

# Strahlenexposition durch [ $^{220,222}\text{Rn}$ ] Radon - Folgeprodukte in Innenräumen

von Robert J. Schwankner, Richard Bämayer, Michael Mundenbruch und  
Markus Steiner, München

## 1 Einführung

Die zu Beginn des Jahrhunderts im Zuge der Aufklärung von Transmutationserscheinungen des Phänomens 'natürliche Radioaktivität' von F.E.Dorn (1900, "Radon":  $^{222}\text{Rn}$ ), E.Rutherford (1900, "Thoron":  $^{220}\text{Rn}$ ), sowie A. Debierne und F. Giesel (1903, "Actinon":  $^{219}\text{Rn}$ ) beschriebenen 'Emanationen' tragen maßgeblich 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 ~ 5ppm, [ $^{232}\text{Th}$ ]Thorium ~ 10ppm) 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) 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 nach Messungen Anfang der Achziger Jahre 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 Rn-222 ( $T_{1/2}=3,8\text{d}$ ) sowie seinen Folgeprodukten zu erfassen und einfache Maßnahmen zur Expositionsreduktion zu Erproben.

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

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 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 Beziehung stehen (gleichgewichtsäquivalente Radonaktivitätskonzentration:  $Rn_{eq}$ ). Für Expositionsabschätzungen, also die Bildung des Produkts von mittlerer Aktivitätskonzentration und Einwirkungszeit [ $Bq \cdot a/m^3$ ] ist diese Tatsache ebenso zu berücksichtigen, wie die Gewohnheit, des im Tagesablauf im Mittel 80%-igen zeitlichen Aufenthalts in Innenräumen [2].

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

Eine mittlere Lebenszeitexposition (70-80 a) errechnet sich dann zu 800-1000  $\$/Bq \cdot a/m^3$ . 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 [9],*
- *mögliche synergistische Effekte durch raucherbedingte Belastung des Bronchialepithels.*

Unter Anwendung der entsprechenden ICRP-Dosisfaktoren [8] ergibt sich für eine Exposition auf der Basis mittlerer Radon-Aktivitätskonzentration von 50  $Bq/m^3$  und eine sich daraus errechnende gleichgewichtsäquivalente Lebenszeitexposition von 1000  $Bq \cdot a/m^3$ , 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 (1494-1555) 1527-33 weiland Stadtarzt in Joachimsthal (Silber-, später Uranbergbau) beobachteten Bergkrankheit um Radon-induzierten Lungenkrebs handelt, ist erst 35 Jahre alt [2,3,10,13]. 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  $Bq \cdot a/m^3$  [2]; man stellt fest, daß diese nurmehr 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 Radon-Exposition ( $Rn_{eq}$ ) in Häusern von

12 Bq·a/m<sup>3</sup> an, so ergibt sich ein rechnerisches Lebenszeit-Risiko für Lungenkrebs von der Größenordnung 5-10 % [2,7].

Dies hat die nationale Strahlenschutzkommission (SSK) bewogen, auf der Basis entsprechender 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 unvermeidbaren 'Normalexposition'; Sanierungsmaßnahmen sind zeitlich abgestuft, je nach Grad der Überschreitung des Richtwerts, einzuleiten.

### 3 Sonderquellen

Als Sonderquellen für Radon-Exhalation in Innenräume kann neben dem Invasionspfad Bodenluft -> Kellerbodenplatte/-mauerwerk/Leitungsdurchführung auch eine Reihe weiterer nennenswerter Exhalationsquellen im Raum in Betracht kommen, so z.B. etwa Fehlbodenfüllungen mit Pechkohenschlacke oberbayerischer Bauernhäuser, Objekte mit radiumhaltigen Leuchtfarben (Wecker, Kompass, div. Militaria) insbesondere aber Baustoffe und Baurohstoffe [13, 14]. 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 im Hinblick auf die erfolgte und zum Teil noch erfolgende Nutzung von z.B. besonders uranhaltigen Haldenmaterialien in den "neuen" Bundesländern [15], aber auch von regulären Provinzen 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 nun 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 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-Folgeprodukte 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 ( $T_{1/2} = 3,8 \text{ d}$ ) bezüglich Emanation/Exhalation somit besonders hervortretenden [ $^{222}\text{Rn}$ ]Radon in identischer Matrix durchwegs deutlich geringer ist als bei der kurzlebigen Thorium-Tochter [ $^{220}\text{Rn}$ ]Radon ( $T_{1/2} = 55 \text{ s}$ )(vgl. Abb.3).

