

Die Strahlenbelastung der Bevölkerung von Badgastein, Österreich

von

Egon POHL und Johanna POHL-RÜLING

(Aus dem Forschungsinstitut Gastein der Österr. Akademie der Wissenschaften, Mitt.-Nr. 344;
Leiter: Univ.-Prof. Dr. F. Scheminzky)

The environmental radiation dose for the population of Badgastein, Austria

Synopsis: In the center of the Austrian spa Badgastein 19 thermal springs originate which supply about 5000 m³ of water with a total of 183 mCi radon per day. The water is gathered in reservoirs from which it is conveyed by a pipeline system to more than 100 hotels. On its way from the heads of the springs to the bathrooms the water loses a great part of its radon content which is delivered to the air of living, sleeping, and working rooms as well as to open air. From numerous measurements we obtained a mean radon content of 2.6 pCi/l for open air and 11 pCi/l for living, sleeping and working rooms in the center. In the other parts of the spa we found 0.8 and 5.0 pCi/l, respectively. The air in the bathrooms and the connected rooms showed mean values of 90 and 46 pCi/l for the entire village. (These values serve for the calculation of the radiation dose of the attending personal).

In previous investigations (e. g. POHL E. and J. POHL-RÜLING: Strahlentherapie, 1968) we studied the dose distribution in the organism after inhalation of radon and its decay products. This enabled us to calculate the *additional dose* due to radon incorporation in the essential organs for three typical groups of the Badgastein population. These dose rates range from 26 to 143 mrad/a for the lungs, 6 to 32 mrad/a for the kidneys, and 1.5 to 6 mrad/a for the red bone marrow and the gonades. All these values are below the maximum permissible dose rate for an individual member of the public. (To obtain the dose rates in mrem/a the given values must be multiplied by 10.)

Die zunehmende Erzeugung und Verwendung radioaktiver Substanzen und die durch die Atombomben-Versuchsexplosionen verursachte weltweite Verbreitung von künstlichen Radionukliden in der gesamten Biosphäre unseres Planeten macht die Frage nach der biologischen Wirkung auch kleinster Strahlendosen zu einem

Kernproblem des Strahlenschutzes. In den letzten zwei Jahrzehnten haben sich zahlreiche Forscher in der ganzen Welt damit beschäftigt, wobei sich zeigte, daß sich durch Tierexperimente allein keine endgültig gesicherten Aussagen für den Menschen machen lassen. So wertvoll tierexperimentelle Untersuchungen gerade auf diesem Gebiet sind, ist es doch besonders für das Studium des Einflusses langdauernder Strahleneinwirkungen notwendig, auch über Beobachtungen am Menschen zu verfügen. Nun steht die Menschheit schon seit ihrer Entstehung unter dem Einfluß natürlicher Quellen ionisierender Strahlung, herrührend von der Kosmischen Strahlung und von der Strahlung natürlich radioaktiver Substanzen, die überall in der Erdkruste zu finden sind und durch Nahrung, Wasser und Luft auch in den menschlichen Organismus gelangen. Natürlich radioaktive Nuklide treten aber in einzelnen Gebieten unserer Erde in erhöhtem Maße auf, so daß die Bewohner dieser Gebiete auch eine über dem Durchschnitt liegende natürliche Strahlenbelastung erhalten. Derartige Bevölkerungsgruppen erlauben es nun, etwaige Effekte kleiner, aber ständig einwirkender Strahlendosen zu studieren. Voraussetzung dazu ist aber die Berechnung der Strahlendosen bzw. Dosisleistungen, weil es nur dadurch möglich ist, zu quantitativen Aussagen und zu einem gesicherten Vergleich mit anderen Bevölkerungsgruppen zu kommen.

In Österreich kommt für derartige Untersuchungen die etwa 6500 Einwohner zählende Bevölkerung *Badgasteins* in Frage, weil sie infolge der radonhaltigen Therme des Kurortes unter dem Einfluß einer zusätzlichen natürlichen Strahlenquelle steht. Zwar gibt es bisher keine statistisch gesicherten Hinweise über medizinische Besonderheiten der Bevölkerung, doch wäre es immerhin denkbar, daß systematische Untersuchungsreihen solche aufdecken könnten. Bisher fehlten jedoch — obwohl die Radioaktivität der Therme und der Luft des Ortes seit mehr als 60 Jahren bekannt ist — alle quantitativen Angaben über die Strahlendosen, welche ein Einwohner Badgasteins aufgrund des besonderen radioaktiven Milieus erhält. Die Verfasser konnten in den letzten Jahren durch Untersuchungen an Mensch und Tier die Dosisverteilung im menschlichen Organismus bei der Inkorporation des Radon berechnen und haben außerdem durch zahlreiche Meßreihen die Radioaktivität im Bereich des Kurortes studiert. Sie sind deshalb erstmals in der Lage, mit der vorliegenden Arbeit eine Abschätzung der Strahlendosen für verschiedene Gruppen der Gasteiner Bevölkerung vorzulegen.

Badgastein, dessen Häuser sich hufeisenförmig um eine enge Talstufe eines südlichen Nebentales der Salzach schmiegen, liegt auf dem Zentralgneis der Hohen Tauern. Die Gesteine dieses Gebietes zeigen — mit einer einzigen Ausnahme — einen Uran-Radium- und Thoriumgehalt, der für das Urgestein typisch ist (EXNER und POHL 1949). Die Besonderheit Badgasteins liegt darin, daß mitten im Ort 19 Thermalquellen mit einer Gesamtschüttung von mehr als 5 Millionen Liter pro Tag entspringen, deren Wasserspende zum Teil direkt, zum Großteil aber in Sammel- und Speicherbehältern erfaßt und über ein eigenes Leitungssystem mehr als 100 Kurhäusern und Hotels zugeführt wird. Dieses bis zu 46,6° C warme Thermal-

wasser enthält das radioaktive Edelgas Radon¹, das mit einer Halbwertszeit von 3,825 Tagen in eine Anzahl ebenfalls radioaktiver, aber kurzlebiger Tochtersubstanzen (RaA, RaB, RaC und RaC') zerfällt².

