

125 JAIRE  
CHIEF MAGAY  
GAMMASIMA  
TRAWSTEM  
1872 - 1997

## Strahlenexposition der Lunge durch Radon/-Folgeprodukte

### *Expositionsquelle*

Die zu Beginn des Jahrhunderts im Zuge der Aufklärung von Transmutationserscheinungen des Phänomens 'natürliche Radioaktivität' von F. E. Dom (1900, "Radon":  $^{222}\text{Rn}$ ), E. Rutherford (1900, "Thoron":  $^{220}\text{Rn}$ ), sowie A. Debiere und F. Giesel (1903, "Actinon":  $^{219}\text{Rn}$ ) beschriebenen 'Emanationen' tragen mehr als 50 % zur natürlichen Strahlenexposition der Bevölkerung bei [1-4].

Bedingt durch die Omnipräsenz der entsprechenden radiogenetischen Mutternuklide in mineralischen Böden (z. B.  $^{238}\text{U}$  Uran - 5 ppm,  $^{232}\text{Th}$  Thorium - 10 ppm) steht ein beachtenswertes Radonpotential in der Biosphäre zur Verfügung [4].

Je nach Wegsamkeit, d.h. also z.B. die Struktur des Interfaces Kellerbodenplatte/Hausuntergrund kann es dabei zur mehr oder minder intensiven Invasion von Innenräumen kommen (Abb. 1). Durch die bauphysikalisch beschreibbare Kaminwirkung von Häusern, werden dann auch die oberen Stockwerke eines Gebäudes betroffen (Abb. 1) [5]. Dies gilt umso mehr, als Raumlüftungsbegrenzung zum Zweck der Vermeidung von Energieverlusten, wie etwa im § 1 (2) des Gesetzes zur Einsparung von Energie in Gebäuden (zuletzt geändert am 20.06.1980, BGBl. 1 S. 701) niedergelegt, auch eine Begrenzung des Radon-Abtransports mit beinhaltet:

".Bei der Begrenzung von Lüftungswärmeverlusten ist der gesamte Einfluß der Lüftungseinrichtungen, der Dichtheit von Fenstern und Türen sowie der Fugen

zwischen den einzelnen Bauteilen zu berücksichtigen...".

Die Luftwechselzahl in Innenräumen kann so z.B. u.a. durch Einführung von doppelten Lippendichtungen in Fenstern bis um den Faktor 5 zurückgehen [6], was allgemein zu einer Pegelzunahme atomar bzw. molekular disperser und/oder aerosolgetragener Innenraumnoxen führt.

Ziel vorliegender Arbeiten ist es, die Innenraumexposition durch das strahlenhygienisch bedeutsamste Radonisotop  $\text{Rn-222}$  ( $T_{1/2} = 3,8 \text{ d}$ ) sowie seinen Folgeprodukten zu erfassen und einfache Maßnahmen zur Expositionsreduktion zu erproben.

### *Kumulierte [ $^{222}\text{Rn}$ ] Radon/-Folgeprodukt-Exposition in Innenräumen*

In den "alten" Ländern der Bundesrepublik durchgeführte Messungen in 6000 Wohnungen ergaben einen häufigsten Wert der Aktivitätskonzentration von  $50 \text{ Bq/m}^3$  für [ $^{222}\text{Rn}$ ] Radon [7], während die Außenluft im Ländermittel -  $14 \text{ Bq/m}^3$  aufweist.

Bedingt durch Oberflächendepositionen (plate-out und Anlagerung an Aerosole) sind die Aktivitätskonzentrationen der kurzlebigen, für die Expositionssituation des Zielorgans Atemtrakt besonders bedeutsamen, Radon-Folgeprodukte generell niedriger als die des Mutternuklids, mit welchem sie über einen sog. Gleichgewichtsfaktor ( $< 1$ ; in Innenräumen - 0,3) in Beziehung stehen (gleichgewichtsäquivalente Radonaktivitätskonzentration:  $\text{Rn}_{\text{eq}}$ ). Für Expositionsabschätzungen, also die Bildung des Produkts von mittlerer Aktivitätskonzentration und Einwirkungszeit [ $\text{Bq}\cdot\text{a}/\text{m}^3$ ] ist diese Tatsache ebenso zu berücksichtigen, wie die Gewohnheit, sich im Tagesablauf im Mittel zu 80 % zeitlichen Aufenthalts in Innenräumen aufzuhalten [2].

