

Natürliche Radioaktivität in Baumaterialien und die daraus resultierende Strahlenexposition

Fachbereich
Strahlenschutz und Umwelt

Gehrcke, K.

Hoffmann, B.

Schkade, U.

Schmidt, V.

Wichterey, K.



BFS-SW-14/12

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokuments immer auf folgende URN:

urn:nbn:de:0221-201210099810

Zur Beachtung:

BfS-Berichte und BfS-Schriften können von den Internetseiten des Bundesamtes für Strahlenschutz unter <http://www.bfs.de> kostenlos als Volltexte heruntergeladen werden.

Salzgitter, November 2012

Natürliche Radioaktivität in Baumaterialien und die daraus resultierende Strahlenexposition

**Fachbereich
Strahlenschutz und Umwelt**

Gehrcke, K.

Hoffmann, B.

Schkade, U.

Schmidt, V.

Wichterey, K.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Vorgehen zur Probengewinnung	5
2.1	Zusammenarbeit mit dem bbs	5
2.2	Beteiligte Verbände.....	5
2.3	Grundsätze der Probenauswahl	5
3	Messmethoden	7
3.1	Messung der spezifischen Aktivität (Gammaskpektrometrie)	7
3.2	Bestimmung der Radonexhalation	8
4	Abschätzung der Strahlenexposition.....	11
4.1	Radonexposition	12
4.2	Äußere Strahlenexposition.....	14
5	Messergebnisse.....	15
5.1	Spezifische Aktivität	15
5.2	Radonexhalation	19
5.3	Vergleich mit vorhandenen Messdaten und Literaturangaben.....	19
6	Strahlenexposition	21
6.1	Äußere Exposition.....	21
6.2	Radonexposition	22
6.3	Gesamtexposition	24
7	Bewertung natürlicher Radioaktivität in Baustoffen.....	25
7.1	Überblick zu bestehenden strahlenschutzrechtlichen Anforderungen	25
7.2	EU-Empfehlung Radiation Protection 112	26
7.3	Österreichische Norm S 5200 „Radioaktivität in Baumaterialien“ (ÖNORM) .	28
7.4	Entwurf der EU-Grundnormen	29
7.5	Baurechtliche Anforderungen	31
8	Bewertungsvorschlag des BfS	32
9	Zusammenfassung	34
	Literatur	36
	Anlagenverzeichnis	38

1 Einleitung

Aufgrund ihrer geologischen Entstehung enthalten alle zur Herstellung von Baumaterialien verwendeten Rohstoffe einen bestimmten Anteil an natürlicher Radioaktivität, insbesondere an Kalium-40 und den Radionukliden der Uran-238- und der Thorium-232-Zerfallsreihe. Diese Radionuklide führen beim Aufenthalt in Gebäuden zu einer Strahlenexposition des Menschen über zwei Pfade:

- durch äußere (externe) Exposition durch Gamma-Strahlung und
- innere (interne) Exposition durch die Inhalation von Radon-222 und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten.

Um die Höhe der möglichen Strahlenexposition aus Baumaterialien abschätzen und ggf. begrenzen zu können, ist die Kenntnis der Gehalte an Radionukliden in den unterschiedlichen Baumaterialien und des aus ihnen in die Gebäude freigesetzten Radons erforderlich.

Untersuchungen und Messungen zu diesem Thema gab es bereits sowohl in Deutschland als auch international an einer Vielzahl von Rohstoffen und Produkten. Dabei ging es insbesondere um die Konsequenzen des Zuschlags industrieller Rückstände mit erhöhter natürlicher Radioaktivität zu Baumaterialien. Wesentliche Ergebnisse dieser Erhebungen aus 20 europäischen Ländern und aus der internationalen Literatur sind im Bericht der Europäischen Kommission Radiation Protection (RP) 96 „Enhanced radioactivity of building materials“ [1] von 1997 zusammengefasst worden.

Die dafür genutzten Daten aus Deutschland wurden in [2], [3] veröffentlicht. Sie beziehen sich auf Untersuchungen aus den 70er und 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts. Sie können wegen der genannten Schwerpunktsetzung, der regionalen Beschränkung und wegen mangelnder Aktualität nicht als repräsentativ für die heutige Produktpalette angesehen werden. Im Zuge der Diskussion um eine Einbeziehung der spezifischen Aktivität natürlicher Radionuklide und die Radonabgabe eines Baustoffes als Zulassungskriterium in einer europäischen Bauprodukttrichtlinie einerseits und der bevorstehenden Einbeziehung der Baustoffe in die Europäische Grundnormenrichtlinie zum Strahlenschutz andererseits bedurfte es einer Aktualisierung der Datenbasis.

Mit den hier vorgestellten Untersuchungen sollte eine repräsentative Bestandsaufnahme durchgeführt werden mit dem Ziel, eine fachliche Grundlage für Diskussionen im internationalen Maßstab im Zusammenhang mit der Umsetzung der künftigen europäischen Vorgaben wie auch für Entscheidungen über die nationale Ausgestaltung künftiger Regelungen zur natürlichen Radioaktivität von Baumaterialien zu schaffen.

Der Bericht enthält auch eine ausführliche Darstellung der nationalen und internationalen rechtlichen Situation und der Normung bezüglich natürlicher Radioaktivität in Baustoffen sowie einen Bewertungsvorschlag des Bundesamtes für Strahlenschutz.

2 Vorgehen zur Probengewinnung

2.1 Zusammenarbeit mit dem bbs

Im Interesse eines effizienten Vorgehens bei der Probengewinnung und zum Erhalt zuverlässiger Informationen zur Herkunft und Zusammensetzung der Baumaterialien bemühte sich das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) um eine Zusammenarbeit mit dem Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e. V. (bbs). Der Verband zeigte sich sehr kooperativ, da die Baustoffindustrie an den Messungen und der Bewertung durch das BfS großes Interesse hat. Hintergrund dazu sind insbesondere die anstehenden Regelungen in der EU und im nationalen Rahmen.

Die Messergebnisse wurden den jeweiligen Herstellerfirmen bzw. den liefernden Vereinigungen übermittelt. Um die von den Herstellern gewünschte Anonymität zu wahren, werden die Messergebnisse im Weiteren ohne deren Angabe verwendet.

Zusätzlich zu den Ergebnissen des BfS wurden bei einigen Branchen im Rahmen anderer Untersuchungen erhobene Messwerte einbezogen. Zur Qualitätssicherung erfolgte in solchen Fällen zwischen diesen Laboren und dem BfS ein Messvergleich.

2.2 Beteiligte Verbände

Am Untersuchungsprogramm beteiligten sich insgesamt 11 Organisationen der Baustoffindustrie, meist in Form von Bundes- oder Industrieverbänden, Forschungsinstituten oder Fachvereinigungen. Im Einzelnen gehörten dazu folgende Branchen:

- Beton/Betonfertigteile
- Gips
- Kalksandstein
- Keramische Fliesen und Platten
- Keramische Rohstoffe
- Leichtbeton
- Mineralwolle
- Mörtel / Putze / Estriche
- Porenbeton
- Zement
- Ziegel

Die Vereinigungen repräsentieren jeweils die Mehrheit der Hersteller in den betreffenden Branchen [4], [5], [6]. Der Deutsche Naturwerkstein-Verband e.V. wurde nicht in dieses Messprogramm einbezogen, da eine Untersuchung dieser Produkte hinsichtlich ihrer natürlichen Radioaktivität durch das BfS bereits in den Jahren 2005/06 stattgefunden hat [7].

2.3 Grundsätze der Probenauswahl

Wegen der Vielzahl der Baumaterialien, Produkte und Hersteller in Deutschland mussten wir uns auf stichprobenartige Untersuchungen beschränken. Um dennoch

aussagefähige Ergebnisse zu erhalten, sind folgende Gesichtspunkte in die Probenauswahl eingeflossen:

- Es wurden ausschließlich aktuell hergestellte Produkte untersucht, die teils auch unter Verwendung von Rückständen aus industriellen Prozessen mit erhöhten Gehalten natürlicher Radioaktivität (international üblicherweise als **Naturally Occurring Radioactive Materials** – NORM gekennzeichnet) gefertigt wurden.
- Da nur Innenraum-Baustoffe aus Sicht des Strahlenschutzes von Interesse sind erfolgte eine Beschränkung auf solche Produkte.
- Bei der Festlegung des jeweiligen Beprobungsumfanges wurden Fragen der Homogenität von Ausgangsstoffen und der Konstanz der Technologie im Herstellungsprozess einbezogen. Variable Bedingungen erforderten grundsätzlich höhere Probenzahlen. Insbesondere wurden variable geologische Voraussetzungen bei den Ausgangsstoffen beachtet.
- Es wurde zwischen Produkten, die in großen Mengen eingebaut werden (Wandbildner), und solchen Materialien unterschieden, die nur in beschränktem Umfang (dünn-schichtig oder mit sehr geringer Dichte) verwendet werden. Materialien mit geringerem Materialeinsatz in einem Gebäude können nur einen relativ kleinen Beitrag zur gesamten Strahlenexposition verursachen. Sie wurden deshalb in geringem Umfang beprobt.
- Ein Kriterium für den Umfang der Messungen stellte die aus früheren Untersuchungen erwartete Höhe der spezifischen Aktivität der interessierenden Radionuklide dar. Bei Materialien mit bekanntermaßen geringen Radioaktivitätsgehalten wurden kleine Probenzahlen als ausreichend angesehen, bei solchen mit zu erwartenden höheren Gehalten wurden dagegen höhere Probenzahlen gewählt, um insbesondere die Spannweite der Radioaktivitätsgehalte nach oben zu erfassen. Dabei wurden neben den älteren BfS-Daten auch internationale Literaturangaben analysiert.

Daraus resultierte, dass aus Branchen mit ausnahmslos sehr niedrigen spezifischen Aktivitäten oder mit geringem Materialeinsatz auch wenige Proben als ausreichend angesehen wurden, wenn damit der typische und überwiegende Anteil des Produktionsumfanges abgedeckt war. Im Zweifel wurden auch eher kritisch zu bewertende Materialien (z. B. unterschiedliche Gipse, neue Putzmischungen) in die Untersuchung einbezogen. Die einzelnen Baustoffbranchen bestätigten, dass die Probenauswahl den größten Marktanteil der jeweiligen Produktpalette abdeckt, so dass von deren Repräsentativität ausgegangen werden kann. Es ergab sich nach diesen Kriterien ein Untersuchungsumfang von insgesamt 120 Proben.

Eine Sonderrolle nahmen bei den Untersuchungen Betonprodukte ein. Repräsentative Erhebungen an Betonen sind äußerst aufwändig. Die Gründe liegen in der Vielzahl von Rezepturen und Herstellern. Viele lokale Hersteller sind auch nicht im Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie organisiert. Im Übrigen wären auch Transportbetonmischungen und solche, die direkt an der Baustelle unter Nutzung von Sanden/Kiesen aus der jeweiligen Region hergestellt werden zu berücksichtigen. Aus diesen Gründen konnte eine repräsentative oder markt-abdeckende Erhebung für Beton nicht durchgeführt werden. Es ist jedoch bekannt,

dass geologisch bedingt in den Ausgangsstoffen eine hohe Variabilität der Radionuklidkonzentration besteht und deshalb Betone unter Strahlenschutzgesichtspunkten relevant sein könnten.

Aus diesen Gründen wurden zusätzlich zu den an einer vergleichsweise geringen Anzahl von Betonproben durchgeführten experimentellen Analysen rechnerische Abschätzungen der zu erwartenden spezifischen Aktivitäten der Endprodukte vorgenommen. Dazu wurden die aus der Literatur [1], [2] relativ gut bekannten spezifischen Aktivitäten der Ausgangsstoffe zur Betonherstellung in Verbindung mit den Rezepturen verwendet (s. Abschnitt 6).

Für Ziegel wurde eine zusätzliche Beprobung von acht Herstellern aus Regionen vorgenommen, die aufgrund ihrer Geologie und bekanntermaßen erhöhter Radonkonzentrationen in der Bodenluft (vgl. Bodenluftprognosekarte für Deutschland http://www.bfs.de/de/ion/radon/radon_boden/radonkarte.html) höhere spezifische Aktivitäten für Radium-226 im Boden erwarten ließen. Wie bereits dargestellt, ging es bei den Untersuchungen insbesondere auch um die Erfassung der oberen Spannweite der Aktivitätsgehalte¹.

Über die Untersuchungen des BfS hinaus wurde im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) innerhalb der von diesem 2007 ins Leben gerufenen Projektgruppe „Radioaktivität/Radonexhalation“ ein ergänzendes Untersuchungsprogramm durchgeführt. Dabei sind von einer Gutachterfirma im freien Handel verfügbare Baumaterialien aller Branchen unter Berücksichtigung der relevanten geologischen Hauptstrukturen in Deutschland hinsichtlich ihrer natürlichen Radioaktivität untersucht worden. Auf die Ergebnisse dieser Untersuchungen wird im Abschnitt 5.3 eingegangen.

3 Messmethoden

3.1 Messung der spezifischen Aktivität (Gammaskpektrometrie)

Für die Abschätzung der durch Baumaterialien verursachten externen Exposition durch Gamma-Strahlung sind die spezifischen Aktivitäten folgender Radionuklide relevant:

- Kalium-40 (K-40)
- Radium-226 (Ra-226) und
- Thorium-232 (Th-232).

Dabei stellen Ra-226 und Th-232 lediglich Leitnuklide dar, die Gamma-Ortsdosisleistung wird primär durch Töchter dieser Radionuklide in den jeweiligen Zerfallsketten verursacht. Neben den genannten Nukliden wurden die Aktivitäten von Uran-238 und Radium-228 bestimmt. Die gammaskpektrometrische Ermittlung erfolgte nach folgender Methode:

¹ Es sei angemerkt, dass es sich aus diesem Grunde nicht um Zufallsstichproben im streng statistischen Sinne handelt. Das hat zur Konsequenz, dass beispielsweise Mittelwerte nach oben verzerrt sein können. Diese standen allerdings hier nicht im Vordergrund des Interesses.

Für die Messung wurde ein GMX-Detektor (n-Type, High-Purity-Germanium) mit einer relativen Effektivität von 40 % und ein GEM-FX-Detektor (p-Type, High-Purity-Germanium) verwendet. Mit diesen Detektoren kann im Energiebereich zwischen 10 keV und 10 MeV gemessen werden. Die Proben wurden in der Messgeometrie „250 ml-Aluminiumgefäß“ (Füllhöhe: 8 cm) gemessen. Die verwendeten Messgefäße sind gasdicht. Die Aktivitätsbestimmung erfolgte nach Verfahren, die im BfS allgemein zur gammaspektrometrischen Bestimmung von natürlichen Radionukliden in Umweltproben angewendet werden [8], [9]. Die Messunsicherheit wird gemäß DIN 1319 [10] angegeben (Vertrauensniveau 95 %).

Der fachliche Hintergrund der Verwendung gasdichter Messgefäße bei der gammaspektrometrischen Bestimmung ist, dass sich nach einer Wartezeit von mindestens 23 Tagen Ra-226 mit Radon-222 (Rn-222) und dessen kurzlebigen Folgenukliden im radioaktiven Gleichgewicht befindet und dann über die gammaspektrometrische Messung von Blei-214 (Pb-214) und Wismut-214 (Bi-214) bestimmt werden kann. Dieses indirekte Verfahren wird bevorzugt, weil die Direktmessung des Ra-226 bei 186,2 keV durch eine intensive Linie des Uran-235 (U-235) bei 185,7 keV gestört wird und die Korrektur dieser Störung Probleme bereiten kann, sofern U-235 bei anderen Energien (geringe Emissionswahrscheinlichkeiten, hohe Nachweisgrenzen) nicht bestimmt und infolge fehlender Kenntnis des U-238-Gehaltes (ebenfalls hohe Nachweisgrenzen bei der Messung bzw. hoher Matrixeinfluss auf Grund der geringen Energien des Folgeproduktes Thorium-234 (Th-234)) auch nicht berechnet werden kann.

Die Auswertung für U-238 erfolgte aus der Berechnung der U-235-Aktivität bei 186 keV unter Berücksichtigung des Ra-226-Anteils unter dieser Linie und über die Folgenuklide Protactinium-234m (Pa-234m) bei 1001,03 keV sowie Th-234 bei 63,28 keV. Zur Bestimmung von K-40 wurde die Linie bei 1460,83 keV und von Ra-228 die Linie über sein Folgenuklid Actinium-228 (Ac-228) bei 911,32 keV ausgewertet. Die Bestimmung der spezifischen Th-228-Aktivität erfolgte durch Messung seines kurzlebigen Folgenuklids Pb-212. Für diese Messung ist Voraussetzung, dass Rn-220 in der Probenmatrix verbleibt. Dies ist infolge seiner geringen Halbwertszeit von 56 Sekunden im Allgemeinen gegeben. Bei Verwendung gasdichter Messgefäße wird diese Voraussetzung jedoch immer gesichert. Eine Summationskorrektur für die relevanten Radionuklide Bi-214 und Ac-228 wurde durchgeführt und die Selbstadsorption korrigiert.

Mit dem Vergleich der Messergebnisse von Ra-228 und Th-228 sowie von U-238 und Ra-226 konnte unter Berücksichtigung dieser Messprozedur gezeigt werden, dass in diesen Materialien für beide natürlichen Zerfallsreihen vom säkularen Gleichgewicht ausgegangen werden kann. Aufgrund dieses Nachweises wurde im Weiteren das Radionuklid Th-228 als Äquivalent für Th-232 verwendet.

3.2 Bestimmung der Radonexhalation

Das gasförmige Radon-222 (Rn-222) ist ein Nuklid, das aus dem Zerfall von Radium-226 aus der Uran-238-Reihe stammt und fortlaufend nachgebildet wird. Die Untersuchungen dienen dazu, den baumaterialbedingten Beitrag zur Innenraumkonzentration von Radon-222 und damit zur Strahlenexposition durch Inhalation von Radon und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten abzuschätzen. Dazu wird zunächst die pro Zeit- und Flächeneinheit aus dem Baumaterial in die Raumluft abgegebene Radonaktivität (Radonexhalationsrate Φ , siehe unten) bestimmt, aus der dann die Radonkonzentration eines Modellraumes gemäß Abschnitt 4.1 berechnet wird.

Da bisher keine standardisierte Messmethode existiert, wurden im Rahmen der Untersuchungen zu diesem Projekt zur Qualitätssicherung zwei verschiedene Messmethoden zur Bestimmung der flächenbezogenen Radonexhalationsrate Φ eingesetzt. Beide Methoden basieren auf der Messung des Emanationskoeffizienten ε , d. h. dem Anteil des im Material freigesetzten Radons, der in den Porenraum gelangt, der der Außenluft zugänglich ist.

Die Exhalationsrate kann aus dem Emanationskoeffizienten mit den Parametern

- effektiver Diffusionskoeffizient D^* ,
- Materialdichte ρ ,
- Zerfallskonstante des Radons λ_{Rn} ,
- Materialdicke: d
- Radiumaktivitätskonzentration C_{Ra-226}

über die Gleichung

$$\Phi = R \cdot \rho \cdot \lambda_{Rn} \cdot \varepsilon \cdot C_{Ra-226} \cdot \tanh\left(\frac{d}{2 \cdot R}\right) \quad (1)$$

bestimmt werden. Dabei steht

$$R = \sqrt{D^* / \lambda_{Rn}} \quad (2)$$

für die so genannte Diffusionslänge von Radon im porösen Material. Abgesehen von Ausnahmefällen spielt der Zerfall des Radons innerhalb der Probe keine Rolle, da in der Regel die Diffusionslänge groß gegenüber der Probendicke ist (siehe z. B. [11]). Dann vereinfacht sich Gleichung (1) zu

$$\Phi = \rho \cdot \lambda_{Rn} \cdot \varepsilon \cdot C_{Ra-226} \cdot d / 2. \quad (3)$$

Aus den gleichen Gründen kann der Emanationskoeffizient in einfacher Weise unter Verwendung von gekörntem Material bestimmt werden. Dabei muss gewährleistet sein, dass der Korndurchmesser sehr viel kleiner als die Diffusionslänge R ist. Diese Forderung ist bei einem Korndurchmesser von weniger als 4 mm praktisch immer erfüllt. Bei diesen Analysen ist es wichtig, dass die Emanationsrate bei definierten Feuchtigkeitsgehalten bestimmt wird, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.

