

Berechnung der Dosis aus der spezifischen Aktivität der Radonfolgeprodukte

Author: Christian Bartzsch
Version: 2020-04-28
File: an-010_dose_calculation-de.docx

Radon-222 ist ein Edelgas mit folgenden Eigenschaften: gasförmig, inert, farblos und geruchlos. Radon-222 besitzt eine kurze Halbwertszeit von $T = 3,8$ Tagen, aber es bildet sich immer wieder neu aus dem langlebigen Radium-226 mit $T = 1600$ Jahren und dieses wiederum entsteht aus Uran-238 mit einer großen Halbwertszeit von $T = 4,5$ Milliarden Jahren. Rn-222 gehört zu den drei natürlichen Isotopen von Radon. Radon-220 mit einer Halbwertszeit von $T = 56$ s, auch Thoron genannt, stammt vom Zerfall des Radium-224 in der Thorium-232-Zerfallsreihe. Das Radon-219, auch Actinon genannt, mit einer Halbwertszeit von $T = 4$ s, stammt dagegen vom Radium-223 Zerfall in der Uran-235-Zerfallsreihe.

Die Ursachen für erhöhte gemessene Radonkonzentrationen in Wohnräumen liegen bei

- geologischem Untergrund mit erhöhten Uran-/Radium-Gehalten,
- der Konstruktion des Hauses ohne abdichtende Bodenplatte,
- den Luftdruckunterschieden zwischen Boden und Haus,
- der mangelhafte Lüftung im Energiesparhaus
- den Baumaterialien, die Radon abgeben.

Das Ziel von Messungen ist nicht nur die Bestimmung der Radonkonzentrationen in den zu messenden Räumlichkeiten, sondern auch der Dosis aus der spezifischen Aktivität der Radon- und Radonfolgeprodukte. Dabei ist die Dosis ein Maß für die schädlichen Auswirkungen von inhalierten Radon-Tochterprodukten.

Radon ist der Risikofaktor Nr. 2 für Lungenkrebs nach dem Rauchen. Der Hauptanteil der Strahlenexposition der Lunge wird nicht durch die Inhalation von Radon, sondern durch die Inhalation der in der Luft gebildeten kurzlebigen Radontochternuklide (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po) verursacht.

Hohe Radonkonzentrationen sind in der freien Atmosphäre selbst nicht vorzufinden, da das Gas breitflächig verdünnt. Unter bestimmten Voraussetzungen und Bedingungen lassen sich in geschlossenen Räumlichkeiten hohe Konzentrationen feststellen.

Annahme: kein Plate Out -> Radioaktives Gleichgewicht von Radon + Tochternuklide ist gegeben.

Für ein Gemisch aus einem langlebigen Mutternuklid und deren kurzlebigen Zerfallsprodukte (nach etwa 5 Halbwertszeiten der langlebigsten Tochter) baut sich die Konzentration der Töchter soweit auf, dass für jede Tochter ebenfalls so viele Atome zerfallen, wie aus der Mutter oder dem vorhergehenden Glied der Zerfallsreihe neu gebildet werden. Somit haben die Radionuklide dieselbe

Konzentration. Dies gilt für Radon und seine Zerfallsprodukte nur dann, wenn nicht frische Luft oder Ablagerungen von Aerosolpartikeln die Konzentration der Zerfallsprodukte verringern. Diese Bedingung ist nie erfüllt; die Töchter liegen immer in geringerer Konzentration als Radon vor.