Die besondere Bedeutung des Radon besteht darin, daß es sehr leicht aus dem Wasser entweicht und in die Luft übergeht, mit der es samt seinen Zerfallsprodukten bei der Atmung inkorporiert wird. In allen Häusern Badgasteins und selbst im Freien innerhalb des Ortsgebietes ist der Radongehalt der Luft wesentlich höher als in anderen Gebieten. Das Gleiche gilt — wenn auch in geringerem Maße — für den Schwesterkurort *Bad Hofgastein*, in dem ebenfalls durch ein gemeindeeigenes Leitungsnetz Thermalwasser in zahlreiche Hotels und Kurhäuser geleitet wird.

Beim *Thermalbad* kann Radon auch durch die Haut des Badenden inkorporiert werden. Für die gesamte Strahlenbelastung der Bevölkerung spielt die direkte Aufnahme des Radon durch die Haut während des Bades jedoch, wie im folgenden noch gezeigt werden wird, nur eine untergeordnete Rolle. Das Gleiche gilt für die von anderen radioaktiven Nukliden (z. B. Thoron und seine Folgeprodukte) verursachte Bestrahlung. Die bei weitem wichtigste Komponente des radioaktiven Milieus von Badgastein ist der Gehalt der Luft an Radon und seinen Zerfallsprodukten.

I. Der Gehalt an Radionukliden in der Biosphäre von Badgastein

I. 1. Der Radongehalt des Wassers

Die 19 Thermalquellen Badgasteins weisen bei sehr ähnlicher chemischer Zusammensetzung große Unterschiede in ihrer Schüttung (vom kleinen Rinnsal bis zu 2450 m³/Tag) und in ihren Radongehalt auf (von 0,6 bis 123 nCi/l). Die 4,6 Millionen Liter Wasser, welche alle genutzten Quellen pro Tag liefern, enthalten insgesamt 183 mCi Radon, was einen mittleren Gehalt von 40 nCi/l ergäbe. Ein erheblicher Teil des Radon tritt bereits bei der Fassung der Quellen in die Luft der Umgebung über, ein anderer Teil entweicht in den Sammel- und Speicherbehältern. Nur einige Kurhäuser erhalten das Wasser direkt aus einer Quelle. Einige Thermalquellen fließen wegen zu geringer Schüttung oder zu geringer Temperatur ungenutzt in die Ache ab. Das Wasser der gemeindeeigenen Quellen (I, II, III, IV, Überschußwasser von V, VI, VII, IX³, XII, Austritt 4 von XIII u. XVI) wird zunächst in einem zentralen Behälter gesammelt, von dort durch Pumpaggregate zu drei Hochbehältern gefördert und dann durch ein ausgedehntes Leitungsnetz den einzelnen Kurhäusern zugeführt. Tabelle 1 zeigt den Radongehalt des Thermalwassers in verschiedenen Kurhäusern unmittelbar am Einlauf in die Badewanne. Vergleicht man die Werte der Tabelle mit der berechneten mittleren Radonkonzentration

¹ Radon 222, im folgenden immer kurz „Radon (Rn)“ genannt, während das Radonisotop 220 „Thoron (Tn)“ genannt wird.

² Vergleiche dazu Tabelle 1 bei T. MÁRK (1969, p. 72).

³ Aus dieser Quelle werden täglich 0,95 Millionen Liter Thermalwasser nach Bad Hofgastein, welches keine eigenen Thermalquellen besitzt, geleitet.

Tab. 1: Der Radon-Gehalt des Thermalwassers in einigen Kurhäusern Badgasteins, des Trinkwassers und des Wassers der Gasteiner Ache (Mittelwerte aus zahlreichen Einzelmessungen)

Ort der Entnahme	Herkunft des Wassers	Rn-Gehalt in nCi/l
Lainerhaus	Quelle V, privat	15,6
Grabenbäcker	Quelle XIV, privat	46,8
Badehospiz	Sammelwasser der Gemeinde	12,4
Kurhäuser im Ortszentrum	Sammelwasser der Gemeinde	15,1
Kurhäuser am Ende des Leitungssystems	Sammelwasser der Gemeinde	13,2
Mittelwert aus allen mit Sammelwasser versorgten Kurhäusern	Sammelwasser der Gemeinde	13,6
Trinkwasser aus Ortsnetz oberhalb des Wasserfalls	5 Einzelquellen Gasteiner Ache	0,6 0,035

tration des genützten Thermalwassers, sieht man, daß über 65% des gesamten Radon auf dem Weg von der Quelle bis zum Verbraucher aus dem Wasser entweicht. Dieses Radon dürfte in erster Linie für den erhöhten Rn-Gehalt der Freiluft Badgasteins verantwortlich sein. Beim Badebetrieb in den Kurhäusern entweicht weiteres Radon, das sich vor allem in der Raumluft der Kurhäuser wiederfindet. Die Tabelle zeigt, daß, abgesehen von den Kurhäusern, welche durch Einzelquellen beliefert werden, der Radongehalt des Wassers in den übrigen Häusern nur geringe Unterschiede aufweist. Es ist allerdings zu beachten, daß das in die Häuser eingeleitete Thermalwasser eine umso ergiebigerer Emanationsquelle darstellt, je größer die Zahl der verabreichten Bäder ist. Auch die Größe der Badewannen (im Badehospiz und in einigen anderen Kurhäusern 600 l, sonst gewöhnlich 350 l) spielt eine Rolle.

Das *Trinkwasser* weist in Badgastein einen Radongehalt von 0,6 nCi/l auf (Mittelwert aus zahlreichen Einzelmessungen an verschiedenen Stellen des Ortsnetzes), da die fünf das Trinkwasser liefernden Quellen an ihrem Ursprung Rn-Gehalte von 0,2 bis 3,6 nCi/l aufweisen.

I. 2. Der Radongehalt der Luft in Badgastein

Im Gegensatz zum Rn-Gehalt des Wassers unterliegt der Rn-Gehalt der Luft großen zeitlichen und örtlichen Schwankungen. Diese sind durch die verschiedenen Witterungseinflüsse wie horizontale und vertikale Luftströmungen (Winde, Konvektionsströmungen, hervorgerufen durch den jeweiligen Temperaturgradienten), Niederschlagstätigkeit und Luftdruckschwankungen bedingt. Der Radongehalt der Luft in den Aufenthaltsräumen wird außerdem von der Art und Häufigkeit der Lüftung abhängen, welche wiederum je nach Witterung verschieden stark sein kann.