Die Bestimmung des effektiven Diffusionskoeffizienten erfolgte nach der von Keller et al. [11] publizierten Methode. Allerdings konnte wegen der großen Diffusionslänge vieler Baustoffe nicht für alle Proben die Diffusionskonstante bestimmt werden, da bei großen Diffusionskoeffizienten der Diffusionsverlauf zeitlich nicht aufgelöst werden kann. In solchen Fällen wurde für die Berechnungen ein konservativer Wert von $1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ benutzt (Anlage 4, gelb markierte Zellen). Die Unsicherheiten der Diffusionsmessung liegen bei ca. 30 %. Die Unsicherheit der Exhalationsmessung ist im Gesamtunsicherheitsbudget von einem Faktor 2 berücksichtigt (jeweils 1σ).

Messmethode 1: abgeschlossenes Volumen, Szintillationskammer

Primär wird bei diesem Verfahren die Sättigungskonzentration gemessen, die sich nach dem Einschließen der Pulverprobe in einem gasdichten Volumen einstellt. Die

in diesem Luftvolumen enthaltene Radonaktivität beschreibt im Gleichgewicht den Anteil der vom Radium produzierten Radonatome, der in das Luftvolumen übergegangen ist.

Nach standardisierter Vorbehandlung des Materials (Zermahlen, Trocknung) wird eine definierte Menge des gekörnten Materials abgewogen (ca. 200 g), in ein Volumen von ca. 250 ml abgefüllt, dicht verschlossen und für eine definierte Zeit von mehr als 12 Tagen gelagert. Nach Ablauf dieser Zeit wird dem Gesamtvolumen durch Absaugung mittels vorevakuiertes Szintillationskammer ein Teilvolumen entnommen. Aus der Messung der Radon-222-Aktivität in der Szintillationskammer kann die gesamte im Probenvolumen vorhandene Radon-222-Aktivität bestimmt werden und daraus wiederum der Emanationskoeffizient. Es wurde eine Gesamtunsicherheit von ca. 30 % ermittelt.

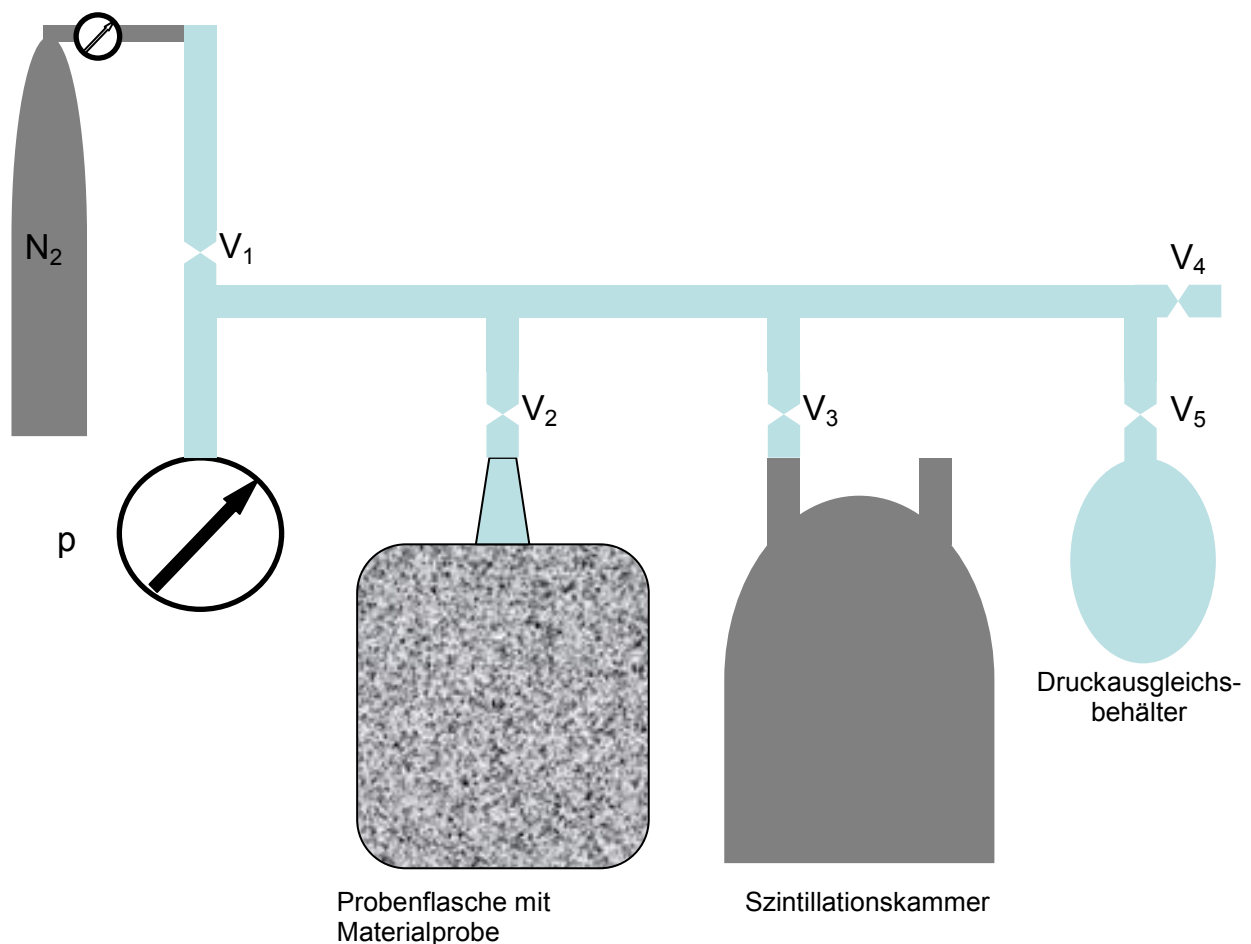


Abbildung 1: Schema des experimentellen Aufbaus, Szintillationskammer

Der Vorteil dieser Methode liegt in der relativ hohen Sättigungskonzentration und der damit verbundenen geringen statistischen Messunsicherheit. Nachteilig sind die Probleme bei der Gewährleistung der Radondichtheit der Probenbehälter und der Zeitbedarf infolge der mit dem Einstellen des Gleichgewichtes verbundenen Lagerung.

Messmethode 2: offenes Volumen, Zweifiltermethode

Um im Sinne einer Qualitätssicherung unabhängige Vergleichsmessungen zu erhalten, wurden die Emanationskoeffizienten mittels einer zweiten Messmethode verifiziert. Bei dieser Methode wird der Probenbehälter kontinuierlich mit radonfreiem Stickstoff gespült. Das in der Probe gebildete Radon wird dabei mit dem Stickstoff in eine Messkammer überführt. Radonfolgeprodukte, die sich vor der Messkammer gebildet haben, werden durch einen ersten Filter am Einlass der Messkammer zurückgehalten. Die Radonfolgeprodukte, die sich dann innerhalb der Kammer bilden, werden auf einem zweiten Filter abgeschieden und mittels eines Halbleiterdetektors (Oberflächensperrschichtdetektor) alphaspektroskopisch gemessen. Aus der Radonfolgeproduktmessung kann auf die Radonkonzentration im Stickstoffstrom und weiter auf die Emanation in der Probe geschlossen werden.

Im Gegensatz zur ersten Methode ist der Einfluss von Undichtigkeiten bei geeigneten Randbedingungen vollständig auszuschließen. Bei einer Messzeit von 24 Stunden wird eine extrem geringe untere Nachweisgrenze von $0,25 \text{ Bq/m}^3$ im Stickstoffstrom erreicht. Nachteilig wirkt sich der hohe Stickstoffverbrauch aus.

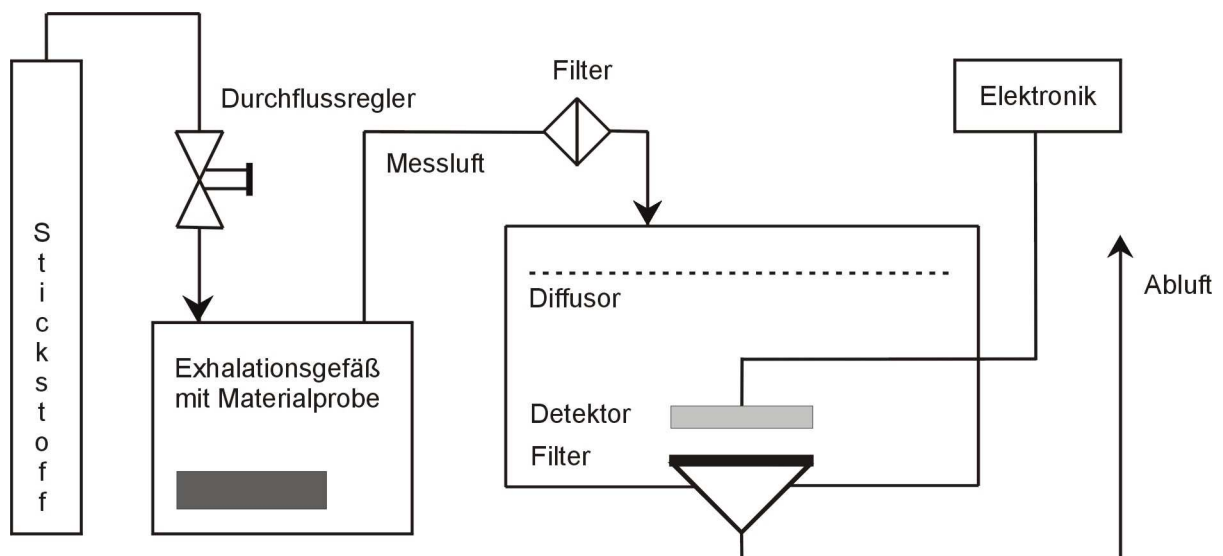


Abbildung 2: Schema des experimentellen Aufbaus, Zweifiltermethode

4 Abschätzung der Strahlenexposition

Die aus den Gehalten der Radionuklide in den Baustoffen über die bereits in der Einleitung genannten Expositionspfade ‚äußere Exposition durch Gammastrahlung‘ und ‚Inhalation von Radon und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten‘ für in den daraus errichteten Gebäuden lebende Personen resultierende Strahlenexposition kann nicht direkt gemessen werden. Zu ihrer Abschätzung müssen vielmehr Rechenmodelle und Parameter herangezogen werden, die den Zusammenhang zwischen den Messgrößen nach Abschnitt 3 und der Strahlenexposition beschreiben. Diese werden in den beiden folgenden Abschnitten erläutert.

4.1 Radonexposition

Um aus der ermittelten Radonexhalationsrate Φ die Radonkonzentration C_{Rn} eines Raumes abzuschätzen, müssen Annahmen zur Raumgeometrie und zur Luftwechselzahl getroffen werden, die in folgender Weise in die Berechnung eingehen:

$$C_{Rn} \approx \frac{A \cdot \Phi}{V \cdot \nu} \quad (4)$$

Dabei bedeuten:

- gesamte innere Wandfläche A [m^2]
- Volumen V [m^3]
- Luftwechselzahl ν [h^{-1}].

Für eine einheitliche Bewertung von Baustoffen spielt die Festlegung eines Standard-Modellraumes eine wichtige Rolle. Das gilt nicht nur für Radon, sondern auch für andere Innenraumschadstoffe. Da sich die verschiedenen Rechts- und Normungsbereiche weitgehend unabhängig voneinander entwickelt haben überrascht es nicht, dass sich national und international für verschiedene Zwecke auch die Verwendung verschiedener Modellräume etabliert hat. Zur Vereinfachung wird dabei in der Regel ein vollständig umbauter Raum (d. h. ohne Fenster und Türen) angenommen, allerdings mit unterschiedlichen Dimensionen. Tabelle 1 zeigt einige Beispiele dafür.

Tabelle 1: Modellräume aus unterschiedlichen Normen

Quelle	Oberfl./Volumen -verhältnis [m^{-1}]	Raumfläche [m^2]	Raumhöhe [m]	Luftwechsel- rate [m^{-1}]
RP 96, RP 112	1,6	5 x 4	2,8	k. A.
ÖNORM S 5200	2.0*	-	-	0,7
DIN V ENV 13419-1	2,4	2 x 3,5	2,5	0,5
DIN 1946-6	1,9	3 x 4	2,7	0,5
DIN ISO 16000-9	2,0	3 x 4	2,5	0,5

*In der ÖNORM wird keine Angabe zur Raumgröße gemacht, aber ein Flächen-Volumen-Verhältnis von 2 (1,5 – 2,5) m^{-1} unterstellt.

Im Strahlenschutz ist der mit den Publikationen Radiation Protection (RP 96) [1] und RP 112 [12] eingeführte Modellraum zur Abschätzung der äußeren Strahlenexposition inzwischen weitgehend etabliert (vgl. Abschnitte 6.1 und 7.2). Zur Abschätzung und Bewertung der Radonexposition würde sich zwar zum Beispiel auch die Annahme eines Modellraums entsprechend dem zur Messung flüchtiger Kohlenwasserstoffe (VOC) aus Baustoffen entwickelten der DIN EN ISO 16000-9 [13] anbieten, da Radon ebenfalls ein Innenraumschadstoff ist. Im Sinne der Konsistenz und Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird aber hier für beide betrachteten Exposi-

tionspfade der Modellraum nach RP 112 verwendet. Es handelt sich dabei um eine für den Strahlenschutz spezifische Konvention.

Aus Gleichung (4) ist abzuleiten, dass das Flächen-/Volumenverhältnis sich linear auf die Radonkonzentration auswirkt. Daher wären die bei Verwendung des kleineren VOC-Modellraums abgeschätzten Werte um ca. 20 % höher als bei dem größeren Raum der RP 112.

Für die Abschätzung der Radonexposition ist, wie in Gleichung (4) erkennbar, auch die Luftwechselrate ein entscheidender Parameter. Auch dafür werden national und international verschiedene Werte angenommen. Da in RP 112 die Radon-Exposition nicht berücksichtigt wird, gibt es dort allerdings keine Festlegung für diesen Parameter.

Die in der ÖNORM S 5200 (ÖNORM) [14] verwendete Luftwechselrate von $0,7 \text{ h}^{-1}$ ist im Vergleich zu Annahmen der DIN oder bei Abschätzungen für andere Luftschadstoffe (VOC etc.) von $0,5 \text{ h}^{-1}$ als vergleichsweise hoch einzuschätzen. Neuere Untersuchungen weisen darauf hin, dass angesichts der aktuellen energiesparenden und gut abdichtenden Bauweise selbst der in der deutschen Normung etablierte Wert von $0,5 \text{ h}^{-1}$ in der Praxis oftmals unterschritten wird, mit entsprechend negativen Konsequenzen für die Schadstoffkonzentrationen. Für die hier vorgenommene Abschätzung der Radonexposition wurde, übereinstimmend mit den in Tabelle 1 genannten DIN-Normen, der Wert von $0,5 \text{ h}^{-1}$ verwendet.

In die Bestimmung der Exhalationsrate geht als ein Parameter die Dichte des Materials ein (Gl. (1), (3)). Abweichend von der RP 112 wird hierfür nicht im Sinne einer oberen Abschätzung der für Beton typische hohe Wert von 2350 kg/m^3 verwendet, sondern reale Werte aus Herstellerangaben, der Literatur oder eigene Messergebnisse. Auch die in der RP 112 standardmäßig angenommene Wanddicke von 20 cm ist für einige Materialien an übliche Einbaumaße angepasst worden, wie in Anlage 4 angegeben.

Sollen die äußere Exposition und die durch Radon-Inhalation verursachte Exposition gemeinsam bewertet werden, ist die Umrechnung der Radonkonzentration in eine effektive Dosis erforderlich. Der dazu notwendige Dosiskonversionskoeffizient ist Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen. Für die Abschätzungen im Rahmen dieser Studie wurde der Koeffizient lt. UNSCEAR 2000² [15] verwendet, da dieser den bisherigen Kenntnisstand besser wiedergibt als die ICRP 65 [16]. Nach UNSCEAR 2000 entspricht - bei einer für die Bevölkerung unterstellten Aufenthaltszeit in Häusern von ca. 7000 Stunden pro Jahr (d. h. 19 Stunden pro Tag) - eine Radonkonzentration von 40 Bq/m^3 etwa einer effektiven Dosis von 1 mSv/a. Gemäß einem neueren Statement der ICRP [17] ist davon auszugehen, dass künftig noch höhere Dosiskonkoeffizienten verwendet werden. Danach wäre bereits bei einer Radonkonzentration in Innenräumen in Höhe von 30 Bq/m^3 von einer effektiven Dosis von etwa 1 mSv/a auszugehen. Demnach würde sich eine weitere Erhöhung der im Rahmen dieser Studie angegebenen Dosiswerte durch Radon-Inhalation von etwa 25 % ergeben.

² Dies ist lt. EU-Grundnormen [20] § 16 für die Abschätzung der internen Exposition zulässig, während für die externe Exposition die Vorgaben lt. ICRP 65 [16] benutzt werden müssen.

4.2 Äußere Strahlenexposition

Zur Abschätzung der baumaterialbedingten äußeren Strahlenexposition wurden die Rechnungen von Markkanen für die RP 96 [1], die auch die Basis der RP 112 [12] darstellen, nachvollzogen. Dort erfolgte eine Berechnung der Luftkerma für einzelne Wände in einem vorgegebenen Abstand von der Wandmitte mit Hilfe des Berger-Modells [18]. Dabei wurden unabhängig von dem betrachteten Material die Selbstabsorption und der Aufbaufaktor von Beton sowie jeweils mittlere Gamma-Energien für die berücksichtigten Nuklide der Zerfallsketten von Uran und Thorium verwendet. Die Gesamtdosis ergibt sich aus der Summierung der Beiträge der sechs Wände, die den in Tabelle 1 beschriebenen Modellraum bilden. Es wurde eine für Wandbildner vergleichsweise hohe Dichte von 2350 kg/m^3 und eine Dicke von 20 cm angenommen. Für Materialien, die nur in dünnen Schichten verwendet werden, wie z. B. Kacheln und Fliesen, ist eine Dichte von 2600 kg/m^3 und eine deutlich geringere Dicke von 3 cm zugrunde gelegt worden. Die sich für diese beiden Optionen ergebenden spezifischen Dosisraten sind in Tabelle 3 der RP 112 angegeben.

Zur Ermittlung der effektiven Dosis wurde des Weiteren von einer Aufenthaltszeit von 7000 Stunden ausgegangen und zur Umrechnung der Umgebungsäquivalentdosis in die effektive Dosis ein Konversionsfaktor von 0,7 Sv/Gy verwendet, beides ebenfalls in Übereinstimmung mit RP 112.

Vorsorglich muss darauf hingewiesen werden, dass bei der Abschätzung der äußeren Strahlenexposition der Einfluss der materialspezifisch unterschiedlichen Dichte - in Übereinstimmung mit der RP 112 - nicht berücksichtigt wurde. Dies liegt darin begründet, dass derzeit kein Instrumentarium dafür zur Verfügung steht. Korrekturen aufgrund der von der Annahme mit 2350 kg/m^3 abweichenden Dichte erfordern aufwändige Rechnungen, die den Rahmen dieses Berichts sprengen würden. Die hier verwendeten Annahmen führen bei Materialien mit geringerer Dichte zu überkonservativen Ergebnissen, so dass derzeit weitere Arbeiten zur verbesserten Abschätzung der äußeren Exposition laufen. Im Gegensatz dazu konnten bei der Radonexhalation aus Baumaterialien die jeweils typischen Werte für die Dichte in der Berechnung verwendet werden. Insofern besteht eine Inkonsistenz bei der Zusammenführung der Dosisbeiträge aus beiden Expositionspfaden.

