

**Zeitschrift:** Radioaktivität der Umwelt in der Schweiz = Radioactivité de l'environnement en Suisse = Radioattività dell'ambiente in Svizzera

**Herausgeber:** Bundesamt für Gesundheitswesen, Abteilung Strahlenschutz

**Band:** - (1989-1990)

**Rubrik:** Strahlenexposition durch Radon

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 03.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## **2. STRAHLENEXPOSITION DURCH RADON**

### **2.1. EINLEITUNG**

H. Vöklé, Sektion Überwachung der Radioaktivität, BAG, Fribourg

#### **2.1.1. Herkunft und Ausbreitung des Radon**

Radon und seine Folgeprodukte sind im Strahlenschutz zu einem wichtigen Thema geworden wegen des möglicherweise davon ausgehenden gesundheitlichen Risikos. Erhöhte Radonpegel im Hausinnern hängen nicht nur vom Radium-Gehalt des Bauuntergrundes ab, sondern auch davon, wie weit das beim Radium-Zerfall entstehende Radon aus dem Gestein austreten und im Porenvolumen des Bodens zirkulieren kann. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Permeabilität (als Folge der Porosität) des Erdbodens für das Radon-Gas. Diese ist hoch auf grobem, reinem Kies, auf schlecht verfestigten Auffüllungen sowie in Felssturz- oder Karstgebieten. Die wichtigste Bewertungsgrösse ist demnach das Produkt von Radonkonzentration und Permeabilität, nämlich die Radon-Verfügbarkeit.

Das im Bauuntergrund vorkommende Radium ist in der Regel natürlichen Ursprunges, wobei allerdings der Radiumgehalt in der obersten Erdbodenschicht, je nach Herkunft, nicht immer mit demjenigen des darunterliegenden Gesteins übereinstimmen muss. In einzelnen Fällen kann der Radiumgehalt auch lokal erhöht sein z.B. durch Radiumabfälle aus der Uhrenindustrie oder im Zusammenhang mit dem Uranerzabbau.

#### **2.1.2. Eintritt in das Haus**

Für den Eintritt des Radon in das Hausinnere spielt die Qualität der Abdichtungen des Hausfundamentes gegenüber dem Bauuntergrund eine wesentliche Rolle. Das Eindringen in den Keller und die Verteilung im Hausinnern wird zudem wesentlich von den Druck- und Temperaturverhältnissen im Haus (z.B. Kamineffekt durch Heizung) beeinflusst. In nicht unterkellerten Räumen des Erdgeschosses und bei durchlässigen Holz-Fussböden sind die Radonwerte höher als in unterkellerten Räumen mit gut abgedichteten Fussböden; ebenso ergeben Einfamilienhäuser oft höhere Werte als Mehrfamilienhäuser. Da das Radon meist von unten eindringt (Baumaterialien und Trinkwasser spielen in der Schweiz in der Regel keine wichtige Rolle), ist dessen Konzentration in den oberen Stockwerken meist niedriger als etwa im Erdgeschoss.

#### **2.1.3. Messtechnische Aspekte**

Für die Strahlenexposition ist primär die Konzentration der Radon-Folgeprodukte in der Innenluft massgeblich. Meist wird aus messtechnischen Gründen nur das Radon-Gas gemessen, weshalb auch der sogenannte Gleichgewichtsfaktor bekannt sein muss. Er ist gegeben durch das Konzentrationsverhältnis zwischen den Folgeprodukten und dem Radongas und liegt nach Lite-

raturangaben im Hausinnern etwa zwischen 0.3 und 0.5. Für dosimetrische Überlegungen ist auch der aerosolgebundene Anteil der Radon-Töchter und die Grössenverteilung der Aerosole, an die die Folgeprodukte angelagert sind von Bedeutung.

Da der Radongehalt im Hausinnern z.T. erhebliche tägliche und jahreszeitliche Schwankungen aufweisen kann, sind integrierende Überwachungsverfahren die einen Mittelwert über mindestens einen oder mehrere Monate liefern den Kurzeitmessungen vorzuziehen. Solche Messverfahren mit passiven Dosimetern werden eingesetzt für Radon-Erhebungen über grössere Regionen oder Gebiete. Die Frage der Repräsentativität bei der Auswahl der Häuser, bzw. die nachträgliche diesbezügliche Korrektur der Stichprobe, ist dabei ein nicht zu vernachlässigender Aspekt, wie übrigens auch die Sommer/Winter-Korrektur und (für die Dosisabschätzung) die tatsächlichen Aufenthaltszeiten der Bewohner im Hausinnern.

#### **2.1.4. Das Gesundheitsrisiko durch Radon**

Zur gesundheitlichen Bewertung der Radonkonzentration im Hausinnern stehen epidemiologische Daten von Minenarbeitern zur Verfügung, bei denen eine Korrelation zwischen Lungenkrebs und erhöhtem Radongehalt festgestellt wurde. Wieweit jedoch diese Erfahrungen auf den Wohnbereich mit völlig anderen Verhältnissen bezüglich Aerosolspektrum, Luftfeuchte, Atemraten etc. übertragen werden können, bleibt eine offene Frage. Es gibt heute noch keine signifikante Korrelation zwischen Radon im Wohnbereich und der Lungenkrebshäufigkeit bei der Bevölkerung. Alle entsprechenden Rechenmodelle zur Abschätzung des gesundheitlichen Risikos durch Radon sind deshalb mit einer grossen Unsicherheit behaftet und sind - zum mindesten heute - nicht beweisbar.

Die neuesten Arbeiten geben eher einem multiplikativen Modell für den Zusammenhang zwischen Radon und den gesundheitlichen Auswirkungen den Vorzug. Dies bedeutet, dass das zusätzliche Risiko (durch Radon) proportional zum bereits vorhandenen Lungenkrebsrisiko ist. Das Radon-Risiko wäre somit bei einem Raucher höher als bei einem Nicht-Raucher. Gemäss diesen Modellen wären in der Schweiz etwa ein Siebtel der Lungenkrebsfälle dem Radon zuzuordnen. Es sei allerdings mit Nachdruck auf die Unsicherheit solchen Schätzungen hingewiesen.

#### **2.1.5. Bisherige Untersuchungen in der Schweiz**

In der Schweiz genehmigte der Bundesrat 1986 ein nationales Radon-Programm RAPROS, das auf fünf Jahre (bis Ende 1991) befristet ist. Unter Koordination durch das Bundesamt für Gesundheitswesen (Abteilung Strahlenschutz) wurden die verschiedenen Aspekte des Radon-Problems durch Fachstellen des Bundes, z.T. in Zusammenarbeit mit kantonalen Stellen, bearbeitet. Ein Bericht über den Stand des Projektes bis Ende 1991 wurde vom Bundesamt für Gesundheitswesen veröffentlicht. 1992 sollen die Radonuntersuchungen im Rahmen des Routine-Überwachungsprogrammes des Bundesamtes für Gesundheitswesen weitergeführt werden.

Die einzelnen Teilprojekte des RAPROS befassten sich mit der Dosis der Schweizer Bevölkerung durch Radon in Wohnhäusern, dem Zusammenhang zwischen Radon und Geologie / Wasser, dem Einfluss von Baumaterialien, der Ausbreitung des Radons, dem Einfluss der Dichtheit der Gebäudehülle, den Pilotsanierungen von Gebäuden mit hohen Pegeln, der Herkunft hoher Radon-Werte in der Region La Chaux-de-Fonds und Sanierungen. Im folgenden Teil dieses Kapitels 2 sind die Kurzfassungen zu den einzelnen Teilprojekten aus dem RAPROS-Bericht des Bundesamtes für Gesundheitswesen abgedruckt.

#### **2.1.6. Radon-Situation in der Schweiz**

In der Schweiz sind von den etwa 3.5 mSv, die die Bevölkerung im Jahresdurchschnitt (ohne den Beitrag der Medizin) erhält, etwa 2.2 mSv (effektive Dosis) dem Radon und seinen Folgeprodukten zuzuordnen. Aber nicht nur im Mittel für die ganze Bevölkerung ist Radon der grösste Einzelbeitrag, auch die Extremwerte sind z.T. sehr hoch: In Einzelfällen treten in der Schweiz effektive Dosen durch Radon bis 150 mSv pro Jahr auf; in 90% der Häuser führt die Radon-Konzentration zu weniger als 4 mSv pro Jahr.

Aus naheliegenden Gründen kann die mittlere Radon-Exposition der Bevölkerung durch technische Massnahmen (Sanierungen) nur unwesentlich beeinflusst werden. Es sollte aber das Ziel sein, vor allem jene Häuser mit extrem hohen Radon-Werten aufzufinden und dort die Radon-Konzentrationen durch geeignete bauliche Massnahmen auf ein tragbares Niveau zu senken.

#### **2.1.7. Weiteres Vorgehen**

Das Radon-Problem erstreckt sich als interdisziplinäre Aufgabe über mehrere Wissenschaftsgebiete: Geologie/Bodenkunde, Ausbreitung von Gasen im Boden, Strahlenmesstechnik, Baufachkunde, Eigenschaften von Baumaterialien, Luftströmungen in Gebäuden, Medizin (Physiologie der Atemorgane), Wirkung von Strahlung auf lebendes Gewebe, Epidemiologie (Auswirkungen des Radon auf die Lungenkrebssterblichkeit).

Das weitere Vorgehen konzentriert sich u.a. auf zusätzliche Radonmessungen in Regionen mit erhöhtem Radon-Risiko, Information der Bevölkerung, Vereinheitlichung der Messtechnik, Sanierung von Häusern mit hohen Pegeln, Zusammenarbeit mit dem Baufachgewerbe, Erarbeiten von Empfehlungen oder Richtlinien betreffend Radon im Wohnbereich und Untersuchungen zur Dosis-Wirkungs-Beziehung.

Allen am RAPROS-Projekt beteiligten Stellen und Laboratorien sei für die gute Zusammenarbeit und das Ueberlassen der Kurzfassungen aus dem RAPROS-Schlussbericht bestens gedankt.



## 2.2. RADON-MESSUNGEN IN SCHWEIZER WOHNHÄUSERN

H. Völkle, B. Sturny, F. Steffes, P.-A. Tercier,  
R. Truffer, M. Schnyder, Ch. Johner

Sektion Ueberwachung der Radioaktivität, BAG, Fribourg

### ZIEL DES PROJEKTES:

Radon-Konzentrationen in Schweizer Wohnhäusern: Durchschnittswerte, örtliche Variation und Strahlenexposition der Bevölkerung.

### BEGRÜNDUNG

Radon ist die grösste Einzelkomponente der Strahlenexposition der Bevölkerung und weist auch den grössten Variationsbereich auf. Wegen seiner möglichen gesundheitlichen Auswirkungen sollte es besser untersucht werden.

### VORGEHEN UND METHODIK

Mit passiven Radon-Dosimetern wird die durchschnittliche Radon-Konzentration in Wohnräumen (in der Regel 2-3 Dosimeter pro Haus, ev. eines im Keller) während 2-3 Monaten gemessen. Meistens wurden diese Erhebungen im Winterhalbjahr durchgeführt und in ausgewählten Fällen im Sommer wiederholt. Die wichtigsten Parameter, die möglicherweise auf die Radon-Konzentration einen Einfluss haben, wurden mittels eines Fragebogens erfasst: Lage, Stockwerk und Benutzungsart der Räume; Lage, Bauart, Typ, Alter und Grösse des Gebäudes; Dichtheit von Fenstern und Türen sowie Lüftungsgewohnheiten; verwendete Baumaterialien; Standort, Bauuntergrund und Art der Unterkellerung etc.

Die Auswahl der Häuser erfolgte anfänglich bei Interessenten, später wurden Messkampagnen gezielt für bestimmte Regionen (Kantone) geplant und in Zusammenarbeit mit den lokalen Behörden durchgeführt. Weitere Messwerte stammen von Kampagnen des Paul Scherrer Institutes (Dr. R. Crameri, Dr. D. Furrer) oder des Institutes für Geophysik der ETH Zürich (Prof. L. Rybach, Hr. F. Medici), oder von Personen, die sich aus eigenem Interesse für eine Radon-Messung gemeldet hatten. Allen danken wir für die Zurverfügungstellung der Daten. Zur Zeit dieser Berichterstattung umfasst die Datenbank Radon-Messwerte aus etwas über 4000 Wohn- und rund 1700 Kellerräumen.

Die Auswertung der Kernspur-Dosimeter erfolgte z.T. im Paul Scherrer Institut (Abt. Strahlenhygiene, Dr. W. Burkart, Hr. Ch. Wernli, Hr. K. Heusi), für weitere Kampagnen wurde auch der Dosimeter-Service der Firma TERRADEX/USA benutzt (Dosimeter des gleichen Typs). Die Kalibrierung wird durch Teilnahme an internationalen Radon-Vergleichsmessungen sichergestellt. Die statistische Auswertung der Daten umfasste die Bestimmung von regionalen und nationalen Mittelwerten und Häufigkeitsverteilungen, sowie Korrelationsrechnungen der Radonwerte mit den verschiedenen erfassten Parametern. Da die Stichproben nicht nach statistischen Kriterien erhoben wurden (mehr Einfamilien- als Mehrfamilienhäuser, gezielte Messungen in Regionen mit potenziell erhöhtem Risiko) mussten die Daten nachträglich in drei Normierungs-Schritten korrigiert werden, bezüglich:

1) der Verteilung der Bevölkerung auf die verschiedenen Haustypen (Einfamilien-, Bauern-, Mehrfamilienhaus) und Stockwerke; 2) der regionalen Bevölkerungsdichte beim Mitteln für das ganze Land; 3) des Sommer/Winter-Unterschiedes.

