einen Haushalt mit durch-

schnittlicher Luftwechselrate und Wasserverbrauch ein wasserbedingter zusätzlicher Radonpegel von etwa  $1 \text{ Bq/m}^3$  Raumluft pro  $10 \text{ kBq/m}^3$  Radon im Trinkwasser abschätzen. *Abbildung 5* zeigt die Korrelation zwischen dem Radongehalt des Trinkwassers und der Differenz des Luftradonpegels in Badezimmer und Wohnzimmer. Da in den untersuchten Gebieten auch die durch den geologischen Untergrund bedingte Radonkomponente sehr stark erhöht ist, wurde der Pegel des Wohnzimmers (Annahme: durch den Untergrund bedingt) vom Wert des Badezimmers abgezogen.

#### c) Studien mit kontinuierlichen WL-Monitoren

Eine quantitative Erfassung der den Radonpegel dominierenden Einflussfaktoren (siehe Tabelle 1) ist nur durch die kontinuierliche Erfassung von Radon- oder Radontöchterkonzentration und der relevanten Klimafaktoren möglich. Erste Versuche in diese Richtung vor allem in Nordamerika und Skandinavien zeigten die Bedeutung des geologischen Untergrundes als Quelle des Radons und der wind- und temperaturabhängigen Druckdifferenzen als Triebkraft des Radontransports. Da der Baustil vor allem der Einfamilienhäuser in Mitteleuropa sich sehr stark von dem in den USA und in Skandinavien unterscheidet, lassen sich die bisherigen Befunde nicht direkt auf die Situation in der Schweiz übertragen. Im Hinblick auf eine Multiparameterstudie in den Alpen wurden deshalb einzelne als wichtig erkannte Faktoren mit kontinuierlich registrierenden Radontöchtermonitoren untersucht. *Abbildung 6* zeigt als Beispiel den Einfluss der Windgeschwindigkeit und des Transportes von



*Abb. 6.* Einfluss der Windgeschwindigkeit und Erhöhung des Radonpegels durch den Transport radonreicher Kellerluft in den Wohnraum. Vertikale Linien: Stosslüftung.

- a) Radonpegel bei kleinen Windgeschwindigkeiten (Mittel von 7 Tagen)
- b) Radonpegel bei Windgeschwindigkeiten über  $5 \text{ m/sec}$  (Mittel von 3 Tagen)
- c) Erhöhung des Radonpegels durch Warmluftheizung (Mittel von 2 Tagen).

Kellerluft in den Wohnbereich auf den Radonpegel. Trotz den oft überzeugenden Korrelationen ergeben sich Fälle, in denen weitere, schwer zu quantifizierende Grössen entscheidenden Einfluss auf den Radonpegel ausüben. Beispiele solcher Faktoren sind Wassergehalt des Untergrundes, Luftfeuchtigkeit und atmosphärische Druckschwankungen. Leider deuten die bisherigen Ergebnisse darauf hin, dass auch in Zukunft nur die direkte Messung am Objekt mit genügender Genauigkeit Aufschluss über den Radonpegel in der Innenluft von Häusern geben kann. Der Einfluss von Abdichtungsmassnahmen an der Gebäudehülle zur Reduktion des Luftwechsels wurde an anderer Stelle kritisch betrachtet [7].