Um eine Vorstellung des Einflusses unterschiedlicher Modellraumgrößen auf die spezifischen Dosisraten zu erhalten, wurden zusätzliche Rechnungen für die anderen in Tabelle 1 beschriebenen Modellräume durchgeführt. Die Umsetzung der Berechnungen erfolgte hier mittels des Programms Mathematica (Wolfram Research). Die sich gegenüber dem Modellraum der RP 112 ergebenden prozentualen Abweichungen der resultierenden Dosisraten bzw. der Dosis sind in Abbildung 3 grafisch dargestellt. Die Abweichungen bewegen sich im Bereich von maximal ca. 2 %, wenn ausschließlich vollständig geschlossene Modellräume gemäß Tabelle 1 betrachtet werden. Bei Einbeziehung einer Tür und eines Fensters in üblichen Maßen bei zwei verschiedenen Anordnungen ergeben sich weitere 5 % Abweichung. Diese Abweichungen sind im Vergleich mit den sonstigen Modellunsicherheiten als gering einzuschätzen.

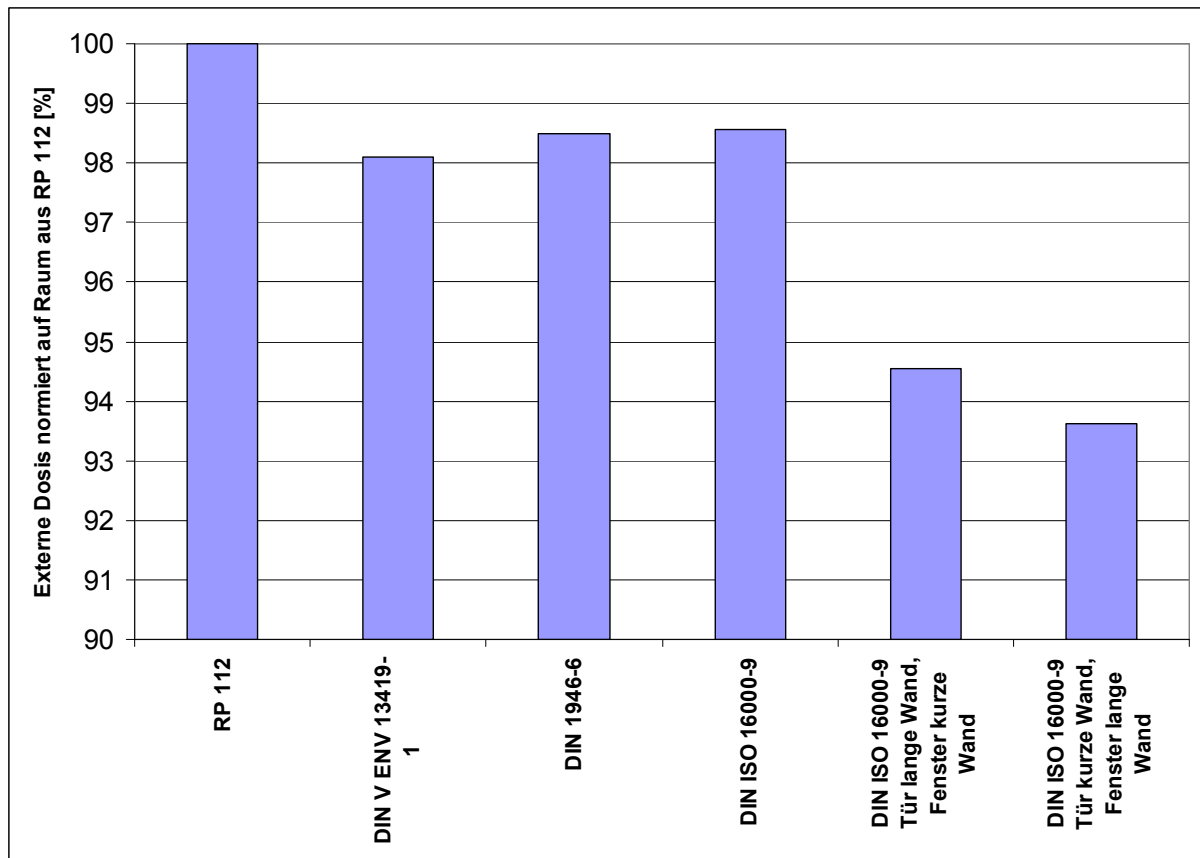


Abbildung 3: Externe Dosis in Abhängigkeit von der Raumgröße normiert zur RP 112

5 Messergebnisse

5.1 Spezifische Aktivität

Die Einzelwerte der gammaspektrometrisch ermittelten Messergebnisse aller Baumaterialproben aus dem Untersuchungsprogramm sind in Anlage 2 dargestellt. Dabei wurden die Ergebnisse von zwei Fremdlaboren nach einem Messvergleich zur Qualitätssicherung einbezogen. In Anlage 3 sind die Ergebnisse in Form der Spannweiten und der Medianwerte für die zwölf untersuchten Produktgruppen zusammenfassend dargestellt. Die Abbildungen 4 bis 6 enthalten zusätzlich Darstellungen der ermittelten Werte als eindimensionale Streudiagramme. Die Spannweite der Nuklidkonzentrationen von Ra-226, Th-232 (Th-228) und K-40 bildete die Basis zur Abschätzung der durch das Baumaterial bedingten äußeren Strahlenexposition, auf die in den Abschnitten 6.1 und 6.3 eingegangen wird.

Kalium-40

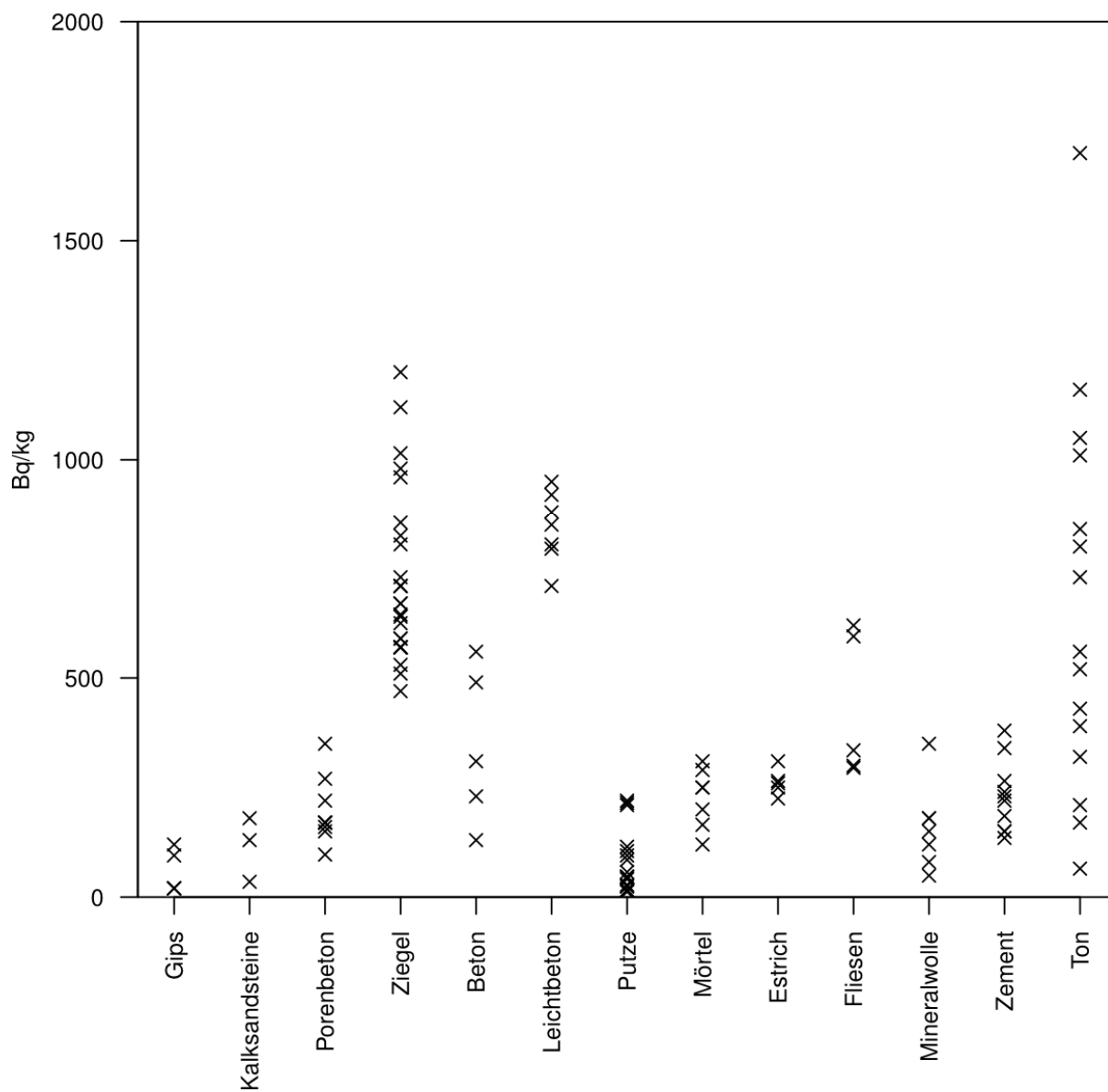


Abbildung 4: Kalium-40-Messergebnisse aller untersuchten Baumaterialien

Radium-226

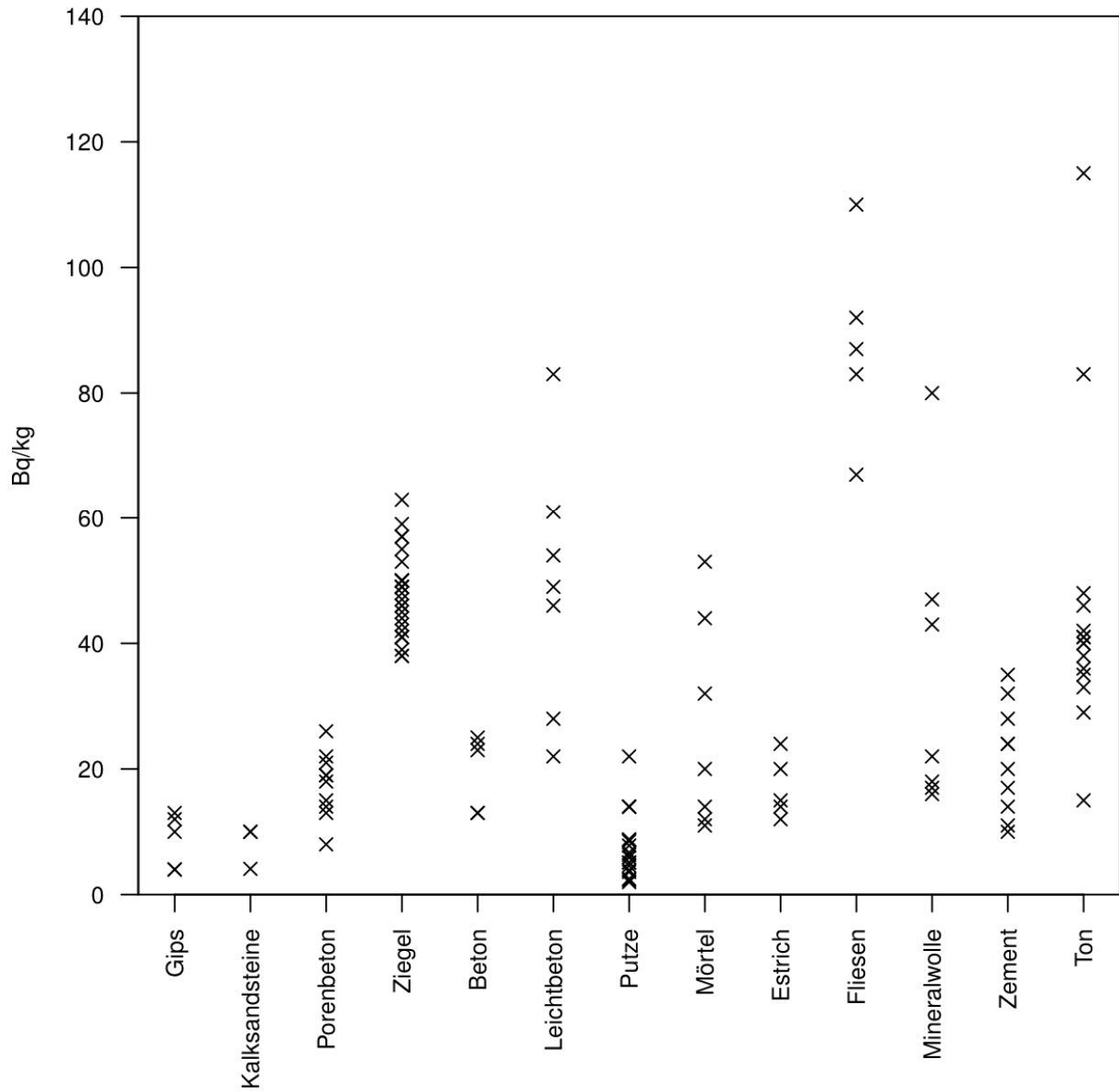


Abbildung 5: Radium-226-Messergebnisse aller untersuchten Baumaterialien

Thorium-228

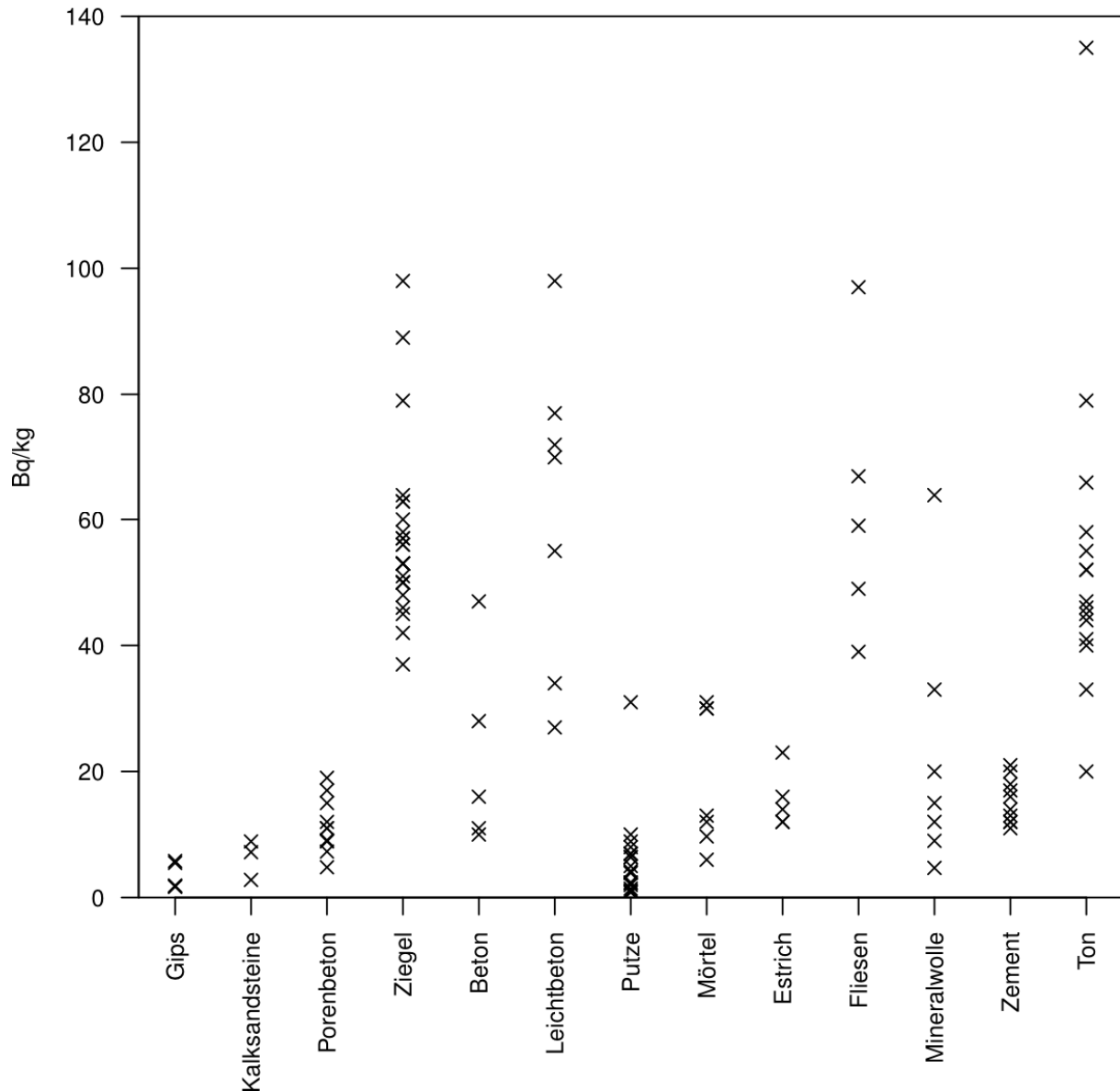


Abbildung 6: Thorium-228-Messergebnisse aller untersuchten Baumaterialien

Die Diagramme zeigen Anzahl und Verteilung der Messwerte von K-40, Ra-226 und Th-228 für die einzelnen Baumaterialgruppen. Daraus wird deutlich, dass die spezifischen Aktivitäten von Ra-226 bei den Massenbaustoffen (Wandbildner) in der Regel unterhalb von 80 Bq/kg und bei Th-232 unterhalb von 100 Bq/kg liegen. Einige Materialgruppen zeigen sogar ausnahmslos noch niedrigere Werte der spezifischen Aktivitäten für Ra-226 und Th-228 unterhalb von 50 Bq/kg. Dieser Wert repräsentiert den Durchschnittswert der natürlichen Radioaktivität dieser Radionuklide in Böden in Deutschland. Bei diesen Produkten treten mit Werten von maximal 400 Bq/kg gleichzeitig niedrige Aktivitäten für K-40 auf. Dazu zählen Kalksandsteine, Gipsprodukte, Porenbeton, Zement bzw. Zementmörtel, Putze und Estriche.

Bei den übrigen Materialien sind spezifische Aktivitäten für Ra-226 und Th-232 im Bereich von 50 Bq/kg bis maximal 135 Bq/kg ermittelt worden. Teilweise werden diese von einer höheren K-40-Aktivität oberhalb von 700 Bq/kg bis maximal 1700 Bq/kg begleitet. Das ist i. W. bei Ton sowie daraus gefertigten Produkten (Ziegel, Fliesen) sowie Leichtbeton wegen seines hohen Bimsanteils der Fall.

Erwartungsgemäß wurden keine Werte der spezifischen Aktivität für die Radionuklide der Zerfallsreihen von U-238 und Th-232 oberhalb von 200 Bq/kg gefunden. Dieser Wert gilt als oberer Bereich der spezifischen Aktivitäten dieser Radionuklide in natürlichen Böden in Deutschland. Bei geringeren Gehalten unterfallen zum Beispiel Rückstände aus industriellen Prozessen (NORM-Stoffe) nicht den Regelungen des Teils 3 der Strahlenschutzverordnung [21], auch wenn sie Baustoffen zugesetzt werden.

5.2 Radonexhalation

Eine Zusammenstellung der Ergebnisse der Emanations- und Diffusionsmessungen und der daraus berechneten Exhalationsraten enthält Anlage 4. Für die 22 von Fremdlaboren untersuchten Proben liegen nur gammaspektrometrische Werte vor. Daher konnten im BfS nur 98 der 120 Baumaterialien hinsichtlich ihrer möglichen Radonexhalation untersucht werden. Auf die Einbeziehung der Radonexhalationsmessungen eines Fremdlabors wurde verzichtet, da die Vergleichbarkeit der Methodik nicht gewährleistet war.

