



Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

<http://www.ssk.de>

**Exposition der Bevölkerung durch Radon im
Zusammenhang mit radioaktiven Altlasten**

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 319. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 28./ 29. März 2022

INHALT

1	Einleitung.....	3
2	Beratungsauftrag	4
3	Problemdarstellung / Hintergrund	4
4	Empfehlung	8
5	Begründung.....	9
5.1	Grundlegende Rahmenbedingungen.....	9
5.2	Begründung des Referenzwertes von 300 Bq pro m ³ in Aufenthaltsräumen	10
5.3	Einordnung des Radon-Referenzwertes von 300 Bq pro m ³ in Risikobetrachtungen	11
5.4	Begründung des Referenzwertes von 80 Becquerel pro m ³ im Freien.....	12
6	Konsequenzen hinsichtlich bisheriger Praktiken	13
7	Literatur	14
	Glossar	18

1 Einleitung

Mit Inkrafttreten des Strahlenschutzgesetzes (StrlSchG 2017) wurde der Begriff der radioaktiven Altlast erstmals auf gesetzlicher Grundlage definiert. Radioaktive Altlasten sind im Teil 4 Kapitel 4 Abschnitt 1 des Gesetzes (Strahlenschutz bei bestehenden Expositionssituationen) eingeordnet. Wie generell für bestehende Expositionssituationen wird im Gesetz auch für radioaktive Altlasten ein Referenzwert für die jährliche effektive Dosis der Einzelperson der Bevölkerung anstelle eines Grenzwertes festgelegt. In § 136 StrlSchG wird eine radioaktive Altlast wie folgt definiert: *„Radioaktive Altlasten sind durch abgeschlossene menschliche Betätigung kontaminierte Grundstücke, Teile von Grundstücken, Gebäude oder Gewässer, wenn von der Kontamination eine Exposition verursacht wird oder werden kann, durch die für die Einzelperson der Bevölkerung der Referenzwert der effektiven Dosis von 1 Millisievert im Kalenderjahr überschritten wird.“* Dieser Referenzwert schließt den Dosisanteil durch die Inhalation von Radon und seinen Zerfallsprodukten grundsätzlich ein.

Der Schutz der Bevölkerung vor natürlich vorkommendem Radon ist ebenfalls im Rahmen einer bestehenden Expositionssituation definiert und entsprechend im Teil 4 Kapitel 2 des Strahlenschutzgesetzes geregelt. Allerdings wird beim natürlich vorkommenden Radon gemäß § 124 StrlSchG ausschließlich die Aktivitätskonzentration von Radon-222 mit einem Referenzwert von 300 Bq m^{-3} in der Luft in Aufenthaltsräumen vorgegeben und auf die Berechnung der radonbedingten Dosis verzichtet.

Mit dem Verzicht einer Dosisberechnung und mit dem Bezug auf eine Aktivitätskonzentration löst sich das Konzept zum Schutz vor Radon („Risikobegrenzung durch Begrenzung der Aktivitätskonzentration“) aus dem allgemeinen Konzept des Strahlenschutzes („Risikobegrenzung durch Dosisbegrenzung“). Das Strahlenschutzkonzept für die Exposition der Bevölkerung durch Radon wird damit zwar vom sonst üblichen Bezug auf die Dosis separiert, stützt sich jedoch dennoch auf die gleichen Prinzipien und gleichen Standards bei bestehenden Expositionssituationen wie für andere Expositionsquellen. Mit diesem Vorgehen zum Schutz vor Radon folgt der Gesetzgeber der Richtlinie 2013/59/Euratom (Euratom 2014), die auf die Grundsatzempfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP 2007) und die nachfolgenden Empfehlungen speziell zum Thema Radon (ICRP 2010, ICRP 2014) Bezug nimmt.