$\text{Exp Rn}_{\text{eq}} = (50 \times 0,3 \times 0,8) [\text{Bq}\cdot\text{a}/\text{m}^3]$

Eine mittlere Lebenszeitexposition (70-80 a) errechnet sich dann zu 800-1000 Bqxa/m<sup>3</sup>. Es handelt sich hierbei um eine protrahierte Exposition mit folgenden Eigenschaften

- hohe relative Strahlenempfindlichkeit des Zielorgans (bronchialer und pulmonärer Bereich der Lunge) [5, 8],
- hoher Qualitätsfaktor der lokal emittierten Alpha-Strahlung (Q = 20) der dort deponierten kurzlebigen Radon-Töchter (u.a. Aerosoldeposition) [9],
- mögliche synergistische Effekte durch raucherbedingte Belastung des Bronchialepithels.

Unter Anwendung der entsprechenden Dosisfaktoren der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) [8] ergibt sich für eine Exposition auf der Basis mittlerer Radon-Aktivitätskonzentration von 50 Bq/m<sup>3</sup> und einer sich daraus errechnende gleichgewichtsäquivalente Lebenszeitexposition von 1000 Bq/m<sup>3</sup> eine Äquivalentdosis im Bronchialbereich von 1300 mSv und im pulmonären Bereich der Lunge von 170 mSv [2, 9], was ausweist, daß es sich hier in seiner Gesamtheit um das Organ mit der höchsten natürlichen Strahlenbelastung handelt.

Die These, daß es sich bei den Opfern der schon von Georgius Agricola, 1527-33, Stadtarzt in Joachimsthal (Silber-, später Uranbergbau) beobachteten Bergkrankheit um Radon-/Folgeprodukt-induzierten Lungenkrebs handelt, ist erst 35 Jahre alt [2, 3, 10, 13]. Der Bergarzt F. Härting in Schneeberg und der Bezirksarzt W. Hesse in Schwarzenberg legten dagegen schon 1879 unter dem Titel "Der Lungenkrebs, die Bergkrankheit in den Schneeberger Gruben" in der "Vierteljahresschrift für gerichtliche Medicin und öffentliches Sanitätswesen" nieder:

"... Die in den Gruben bei Schneeberg endemisch vorkommende Bergkrankheit ist primärer Lungenkrebs, und circa 75 pCt. der Todesfälle kommen auf ihre Rechnung...

Alle hiesigen Grubenarbeiter, welche nicht verunglücken... gehen schließlich an Lungenkrebs zu Grunde..." [24].

Zieht man zur Bewertung der oben abgeschätzten Lebenszeit-Innenraumexposition strahlenepidemiologische Daten, überwiegend von Uran-Bergarbeitern, heran, zeigt sich beispielsweise beim sog. 'CSFR-Kollektiv' eine statistische Erhöhung der Lungenkrebsrate oberhalb einer gleichgewichtsäquivalenten Lebensarbeitszeit-Exposition von 3500 Bq.a/m<sup>3</sup> [2]; man stellt fest, daß diese nurmehr um den Faktor 4 über der kumulierten mittleren Lebenszeit-Exposition unserer Bevölkerung in Wohnhäusern liegt [7].

Wendet man umgekehrt die, zum großen Teil aus der Untersuchung mehrerer derartiger Uranbergarbeiter-Kollektive epidemiologisch gewonnenen Risikofaktoren (ICRP 50 [8] und BEIR IV [11], proportionale Expositions-Risiko-Beziehung für Induktion von Lungenkrebs durch dicht ionisierende Strahlung), auf eine mittlere gleichgewichtsäquivalente RadonExposition ( $Rn_{eq}$ ) in Häusern von 12 Bqxa/m<sup>3</sup> an, so ergibt sich ein rechnerisches Lebenszeitrisiko für Lungenkrebs von der Größenordnung 5-10 % [2, 7].

Dies hat die nationale Strahlenschutzkommission (SSK) bewogen, nach entsprechenden ICRP-Empfehlungen, mit einer Radon-Aktivitätskonzentration von 250 Bq/m<sup>3</sup> einen oberen Richtwert ("Obergrenze des Normalbereichs") für die Planung neuer Häuser auf der Basis des Fünffachen des als unvermeidbar ansehbaren Normalwerts anzusetzen [12].