Um für einen bestimmten Ort einen zuverlässigen Mittelwert zu finden, sind zahlreiche Einzelmessungen, welche sich über einen längeren Zeitraum mit verschiedenem Wetter erstrecken sollen, erforderlich. Wir haben in den letzten Jahren den Rn-Gehalt der Luft in Badgastein in vielen hundert Einzelmessungen untersucht. Aus diesen Einzelwerten wurden für die Freiluft und für verschiedene Aufenthaltsräume in Badgastein Mittelwerte berechnet, die für die betreffenden Orte als repräsentativ gelten können.

Die Radonkonzentrationen der Luft sind im allgemeinen im Ortszentrum etwas höher als im übrigen Ortsgebiet. Wir bezeichnen im folgenden mit „Zone I“ ein etwa 6,5 ha großes Gebiet im Zentrum des Ortes, in dem praktisch alle Thermalquellen liegen⁴.

Unter „Zone II“ ist das gesamte übrige zusammenhängend verbaute Gebiet einschließlich Badbruck zu verstehen, jedoch ohne die isoliert liegenden Ortsteile Bökkstein und Kötschachdorf. Innerhalb der Zone II konnten wir keine signifikanten Unterschiede im Radongehalt zwischen den verschiedenen Ortsteilen feststellen. Die Tabelle 2

Tab. 2: Der Radongehalt der Luft im Freien und in Aufenthaltsräumen in Badgastein (Mittelwerte aus zahlreichen Einzelmessungen)

	Ort	Rn-Gehalt in pCi/l
Zone I	Freiluft	2,6
	Aufenthaltsräume in Kurhäusern	11
	Schlafräume in Kurhäusern	11
	Öffentliche Räume (Kur- und Lesesaal, Geschäfte, Post)	8
	Büroräume in Kurverwaltung und Gemeindeamt	14
	Vorräume der Thermalbäder (bei Badebetrieb)	46
	Badekabinen (während des Badebetriebes)	90
Zone II	Freiluft	0,8
	Aufenthalts- und Schlafräume in Kurhäusern mit Thermalbädern	5,0
	Aufenthalts- und Schlafräume in Kurhäusern ohne Thermalbäder	5,0
	Vorräume der Thermalbäder (bei Badebetrieb)	40
	Badekabinen (während des Badebetriebes)	86
Badehauspiz	Aufenthalts- und Ordinationsräume	5,5
	Schlafräume	6,5
	Halle der Unterwasser-Therapiestation	32
	Vorräume der Thermalbäder (bei Badebetrieb)	85
	Badekabinen: bei Beginn des Badebetriebes	60
	am Ende des Badebetriebes	150
Mittelwert während des Badebetriebes	100	

⁴ Dieses Gebiet wird im Süden durch den Berghang hinter dem Parkplatz Austria und dem Hotel Elisabethpark, im Westen durch die Bökksteinerstraße und im Norden durch eine Linie begrenzt, die vom Hotel Europe hinunterführt zum Grabenbäcker Kurhaus und von dort die andere Talseite wieder bis zum Gasteiner Hof hinaufsteigt. Im Osten umfaßt dieses Gebiet noch die am Badberg liegenden Häuser.

zeigt die berechneten Mittelwerte getrennt für Zone I und Zone II, außerdem sind in ihr noch die Werte für verschiedene Räume des Badehospizes angeführt, in dem rund 190 Patienten behandelt werden und zahlreiches wissenschaftliches und technisches Personal beschäftigt ist.

Aus dieser Tabelle lassen sich folgende für unser Problem wichtige Ergebnisse ablesen. Der Rn-Gehalt der Freiluft ist im Ortszentrum etwa dreimal so groß wie im übrigen Ortsgebiet, wo er aber immer noch wesentlich über dem Durchschnitt liegt (0,1–0,2 pCi/l über dem Festland). Auch die Aufenthalts- und Schlafräume der untersuchten Kurhäuser sowie Räume in Gebäuden ohne eingeleitetes Thermalwasser zeigen im Ortszentrum erhöhte Radonkonzentrationen. Es ist dies offensichtlich der Radonexhalation des das Quellgebiet umfassenden Berghanges zuzuschreiben. In der Zone II zeigt der Radongehalt der Raumluft nur etwa halb so hohe Werte, wobei wir keinen statistisch gesicherten Unterschied zwischen Kurhäusern mit und ohne Thermalwasseranschluß (bzw. Badebetrieb) feststellen konnten. Der mittlere Radongehalt der Raumluft von 5 pCi/l liegt bereits an der oberen Grenze des Bereiches, der auch in Gebäuden in Gegenden ohne besonderes radioaktives Milieu gefunden wurde (HULTQUIST 1956).

Die Luft in den Vorräumen der Thermalbäder und in den Badekabinen zeigte aber in beiden Zonen gleich hohe Werte, was durch die gleiche Radonkonzentration des Thermalwassers verständlich ist. In den entsprechenden Räumen des Badehospizes lagen die Mittelwerte etwas höher, weil dort die Zahl der täglich verabreichten Thermalbäder größer ist als in jedem anderen Kurhaus Badgasteins.

I. 3. Der Gehalt der Luft an den Zerfallsprodukten des Radon.

Für die Strahlenbelastung bei der Inhalation radonhaltiger Luft ist nicht nur ihr Rn-Gehalt, sondern auch ihr Gehalt an Zerfallsprodukten von Bedeutung. Die beim Zerfall des Radon entstehenden kurzlebigen Zerfallsprodukte RaA bis RaC-C' lagern sich zum Großteil an das jeweils vorhandene Aerosol an und können Konzentrationen bis zur Höhe ihres Gleichgewichtswertes zum Radon erreichen (unter besonderen Umständen auch höhere). In der Regel liegt der Gehalt der Zerfallsprodukte jedoch unterhalb des Gleichgewichtswertes, weil durch Strömung und Diffusion ein Teil der Zerfallsprodukte sich an die festen Oberflächen der Umwelt anlagert (bei der Freiluft kommt dazu noch das Auswaschen durch Niederschläge).

Die Messung der Zerfallsprodukte in der Luft erfolgt durch Abfiltern mit geeigneten Filtern und erfordert eine sorgfältige Analyse der Zerfallskurve der Filteraktivität. Die von den Verfassern benützte Meßtechnik ist ebenso wie die Messung des Radon selbst ausführlich bei POHL (1965) beschrieben.