Die strahlenschutzmassige Bewertung der Ergebnisse basiert auf den Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP, Publikation Nr. 50). Da bei den verwendeten Radon-Dosimetern das Radon-Gas und nicht die für die Strahlenexposition massgeblichen Radon-Folgeprodukte gemessen werden, muss der Messwert mit dem Gleichgewichtsfaktor von 0.4 multipliziert werden, dieser gibt das Konzentrationsverhältnis zwischen Folgeprodukten und Radon-Gas an und liegt im Wohnbereich meist zwischen 0.3 und 0.5. Als Dosiskonversionsfaktor wird gemäss ICRP Nr.50 ein Wert von 0.09 mSv (effektive Dosis) pro  $\text{Bq/m}^3$  und Jahr gleichgewichtsäquivalente Radon-Konzentration verwendet. Für den Aufenthaltsfaktor, d.h. den Anteil Atemluft, der im Wohnbereich geatmet wird, wurde ein Wert von 0.75 angenommen. Eine gemessene Radon-Gas-Konzentration von  $1 \text{ Bq/m}^3$  führt damit pro Jahr zu 0.027 mSv. Die Organdosis der Lunge (als gesamtes Organ) beträgt das Achtfache der effektiven Dosis.

## ERGEBNISSE

Die Auswertung der bisherigen Daten ergab eine annähernd log-normale Verteilung der Radon-Messwerte in den Wohnräumen mit einem arithmetisches Mittel von  $131 \text{ Bq/m}^3$  (Medianwert  $56 \text{ Bq/m}^3$ ) und einem sehr grossen Wertebereich mit Extremwerten bis  $5000 \text{ Bq/m}^3$ . Nach Normierung ergibt sich ein arithmetisches Mittel von  $72 \text{ Bq/m}^3$  (Medianwert  $43 \text{ Bq/m}^3$ ) mit 90% der Werte unter  $150 \text{ Bq/m}^3$  und 99% unter  $500 \text{ Bq/m}^3$ . Die Sommer/Winter-Korrektur ergibt eine weitere Verminderung um ca. 8% auf  $66 \text{ Bq/m}^3$  (arithmetisches Mittel). Die Korrektur bezüglich Aufenthalt in Nicht-Wohnräumen erwies sich als unnötig.

Die Messwerte in Einfamilien- und Bauernhäusern sind in der Regel etwas höher als in Mehrfamilienhäusern; in den oberen Stockwerken sind sie meist tiefer als in den unteren; im Sommer wurden um durchschnittlich ein Drittel tiefere Konzentrationen gemessen als im Winter. In Kellern sind die Radon-Werte im Durchschnitt zwei bis drei mal höher als in den darüber liegenden Wohnräumen.

Die Messwerte weisen auch beträchtliche regionale Unterschiede auf, wobei jene aus dem Schweizerischen Mittelland in der Regel tiefer sind als aus den Vor-, Hoch- und Südalpen. Aber auch im Jura treten z.T. sehr hohe Werte auf, weil weniger der Radium-Gehalt des lokal vorhandenen Felsen als vielmehr jener des Bauuntergrundes und vor allem dessen Gas-Permeabilität eine Rolle spielt. Deshalb können Häuser auf Bauuntergrund mit durchschnittlichem Radium-Gehalt aber hoher Gas-Permeabilität u.U. auch hohe Radon-Werte ergeben. Schliesslich spielt auch die Bauweise des Hauses, d.h. die Abdichtung gegenüber dem Bauuntergrund und eine allfällige Saugwirkung im Hausinnern (Kamineffekt durch Heizung) eine Rolle.

Für die Bewertung des Radon-Risikos einzelner Regionen oder Kantone kann der normierte arithmetische Mittelwert oder der Prozent-Anteil der Werte über einer bestimmten Schwelle ( $200$ ,  $500$  oder  $1000 \text{ Bq/m}^3$ ) als redundantes Kriterium herangezogen werden. In den Kantonen Graubünden, Neuenburg, Glarus und Jura liegen mehr als 15% der bisherigen Messungen über  $200 \text{ Bq/m}^3$ , in Appenzell, Solothurn, Tessin, Innerschweiz und Wallis sind es zwischen 6 und 15%, in den übrigen weniger als 6%. Bezüglich des normierten arithmetischen Mittelwertes lassen sich vier Gruppen von Kantonen bzw. Regionen unterscheiden, wobei sich laufende oder geplante Radon-Kampagnen vor allem mit Gebieten aus den letzten zwei Gruppen befassen:

- a)  $< 50 \text{ Bq/m}^3$ : Basel-Stadt, Genf, Luzern, Thurgau, Zug, Zürich.
- b)  $50-80 \text{ Bq/m}^3$ : Aargau, Bern, Basel-Land, Freiburg, Schaffhausen, St. Gallen, Waadt;
- c)  $80-200 \text{ Bq/m}^3$ : Appenzell (AR und AI), Glarus, Jura, Solothurn, Tessin, Innerschweiz (UR, SZ, OW, NW), Wallis;
- d)  $> 200 \text{ Bq/m}^3$ : Neuenburg und Graubünden.

Die Radon-Konzentrationen in Schweizer Wohnhäusern führt zusammen mit der Radonexposition im Freien und dem Beitrag des kurzlebigen Radon-220 zu einer jährlichen durchschnittlichen effektiven Dosis von rund 2.2 mSv, also etwa zwei Drittel der durchschnittlichen natürlichen Strahlenexposition. Radon ist

der grösste Einzelbeitrag zur Strahlenexposition und ergibt auch die grössten Extremwerte (in einzelnen Fällen bis 150 mSv/Jahr). Gemäss dem Modell der amerikanischen Akademie der Wissenschaften (BEIR-IV-Report von 1988) wären in der Schweiz etwa ein Siebtel der Lungenkrebstodesfälle dem Radon zuzuordnen. Diese Angabe ist allerdings epidemiologisch nicht untermauert, da einerseits bei der Übertragung der Ergebnisse der Minenarbeiter auf die Verhältnisse im Wohnbereich grosse Unsicherheiten bestehen und andererseits beim Lungenkrebs auch andere Ursachen (Rauchen, Luftverschmutzung, berufliche Exposition durch andere Schadstoffe) eine Rolle spielen.

## **SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK**

Die bisher vorhandenen Radon-Daten ermöglichen die Erfassung der gesamtschweizerischen Situation und es ist nicht damit zu rechnen, dass weitere Erhebungen das Gesamtmittel wesentlich verändern; sie geben zusammen mit den laufenden geologischen Untersuchungen auch Hinweise, in welchen Haustypen bzw. auf welchem Bauuntergrund und in welchen Regionen die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten hoher Radon-Konzentrationen grösser ist. Die regionale Datenauswertung wird künftig mit einer noch feineren geographischen Einteilung durchgeführt, zur genaueren Abgrenzung der Gebiete mit erhöhtem Radon-Risiko und um Häuser mit Extremwerten zwecks Durchführung von Radon-Reduktionsmassnahmen aufzufinden. Für diese Aufgabe sind weitere regionale Messkampagnen geplant bzw. im Gang.

Es ist wenig wahrscheinlich, dass durch Sanierungen einzelner Häuser das gesamtschweizerische Mittel wesentlich beeinflusst werden kann, es sollte jedoch angestrebt werden, die Extremwerte durch Sanierung zu eliminieren. In diesem Zusammenhang ist es auch wichtig, dass die Öffentlichkeit besser über Radon und seine möglichen Auswirkungen informiert und dass insbesondere das Baufachgewerbe für die Haussanierungen motiviert wird und die bisher auf diesem Gebiet gemachten Erfahrungen weitergegeben werden. Dazu ist auch der internationale Erfahrungsaustausch zu intensivieren.

Abb. 1c: Radon in Wohnräumen: ungewichtete Rohdaten

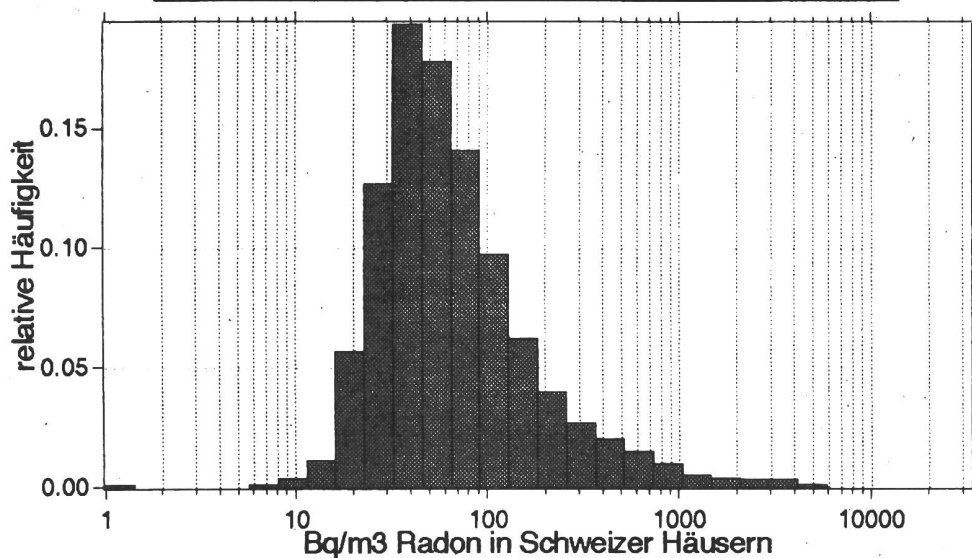


Abb. 1d: Radon in Wohnräumen.  
gewichtet mit Haustyp und Bevölkerungsverteilung.

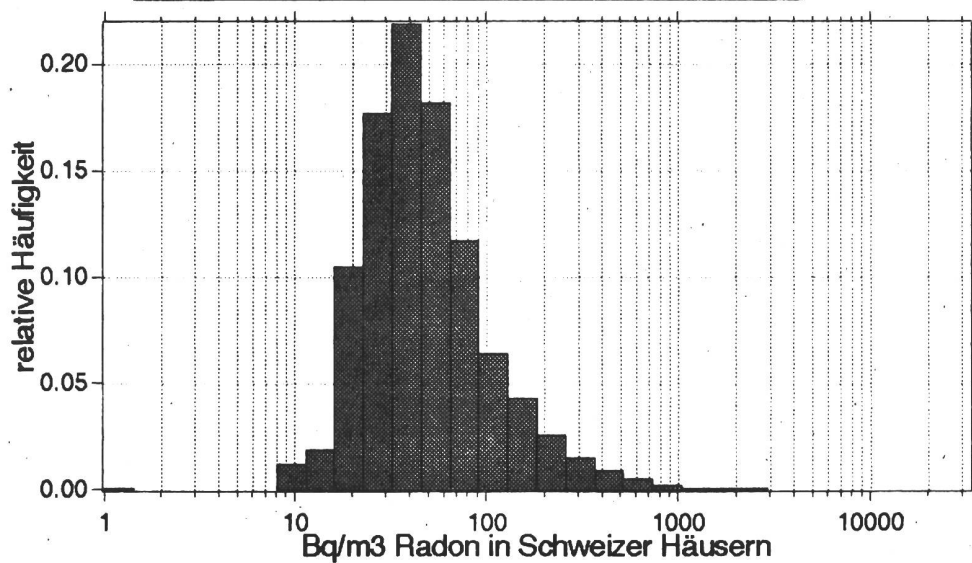
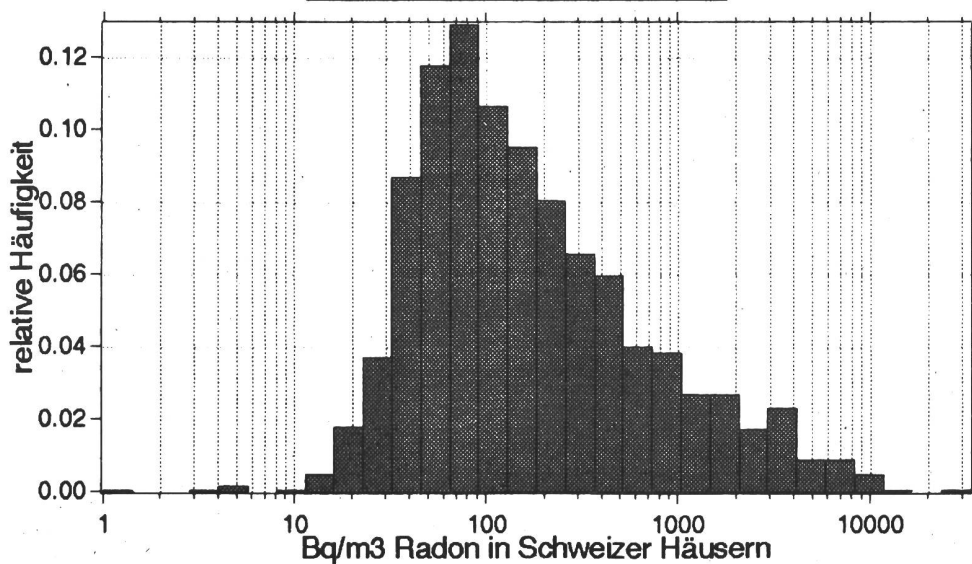


Abb. 1e: Radon in Kellerräumen



## 2.3. RADON UND GEOLOGIE/WASSER

F. Medici und L. Rybäch

Forschungsgruppe Geothermik und Radiometrie  
Institut für Geophysik, ETH Hönggerberg, Zürich