Bei bestehenden Häusern werden Sanierungsmaßnahmen empfohlen, wenn der langzeitige Mittelwert der Radon-Aktivitätskonzentration im Wohn- und Aufenthaltsbereich des Hauses oberhalb dieses Richtwertes liegt. Diese Forderungen orientieren sich sowohl "am Grundsatz der Verhältnismäßigkeit" im Umweltschutz, wie an der Tatsache einer in der Praxis unvermeid-

baren 'Normalexposition'-Sanierungsmaßnahmen sind zeitlich abgestuft, je nach Grad der Überschreitung des Richtwerts, einzuleiten [23].

#### *Expositionsprofil: Exhalation von Sonderquellen*

Als Sonderquellen für Radon-Exhalation in Innenräume kann neben dem Invasionspfad [23] Bodenluft (→ Kellerbodenplatte/-mauerwerk/Leitungsdurchführungen) auch eine Reihe weiterer nennenswerter Exhalationsquellen im Raum in Betracht kommen, so z.B. etwa Fehlbodenfüllungen mit Pechkohlen Schlacke oberbayerischer Bauernhäuser, Objekte mit radiumhaltigen Leuchtfarben (Wecker, Kompass, div. Militaria) insbesondere aber Baustoffe, Baurohstoffe und sekundäre Uran- bzw. Thorium-Mineralien [13, 14, 25, 26]. Der Radionuklidgehalt von Baustoffen und -rohstoffen, welcher neben dem primordialen [<sup>40</sup>K] Kalium auch auf die Startglieder der 4n([<sup>232</sup>Th] Thorium)- und (4n+2)([<sup>238</sup>U] Uran) Zerfallsreihe zurückgeht, variiert in weiten Grenzen (Abb.2). Insbesondere die bis in die jüngste Vergangenheit erfolgte Nutzung von z.B. besonders uranhaltigen Haldenmaterialien in den "neuen" Bundesländern [15], aber auch von regulären Provenienzen generell erhöhten Urangehalts (z.B. Oberpfalz, Oberfranken) werden potentielle Radonquellen in den Innenraum verbracht. Der Radongehalt der Innenluft hängt nun zum einen von konvektiver und aktiver Zufuhr von Kellerluft, aber auch - und dies kann in Grenzfällen der dominierende Anteil sein - von der Verwendung radonexhalierender Baustoffe ab.

Nicht jede mineralische Matrix wird die radiogenetische Tochter des Uran/Radiums, das monoatomare Edelgas [<sup>222</sup>Rn] Radon, fixieren, und so kommt es in Abhängigkeit vom Gefüge zum Übertritt in interne Wegsamkeiten (Emanationsvorgang) sowie ggf. zum anschließenden Austritt in die Raumluft (Exhalationsvorgang) [16]. Diese beiden Effekte sind in der Praxis nur schwer zu separieren, machen sich in der Summe

jedoch in einer Minderung der spezifischen Aktivitäten der Matrix an Radon-Folgeprodukten bemerkbar (Abb. 2, 3).

Weichen die Werte der Glieder vor und nach dem [<sup>220,222</sup>Rn] Radon bzgl. ihrer spezifischen Aktivitäten nicht von einander ab, so liegt radiogenetisches Gleichgewicht zu 100 % vor (keine Exhalation), kommt es hingegen zu mehr oder minder intensiver Emanation/ Exhalation, so wird dasselbe nur teilweise erreicht (<100 %: Exhalation) (Abb. 3) [17]. Es fällt insbesondere auf, daß die Gleichgewichtslage bei dem langlebigen ( $T_{1/2} = 3,8$  d), bezüglich Emanation/Exhalation somit besonders hervortretenden [<sup>222</sup>Rn] Radon in identischer Matrix durchwegs deutlich geringer ist als bei der kurzlebigen Thorium-Tochter [<sup>220</sup>Rn] Radon ( $T_{1/2} = 55$  s) (vgl. Abb. 3).