Die ermittelten Werte der flächenhaften Radonexhalation liegen überwiegend in einem niedrigen Bereich, meist unterhalb von 1 Bq/m²h. Ausnahmen in bestimmten Produktgruppen (Mörtel/Estriche/Putze, Ziegel, Porenbeton) weisen Werte von 1 - 3 Bq/m²h auf. Auffällig sind dagegen die Keramischen Rohstoffe mit Exhalationsraten von 2 - 22 Bq/m²h. Im Vergleich damit belegen die geringen Werte für Ziegel und Fliesen den Effekt des Brennens auf Tonmaterialien, bei dem die Exhalation durch Verglasung der Kornoberfläche unterdrückt wird.

Wie bereits im Abschnitt 4.1 dargestellt, wurde bei der Berechnung der Normraumluftkonzentration nicht die standardisierte Wanddicke von 20 cm gemäß RP 112 zugrunde gelegt, sondern es wurden, soweit verfügbar, realistische Werte verwendet. Hinsichtlich der Bewertung der Exhalationsrate und der Normraumkonzentration ist zu berücksichtigen, dass die Dichte linear und die Dicke annähernd linear in die Berechnung eingehen (Gl. (1), (3)). Bei abweichenden Dicken und Dichten können die Exhalationsraten und Raumluftkonzentration ins Verhältnis zu den angegebenen Dicken und Dichten gesetzt werden, d. h. eine Halbierung der Materialdichte halbiert die Exhalationsrate und die Normraumluftkonzentration.

5.3 Vergleich mit vorhandenen Messdaten und Literaturangaben

Zum Vergleich und zur Plausibilitätsprüfung der Messdaten von Baumaterialien aus den aktuellen Messungen wurden Werte aus früheren Programmen des BfS, aber auch anderen Quellen in die Betrachtung einbezogen.

Die Ergebnisse der aktuellen Untersuchungen stimmen mit den bisher publizierten Daten [1] - [3], [11], [12] recht gut überein³. Allerdings sind für einige der untersuchten Produktgruppen die aktuell gemessenen Spannweiten deutlich geringer als bei früheren Untersuchungen. Einer der Gründe liegt darin, dass in der Literatur auch Daten von Baumaterialien enthalten sind, denen zu Versuchszwecken NORM-Rückstände zugefügt wurden. Als weitere Ursache sind veränderte Rezepturen (z. B. bei Mörteln/Putzen) oder Ausgangsstoffe (z. B. bei Ziegeln/Klinkern) zu nennen. Bei Produktgruppen mit bekanntermaßen geringer Radionuklidkonzentration kann auch die Beschränkung auf eine vergleichsweise geringe Probenzahl (vgl. Abschnitt 2.3) zu einer kleineren Spannweite geführt haben.

Aus Strahlenschutzgründen ist es wichtig, den möglichen Ursachen nachzugehen, wenn früher gemessene hohe Gehalte in den Bereich bis zu 200 Bq/kg bei den heutigen Messungen nicht mehr festgestellt werden. Das ist bei Beton, Phosphogips und Ziegeln der Fall.

Die erhöhten Werte früherer Untersuchungen bei Beton lassen sich vollständig durch die dokumentierte damalige Einbeziehung von Prüfkörpern mit speziellen Zuschlägen (NORM-Rückstände, i. W. Schlacke) und auch die tatsächliche Verwendung solcher Rückstände in Baustoffen erklären, die ohne die heute gültigen strahlenschutzrechtlichen Beschränkungen zugesetzt wurden.

Bei der Gipsherstellung wird inzwischen radiumhaltiger Phosphogips nicht mehr verwendet, da in Deutschland die Phosphordüngemittelherstellung aus Rohphosphat nicht mehr stattfindet und überdies als preiswerte Alternative genügend Rauchgasentschwefelungs(REA)-Gips verfügbar ist.

Im Unterschied dazu haben sich die auch schon früher gefundenen höheren Radionuklidgehalte im Leichtbeton bei unseren Untersuchungen bestätigt. Sie sind mit dem hohen Anteil von Bims als vulkanisch entstandenem natürlichen Zuschlag zu erklären, der bisher keiner Regelung unterliegt. Der neue Vorschlag zur EU-Grundnormenrichtlinie im Strahlenschutz sieht allerdings eine Einbeziehung von Natursteinen vulkanischen Ursprunges in den Regelungsbereich für Baustoffe vor (vgl. Abschnitt 7.4)

Im Falle der Ziegel sind genaue Informationen zur Produktion und den früher und derzeit bestehenden Herstellerwerken im Bericht des Bundesverbandes der Deutschen Ziegelindustrie e.V. [19] dargestellt. Daraus wird deutlich, dass viele Hersteller aus der ehemaligen DDR, bei denen früher erhöhte Werte für Radium-226, Thorium-232 oder Kalium-40 ermittelt wurden, zwischenzeitlich ihre Produktion aus wirtschaftlichen Gründen eingestellt haben oder Ziegelarten herstellen, die nicht in Innenräumen verwendet werden (Klinker, Dachziegel etc.). Inwiefern damals auch Rotschlamm aus der Aluminiumherstellung zur besseren Farbgebung verwendet wurde, ist nicht mehr zweifelsfrei nachvollziehbar. Dies wäre jedoch eine weitere plausible Erklärung für die damaligen hohen Werte. Heutige Ziegelhersteller aus den neuen Bundesländern sind zwar bei der Beprobung berücksichtigt worden, ihr Produktionsumfang ist jedoch sehr gering gegenüber den vorwiegend im Südwesten Deutschlands angesiedelten großen Produzenten. Damit sind die früheren Ergeb-

³ Bei verschiedenen Publikationen wird teilweise auf dieselben Daten zurückgegriffen.

nisse mit der aktuellen Erhebung, die sich ausschließlich auf die für Innenräume relevanten Hintermauerziegel bezieht, nur noch bedingt vergleichbar.

Im Rahmen der im Abschnitt 2.3 erwähnten Zusammenarbeit in der DIBt-Projektgruppe wurde im Jahr 2009 ein ergänzendes Untersuchungsprogramm unabhängig von den Verbänden der Bauindustrie durch eine Gutachterfirma durchgeführt. Die Auswahl der auf deutschen Baumärkten verfügbaren zufällig entnommenen ca. 80 Proben aller Baumaterialgruppen erfolgte nach geologischen Gesichtspunkten, wobei aus vier ausgewählten Regionen Deutschlands jeweils etwa die gleiche Probenzahl zugrunde gelegt wurde. Diese Untersuchung diente der Überprüfung des BfS-Messprogramms und der Gewinnung zusätzlicher Daten. Die Messungen der natürlichen Radioaktivität (spezifische Aktivitäten, Radonexhalation) erfolgten nach den gleichen Methoden wie im BfS. Die Spannweite der Messergebnisse bei den einzelnen Produktgruppen stimmte gut mit der im Rahmen unseres Messprogramms ermittelten überein. Dies stützt die Annahme der Repräsentativität der in Zusammenarbeit mit dem bbs erfolgten Probenauswahl für das derzeitige Spektrum in Deutschland produzierter Baumaterialien.

6 Strahlenexposition

6.1 Äußere Exposition

Die Ergebnisse der Dosis-schätzungen für die äußere Exposition durch Gammastrahlung aus den Baumaterialien, die sich bei Anwendung der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Modelle und Parameter ergeben, sind für die einzelnen Baustoffgruppen in der folgenden Tabelle 2 in Form der ermittelten Spannweiten zusammenfassend dargestellt. Dabei fanden für beide Verwendungsoptionen (Wandbildner und Einsatz in beschränktem Umfang) differierende spezifische Dosisraten gemäß Anlage 2 der RP 112 Berücksichtigung, vgl. Abschnitt 4.2.

Bei der Bewertung dieser Ergebnisse aus Sicht des Strahlenschutzes ist zu beachten, dass grundsätzlich nur solche Dosisbeiträge von Relevanz sind, die das Niveau der allgegenwärtigen natürlichen Untergrundstrahlung übersteigen. Nach RP 112 wird dafür pauschal ein mittlerer Wert für die Umgebungsäquivalentdosisleistung in Europa in Höhe von 50 Nanosievert pro Stunde (nSv/h) bzw. 0,245 Millisievert pro Jahr (mSv/a) angesetzt, der bei den Wandbildnern in Abzug gebracht wird. Werden nur die über das angenommene natürliche Niveau hinausgehenden Expositionsbeiträge betrachtet, so ergeben sich die in Spalte 3 von Tabelle 2 dargestellten Werte.

Tabelle 2: Mögliche Dosisbeiträge durch äußere Gammastrahlung aus Baumaterialien

Baumaterial	äußere Exposition [mSv/a] (ohne Untergrundabzug)	äußere Exposition [mSv/a] (nach Untergrundabzug)
Gipsprodukte	0,03 – 0,14	0
Kalksandstein	0,05 – 0,16	0
Porenbeton	0,1 - 0,3	< 0,05
Putze*	0,001 – 0,04	0
Mörtel*	0,02 – 0,06	0
Estriche**	0,05 - 0,09	0
Fliesen/Platten*	0,08 – 0,14	0
Mineralwolle*	< 0,3	< 0,05
Zement	< 0,3	< 0,05
Ziegel	0,56 – 1,2	0,32 – 0,95
Leichtbeton	0,59 – 1,24	0,35 – 1,0
Beton (eigene Messwerte)	0,17 – 0,58	< 0,34
Beton (Literatur [30]/Schätzwerte)	0,15 – 1,3	< 1,06

* in geringer Menge verwendetes Baumaterial

** nur als Fußboden

Für die Produktgruppe „Beton“ wurden neben den wenigen eigenen Messwerten und Literaturangaben auch rechnerische Abschätzungen einbezogen, indem aus den Massenanteilen laut Rezeptur die zu erwartende spezifische Aktivität der Endprodukte und die resultierenden Dosen errechnet wurden. Dabei fand die gesamte Spannweite der spezifischen Aktivitäten natürlicher Zuschläge (Kies, Sand) und von künstlichen Zusätzen (Flugasche, Hochofenzement) zur Betonherstellung Berücksichtigung.

Tabelle 2 zeigt, dass die durch aus den Baustoffen austretende Gammastrahlung hervorgerufene effektive Dosis bei den meisten Baumaterialgruppen unterhalb von 1 mSv/a liegen. Dieser Wert kann bei Ziegeln, Leichtbeton und Beton in Einzelfällen überschritten werden (Spalte 2). Unter Berücksichtigung des natürlichen Untergrundes (Spalte 3) wird bei den untersuchten Baustoffen der für die strahlenschutzfachliche Bewertung relevante Wert von 1 mSv/a in Ausnahmefällen erreicht oder unwesentlich überschritten. Näheres hierzu enthält Abschnitt 7.

6.2 Radonexposition

Die nach der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Methodik ermittelten baumaterialbedingten Beiträge zur Radonaktivitätskonzentration im angenommenen Normraum liegen ausnahmslos unterhalb von 20 Bq/m³ und damit insgesamt auf einem niedrigen Konzentrationsniveau. Sie betragen bei fast allen Baustoffen weniger als 1 - 8 Bq/m³, meist sogar nur < 1 - 4 Bq/m³. Lediglich für einzelne Materialien (Zementmörtel) wurden Werte von 11 und 14 Bq/m³ ermittelt.

Dagegen ergaben sich für die zusätzlich zu den Standardbaustoffen untersuchten keramischen Rohstoffe (i. W. spezielle Tone) deutlich höhere Radonkonzentrationen

bis 47 Bq/m^3 . Da es sich hierbei um Rohstoffe handelt, die als Bauprodukt vorwiegend in gebrannter Form (für Fliesen, Ziegel) eingesetzt werden, ist dies lediglich als ergänzende Information von Interesse und zeigt deutlich, welchen entscheidenden Einfluss die Herstellungstechnologie, wie z. B. das Brennen, auf die Kornoberfläche und das Porenvolumen und damit auch auf die Radonfreisetzung hat. Im Falle der Verwendung von Ton (und gegebenenfalls auch Lehm) in seiner natürlichen Form sollte allerdings die damit gegebenenfalls verbundene erhöhte baumaterialbedingte Radonexposition in derartigen Häusern beachtet werden.

Die sich nach der beschriebenen Methodik aus den ermittelten Radonexhalationsraten ergebenden Beiträge der Radoninhalation zur effektiven Dosis liegen in der Regel deutlich unterhalb von $0,5 \text{ mSv/a}$. In der folgenden Zusammenfassung werden die untersuchten Produktgruppen entsprechend der ermittelten Spannweiten in drei Klassen von Konzentrationen bzw. effektiven Dosen eingeteilt:

Radonkonzentrationen von $0 - 4 \text{ Bq/m}^3$: Dosisbeitrag bis $0,1 \text{ mSv/a}$:

- Fliesen
- Gipsprodukte
- Kalksandstein
- Putze, Mörtel, Estriche
- Porenbeton

Radonkonzentrationen von $1 - 9 \text{ Bq/m}^3$: Dosisbeitrag bis $0,2 \text{ mSv/a}$:

- Ziegel

Radonkonzentrationen von $1 - 14 \text{ Bq/m}^3$: Dosisbeitrag bis $0,35 \text{ mSv/a}$:

- Zement
- Leichtbeton
- Beton

Die Sonderstellung von Betonen hinsichtlich der Repräsentativität der Ergebnisse wurde bereits in den Abschnitten 2.3 und 6.1 betont. Die Radonexhalation von Betonen hängt sehr stark von ihrer Rezeptur und Verarbeitung (Porenstruktur) ab. Aus der Literatur ergab sich eine Spannweite für den Radonbeitrag von bis zu 20 Bq/m^3 , in Extremfällen (Hüttenbeton mit 80 % Anteil Hüttensand) von 30 Bq/m^3 , was gemäß UNSCEAR [15] einer Dosis von bis zu $0,5 \text{ mSv/a}$, bei Hüttenbeton von $0,8 \text{ mSv/a}$ entspricht. Selbst unter Einbeziehung dieser Kenntnisse sind unter Berücksichtigung des Produktspektrums der Betone keine repräsentativen Aussagen zur Radonexposition möglich. Im Unterschied zur Bestimmung der äußeren Strahlenexposition (gemäß Abschnitt 6.1) ist eine rechnerische Abschätzung der Radonexhalation auf der Grundlagen der Rezepturen und der Radium-226-Gehalte für konkrete Baustoffe wegen der Variabilität der Emanationskoeffizienten nicht zuverlässig möglich. Dazu ist eine ergänzende Untersuchung von Betonen erforderlich, die jedoch den Rahmen dieses Messprogramms gesprengt hätte.

Allerdings führt eine einfache generische Abschätzung unter Einbeziehung der in den Abschnitten 3.2 und 4.1 dargestellte Zusammenhänge und Verwendung mittlerer Parameter für Beton zu folgender Beziehung:

$$C_{Rn} \approx 0,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot C_{Ra}$$

Dies zeigt, dass schon eine moderate Radiumaktivität im Bereich des natürlichen Untergrundes (ca. 50 Bq/kg) zu Radonkonzentrationen führen kann, die die auf der Grundlage unserer Untersuchungen ermittelten Werte deutlich überschreiten.

Daraus wird deutlich, dass eine realistische Bewertung der durch Radonexhalation aus Betonen resultierenden Strahlenexposition letztendlich nur über Einzelfallprüfungen möglich wäre.

6.3 Gesamtexposition

Aus den bisher dargestellten Ergebnissen lassen sich die Spannweiten der möglichen Dosisbeiträge aus der Summe der beiden relevanten Expositionspfade für die einzelnen Baustoffgruppen abschätzen. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Mögliche Dosisbeiträge aus den Baumaterialien

Baumaterial	externe Exposition (ohne Untergrund abzug)	Radon-inhalation (interne Exposition)	mögliche Gesamtdosis (ohne Untergrund abzug)	mögliche Gesamtdosis (nach Untergrund abzug)
	Dosisbereich [mSv/a]			
Gipsprodukte	0,03 – 0,14	0,02	0,05 – 0,16	0
Kalksandstein	0,05 – 0,16	0,02	0,07 – 0,18	0
Porenbeton	0,1 - 0,3	0,02 - 0,1	0,1 - 0,4	< 0,15
Putze*	0,001 – 0,04	0,02	0,02 – 0,06	0
Mörtel*	0,02 – 0,06	0,02	0,04 – 0,08	0
Estriche**	0,05 -0,09	0,02 - 0,05	0,07 – 0,14	0
Fliesen/Platten*	0,08 – 0,14	0,002	0,08 - 0,14	0
Mineralwolle*	< 0,3	-	< 0,3	< 0,05
Zement	< 0,3	0,35	bis ca. 0,6	bis 0,35
Ziegel	0,56 – 1,2	bis 0,3	0,6 - 1,5	bis 1,2
Leichtbeton	0,59 – 1,24	0,35	0,9 - 1,6	bis 1,4
Beton: eigene Messwerte	0,17 – 0,58	0,1 - 0,35	0,27 – 0,92	bis 0,68
Literat./Schätzwerte	0,15 – 1,3	0,2 – 0,8	bis 2,1	bis 1,9

* in geringer Menge verwendetes Baumaterial

** nur als Fußboden

Gemäß Abschnitt 6.1 sind für die strahlenschutzfachliche Bewertung der externen Strahlenexposition nur Beiträge relevant, die den Wert 0,245 mSv/a übersteigen. In der Spalte 5 von Tabelle 3 ist dies unter Bezug auf Spalte 3 der Tabelle 2 für die Gesamtexposition berücksichtigt worden. Auf die im Abschnitt 4.2 erwähnte Inkonsistenz bei der Addition der Dosisbeiträge sei nochmals hingewiesen.

Wie Tabelle 3 zeigt, wird für die Mehrzahl der Baumaterialgruppen nach Abzug des Untergrundwertes eine Gesamtdosis unterhalb von 1 mSv/a abgeschätzt. Dieser Wert kann bei den letzten drei Produktgruppen, die allerdings die am meisten ver-

wendeten Produkte darstellen, von einigen Produkten überschritten werden. In keinem Fall wird eine Gesamtdosis von 2 mSv/a erreicht.

7 Bewertung natürlicher Radioaktivität in Baustoffen

7.1 Überblick zu bestehenden strahlenschutzrechtlichen Anforderungen

In Deutschland fehlen bisher allgemein verbindliche Regeln zur Bewertung der von Bauprodukten ausgehenden Strahlenexposition und für deren Ermittlung. Diese sind jedoch für die vom Deutschen Institut für Bautechnik zu erteilenden bauaufsichtlichen Zulassungen entsprechend der Musterbauordnung (<http://www.bauordnungen.de/html/musterbauordnung.html>) und den Landesbauordnungen nötig.

Eine Ausnahme bilden lediglich die in Umsetzung der EU-Grundnormenrichtlinie für den Strahlenschutz von 1996 [20] in die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) [21] von 2001 (Teil 3, Kapitel 3) erstmals aufgenommenen speziellen Regelungen zum Schutz vor erhöhter Strahlenexposition bei der Beseitigung oder Verwertung von Rückständen aus industriellen Prozessen, in denen erhöhte Gehalte natürlicher Radionuklide (NORM) auftreten. Teil dieser Regelungen ist die Begrenzung der Menge und des Radionuklidgehalts solcher Rückstände als Zuschlagstoff für Baumaterialien. Ziel ist es sicherzustellen, dass die *durch Verwendung dieser Rückstände* verursachte zusätzliche Strahlenexposition der Bevölkerung auf Werte unterhalb von 1 mSv/a beschränkt bleibt. Der Beitrag der Bestandteile natürlichen Ursprungs (Sand, Kies etc.) bleibt dabei unberücksichtigt und es werden lediglich die Radionuklide der Uran-238 und der Thorium-232 – Zerfallsreihen betrachtet, nicht jedoch das Kalium-40. Eine auszugsweise Auflistung der zu berücksichtigenden Rückstände gemäß StrlSchV Anlage XII Teil A und der in Teil B genannten Überwachungsgrenzen der spezifischen Aktivitäten in Verbindung mit festgelegten Verwertungsszenarien enthält Anlage 1.

Seit September 2011 liegt ein Vorschlag zur neuen EU-Grundnormenrichtlinie für den Strahlenschutz [22] vor, der im Vergleich zu der derzeit gültigen Richtlinie genauere Festlegungen zur Berücksichtigung der natürlichen Radioaktivität enthält und auch verbindliche Regelungen für Baustoffe einfordert. Eine ausführliche Diskussion erfolgt in Abschnitt 7.4.