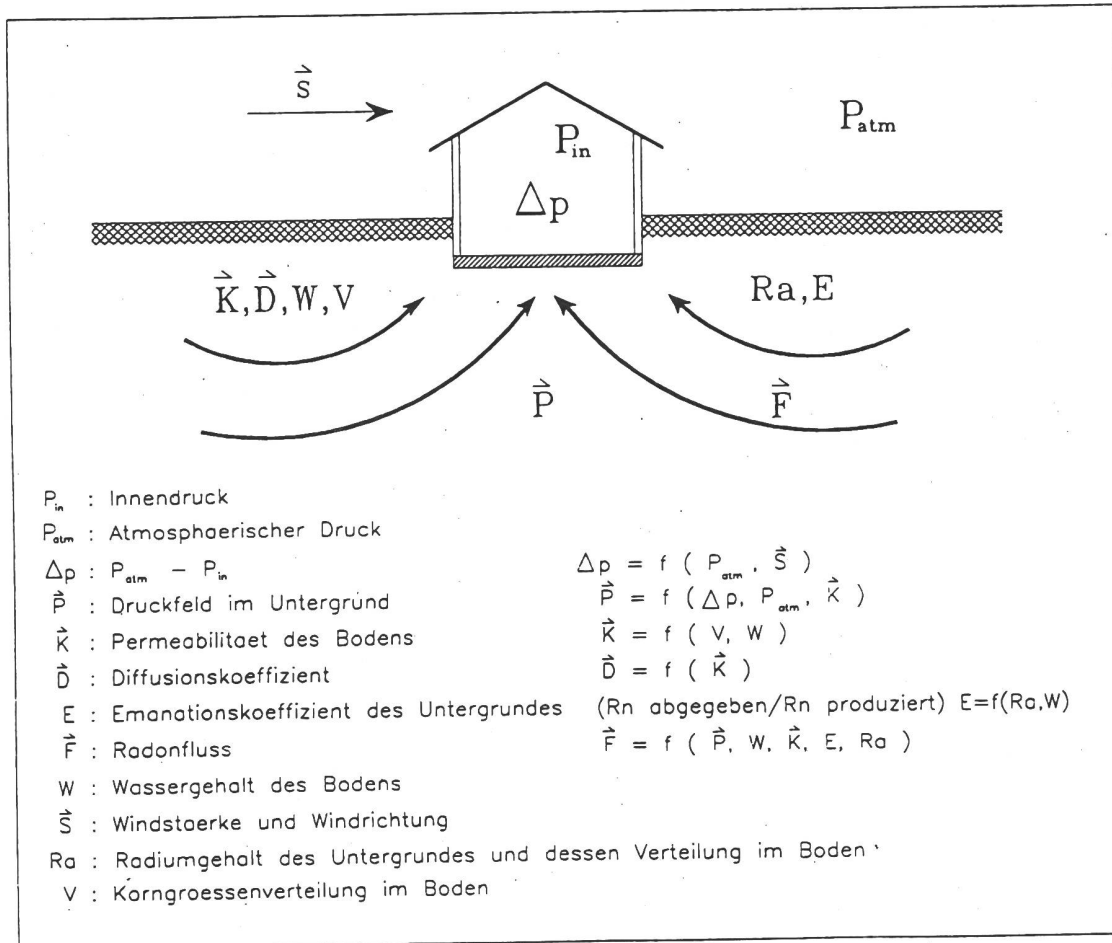
### EINLEITUNG

Die entscheidende Rolle, die geologischen Faktoren beim Rn-Quellterm spielen, ist aus zahlreichen ausländischen Untersuchungen bekannt. Mehrere zusammenwirkende Faktoren beeinflussen die Rn-Produktion und den Rn-Transport im Untergrund: der Radium-Gehalt, der Emanationskoeffizient, die Gaspermeabilität, der Wassergehalt sowie das Druckfeld unter einem Haus (siehe Fig. 1). Ferner kann die Rn-Konzentration des Trinkwassers regional gewisse Auswirkungen auf den Rn-Pegel der Innenluft haben. Geologische Interpretationen anhand der Daten älteren Messkampagnen, die zur generellen Ermittlung der Strahlenbelastung der Schweizer Bevölkerung dienten, wurden bis zum Beginn von RAPROS kaum gemacht.

Das Projektziel war die Grundlagenbeschaffung für das Verständnis der Zusammenhänge zwischen Rn-Konzentration in Wohn- und Arbeitsräumen und den erwähnten geologischen Faktoren. Die Rolle des Trinkwassers (u/o Grundwassers) und auch der tektonischen Störungen (Brüche und Verwerfungen) auf den Rn-Pegel der Innenluft musste untersucht werden. Ein zentraler Punkt war aber die Suche nach Gebieten mit hoher Rn-Belastung. Die Ergebnisse sollen Hinweise über den Einfluss der geologischen Faktoren bei der Rn-Strahlenbelastung relativ zur Bauphysik geben. Daraus können wichtige Erkenntnisse für Sanierungsmassnahmen gewonnen werden. Die komplexen geologischen Verhältnisse der Schweiz erforderten ein entsprechend angepasstes und zielgerichtetes Vorgehen. Die Messkampagnen sollten die Ausscheidung von Gebieten besonders hoher Exposition erlauben. Speziell gezielte Untersuchungen im Jura sollten erweisen ob die erhöhten Rn-Pegel natürlichen Ursprungs sind. Die Daten und die Erkenntnisse dieses Teilprojektes zusammen sollten zum besseren Verständnis der Rn-Problematik führen und erlauben, eine Rn-Gefährdungskarte der Schweiz zu erstellen.

### VORGEHEN UND MESSMETHODIK

Um die geologischen Einflussfaktoren beim Rn-Quellterm zu erfassen, wurden einige Gebiete für vertiefende Untersuchungen ausgewählt. Dabei wurden hauptsächlich Regionen ausgesucht wo hohe Rn-Pegel in Häusern erwartet werden und wo die geologischen Verhältnisse sehr kontrastreich sind. In diesen Gebieten wurden verschiedene Messtechniken angewendet: Messung des Rn-Pegels in Wohnräumen, der Rn-Konzentration im Boden mit zugehöriger Permeabilitätsbestimmung, des Ra-Gehaltes von Bodenproben, der Rn-Konzentration im Wasser; einige kontinuierliche Rn-Messungen in Häusern. Ferner wurde in allen Fällen auch eine lokale geologische Beurteilung des Gebietes vorgenommen, die von grundlegender Wichtigkeit ist, um Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Messverfahren zu erkennen und diese auch interpretieren zu können. Das Ziel war die beobachteten Rn-Pegel im Zusammenhang mit der Geologie und der Bauweise zu erklären. Ein anderer Teil des Projektes befasste sich mit Messungen in Karstsystemen (Rn-Konzentration in der Luft und im Wasser, Ra-Gehalt von Proben aus lockeren Sedimenten); diese sind ein Bestandteil der Suche nach natürlichen Rn-Quellen im Jura.



Figur 1: Die wichtigsten Einflussparameter auf die Rn-Innenluft-Konzentration

## ERGEBNISSE

### Radon und Karst

Es hat sich herausgestellt, dass die erhöhten Rn-Pegel im Jura dem Einfluss von Karstsystemen zugeschrieben werden können. Tatsächlich können die Rn-Konzentrationen in Karstsystemen sehr hohe Werte erreichen (bis  $35 \text{ kBq m}^{-3}$ ). Diese weisen aber auch eine sehr grosse Variationsbreite auf. Rn-Messungen im Wasser und gemessene  $^{210}\text{Pb}$ -Überschüsse in Höhlensedimenten deuten darauf hin, dass Karstwasser das Transportmittel für Radon ist. Existierende Kommunikationswege (die auch beobachtet wurden) zwischen Karstsystemen und Häusern erlauben das Eindringen in Gebäude von stark Rn-haltiger Luft. Diese Untersuchungen wurden in enger Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern des Projektes "Die Suche nach der Ursache erhöhter Rn-Konzentrationen in Wohnräumen der Region La Chaux-de-Fonds" durchgeführt.

### Rn-Messungen in ausgewählten Gebieten

Im folgenden werden die aus den ausgewählten Gebieten gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse diskutiert. Aus Fig. 2 sind die gemessenen Rn-Pegel in Kellern und Wohnräumen dieser Gebiete ersichtlich. In der Schweiz gibt es zur Zeit keine Limite für den Rn-Pegel in Wohnräumen. Um die folgenden Ergebnisse besser bewerten zu können, wird der Wert  $200 \text{ Bq m}^{-3}$  als Schwelle benützt. Der Wert  $200 \text{ Bq m}^{-3}$  stützt sich auf diesbezügliche Empfehlungen der EG für Neubauten.

**Udligenswil, Dierikon, Sempach (LU)**

Niedrige Rn-Pegel in Wohnräumen, unterhalb des schweizerischen Mittelwertes. Niedrige Ra-Gehalte von Bodenproben (20 bis 40 Bq kg<sup>-1</sup>). Stark variierende Bodengaspermeabilität. Rn-Pegel in Häusern vom Sandstein des Untergrundes verursacht, da quartäre Ablagerungen geringmächtig oder inexistent.

**La Sagne (NE)**

Wert von 200 Bq m<sup>-3</sup> in drei (von elf gemessenen) Häusern überschritten. Ra-Gehalt von Bodenproben relativ zum Mittelland erhöht (60 bis 100 Bq kg<sup>-1</sup>). Häuser direkt auf Kalkgestein gebaut, d.h. quartäre Ablagerungen nicht von Bedeutung für die Rn-Pegel. Viel niedrigere Rn-Pegel als im naheliegenden La Chaux-de-Fonds. Unterschiedliche Rn-Transportmechanismen möglich. Möglicher Einfluss von Karstsystemen, obwohl keine grosse bekannt.

**Schmitten (GR)**

Wert von 200 Bq m<sup>-3</sup> in drei (von zehn gemessenen) Häusern überschritten. Ra-Pegel in Häusern nur leicht erhöht. Zum Teil hohe Ra-Gehalte von Bodenproben (50 bis 190 Bq kg<sup>-1</sup>) obwohl in kalkigem Gebiet. Erklärung durch vom Gletscher transportierte Komponenten. Häuser direkt auf Kalkgestein gebaut, d.h. quartäre Ablagerungen nicht von Bedeutung für die Rn-Pegel. Möglicher Einfluss von kleinen Karsterscheinungen, aber fraglich.

**Münstertal (GR) (Tschier, Fuldera, Valchava)**

Wert von 200 Bq m<sup>-3</sup> in drei (von vierzehn gemessenen) Häusern überschritten. Ra-Pegel nur leicht erhöht. Stark schwankende Ra-Gehalte von Bodenproben (40 bis 140 Bq kg<sup>-1</sup>) wegen Inhomogenität des Felsuntergrundes. Mächtige quartäre Überdeckung, Bodeneigenschaften (Rn-Konzentration und Gaspermeabilität des Quartärs) verantwortlich für die Rn-Pegel. Hohe Bodengaspermeabilität aber mässige Rn-Konzentration im Boden; nicht hohes Rn-Gefährdungspotential, wie dies auch Messungen in Häusern bestätigen.

**Vicosoprano (GR)**

Wert von 200 Bq m<sup>-3</sup> in fünf (von sechzehn gemessenen) Häusern überschritten. Rn-Pegel leicht erhöht. Aus Bodengasmessungen mittleres bis hohes Rn-Gefährdungspotential. Hohe Ra-Aktivitäten (100 bis 190 Bq kg<sup>-1</sup>, eine Probe sogar 270 Bq kg<sup>-1</sup>). Aus Geologie und Ra-Gehalt höhere Rn-Pegel erwartet. Wahrscheinlich niedriger Emanationskoeffizient. Beispiel wie eine einzige Messmethode falsche Schlussfolgerungen liefern kann.

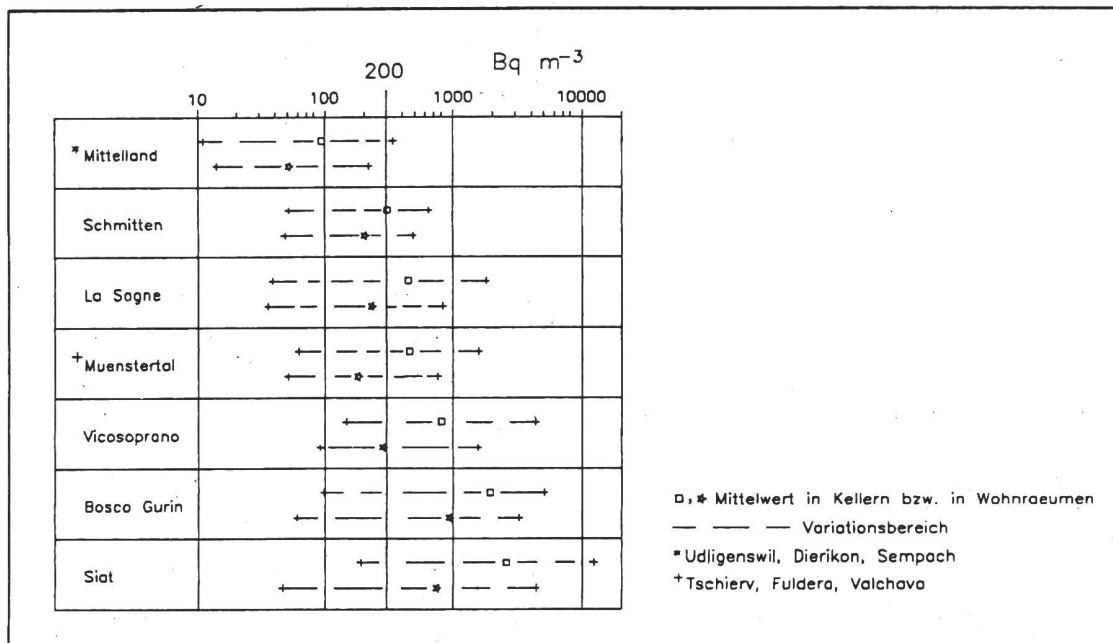
**Bosco Gurin (TI)**

Sehr hohe Rn-Pegel in Gebäuden (siehe Fig. 2); nur ein Haus (von vierzehn gemessenen) unterhalb von 200 Bq m<sup>-3</sup>. Hinweis auf lokalisierte Rn-Quellen (an beschränkten Flächen am Kellerboden). Ra-Gehalte von Bodenproben "normal" (50 bis 100 Bq kg<sup>-1</sup>, Ausgangsmaterialien: Gneise und ähnliche Gesteine). Begünstigung des Rn-Transportes durch sehr permeablen Bauuntergrund (Bergsturz- und Moränenmaterial). Mögliche Rolle von Luftströmungen im Untergrund. Zusätzlich ungünstige Bauart der Häuser (Naturboden im Keller).