Zur Ermittlung des aus der Inhalation von Radon und seinen Zerfallsprodukten resultierenden Lungenkrebsrisikos für die Bevölkerung wird in einschlägigen Studien (z. B. Darby et al. 2005) unmittelbar die Aktivitätskonzentration herangezogen. Es bietet sich daher an, den Schutz vor Radon auf diese gut messbare Größe zu stützen. Vor diesem Hintergrund ist die Schwierigkeit zu bewerten, belastbare Berechnungen von Organdosen und effektiven Dosen durch eine erfolgte Radonexposition durchführen zu können. Aufgrund des derzeitigen Wissensstandes sind die Radon-Dosiskoeffizienten mit großen Unsicherheiten behaftet, auf die die SSK in ihrer Empfehlung zu diesem Thema hingewiesen hat (SSK 2017). Auch UNSCEAR hebt bei der Diskussion um den Radon-Dosiskoeffizienten diesen Umstand hervor (UNSCEAR 2019). Die natürlich bedingte Aktivitätskonzentration von Radon in der Atmosphäre ist erheblich größer als die anderer Radionuklide. Vor diesem Hintergrund bekommt die Unsicherheit des Dosiskoeffizienten für Radon eine besonders große Bedeutung.

Referenzwerte für Radon beziehen sich durchgehend auf eine Aktivitätskonzentration und nicht auf eine effektive Dosis. Die einzige Ausnahme bildet zurzeit die Definition der Altlast in § 136 StrlSchG. Hier wird, wie oben erwähnt, gegenwärtig der Radonanteil in den Dosisreferenzwert einbezogen. Dies durchbricht also konzeptionell die sonst durchgängige Abtrennung des Schutzes vor Radon vom Dosisbezug für die Bevölkerung. Die vorliegende Empfehlung hat daher u. a. zum Ziel, auch den Schutz der Bevölkerung vor Radon aus radioaktiven Altlasten

an die im sonstigen Strahlenschutz für Radon definierten Bezugsgrößen konzeptionell anzugleichen und damit den gleichen Kriterien bezüglich des Schutzes vor Radon zu unterwerfen.

2 Beratungsauftrag

Mit Schreiben vom 31. Januar 2020 bat das Bundesumweltministerium die SSK um eine Empfehlung für ein Konzept zum Schutz vor der Exposition durch Radon im Zusammenhang mit radioaktiven Altlasten. Diese Empfehlung sollte folgenden Punkten Rechnung tragen und gleichzeitig zu einer Harmonisierung mit der Vorgehensweise zum Schutz vor Radon in Aufenthaltsräumen gemäß Strahlenschutzgesetz beitragen:

- Der Radon-Dosiskoeffizient ist derzeit mit signifikanten Unsicherheiten behaftet. Der Wert des Radon-Dosiskoeffizienten kann sich aber im Rahmen der Dosisbestimmung im Strahlenschutzrecht direkt auf die Einstufung einer Altlastenverdachtsfläche als einer radioaktiven Altlast auswirken. Wie kann eine robuste Bewertung von Radonexpositionen vor dem Hintergrund von – je nach Altlast – teilweise sehr aufwändigen Sanierungsarbeiten erfolgen?
- Das System der Regelungen zum Schutz vor Radon für Einzelpersonen der Bevölkerung in Aufenthaltsräumen sieht – im Gegensatz zu der Betrachtung bei radioaktiven Altlasten – gerade keine Berechnung einer Dosis vor, sondern beruht auf Referenzwerten im Hinblick auf die Radon-222-Aktivitätskonzentration in der (Innenraum-)Luft. Es finden somit zwei unterschiedliche Betrachtungsweisen für potenziell denselben Sachverhalt Anwendung. Ist hier eine Harmonisierung möglich?
- Bei Altlasten, welche zu einer Freisetzung von Radon führen, gilt es, die von der Altlast ausgehende Radonexposition vor dem Hintergrund der ggf. zusätzlich auftretenden Radon-Aktivitätskonzentrationen in der Innenraumluft durch geogenes Radon zu bestimmen und zu bewerten. Welche Verfahrensweisen sind hierfür erforderlich?

3 Problemdarstellung / Hintergrund

Ursprung von Radon

Die Exposition durch Radon ist Teil der natürlichen Strahlenexposition, da Radon als Zerfallsprodukt des in der Erdkruste enthaltenen natürlichen Radionuklids U-238 freigesetzt wird. Die in der Bodenluft enthaltenen Radonkonzentrationen liegen selbst in Böden mit geringen Urangelhalten bei einigen $1\,000\text{ Bq m}^{-3}$ und erreichen in Gebieten mit etwas stärker uranhaltigen Gesteinen Werte bis über $100\,000\text{ Bq m}^{-3}$ (siehe Radonkarte des Bundesamtes für Strahlenschutz¹). Das Radon in der Bodenluft kann je nach Gasdurchlässigkeit (Gaspermeabilität) des Bodens in die freie Atmosphäre übergehen sowie durch Leckagen der Gebäudehülle auch in Gebäude eintreten. Die Radonkonzentrationen betragen in Deutschland typischerweise etwa 50 Bq m^{-3} in Innenräumen und etwa 10 Bq m^{-3} in der freien Atmosphäre.