#### 4 Radon-Radiometrie

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]. Durch Abwischen können so die Radon-Folgeprodukte trägerfrei gewonnen werden, auch wird dieser Effekt zum quantitativen Nachweis genutzt. Abb. 4 zeigt so den Ausschnitt eines Gammaskpektrums einer derartig gewonnenen Wischprobe. Bei den aufscheinenden Peaks handelt es sich um die Folgeprodukte von [ $^{222}\text{Rn}$ ] ( $T_{1/2} = 3,8 \text{ d}$ )/[ $^{220}\text{Rn}$ ] ( $T_{1/2} = 55 \text{ s}$ ) Radon: [ $^{214}\text{Pb}$ ]/[ $^{212}\text{Pb}$ ]Blei.

Im vorliegenden Fall wurden in definierten Abständen vor einer Gipswand ( $A([^{238}\text{U}]) = 40 \text{ Bq/kg}$ ;  $A([^{232}\text{Th}]) = 10 \text{ Bq/kg}$ ) Cu-Kathodendrähte ( $l = 4,5 \text{ m}$ ,  $\phi = 0,8 \text{ mm}$ ,  $U_{\text{kath}} = 1,4 \text{ kV}$ ) zwecks Elektrodeposition der Folgeprodukte exhalierter Radons gespannt. Es zeigt sich eine ausgeprägte Abstandsabhängigkeit [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, der Entladung eines Elektreten oder dem nuklidspezifischen Signal einer Durchfluß-Gitterionisationskammer orientiert [16, 19-21]. In Abb. 5 ist ein Registrierbeispiel der letztgenannten Methode für Innenraumluft (vgl Abb. 6) wiedergegeben [19]; deutlich sichtbar sind die Peaks von [ $^{222}\text{Rn}$ ]Radon ( $E_{\alpha 1} = 5,5 \text{ MeV}$ ,  $\sim 100\%$ ) sowie dessen Folgeprodukte [ $^{218}\text{Po}$ ]/[ $^{214}\text{Po}$ ] Polonium ( $E_{\alpha 2} = 6,0 \text{ MeV}/E_{\alpha 3} = 7,7 \text{ MeV}$ , beide  $\sim 100\%$ ).

#### 5 Saisonalität im Innenraum

Die Aktivitätskonzentration von Radonisotopen in Gebäudeluft insbesondere im Kellerbereich unterliegen 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 in Eintritt von radonhaltigem Wasser zu sehen [22].

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 jah-

resrhythmisches Verhalten mit ausgeprägtem Minimum im Hochsommer und einer Pegelvariation bis zum Faktor 10 (Abb. 6) [19]. Diese ausgeprägten Pegelschwankungen im Quellraum (Keller) zeigen sich mit geringem Zeitverzug, aber deutlicher Amplitudenabschwächung, auch im darübergelegenen Wohnzimmer (Abb. 7). Die erkennbare Korrelation von Pegelanstiegen mit vorausgegangenen lokalen Niederschlägen (Abb. 8) deutet im Zusammenhang mit feuchten Kellerwänden auf einen noch nicht voll verstandenen Mechanismus [22], des Radoneintrags durch wassergelöstes Radon auf dem Pfad: Boden- → Kellerwand-Vernässung → Radonfreisetzung durch Wasserverdunstung hin (Abb. 1).

## 6 Expositionsreduktion durch Lüftungsverhalten

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 Lufthygiene geboten, die aktive, wie passive Raumlüftungsrate erhöht werden.

Die in Abb. 9 und 10 dargestellten Lüftungsexperimente belegen eindrucksvoll mit Hilfe von zwei bzw. drei von einander unabhängigen Meßverfahren (Alpha-, Gammaskpektrometrie, Gitterionisationskammer) die mögliche Pegelreduktion durch Kippen von ein bzw. zwei Raumbfenstern (Kellerraum  $V = 6 \times 4 \times 2,2 \text{ m}^3$ ; Variation der Luftfeuchtigkeit zwischen Mai 91 und Mai 92: 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 das Kanzerogen  $Z = 86$  Radon dar.