#### *Radon in Innenräumen*

Nach Übertritt in die Innenraumluft unterliegen die Radongasatome dem Lufttransport. Im Zuge ihres radiogenetischen Zerfalls (zwei sukzessive Alphazerfälle) erleiden sie (je) einen Rückstoß in der energetischen Größenordnung von ca. 100 keV. Dies führt im Zuge von Stoßionisationsprozessen mit umgebenden Luftmolekülen zu Kationen in der Gasphase, welche z.B. im elektrischen Feld kathodisch niedergeschlagen werden können (Elektrodeposition) [16-18].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit fehlt der Raum, auf die Vielzahl von Methoden der Radon-Radiometrie einzugehen, seien sie nun an der Gamma- bzw. Alphaspektroskopie der Folgeprodukte [26], der Entladung eines Elektreten oder dem nuklidspezifischen Signal einer Durchfluß-Gitterionisationskammer orientiert [16, 19-21]. In Abb. 4 ist ein Registrierbeispiel der letztgenannten Methode für Innenraumluft (vgl. Abb. 5) wiedergegeben [19]; deutlich sichtbar sind die Peaks von [<sup>222</sup>Rn] Radon ( $E_{\alpha 1} = 5,5$  MeV, - 100 %) sowie des-

sen Folgeprodukte [ $^{218}\text{Po}$ ]/[ $^{214}\text{Po}$ ] Polonium ( $E_{\alpha 2} = 6,0$  MeV /  $E_{\alpha 3} = 7,7$  MeV, beide  $\sim 100\%$ ).

#### *Tages- und Jahresrhythmus: Saisonalität der Noxe [ $^{222}\text{Rn}$ ] Radon*

Die Aktivitätskonzentration von Radonisotopen in Gebäudeluft insbesondere im Kellerbereich unterliegt saisonalen Schwankungen. Die Ursachen dafür sind in Tag/Nacht-Rhythmen (24h-Periodik der Temperatur- bzw. Druckdifferenzen: innen/außen) einerseits [5, 16], aber auch in komplexeren Vorgängen, wie saisonaler Verfügbarkeit von Untergrund-Wegsamkeiten, Bodenvernässung, -auflage sowie auch im Eintritt von radonhaltigem Wasser zu sehen [22, 23].

Ein abgerundetes Bild der gegenseitigen Wechselwirkung all dieser Einflüsse steht dem gegenüber noch aus, jedoch liegen bereits jetzt gesicherte Einzelerkenntnisse vor. So zeigt sich z.B. bei einem der Untersuchungsobjekte während des im vierstündigen Rhythmus über ein Jahr hinweg als Zeitreihe aufgezeichneten [ $^{222}\text{Rn}$ ] Radon-Pegels, trotz geschlossener Kellerfenster, ein jahresrhythmisches Verhalten mit ausgeprägtem Minimum im Hochsommer und einer Pegelvariation bis zum Faktor 10 (Abb. 5) [19]. Diese ausgeprägten Pegelschwankungen im Quellraum (Keller) treten mit geringem Zeitverzug, aber deutlicher Amplitudenabschwächung, auch im darübergelegenen Wohnzimmer auf (Abb. 6). Die erkennbare Korrelation von Pegelanstiegen mit vorausgegangenen lokalen Niederschlägen (Abb. 7) deutet im Zusammenhang mit feuchten Kellerwänden auf einen noch nicht voll verstandenen Mechanismus [22] des Radoneintrags durch wassergelöstes Radon auf dem Pfad: Boden-  $\rightarrow$  Kellerwand-Vernässung  $\rightarrow$  Radonfreisetzung durch Wasserverdunstung hin (Abb. 1).

#### *Einfache Maßnahmen zur Expositionsreduktion*

Wenn einfache, stets meßtechnisch zu begleitende Maßnahmen, wie etwa Verfugen von Ritzen (Abb. 1),

im Quell- wie im Senkenbereich bzw. die Entfernung mobiler Sonderquellen keinen oder nur geringen Einfluß auf den Radonpegel zeigen, sollte parallel, wie schon aus Gründen der allgemeinen Lüfthygiene geboten, die aktive wie passive Raumlüftungsrate erhöht werden.

Die in Abb. 8 und 9 dargestellten Lüftungsexperimente belegen eindrucksvoll mit Hilfe von zwei bzw. drei von einander unabhängigen Meßverfahren (Alpha-, Gammaskopie, Gitterionisationskammer) die mögliche Pegelreduktion durch Kippen von ein bzw. zwei Raumfenstern (Kellerraum  $V = 6 \times 4 \times 2,2 \text{ m}^3$ ; Variation der Luftfeuchtigkeit zwischen 78-88 %) und die damit erreichbare Expositionsreduktion [16, 19].