Der Gehalt an Zerfallsprodukten geht nicht konform mit dem Radongehalt, sondern es zeigt das Verhältnis Radon : Zerfallsprodukte große Schwankungen, die

durch die Art und den zeitlichen Verlauf der *Radonnachlieferung* einerseits und durch den Mechanismus der *Ausscheidung* der Zerfallsprodukte aus der Luft andererseits bedingt sind. Wir haben zahlreiche Messungen des Zerfallsproduktverhältnisses in Badgastein vorgenommen und bringen in Tabelle 3 eine Zusammenstellung von Mittelwerten, welche im folgenden für die Berechnung der Strahlendosen gebraucht werden. Dazu sei jedoch bemerkt, daß diese Mittelwerte weniger signifikant als die in der Tabelle 2 angeführten Mittelwerte des Radongehaltes sind, weil der Zerfallsproduktegehalt zu sehr von örtlich bedingten Verhältnissen wie z. B. Größe der Räume, Lüftungsverhältnis, Luftfeuchtigkeit usw. beeinflusst wird.

Tab. 3: Mittelwerte des Verhältnisses Rn : RaA : RaB : RaC in der Luft. Für die Freiluft kann nur das Verhältnis Rn : RaB angegeben werden.

Meßort	Rn : RaA : RaB : RaC
Badezimmer und Vorräume	1 : 0,8 : 0,4 : 0,3
Aufenthalts- und Schlafräume	1 : 0,6 : 0,3 : 0,15
Unterwassertherapieraum (Badehospiz)	1 : 0,8 : 0,2 : 0,1
Freiluft 1,5 m über Gras	1 : x : 0,6 : x

I. 4. Der Gehalt der Luft an Thoron und seinen Zerfallsprodukten

In den Jahren 1967 und 1968 wurde erstmalig in Badgastein auch der Gehalt der Luft an Thoron untersucht, der kurzlebigen Schwestersubstanz des Radon. Wegen seiner kurzen Halbwertszeit (54,5 s) bereitet der direkte Nachweis dieses Nuklids große experimentelle Schwierigkeiten, vor allem, wenn es sich um den Nachweis kleiner Thoron-Aktivitäten bei Gegenwart eines sehr viel höheren Rn-Gehaltes handelt. Gerade dies ist aber in Badgastein an vielen Orten der Fall. Im Rahmen seiner Dissertationsarbeit entwickelte T. MARK am Isotopenlabor des Physiologischen Institutes der Universität Innsbruck in den Jahren 1966—67 für diesen Zweck eine neue Apparatur nach dem Doppelfilterprinzip, mit deren Hilfe es möglich ist, gleichzeitig den Gehalt der Luft an Radon, Thoron, RaB und ThB festzustellen (MARK 1968, 1969).

Bisher wurden in verschiedenen Quell- und Bergwerkstollen, in der Unterwasser-Therapiestation des Badehospizes und im Freien Untersuchungen durchgeführt. Der mittlere Thorongehalt im Freien betrug 0,56 pCi/l bei einem ThB-Gehalt von 0,0024 pCi/l, während in der Halle der Unterwasser-Therapiestation die Luft im Mittel 15 pCi Thoron und 0,018 pCi ThB pro Liter enthielt. Dieser relativ hohe Tn-Gehalt kann nur aus dem Thermalwasser stammen, das dem Therapiebecken während des Betriebes ständig zugeführt wird. Die lebhafteste Bewegung des Wassers im Becken sorgt außerdem für eine gute Entemanierung.

In Schlaf- und Aufenthaltsräumen konnten noch keine Messungen vorgenommen werden, doch wird man hier mit Werten rechnen müssen, die zwischen den oben angeführten liegen.

I. 5. Andere Strahlenquellen in Badgastein

Es wurde schon erwähnt, daß der Boden und die im Ortsbereich anstehenden Gesteine einen Gehalt an natürlich radioaktiven Nukliden aufweisen, der außer an einigen engumgrenzten Stellen nicht über dem Durchschnitt liegt. Die vom Boden und vom Baumaterial der Häuser ausgehende γ -Strahlung ist deshalb nicht höher als an anderen Orten mit gleichem geologischen Untergrund.

Die Seehöhe von rund 1000 m bedingt einen geringfügigen Anstieg der Intensität der Kosmischen Strahlung.

An sonstigen Strahlenquellen wäre nur noch der Gehalt des Trinkwassers an Ra 226 zu erwähnen, der im Mittel rund 6 pCi/l beträgt, das sind nur 6% der maximal zulässigen Ra-Konzentration im Trinkwasser (100 pCi/l entsprechend den Empfehlungen der Internationalen Kommission für Strahlenschutz).

II. Berechnung der Strahlendosen

II. 1. Die Strahlendosis durch die externe Bestrahlung

Unter externer Bestrahlung versteht man die Bestrahlung durch die gesamte durchdringende Strahlung, welche sich aus der Kosmischen Strahlung und der γ -Strahlung, die von den Radionukliden der Umgebung herrührt, zusammensetzt. Da der Boden, die Gesteine und das Baumaterial der Häuser in Badgastein keine überdurchschnittliche Radioaktivität zeigen, könnte eine erhöhte externe Bestrahlung nur von den ebenfalls γ -strahlenden Zerfallsprodukten des Radon herrühren, die sich sowohl in der Luft als auch an den festen Oberflächen der Umgebung befinden. Messungen mit Ionisationskammern in Badgastein zeigten jedoch gegenüber Vergleichsmessungen in Innsbruck nur geringfügig erhöhte Werte. Auch Taschendosimeter, die verschiedene Versuchspersonen über viele Wochen mit sich trugen, zeigten nur unwesentlich höhere Werte als Vergleichsmessungen in Innsbruck. Leider verfügten wir nicht über geeichte Präzisions-Dosimeter, um die Umgebungsstrahlung an den verschiedenen Orten exakt messen zu können.

Die erwähnten Untersuchungen erlauben jedoch unter Berücksichtigung der Seehöhe die Jahresdosis bei einem Aufenthalt in Badgastein wie folgt abzuschätzen:

Mittelwert der *externen Bestrahlung*

(Ganzkörperbestrahlung) bei ständigem Aufenthalt in Badgastein: $130 \text{ mrad/a} = 130 \text{ mrem/a}$.