#### Radon, eine Innenluftnoxe unter vielen?

Humanepidemiologische und tierexperimentelle Studien zeigen über mehrere Grössenordnungen der Exposition eine annähernd lineare Beziehung zwischen Strahlenexposition durch Radonzerfallsprodukte und Lungenkrebs. Von mehreren internationalen Organisationen wurden entsprechende Risikofaktoren publiziert (z. B. NCRP 78 [8]), die weitgehend auf den Untersuchungen von Bergwerkarbeitern beruhen (*Abb. 7*). Die bis heute publizierten epidemiologischen Studien über das Risiko der Radonexposition im Häusern erlauben, trotz dem Befund einer statistisch signifikanter Erhöhung der Lungenkrebsmortalität mit steigenden Radonpegel der Innenluft, keine direkte Quantifizierung des Radon-Risikos im Wohnbereich [9, 10]. Es muss jedoch an dieser Stelle erwähnt werden, dass in einem zwar kleinen Bruchteil der Häuser der Granit- und Gneisalpen über eine Generation Lungendosen akkumuliert werden, die im Bereich der Dosen von Gruppen von Bergwerkarbeitern liegen, die ein signifikant erhöhtes Lungenkrebsrisiko aufweisen (*Abb. 7*).

Viele Studien an Bergwerkarbeitern zeigen einen deutlichen Synergismus zwischen Zigarettenrauchen und Radonexposition. Ein Vergleich des Risikos durch die Radonzerfallsprodukte in der Innenluft bei linearer Extrapolation mit den gesundheitlichen Gefahren des Rauchens ergibt auch hier eine deutliche Dominanz des freiwilligen Risikos. Bei durchschnittlichen Radonpegeln von  $45 \text{ Bq/m}^3$  ( $1.2 \text{ pCi/l}$ ) wird etwa 10–30% der Lungenkrebsmortalität bei Nichtrauchern der Strahlenexposition durch die Radonzerfallsprodukte zugeschrieben [11]. Die jährlich durch die Innenluftnoxe Radon bedingten Lungenkrebsfälle in der Schweiz beliefen sich nach dieser Abschätzung auf 100 bis 200 Fälle.

Aus Sanierungsprogrammen in Schweden und Kanada ist bekannt, dass sich die Radonpegel und damit die Strahlenexposition in Häusern in vielen Fällen kostengünstig reduzieren lassen. Es steht dabei vor allem das Absaugen von radonreichem Bodengas unter der Fundamentplatte mit Hilfe eines Kleinventilators im Vordergrund. Angesichts der beachtlichen Jahresdosen in Gebieten mit erhöhter natürlicher Radioaktivität, die sogar in einzelnen Fällen die Limiten für berufliche

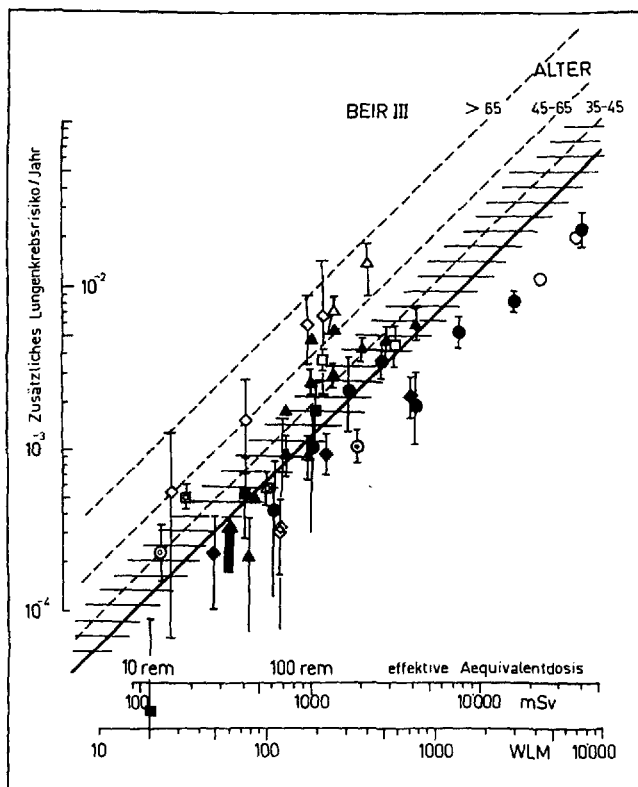


Abb. 7. Humanepidemiologische Daten des radoninduzierten Lungenkarzinoms. Jeder Punkt gibt kumulative Dosis und jährliches zusätzliches Lungenkrebsrisiko während der Expressionsperiode