Aus strahlenhygienischer Sicht stellt also eine kontrollierte Lüftungssituation ein wirksames Mittel zur Verminderung der kumulierten Innenraum-Exposition durch die kanzerogene Noxe  $Z = 86$  Radon mit seinen aerosolgetragenen Folgeprodukten i.H.v. 1 mSv effektiver Äquivalentdosis pro Jahr dar.

#### *Dank*

Der Autor dankt seinen Mitarbeitern Hans Berger, Thomas Bauer, Rudolf Laubinger und Michael Mundenbruch für die meßtechnische Unterstützung.

#### *Literatur*

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR): Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly, New York 1988 und 1994
- [2] Jacobi, W.: Phys.Bl. 45 (1989) 430-434
- [3] Jacobi, W.: Naturwissenschaften 73 (1986) 661-668
- [4] Schwankner, R.J.: Rev.Arch.Sci. 6 (1986) 285-288
- [5] Cramer, R., W. Burkart (Hrsg.): Radon und Strahlenbiologie der Lunge, PSI-Bericht-Nr. 22, Villingen 1989
- [6] Wegener, J.: Gesundheits-Ingenieur-Haustechnik-Bauphysik-Umwelttechnik 104 (1983) 1-5

- [7] Bundesministerium des Innern (Hrsg.): Radon in Wohnungen und im Freien; Erhebungsmessungen in der Bundesrepublik Deutschland, BMI-Bericht, Bonn 1985
- [8] ICRP: Lung Cancer Risk from Indoor Exposures to Radon Daughters, ICRP Pub. 50, Oxford 1986
- [9] Jacobi, W., H.G. Paretzke, U.H. Ehling: Strahlenexposition und Strahlenrisiko der Bevölkerung, GSF S-7 1 0, Neuherberg 1981
- [10] Jacobi, W., K. Einfeld: Dose to Tissues as Effective Dose Equivalent by Inhalation of Radon-222, Radon-220 and their Short-Lived Daughters, GSF S-626, Neuherberg 1980
- [11] National Research Council: Health Risks from Radon and other Internally Deposited Alpha-Emitters. Report of the BEIR-IV Committee, Washington D.C. 1988
- [12] Strahlenschutzkommission: Strahlenschutzgrundsätze zur Begrenzung der Strahlenexposition der Bevölkerung durch Radon und seine Zerfallsprodukte, Bundesanzeiger Nr. 208 (vom 30.06.1988) 4759-4760
- [13] Schwankner, R.J., A. Brummeisl, G. Lieckfeld, P. Schöffl, A. Schöpf: Geowiss. 10 (1992) 160-167 u. 190-198
- [14] Keller, G., H. Muth: Natürliche Radioaktivität, in: Beckert, J., J. Mechel, H.O. Lamprecht (Hrsg.): Gesundes Wohnen, Düsseldorf 1986
- [15] Rösch, W.: Territorialer Strahlenschutz in den Südregionen der ehemaligen DDR (Thüringen und Sachsen), in: Tagungsbericht für den Strahlenschutz, Seminar am 19. und 20. Oktober 1990 in Berlin, Publikationsreihe Fortschritte im Strahlenschutz FS-90-53-T

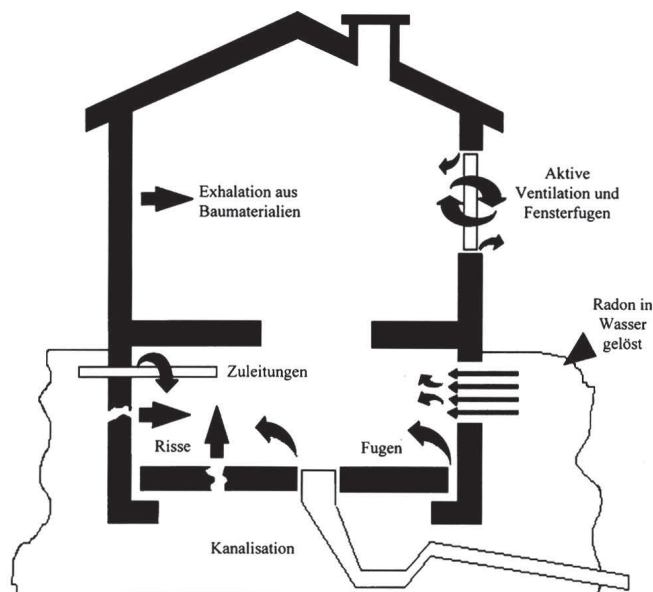


Abb. 1: Mögliche Eintrittspforten für Radonisotope in den Innenraum, sowie Quellen- und Senkensituation