Dieser Wert liegt noch innerhalb des Bereiches, der in Orten ohne besonderes radioaktives Milieu gefunden wurde (70–130 mrad/a).

II. 2. Die Strahlendosis bei der Inhalation von Radon, Thoron und deren Zerfallsprodukten

Bei der Inkorporation von Radionukliden ist die Berechnung der Strahlendosis wesentlich schwieriger als bei einer externen Strahlenquelle. Die inkorporierten Nuklide nehmen nämlich im allgemeinen am Stoffwechsel teil und werden oft in den verschiedenen Organen und Geweben des Organismus in sehr unterschiedlichen Konzentrationen abgelagert. Die Strahlenbelastung kann nicht durch einen einzigen Wert wie bei der Ganzkörperbestrahlung angegeben werden, sondern sie ist für jedes Organ einzeln zu berechnen. Im Fall der Inhalation radon- und thoronhaltiger Luft handelt es sich um einen besonders komplizierten Vorgang. Während die gasförmige Komponente durch das Blut relativ gleichmäßig verteilt wird, werden die gleichzeitig in der Luft befindlichen festen Zerfallsprodukte im Atemtrakt abgefiltert und akkumuliert. Die Verfasser konnten in den letzten Jahren durch eingehende Untersuchungen an Mensch und Tier zeigen, daß die im Atemtrakt abgefilterten Zerfallsprodukte teils durch Verschlucken über den Magen-Darm-Trakt, zum Großteil aber durch direkte Resorption in der Lunge in den Blutkreislauf gelangen. Sie werden in alle übrigen Organe des Körpers transportiert und nehmen dort lebhaft am Stoffwechsel teil, was zu einer sehr unterschiedlichen Konzentration in den einzelnen Organen führt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden in mehreren Arbeiten niedergelegt (POHL 1964, 1965, POHL und POHL-RÜLING 1967, 1968 und PLATTNER 1967, 1968) und gestatten es erstmals, die Strahlendosen der einzelnen Organe auch beim Menschen zu berechnen.

Bei andauernder Inhalation der gleichen Luftaktivität stellt sich bei der Radoninhalation nach etwa drei Stunden, bei der Thoroninhalation erst nach 3 Tagen ein Gleichgewichtszustand ein, dem ein bestimmtes Verteilungsmuster im Organismus entspricht. Ist die Konzentration eines Radionuklides mit gegebener Strahlenart und -energie in einem Organ bekannt, kann die Dosisleistung in diesem Organ berechnet werden.

In Tabelle 4 sind die berechneten Dosisleistungen für einige wichtige Organe des Menschen zusammengestellt, welche sich nach Dauerinhalation von Luft mit einem Radon-, Thoron- oder ThB-Gehalt von 1 pCi/l einstellen. Für den Fall der Radoninhalation wurden die Werte für zwei verschiedene Verhältnisse „Radon : Zerfallsprodukte“ ausgerechnet, entsprechend den in Tabelle 3 angeführten mittleren Zerfallsprodukt-Konzentrationen in den Baderäumen einerseits und den Aufenthalts- und Schlafräumen andererseits. Hingegen kann man wegen der stark abweichenden Halbwertszeiten zwischen Thoron und ThB die Berechnung für die beiden Komponenten getrennt vornehmen, was bei Rn und seinen Zerfallsprodukten nicht möglich ist.

Allen Berechnungen wurde ein Atem-Minuten-Volumen von 13,9 Liter/min (= 7300 m³/a) zugrundegelegt. Dieser Wert entspricht dem Durchschnittswert für

Tab. 4: Die Dosisleistungen in den Organen des Menschen nach Dauerinhalation für ein mittleres Atemminutenvolumen von 13,9 l/min (= 7300 m³/a)

Organ oder Gewebe	Die Luft enthalte 1 pCi/Liter an:			
	Rn u. Zerfallspr. im Verh.:		Tn-ThA, ohne	ThB-ThC''
	1 : 0,8 : 0,4 : 0,3	1 : 0,6 : 0,3 : 0,15	ThB-ThC''	(im Gleichg.)
	$\mu\text{rad/h}$	$\mu\text{rad/h}$	$\mu\text{rad/h}$	$\mu\text{rad/h}$
Lunge (Alveolargewebe)	0,83	0,59	0,050	22,0
Blut ⁵	0,085	0,063	0,0078	4,0
Leber	0,054	0,040	0,0015	2,5
Niere	0,186	0,129	0,0028	6,0
Nebenniere	0,052	0,046	0,0012	0,60
Muskulatur	0,019	0,017	0,00014	0,115
Knochen	0,016	0,012	0,0009	0,75
Knochenmark	0,031	0,026	0,0012	1,75
Gonaden	0,025	0,023	0,00023	0,10

den 24-Stunden-Tag, wie er von der Internationalen Kommission für Strahlenschutz für derartige Berechnungen empfohlen wird.⁶

Multipliziert man die Zahlenwerte der Tabelle 5 mit der jeweils vorhandenen Konzentration in der Luft und mit der Aufenthaltsdauer, erhält man direkt die Strahlendosen für das betreffende Organ.

Diese Rechnung stimmt streng aber nur für konstante Luftaktivität während einer Aufenthaltsdauer, die groß ist im Vergleich zu den oben angeführten Zeiten zur Erreichung des radioaktiven Gleichgewichtes. Betritt z. B. ein Mensch — aus einem radonfreien Milieu kommend — einen Raum mit bestimmter, konstanter Rn-Konzentration, so nimmt in den ersten drei Stunden die Dosisleistung in seinen Organen von Null bis zu dem konstanten Wert für Dauerinhalation zu. Nach Verlassen des radonhaltigen Raumes sinkt die Dosisleistung innerhalb drei Stunden durch die Ausscheidung des Radon und den Zerfall seiner Tochter-substanzen wieder auf Null ab. Die Strahlenbelastung in den Organen ist also in den ersten drei Stunden geringer als bei Dauerinhalation, dafür dauert sie aber auch nach Ende der

⁵ Beim Blut rührt die Strahlenbelastung nicht nur von den in ihm enthaltenen Radionukliden her, sondern es kommt beim Fließen des Blutes durch die Lunge zu einer zusätzlichen Bestrahlung durch die in den Alveolen abgelagerten, aber nicht resorbierten Zerfallsprodukte (vgl. POHL 1962 u. 1965).