Durch anthropogene Tätigkeiten wie den Untertagebergbau, der durch die Auflockerung des Untergrundes gute Wegsamkeiten für Gase schafft, kann der Radontransport im Boden erhöht werden. Uranhaltige Ablagerungen auf der Erdoberfläche, wie Hinterlassenschaften des Uran-

¹ https://www.bfs.de/SharedDocs/Bilder/BfS/DE/ion/umwelt/radon-karte-boden.jpg?__blob=poster&v=21

bergbaus oder auch Hinterlassenschaften anderer industrieller Aktivitäten, bei denen uranhaltige Rohstoffe verarbeitet wurden, stellen ebenso bedeutende anthropogene Radonquellen dar. Dadurch entstehen Expositionssituationen in Gebäuden oder im Freien, bei denen zusätzlich zur allgemeinen geogenen Radonquelle auch anthropogene Quellen signifikant zur Exposition beitragen.

Expositionssituation

Im Konzept des Strahlenschutzes stellt die Exposition durch Radon eine bestehende Expositionssituation dar (ICRP 2007). In § 2 Abs. 4 StrlSchG ist eine bestehende Expositionssituation definiert als *„Expositionssituation, die bereits besteht, wenn eine Entscheidung über ihre Kontrolle getroffen werden muss“*. Für diese Klasse von Expositionssituationen sind keine Grenzwerte vorgesehen. Als Instrument der Optimierung im Strahlenschutz dienen hier die Referenzwerte, die ein flexibles und an die Situation angepasstes Vorgehen im Prozess der Optimierung erlauben. Ein Referenzwert ist nach § 5 Abs. 25 StrlSchG *„ein festgelegter Wert, der als Maßstab für die Prüfung der Angemessenheit von Maßnahmen dient“*.

In Bezug auf den Referenzwert für bestehende Expositionssituationen entwirft die ICRP in ihrer Publikation 103 (ICRP 2007) einen Bereich für Referenzwerte (*„bands of constraints and reference levels“*), den sie von 1 mSv a^{-1} bis 20 mSv a^{-1} ansiedelt. Dieser Wertebereich wird in dem Anhang I der Richtlinie 2013/59/Euratom (Euratom 2014) übernommen. Für Radon werden Referenzwerte mit Bezug auf die Rn-222-Aktivitätskonzentration in Bq m^{-3} angegeben. Im deutschen Strahlenschutzrecht wird für radioaktive Altlasten in § 136 StrlSchG der unterste Wert des ICRP-Bereichs, also 1 mSv a^{-1} , als Referenzwert für die Exposition der Einzelpersonen der Bevölkerung festgelegt. In den Erläuterungen zu § 136 StrlSchG heißt es: *„Der Referenzwert ist der Maßstab für die Feststellung einer radioaktiven Altlast und die Abwägungen hinsichtlich Notwendigkeit, Ausgestaltung und Durchführung von Maßnahmen“*. In diesem Referenzwert ist der Beitrag des Radons miteinbezogen.

Die effektive Dosis als Bezugsgröße für Referenz- und Grenzwerte

Mit der effektiven Dosis ist im Strahlenschutz eine Schutzgröße definiert, die ein Maß für das Strahlenrisiko liefert und mit der unterschiedliche Expositionsbedingungen, Strahlenarten und betroffene Organe vergleichbar gemacht werden können. Es können also mit Bezug auf einen Dosiswert (z. B. einen Dosisgrenzwert oder einen Dosisreferenzwert) verschiedene Expositionsszenarien einem gemeinsamen und gleichen Schutzstandard unterworfen werden.

Zur Ermittlung der effektiven Dosis als Schutzgröße sind die zusätzlichen, aus einer kontrollierbaren Quelle stammenden Expositionen, zu bestimmen. Die natürliche Strahlenexposition ist bei der Ermittlung auszuklammern (*„Nettodosis“*) (BfS 2010).