## 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
- [ 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 ] Crameri, 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-710, Neuherberg 1981
- [10] Jacobi, W., K. Eisfeld: 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] Rönsch, 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
- [16] Schwankner, R.J., A. Brummeisl, P. Höpfl, M. Mundenbruch und M. Steiner: Öff.Gesundh.-Wes., 53 (1991) 398-408
- [17] Steiner, M.: Beitrag zur Radiochemie und Baustoffradiometrie von Z = 86 Radon und seinen Folgeprodukten, Diplomarbeit FHM, Fachbereich 06/Physikalische Technik 1992
- [18] Bämayer, R., R.J. Schwankner: (unveröffentlichte Resultate)
- [19] Mundenbruch, M.: Saisonalität und Traceranwendungen von Z = 86 Radon/ Folgeprodukten, Diplomarbeit FHM, Fachbereich 06/Physikalische Technik 1992
- [20] Kotrappa, P., J.C. Dempsey, R.W. Ramsay, L.R. Stieff: Health Physics 58 (1990) 461-467
- [21] Genrich, V.: Atmos 12D Benutzerhandbuch, Genitron Instruments, Frankfurt/M. 1989
- [22] Montague, A., W.E. Belanger, F.J. Haughey: International Symposium on Radon and Radon Reduction Technology, US-EPA 1991

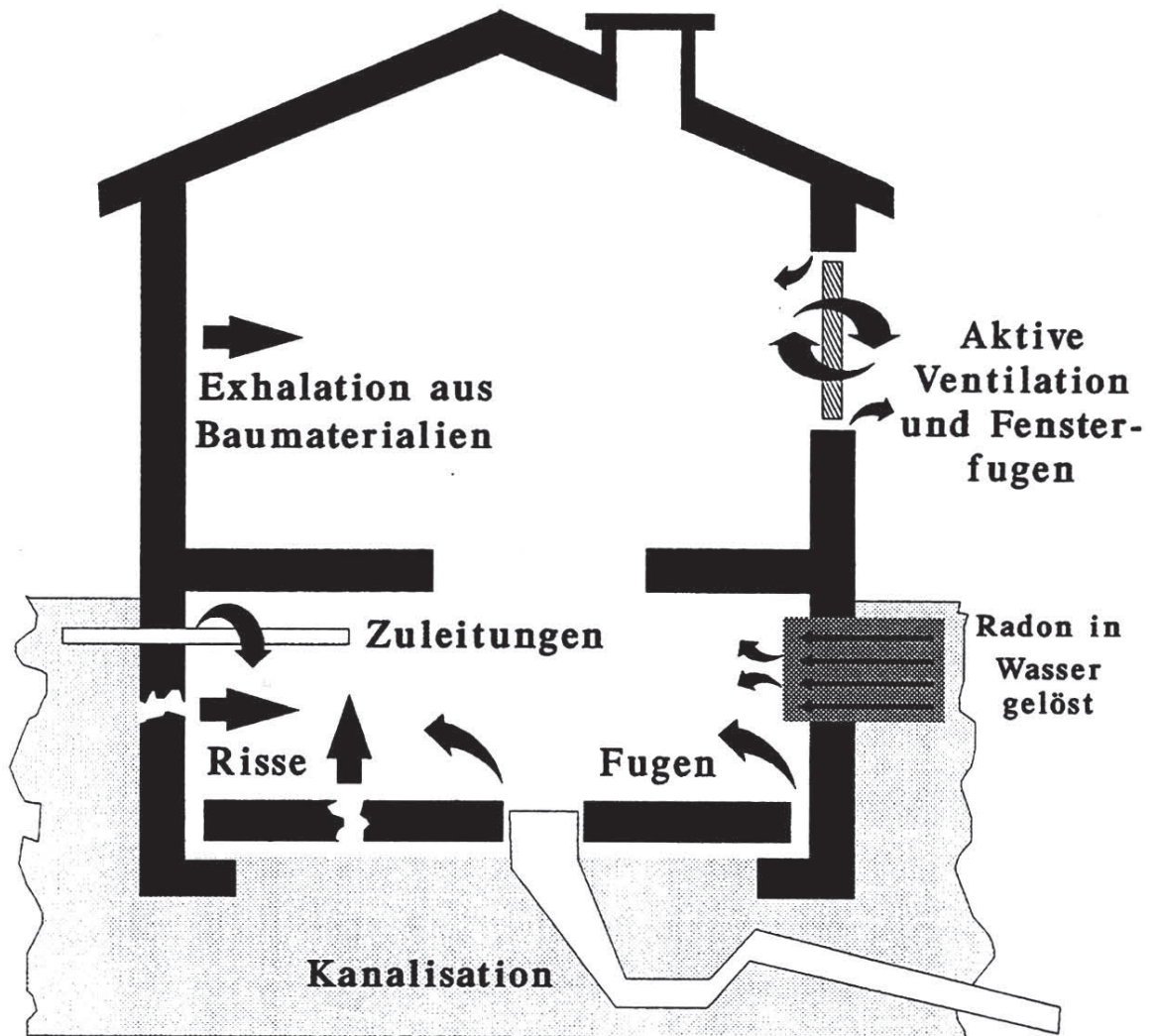


Abb. 1 Mögliche Eintrittspforten für Radonisotope in den Innenraum, sowie Quellen- und Senkensituation.