Basierend auf der Publikation Radiation Protection (RP) 96 [1] wurde 1999 mit der RP 112 „Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials“ [12] eine Empfehlung der Europäischen Kommission veröffentlicht, die einen Bewertungsansatz für Baustoffe hinsichtlich des Strahlenschutzes enthielt, der auch die Grundlage für den geplanten Regelungsansatz der neuen EU-Grundnormenrichtlinie darstellt. Näheres wird unter 7.2 erläutert. Obwohl diese EU-Empfehlung unverbindlich ist, wird sie in Europa zur Bewertung von Baumaterialien und zur Beschränkung der von ihnen ausgehenden Strahlenexposition weitgehend akzeptiert und angewendet.

Die bislang einzige rechtsverbindliche *und bei der EU notifizierte* Norm existiert in Österreich, die ÖNORM S 5200 „Radioaktivität in Baumaterialien“ von 2009 [14]. Einzelheiten werden in Abschnitt 7.3 vorgestellt. Regelungen zur Begrenzung der Radioaktivität in Baumaterialien gibt es darüber hinaus in Luxemburg, Polen und Finnland [23], [24], [25]. Sie sind allerdings nicht bei der EU notifiziert worden,

werden aus diesem Grund von den EU-Normungsgremien grundsätzlich nicht berücksichtigt. Ebenso wie die RP 112 regeln sie den Radonbeitrag aus Baumaterialien nicht explizit, was im Hinblick auf mögliche Expositionsbeiträge durch diesen Pfad vom BfS als unzureichend angesehen wird.

7.2 EU-Empfehlung Radiation Protection 112

In der im Strahlenschutz etablierten EU-Empfehlung Radiation Protection (RP) 112 [12] wird, wie im Abschnitt 4.1 erläutert, zur einheitlichen, generischen Bewertung der Baumaterialien der dort beschriebene Standard-Modellraum zugrunde gelegt. Nur die äußere Exposition durch aus den Baustoffen austretende Gammastrahlung wird explizit betrachtet. Zur Vereinfachung der Prüfungen wird als Hilfsgröße der so genannte Indexwert I wie folgt definiert und zur Bewertung verwendet:

$$I = \frac{C_{Ra}}{300 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{Th}}{200 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_K}{3000 \text{ Bq/kg}} \leq 1 \quad (5)$$

Dabei werden mit C die spezifischen Aktivitäten der einzelnen Radionuklide in Bq/kg bezeichnet. Diese Indexformel wurde auf der Grundlage des beschriebenen Modellraums abgeleitet. Bei Erfüllung der Ungleichung, also wenn $I \leq 1$ gilt, kann davon ausgegangen werden, dass die Verwendung dieser Baumaterialien bei Bewohnern höchstens zu einer Dosis führt, die kleiner als 1 mSv/a ist. Dies ist der dosimetrische Bewertungsmaßstab nach RP 112. Berücksichtigt wird mit der Indexformel nur die Strahlenexposition, die man beim Aufenthalt in Gebäuden *zusätzlich* zur mittleren externen Dosis im Freien erhält. Als ein für Europa typischer Wert des natürlichen Untergrundes wurde hierin eine Umgebungsäquivalentdosisleistung von 50 nSv/h verwendet, vgl. Abschnitt 6.1.

RP 112 unterscheidet zwei Dosisbereiche, die zu unterschiedlichen Konsequenzen hinsichtlich der Kontrollen führen:

Ausschlusslevel (keine weiteren Kontrollen)	< 0,3 mSv/a ($I \leq 0,5$)
Dosiskriterium für weitere Kontrollen:	0,3 - 1 mSv/a ($I \leq 1,0$) ⁴

Außerdem wird in der RP 112 eine Unterscheidung hinsichtlich des Umfanges der Verwendung von Baumaterialien in Innenräumen getroffen, da Wandbildner als Materialien, die in großen Mengen Verwendung finden („materials used in bulk amounts“) und solche mit dünnflächiger/geringer Verwendung („superficial and other materials with restricted use“), bei sonst gleichen Bedingungen zu deutlich unterschiedlichen Dosisbeiträgen führen. Dies wird dadurch berücksichtigt, dass für nur in beschränktem Umfang eingesetzte Materialien (z. B. Fliesen, Platten) höhere Indexwerte zugelassen werden. Als Ausschlusskriterium gilt in diesen Fällen $I \leq 2$ und als Kriterium für weitere Kontrollen $I \leq 6$.

Die Indexformel stellt jedoch keinesfalls eine Zulassungsgrenze dar, sondern dient lediglich als erstes Prüfinstrument im Rahmen von Screenings. Überschreitet der

⁴ Wegen der Berücksichtigung des Untergrundwertes sind die Zahlenwerte der Dosis in Millisievert pro Jahr und des Indexwertes mit Ausnahme des Falls von $I=1$ nicht identisch.

Index die angegebenen Werte von 1 bzw. 6, so ist eine Dosisabschätzung unter Zugrundelegung typischer Nutzungsszenarien vorzunehmen.

Der neben der externen Exposition möglichen Radonexposition aus Baumaterialien wird in der RP 112 lediglich mit einer Annahme Rechnung getragen. Es wird davon ausgegangen, dass bei Einhaltung der angegebenen Bedingung zum maximalen Gehalt des Radon-Mutternuklids Radium-226 das in der EU-Empfehlung bezüglich des Radons in Innenräumen vom 21. Februar 1990 (90/143 EURATOM) [26] für Neubauten empfohlene Designlevel von 200 Bq/m^3 (bestehend aus dem geogenen und dem aus Baumaterialien exhalierten Radon) sicher unterschritten wird.

Klassifizierung der Messergebnisse dieser Studie nach der Indexformel

Aus den Messwerten der spezifischen Aktivität von K-40, Ra-226 und Th-232 wurden die Indexwerte für die von uns untersuchten Baustoffe errechnet. Sie sind in Anlage 2 für alle untersuchten Baustoffe angegeben. Auf Grund der Wahl einiger Parameter, insbesondere der vergleichsweise hohen Dichte der Baustoffe (vgl. Abschnitt 4.1), die bei der Ableitung der Indexformel verwendet wurden ist davon auszugehen, dass die errechneten Werte im Sinne des Strahlenschutzes konservativ sind, das heißt, dass die tatsächliche Strahlenexposition tendenziell überschätzt wird. Die Nichteinhaltung der Prüfbedingung (5) ist deshalb nicht gleichbedeutend mit der Nichteinhaltung des Dosiskriteriums. Vielmehr wird davon ausgegangen, dass in vielen Fällen schon auf Grund der in den Modellen pauschal angenommenen hohen Dichte der Baustoffe die tatsächliche Exposition unter 1 mSv/a bleibt, auch wenn die Prüfbedingung nicht eingehalten wird. Um dies zu prüfen, sind dann weitere Untersuchungen erforderlich.

Aus Anlage 2 ist ersichtlich, dass bei den Proben folgender Baumaterialien der Index von 0,5 eingehalten wird, bei dem von einer resultierenden äußeren Exposition $< 0,3 \text{ mSv/a}$ ausgegangen werden kann und damit gemäß RP 112 keine weiteren Prüfungen erforderlich sind:

- Gipsprodukte (Index: 0,03 – 0,11)
- Kalksandstein (Index: 0,04 – 0,14)
- Porenbeton (Index: 0,08 – 0,27)
- Mörtel (Index: 0,14 – 0,42)
- Putze (Index: 0,02 – 0,26)
- Estriche (Index: 0,17 – 0,35)
- Zement (Index: 0,14 – 0,35).

Wegen ihrer Verwendung als Oberflächenmaterial bzw. wegen der geringen Einbaumengen kann für folgende Materialgruppen der Index von 2 in Anspruch genommen werden. Der Wert 2 wird jedoch von allen untersuchten Proben dieser Gruppen weit unterschritten, d. h. auch für diese Materialien wären keine weiteren Prüfungen erforderlich:

- Fliesen/Platten/Steingut (Index: 0,52 – 0,9)
- Mineralwolle (Index: 0,10 – 0,7).

Indexwerte oberhalb von 0,5, jedoch < 1 oder mit geringfügiger Überschreitung von 1 ergaben sich bei den nachfolgend genannten Produkten:

- Ziegel (Index von 0,47 – 1,03)
- Leichtbeton (Index von 0,50 - 1,03)
- Beton (Index von 0,14 – 1,1*)

*) unter Verwendung sowohl eigener Messungen als auch der rechnerischen Abschätzungen unter Verwendung normierter Rezepturen und der bekannten Messwerte dieser Ausgangsstoffe (s. Abschnitt 2.3). Dabei wurde davon ausgegangen, dass auf die Verwendung von Granit oder Basalt und anderen Erstarrungsgesteinen als Zuschlag aus ökonomischen Erwägungen verzichtet wird. Anderenfalls würden sich deutlich höhere Indexwerte ergeben.

Nach RP 112 sind für diese Produkte weitere Kontrollen zu empfehlen, da die Beiträge zur äußeren Exposition zwischen 0,3 mSv/a und 1 mSv/a liegen können.

Zur ergänzenden Information wurden Proben der Rohstoffe Ton, Feldspat und Kaolin untersucht, die jedoch nicht in reiner Form verwendet und daher nicht als Finalbaustoff bewertet werden können. Diese Materialproben weisen die höchsten Indexwerte zwischen 0,4 bis 1,6 auf.

7.3 Österreichische Norm S 5200 „Radioaktivität in Baumaterialien“ (ÖNORM)

Mit der Österreichischen Norm S 5200 „Radioaktivität in Baumaterialien“ (ÖNORM) [14] existiert in Österreich ein rechtsverbindliches und bei der EU notifiziertes Regelwerk, welches sowohl die externe Strahlenexposition als auch den baumaterialbedingten Beitrag zur Inhalation von Radon-222 explizit berücksichtigt, und zwar summarisch mit Hilfe einer angepassten Indexformel auf Basis der RP 112. Allerdings wird die maximal tolerable Dosis aus beiden Expositionspfaden mit 2,2 mSv/a deutlich höher angesetzt als in der RP 112. Das Dosiskriterium von 2,2 mSv/a ergibt sich als Summe aus einer nicht beeinflussbaren Hintergrundexposition im Freien, die für Österreich mit 1,2 mSv/a angegeben wird, sowie einer tolerierten Exposition durch äußere Strahlung und Inhalation von baumaterialbedingtem Radon und seinen Zerfallsprodukten, die in Summe eine Dosis von 1 mSv/a nicht überschreiten sollte. Zur Beurteilung der Baumaterialien ist das Gesamtdosiskriterium entscheidend. Die rechnerische Zusammenführung beider Komponenten zum Indexwert I , der ebenfalls als Hilfsgröße zur Dosisabschätzung verwendet wird, lautet in der ÖNORM wie folgt:

$$I = (1 + 0,07 \cdot \varepsilon \cdot \rho \cdot d) \cdot \frac{C_{Ra}}{880 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{Th}}{530 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_K}{8800 \text{ Bq/kg}} \quad (6)$$

In dieser Beziehung stehen ε für den Emanationskoeffizienten (dimensionslos), ρ für die Rohdichte (in kg/m^3) und d für die Einbaudicke (in m). Die Erhöhung des Dosiskriteriums drückt sich in den entsprechend erhöhten Werten der spezifischen Aktivität in den Nennern der drei Summanden aus.

In Formel (6) beschreibt der zweite Summand innerhalb der Klammern gemeinsam mit der spezifischen Aktivität von Ra-226 den Radonbeitrag zur baumaterialbedingten Strahlenexposition. Durch die Berücksichtigung der Materialparameter ε , ρ und d ist eine für einzelne Baustoffe angepasste realitätsnahe Bewertung bezüglich der

Radonexposition möglich. Bei der Berechnung der externen Exposition erfolgt jedoch keine entsprechende Berücksichtigung des Einflusses der Dichte und der Einbaudicke.

Die ÖNORM beinhaltet keine Vorschrift zur Bestimmung des Emanationskoeffizienten. Dieser kann bei fehlenden Messresultaten pauschal auf 0,1 festgelegt werden. Wie im Abschnitt 4.1 diskutiert, wird ein Wert der für die Radonkonzentration wesentlichen Luftwechselrate von $0,7 \text{ h}^{-1}$ unterstellt.

Ein möglicher Nachteil des Bewertungsansatzes der ÖNORM ist, dass infolge des erhöhten Dosiskriteriums und der Summation beider Dosisbeiträge Situationen vorstellbar sind, in denen ein Baustoff, der eine externe Exposition von mehr als einem Millisievert verursacht, aber nur wenig Radon exhaliert, zwar die Bedingung der ÖNORM erfüllt, nicht aber die der RP 112. Dies könnte zu Problemen beim Export solcher Baustoffe führen. Auch die in der Vergangenheit mehrfach vorgenommenen Veränderungen des Dosiskonversionskoeffizienten für die dosimetrische Bewertung der Radonexposition sind aus Sicht des BfS ein Nachteil dieses Ansatzes. Eine auf die Radonexposition beziehungsweise die zu erwartende Radonaktivitätskonzentration im Modellraum bezogene Bewertung könnte diesen möglichen Nachteil verhindern.

7.4 Entwurf der neuen EU-Grundnormenrichtlinie im Strahlenschutz

Am 29.09.2011 hat die EU-Kommission den Vorschlag einer neuen „Richtlinie des Rates zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung“ gebilligt [22]. Obwohl diesem Vorschlag noch ein längerer Diskussionsprozess bevorsteht, werden im Folgenden die wesentlichen auf Baumaterialien bezogenen Inhalte und die sich daraus voraussichtlich künftig ergebenden Aufgaben für Behörden und Industrie zusammengefasst und bewertet.

Generell ist zu bemerken, dass sich der EU-Vorschlag bezüglich der Baumaterialien stark an der Empfehlung RP 112 (siehe Abschnitt 7.2) orientiert, jedoch auf die dort vorgenommene Zweiteilung des Dosisbereiches unterhalb von 1 mSv/a mit den beschriebenen Konsequenzen für die Überwachung verzichtet. Es ist aber eine Einteilung in zwei Kategorien von Baustoffen (A und B) vorgesehen, je nachdem, ob der Indexwert I eingehalten oder überschritten wird, wobei I für Wandbildner den Wert 1 annimmt und für Materialien mit dünnflächiger/geringer Verwendung den Wert 6 (vgl. Abschnitt 7.2). In Abhängigkeit davon, welche Nutzungsklasse zutrifft (bzw. welcher Index zur Klassifizierung herangezogen wird), ist eine weitere Aufteilung in die Klassen A1 bzw. B1 (Wandbildner) oder A2 bzw. B2 (Materialien mit dünnflächiger/geringer Verwendung) vorgesehen, vgl. Anhang VII. Die entsprechende Zuordnung der Nutzungsklassen soll durch die zuständige nationale Behörde erfolgen.

Im Einzelnen wird in Artikel 75 verbindlich gefordert, dass die *zuständigen nationalen Behörden* eine Liste von Baumaterialien erstellen sollen, die nach den bisherigen Erfahrungen wegen ihrer Gammastrahlung (unter Beachtung der indikativen Listen in Anhang XI.1 und XI.2 für natürliche Ausgangsstoffe bzw. NORM-Zusätze) oder der Radonexhalation für den Strahlenschutz relevant sind.

Die Baustoffindustrie wäre danach verpflichtet, für die durch die Behörden gelisteten Materialien - und nur für diese - vor deren Markteinführung

- die spezifischen Aktivitäten von K-40, Ra-226 und Th-232(228) zu messen, um den Aktivitätsindex I ermitteln zu können und
- beides der zuständigen Behörde mitzuteilen.

Materialien der Kategorie A, die wegen der Konservativität der Indexformel mit hoher Wahrscheinlichkeit zu keinen Strahlenexpositionen oberhalb von 1 mSv/a für die äußere Strahlenexposition im Gebäude zusätzlich zur äußere Strahlenexposition im Freien führen können, sind *auf nationaler Ebene* von allen Forderungen – unter Vorbehalt möglicher Restriktionen bezüglich ihrer Radonabgabe – aus Sicht des Strahlenschutzes befreit und sollen nur bei Bedarf hinsichtlich möglicher Änderungen der Aktivitätskonzentrationen überprüft werden. *Auf EU-Ebene* sollen alle Baumaterialien der Kategorie A uneingeschränkt auf dem Markt gehandelt werden können und erfordern im Zielland keine weiteren Prüfungen vor der Markteinführung.

Für die identifizierten Baumaterialien der Kategorie „B“, die eine Dosis oberhalb von 1 mSv/a verursachen könnten, ist eine genauere Prüfung erforderlich. Wenn der Nachweis erbracht werden kann, dass die resultierende Dosis von 1 mSv/a trotzdem eingehalten wird, sind keine weiteren Maßnahmen nötig. Gelingt dieser Nachweis nicht, soll die *zuständige nationale Behörde* über angemessene Maßnahmen entscheiden, die von der Registrierung über Bauvorschriften oder Beschränkungen beim Einsatz dieser Materialien reichen können. Sie unterliegen den nationalen Zulassungsrichtlinien des Ziellandes und müssen gemäß der dortigen nationalen Kriterien auf Einhaltung des Referenzwertes von 1 mSv/a geprüft werden. Eine Präzisierung und europäische Harmonisierung der Bewertungskriterien wird gegenwärtig in der Arbeitsgruppe „Strahlung“ des zuständigen Normungsausschusses CEN/TC 351 diskutiert

In diesem Sinne besitzt die Indexformel den Charakter eines Screening-Tools. Sie erleichtert den nationalen Behörden die Prüfung und schränkt die Auswahl der Materialien ein, die einer genaueren Untersuchung unterzogen werden müssen.

Aus dem vorliegenden EU-Entwurf würde sich derzeit unter ausschließlicher Betrachtung der äußeren Exposition ableiten lassen, dass von den im BfS untersuchten Baumaterialien nur Leichtbeton wegen seiner Bimsanteile und Beton wegen der Zusätze von Flugasche oder Schlacke der Prüfpflicht unterliegen, da diese Zusätze in den indikativen Listen in Anhang XI.1 und XI.2 genannt werden. Weitere Produkte müssten nur bei Verwendung dieser oder anderer industrieller Rückstände mit erhöhten Gehalten natürlicher Radioaktivität (NORM) einbezogen werden, wie z. B. Ziegel mit Anteilen von Rotschlamm aus der Aluminiumproduktion. Dies gilt allerdings vorbehaltlich einer abweichenden Entscheidung durch nationale Behörden, die aus Vorsorgegründen eine Prüfung weiterer Baumaterialien und Rückstände fordern können.

Die Möglichkeiten zur Vermeidung erhöhter Expositionen durch Radioaktivität in Baumaterialien sind begrenzt:

- Verzicht auf den Einsatz im Innenbereich
- Verwendung radioaktivitätsärmerer Ausgangsstoffe
- Verzicht auf Zusatz industrieller Rückstände mit hohen Aktivitäten.

Die Nutzung industrieller Rückstände als Wertstoffe gemäß Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz, die Schonung von Naturressourcen und die Energieeinsparung liegt andererseits in gesamtgesellschaftlichem Interesse, so dass bei allen künftigen Regelungen auch die Konsequenzen jenseits des Strahlenschutzes beachtet werden sollten.

Wegen der genannten geringen Einflussmöglichkeiten erfolgte die Einstufung der natürlichen Radioaktivität von Baumaterialien im Entwurf der europäischen Grundnormenrichtlinie [22] als bestehende Expositionssituation (siehe Artikel 100 Nr. 2b) und lässt den Behörden den erforderlichen Spielraum zur Umsetzung in nationale Regelungen.