Abb. 2:  
Baustoff-, Baurohstoff-Radiometrie; Gammaspektrometrische Resultate der Ermittlung spezifischer Aktivitäten ausgewählter Glieder der  $(4n+2)$ -,  $(4n)$ -Zerfallsreihen (unter Berücksichtigung dichteabhängiger Selbstabsorption) [17].

| Probe Nr. | Bezeichnung (Ort)              | Th-234<br>Bq/kg | Pb-214<br>Bq/kg | Bi-214<br>Bq/kg | U-238<br>als Th-234<br>Bq/kg | Ac-228<br>Bq/kg | Bi-212<br>Bq/kg | Th-232<br>als Ac-228<br>Bq/kg | K-40<br>Bq/kg | Kalium<br>Bq/kg |
|-----------|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|---------------|-----------------|
| 01        | Kalksand<br>Amberg (Obpf.)     | 124             | 65              | 57              | 10                           | 101             | 63              | 25                            | 1461          | 31210           |
| 02        | Lehm<br>Rötz (Obpf.)           | 115             | 41              | 37              | 10                           | 54              | 29              | 13                            | 651           | 13910           |
| 03        | Lehm<br>Freising               | 160             | 49              | 47              | 13                           | 62              | 40              | 15                            | 861           | 18390           |
| 04        | Quarz-Sand<br>Hirschau (Obpf.) | 44              | 21              | 22              | 4                            | 30              | 18              | 7                             | 576           | 12300           |
| 05        | Kies<br>Freising               | 59              | 29              | 23              | 5                            | 4               | 3               | 1                             | 163           | 3480            |
| 06        | Ziegel<br>Freising             | 78              | 66              | 55              | 6                            | 49              | 35              | 12                            | 611           | 13050           |
| 07        | Knorpel-Gips<br>Rohrdorf       | 61              | 21              | 18              | 5                            | 6               | 3               | 2                             | 255           | 5450            |
| 08        | Rea-Gips<br>Zolling            | 21              | 5               | 5               | 2                            | 2               | 1               | 1                             | 16            | 342             |
| 09        | Kalkgemisch<br>Rohrdorf        | 76              | 27              | 23              | 6                            | 17              | 12              | 4                             | 276           | 5900            |
| 10        | Hüttensand<br>Zolling          | 197             | 43              | 81              | 16                           | 40              | 29              | 10                            | 242           | 5170            |
| 11        | Sand<br>Bruck (Obpf.)          | 46              | 17              | 13              | 4                            | 18              | 12              | 4                             | 1045          | 22320           |

| Probe Nr. | Bezeichnung (Ort)           | Schüttdichte [g/cm <sup>3</sup> ] | ppm <sub>U</sub> / ppm <sub>Th</sub> | Radiogenet. Gleichgewicht [%] bzgl. |                   |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
|           |                             |                                   |                                      | Rn-222/Folgeprod.                   | Rn-222/Folgeprod. |
| 01        | Kalksand Amberg (Obpf.)     | 1,46                              | 0,4                                  | 50                                  | 60                |
| 02        | Lehm Rötz (Obpf.)           | 1,58                              | 0,8                                  | 35                                  | 70                |
| 03        | Lehm Freising               | 1,61                              | 0,9                                  | 30                                  | 65                |
| 04        | Quarz-Sand Hirschau (Obpf.) | 1,54                              | 0,6                                  | 50                                  | 60                |
| 05        | Kies Freising               | 1,84                              | 5,0                                  | 45                                  | 75                |
| 06        | Ziegel Freising             | 1,52                              | 0,5                                  | 75                                  | 75                |
| 07        | Knorpel-Gips Rohrdorf       | 1,82                              | 2,5                                  | 30                                  | 50                |
| 08        | Rea-Gips Zolling            | 1,05                              | 2,0                                  | 25                                  | 50                |
| 09        | Kalkgemisch Rohrdorf        | 1,68                              | 1,5                                  | 35                                  | 70                |
| 10        | Hüttensand Zolling          | 1,64                              | 1,6                                  | 30                                  | 75                |
| 11        | Sand Bruck (Obpf.)          | 1,73                              | 1,0                                  | 35                                  | 70                |