⁶ Die Strahlendosis durch das inkorporierte Rn ist unabhängig von der Ventilationsgröße, weil sich auf alle Fälle das gleiche Löslichkeitsgleichgewicht zwischen den Rn-Konzentrationen der Körpergewebe und der Luft einstellt. Hingegen ist die gesamte akkumulierte Aktivität an Zerfallsprodukten durch die Abfilterung im Atemtrakt proportional zur Ventilationsgröße. Die Strahlendosis der Organe müßte demnach für jede Ventilationsgröße getrennt berechnet werden. Die Ventilationsgröße ist in starkem Maße von der jeweiligen körperlichen Tätigkeit, aber auch von Geschlecht und Alter abhängig. Wir rechnen deshalb im folgenden mit der angeführten durchschnittlichen Ventilationsgröße, da ihre individuelle Größe am jeweiligen Aufenthaltsort praktisch nicht erfaßbar ist. Aber selbst bei konstanter Ventilationsgröße stellen die in Tabelle 5 angeführten Dosisleistungen nur Mittelwerte dar. Die Verteilung der Zerfallsprodukte im Organismus hängt vom primären Ablagerungsort der Zerfallsprodukte im Atemtrakt ab, der wieder von Art und Korngröße des Aerosols bedingt wird. Außerdem spielen individuelle Unterschiede in Größe und Funktionstüchtigkeit der Organe, des Kreislaufes usw. eine Rolle.

Inhalation noch an. Theoretische Berechnungen zeigen, daß die geringere Dosis während des Anstieges annähernd ausgeglichen wird durch die zusätzliche Dosis nach Ende der Inhalationszeit. In erster Näherung kann man deshalb die gesamte Dosis einfach dadurch berechnen, daß man die Dosisleistung bei Dauerinhalation mit der Inhalationszeit multipliziert. Daraus geht hervor, daß auch bei dauernder Schwankung der Luftaktivität die Dosis für einen bestimmten Zeitraum dadurch berechnet werden kann, in dem für diesen Zeitraum eine mittlere, aber konstante Luftaktivität angenommen wird.

Wir können jetzt für jeden Einwohner Badgasteins die durch die Inhalation radon- und thoronhaltiger Luft verursachten Jahresdosen ausrechnen, wenn wir die Aufenthaltszeiten an den verschiedenen Orten kennen.

II. 3. Die Strahlendosis beim Thermalbad

Bei der Berechnung der Jahresdosen muß auch berücksichtigt werden, daß die Einwohner Badgasteins ebenso wie die Kurgäste im Thermalwasser baden. Beim Thermalbad wird Radon direkt aus dem Wasser durch die Haut aufgenommen, die im Wasser gelösten Zerfallsprodukte können jedoch die Epidermis nicht durchdringen (POHL 1965). Gleichzeitig mit der Aufnahme durch die Haut wird aber auch radon- und zerfallproduktthaltige Luft eingeatmet. Die Strahlendosen müssen für beide Inkorporationsarten getrennt berechnet und summiert werden. Wegen der im allgemeinen kurzen Badedauer muß der Anstieg der Aktivitäten (Gleichgewicht wird nicht erreicht!) und ihr Abfall nach Verlassen des Bades berücksichtigt werden.

In Tabelle 5 wurden die Strahlendosen für ein einmaliges Thermalbad für einige Organe des Körpers berechnet. Dabei wurde eine Badedauer von 20 Minuten und die schon angegebenen mittleren Radonkonzentrationen für das Wasser und die Luft zugrundegelegt. Selbst bei 200 Thermalbädern im Jahr ergäbe sich eine gesamte Lungenbelastung von nur 5,4 mrad pro Jahr!

Tab. 5: Die Strahlendosis im menschlichen Organismus bei einem einmaligen Gasteiner Thermalbad.

Annahme: Rn-Konzentration im Wasser	15, nCi/l
Rn-Konzentration in der Luft	90 pCi/l
Rn : RaA : RaB : RaC in der Luft	1 : 0,8 : 0,4 : 0,3
Badedauer	20 min
Lunge	0,027 mrad
Blut	0,006 mrad
Leber	0,005 mrad
Niere	0,009 mrad
Nebenniere	0,010 mrad
Muskulatur	0,004 mrad
Knochen	0,001 mrad
Knochenmark	0,005 mrad
Gonaden	0,006 mrad

II. 4. Berechnung der Jahresdosen für typische Gruppen der Bevölkerung

Die bisher erarbeiteten Grundlagen gestatten es nun, für jeden Einwohner Badgasteins die jährliche Strahlendosis abzuschätzen. Wir müssen dazu seine Aufenthaltszeiten an den verschiedenen Orten und die Anzahl seiner Thermalbäder pro Jahr kennen. Naturgemäß werden diese Daten von Fall zu Fall verschieden sein.

Wir wollen im folgenden die Jahresdosen für drei „Modellfälle“ berechnen, nämlich für einen ganzjährig beschäftigten Bademeister, einen Einwohner der Zone I und einen solchen der Zone II.

Modellperson 1:

Aus der Befragung verschiedener in Gasteiner Kurhäusern beschäftigter und im Ortszentrum wohnhafter Bademeister ergaben sich im Mittel folgende Aufenthaltszeiten:

in Badekabinen	400 h/a
in den Vorräumen dazu	2000 h/a
in Wohn- und Schlafräumen der Zone I	5100 h/a
in Aufenthaltsräumen der Zone II	200 h/a
in der Freiluft der Zone I	360 h/a
in der Freiluft der Zone II	360 h/a
außerhalb des Ortsgebietes	340 h/a
Zahl der Thermalbäder	100/a

Diese Gruppe von Personen erhält die höchste Strahlenbelastung von allen Einwohnern Badgasteins. Die übrigen beim Badebetrieb beschäftigten Personen, aber auch Bademeister in Kurhäusern mit geringerem Badebetrieb oder solche, welche außerhalb des Ortszentrums wohnen, erhalten geringere jährliche Strahlendosen.