7.5 Baurechtliche Anforderungen

Im Jahr 1989 wurde die europäischen „Bauproduktenrichtlinie“ (BPR) [27] verabschiedet, die die wesentlichen Anforderungen an die Brauchbarkeit eines Produktes definiert und das Vorgehen zur CE-Kennzeichnung regelt, um einen ungehinderten Warenverkehr der Bauprodukte im Bereich der Europäischen Union (EU) zu ermöglichen. Sie enthält im Artikel 7 die Forderung zur Erarbeitung harmonisierter Normen. Im Anhang I (Wesentliche Anforderungen) dieser Richtlinie ist unter Punkt 3 (Hygiene, Gesundheits- und Umweltschutz) u. a. der Schutz vor „Emissionen gefährlicher Strahlen“⁵ genannt. Die Umsetzung der BPR in deutsches Recht erfolgte 1992 mit dem Bauproduktengesetz (BauPG) [20]. Beide Dokumente enthalten jedoch noch keine konkreten Vorgaben zu den die „Emission gefährlicher Strahlen“ betreffenden Anforderungen.

Auf der Grundlage der BPR wurde daher von der EU ein Auftrag an das Europäische Komitee für Normung (CEN) zur Erarbeitung einer harmonisierten Norm für Emissionen von gefährlichen Stoffen aus Baumaterialien erteilt. Dazu wurde eine Experten-Gruppe, das Technical Committee (TC) 351 „Bewertung der Freisetzung gefährlicher Substanzen aus Bauprodukten“ mit vier Arbeits- und dazu gehörenden Beratungsgruppen gebildet. Die Arbeitsgruppe „Radioaktivität aus Bauprodukten“ hat den Auftrag, einen Report zu den gegenwärtig bestehenden Messmethoden und Regelungen („State of the art-report“) zu erarbeiten. Im Ergebnis dieses Normungsvorhabens sollen vor allem Messmethoden vorgegeben werden. Dabei werden aber zwangsläufig auch Bewertungsfragen berührt. Ein Bewertungsansatz des BfS, das in dem Gremium vertreten ist, wird in Abschnitt 8 vorgestellt. In Deutschland ist das TC 351 im Deutschen Institut für Normung (DIN) in den Normenausschüssen Bauwesen (NABau) im Fachbereichsbeirat „Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz“ gespiegelt, d. h. die Themen werden parallel auf nationaler Ebene behandelt.

Nach Verabschiedung der europäischen Normen ist eine Übergangszeit geplant, in der sowohl deutsche als auch europäische Bauproduktnormen nebeneinander

⁵ Gemeint ist im Sinne des Strahlenschutzes sowohl die äußere Exposition als auch die Inhalation von Radon, so dass die spezifische Aktivität und die Exhalation von Radon aus Baumaterialien beachtet werden muss.

Gültigkeit haben. Zukünftig werden dann ausschließlich die europäischen Normen zu beachten sein.

Alle nicht gemäß den Normen des DIN mit exakt festgelegten Vorgaben zu Maßen, Zusammensetzung etc. hergestellten Baustoffe müssen in Deutschland, selbst bei beabsichtigten geringfügigen Abweichungen von der Norm, als nicht genormte Bauprodukte im Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) geprüft und zugelassen werden. Dies erfolgt nach zwischen den Bundesländern vereinbarten Zulassungsgrundsätzen, die aber bisher ebenfalls keine Aspekte des Strahlenschutzes beinhalten. Das BfS ist jedoch in entsprechenden Ausschüssen des DIBt vertreten und gibt Hinweise zur Prüfung von Zuschlagstoffen für neu beantragte Rezepturen, sofern es sich um Rückstände mit erhöhter natürlicher Radioaktivität gemäß der Strahlenschutzverordnung handeln könnte.

Mit der Definition der erforderlichen allgemein gültigen Kriterien zur Zulassung von Baustoffen und der Festlegung geeigneter Messmethoden befasst sich seit 2007 in Deutschland die vom DIBt geleitete Projektgruppe „Radioaktivität/Radonexhalation“. Die Arbeiten erfolgten unter Einbeziehung der Kenntnisse von Sachverständigen auf diesem Gebiet, die als Gutachter oder in den zuständigen Behörden (Bundesumweltministerium, BfS, Umweltbundesamt) tätig sind. Die Arbeiten der Projektgruppe waren zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichtes noch nicht abgeschlossen.

8 Bewertungsvorschlag des BfS

Unter Beachtung der in Deutschland und international bestehenden Vorgaben zur Bewertung von Baumaterialien mit dem Ziel der Begrenzung der von ihnen ausgehenden Strahlenexposition wird im Folgenden ein Vorschlag für eine entsprechende Regelung in Deutschland vorgestellt.

Dem Vorschlag liegt Folgendes zu Grunde:

- Mit Teil 3 Kapitel 3 der StrlSchV [21] existiert für einen Teilbereich bereits geltendes Recht für die Strahlenexposition aus Baustoffen, das eine Begrenzung der durch den Zusatz bestimmter industrieller Rückstände (NORM) hervorgerufenen Dosis auf 1 mSv/a fordert. Dabei wird auch die Inhalation von Radon in die Dosisermittlung einbezogen. Die bereits durch die in den natürlichen Ausgangsstoffen enthaltenen Radionuklide hervorgerufene Exposition wird allerdings bisher nicht berücksichtigt. Unterstellt man, und das haben die hier vorgestellten Untersuchungen gezeigt, dass einige Baustoffe schon derentwegen zu Expositionen im Bereich 1 mSv/a und darüber hinaus (unter Berücksichtigung der Radonexposition) führen können, so werden bei geltender Rechtslage Expositionen ggf. bis 2 mSv/a toleriert.⁶ Ein einheitlicher Bewertungsansatz für die aus dem gesamten Gehalt an natürlichen Radionukliden in Baustoffen (unabhängig von deren Ursprung) resultierende Strahlenexposition sollte keine Expositionen vorsehen,

⁶ Beispiel: Lt. Anlage XII Teil B Nr. 1 bzw. 2 wird Beton mit max. 20 % Rückstandsverwertung (z. B. Schlacke) für den Hausbau hergestellt, wodurch 1 mSv/a verursacht werden darf. Durch die übrigen 80 % seiner Bestandteile (Kies, Zement) werden jedoch weitere 0,3 mSv/a durch äußere Exposition und ein Beitrag zur Radonkonzentration in der Raumluft von 10 Bq/m³ (\approx 0,3 mSv/a) verursacht, so dass die berechnete gesamte Strahlenexposition durch den Baustoff 1,6 mSv/a beträgt.

die diesen Wert überschreiten, damit das zumindest für Teilbereiche schon jetzt erreichte Schutzniveau nicht verschlechtert wird.

- Hinsichtlich der Radonexposition in Häusern verfolgen das Bundesumweltministerium und das BfS in Übereinstimmung mit der Weltgesundheitsorganisation [29] das Ziel, einen Zielwert von 100 Bq/m^3 in Deutschland zu etablieren. Da der wesentliche Beitrag zur Innenraumkonzentration von Radon aus dem Gebäudeuntergrund stammt und auch der Beitrag des Radons aus der freien Atmosphäre zu berücksichtigen ist, sollte der baumaterialbedingte Beitrag möglichst klein gegenüber diesem Zielwert sein. Im Übrigen erscheint es aus den in Abschnitt 4.1 genannten Gründen der Unabhängigkeit von möglichen künftigen Veränderungen der dosimetrischen Bewertung der Radonexposition sinnvoll, für diese Komponente eine separate Bewertung in Gestalt einer zulässigen baumaterialbedingten Konzentration einzuführen.
- Die Bewertung der externen Exposition aus natürlicher Radioaktivität in Baustoffen sollte in Übereinstimmung mit der international akzeptierten Empfehlung RP 112 [12] bzw. der im Entwurf vorliegenden neuen EU-Grundnormenrichtlinie [22] stehen, die dafür eine Begrenzung auf Werte $< 1 \text{ mSv/a}$ vorsehen. Eine gemeinsame dosimetrische Bewertung mit der Radonexposition mit einem dann entsprechend erhöhten Referenzwert der Dosis, wie in der ÖNORM S 5200 (vgl. Abschnitt 7.3), ist aus Sicht des BfS nicht empfehlenswert. Sie kann zu Situationen führen, in denen bei Materialien mit geringer Radonexhalation (z. B. Ziegel) zwar das integrale Dosiskriterium erfüllt wird, nicht aber die Anforderungen gemäß RP 112. Probleme im internationalen Warenaustausch wären nicht auszuschließen, wenn die Empfehlung RP 112 zum Bewertungsmaßstab wird, wofür zur Zeit Einiges spricht.

Unter diesen Prämissen wird folgender Vorschlag vorgelegt:

- Für die Bewertung der äußeren Exposition aus in Baumaterialien enthaltenen natürlichen radioaktiven Stoffen wird ein Referenzwert von 1 mSv/a verwendet, der zusätzlich zum natürlichen Hintergrund im Freien gilt. Zur Überwachung des Dosiskriteriums kann entsprechend der RP 112 in einem ersten Schritt im Sinne eines Screenings der Aktivitätskonzentrationsindex herangezogen werden, in dem in einer Summenformel die drei Leitnuklide Ra-226, Th-232 und K-40 berücksichtigt werden. Nach dieser orientierenden Prüfung sollte eine realistischere Dosisabschätzung unter Verwendung besser geeigneter Modelle (z. B. mit Dichtekorrektur) erfolgen, sofern der Indexwert überschritten wird.
- Die aus der Exhalation von Radon aus Baumaterialien resultierende Radonkonzentration in Innenräumen sollte separat bewertet werden und einen Wert von 20 Bq/m^3 möglichst nicht übersteigen.

Wenn künftig spezielle Regelungen für natürliche Radioaktivität in Baustoffen insgesamt, etwa auf der Grundlage dieses Vorschlages, geschaffen werden, entfällt aus Sicht des BfS die Notwendigkeit spezifischer Regelungen für den Zusatz von NORM zu Baustoffen entsprechend des jetzigen Teils 3 StrlSchV [21].

Die Anwendung dieses Ansatzes würde für die von uns untersuchten Baustoffe zur Folge haben, dass für einige Proben von Ziegeln und Leichtbeton der Indexwert überschritten wäre und eine aufwändigere Prüfung erfolgen müsste. Hinsichtlich der Betone wären Messungen der Radionuklidgehalte der Ausgangsstoffe oder des Fertigprodukts und Messungen der Radonexhalation erforderlich.

9 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Zeitraum 2007 - 2009 hat das Bundesamt für Strahlenschutz in Zusammenarbeit mit dem Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e. V. (bbs) und 11 Industrieverbänden bzw. -branchen ein Untersuchungsprogramm zur Ermittlung der natürlichen Radioaktivität in Baumaterialien durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war es, aktuelle und repräsentative Daten für diese Produkte zu gewinnen, die im Sinne einer Sachstandsanalyse als Grundlage für eine Bewertung der Baustoffe dienen sollen. Hintergrund dazu sind die anstehenden Regelungen in der EU und im nationalen Rahmen.

An 120 Baustoffproben wurden gammaspektrometrisch die spezifischen Aktivitäten von Kalium-40, Radium-226 und Thorium-228 ermittelt und mithilfe der in der Publikation „Radiation Protection 112“ angegebenen Formel der Indexwert bzw. der Beitrag zur äußeren Exposition errechnet. Daraus ergab sich eine Klassifikation der untersuchten Materialien hinsichtlich der von ihnen verursachten äußeren Strahlenexposition.

Die Abschätzung des baumaterialbedingten Radonbeitrages zur Innenraumluft erfolgte durch die Ermittlung der Flächen-Exhalationsrate. Die entstehende Radonkonzentration in einem Normraum wurde mit dem Dosiskonversionskoeffizienten gemäß des Reports des United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) in eine Dosis umgerechnet, so dass eine Summation der Anteile aus beiden Expositionspfaden möglich wurde.

Die ermittelten Werte der spezifischen Aktivitäten und der Exhalationsraten für die relevanten Radionuklide lagen weitgehend in der aus früheren Messungen erwarteten Größenordnung. Abweichungen der spezifischen Aktivitäten zu den Ergebnissen älterer Untersuchungen, in denen zum Teil nennenswert höhere Werte festgestellt worden waren, konnten seitens der Hersteller plausibel mit geringeren Gehalten an natürlicher Radioaktivität in den heute genutzten Rohstoffquellen bzw. durch die frühere Verwendung von NORM erklärt werden. Das Auftreten höherer als der in dieser Untersuchung ermittelten Werte bei einzelnen Produkten kann damit aber nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden.

Im Falle der Summation der Dosisbeiträge aus beiden Expositionspfaden können sich für einige Baustoffe Dosiswerte oberhalb von 1 Millisievert jährlich (mSv/a), jedoch deutlich unterhalb von 2 mSv/a ergeben. Bei folgenden Baustoffgruppen sind generell Gesamtdosisbeiträge unterhalb von 0,3 mSv/a zu erwarten: Gipsprodukte, Kalksandsteine, Fliesen und Platten, Mineralwolle und Mörtel/Putze/Estriche. Geringfügig darüber rangieren Porenbeton und Zement, die bis zu 0,4 bzw. 0,7 mSv/a verursachen können. Bei den Massenprodukten Ziegel, Leichtbeton und Beton wurden Dosisbeiträge abgeschätzt, die zum Teil oberhalb von 1 mSv/a liegen können.

Unter Beachtung des bestehenden nationalen Schutzniveaus und der europäischen Vorgaben schlägt das BfS zur Bewertung der Baumaterialien folgende voneinander unabhängig anzuwendende Kriterien vor:

- Dosisbeitrag von 1 mSv/a für die äußere Exposition (zusätzlich zum natürlichen Hintergrund im Freien) und
- eine maximale Radonkonzentration von 20 Bq/m³ separat für den baumaterialbedingten Beitrag zur Inhalation von Radon und seinen Folgeprodukten.

Allerdings erfordert die Bestimmung der internen Radon-Dosis die Messung der Radonexhalation der finalen Baumaterialien. Zum jetzigen Zeitpunkt existieren weder eine deutsche oder europaweit standardisierte Messmethodik noch Messlabore, die diese Messungen anbieten können. Vor dem Hintergrund der anstehenden europäischen Abstimmungen im CEN werden diese Aufgabenstellungen dort ebenfalls diskutiert. Zur Qualitätssicherung wäre es aus Sicht des BfS notwendig, ein Institut mit entsprechenden Leitstellenaufgaben zu beauftragen.

Literatur

- [1] European Commission, Radiation Protection 96 „Enhanced radioactivity of building materials“, European Communities, 1999
- [2] Siehl, A.: Umweltradioaktivität, Verlag Ernst & Sohn, 1996
- [3] Die Strahlenexposition von außen in der Bundesrepublik Deutschland durch natürliche radioaktive Stoffe im Freien und in Wohnungen unter Berücksichtigung des Einflusses von Baustoffen, BMI, 1976
- [4] Auswertung der Fragebögen aller beteiligten Baubranchen
- [5] Internetseiten der beteiligten Bundesverbände für Baumaterialien
- [6] Ein volkswirtschaftliches Porträt der deutschen Bauindustrie, M. Grömling, bbs, Juni 2005
- [7] Jahresbericht des BfS, S. 48-49, 2006
- [8] Messanleitungen für die Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt und externer Strahlung, Allgemeine Kapitel, Gammaspекtrometrische Bestimmung ausgewählter natürlicher Radionuklide, γ -SPEKT/NADRAD, ISSN 1865-8725, Version Oktober 2000;
- [9] Messanleitungen für die Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt und externer Strahlung, Messanleitungen für Baustoffe und NORM-Stoffe (ENORM), Verfahren zur gammaspекtrometrischen Bestimmung der spezifischen Aktivität von Radionukliden in Baumaterialien, K- γ -SPEKT-BAUST-01, ISSN 1865-8725, Version April 2008
- [10] NORM DIN 1319, Grundbegriffe der Messtechnik, Beuth Verlag, 1983
- [11] Keller, G. Hoffmann, B., Feigenspan, T., Radon permeability and radon exhalation of building materials, The Science of the Total Environment 272(2001)85-89
- [12] European Commission, Radiation Protection 112 „Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials“, European Communities, 2000
- [13] Deutsches Institut für Normung (DIN): Februar 2006, DIN EN ISO 16000-9 Innenraumlufiverunreinigungen – Teil 9: Bestimmung der Emission von flüchtigen organischen Verbindungen aus Bauprodukten und Einrichtungsgegenständen – Emissionsprüfkammer-Verfahren
- [14] ÖNORM S 5200, Radioaktivität in Baumaterialien, Österreichisches Normungsinstitut, 1. April 2009
- [15] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR Report 2000, Report to the General assembly, with Scientific Annexes, United Nations. New York, 2000
- [16] International Commission on Radiological Protection: Protection Against Radon-222 at Home and at Work, ICRP-Publication 65, First Edition 1994
- [17] International Commission on Radiological Protection Statement on Radon, ICRP Ref 00/902/09, (23.01 .2012)
www.icrp.org/docs/ICRP_Statement_on_Radon%28November_2009%29.pdf

- [18] Berger, M.J., Calculation of energy dissipation by gamma radiation near the interface between two media. Journal of Applied Physics 28, 1502-1508, 1957
- [19] Rosen, D., Natürliche Radioaktivität in Baumaterialien, Bericht zu den Erhebungsmessungen an Mauerziegeln, 29.02.2008
- [20] Richtlinie 96/29/Euratom des Rates vom 13. Mai 1996 zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlungen, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 159 vom 29. Juni 1996
- [21] Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung) vom 20. Juli 2001, BGBl. I S.1714
- [22] Draft Euratom Basic Safety Standards Directive – Version 29. September 2011, [Proposal for a Council Directive laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation \[COM\(2011\)593\]](#) (23.01.2012)
- [23] Amtsblatt des Großherzogtums Luxemburg A-No 66, 8.August 2006
- [24] Dziennik Ustaw Nr. 4/2007, poz. 29, Regulation of the Council of Ministers on the requirements imposed on the content of natural radioisotopes: potassium K-40, radium Ra-226 and thorium Th-228 in raw materials and materials applied in buildings for the accommodation of people and livestock, and in industrial waste applied in construction, and the control of radioisotope content., 2 January 2007
- [25] STUK, Guide ST 12.2, 8.10.2003, The radioactivity of building materials and ash
- [26] European Commission, Commission Recommendation of 21 February 1990 on the protection of the public against indoor exposure to radon (90/143/Euratom), European Communities, Luxembourg, 2000
- [27] Richtlinie des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Bauprodukte (89/106/EWG), geändert durch die Richtlinie des Rates 93/68/EWG vom 22. Juli 993
- [28] Gesetz über das Inverkehrbringen von und den freien Warenverkehr mit Bauprodukten zur Umsetzung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Bauprodukte, vom 10. August 1992
- [29] World Health Organisation, 'WHO Handbook on Indoor Radon', WHO 2009
- [30] Brandt, J., Rechenberg, W., Umwelt, Radioaktivität und Beton, Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1994

Anlagenverzeichnis

Anlage 1

Auszug aus StrlSchV Anlage XII Teil A (zu berücksichtigende Materialien - „Rückstände“) und Teil B (Überwachungsgrenzen)

Anlage 2

Spezifische Aktivitäten in Baumaterialien - Einzelwerte

Anlage 3

Spezifische Aktivitäten in Baumaterialien - Zusammenfassung

Anlage 4

Messergebnisse zur Abschätzung der Flächen-Exhalationsrate und der Radon-Aktivitätskonzentration aus Baustoffen

Auszug aus der Strahlenschutzverordnung mit Relevanz zur Verwertung in Baumaterialien

(zu StrlSchV §§ 97 - 102. Verwertung und Beseitigung überwachungsbedürftiger Rückstände)

Anlage XII Teil A: Liste der zu berücksichtigende Rückstände (Auszug)

- Nicht aufbereitete Phosphogipse, Schlämme aus deren Aufbereitung sowie Stäube und Schlacken aus der Verarbeitung von Rohphosphat (Phosphorit)
- Nebengestein, Schlämme, Sande, Schlacken und Stäube
 - aus der Aufbereitung von Bauxit, Columbit, Pyrochlor, Mikrolyth, Euxenit, Kupferschlacke, Zinn-, Seltene Erden- und Uranerzen und
 - aus der Weiterverarbeitung der dabei anfallenden Rückstände und den o. g. Erzen entsprechenden Mineralien
- Stäube und Schlämme aus der Rauchgasreinigung bei der Primärverhüttung in der Roheisen- und Nichteisenmetallurgie

Anlage XII Teil B: Überwachungsgrenzen für Rückstände nach Teil A

Bei der Verwertung von Rückständen gilt für die Werte $C_{U238max}$ und $C_{Th232max}$ der größten spezifischen Aktivitäten der Radionuklide der Nuklidketten U-238 und Th-232 in Becquerel pro Gramm (Bq/g) die Summenformel:

$$C_{U238max} + C_{Th232max} \leq C$$

Die Überwachungsgrenze C beträgt (abweichend von der allgemein geltenden in Höhe von 1,0 Bq/g) 0,5 Bq/g, wenn Baustoffen bei der Verwertung im Hausbau mehr als 20 % oder bei der Verwertung im Straßen-, Wege-, Landschafts- oder Wasserbau, auch im Bereich von Sport- und Spielplätzen, mehr als 50 % Rückstände nach Teil A zugesetzt werden.