Probe Nr.	Bezeichnung (Ort)	Th-234 + Bq/kg	Pb-214 + Bq/kg	Bi-214 + Bq/kg	U-238 als Th-234 + ppm	Ac-228 * Bq/kg	Bi-212 * Bq/kg	Th-232 als Ac-228 * ppm	K-40 Bq/kg	Kalium ppm
01	Kalksand Amberg (Obpf.)	124	65	57	10	101	63	25	1461	31210
02	Lehm Rötze (Obpf.)	115	41	37	10	54	39	13	651	13910
03	Lehm Freising	160	49	47	13	62	40	15	861	18390
04	Quarz-Sand Hirschau (Obpf.)	44	21	22	4	30	18	7	576	12300
05	Kies Freising	59	29	23	5	4	3	1	163	3480
06	Ziegel Freising	78	66	55	6	49	35	12	611	13050
07	Knorpel-Gips Rohrdorf	61	21	18	5	6	3	2	255	5450
08	Rea-Gips Zolling	21	5	5	2	2	1	1	16	342
09	Kalkgemisch Rohrdorf	76	27	23	6	17	12	4	276	5900
10	Hüttensand Zolling	197	43	81	16	40	29	10	242	5170
11	Sand Bruck (Obpf.)	46	17	13	4	18	12	4	1045	22320

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

Probe Nr.	Bezeichnung (Ort)	Schüttdichte $[g/cm^3]$	$\frac{ppm_U}{ppm_{Th}}$	Radiogenet. Gleichgewicht [%] bzgl.	
				Rn-222/Folgeprod.	Rn-220/Folgeprod.
01	Kalksand Amberg (Obpf.)	1,46	0,4	50	60
02	Lehm Rötze (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:  $[^{214}Pb]$  Blei und  $[^{214}Bi]$  Wismut in der  $(4n+2)$ - und  $[^{212}Pb]$  Blei in der  $(4n)$ -Reihe; bemerkenswert ist, daß das kürzerlebige Radonisotop der  $(4n)$ -Reihe  $[^{220}Rn]$  Radon ( $T_{1/2} = 55$  s) geringere simultane Austrittschancen aus der Matrix hat als  $[^{222}Rn]$  Radon ( $T_{1/2} = 3,8$  d),  $(4n+2)$  [17].