Abb. 3: Radiogenetische Gleichgewichtslage: Mutternuklid/Radonfolgeprodukte (FP: <sup>214</sup>Pb]Blei und <sup>214</sup>Bi]Wismut) in der (4n+2)- und <sup>212</sup>Pb]Blei in der (4n)-Reihe; bemerkenswert ist, daß das kürzerlebige Radonisotop der (4n)-Reihe <sup>220</sup>Rn]Radon (T<sub>1/2</sub> = 55 s) simultan geringere Austrittschancen aus der Matrix hat als <sup>222</sup>Rn]Radon (T<sub>1/2</sub> = 3,8 d), (4n+2) [17].

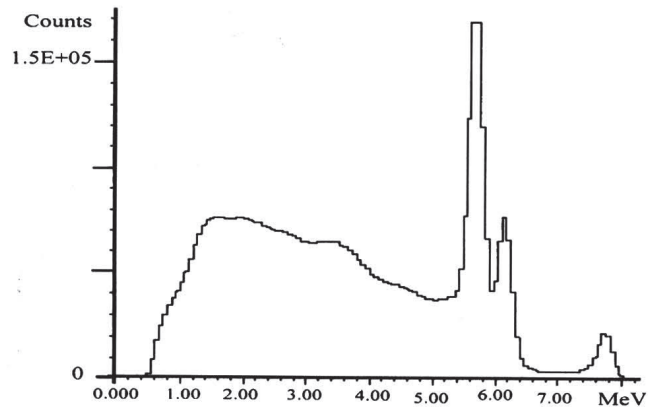


Abb. 4: Alphaspektrum von Innenraumluft (Kelleruntersuchungsraum: Bungalow Baujahr 1978, München-Obermenzing) aufgenommen mit aktiv ansaugender Gitterinisationkammer (Atmos 12D, t<sub>sammel</sub> = 73 Meßtage, V<sub>sammel</sub> = 105 m<sup>3</sup>). Indizierbar (vgl. Text) sind (v.l.n.r.) die Alphaemittoren ((4n+2)-Reihe): <sup>222</sup>Rn]Radon, <sup>218</sup>Po] und <sup>214</sup>Po]Polonium [19].

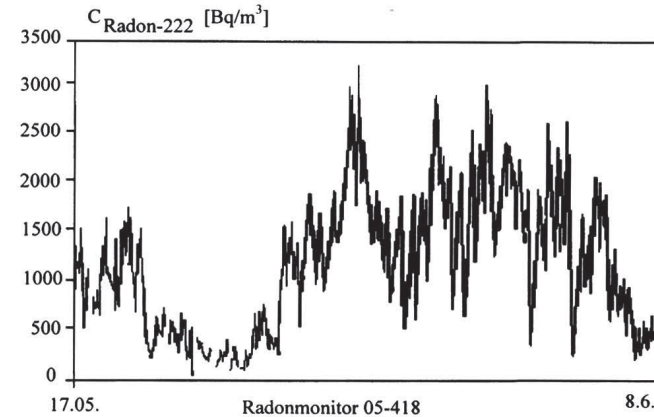


Abb. 5: Aufzeichnung des „Münchner Radonjahres“ (vgl. Abb. 4) bei geschlossenen Fenstern mit Hilfe der passiven Alpha-Oberflächenbsperrschichtspektrometrie (Radon-Monitor 05-418, 4b-Werte); man beachte die ausgeprägte jahreszeitliche Saisonalität (die Unterbrechungen der Zeitreihe geben auf insgesamt 9 ein- bis dreitägige Lüftungsexperimente zurück) [19].