Das Konzept zum Schutz vor Radon

Für den Schutz der Bevölkerung vor Radon sehen das Strahlenschutzgesetz (StrlSchG 2017) und die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV 2018) auf der Grundlage der Grundsatzempfehlungen der ICRP (ICRP 2007) vor, die Exposition in Aufenthaltsräumen ausschließlich über die Angabe von Referenzwerten für die Radon-Aktivitätskonzentration zu bewerten. Aufenthaltsräume im Sinne des § 5 Abs. 5 StrlSchG stellen eine Teilmenge der Innenräume dar. In Abgrenzung zum übergeordneten Innenraum wird die Bestimmung dieser Räume zum nicht

nur vorübergehenden Aufenthalt von Einzelpersonen der Bevölkerung in den Blick genommen. Personen in Aufenthaltsräumen erhalten keine berufliche Strahlenexposition².

Im Unterschied zum sonst üblichen Dosisbezug ist der Schutz vor Radon mit Bezug auf die Messgröße Radon-222-Aktivitätskonzentration aufgebaut. Eine Unterscheidung von geogenen und etwaigen anthropogenen Anteilen ist hierbei nicht vorgesehen und schwierig durchführbar. Mit dem Verzicht auf eine Dosisberechnung für Radon und dem ausschließlichen Bezug auf eine Aktivitätskonzentration löst sich das Konzept zum Schutz vor Radon aus dem allgemeinen Konzept des Strahlenschutzes. Dieser Ansatz umgeht Schwierigkeiten, belastbare Berechnungen von Organ-Äquivalentdosen und effektiven Dosen durch eine erfolgte Radonexposition durchzuführen. Bei der Bestimmung der Radon-Dosiskoeffizienten existieren große Unsicherheiten, auf die die SSK in ihrer Empfehlung zu diesem Thema hingewiesen hat (SSK 2017). Auch UNSCEAR hebt bei der Diskussion um den Radon-Dosiskoeffizienten diesen Umstand hervor (UNSCEAR 2019).

Optimierung beim Schutz vor Radon

Der Optimierungsprozess in bestehenden Expositionssituationen mit Hilfe von Referenzwerten bezieht sich in der Regel auf spezifische Expositionsbedingungen und erlaubt auf diese Weise ein flexibles Vorgehen. Der einheitliche Bezug auf eine feste und vergleichbare Bezugsgröße wie die Dosis ist dabei nicht erforderlich. So gesehen ist das Konzept zum Schutz vor Radon für die Bevölkerung schlüssig.

In der ICRP-Veröffentlichung 103 wird das Konzept des bereits erwähnten „*bands of constraints and reference levels*“ auch auf Radon angewendet (ICRP 2007). Die gesonderte Behandlung von Radon mit dem Bezug auf die Aktivitätskonzentration wird hervorgehoben und wird u. a. damit begründet, dass bestimmte dosimetrische und epidemiologische Fragestellungen für Radon spezifisch seien. Dem Optimierungsgrundsatz und der Anwendung von Referenzwerten komme dabei eine zentrale Rolle zu (ICRP 2007, Absatz 292). Unter Zugrundlegung des Mittelwerts aus dem Bereich für Referenzwerte (etwa 10 mSv a^{-1}) kam die ICRP auf den damaligen Referenzwert von 600 Bq m^{-3} für Wohnungen (ICRP 2007, Absatz 294). In der Folgezeit wurde dieser Bezug stets aufrechterhalten. Als Reaktion auf ihre Überprüfung epidemiologischer Studien zu gesundheitlichen Folgen der Radonexposition in der Veröffentlichung 115 (ICRP 2010) und der Erhöhung des nominalen Risikokoeffizienten um etwa den Faktor 2 senkte die ICRP in der zugehörigen Erklärung den oberen Referenzwert für Wohnungen auf 300 Bq m^{-3} . Dem folgte die Richtlinie 2013/59/Euratom und senkte gleichfalls den Referenzwert auf 300 Bq m^{-3} (Euratom 2014) in Einklang mit der ebenfalls 2014 veröffentlichten Empfehlung der ICRP 126 „Radiological Protection against Radon Exposure“ (ICRP 2014).