**Siat (GR)**

Wert von 200 Bq m<sup>-3</sup> in elf (von sechzehn gemessenen) Häusern überschritten. Hohe Rn-Pegel besonders in Kellern. Ra-Gehalte der Bodenproben nicht sehr hoch (60 bis 120 Bq kg<sup>-1</sup>). Hohes Rn-Gefährdungspotential durch Bodengasmessungen bestätigt, Rn-Konzentrationen im Boden bis 200 kBq m<sup>-3</sup> und hohe Bodengaspermeabilität. Nachträglich einige Häuser als Sanierungsobjekte für RAPROS benutzt. Sehr breite Streuung der Rn-Konzentration in Häusern infolge von lokal stark variierenden Bodeneigenschaften.





Figur 2: Rn-Pegel der Häuser in den untersuchten Gebieten.

## DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die gewonnenen Kenntnisse und Erfahrungen erlauben folgende Aussagen zu formulieren:

- Auch in der Schweiz ist der Untergrund die wichtigste (oft die einzige) Rn-Quelle. Der grösste Teil des Radons, das in Häusern beobachtet wird, stammt aus dem Boden unmittelbar unterhalb des Gebäudes. Die wichtigsten Einflussfaktoren sind die geologischen Parameter, die sich in verschiedenen Massstäben auswirken: regionale Schwankungen der Rn-Exposition entsprechen Änderungen der Lithologie des Untergrundes und des Ra-Gehaltes, kleinräumige Variationen können hingegen den Unterschieden der Gesteinseigenschaften, wie Porosität, Permeabilität und Wassergehalt zugeschrieben werden.
- Trink- und Brauchwasser spielen generell eine unbedeutende Rolle als Rn-Quelle.
- Ein ganz wesentlicher Effekt beim Rn-Transport besteht in der starken Verdünnung der Rn-Konzentration beim Übergang Untergrund-Gebäude (typische Rn-Konzentrationen im Bodengas einige zehn kBq m<sup>-3</sup>, in der Innenluft einige zehn Bq m<sup>-3</sup>). Der Rn-Fluss wird durch Luftdruckunterschiede, die aus den lokalen atmosphärischen Faktoren folgen, zwischen Gebäude und Untergrund getrieben. Normalerweise stammt der Rn-Fluss von einem ziemlich beschränkten Volumen um das Gebäude (einige Meter).
- Die Bodeneigenschaften schwanken selbst in beschränkten Gebieten sehr stark; Rn-Gehalte im Boden werden z.B. durch viele Faktoren beeinflusst, diese erschweren erheblich, die Zusammenhänge zwischen geologischem Untergrund und Rn-Pegel der Innenluft zu erkennen oder gar zu quantifizieren.

- Da in zahlreichen Gebieten die Bodeneigenschaften stark schwanken, können naheliegende, ähnlich gebaute Häuser entsprechend stark verschiedene Rn-Pegel aufweisen. Diese Besonderheiten des Rn-Verhaltens machen Vorhersagen über das Rn-Gefährdungspotential eines gegebenen Gebietes sehr unsicher.
- Regionen mit erhöhter Bodengaspermeabilität (unter anderem auch verkarstete Gebiete, wie z.B. der Jura), können schon jetzt generell als Rn-gefährdet angesehen werden. Aus allen diesen Überlegungen ist beim jetzigen Stand der Kenntnisse und anhand der noch lückenhaften Messdaten die Herstellung einer schweizerischen Rn-Gefährdungskarte allein aufgrund geologischen Kriterien jedoch nicht möglich.

## AUSBLICK

Eine vertiefte Untersuchung der geologischen Einflussfaktoren drängt sich auf. Insbesondere soll die Rolle der Quartär-Bedeckung über anstehendem Fels im Detail untersucht werden. Dabei steht die Abklärung des Zusammenhanges zwischen Rn-Konzentration und den Quartär-Eigenschaften wie Mächtigkeit, Zusammensetzung, Struktur, Verdichtungsgrad, Wasserführung, sowie dem Grad der Zerklüftung der Felsbasis im Vordergrund. Es sollen dabei, neben Bodengas- und Permeabilitätsmessungen, insbesondere geophysikalische Methoden mit höher Auflösung wie Georadar und VLF ("very low frequency resistivity") eingesetzt werden. Zudem bedürfen die zukünftigen Messkampagnen verschiedener Kantone einer wissenschaftlichen Begleitung. Sie sollen deswegen sinnvoll koordiniert werden. Bei der Auswertung der Resultate müssen erprobte Verfahren zum Einsatz gelangen. Auch muss die Abgrenzung von Gebieten mit erhöhtem Rn-Pegel sorgfältig vorgenommen werden.

## 2.4. DER BEITRAG AUS BAUMATERIALIEN ZUM INNENLUFT-RADONPEGEL IN SCHWEIZERISCHEN HÄUSERN

Ch. Schuler, R. Crameri und W. Burkart

Abteilung Strahlenhygiene  
Paul Scherrer Institut, Villiger-PSI

### EINLEITUNG

Die Radiumgehalte von Trinkwasser, Baumaterialien und Bauuntergrund stellen, mit zunehmender Bedeutung in dieser Reihenfolge, die wichtigsten Radonquellen für schweizerische Wohnhäuser dar. Baumaterialien sind - zumindest theoretisch - eine gut definierbare, messbare und somit kontrollierbare Radonquelle. Dabei tragen Baustoffe sowohl zur externen Strahlenbelastung der Bevölkerung, verursacht durch die gamma-Strahlung, welche proportional zum Radionuklidgehalt der verwendeten Baumaterialien ist, als auch zur Strahlenexposition der Lunge, verursacht durch das aus Baumaterialien freigesetzte Radon und dessen Zerfallsprodukte, bei.

Ziel dieser Untersuchungen war es, anhand von experimentellen Messungen den Beitrag von Baumaterialien zur externen Strahlenbelastung der Bevölkerung und zur Innenluft-Radonbelastung in schweizerischen Wohnräumen abzuschätzen.

### VORGEHEN / METHODIK

Baumaterialienproben wurden nach dem Kriterium der Marktanteile gesammelt. Die getrockneten Proben wurden bis auf 2 cm Korngrösse verkleinert und in gasdichte Flaschen abgefüllt. Nach Einstellung des Gleichgewichtes zwischen  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  und dessen Zerfallsprodukten wurde die  $^{226}\text{Ra}$ -Konzentration durch Auswertung der  $^{214}\text{Pb}$ - und  $^{214}\text{Bi}$ -Linien auf einem Reinst-Germanium-Detektor bestimmt. Die  $^{232}\text{Th}$ - und  $^{40}\text{K}$ -Konzentrationen wurden durch die Auswertung der Intensität der charakteristischen Linien bei 911 und 1461 keV bestimmt. Eine Abschätzung der potentiellen Gefährdung durch den gesamten Radionuklidgehalt ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  und  $^{40}\text{K}$ ) von Baumaterialien wurde nach international anerkannten Normen vorgenommen. Die Bestimmung der Radonexhalationsraten erfolgte mit Aktivkohledosimetern unter standardisierten Bedingungen.

### RESULTATE

Zwei Grössen sind für die Beurteilung der potentiellen Gefährlichkeit von Baumaterialien wichtig: Der Radionuklidgehalt, verantwortlich für die durch gamma-Strahlung verursachte externe Strahlenbelastung, und die von Radiumgehalt und Radonemanationsstärke abhängige Radonabgabe an die Umwelt. Beide Grössen lassen sich im Labor durch gammaspektrometrische Messungen ermitteln.

Die Radionuklide, welche bezüglich externer Strahlenexposition in Wohnräumen von allgemeinem Interesse sind, weil sie in Baustoffen in unterschiedlichen Mengen enthalten sein können, sind Radium-226, Thorium-232 und Kalium-40. Eine Abschätzung der potentiellen Gefährdung aus der gamma-Komponente durch den gesamten Radionuklidgehalt von Baumaterialien ergab, dass die Dosisleistung der Gammastrahlung verglichen mit der natürlichen Umgebungsstrahlung und ihrer Schwankungsbreite nicht

ins Gewicht fällt. Als mittlerer Wert für die externe Strahlenbelastung der Schweizer Bevölkerung durch terrestrische Strahlung kann ein Beitrag von  $0.65 \text{ mSv y}^{-1}$  angenommen werden.

Weit wichtiger für die radiologische Beurteilung der verwendeten Baustoffe ist die aus der Freisetzung von Radon aus Baumaterialien verursachte innere Komponente der Strahlenbelastung der Bevölkerung.

Die Untersuchungen bezüglich der in der Schweiz verwendeten Baustoffe decken neben dem Radionuklidgehalt die Radonemanationsstärke der Ausgangsmaterialien Gips, Zement, Kalk, Kies und Sand sowie der Fertigprodukte Backstein, Betonstein, Gasbetonstein und Kalksandstein ab.

Die Mittelwerte und die Variationsbereiche der Radionuklidgehalte für alle gemessenen Grundstoffe und Baumaterialien decken einen Bereich zwischen 9 und  $415 \text{ Bq kg}^{-1}$  für Radium-226,  $1\text{--}200 \text{ Bq kg}^{-1}$  für Thorium-232 und  $3\text{--}1440 \text{ Bq kg}^{-1}$  für Kalium-40 ab. Die Radionuklidgehalte der in der Schweiz verwendeten Baumaterialien fallen in den durch die Resultate anderer Länder vorgegebenen Rahmen. Die höchsten Radionuklidgehalte wurden erwartungsgemäss bei Bims und Bimssteinprodukten gemessen, liegen aber unterhalb der international empfohlenen Werte. Bims ist ein Grundstoff vulkanischer Herkunft und dient zur Herstellung von mit Beton verfestigten Isoliersteinen. Nicht tolerierbare Radionuklidgehalte wurden lediglich bei in der Schweiz als Baumaterial nicht verwendeten Gipsprodukten aus der Phosphatindustrie gefunden.

Die Radonexhalationsraten aus schweizerischen Baustoffproben weichen mit Werten zwischen 1 und  $42 \mu\text{Bq kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$  grundsätzlich nicht von publizierten Daten gleichartiger Baustoffe aus dem Ausland ab. Allerdings wurden bis anhin diesbezüglich weltweit relativ wenige Untersuchungen durchgeführt. Radonexhalationsraten sind für die Abschätzung der Beiträge aus Baumaterialien zum Innenlufradonpegel unerlässlich.

Der Beitrag aus Baumaterialien zum Innenluft-Radonpegel wurde ausgehend von den Radonexhalationsraten anhand von Modellrechnungen konservativ abgeschätzt. Aus diesen Berechnungen geht hervor, dass der maximal zu erwartende Radonbeitrag aus Baumaterialien zum Innenlufradonpegel bei tiefen Luftwechselraten ( $0.3 \text{ h}^{-1}$ ) zwischen  $30$  und  $70 \text{ Bq m}^{-3}$  liegen müsste (Figur 1). Solche Abschätzungen müssen jedoch aus verschiedenen Gründen relativiert werden:

- Für die Laboranalysen mussten die Baumaterialien zerkleinert werden. Dadurch wird die zur Exhalation fähige Oberfläche extrem vergrössert.
- Experimentell im Labor bestimmte Rn-Exhalationsraten hängen vom physikalischen Zustand des Baumaterials ab (ein hoher Wassergehalt der Poren vergrössert die Rn-Exhalation).
- Abschirmungseffekte der verschiedenen Komponenten einer Wand (Pflaster zwischen Backsteinen, Gipsverputz auf der Wandoberfläche, Farbanstrich, Tapeten usw.) wurden in der Modellrechnung nicht berücksichtigt.
- Luftwechselraten von  $0.3 \text{ h}^{-1}$  sind für bewohnte konventionelle Häuser zu tief angesetzt.

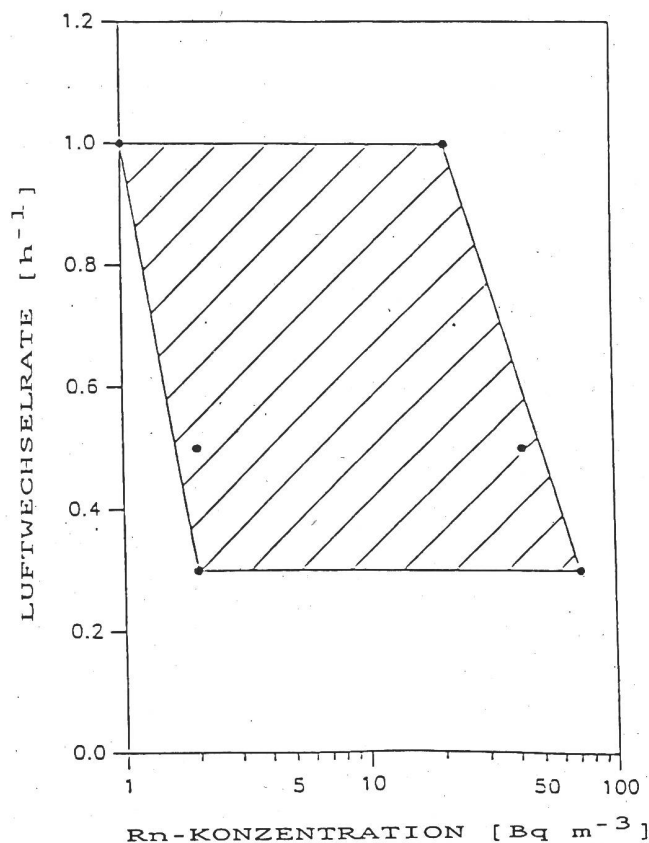
Diese Faktoren tragen dazu bei, dass der Beitrag aus Baumaterialien zum Radonpegel der Modellräume tendenziell überschätzt wird.