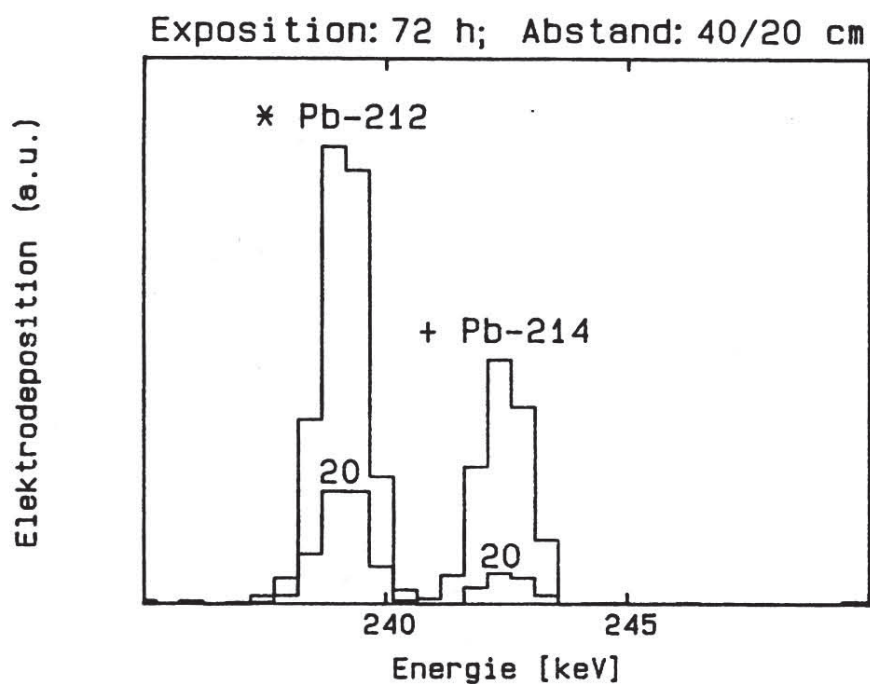


Abb. 4 Kathodische Elektrodeposition ausgewählter Folgeprodukte von  $[^{220,222}\text{Rn}]$ Radon der  $(4n+2)$ - und  $(4n)$ -Zerfallsreihe ( $[^{214}\text{Pb}]$ Blei/ $[^{214}\text{Bi}]$ Wismut,  $[^{212}\text{Pb}]$ Blei) in unterschiedlichen Abständen von einer exhaliierenden Gipskartonwand (vgl. Text) [18].

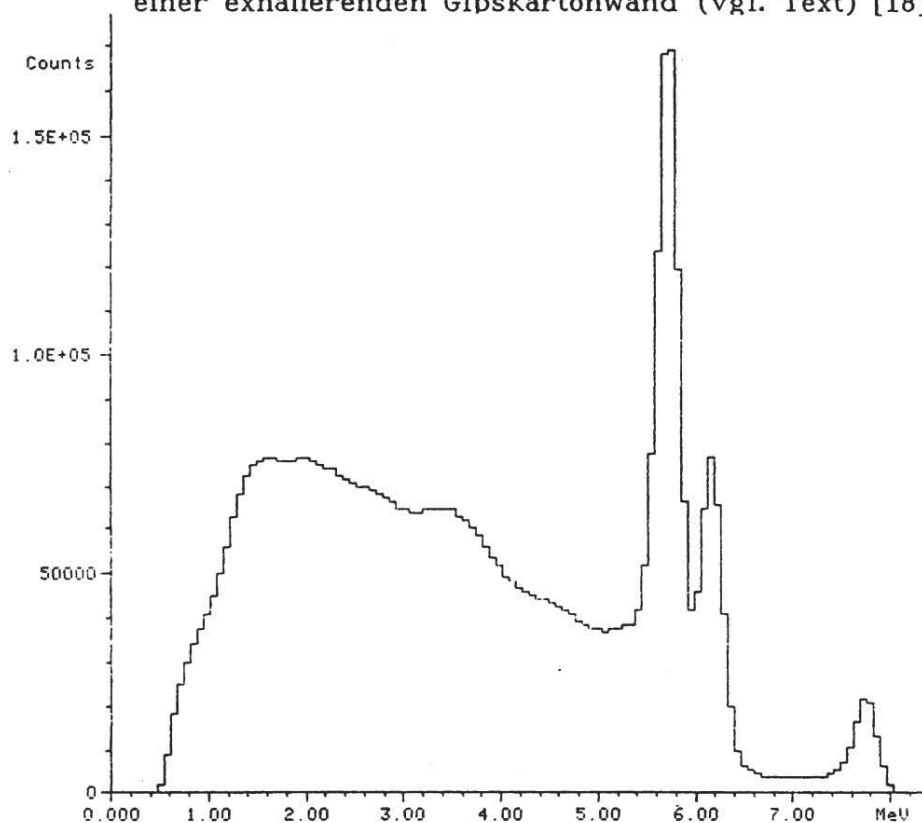


Abb. 5 Alphaspektrum von Innenraumluft (Kelleruntersuchungsraum: Bungalow Baujahr 1978, München Obermenzing) aufgenommen mit aktiv ansaugender Gitterionisationkammer (Atmos 12D, Start 26.04.92,  $t_{\text{sammel}} = 73$  Meßtage,  $V_{\text{sammel}} = 105 \text{ m}^3$ ). Indizierbar (vgl. Text) sind (v.l.n.r.) die Alphaemittoren ( $(4n+2)$ -Reihe):  $[^{222}\text{Rn}]$ Radon,  $[^{218}\text{Po}]$  und  $[^{214}\text{Po}]$ Polonium [19].