Es ist wichtig festzuhalten, dass sich das Strahlenschutzkonzept für die Exposition der Bevölkerung durch Radon zwar vom sonst üblichen Bezug auf die Dosis löst, sich jedoch dennoch auf die gleichen Prinzipien und gleichen Standards bei bestehenden Expositionssituationen stützt wie für andere Expositionsquellen.

Stilllegung Uranbergbau-Altlasten (Entwicklung seit 1991)

Bereits vor dem Inkrafttreten des Strahlenschutzgesetzes im Jahr 2018 waren radioaktive Altlasten zu bewerten und Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor altlastenbedingten Strah-

² Hierunter fallen als wichtigste Gruppe die Wohnräume, aber auch sonstige Aufenthaltsräume, etwa Räume in Kindergärten und Schulen, private Arbeitszimmer, Hobbyräume und Spielzimmer. Innenräume können also sowohl Aufenthaltsräume als auch Arbeitsplätze sein. Sie können auch beides zusammen sein, z. B. in Klassenzimmern (Aufenthaltsraum für Schüler aber Arbeitsplatz für Lehrer).

lenexpositionen, einschließlich dem Schutz vor Radon aus den Altlasten, abzuleiten. Gegenstand von Bewertungen waren insbesondere die Hinterlassenschaften der Förderung und Verarbeitung von Uranerz in Thüringen und Sachsen (SSK 1991), aber auch radioaktive Altlasten aus anderen industriellen Tätigkeiten (Gellermann 2010).

Die Strahlenschutzkommission hat in der Vergangenheit zum Schutz vor Radon aus Altlasten des Uranerzbergbaus verschiedene Empfehlungen veröffentlicht. An erster Stelle sind hier die bereits 1991 verabschiedeten Strahlenschutzgrundsätze für die Verwahrung, Nutzung oder Freigabe von kontaminierten Materialien, Gebäuden, Flächen oder Halden aus dem Uranerzbergbau (SSK 1991) zu nennen. Die Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaus wurden darin als eine vorgegebene bzw. als bereits existierende Strahlenexposition charakterisiert. Als Maßstäbe zur Bewertung und Reduzierung der individuellen Strahlenexposition übernahmen Richtwerte die Funktion von Grenzwerten. Auf den Umstand, dass es sich hierbei um Richtwerte und nicht um Grenzwerte handelt, wies die SSK explizit in ihrer Empfehlung im Jahr 1991 hin (SSK 1991). Die Rechtfertigung und Optimierung waren auf die Interventionsmaßnahmen zu richten. Die SSK empfahl für die Nutzung von Flächen, Gebäuden und Halden, die durch den Uranerzbergbau kontaminiert waren, einen primären Richtwert der effektiven Dosis von 1 mSv a^{-1} . Er orientierte sich an der Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition³.

Der Richtwert von 1 mSv a^{-1} bezog sich auf bergbaubedingte Expositionen, zusätzlich zu der Strahlenexposition, die durch die natürlicherweise in der Region vorhandenen Radionuklide der Uran-Radium-Reihe bedingt ist. Der Richtwert schloss die Dosis durch die Inhalation von Radon und seinen Zerfallsprodukten auf kontaminierten Flächen, Halden und deren Umgebung ein, nicht jedoch die Dosis durch Radon in Häusern. Für Radon in Häusern wurde auf Eingreifrichtwerte verwiesen, die in einer früheren Empfehlung der SSK bereits festgelegt worden waren. Die entsprechende Empfehlung aus dem Jahr 1988 (SSK 1988) war den Strahlenschutzgrundsätzen (SSK 1991) als Anlage beigelegt. Die SSK hatte die Obergrenze des Normalbereiches der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Raumluft auf 250 Bq m^{-3} definiert (SSK 1988). Für einen langzeitigen Mittelwert oberhalb von 250 Bq m^{-3} wurden Sanierungsmaßnahmen zur Reduzierung der Radon-222-Aktivitätskonzentration der Raumluft empfohlen.