Aus diesen Gründen kann ein Beitrag zwischen  $2$  und  $40 \text{ Bq m}^{-3}$  für Schweizer Wohnverhältnisse eher als realistisch angesehen werden. Bei einer gemessenen mittleren Radonkonzentration von etwa  $70 \text{ Bq m}^{-3}$  in schweizerischen Wohnräumen würde das bedeuten, dass im extremsten theoretisch annehmbaren Fall Baumaterialien höchstens die Hälfte des gemessenen Innenlufradons beisteuern. Das reicht bei weitem nicht aus, um die gemessene mittlere Innenlufradonkonzentration in schweizerischen Wohnräumen zu erklären. Andererseits würde auch der Maximalbetrag aus Baumaterialien von  $70 \text{ Bq m}^{-3}$  in hoch belasteten Häusern nur einige Prozente des Gesamtradonpegels ausmachen. Gegen hohe Beiträge aus Baumaterialien zum Innenlufradonpegel sprechen auch die zum Teil beträchtlichen Radonkonzentrationen, welche in Holzbauten nachgewiesen wurden.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN/EMPFEHLUNGEN

Unter den in diesem Projekt untersuchten Baumaterialproben fand sich keine, welche aus radiologischer Sicht zu Bedenken Anlass gegeben hätte. Sowohl bezüglich Radionuklidgehalt und der damit verbundenen externen Strahlenbelastung als auch bezüglich Radonfreigabe an die Umwelt und der damit verbundenen Strahlenbelastung der Lunge tragen Baumaterialien relativ wenig zur Gesamtstrahlendosis der Bevölkerung bei.

Infolge der steigenden Tendenz zur Verarbeitung von Abfallstoffen oder wiederaufbereitetem Material als Baumaterial-Zuschlagstoffe ist es aber ratsam, in der Schweiz neu auf den Markt kommende Baumaterialien oder Zuschlagstoffe wenigstens periodisch auf die Radonabgabe sowie auf die Abgabe anderer Innenluftnoxen zu überprüfen.



Figur 1.

Radonbeitrag von Baumaterialien zum Innenluftpegel, berechnet für fünf verschiedenartige Modellräume. Der schraffierte Bereich zeigt eine konservative Abschätzung der zu erwartenden maximalen und minimalen Radonbeiträge zum Innenluftpegel als Funktion der Luftwechselrate. Als Berechnungsgrundlage werden die Radonexhalationsraten pro Flächeneinheit verwendet. Die Minimal- und Maximalbeiträge ergeben sich aus den niedrigsten bzw. höchsten gemessenen  $^{226}\text{Ra}$ -Gehalten sowie Exhalationsraten der Baumaterialproben.

## 2.5. AUSBREITUNG DES RADONS

R. Cramer, D. Furrer und W. Burkart

Abteilung Strahlenhygiene  
Paul Scherrer Institut, Villiger-PSI

### EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Das im Boden - die Hauptradonquelle für schweizerische Wohnräume - gebildete Radon wird durch Diffusion und Konvektion aus dem Keller von Gebäuden in den Wohnraum transportiert. Von entscheidender Bedeutung für die Radonkonzentration in Innenräumen ist der Übergang Kellerboden-Kellerluft und der nachfolgende Transport vom Keller in höhere Stockwerke.

Die Ausbreitung des Radons im Inneren von Gebäuden wird durch komplizierte ineinandergreifende Parameter beeinflusst, wobei der Erfolg von baulichen Massnahmen zur Senkung des Radonpegels erheblich vom Verständnis der Radonquellen und der Mechanismen, welche die Radoninfiltration im Kellergeschoss und dessen Ausbreitung in Innenräumen steuern, abhängt.

Ziel dieser Arbeit war es, die Infiltrationsmechanismen des Radons in Wohnräumen zu untersuchen und dadurch Wege für eine kostengünstige Herabsetzung der Innenlufradonkonzentration aufzuzeigen.

### VORGEHEN / METHODIK

Radongas wurde mit passiven alpha-Spuredosimetern des Typs Karlsruhe, Radonzerfallsprodukte mit Hilfe von Eberline Working-Level Monitoren bestimmt. Die Temperatur wurde ausserhalb der Gebäude kontinuierlich mit mechanischen Thermohygrographen und innerhalb mit einem Innenklima-Analysator gemessen. Das letzte Gerät diente auch zur Erfassung von vertikalen Luftströmungen zwischen den Stockwerken. Druckdifferenzen wurden mit hochauflösenden Mikromanometern registriert. Windgeschwindigkeiten wurden kontinuierlich mit einem Anemometer gemessen. Luftwechselraten wurden mit der Methode der konstanten "tracer gas"-Konzentration bestimmt, deren kurzfristige Schwankungen hingegen mit der Methode der instantanen Luftwechselrate ermittelt.

### RESULTATE

Das im Bauuntergrund vorhandene Radon stellt die Hauptquelle für die Radonkonzentration in schweizerischen Wohnräumen dar. Die Radonkonzentration im Bodengas variiert je nach geologischen Gegebenheiten und Permeabilität des Bodens von wenigen Bq bis zu 100 kBq m<sup>-3</sup> oder mehr. An der Oberfläche Kellerboden/Kellerluft erfolgt eine Verdünnung des Bodengases über mehrere Grössenordnungen, so dass die Radonkonzentration im Keller von Gebäuden - je nach Konzentration im Bodengas und Struktur des Kellerbodens - einige bis mehrere tausend Bq m<sup>-3</sup> betragen kann. Die vorhandenen Ergebnisse über Geologie und Bodenpermeabilität reichen noch nicht aus, um die Radonabgabe des Bodens in Einzelfällen vorauszusagen und daraus Anforderungen für die Beschaffenheit der Fundamentstruktur bei Neubauten zu formulieren.

Für existierende Häuser konnte jedoch gezeigt werden, dass der Beitrag aus dem Bauuntergrund zur Radongaskonzentration im Keller von Gebäuden in der Grössenordnung von 90% liegt. Dieser Beitrag ist unabhängig von der Höhe der tatsächlich gemessenen Radonkonzentration. Andererseits ist die Bodengasdurchlässigkeit des Kellerbodens für die Radonkonzentration im Keller und somit indirekt für

den Radonpegel im ganzen Gebäude massgebend. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, durch geeignete bauliche Massnahmen den Eintritt des Radons in Kellergeschosse zu verhindern, um eine relevante Senkung des Radonpegels in Wohnräumen hoch belasteter Häuser zu erreichen.

Die Untersuchungen zeigten, dass Trinkwasser und Baumaterialien als Radonquellen für schweizerische Wohnräume im allgemeinen eine untergeordnete Rolle spielen. Der grösste Teil des in Wohnräumen vorhandenen Radons stammt somit aus dem Keller. Der Übergang des Radons vom Keller in höhere Stockwerke wird von verschiedenen Parametern beeinflusst, welche schlussendlich massgebend für die in Wohnräumen gemessene Radonkonzentration sind.

Die zeitliche Erfassung der Radonzerfallsproduktkonzentration zeigte, dass der Radonpegel in einem Gebäude ausgeprägten periodischen Schwankungen unterworfen ist. Dabei erreicht normalerweise der Radonpegel ein Maximum am frühen Morgen und ein Minimum am späten Nachmittag. Damit folgt die Schwankung der Innenluft radonkonzentration der täglichen Schwankung der Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen. Die Temperaturdifferenz durch die Gebäudehülle verursacht Unterschiede in der Luftdichte und demzufolge eine Druckdifferenz zwischen aussen und innen sowie zwischen Kellerboden und höheren Stockwerken (Kamineffekt). Die Feldmessungen zeigten, dass 1 °C Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen durchschnittlich eine Druckdifferenz von ca. 0.1 Pa zwischen Keller und dem ersten Stockwerk erzeugt. Dabei verlaufen die zeitlichen Änderungen der Temperaturdifferenz Innen-Aussen und der Druckdifferenz Keller-höhere Stockwerke synchron. Die temperaturbedingte Druckdifferenz zwischen Kellerboden und höheren Stockwerken hat zur Folge, dass der Wohnbereich sich im Vergleich zum Keller durchschnittlich im Unterdruck befindet. Der Druckgradient von unten nach oben begünstigt vertikale Luftbewegungen und das Eindringen radonreicher Kellerluft in den Wohnbereich. Anhand dieser Erkenntnisse lässt sich das Potential der vertikalen Luftströmung für den Radontransport im Wohnbereich abschätzen.

Die Radoninfiltrationsrate aus dem Boden, welche notwendig ist, um eine bestimmte Konzentration im Keller von Gebäuden aufrechtzuerhalten, kann aus experimentell bestimmten Grössen berechnet werden. Ausgehend von der Luftwechselrate im Wohnbereich kann die nötige Menge an Kellerluft, welche für die Aufrechterhaltung einer bestimmten Radonkonzentration benötigt wird, vorausgesagt werden. Das transportierte Luftvolumen ergibt sich in erster Näherung aus der mittleren vertikalen Luftgeschwindigkeit multipliziert mit der Durchlässigkeitsfläche zwischen Keller und höheren Stockwerken. In den meisten Fällen reichen die Daten dieser zwei Grössen aus, um hohe Radonkonzentrationen im Wohnbereich zu erklären.

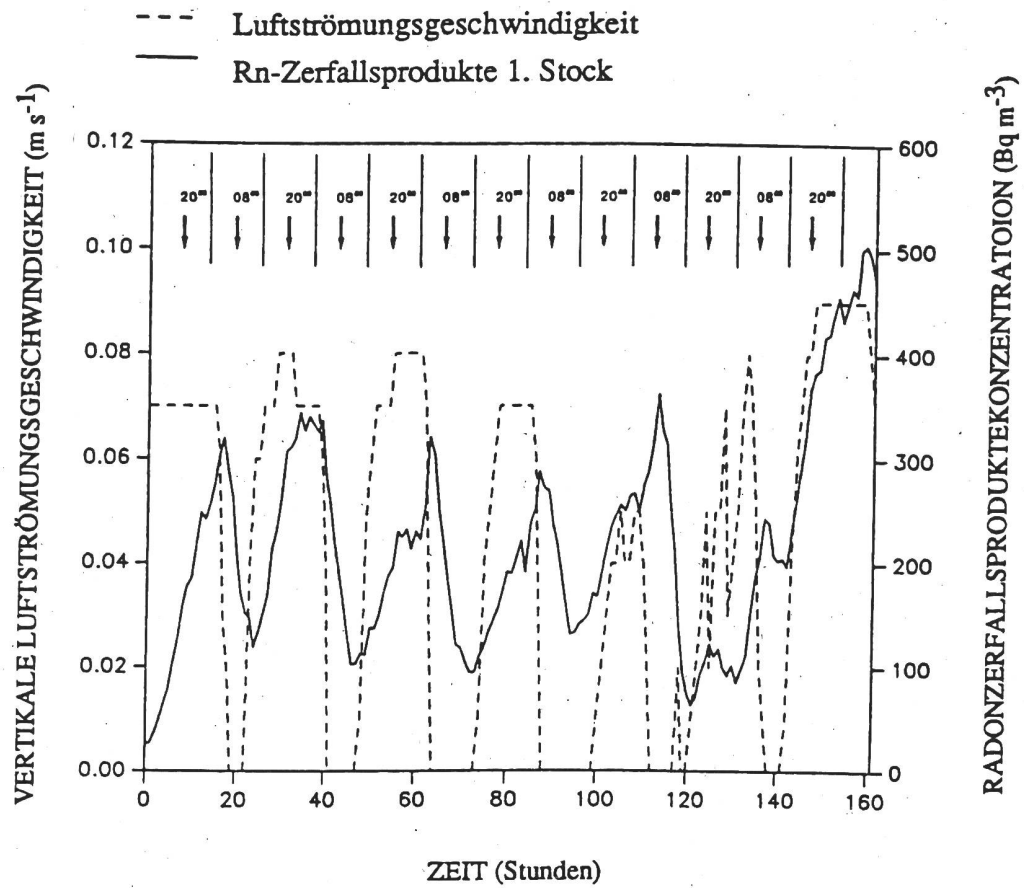
Bei einer mittleren Luftströmungsgeschwindigkeit von  $0.05 \text{ m s}^{-1}$  und einer Radonkonzentration im Keller von  $2000 \text{ Bq m}^{-3}$  reichen  $330 \text{ cm}^2$  Leckfläche zwischen Keller und höheren Stockwerken aus, um eine Radonkonzentration von  $500 \text{ Bq m}^{-3}$  in einem Raum von  $70 \text{ m}^3$  bei einer Luftwechselrate von  $0.4 \text{ h}^{-1}$  aufrechtzuerhalten. Dabei ist zu bemerken, dass eine einzige Türe von  $200 \times 90 \text{ cm}$  mit einer undichten Umrandung von 1 mm Breite bereits  $58 \text{ cm}^2$  Leckfläche aufweist.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN / EMPFEHLUNGEN

Das Eindringen von Radon aus dem Boden über nicht gasdichte Fundamentstrukturen ist verantwortlich für die in Kellern von Gebäuden gemessenen Radonkonzentrationen. Die vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, dass temperaturbedingte Druckunterschiede zwischen Keller und höheren Stockwerken eine wesentliche treibende Kraft für die Ausbreitung des Radons im Wohnbereich darstellen. Entlang vertikaler Luftströmungen innerhalb der Gebäude können durch Fugen und Ritzen beträchtliche Mengen radonreicher Kellerluft in den Wohnbereich gelangen.