Modellperson 2:

Angenommen wird ein Einwohner Badgasteins, der im Ortszentrum wohnt und dort beschäftigt ist. Er soll 3 Wochen Urlaub außerhalb Badgasteins verbringen. Daraus lassen sich folgende mittlere Aufenthaltszeiten abschätzen:

in Wohn-, Schlaf- und Arbeitsräumen der Zone I	7000 h/a
in Aufenthaltsräumen der Zone II	240 h/a
in der Freiluft der Zone I	360 h/a
in der Freiluft der Zone II	360 h/a
außerhalb des Ortsgebietes	800 h/a
Zahl der Thermalbäder pro Jahr	100/a

Modellperson 3:

Angenommen wird ein Einwohner Badgasteins, der in der Zone II wohnt und beschäftigt ist und das Ortszentrum nur vorübergehend aufsucht (Einkäufe, Gast-

stättenbesuch usw.). Er soll 3 Wochen Urlaub außerhalb Gasteins verbringen. Es lassen sich folgende mittlere Aufenthaltszeiten abschätzen:

in Wohn-, Schlaf- und Aufenthaltsräumen der Zone II	7100 h/a
in Aufenthaltsräumen der Zone I	250 h/a
in der Freiluft der Zone I	250 h/a
in der Freiluft der Zone II	360 h/a
außerhalb des Ortsgebietes	800 h/a
Zahl der Thermalbäder	100/a

In Tabelle 6 sind für die drei Modellpersonen die Jahresstrahlendosen in mrad berechnet, welche bei der Inhalation des Radon und seiner Zerfallsprodukte und bei den angenommenen 100 Thermalbädern pro Jahr in den verschiedenen Organen entstehen. Aus den Berechnungsgrundlagen (Tabellen 4 u. 5) sieht man, daß die 100 Thermalbäder nur einen geringen Beitrag zu den Jahresdosen liefern, so daß sich aus den sicher individuell sehr unterschiedlichen Badegewohnheiten keine großen Abweichungen ergeben. Die Strahlendosen, welche durch die Inhalation des Thoron und des ThB zusätzlich erzeugt werden, wurden in der Tabelle *nicht* berücksichtigt, da dazu die erforderlichen Meßwerte in Wohn-, Schlaf- und Aufenthaltsräumen noch fehlen. Es läßt sich jedoch abschätzen, daß dieser Beitrag gegenüber der Radoninhalation nur einige Prozent betragen wird.

Tab. 6: Die Jahresdosen in einigen Organen für typische Gruppen der Gasteiner Bevölkerung („Modellpersonen 1–3“), welche durch die Inhalation radonhaltiger Luft und durch Thermalbäder verursacht werden. Die Einflüsse anderer Strahlenquellen (externe Bestrahlung, Tn- und ThB-Inhalation) sind *nicht* berücksichtigt! Zum Vergleich werden auch die entsprechenden Dosen für eine Person in normaler Umwelt angeführt, wobei ein durchschnittlicher Rn-Gehalt von 0,3 pCi/l und ein Rn:RaB-Verhältnis gleich 1:0,3 angenommen wurde^{6a}.

Organ oder Gewebe	Jahresdosen in mrad für			Person in normaler Umwelt
	Modellperson 1	Modellperson 2	Modellperson 3	
Lunge (Alveolargewebe)	143	50	26	1,55
Blut (Gesamtdosis) ⁷	15	5,7	3,1	0,17
Leber	9,7	3,7	2,1	0,11
Niere	32	11	6,0	0,34
Nebenniere	10	4,7	2,8	0,12
Muskulatur	3,8	1,8	1,1	0,05
Knochen	2,8	1,1	0,6	0,03
Knochenmark	6,0	2,6	1,5	0,07
Gonaden	5,1	2,4	1,5	0,06

^{6a} Dies entspricht einem mittleren Wert für den Rn- und RaB-Gehalt der Raumluft in normalem Milieu. Der geringere Rn-Gehalt der Freiluft braucht praktisch nicht berücksichtigt werden, da sich der Mensch der Industriegesellschaft überwiegend in Räumen aufhält.

⁷ Vgl. Fußnote 5, S. 104.

III. Diskussion der Ergebnisse

Die Tabelle 6 zeigt, daß die Strahlendosen durch das Radon und seine Zerfallsprodukte für alle Einwohner von Badgastein wesentlich höher sind als für solche von Gegenden mit normalem Radongehalt der Luft. Die berechneten Jahresdosen in mrad sind aber auch für den Bewohner Badgasteins im allgemeinen geringer als die durch die externe Bestrahlung erzeugte Dosis, welche wir als Ganzkörperbestrahlung zu etwa 130 mrad pro Jahr abschätzen konnten (tieferliegende Organe werden jedoch durch die darüberliegenden Gewebe geschützt, so daß für sie Abschirmfaktoren herunter bis zu 0,5 gelten). Trotzdem ist nicht auszuschließen, daß auch die kleinen durch das Radon und seine Zerfallsprodukte erzeugten zusätzlichen Dosen eine biologische Wirkung zeigen. Die Strahlungsenergie dieser Nuklide entfällt nämlich zu mehr als 90% auf die α -Strahlung. Von der α -Strahlung ist bekannt, daß sie bei verschiedenen biologischen Strahlenreaktionen eine höhere Wirksamkeit zeigt als gleiche Dosen einer β - oder γ -Strahlung, was durch den RBW-Faktor ausgedrückt wird. Die sehr komplexen Strahlenreaktionen kleiner Dosen im Organismus höherer Tiere oder des Menschen können aber bei derartigen Vergleichsuntersuchungen nicht herangezogen werden, da es praktisch nicht möglich ist, die gleiche Dosisverteilung im Organismus sowohl mit einer α -Strahlung als auch mit einer β - oder γ -Strahlung zu erzielen. Besonders bei kleinsten Dosisleistungen sind die sichtbaren Strahlenreaktionen die Folge einer Kette sehr verwickelter und bis heute noch wenig bekannter Einzelreaktionen, welche schon auf zellularer Ebene einsetzen und in komplexer Weise (z. B. auch über das hormonale System) sich über den gesamten Organismus erstrecken. Wir besitzen in diesen Fällen noch keine Anhaltspunkte über die tatsächliche relative biologische Wirksamkeit der α -Strahlung. Wir haben in den Tabellen die Dosen deshalb immer in rad angegeben und nicht in rem, da diese Einheit ausschließlich für Probleme des Strahlenschutzes verwendet werden soll. In diesem Falle nimmt man für die α -Strahlung eine relative biologische Wirksamkeit von 10 an und nennt diesen „Sicherheitsfaktor“ heute „Quality Factor“ (QF). Für die durch die Radoninhalation erzeugten Dosen in rad (Tabellen 4 bis 6) erhält man mit ausreichender Genauigkeit die Dosen in rem durch einfache Multiplikation mit 10. Sie liegen in allen Fällen noch unterhalb der heute als maximal zulässig angesehenen Jahresdosen, welche für unkontrollierte Bevölkerungsgruppen (ohne berufliche Strahlenbelastung!) für die einzelnen Organe wie folgt festgelegt wurden (IAEA 1966):