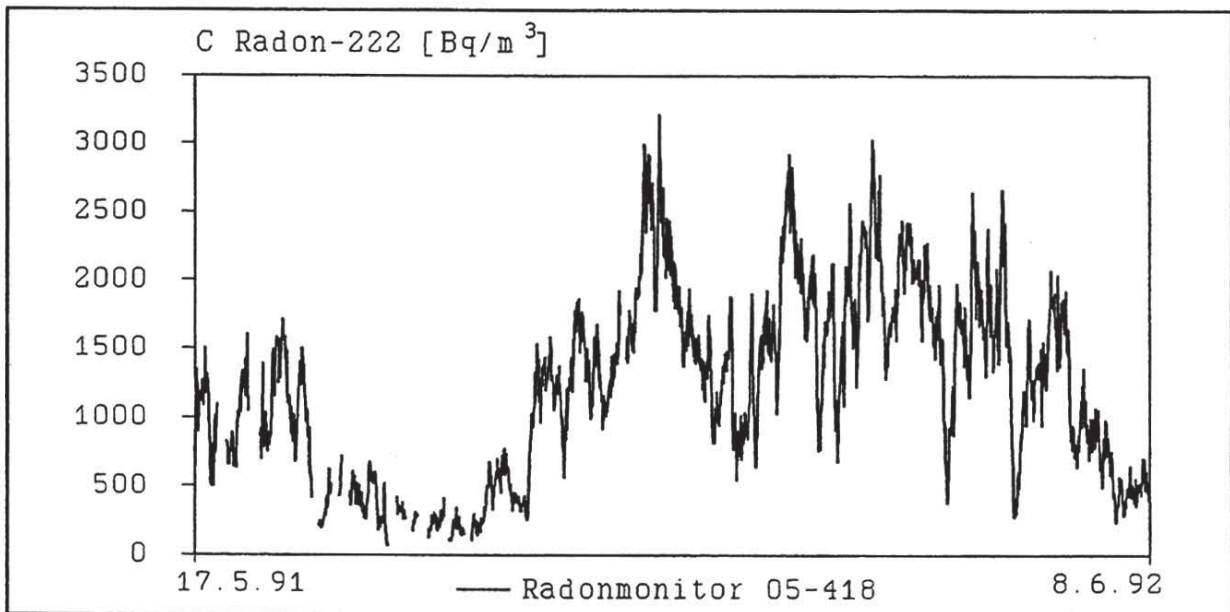


Abb. 6 Aufzeichnung eines Münchener Radonjahrs (Kelleruntersuchungsraum vgl. Abb.5) bei geschlossenen Fenstern mit Hilfe der passiven Alpha-Oberflächensperrschichtspektrometrie (Radon-Monitor 05-418, 4h-Werte) man beachte die ausgeprägte jahreszeitliche Saisonalität (die Unterbrechungen der Zeitreihe gehen auf insgesamt 9, ein- bis dreitägige Lüftungsexperimente zurück) [19].