Anhand dieser Erkenntnisse können erfolgversprechende Sanierungsmassnahmen für radonbelastete Häuser vorausgesagt werden. Der aussichtsreichste Weg zur Reduktion der Radonkonzentration in Wohnräumen führt über eine Reduktion der Radonkonzentration des Kellers. In einfachen Fällen genügt unter Umständen die Abdichtung von Fugen und Ritzen zwischen Kellergeschoss und höheren Stockwerken, um eine erhebliche Reduktion des Radonpegels im Wohnbereich zu erzielen. Im allgemeinen werden jedoch tiefgreifendere bauliche Massnahmen notwendig sein, um eine wesentliche und dauerhafte Senkung der Radonbelastung zu erzielen.





Figur 1: Zusammenhang zwischen Radonzerfallsproduktepegelschwankungen in höheren Stockwerken und vertikaler Luftströmungsgeschwindigkeit innerhalb der Gebäude. Die vertikale Luftströmung wird von Temperaturdifferenzen zwischen innen und aussen gesteuert und befördert radonreiche Kellerluft in den Wohnbereich.

## 2.6. RADON UND DICHTHEIT DER GEBÄUDEHÜLLE

R. Cramer, D. Furrer und W. Burkart

Abteilung Strahlenhygiene  
Paul Scherrer Institut, Villiger-PSI

### EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Die rasch steigenden Kosten für fossile Energieträger nach der Energiekrise der Siebzigerjahre führten zu grossen Anstrengungen, um den Heizenergiebedarf zu senken. Die Frage nach den Auswirkungen von Abdichtungsmassnahmen an Gebäuden und der damit einhergehenden Erniedrigung der Luftwechselrate auf den Radonpegel ist deshalb auf Grund der in den letzten Jahren bekanntgewordenen gesundheitlichen Risiken der Innenluft-Strahlenbelastung höchaktuell.

Die billigste und folgedessen auch die populärste Energiesparmassnahme für bestehende Gebäude ist das Abdichten der Türen und Fenster zur Reduktion der Luftwechselrate. Verschiedene in der Innenluft der Häuser vorhandene Schadstoffe wie radioaktives Radon, Formaldehyd, Stickoxide, Rauchpartikel und Asbestfasern können dadurch Konzentrationen erreichen, die in der Grössenordnung der tolerierbaren Limiten für beruflich exponierte Personen liegen. Dabei hängt die Innenluftkonzentration eines Schadstoffes primär von der Lokalisation der Quelle, von der Quellstärke und von der Luftwechselrate ab.

Ziel dieser Arbeit war es experimentell abzuklären, ob und inwieweit Abdichtungsmassnahmen an der Gebäudehülle den Radonpegel beeinflussen.

### VORGEHEN / METHODIK

#### Auswahl der Häuser

Die Auswahl der Häuser wurde in Zusammenarbeit mit Architekten vorgenommen und die Häuser liegen mehrheitlich im Mittelland. Alle Häuser waren während der Messperioden bewohnt, wobei die Hausbewohner aufgefordert wurden, die Lüftungsgewohnheiten auch nach der energietechnischen Sanierung beizubehalten.

#### Bestimmung der Radongaskonzentrationen

Radongaskonzentrationen wurden vor und nach der Abdichtung der Gebäudehülle in jedem Haus bei vergleichbaren meteorologischen Bedingungen über eine Periode von drei Monaten mittels Kernspurdetektoren bestimmt. Die verwendeten Dosimeter unterdrücken den Beitrag aus der  $^{232}\text{Th}$ -Zerfallsreihe und haben eine Nachweisgrenze für  $^{222}\text{Rn}$  von etwa  $10 \text{ Bq m}^{-3}$ .

### RESULTATE

Langzeitmessungen der Innenluft-Radonkonzentration wurden vor und nach der Abdichtung der Gebäudehülle in 25 Mehrfamilienhäusern sowie in 7 Einfamilienhäusern durchgeführt. Die Untersuchung umfasste total 170 Räume, 132 in Mehrfamilienhäusern und 38 in Einfamilienhäusern. Alle Häuser waren während der Messperioden vor und nach der energietechnischen Sanierung normal bewohnt.

Um eine starke Beeinflussung des Radonpegels durch meteorologische Faktoren zu vermeiden, wurden die Messungen nach der Abdichtung der Gebäudehülle während Perioden mit ähnlichen äusseren Bedingungen wie vor den getroffenen Abdichtungsmassnahmen durchgeführt. Die durchschnittlichen Werte für Windgeschwindigkeit ( $1.98/1.95 \text{ m s}^{-1}$ ), Aussentemperatur ( $13.9/14.2 ^\circ\text{C}$ ) und Barometerdruck ( $96.41/96.48 \text{ kPa}$ ) waren während der Messperioden vor und nach der Abdichtung der Gebäudehülle durchaus vergleichbar.

Die Radondosimeter wurden vor und nach der energietechnischen Sanierung jeweils im gleichen Raum aufgestellt. Die Untersuchungen erlauben deshalb einen Vergleich der Radonkonzentration vor und nach der Abdichtung der Gebäudehülle in zwei Stichproben von 170 identischen Räumen ('matched pair analysis'). Der Vergleich der Radonkonzentration in Einzelräumen vor und nach der Abdichtung der Gebäudehülle zeigt in einzelnen Fällen eine Zunahme, in anderen Fällen eine Abnahme des Radonpegels.

Die arithmetischen Mittelwerte der Radonkonzentration in 132 Räumen von Mehrfamilienhäusern vor und nach der Sanierung betrugen  $55$  bzw.  $49 \text{ Bq m}^{-3}$ . Erwartungsgemäss liegen die geometrischen Mittelwerte mit  $44$  bzw.  $37 \text{ Bq m}^{-3}$  etwas niedriger. Ein analoges Bild ergibt sich für die Messungen in 38 Räumen von Einfamilienhäusern. Sowohl die arithmetischen Mittelwerte mit  $222$  bzw.  $219 \text{ Bq m}^{-3}$  als auch die geometrischen Mittelwerte mit  $136$  bzw.  $131 \text{ Bq m}^{-3}$  der Radonkonzentration vor und nach den Abdichtungsmassnahmen liegen aber wesentlich höher als in den Räumen von Mehrfamilienhäusern. Die markanten Unterschiede in der Innenlufradonkonzentration zwischen Ein- und Mehrfamilienhäusern sind auf verschiedene Gründe zurückzuführen. Die Radonkonzentration in Räumen hängt unter anderem von der Geologie des Bauuntergrundes, von der Bauweise des Hauses und von der Lage des Raumes im Gebäude ab. Die Messungen in Mehrfamilienhäusern umfassten Räume verteilt auf acht Stockwerke, jene in Einfamilienhäusern jedoch meistens nur Kellergeschoss, Erdgeschoss und erstes Stockwerk. Je höher ein Raum über dem Boden liegt, um so geringer wird der für die Innenluftkonzentration massgebende Radonbeitrag aus dem Bauuntergrund. Andererseits liegen die untersuchten Einfamilienhäuser in der Alpenregion, die Mehrfamilienhäuser aber in der Mittellandregion. Wie die Erhebungen über die regionale Verteilung der Radonkonzentration gezeigt haben, sind die Mittelwerte der Radonbelastung in der Alpenregion wesentlich höher als im schweizerischen Mittelland. Diese zwei Tatsachen reichen aus, um die Unterschiede der mittleren Radonbelastung zwischen Mehr- und Einfamilienhäusern dieser Messreihe zu erklären.

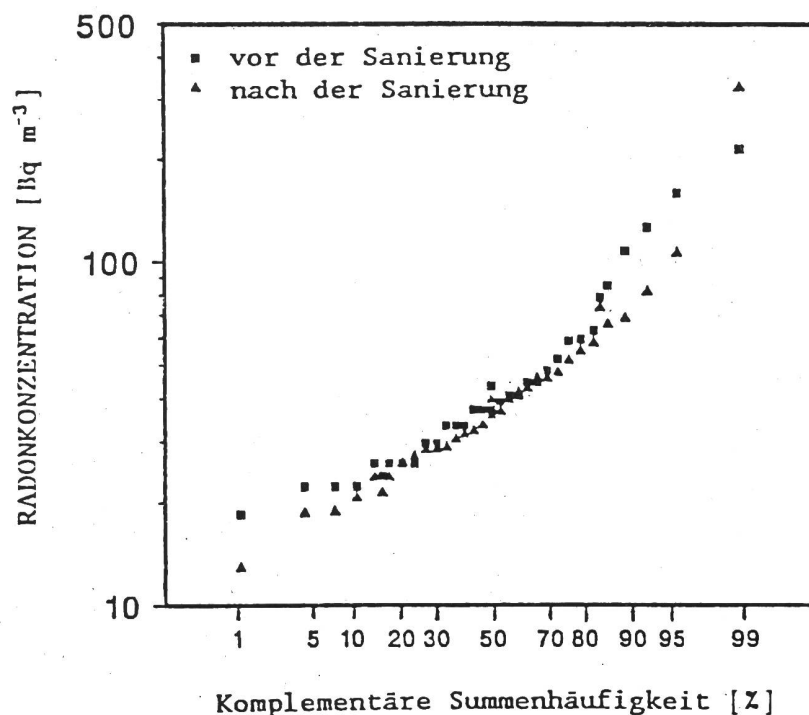
Bezüglich der mittleren Radonbelastung vor und nach der Abdichtung der Gebäudehülle sind aber weder bei den Räumen von Einfamilienhäusern noch bei den Räumen von Mehrfamilienhäusern statistisch relevante Unterschiede feststellbar.

Die experimentellen Resultate stehen scheinbar im Widerspruch zu theoretischen Überlegungen, welche eine Erhöhung der Konzentration von Innenluftschadstoffen bei einer Erniedrigung der Luftwechselrate voraussagen. Die Erklärung für die Diskrepanz zwischen theoretischen Voraussagen und Messresultaten ergibt sich aus der differenzierten Betrachtung der Radonquellen. Wenn eine Luftschadstoffquelle im Wohnraum selbst lokalisiert ist, so muss die Luftschadstoffkonzentration bei einer Herabsetzung der Luftwechselrate zwangsläufig ansteigen. Das gilt auch für in Innenräumen vorhandene Radonquellen. In schweizerischen Häusern tragen jedoch die in Wohnräumen vorhandenen Radonquellen nur geringfügig zum Innenlufradonpegel bei.

Die Hauptquelle des Radons ist im Bauuntergrund lokalisiert. Die Innenlufradonkonzentration ergibt sich deshalb durch das Gleichgewicht zwischen einströmenden Radon aus dem Boden im Hausinneren, dem radioaktiven Zerfall des Radons und deren Verdünnung mit radonarmer Aussenluft. Dabei spielt der radioaktive Zerfall des Radons wegen der relativ langen Halbwertszeit von 3.82 Tagen im Vergleich zur Luftwechselrate eine vernachlässigbare Rolle. Solange das Austauschverhältnis zwischen radonarmer Aussenluft und radonreicher Kellerluft im Wohnbereich von Abdichtungsmassnahmen an der Gebäudehülle nicht wesentlich beeinflusst wird, bleibt die Radonkonzentration auch nach einer energietechnischen Sanierung weitgehend unverändert.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN / EMPFEHLUNGEN

Die Resultate der vorliegenden Untersuchung liefern keine Hinweise auf eine Erhöhung des Radonpegels bei der Abdichtung der Gebäudehülle. Trotzdem kann nicht ausgeschlossen werden, dass in Einzelfällen - je nach bauphysikalischen Gegebenheiten - als Folge der Abdichtung der Gebäudehülle eine Erhöhung des Innenlufradonpegels auftreten kann. Es empfiehlt sich deshalb, bei allfälligen Abdichtungen der Gebäudehülle vor und nach der Durchführung der Arbeiten den Radonpegel zu messen. Bei Häusern mit einer hohen Radonbelastung wird dringend empfohlen, parallel mit der Durchführung der Abdichtungsarbeiten Massnahmen zur Reduktion des Radonpegels in Betracht zu ziehen. Im weiteren muss darauf hingewiesen werden, dass eine starke Herabsetzung der Luftwechselrate in Wohnräumen zu einer Verschlechterung der Innenluftqualität führt.



Figur 1. Verteilung der Radonkonzentration in 132 Räumen von Mehrfamilienhäusern vor und nach der Abdichtung der Gebäudehülle. Die logarithmisch-normale Verteilung der Messwerte zeigt keine wesentlichen Einflüsse von Abdichtungsmassnahmen der Gebäudehülle auf den Radonpegel.

## 2.7. DIE SUCHE NACH DER URSACHE ERHÖHTER RADONKONZENTRATIONEN IN WOHNÄUMEN DER REGION LA CHAUX-DE-FONDS

H. Surbeck und G. Piller

Sektion Ueberwachung der Radioaktivität, BAG, Fribourg

### EINLEITUNG

Anfangs der 80er Jahre wurden von der SUVA erhöhte Radonkonzentrationen in Wohnräumen der Stadt La Chaux-de-Fonds (L.C.d.F.) festgestellt. Hohe Werte wurden zuerst in einem ehemaligen Leuchtfarben-Setzatelier gefunden, später aber auch in Häusern, in denen mit grosser Wahrscheinlichkeit nie mit radiumhaltiger Leuchtfarbe gearbeitet worden war. Die Messungen in diesen "Referenz"-Häusern liessen Zweifel an der künstlichen Herkunft des Radonproblems in L.C.d.F. aufkommen und waren der Auslöser für das schliesslich 1986 gestartete Untersuchungsprogramm über die Radon-Situation in der Schweiz (RAPROS). Die bereits früher vom damaligen Labor Fribourg der KUeR (LFR, heute SUEr) begonnene Suche nach der Herkunft der erhöhten Radonkonzentrationen in L.C.d.F. wurde als Teilprojekt dieses Programmes weitergeführt.