Das Gleichgewicht ist nicht immer ideal gegeben, da das Radon und seine Folgeprodukte beim Zerfall ihre Kerne in der Luft durch den Rückstoß ihre Elektronen verlieren und sich positiv aufladen. Die positive Ladung bewirkt, dass sich die so gebildeten Ionen an Staub- oder Aerosolpartikeln anheften, aber auch an elektrisch geladenen Kunststoffflächen ablagern (Plate-Out-Effekt). Der Vorgang ist dabei zusätzlich abhängig von der Luftfeuchte. Damit werden nicht alle Tochterkerne bei der Messung erfasst und das für die Bestimmung des Radons vorausgesetzte Gleichgewicht ist verändert. Die Abweichung wird durch den Gleichgewichtsfaktor F angegeben und besagt dabei, wie viele Folgekerne für die messtechnische Erfassung noch zur Verfügung stehen. Anders ausgedrückt liegt bei $F = 0$ nur Radon vor, während bei $F = 1$ ein radioaktive Gleichgewicht vollständig eingestellt ist.

Äquivalentdosisbestimmung aus der Radonkonzentration $C(\text{Radon})$

Die Beziehung zwischen dem Gleichgewichts- und dem Nichtgleichgewichtszustand der Radonkonzentration wird mit Hilfe der Formel

$$C(\text{Radon}) \cdot F = EEC$$

beschrieben. Dabei stellt $C(\text{Radon})$ die reale Radonkonzentration im Nichtgleichgewicht der Atmosphäre dar, während EEC das Gleichgewichtsäquivalent der Zerfallsprodukte von Radon in Bezug auf die Radonkonzentration ist. Der Gleichgewichtsfaktor F charakterisiert das Verhältnis oder Ungleichgewicht bzw. das Maß für die „Ausdünnung“ der kurzlebigen Folgeprodukte gegenüber dem Radon in Raumluft. Dabei wird die Größe F im Bereich zwischen 0 und 1 angegeben. Typische Zahlenangaben sind:

- Raum mit normaler Lüftung: zwischen 0,3 und 0,6
- großer Raum mit staubiger Luft: 0,8
- Außenluft: 0,7

Die Äquivalentdosis H wird aus der gleichgewichtsäquivalenten Konzentration EEC unter der Verwendung eines Dosiskonversionskoeffizienten D'_{EEC} bestimmt:

$$H = EEC \cdot t \cdot D'_{EEC} = C_{Rn} \cdot F \cdot t \cdot D'_{EEC}$$

Folgende Dosiskonversionskoeffizienten der Referenzperson sind zu verwenden:

Referenzperson	Dosiskonversionskoeffizienten D'_{EEC} in $\text{nSv} \cdot \text{m}^3 \cdot (\text{Bq} \cdot \text{h})^{-1}$
Bevölkerung	6,1
Radon am Arbeitsplatz für Berufstätige	7,8 ¹
Thoron am Arbeitsplatz für Berufstätige	81,7

Rechenbeispiel für Äquivalentdosisbestimmung aus der Radonkonzentration

Für die Abschätzung der Strahlenexposition der Lunge wird mit einem Gleichgewichtsfaktor von $F=0,4$ gerechnet. Als Exposition bezeichnet man das Produkt der Konzentration $[Bq \cdot m^{-3}]$ und der Aufenthaltsdauer [h]. Eine in einem Wohnraum gemessene Radonkonzentration mit beispielsweise $C_{Rn}=100 Bq \cdot m^{-3}$ entspricht dabei einer gleichgewichtsäquivalenten Radonkonzentration von $EEC=40 Bq \cdot m^{-3}$.

In den Wohnräumen wird eine Aufenthaltszeit von $t=7000$ h im Jahr angesetzt. Zur Umrechnung einer Exposition in die effektive Dosis wird der Dosiskonversionsfaktor von $6,1 nSv \cdot m^3 \cdot (Bq \cdot h)^{-1}$ für die radonäquivalente Konzentration verwendet. Folgende Berechnung ergibt

$$100 Bq \cdot m^{-3} \cdot 0,4 \cdot 7000 h \cdot 6,1 nSv \cdot m^3 \cdot (Bq \cdot h)^{-1} = 1708000 nSv = 1,708 mSv$$

Anhand dieser Beispielrechnung ergibt sich eine Dosis von etwa 1,71 mSv.