Spezifische Aktivitäten in Baumaterialien – Einzelwerte

Produkt/ Verband	spezifische Aktivität [Bq/kg]										INDEX lt. RP 112:		
	K-40	VB	Ra-228	VB	Th-228	VB	U-238	VB	Ra-226	VB	C Ra + 300	C Th + 200	C K 3000
Gipsprodukte	< 20		2,3 ± 0,5		1,7 ± 0,3		19 ± 3		12 ± 2		0,06		
	120 ± 20		6,0 ± 1,5		5,8 ± 1,2		17 ± 4		13 ± 3		0,11		
	95 ± 15		6,0 ± 1,5		5,5 ± 1,2		11 ± 3		10 ± 2		0,09		
	< 20		< 5		1,9 ± 0,5		8 ± 3		4,2 ± 0,9		0,03		
	< 20		< 5		1,8 ± 0,5		12 ± 4		3,8 ± 0,8		0,03		
Kalksand- stein	35 ± 7		3,0 ± 1,0		2,8 ± 0,7		6 ± 2		4,1 ± 0,9		0,04		
	180 ± 20		9,1 ± 1,5		8,9 ± 1,0		10 ± 2		10 ± 3		0,14		
	130 ± 15		7,2 ± 0,8		7,2 ± 0,8		9,5 ± 2		10 ± 3		0,11		
Mineralwolle	350 ± 70		54 ± 11		64 ± 13		84 ± 17		80 ± 16		0,70		
	120 ± 40		18 ± 5		15 ± 5		43 ± 15		43 ± 9		0,26		
	150 ± 40		14 ± 5		12 ± 4		17 ± 6		17 ± 5		0,17		
	180 ± 30		< 10		4,7 ± 0,5		< 25		22 ± 5		0,16		
	180 ± 30		33 ± 7		33 ± 6		44 ± 10		47 ± 10		0,38		
	< 80		< 15		9 ± 2		< 30		16 ± 4		0,10		
	49 ± 15		19 ± 4		20 ± 4		20 ± 6		18 ± 4		0,18		
Ziegel	805 ± 50		60 ± 6		63 ± 5		39 ± 8		48 ± 5		0,74		
	825 ± 50		60 ± 5		63 ± 4		50 ± 8		48 ± 3		0,75		
	670 ± 40		55 ± 6		56 ± 5		46 ± 9		49 ± 4		0,67		
	855 ± 55		61 ± 6		60 ± 4		62 ± 12		57 ± 5		0,78		
	530 ± 40		44 ± 5		46 ± 4		38 ± 8		38 ± 3		0,53		
	570 ± 40		49 ± 5		53 ± 4		41 ± 8		45 ± 4		0,61		
	1120 ±		79 ±		79 ±		50 ±		50 ±		0,94		
	470 ± 50		36 ± 4		37 ± 4		50 ± 8		38 ± 4		0,47		
	570 ± 60		40 ± 5		42 ± 4		52 ± 8		43 ± 5		0,54		

Produkt/ Verband	spezifische Aktivität [Bq/kg]										INDEX lt. RP 112:		
	K-40	VB	Ra-228	VB	Th-228	VB	U-238	VB	Ra-226	VB	C Ra +	C Th +	C K
											300	200	3000
Ziegel	570 ± 60		57 ± 6		57 ± 5		65 ± 10		44 ± 5		0,62		
	1200 ± 100		51 ± 5		48 ± 4		50 ± 8		49 ± 5		0,80		
	510 ±		53 ±		53 ±		41 ±		41 ±		0,57		
	625 ± 70		50 ± 7		51 ± 6		54 ± 11		47 ± 7		0,62		
	590 ± 60		42 ± 6		45 ± 5		39 ± 8		39 ± 5		0,55		
	640 ± 70		50 ± 7		50 ± 5		48 ± 10		46 ± 6		0,62		
	710 ± 80		51 ± 7		53 ± 6		50 ± 10		50 ± 7		0,67		
	670 ± 70		51 ± 7		53 ± 6		49 ± 10		53 ± 7		0,67		
	730 ±		50 ±		50 ±		63 ±		63 ±		0,70		
	710 ±		89 ±		89 ±		50 ±		50 ±		0,85		
	980 ± 60		56 4		57 4		57 4		55 4		0,80		
	1015 ± 65		95 7		98 6		67 8		59 5		1,03		
	590 ± 40		52 4		56 3		61 5		57 4		0,67		
	710 ± 30		55 4		58 3		51 6		49 4		0,69		
	570 ± 30		48 3		50 3		41 6		41 4		0,58		
	570 ± 20		47 2		50 2		42 4		41 3		0,58		
960 ± 40		49 3		53 3		42 6		42 4		0,73			
645 ± 40		64 4		64 4		51 3		50 3		0,70			
Zement/ Mörtel	185 ± 30		13 ± 2		13 ± 2		23 ± 4		20 ± 3		0,19		
	380 ± 40		20 ± 3		21 ± 3		40 ± 8		35 ± 6		0,35		
	135 ± 20		11 ± 2		11 ± 2		19 ± 4		17 ± 3		0,16		
	230 ± 30		14 ± 3		16 ± 2		23 ± 4		24 ± 4		0,24		
	220 ± 30		11 ± 2		12 ± 2		24 ± 5		11 ± 2		0,17		
	340 ± 40		16 ± 3		17 ± 2		30 ± 6		28 ± 5		0,29		
	150 ± 20		12 ± 1		12 ± 1		22 ± 3		10 ± 1		0,14		

Produkt/ Verband	spezifische Aktivität [Bq/kg]										INDEX lt. RP 112:			
	K-40	VB	Ra-228	VB	Th-228	VB	U-238	VB	Ra-226	VB	C Ra + 300	C Th + 200	C K 3000	
	265 ± 25		18 ± 2		18 ± 2		26 ± 5		24 ± 3		0,26			
	150 ± 20		13 ± 2		14 ± 2		23 ± 4		14 ± 2		0,17			
	240 ± 30		19 ± 3		20 ± 3		33 ± 7		32 ± 5		0,29			
	125 ± 15		6,3 ± 0,9		6,2 ± 0,5		7,9 ± 2,0		5,7 ± 0,9		0,09			
Fliesen/ Platten/ Steingut- zeug	300 ± 20		38 ± 3		39 ± 3		67 ± 7		67 ± 5		0,52			
	335 ± 30		96 ± 9		97 ± 8		91 ± 10		92 ± 8		0,90			
	595 ± 50		65 ± 6		67 ± 5		80 ± 8		83 ± 7		0,81			
	295 ± 25		47 ± 5		49 ± 4		98 ± 10		87 ± 7		0,63			
	620 ± 60		57 ± 6		59 ± 5		110 ± 10		110 ± 8		0,87			
Keram. Rohstoffe Nr. 1	840 ± 80		45 ± 5		45 ± 4		37 ± 7		36 ± 4		0,63			
	2	520 ± 50		41 ± 4		41 ± 4		39 ± 8		40 ± 4		0,51		
	3	560 ± 50		47 ± 5		47 ± 7		33 ± 7		33 ± 4		0,53		
	4	170 ± 20		38 ± 4		40 ± 4		39 ± 8		40 ± 4		0,39		
	5	1010 ± 100		53 ± 7		52 ± 6		47 ± 10		46 ± 7		0,75		
	6	730 ± 80		54 ± 7		52 ± 6		42 ± 9		35 ± 6		0,62		
	7	1160 ± 120		78 ± 11		79 ± 9		46 ± 10		42 ± 7		0,92		
	8	1050 ± 110		67 ± 10		66 ± 8		52 ± 11		48 ± 8		0,84		
	9	1700 ± 200		125 ± 15		135 ± 15		115 ± 25		115 ± 20		1,63		
	10	390 ± 50		59 ± 8		58 ± 6		44 ± 9		41 ± 7		0,56		
	11	800 ± 90		46 ± 7		46 ± 6		40 ± 9		41 ± 7		0,63		
	12	430 ± 50		45 ± 7		44 ± 5		33 ± 8		29 ± 5		0,46		
	13	210 ± 30		53 ± 8		55 ± 7		77 ± 16		83 ± 15		0,62		
	14	320 ± 40		34 ± 5		33 ± 4		38 ± 9		38 ± 7		0,40		
	15	65 ± 9		21 ± 4		20 ± 3		16 ± 5		15 ± 3		0,17		

Produkt/ Verband	spezifische Aktivität [Bq/kg]										INDEX lt. RP 112:		
	K-40	VB	Ra-228	VB	Th-228	VB	U-238	VB	Ra-226	VB	C Ra + 300	C Th + 200	C K 3000
Porenbeton	97 ± 10		5,6 ± 1,0		4,8 ± 0,6		< 30		8,0 ± 1,6		0,08		
	150 ± 20		11 ± 2		11 ± 2		< 30		15 ± 3		0,16		
	170 ± 20		7,4 ± 0,7		9,1 ± 0,9		< 30		19 ± 2		0,17		
	220 ± 20		18 ± 2		19 ± 2		22 ± 4		19 ± 2		0,23		
	350 ± 40		16 ± 3		17 ± 2		22 ± 6		21 ± 4		0,27		
	170 ± 20		7,7 ± 1,4		8,9 ± 1,3		15 ± 5		13 ± 3		0,14		
	170 ± 20		10 ± 2		11 ± 2		23 ± 6		18 ± 3		0,17		
	160 ± 20		12 ± 3		12 ± 2		27 ± 7		26 ± 5		0,20		
	270 ± 30		14 ± 3		15 ± 2		24 ± 6		22 ± 4		0,24		
	170 ± 20		7,7 ± 1,4		7,3 ± 1,2		15 ± 5		14 ± 3		0,14		
Leichtbeton	710 ±		34 ±		34 ±		28 ±		28 ±		0,50		
	795 ±		72 ±		72 ±		61 ±		61 ±		0,83		
	850 ±		98 ±		98 ±		83 ±		83 ±		1,03		
	880 ±		27 ±		27 ±		22 ±		22 ±		0,50		
	805 ±		55 ±		55 ±		49 ±		49 ±		0,71		
	920 ±		70 ±		70 ±		46 ±		46 ±		0,81		
	950 ±		77 ±		77 ±		54 ±		54 ±		0,88		
Normalbeton	490 ± 40		29 ± 3		28 ± 2		24 ± 5		25 ± 3		0,39		
	230 ± 20		10 ± 2		10 ± 1		14 ± 4		13 ± 2		0,17		
	560 ± 50		47 ± 4		47 ± 3		23 ± 5		24 ± 3		0,50		
	130 ± 10		10 ± 1		11 ± 1		13 ± 3		13 ± 1		0,14		
Putze P1	210 ± 18		8,9 ± 1		8,9 ± 1,4		14 ± 2		14 ± 2		0,16		
	P2	95 ± 11		5 ± 1,2		5 ± 1,2		8,5 ± 1		8,5 ± 1,1		0,09	
	P3	24 ± 4		1,1 ± 0,6		1,1 ± 0,6		3,6 ± 1		3,6 ± 0,6		0,03	
	P4	26 ± 4		< 1,3		< 1,3		6,3 ± 1		6,3 ± 1,1		0,04	

Produkt/ Verband	spezifische Aktivität [Bq/kg]										INDEX lt. RP 112:		
	K-40	VB	Ra-228	VB	Th-228	VB	U-238	VB	Ra-226	VB	C Ra + 300	C Th + 200	C K 3000
P5	12 ± 3		0,9 ± 0,5		0,9 ± 0,5		2,5 ± 1		2,5 ± 0,5		0,02		
P6	105 ± 12		31 ± 3		31 ± 3		22 ± 2		22 ± 2		0,26		
P7	28 ± 4		2,0 ± 0,6		2,0 ± 0,6		2,3 ± 1		2,3 ± 0,5		0,03		
P8	16 ± 3		7,0 ± 1,3		7,0 ± 1,3		8,7 ± 1		8,7 ± 1		0,07		
P9	15 ± 3		1,4 ± 0,7		1,4 ± 0,7		2,0 ± 1		2,0 ± 0,5		0,02		
P10	85 ± 14		6,4 ± 2,3		6,4 ± 2,3		6,7 ± 2		6,7 ± 1,6		0,08		
P11	41 ± 5		2,4 ± 0,9		2,4 ± 0,9		3,9 ± 1		3,9 ± 0,7		0,04		
P12	45 ± 6		3,9 ± 0,9		3,9 ± 0,9		5,1 ± 1		5,1 ± 0,8		0,05		
P13	57 ± 7		4,2 ± 1,0		4,2 ± 1,0		5,9 ± 1		5,9 ± 0,9		0,06		
P14	46 ± 6		4,0 ± 1,0		4,0 ± 1,0		5,1 ± 1		5,1 ± 0,8		0,05		
P15	115 ± 14		6,4 ± 1,4		6,4 ± 1,4		7,8 ± 1		7,8 ± 1,2		0,10		
P16	215 ± 20		10 ± 2		10 ± 2		14 ± 2		14 ± 2		0,17		
P17	47 ± 6		2,3 ± 0,8		2,3 ± 0,8		4,6 ± 1		4,6 ± 0,8		0,04		
P18	220 ± 19		8 ± 1,3		8 ± 1,3		14 ± 2		14 ± 1,5		0,16		
P19	16 ± 3		6,9 ± 1,3		6,9 ± 1,3		8,8 ± 1		8,8 ± 1,1		0,07		
<i>Estriche</i>													
E1	295 ± 25		14 ± 2		14 ± 2		16 ± 2		16 ± 2		0,22		
E2	285 ± 22		34 ± 3		34 ± 3		26 ± 2		26 ± 2		0,35		
E3	255 ± 22		13 ± 2		13 ± 2		13 ± 1		13 ± 1		0,19		
E4	210 ± 18		12 ± 1		12 ± 1		11 ± 1		11 ± 1		0,17		
E5	250 ± 20		11 ± 1		11 ± 1		11 ± 1		11 ± 1		0,18		
<i>Mörtel</i>													
M1	250 ± 20		12 ± 2		12 ± 2		12 ± 1		12 ± 1		0,18		
M2	120 ± 12		6 ± 1,3		6 ± 1,3		20 ± 2		20 ± 2		0,14		
M3	200 ± 16		9,7 ± 1,4		9,7 ± 1,4		11 ± 1		11 ± 1		0,15		
M4	290 ± 27		30 ± 4		30 ± 4		44 ± 5		44 ± 5		0,39		
M5	250 ± 22		31 ± 4		31 ± 4		53 ± 6		53 ± 6		0,42		

Produkt/ Verband	spezifische Aktivität [Bq/kg]								INDEX lt. RP 112:				
	K-40	VB	Ra-228	VB	Th-228	VB	U-238	VB	Ra-226	VB	C Ra + 300	C Th + 200	C K 3000
M6	310 ± 30		30 ± 4		30 ± 4		32 ± 4		32 ± 4		0,36		
M7	165 ± 14		13 ± 2		13 ± 2		14 ± 1		14 ± 1		0,17		
VB = Vertrauensbereich 95% <i>Kursiv- schrift:</i> Messwerte (Putze, Mörtel, Estriche) stammen nicht vom BfS, sind jedoch durch Messvergleich qualitätsgesichert. Eigene Messungen ergaben Gleichgewicht der Zerfallsreihen von U-238 und Th-232, so dass fehlende Werte (U-238, Ra-228) beim Fremdlabor entsprechend ergänzt wurden. Gerundet auf 2 signifikante Stellen, bei K-40 auf 3 Stellen.													
INDEX lt. < 0,5 Dosis < 0,3 > 0,5 – 1 Dosis < 1 > 1 Dosis > 1 < 2 Dosis < 0,3 mSv/a bei Materialien mit begrenzter Anwendung (Schichtdicke; Verfüllung etc.)													

Spezifische Aktivitäten in Baumaterialien – Zusammenfassung

Produkt/ Verband	Anzahl der Proben	spezifische Aktivität [Bq/kg]														
		K-40			Ra-228			Th-228			U-238			Ra-226		
		Min.	Max.	Me- dian	Min.	Max.	Me- dian	Min.	Max.	Me- dian	Min.	Max.	Me- dian	Min.	Max.	Me- dian
Gipsprodukte	5	< 20	120	< 20	2,3	6	6	1,7	5,8	1,9	8	19	12	3,8	13	10
Kalksandstein	3	35	180	130	3	9,1	7,2	2,8	8,9	7,2	6	10	9,5	4,1	10	10
Mineralwolle	7	49	350	150	< 10	54	18	4,7	64	15	17	84	20	16	80	22
Ziegel	27	470	1200	670	36	95	51	37	98	53	38	67	50	38	63	48
Zement/Mörtel	10	135	380	225	11	20	14	11	21	15	19	40	24	11	35	22
Fliesen/Platten	5	295	620	335	38	96	57	39	97	59	67	110	91	67	110	87
Keramische Rohstoffe (i. W. Ton)	15	65	1700	560	21	125	47	20	135	47	16	115	40	15	115	40
Porenbeton	10	97	350	170	5,6	18	11	4,8	19	11	15	27	21	8	26	19
Mörtel	7	120	310	250	6	31	13	6	31	13	11	53	20	11	53	20
Putze	19	12	220	46	0,9	31	4,2	0,9	31	4,2	2	22	6,3	2	22	6,3
Estriche	5	210	295	255	11	34	13	11	34	13	11	26	13	11	26	13
Leichtbeton	7	710	950	850	27	98	70	27	98	70	22	83	49	22	83	49
Normalbeton	4	130	560	360	10	47	20	10	47	20	13	24	19	13	25	19
gesamt	124	12 1700			1 125			1 135			2 115			2 115		

Zusammenfassung der Messergebnisse für die Untersuchung von Baustoffen zur Abschätzung der Flächen-Exhalationsrate E und der Radon-Aktivitätskonzentration C_{Rn} in einem Modellraum

Messwerte:

- Radiumgehalt C_{Ra-226}
- Emanationskoeffizient e
- Diffusionskoeffizient D_{eff}

Bemerkungen:

Der Diffusionskoeffizient konnte nicht an allen Baustoffproben bestimmt werden. Für die nicht bestimmten Proben wurde für die Berechnungen ein konservativer Wert von $1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ benutzt (gelb markierte Zellen).