Ganzkörper, Gonaden, Knochenmark	0,5 rem
Knochen, Schilddrüse, Haut (ohne Extremitäten)	3 rem
Hände, Unterarme, Füße, Knöchel	7,5 rem
alle übrigen Einzelorgane	1,5 rem

Die Ergebnisse unserer Untersuchungen sind in zweifacher Hinsicht von Bedeutung:

1. zeigen sie, daß die zusätzliche Strahlenbelastung der Gasteiner Bevölkerung durch das Radon und seine Zerfallsprodukte unterhalb der heute als maximal zulässig angenommenen Werte liegt,
2. geben sie die Unterlagen für etwaige zukünftige medizinische Untersuchungen an den Einwohnern dieses Gebietes.

Im Raume von Badgastein gibt es allerdings einige Personen, welche einer noch höheren Strahlenbelastung durch Radoninhalation ausgesetzt sind. Es ist dies ein Teil des Personals der *Gasteiner Heilstollen-Betriebsgesellschaft*. Diese Gesellschaft unterhält den Kurbetrieb im sogenannten „Heilstollen“ oder „Thermalstollen“ von Badgastein/Böckstein. Die Luft in diesem Stollen weist einen hohen Radongehalt auf (im Mittel ungefähr 2500 pCi/l), wodurch die mit den Einfahrten beschäftigten Personen trotz kürzerer Arbeitszeit wesentlich höhere Strahlendosen als die Bademeister in Badgastein erhalten. Dabei handelt es sich aber um eine rein *berufliche* Strahlenbelastung (für die höhere maximal zulässige Dosen gelten) einer kleinen Anzahl von Personen, welche samt ihren Familien in Böckstein, also noch außerhalb der Zone II wohnen. Über die Ergebnisse derzeit laufender medizinischer Untersuchungen an diesen Personen wird zusammen mit den entsprechenden Dosisberechnungen an anderer Stelle berichtet werden.

In *Bad Hofgastein* zeigt die Raum- und Freiluft infolge der Zuleitung und Verteilung des Thermalwassers aus Badgastein ebenfalls einen erhöhten Radongehalt, der jedoch geringer ist als in Badgastein. Die Zahl unserer Untersuchungen reicht jedoch nicht aus, um auch für die Bevölkerung dieses Ortes begründete Mittelwerte für die Strahlenbelastung errechnen zu können.

Danksagung

Wir möchten nicht versäumen, Herrn Univ.-Prof. Dr. F. SCHEMINZKY, dem diese Arbeit zu seinem 70. Geburtstag gewidmet ist, für das große Interesse und die Förderung zu danken, die er allen unseren Untersuchungen stets angedeihen ließ. Wir sind ihm für vielfachen Rat und Hilfe verpflichtet und können nur wünschen, daß seine bewundernswerte Tatkraft und Energie dem Forschungsinstitut noch viele Jahre zur Verfügung stehen möge.

Literaturverzeichnis

- EXNER, Ch. und E. POHL (1949—51): Granosyenitischer Gneis und Gesteins-Radioaktivität bei Badgastein. Jahrbuch Geol. B. A. **XCIV**, 2. Teil: 1—57.
- HULTQVIST, B. (1956): Studies on Naturally Occurring Ionizing Radiations. Almqvist and Wiksells, Stockholm.
- IAEA (1966): 2nd Draft of the Agency's Basic Safety Standards for Radiation Protection. IAEA, Wien.
- MÄRK, T. D. (1968): Eine Meßanlage hoher Empfindlichkeit zum Nachweis von Thoron, Radon und deren Zerfallsprodukten in der Luft. Diss. Innsbruck.
- MÄRK, T. D. (1969): Eine Apparatur hoher Empfindlichkeit zur Messung der natürlichen Radioaktivität der Atmosphäre. Ber. nat.-med. Ver. Innsbruck, **57**: 71—93.
- PLATTNER, H. (1967): Die Strahlendosisverteilung im Säugetierorganismus bei der Inhalation von Thoron (Em 220). Sitz.-Ber. Österr. Akad. Wiss. II, **176**: 381—437.
- PLATTNER, H. (1968): Tierexperimentelle Untersuchungen zum Problem der Strahlenbelastung durch den Thorongehalt der Luft. Strahlentherapie, **136**: 750—757.
- POHL, E. (1964): Dose Distribution Received on Inhalation of Rn 222 and its Decay Products. Radiological Health and Safety in Mining and Milling of Nuclear Materials, **1**: 221—236. IAEA Wien.

- POHL, E. (1965): Biophysikalische Untersuchungen über die Inkorporation der natürlich radioaktiven Emanationen und deren Zerfallsprodukte. Sitz.-Ber. Österr. Akad. Wiss. II, **174**: 309–442.
- POHL, E. und J. POHL-RÜLING (1967): The Radiation Dose Received by Inhalation of Air Containing Rn 222, Rn 220, Pb 212 (ThB) and their Decay Products. An. da Acad. Brasileira de Ciências. **39**: 393–404.
- POHL, E. und POHL-RÜLING (1968): Die Strahlenbelastung bei der Inhalation von Radon, Thoron und deren Zerfallsprodukten. Strahlentherapie, **136**: 738–749.

Anschrift der Verfasser: Univ.-Doz. Dr. Egon POHL und Dr. Johanna POHL-RÜLING,
A-6020 Innsbruck, Schöpfstraße 41.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte des naturwissenschaftlichen-medizinischen Verein Innsbruck](#)

Jahr/Year: 1969

Band/Volume: [57](#)

Autor(en)/Author(s): Pohl Egon, Pohl-Rüling Johanna

Artikel/Article: [Die Strahlenbelastung der Bevölkerung von Badgastein, Österreich. 95-110](#)