Uranbergwerke: USA ●; Kanada ■; Tschechoslowakei ▲; Eisen, Zink, Fluorspar: Schweden ◆, ◇, △, △; Kanada □; USA ○

Überlebende Hiroshima/Nagasaki (Gammadosis): ⊙

Ankylosing spondylitis Patienten: ⊠

Die Linien (ausgezogen: BEIR I [12]; gestrichelt, altersabhängig: BEIR III [13]) bzw. schraffierte Flächen (ICRP 32 [14]) geben die Risikofaktoren internationaler Organisationen. Der Pfeil entspricht der innerhalb von 30 Jahren in einem Haus mit 10 pCi/l Radon akkumulierten Dosis.

Expositionen aus «künstlichen» Quellen überschreiten, sollte bei Neubauten sowie bei Abdichtungsmassnahmen zwecks Energiesparens vermehrt auf die Auswirkungen auf den Radonpegel geachtet werden. Das Kosten/Nutzen Verhältnis bei der Sanierung von Häusern mit stark erhöhten Radonpegeln ist im Vergleich zu den Aufwendungen zur Reduktion der Strahlendosis in den Bereichen Industrie und Medizin sehr günstig [4].

#### Zusammenfassung

Das radioaktive Edelgas Radon aus den natürlichen Zerfallsketten des Urans und des Thoriums tritt aus Bauuntergrund, Baumaterialien und Trinkwasser in regional stark unterschiedlichen Mengen in die Innenluft über. Die durch die kurzlebigen Radon-Zerfallsprodukte bedingte Bestrahlung der Lunge durch alpha-Zerfälle ist in der Schweiz und mehreren anderen Ländern die wichtigste Kompo-

nente der Strahlenexposition der Bevölkerung. Die jährlichen Dosen in Gebieten mit stark uranhaltigem, kristallinem Untergrund können die Limiten für beruflich strahlenexponierte Personen erreichen. Eine klare, gesicherte Beziehung zwischen Radonexposition und Erhöhung der Lungenkarzinom-Inzidenz besteht jedoch nur für Expositionen in Bergwerken. Die Vielzahl der humanepidemiologischen Studien über mehrere Grössenordnung der Exposition deuten auf eine lineare Dosis/Wirkung-Beziehung.

Der Radonpegel wird durch Geologie, Baumaterialien und -technik, Klimafaktoren sowie durch das Benutzerverhalten bestimmt. Erfahrungen aus Skandinavien und Nordamerika zeigen, dass Häuser mit kritischen Radonpegeln mit vertretbarem Aufwand saniert werden können.

#### Résumé

Le radon, un gaz rare, provient de la chaîne de désintégration naturelle de l'uranium et du thorium. Il pénètre dans l'air des bâtiments du sous-sol, des matériaux de construction et de l'eau potable et cela en quantités très variables suivant les régions. L'irradiation des poumons par la désintégration alpha des produits de filiation à courte période du radon compose la part la plus importante de l'exposition aux rayonnements ionisants de la population en Suisse et dans divers autres pays. Les doses annuelles accumulées dans des régions au sous-sol cristallin riche en uranium, peuvent atteindre les limites autorisées pour des personnes professionnellement exposées aux radiations. Un rapport significatif entre l'exposition au radon et la fréquence du carcinome pulmonaire n'a été constaté que chez les personnes travaillant dans les mines d'uranium. Les nombreuses études épidémiologiques humaines concernant des expositions de différents ordres de grandeur semblent indiquer une relation linéaire de dose à effet.

Le niveau du radon dans les bâtiments est déterminé par le sous-sol, les matériaux et la technique de construction, des facteurs climatiques ainsi que par le comportement des habitants ou des usagers. Des expériences faites en Scandinavie et en Amérique du Nord montrent qu'il est possible d'assainir les maisons ayant un niveau de radon critique par des moyens tout à fait justifiables.