Parameter des Modellraumes:

F	90 m ²
V	56 m ³
λ_v	0,5 h ⁻¹
rel. Unsicherheit ε	Faktor 2
rel. Unsicherheit D_{eff}	30 %

Beschreibung	Ra-226 [Bq/kg]	Emanationskoeffizient ε	D_{eff} [m ² /s]	$E^{1)}$ [Bq/m ² h]	Einbaudicke [cm]	Dichte [kg/m ³]	C_{Rn} [Bq/m ³]
Gips	12	0,17	1,00E-07	0,21	3	900	1
Gips	13	0,14	1,00E-07	0,19	3	900	1
Gips	10	0,06	1,00E-07	0,06	3	900	<1
Gips	4,2	0,18	1,00E-07	0,08	3	900	<1
Gips	3,8	0,21	1,00E-07	0,08	3	900	<1
Kalksandstein	4,1	0,032	3,2E-07	0,38	20	1600	2
Kalksandstein	10	0,024	2,7E-07	0,28	20	1600	1
Kalksandstein	10	0,043	1,9E-07	0,20	20	1600	1
Zementmörtel	20	0,512	1,3E-09	3,5	20	2100	15
Zement	35	0,022	9,4E-10	0,27	20	2100	1
Zementmörtel	17	0,718	9,4E-10	4,23	20	2100	18
Zement	24	0,048	9,4E-10	0,40	20	2100	2
Zementmörtel	11	0,5	1,00E-09	1,91	20	2100	8
Zement	28	0,045	1,00E-09	0,44	20	2100	2

Beschreibung	Ra-226 [Bq/kg]	Emanationskoeffizient ϵ	D_{eff} [m ² /s]	$E^{1)}$ [Bq/m ² h]	Einbaudicke [cm]	Dichte [kg/m ³]	C_{Rn} [Bq/m ³]
Zementmörtel	10	0,50	1,00E-09	1,74	20	2100	8
Zement	24	0,03	1,00E-09	0,25	20	2100	1
Zementmörtel	14	0,09	1,00E-09	0,45	20	2100	2
Zement	32	0,04	1,00E-09	0,43	20	2100	2
Normsand	5,7	0,5	1,00E-09	0,61	20	1300	3
Mörtel, M1 ⁷	16	0,040	1,00E-07	0,81	0,6	1800	<1
M3 *	12	0,056	1,00E-07	0,85	0,1	1800	<1
M6 *	63	0,019	1,00E-07	1,53	1,8	700	<1
M7 *	21	0,021	1,00E-07	0,57	1,8	1300	<1
Putz, P1	21	0,092	1,00E-07	0,66	1,5	1250	1
P2	14	0,062	1,00E-07	0,30	1,5	1250	<1
P3	5,0	0,054	1,00E-07	0,09	1,5	1800	<1
P4	8,7	0,041	1,00E-07	0,12	1,5	1700	<1
P5	5,4	0,158	1,00E-07	0,29	1,5	1400	<1
P6	24	0,092	1,00E-07	0,67	2	1600	1
P7	3,9	0,056	1,00E-07	0,07	0,2	1700	<1
P8	12	0,055	1,00E-07	0,20	0,2	1700	<1
P9	4,0	0,054	1,00E-07	0,06	1,5	1700	<1
P10	24	0,044	1,00E-07	0,32	10	500	1
P11	5,6	0,076	1,00E-07	0,13	4	1400	<1
P12	8,1	0,043	1,00E-07	0,10	0,7	1800	1
P13	9,6	0,035	1,00E-07	0,10	0,7	1300	<1
P14	8,8	0,054	1,00E-07	0,14	0,7	1200	<1
P15	14	0,060	1,00E-07	0,25	1,5	1000	<1

⁷ Die Mörtelproben wurden analog zu Putzen betrachtet, wobei die tatsächliche Einbaudicke ins Verhältnis der Mörtelmasse zur Gesamtmasse einer Wand gesetzt wurde.

Beschreibung	Ra-226 [Bq/kg]	Emanationskoeffizient ϵ	D_{eff} [m ² /s]	$E^{1)}$ [Bq/m ² h]	Einbaudicke [cm]	Dichte [kg/m ³]	C_{Rn} [Bq/m ³]
P16	21	0,159	1,00E-07	1,01	1,5	1000	1
P17	6,5	0,034	1,00E-07	0,07	1,5	1800	<1
P18	21	0,082	1,00E-07	0,52	1,5	1250	1
P19	13	0,020	1,00E-07	0,08	1,5	1250	<1
Estrich, E1	20	0,041	1,00E-07	1,21	4	2000	1
E2	24	0,034	1,00E-07	1,20	4	2000	1
E3	15	0,078	1,00E-07	1,74	4	2100	2
E4	12	0,061	1,00E-07	1,09	4	2000	1
E5	14	0,026	1,00E-07	0,54	4	2000	<1
Keramische Rohstoffe, 1	36	0,054	1,00E-07	3,25	20	1600	14
2	40	0,326	1,00E-07	21,67	20	1600	95
3	33	0,157	1,00E-07	8,61	20	1600	38
4	40	0,155	1,00E-07	10,33	20	1600	45
5	46	0,063	1,00E-07	4,83	20	1600	21
6	35	0,067	1,00E-07	3,90	20	1600	17
7	42	0,107	1,00E-07	7,45	20	1600	33
8	48	0,262	1,00E-07	20,86	20	1600	91
9	115	0,011	1,00E-07	2,03	20	1600	9
10	41	0,130	1,00E-07	8,88	20	1600	39
11	41	0,143	1,00E-07	10,43	20	1600	46
12	29	0,154	1,00E-07	7,44	20	1600	33
13	83	0,083	1,00E-07	11,47	20	1600	50
14	38	0,057	1,00E-07	3,63	20	1600	16
15	15	0,066	1,00E-07	1,65	20	1600	7
Mauerziegel	46	0,011	1,00E-07	0,29	20	800	1
Mauerziegel	53	0,005	1,00E-07	0,32	20	800	1

Beschreibung	Ra-226 [Bq/kg]	Emanationskoeffizient ϵ	D_{eff} [m ² /s]	$E^{1)}$ [Bq/m ² h]	Einbaudicke [cm]	Dichte [kg/m ³]	C_{Rn} [Bq/m ³]
Mauerziegel	50	0,011	1,00E-07	0,14	20	800	1
Mauerziegel	39	0,009	1,00E-07	0,19	20	800	1
Mauerziegel	47	0,024	1,00E-07	0,63	20	800	3
Ziegelsplitt	48	0,008	3,00E-07	0,48	20	1600	2
Ziegelsplitt	48	0,007	2,88E-07	0,39	20	1600	2
Ziegelsplitt	49	0,013	2,45E-07	0,74	20	1600	3
Ziegelsplitt	57	0,020	3,00E-07	1,31	20	1600	6
Ziegelsplitt	38	0,063	3,70E-07	2,83	20	1600	12
Ziegelsplitt	45	0,03	3,00E-07	1,60	20	1600	7
Mauerziegel	49	0,024	1,00E-07	0,68	20	800	3
Mauerziegel	44	0,033	1,00E-07	0,83	20	800	4
Mauerziegel	38	0,004	1,00E-07	0,09	20	800	0
Mauerziegel	43	0,007	1,00E-07	0,16	20	800	1
Mauerziegel	49	0,004	1,00E-07	0,11	20	670	0
Mauerziegel	41	0,003	1,00E-07	0,07	20	690	0
Mauerziegel	41	0,002	1,00E-07	0,05	20	780	0
Mauerziegel	42	0,004	1,00E-07	0,12	20	800	1
Mauerziegel	55	0,008	1,00E-07	0,28	20	800	1
Mauerziegel	59	0,001	1,00E-07	0,01	20	800	0
Mauerziegel	57	0,004	1,00E-07	0,16	20	800	1
Porenbeton	8,0	0,23	1,00E-07	0,85	20	650	4
Porenbeton	15	0,19	1,00E-07	1,32	20	650	6
Porenbeton	19	0,10	1,00E-07	0,91	20	650	4
Porenbeton	19	0,08	1,00E-07	0,74	20	650	3
Porenbeton	21	0,06	1,00E-07	0,61	20	650	3
Porenbeton	13	0,05	1,00E-07	0,31	20	650	1

Beschreibung	Ra-226 [Bq/kg]	Emanationskoeffizient ϵ	D_{eff} [m ² /s]	$E^{1)}$ [Bq/m ² h]	Einbaudicke [cm]	Dichte [kg/m ³]	C_{Rn} [Bq/m ³]
Porenbeton	18	0,10	1,00E-07	0,84	20	650	4
Porenbeton	26	0,08	1,00E-07	0,98	20	650	4
Porenbeton	22	0,06	1,00E-07	0,57	20	650	2
Porenbeton	14	0,11	1,00E-07	0,71	20	650	3
Normalbeton	25	0,08	1,00E-07	3,30	20	2350	14
Normalbeton	13	0,05	1,00E-07	1,38	20	2350	6
Normalbeton	24	0,03	1,00E-07	1,11	20	2350	5
Normalbeton	13	0,05	1,00E-07	1,14	20	2350	5
Fliese	67	< 0,01	nnw ⁸	nnw	2,00E+00	1,60E+03	nnw
Fliese	92	< 0,01	4,65E-12	2,43E-02	2	1600	0,1
Fliese	83	< 0,01	3,9E-12	2,01E-02	2	1600	0,1
Fliese/Steingut	87	< 0,01	1,94E-11	4,69E-02	2	1600	0,2
Platte/Steinzeug	110	< 0,01	8E-12	3,81E-02	2	1600	0,2

⁸ nnw: nicht nachweisbar

Bisher erschienene BfS-SW-Berichte

(vorher BfS-AR-, BfS-IAR-, BfS-ST- und BfS-AS-Berichte)

BfS-IAR-1/90

Zähringer, M.; Bieringer, P.; Kromer, B.; Sartorius, H.; Weiss, W.
Entwicklung, Erprobung und Einsatz von Schnellmeßmethoden zur nuklidspezifischen Bestimmung atmosphärischer Kontaminationen.
Freiburg, August 1990

BfS-IAR-2/97

Zähringer, M.; Sempau, J.
Calibration Factors for Dose Rate Probes in Environmental Monitoring Networks Obtained from Monte-Carlo-Simulations
Freiburg, Februar 1997

BfS-IAR-3/98

Weiss, W.; Kelly, G.N.; French, S.
Decision Support for Emergency Response - How Best Can it be Improved?
Proceedings of a BfS/EC Workshop Freiburg, Germany, December 8-10, 1997.
Freiburg, September 1998

BfS-AR-1/01

Bieringer, J. u. P.
Abschlussbericht. In-situ Übung 2000. 16. und 17. Mai 2000.
Länder / BfS in Augsburg und die DWD-Stationen.
Freiburg, März 2001

BfS-ST-1/92

Die Auswirkungen des Unfalls im sowjetischen Kernkraftwerk Tschernobyl auf das Territorium der ehemaligen DDR im Jahre 1989.
Berlin, August 1992

BfS-ST-2/92

Umweltradioaktivität in den ostdeutschen Ländern.
Jahresbericht 1990.
Berlin, September 1992

BfS-ST-3/92

2. Biophysikalische Arbeitstagung. Schlema, 11. bis 13. September 1991.
Berlin, November 1992

BfS-ST-4/93

Teil 1: M. Beyermann, B. Höfs, Teil 2: I. Gans, M. Beyermann, M. Lönnig
Teil 1: Radonmessungen in Gebäuden mit Aktivkohledetektoren und Flüssigszintillations-Spektrometrie Teil 2: Verfahren zur Schnellbestimmung der Aktivitätskonzentration von Radon-222 in der Luft von Gebäuden - Screeningmessung 1993
Berlin, Juli 1993

BfS-ST-5/93

Sarenio, O.; Will, W.
Qualitätssicherung der Dosisleistungsmessungen im Grundpegelbereich.
Berlin, September 1993

BfS-ST-6/95

Schmidt, V.; Feddersen, Ch.; Ullmann, W.
Untersuchungen zur Aussagefähigkeit von passiven Meßsystemen zur Bestimmung der Strahlenexposition durch Radon und kurzlebige Radonfolgeprodukte.
Berlin, Juni 1995

Bisher erschienene BfS-SW-Berichte

(vorher BfS-AR-, BfS-IAR-, BfS-ST- und BfS-AS-Berichte)

BfS-ST-7/95

Bünger, T.; Obrikat, D.; Rühle, H.; Viertel, H.

Materialienband 1993 zur Radioaktivität in Trinkwasser, Grundwasser, Abwasser, Klärschlamm, Reststoffen und Abfällen.

Ergänzung zum Jahresbericht 1993 des BMU "Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung".

Berlin, August 1995

BfS-ST-8/96

Kraus, W.

Strahlenexposition und Strahlenschutzdosimetrie

Berlin, April 1996

BfS-ST-9/96

Umweltradioaktivität im Ostthüringer Bergbauegebiet.

Berlin, Juli 1996

BfS-ST-10/96

Hamel, P.; Lehmann, R.; Kube, G.; Couball, B.; Leißring, B.

Modellhafte Sanierung radonbelasteter Wohnungen in Schneeberg.

Berlin, Oktober 1996

BfS-ST-11/97

Beyermann, M.; Naumann, M.; Sarenio, O.; Schkade U.-K.; Will, W.

Erfahrungen zur Qualitätsüberwachung bei der Ermittlung der Umweltradioaktivität im Rahmen der Meßprogramme zum Projekt "Radiologische Erfassung, Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten (Altlastenkaster)".

Berlin, Februar 1997

BfS-ST-12/97

Bünger, T.; Obrikat, D.; Rühle, H.; Viertel, H.

Materialienband 1994 zur Radioaktivität in Trinkwasser, Grundwasser, Abwasser, Klärschlamm, Reststoffen und Abfällen. Ergänzung zum Jahresbericht 1994 des BMU "Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung".

Berlin, Februar 1997

BfS-ST-13/97

Will, W.; Borsdorf, K.-H.; Mielcarek, J.; Malinowski, D.; Sarenio, O.

Ortsdosisleistung der terrestrischen Gammastrahlung in den östlichen Bundesländern

Deutschlands. Berlin, August 1997

BfS-ST-14/97

Will, W.; Borsdorf, K.-H.

Ortsdosisleistung der terrestrischen Gammastrahlung in Deutschland.

Lehmann, R.; Kemski, J.; Siehl, A.

Radonkonzentration in Wohngebäuden der Bundesrepublik Deutschland.

Berlin, November 1997

BfS-ST-15/98

Bünger, T.; Obrikat, D.; Rühle, H.; Viertel, H.

Materialienband 1995 zur Radioaktivität in Trinkwasser, Grundwasser, Klärschlamm, Reststoffen und Abfällen.

Ergänzung zum Jahresbericht 1995 des BMU "Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung".

Berlin, März 1998

Bisher erschienene BfS-SW-Berichte

(vorher BfS-AR-, BfS-IAR-, BfS-ST- und BfS-AS-Berichte)

BfS-ST-16/99

Bünger, T.; Obrikat, D.; Rühle, H.; Viertel, H.

Materialienband 1996 zur Radioaktivität in Trinkwasser, Grundwasser, Klärschlamm, Reststoffen und Abfällen.

Ergänzung zum Jahresbericht 1996 des BMU "Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung".

Berlin, März 1999

BfS-AS-1/00

Bünger, T.; Obrikat, D.; Rühle, H.; Viertel, H.

Materialienband 1997 zur Radioaktivität in Trinkwasser, Grundwasser, Klärschlamm, Reststoffen und Abfällen.

Ergänzung zum Jahresbericht 1997 des BMU "Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung".

Berlin, Februar 2000

BfS-AS-2/00

Jun, J.-S.¹⁾; Guggenberger, R.; Dalheimer, A.

¹⁾ *Department of Physics, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea*

A Comparative Study on the CL Dosimetric Characteristics of German and Korean Sugar and Sorbite.

Berlin, Oktober 2000

Ab 1. Februar 2003 SW

BfS-SW-01/03

Will, W.; Mielcarek, J.; Schkade, U.-K.

Ortsdosisleistung der terrestrischen Gammastrahlung in ausgewählten Regionen Deutschlands.

Salzgitter, Juni 2003

BfS-SW-02/03

Bittner, S.; Braun, H.; H.-W. Dusemund, H.-W.;

Gregor, J.; Raguse, R.; Voß, W.

Einsatz des Entscheidungshilfesystems RODOS in Deutschland

Salzgitter, Juli 2003

BfS-SW-03/06

Beck, Thomas; Ettenhuber, E.

Überwachung von Strahlenexpositionen bei Arbeiten

Leitfaden für die Umsetzung der Regelung nach Teil 3 Kapitel 1 und 2 StrlSchV

Salzgitter, März 2006

BfS-SW-04/09

urn:nbn:de:0221-2009042344

Beck, Thomas

Spezielle Anforderungen an Geräte zur Bestimmung der Strahlenexposition durch Radon- und

Radonzerfallsprodukte

Salzgitter, April 2009

BfS-SW-05/09

urn:nbn:de:0221-2009120417

Dushe, C.; Gehrcke, K.; Kümmel, M.; Müller, S.

Ergebnisse der Radonmessungen in der bodennahen Luft der Bergbauggebiete

Salzgitter, Dezember 2009

BfS-SW-06/09

urn:nbn:de:0221-20100319945

Beyermann, M.; Bünger, T.; Gehrcke, K.; Obrikat, D.

Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide im Trinkwasser in der Bundesrepublik Deutschland

Salzgitter, Dezember 2009

Bisher erschienene BfS-SW-Berichte

(vorher BfS-AR-, BfS-IAR-, BfS-ST- und BfS-AS-Berichte)

BfS-SW-07/10

urn:nbn:de:0221-20100329966

Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen - Bergbau)
Salzgitter, März 2010

BfS-SW-08/10

urn:nbn:de:0221-201008113016

Beck, T.; Buchröder, H.; Döring, J.; Foerster, E.; Schmidt, V.

Messgeräte zur Bestimmung der Radon-Aktivitätskonzentration oder der Radonexposition – Vergleichsprüfung 2010
Instruments to Measure Radon Activity Concentration or Exposure to Radon – Interlaboratory Comparison 2010
Salzgitter, November 2010

BfS-SW-09/11

urn:nbn:de:0221-201109056212

Calculation Guide Mining

Calculation Guide for the Determination of Radiation Exposure due to Environmental Radioactivity Resulting from Mining
Department Radiation Protection and Environment
Salzgitter, September 2011

BfS-SW-10/11

urn:nbn:de:0221-201109216413

Foerster, E.; Beck, T.; Buchröder, H.; Döring, J.; Schmidt, V.

Messgeräte zur Bestimmung der Radon-Aktivitätskonzentration oder der Radonexposition – Vergleichsprüfung 2011
Instruments to Measure Radon Activity Concentration or Exposure to Radon – Interlaboratory Comparison 2011
Fachbereich Strahlenschutz und Umwelt
Salzgitter, Oktober 2011

BfS-SW-11/12

urn:nbn:de:0221-201204128010

Gering, F.; Gerich, B.; Wirth, E.; Kirchner, G.

Analyse der Vorkehrungen für den anlagenexternen Notfallschutz für deutsche Kernkraftwerke basierend auf den Erfahrungen aus dem Unfall in Fukushima
Fachbereich Strahlenschutz und Umwelt
Salzgitter, April 2012

BfS-SW-12/12

urn:nbn:de:0221-201204168021

Kümmel, M.

Erläuterungen zur Berechnung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität mit den Berechnungsgrundlagen-Bergbau
Fachbereich Strahlenschutz und Umwelt
Salzgitter, April 2012

BfS-SW-13/12

urn:nbn:de:0221-201209149412

Foerster, E.; Beck, T.; Buchröder, H.; Döring, J.; Schmidt, V.

Messgeräte zur Bestimmung der Radon-Aktivitätskonzentration oder der Radonexposition – Vergleichsprüfung 2012
Instruments to Measure Radon Activity Concentration or Exposure to Radon – Interlaboratory Comparison 2012
Fachbereich Strahlenschutz und Umwelt
Salzgitter, September 2012

Bisher erschienene BfS-SW-Berichte

(vorher BfS-AR-, BfS-IAR-, BfS-ST-und BfS-AS-Berichte)

BfS-SW-14/12

urn:nbn:de:0221-201210099810

Gehrcke, K., Hoffmann, B., Schkade, U., Schmidt, V., Wichterey, K.

Natürliche Radioaktivität in Baumaterialien und die daraus resultierende
Strahlenexposition

Fachbereich Strahlenschutz und Umwelt

Salzgitter, November 2012

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

Kontakt:

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 03018 333-0

Telefax: + 49 03018 333-1885

Internet: www.bfs.de

E-Mail: ePost@bfs.de

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Bundesamt für Strahlenschutz