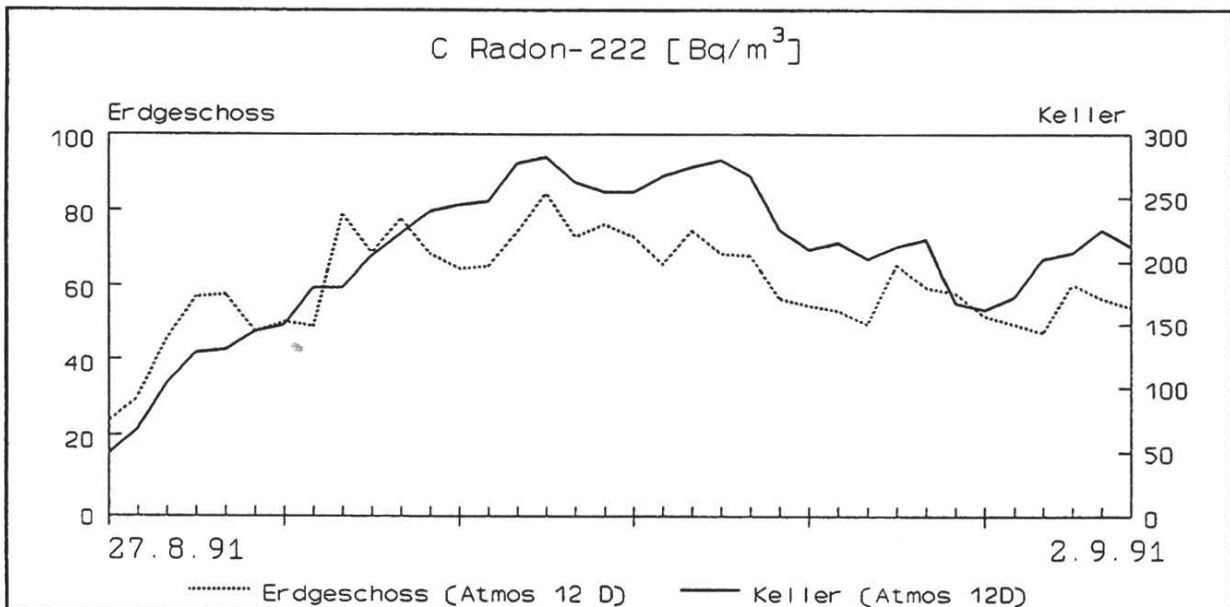


Abb. 7 Simultanaufzeichnung des Radonpegels im Quellraum (Keller) und im unmittelbar darüberliegenden Wohnzimmer, mittels zweier Gitterionisationskammern (Atmos 12D; dem Experiment ging eine eintägige Lüftung beider Räume voraus) [19].

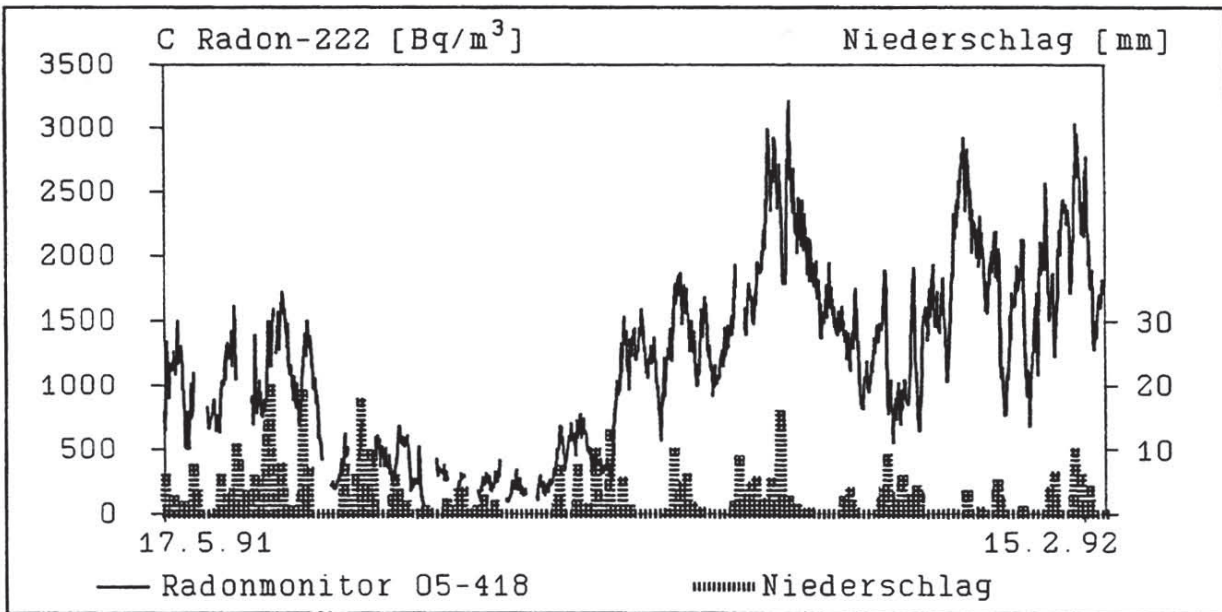


Abb. 8 Die Vernässung der nach außen begrenzenden Kellerwand im Untersuchungsraum deutet auf einen Einfluß von Eintrag wassergelösten Radons hin. Eine Gegenüberstellung der Daten, des im Abstand 2 km vom Untersuchungsort gelegenen Regensammlers der Station Nymphenburg des Münchener Wetteramtes (dreifache Probennahme/Tag), zeigt Korrelation zum Radonpegel im Keller [19].