#### Summary

The radioactive noble gas radon, a member of the natural decay chains of uranium and thorium, enters the indoor environment in regionally diverging amounts. Subsoil of dwellings, building materials and drinking water are the main sources. In Switzerland and in many other countries, exposure of the lung tissue to the short lived radon decay products is the most important component of the radiation dose of the general public. Annual doses in areas with crystalline rock of high uranium content may reach the limits set up for occupational exposure. However, a clear link between cumulative exposure to radon daughters and elevation of the lung cancer incidence exists only for underground miners. The majority of human epidemiological studies point to a linear dose effect relationship.

The indoor radon levels are determined by geology, building materials and techniques, climate and behaviour of the occupants. Experiences from Scandinavia and the Northern parts of America clearly indicate the possibility of cost-efficient remedial measures to reduce indoor radon levels.

#### Literatur

- [1] Seelmann-Eggebert Pfennig G. Münzel H. und Klewe-Nebenius H. Nuklidkarte. Karlsruhe: Kernforschungszentrum: 1981.
- [2] Burkart W. Assessment of Radiation Dose and Effects from Radon and its Progeny in Energy-Efficient Homes. Nuclear Technology 1983; 60: 114-123.
- [3] Harley N. and Pasternack B.S. Environmental Radon Daughter Alpha Dose Factors in a Five-Lobed Human Lung. Health Phys. 1982; 42: 789-799.
- [4] Burkart W. Radon und seine Zerfallsprodukte in Wohnräumen: Abschätzung von Strahlenexposition und Risiko für in der

- Schweiz gemessene Radonpegel. Würenlingen: EIR-Bericht Nr. 512: 1984.
- [5] UNSCEAR 82. Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects. Report of the UN scientific committee on the effects of atomic radiation. New York: United Nations: 1982.
- [6] *Buchli R.* and *Burkart W.* Main sources of indoor radon in the Swiss Central Alps. In: The Sciences of the Total Environment. Proceedings of the Seminar on Natural Radiation and its Regulatory Implications. Maastricht NL, Elsevier: 1985: 425–432.
- [7] *Burkart W.* and *Chakraborty S.* Possible Health Effects of Energy Conservation: Impairment of Indoor Air Quality due to Reduction of Ventilation Rate. *Env. International* 1984; 10: 455–461.
- [8] National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP. Evaluation of Occupational and Environmental Exposures to Radon and Radon Daughters in the United States. Bethesda, MD: 1984: NCRP Report No. 78.
- [9] *Axelsson O.* Lung cancer and radon in dwellings. *Lancet* 1981: October 31: 995–996.
- [10] *Hess C.T., Weiffenbach C.W.* and *Norton S.A.* Environmental radon and cancer correlation in Maine. *Health Phys.* 1983; 45: 339–348.
- [11] *Jacobi W.* Expected Lung Cancer Risk from Radon Daughter Exposure in Dwellings. In: *Berglund B et al., Hrsg. Indoor Air: Recent Advances in the Health Sciences and Technology.* Stockholm. Liber, 1984: Vol. 1: 31–42.
- [12] NRC, National Research Council. BEIR I: The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. Washington, D.C.: National Academy Press: 1972.
- [13] NRC, National Research Council. BEIR III: The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. Washington, D.C.: National Academy Press: 1980.
- [14] ICRP, International Commission on Radiological Protection. Limits for Inhalation of Radon Daughters by Workers. Oxford: Pergamon Press: 1981: ICRP-Publikation 32.

**alles spricht für**



**typon**

**QUALITÄT  
SERVICE  
PREIS**

**der einzige  
Hersteller  
medizinischer  
Röntgenfilme  
in der  
Schweiz**

**typon**

Typon Aktiengesellschaft  
für Photographische Industrie  
CH-3400 Burgdorf/Schweiz  
Telefon 034 21 21 71 Telex 914100