Die Suche nach der Herkunft erhöhter Radonkonzentrationen lässt sich in zwei Teilgebiete zerlegen :

1. Suche nach den Radonquellen und
2. Suche nach den Transportwegen für das Radon von der Quelle bis in die Wohnräume.

Die beiden Bereiche sind sowohl in den verwendeten Untersuchungsmethoden als auch in der Bedeutung der Untersuchungsergebnisse recht verschieden. Falls Kontaminationen aus der Uhrenindustrie die Quelle sind, bleibt das Radonproblem auf die unmittelbare Umgebung ehemaliger Leuchtfarbenbetriebe oder Deponien beschränkt. Ein regionales Problem ergibt sich aber, wenn die Quelle natürlichen Ursprungs ist. Die Kenntnis der Transportwege liefert dagegen eher Hinweise auf Sanierungsmöglichkeiten.

Die wesentlichsten Ziele unseres Projektes waren abzuklären, ob das Radonproblem in L.C.d.F. auf künstliche oder natürliche Quellen zurückzuführen ist und ob ungewöhnlich günstige Transportwege das Problem verschärfen oder sogar wesentlich dafür verantwortlich sind.

### RESULTATE / QUELLEN

Die Untersuchungen konzentrierten sich während längerer Zeit auf ein ehemaliges Leuchtfarben-Setzatelier in L.C.d.F. und die angrenzenden Grundstücke. In den Wohnräumen des ehemaligen Setzateliers und auch in den benachbarten Häusern wurden sehr hohe Radonkonzentrationen gemessen. Die höchsten Werte ( $5 \text{ kBq/m}^3$  in einem Wohnraum) zeigten sich erstaunlicherweise nicht im Setzatelier oder den angrenzenden Wohnräumen, sondern in einem Nachbarhaus. In diesem Haus konnten auch bei gründlicher Suche keine Radiumkontaminationen gefunden werden. Im ans Setzatelier angrenzenden Gebäude, in dem früher ebenfalls mit Leuchtfarbe gearbeitet worden war, fanden sich mit Hilfe einer UV-Lampe noch Spuren Ra-haltiger Leuchtfarbe. Selbst bei grosszügiger Extrapolation auf eventuell noch versteckt vorhandene Kontaminationen genühten aber die abgeschätzten Radiummengen um mehrere Grössenordnungen nicht, um die hohen Rn-Konzentrationen in den Häusern zu erklären. Einige hot-spots im Garten und in der Kanalisation des Setzateliers verbesserten die Bilanz nur unwesentlich.

Erhöhte  $^{226}\text{Ra}$ -Konzentrationen wurden dann in zahlreichen Bodenproben aus den Nachbargrundstücken gefunden (bis  $380 \text{ Bq/kg}$  Trockensubstanz (T.S.)). Diese Aktivitäten genügen schon eher, die hohen Innenluft-Radonpegel aufrecht zu erhalten; allerdings nur, wenn ein wesentlicher Teil ( $>10\%$ ) des im Boden des gesamten Grundstückes (ca.  $1000 \text{ m}^2$ ) produzierten Radons ins Haus gelangen kann. Die Tatsache, dass die Häuser in diesem Gebiet direkt auf den Kalkfels gebaut wurden und nur über die

Aussenwand auf eine Höhe von 20-50 cm mit dem verwitterten Boden in Kontakt stehen, spricht aber gegen diese Möglichkeit.

Der Kalkfels erwies sich wie erwartet als radiumarm (10-20 Bq/kg) und kommt als Quelle nicht in Frage.

Eine ausgedehnte Probenahmekampagne im Neuenburger und Waadtländer Jura förderte dann weitere sehr hohe Radiumaktivitäten zu Tage (bis 880 Bq/kg T.S.). Die  $^{228}\text{Ac}$ -Aktivitäten (repräsentativ für die  $^{232}\text{Th}$ -Reihe) sind in diesen Proben nicht, oder nur leicht höher als in Mittellandproben. Einige der höchsten  $^{226}\text{Ra}$ -Werte wurden an Orten gefunden, die nur zu Fuss erreichbar sind. Die Gefahr, dass hier Abfälle aus der Uhrenindustrie abgelagert wurden, ist nicht sehr gross. Auch die grosse Ausdehnung (mindestens von der Vue des Alpes bis zum La Dôle) spricht für eine natürliche Herkunft dieser Radium-Anomalie. Falls wir nicht zufällig mehrheitlich auf hot-spots gestossen sind, würde die gesamte je in der Schweizer Uhrenindustrie verarbeitete Radiummenge nicht ausreichen, um die beobachtete Anomalie zu erzeugen.

Das stärkste Argument für eine natürliche Herkunft der "Ra-Kontaminationen" im westlichen Jura stammt aber von der gammaspektrometrischen Analyse der Bodenproben.

In seit Jahrmillionen nicht mehr gestörtem Gestein herrscht ein Gleichgewicht zwischen  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{mPa}$ ,  $^{230}\text{Th}$  und  $^{226}\text{Ra}$ . Ausgeprägte Ungleichgewichte zeigen dagegen zahlreiche Bodenproben aus dem westlichen Jura. Zum Teil extrem hohe  $^{226}\text{Ra}$  Aktivitäten sind zwar etwa im Gleichgewicht mit dem  $^{230}\text{Th}$ , aber das  $^{238}\text{U}$  (bestimmt über das  $^{234}\text{Th}$ ) ist nur in "normaler" Konzentration (50-100 Bq/kg) vorhanden.

Man könnte natürlich auf den Gedanken kommen, dass die hohen  $^{226}\text{Ra}$  Konzentrationen in zahlreichen Jura-Bodenproben durch Abfälle aus der Uhrenindustrie verursacht werden. Die Uhrenindustrie hat tatsächlich grosse Mengen an  $^{226}\text{Ra}$  zu Leuchtfarbe verarbeitet und sicher einen Teil der Abfälle nicht gerade umweltfreundlich entsorgt. Leuchtfarbenproben und die Probe eines zweifelsfrei kontaminierten Bodens zeigen aber, dass das  $^{226}\text{Ra}$  aus der Uhrenindustrie höchstens von Spuren von  $^{230}\text{Th}$  begleitet ist, was aufgrund der effizienten chemischen Abtrennung des Radiums auch zu erwarten ist.

Das in den Jura-Bodenproben beobachtete Gleichgewicht (innerhalb der Fehlergrenzen) zwischen dem  $^{230}\text{Th}$  und dem  $^{226}\text{Ra}$  ist daher ein starkes Indiz für die natürliche Herkunft des  $^{226}\text{Ra}$  in den Jura-Bodenproben.

Es scheint gesichert zu sein, dass auf den Jurahöhen seit dem Ende der letzten Eiszeit grosse Mengen windverfrachtetes Material unbekannter Herkunft abgelagert wurden. Geochemische Prozesse wie das Auslaugen des unter oxidierenden Bedingungen leicht löslichen Urans aus dem feinkörnigen Material und damit eine Anreicherung des schwer löslichen Thoriums und Radiums könnten dann zu diesen extremen Ungleichgewichten in den Juraböden geführt haben.

Ein Kandidat für dieses windverfrachtete Material ist Vulkanasche aus der Chaîne des Puys im Massif Central.

## TRANSPORT

Schon früh hatten wir vermutet, dass die hohen Innenluft-Radonkonzentrationen etwas mit der Verkarstung der Kalkformationen in dieser Gegend zu tun haben könnten. Eine mit Hilfe der Gemeinde L.C.d.F. durchgeführte grössere Messkampagne in ca. 150 Häusern der Stadt bestätigte dann die schon bei früheren Messungen beobachtete Tendenz: hohe Innenluftkonzentrationen treten gehäuft in Gebieten auf, bei denen entweder eine Verkarstung bekannt ist (Höhlen, Dolinen) oder zumindest vermutet wird. In einer der Höhlen, die ganz in der Nähe des Setzateliars liegt und sich bis zu diesem erstrecken könnte, fanden wir dann Radonkonzentrationen bis  $40 \text{ kBq/m}^3$ . Zusammen mit der sehr hohen Permeabilität im verkarsteten Untergrund stellt das eine äusserst potente Radonquelle dar. Ueber selbst kleine Verbindungen eines Hauses mit diesem System können grosse Radonmengen zugeführt werden. Dass solche Verbindungen tatsächlich existieren, konnten wir in einem Haus am Stadtrand von L.C.d.F. beobachten. Bei Umbauarbeiten wurde im Erdgeschoss ein Zugang von ca. 50 cm Durchmesser zu einem

18 m tiefen Karstloch freigelegt. Im Karstloch wurden  $26 \text{ kBq/m}^3$   $^{222}\text{Rn}$  gemessen, im Haus ca.  $2 \text{ kBq/m}^3$ , gemittelt über eine Woche.

Hohe Radonkonzentrationen wurden in der Folge vom Inst. f. Geophysik der ETHZ in Zusammenarbeit mit dem Centre d'Hydrogéologie der Univ. Neuchâtel in zahlreichen Kalkkarstgebieten des westlichen Juras gefunden.

Damit scheint klar zu sein, woher die hohen Radonkonzentrationen in den Häusern der Region L.C.d.F. stammen.

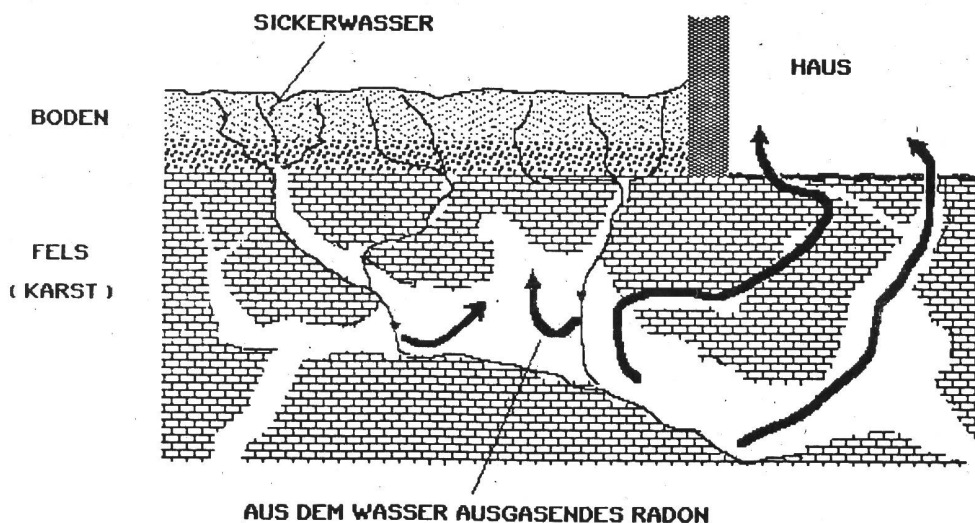
Unklar ist aber noch, wieso die Radonkonzentrationen in den Höhlen so hoch sind. Der Kalkstein kann diese Radonmengen nicht liefern. Kontaminationen wurden in den Höhlen nicht gefunden. Die Höhlensedimente weisen keine besonders hohen Aktivitäten auf und bestehen ausserdem mehrheitlich aus einem lehmigen Silt, der für Rn kaum gut durchlässig ist. Es konnte auch keine Ra-Anreicherung an der Oberfläche der Höhlenwände festgestellt werden. Radonzufuhr aus grosser Tiefe ist wenig wahrscheinlich. Das Kristallin mit möglicherweise erhöhtem Radiumgehalt liegt in mindestens 1000 m Tiefe. Es gibt aber eine sehr viel näher liegende, sehr produktive Radonquelle: der Boden. Wenn nur einige Prozent des im radiumreichen Boden (A- und B-Horizont) des westlichen Juras produzierten Radons in die Karsthöhlen gelangen kann, so lassen sich die hohen Radonpegel in der Höhlenluft zwanglos erklären. Wir vermuten, dass dieser Transport mit dem Sickerwasser erfolgt. Als Indiz für die Radonzufuhr mit dem Wasser erscheinen uns die hohen  $^{210}\text{Pb}$  Ueberschüsse in Höhlenlehmproben und an der Oberfläche der Kalkausscheidungen (Flowstone) an den Höhlenwänden.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Auch wenn noch zahlreiche Fragen offen bleiben, oder durch unsere Untersuchungen überhaupt erst gestellt wurden, sind wir der Meinung, dass wir das Ziel unseres Projektes erreicht haben. Wir glauben mit unserer Arbeit gezeigt zu haben, dass:

- 1) Im westlichen Jura eine grossflächige Radium-Anomalie natürlicher Herkunft existiert.
- 2) Die hohen Innenluft-Radonkonzentrationen in der Region La Chaux-de-Fonds eine Folge dieser Radium-Anomalie im Boden und der Verkarstung des Untergrundes sind (untenstehende Figur).

Es wurde kein Hinweis darauf gefunden, dass Kontaminationen aus der Uhrenindustrie zu erhöhten Innenluft-Radonkonzentrationen in der Region La Chaux-de-Fonds führen.





## **2.8. PILOTPROJEKTE ZUR SANIERUNG VON HÄUSERN MIT ERHÖHTEN RADONKONZENTRATIONEN**

G.-A. Roserens, W. Gfeller und W. Zeller

Abteilung Strahlenschutz, BAG, Bern

### **EINLEITUNG / ZIELE**

Bei den Pilotprojekten zur Sanierungen von Häusern mit erhöhten Radonkonzentrationen wurde versucht, möglichst vielfältige Erfahrungen zu sammeln und verschiedene Sanierungstechniken zu erproben. Die zum Teil im Ausland angewandten Methoden sollten auf die Schweiz übertragen werden und bezüglich Kostenaufwand und Energieverbrauch optimiert werden.