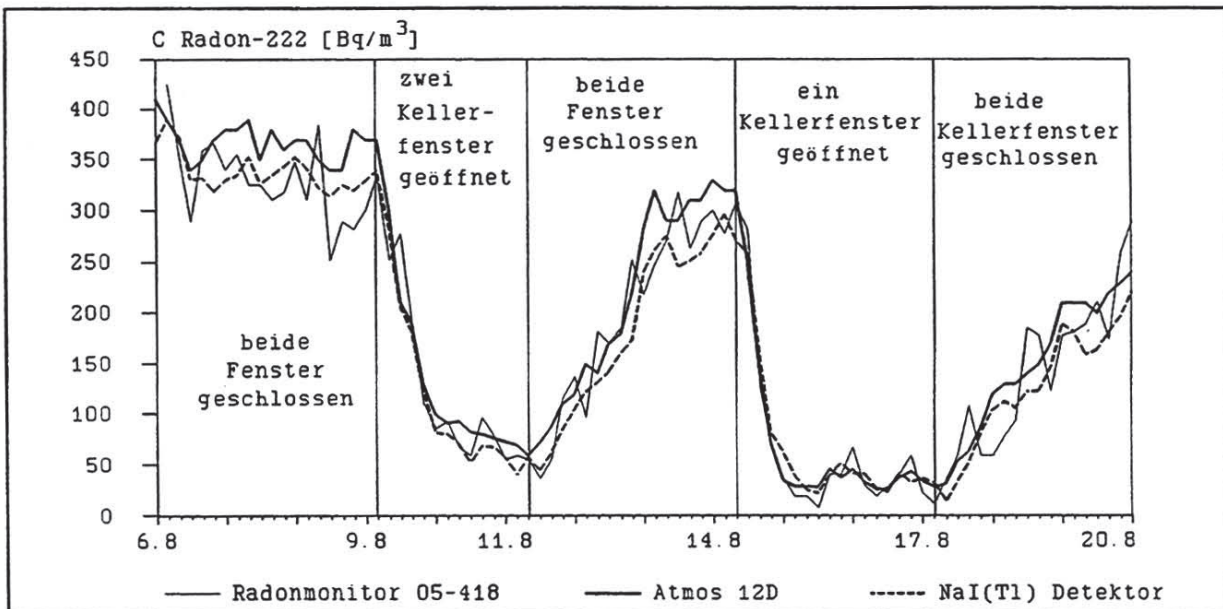


Abb. 9 Lüftungsexperimente zur Expositionsreduktion im Kellerraum während Niederpegelsituation (Sommer 91, vgl. Abb. 6) [19].

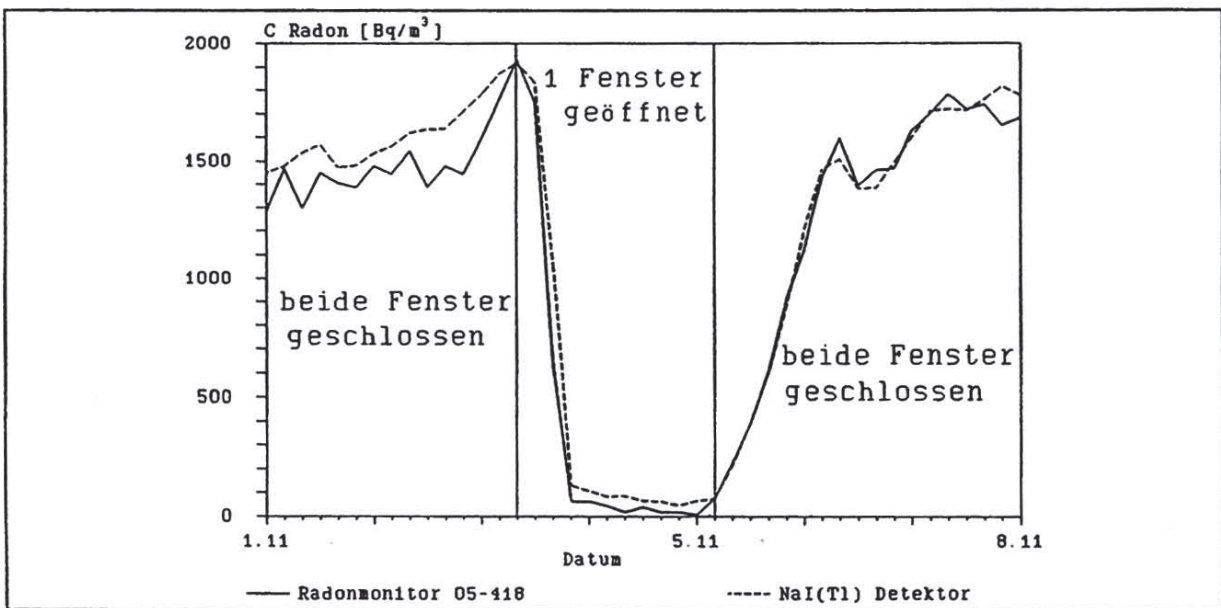


Abb.10 Lüftungsexperimente zur Expositionsreduktion im Kellerraum während Hochpegelsituation (Winter 91, vgl. Abb. 6) [19].