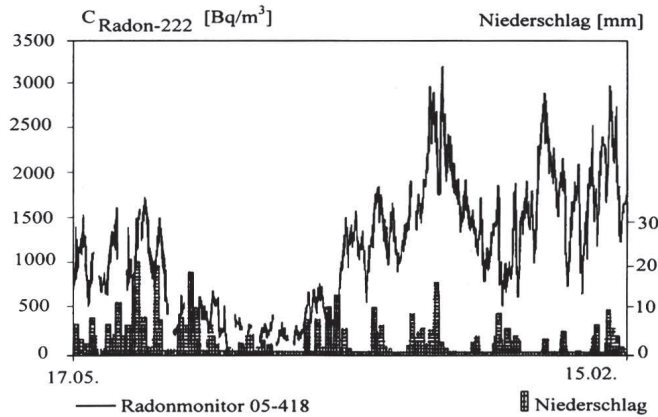


Abb. 6: Simultanaufzeichnung des Radonpegels im Quellraum (Keller) und im unmittelbar darüberliegenden Wohnzimmer mittels zweier Gitterionisationskammern (Atmos 12D; dem Experiment ging eine eintägige Lüftung beider Räume voraus) [19].

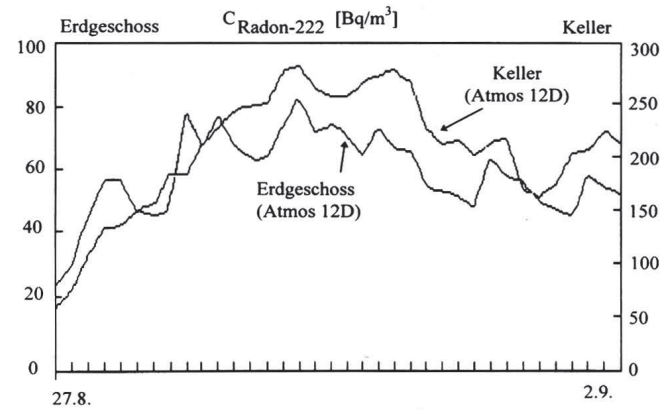


Abb. 7: Die Vernässung der nach außen begrenzenden Kellerwand im Untersuchungsraum deutet auf den Einfluß von Eintrag wassergelösten Radons hin. Eine Gegenüberstellung der Daten des im Abstand < 2 km vom Untersuchungsort gelegenen Regensammlers der Station Nymphenburg des Münchener Wetteramtes (dreifach Probennahme/Tag) zeigt Korrelation zum Radonpegel im Kellerraum [19].

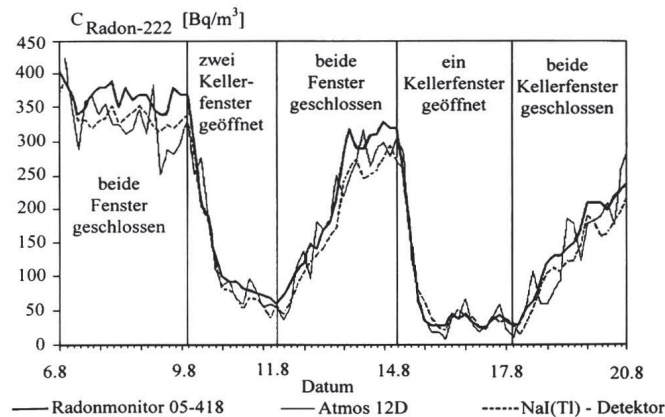


Abb. 8: Lüftungsexperimente zur Expositionsreduktion im Kellerraum während Niederpegelsituation im Sommer, vgl. Abb. 5 [19]

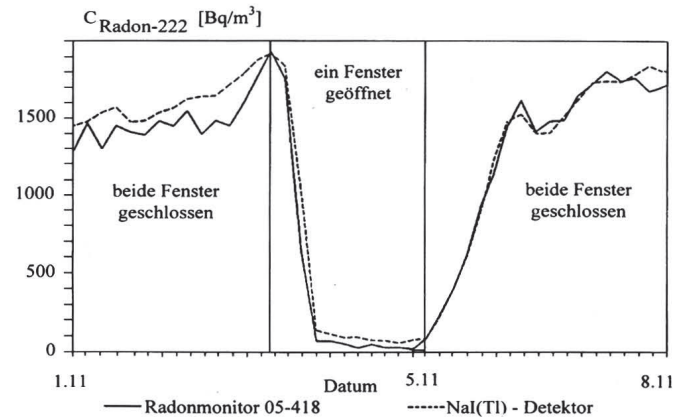


Abb. 9: Lüftungsexperimente zur Expositionsreduktion im Kellerraum während Hochpegelsituation im Winter, vgl. Abb. 5 [19]