Äquivalentdosisbestimmung aus den Radonfolgeprodukten (PAEC oder EEC)

Die genauere Methode zur Bestimmung der Äquivalentdosis ist die Berechnung direkt aus den inhalierten Radon-Tochterprodukten.

Dazu wird die potentielle Alphaenergie-Konzentration für eine Tochtenuklidenmischung aus der Radon-Zerfallsreihe in der Luft betrachtet und als das Maß der schädigenden Wirkung eines Gasgemisches beschrieben:

$$PAEC = \frac{\sum_i PAE_i}{V_{Luft}}$$

mit i als entsprechendes Radontochternuklid.

Für Radon-222 im Gleichgewicht kann die PAEC aus der EEC und umgekehrt mit Hilfe der Einheitenumrechnung

$$1 Bq \cdot m^{-3} = 5,56 nJ \cdot m^{-3}$$

ermittelt werden, für Thoron (Rn-220) lautet dagegen die Einheitenumrechnung:

$$1 Bq \cdot m^{-3} = 75,6 nJ \cdot m^{-3} \cdot 1$$

1 ICRP Publication 115: Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon, M. Tirmarche, J.D. Harrison, D. Laurier, F. Paquet, E. Blanchardon, J.W. Marsh, Ann. ICRP 40(1), 2010

Als nächster Schritt wird aus der PAEC die Potentielle Alpha Energie Exposition (PAEE) bestimmt. Unter einer Exposition ist das Zeitintegral der Konzentration an kurzlebigen Rn-222-Folgeprodukten über die Expositionszeit zu verstehen. Zu berücksichtigen ist, dass die PAEE nicht die einzelnen Zerfallsprozesse in der Lunge betrachtet. Die Menge von inhaliierten und abgelagerten Radonfolgeprodukten ist dabei abhängig von:

- der Potentiellen Alphaenergie-Konzentration in eingeatmeter Luft sowie
- der Zeitspanne t , in welcher die Personen einer bestimmten PAEC ausgesetzt sind.

Dieser Zusammenhang lässt sich durch die Formel

$$PAEE = PAEC \cdot t$$

beschreiben.

Letztendlich lässt sich die Äquivalentdosis

$$H = PAEE \cdot D'_{pot} = PAEC \cdot t \cdot D'_{pot}$$

aus der Potentiellen Alpha Energie Exposition (PAEE) unter Verwendung eines Dosiskonversionskoeffizienten D'_{pot} bestimmen.

Für Radon-Zerfallsprodukte und Thoron-Zerfallsprodukte gelten die folgenden Dosiskonversionskoeffizienten – effektive Dosis pro potenzieller Alphaenergie-Exposition:

Expositionsart	Dosiskonversionskoeffizienten
	D'_{pot} in $Sv \cdot m^3 \cdot (J \cdot h)^{-1}$
Radon im häuslichen Bereich (Bevölkerung)	1,1*
Radon am Arbeitsplatz für Berufstätige	1,4*
Thoron am Arbeitsplatz für Berufstätige	0,5**

Quelle:

*BfS: Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität, Salzgitter, März 2010

** BfS: Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität, Erläuterungen zur Berechnung mit den Berechnungsgrundlagen Bergbau, Salzgitter, April 2012

Rechenbeispiel für Äquivalentdosisbestimmung aus der PAEC

Aus einer mittleren PAEC von $1029 \text{ nJ} \cdot \text{m}^{-3}$ lässt sich bei einer gesamten Messzeit von $t = 18 \text{ h}$ die Exposition

$$PAEE = 1029 \text{ nJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 18 \text{ h} = 18530 \text{ nJ} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$$

Für berufstätige Personen ergibt sich eine Äquivalenzdosis $H = 25,94 \mu\text{Sv}$ aus der Rechnung:

$$H = 18530 \text{ nJ} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 1,4 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Sv} \cdot \text{m}^3}{\text{nJ} \cdot \text{h}} = 0,000025942 \text{ Sv} = 25,94 \mu\text{Sv}.$$