Es sollten bei stark radonbelasteten Wohnhäusern durch geeignete Veränderungen am Haus oder im Bauuntergrund die Radonpegel reduziert werden. An Orten, wo man wusste, dass viel Radon im Bauuntergrund verfügbar war, ging es darum, bei Neubauten prophylaktische Massnahmen zu entwickeln. Es sollten Erfahrungen über Sanierungstechniken, Materialien, Kosten, Messgeräte, etc. gesammelt werden, um diese später bei Beratungen anwenden zu können.

### **VORGEHEN / METHODIK**

Radongas in einem Wohnhaus kann aus verschiedenen Quellen stammen. Möglichst genaue Kenntnis der Quelle ist eine wichtige Voraussetzung für die Planung einer Sanierung.

Folgende Kriterien sollten bei der Auswahl der Häuser für Pilotsanierungen helfen:

- Eine hohe Radonkonzentration im Wohnbereich des Hauses.
- Bereitschaft des Hausbesitzers, "Eingriffe" ins Haus zu akzeptieren.
- Man soll etwas lernen können, das auf andere Häuser übertragbar ist.
- Sanierung von Häusern, in welchen die Ausbreitungsmechanismen untersucht wurden (vgl. Projekt Ausbreitung des Radons).
- Um präventive Massnahmen zu erproben, wurde ein Neubau in einer Ortschaft mit stark radonbelasteten Wohnhäusern ausgewählt.

Die ersten stark radonbelasteten Häuser wurden im Neuenburgerjura und im Graubünden (Landwasser- und Vorderrheintal) gefunden. Es wurden zunächst 5 Pilotsanierungen durchgeführt.

Um den Erfolg einer Sanierung prüfen zu können, muss schon vor dem ersten Sanierungsschritt eine gute Bestandsaufnahme der Radonsituation im entsprechenden Haus vorliegen. Diese soll (wegen der Reproduzierbarkeit) genau definierte Messungen von Radongas und evtl. auch Radon-Zerfallsprodukten enthalten. Um Tageszeitschwankungen, Einflüsse des Wetters, der Jahreszeit, etc. möglichst auszumitteln, wurden mehrmonatige Integralmessungen gemacht, die nach der Sanierung zur gleichen Jahreszeit wiederholt werden können.

## SANIERUNGEN

### Objekt I

#### SANIERUNGSMETHODE: UNTERBODENENTLÜFTUNG

Es wurde eine gasdichte Folie, sowie eine thermische Isolation eingebaut. Dort wo die Gasdichtheit nicht gewährleistet ist, (entlang der Wände) erzeugt eine mechanische Entlüftung einen kleinen Unterdruck und hindert so das Radon am Aufstieg in die Zimmer. Luftfördermenge ca.  $1\text{m}^3/\text{Std}$  pro  $\text{m}^2$  Bodenfläche. Der Keller wird mit einer dichtenden Tür vom Wohnbereich besser getrennt; es wird damit bewusst in Kauf genommen, dass der Radonpegel im nicht bewohnten Keller hoch bleibt.

#### FOLGERUNGEN

Die Methode der Unterbodenentlüftung hat sich bewährt. Das Haus konnte zusätzlich wärmetechnisch verbessert werden. Für nicht unterkellerte Zimmer dürfte eine Unterbodenentlüftung nach oben beschriebener Art eine gute Lösung sein - sicher für Radongaspegel bis ca.  $3\text{ kBq/m}^3$ .

### Objekt II

#### SANIERUNGSMETHODE:

1. Sanierungsetappe:
  - Absaugen von Bodengas unter dem Kellerboden
  - Abdichten des Kellerbodens
  - Auftragen eines gasdichten Farbanstriches
2. Sanierungsetappe:
  - Dichten Übergang Kellergeschoss / Erdgeschoss
  - Erzeugen eines Überdrucks im Kellergeschoss

#### FOLGERUNGEN

Weil diese Sanierung noch nicht abgeschlossen ist, sind hier erst ein paar Teilerkenntnisse zusammengestellt:

- Beim Absaugen unter dem Boden des untersten Geschosses muss zuerst genau geprüft werden, ob nicht eine grössere Luftmenge unter dem Haus "frei verfügbar" ist und somit der erhoffte Unterdruck gar nicht erzeugt werden kann. (lockerer Gebäudeuntergrund, Hohlräume im Boden).
- Eintrittstellen für Radongas können sehr klein sein (hier zwei Löcher in der Wand mit etwa 1 - 2mm Durchmesser). Offenbar genügen im ungünstigen Fall zwei bis drei solcher Löcher, um im Raum Radonpegel von  $20\text{ kBq/m}^3$  und mehr aufzubauen! Dies zeigt auch, dass bei Abdichtungsmassnahmen schon beim Auftreten kleinster Lecks die Radonpegel im entsprechenden Gebäude wieder drastisch steigen können.
- Die getestete gasdichte Farbe hat sich im untersuchten Zimmer bewährt: der Radongaspegel war in diesem Raum nie unter  $2'000\text{ Bq/m}^3$ , an den übermalten (alten) Eintrittstellen konnte keine Erhöhung gemessen werden - im Gegensatz zu den nicht übermalten Eintrittstellen.

### Objekt III (Neubau)

#### METHODE: SICKERROHRE UNTER DEM FUNDAMENT, ENTLÜFTUNG DURCH KAMINE.

Es wurden vorsorgliche bauliche Massnahmen erarbeitet, die das Eindringen des Radons ins Haus möglichst unterdrücken sollen:

- Der Naturbodenkeller wurde gegenüber dem Rest des Gebäudes abgedichtet, indem die Kellertüre mit Gummidichtungen und einer automatischen Türschliessung versehen wurde.
- Unter dem Gebäude wurde im Boden ein Netz von Drainagerohren verlegt. Diese Rohre sind mit zwei zusätzlichen Kaminen verbunden, welche durchs Haus bis aufs Dach verlaufen. Der Unterdruck, der durch den "Kamineffekt" in diesem System entsteht, soll das Radongas unter dem Haus sammeln und via Kamine an die Atmosphäre abgeben.
- Reichen diese Vorkehrungen nicht aus, könnte der Effekt durch den Einbau von Ventilatoren in die Kamine verstärkt werden.

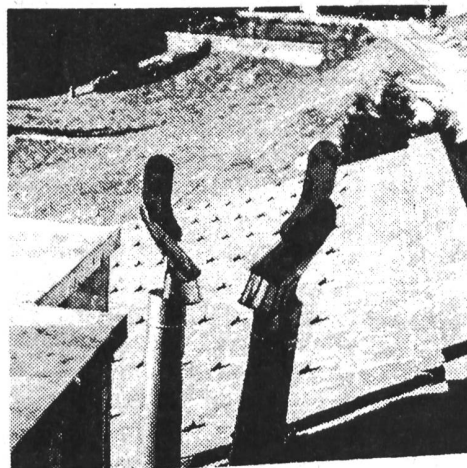


Abb. 1: Ein Röhrensystem unter dem Haus soll das Radon im Boden sammeln und via Kamin in die Atmosphäre führen.

#### FOLGERUNGEN

Dieses Haus wurde in der Nähe von Objekt II (sehr hohe Radonkonzentration) gebaut. So sind die ersten Messresultate sehr erfreulich. Die hohen Werte im Naturbodenkeller entsprechen den Erwartungen - deshalb wurde dieser Raum auch gegenüber dem übrigen Haus abgedichtet. Als nächstes werden in diesem Haus mehrmonatige Radongasmessungen folgen.

#### Objekt IV

##### SANIERUNGSMETHODE: BE-/ENTLÜFTEN DES GESAMTEN KELLERGESCHOSSES

Es wurde im Kellergeschoss eine Lüftungsanlage (Be- und Entlüftung möglich) mit Wärmerückgewinnung eingebaut. Jeder Raum des Kellergeschosses wurde mit einem separaten Zu- bzw. Abluftrohr versehen. Sonst blieb das Haus unverändert.

#### FOLGERUNGEN

Das Haus ist mit der eingebauten Anlage saniert.

#### Objekt V

##### SANIERUNGSMETHODE: - ABDICHTEN ÜBERGANG KELLER/ERDGESCHOSS - ABDICHTEN VON FENSTER UND TÜR IM KELLER

Die Messungen vor den Sanierungsarbeiten zeigten eine gute Korrelation der zeitlichen Verläufe der Radonzerfallsproduktepegel in den drei Stockwerken. Der Versuch, durch geeignete Abdichtungsmassnahmen die Transportwege im Hausinnern zu unterbinden sowie den Radonpegel im Kellergeschoss gleichzeitig zu senken, sollte helfen, die Radon(töchter)pegel in den bewohnten Stockwerken zu senken.

#### FOLGERUNGEN

- Einmal mehr hat sich gezeigt, wie wichtig eine gute Abdichtung des Überganges Kellergeschoss-Erdgeschoss ist.
- Weil das Kellergeschoss dieses Hauses unbewohnt ist, konnte auf eine mechanische Lüftung verzichtet werden, da ein immer noch erhöhter Radonpegel im Kellergeschoss in der vorliegenden Höhe akzeptabel erscheint.
- Bei sehr feuchten Kellerböden verbessert ein Entfeuchten der Kellerluft die Radonbelastung nicht in messbarem Rahmen. (In diesem Haus wurde die Kellerluft von 98% auf 74% Luftfeuchtigkeit gesenkt).

## DISKUSSION DER ERGEBNISSE, SCHLUSSFOLGERUNGEN

### Wahl der Sanierungsmethode

Für die Sanierung von Häusern mit erhöhten Radonpegeln steht eine Auswahl von Methoden zur Verfügung; es sind jedoch insbesondere die folgenden Gegebenheiten zu berücksichtigen:

- Mit keiner Methode kann ein Sanierungserfolg garantiert werden.
- Es kann sich herausstellen, dass nach einer Sanierungsetappe weitere erforderlich sein werden.
- Jedes Haus muss als Spezialfall betrachtet werden.
- Jede Sanierung soll auch unter dem Gesichtspunkt von Energiesparmassnahmen betrachtet werden.
- Die Wahl der Methode sowie der finanzielle Aufwand hängen stark von der Höhe der Radonpegel ab.

### Bewertung der Methoden

In der Schweiz gibt es einige Häuser mit sehr hohen Radongaskonzentrationen. Im Prinzip lassen sich alle diese Häuser sanieren, der Aufwand kann jedoch unter Umständen beträchtlich sein. Die im folgenden aufgeführten Methoden sind nach Aufwand geordnet:

#### ABDICHTUNG VON RADON-EINTRITTSSTELLEN

- |                   |   |
|-------------------|---|
| <i>Vorteile:</i>  | - billig  |
|                   | - kann durch den Eigentümer selbst durchgeführt werden  |
| <i>Nachteile:</i> | - diese Methode eignet sich nur für Konzentrationen von weniger als 1'000 Bq/m <sup>3</sup> . |
|                   | - Die Radonkonzentration muss nach der Sanierung regelmässig nachkontrolliert werden.         |

#### ABDICHTUNG VON DURCHFÜHRUNGEN AUS DEM ERDBODEN INS HAUS

- |                   |  |
|-------------------|--|
| <i>Vorteile:</i>  | - Kosten- Nutzenverhältnis gut   |
|                   | - Verhindert das Aufsteigen des Radons entlang der Leitungen (Elektrizität, Tel, TV) in obere Stockwerke |
| <i>Nachteile:</i> | - Nur als ergänzende Massnahmen sinnvoll   |

#### ABDICHTUNGSMASSNAHMEN ZWISCHEN BEWOHNTEN UND UNBEWOHNTEN BEREICHEN

- |                   |   |
|-------------------|---|
| <i>Vorteile:</i>  | - Reduktion des "Kamineffektes" und damit der Radonkonzentrationen im bewohnten Teil.                       |
|                   | - Diese Methode kann ausreichen.  |
| <i>Nachteile:</i> | - Die Konzentration bleibt im unbewohnten Teil relativ hoch.  |
|                   | - Kann dort, wo sich bewohnte und unbewohnte Räume auf dem gleichen Stock befinden, nicht angewandt werden. |

#### LÜFTUNG DER HOHLRÄUME UNTER DER BODENPLATTE

- |                   |  |
|-------------------|--|
| <i>Vorteile:</i>  | - Kann die Radonpegel mit einem minimalen Aufwand sehr stark reduzieren. |
| <i>Nachteile:</i> | - Abkühlung der Bodenplatte im Winter.                                   |

#### LÜFTUNGSANLAGE IM UNTERSTEN (UNBEWOHNTEN) STOCKWERK

- |                   |  |
|-------------------|--|
| <i>Vorteile:</i>  | - Der Eingriff beschränkt sich auf das Innere des Hauses                           |
|                   | - Diese Methode dürfte auch für sehr hohe Pegel geeignet sein.                     |
| <i>Nachteile:</i> | - Diese Methode bedingt insbesondere für die Wintermonate eine Wärmerückgewinnung. |
|                   | - Relativ teure Methode.   |

#### LÜFTUNGSANLAGE IM WOHNBEREICH

- |                   |  |
|-------------------|--|
| <i>Vorteile:</i>  | - Die Erhöhung der Luftwechselrate kann die Situation wesentlich verbessern.             |
| <i>Nachteile:</i> | - Bedingt einen grossen Eingriff und die Abwesenheit der Bewohner während der Sanierung. |
|                   | - Wärmerückgewinnung erforderlich.   |
|                   | - Methode für Ausnahmefälle.   |

*Es hat sich bisher gezeigt, dass Massnahmen zur Reduktion der Radonpegel in der Schweiz mit einem vertretbaren Kostenaufwand in der Grössenordnung von 10'000 bis 20'000 Fr. pro Objekt durchgeführt werden können, und dass sich der zusätzliche Energieverbrauch im Rahmen hält. Unter Umständen können Häuser bei Radonsanierungen auch energietechnisch verbessert werden.*