Im Jahr 1994 hat die Strahlenschutzkommission dann eine gesonderte Empfehlung zur Bewertung der Strahlenexposition infolge von Radonfreisetzungen aus Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaus in Sachsen und Thüringen verabschiedet (SSK 1994). Die durchschnittliche Radon-222-Aktivitätskonzentration im Freien liegt in Deutschland⁴ zwischen 3 Bq m^{-3} und 31 Bq m^{-3} und kann durch eine logarithmische Normalverteilung mit einem geometrischen Mittelwert von $8,2 \text{ Bq m}^{-3}$ mit einer geometrischen Standardabweichung von $1,9 \text{ Bq m}^{-3}$ angenähert werden (BfS 2018)⁵.

³ Die Begriffe vorgegebene Situation bzw. existierende Strahlenexposition und der Begriff Richtwert wurden so in (SSK 1991) wörtlich verwendet. Im Sprachgebrauch des modernen Strahlenschutzes treten an ihre Stelle die Begriffe bestehende Expositionssituation bzw. Referenzwert, wohingegen der Begriff Richtwert im Sinne von Dose Constraint Anwendung bei der Optimierung der Strahlenexposition bestimmter Expositionspfade findet (siehe StrlSchG 2017 und StrlSchV 2018).

⁴ <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/vorkommen/freiluft.html>

⁵ Die hier diskutierten Radon-Aktivitätskonzentrationen liefern einen guten Anhaltspunkt für die meist niedrigen Radon-Aktivitätskonzentrationen in der Außenluft, auch wenn deren Messung herausfordernd und mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Diese Unsicherheiten wurden von der SSK in der vorliegenden Empfehlung nicht bewertet.

An der natürlichen Varianz der Radon-222-Aktivitätskonzentration im Freien orientierte sich die SSK und empfahl als Richtwert der langzeitigen Radon-222-Aktivitätskonzentration im Freien in den einer bergbaulichen Hinterlassenschaft nächstgelegenen Wohngebieten, möglichen Bebauungsgebieten oder ständigen Aufenthaltsbereichen einen Wert von 80 Bq m^{-3} (SSK 1994). Mit der Empfehlung sollte die Exposition durch Inhalation von Radon und seinen Zerfallsprodukten nicht mehr in die Dosisberechnung zum Vergleich mit dem Dosisrichtwert von 1 mSv a^{-1} nach (SSK 1991) einbezogen, sondern durch einen gesonderten Richtwert beschränkt werden. In ihrer Begründung verwies die SSK im Jahr 1994 bereits auf die Schwierigkeit der Umrechnung einer Radon-222-Aktivitätskonzentration in einen Wert der effektiven Dosis.

Die Empfehlung (SSK 1994) fand nur kurzzeitig in der Genehmigungspraxis der Sanierung der Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaus Anwendung. Ab der zweiten Hälfte der 1990er Jahre wurde die Exposition durch die Inhalation von Radon und seinen Zerfallsprodukten bei der Berechnung der effektiven Dosis wieder einbezogen. Dabei wurde über die SSK-Empfehlung aus dem Jahr 1991 (SSK 1991) hinaus nicht nur das Radon im Freien, sondern auch die aus dem Radon im Freien resultierende Radon-222-Aktivitätskonzentration in Häusern in die Expositionsrechnung zum Vergleich mit dem Richtwert von 1 mSv a^{-1} einbezogen. Die Vorgehensweise wurde in den Berechnungsgrundlagen Bergbau – Teil Radon (BfS 1999) festgeschrieben. Die aktuell geltenden Berechnungsgrundlagen Bergbau (BfS 2010) schreiben diese Vorgehensweise fort. Demnach ist beim Expositionsszenario „Aufenthalt im Gebäude“ der Eintritt radonhaltiger Außenluft zu beachten, sofern sich das Gebäude auf oder in unmittelbarer Umgebung einer bergbaulichen Hinterlassenschaft befindet. Bergbaubedingtes Radon im Freien unmittelbar am Haus geht damit in die Berechnung der Dosis für den Aufenthalt im Haus mit ein, wobei eine jährliche Aufenthaltszeit im Haus von 7 000 h unterstellt wird. Die Anwendung der Berechnungsgrundlagen Bergbau und damit die Einbeziehung des Radons in die Dosisabschätzung, sowohl für den Aufenthalt im Freien als auch für den Aufenthalt in Gebäuden, ist die derzeitige Praxis bei der Bewertung und Stilllegung der Altlasten des Uranerzbergbaus in Sachsen und Thüringen.

4 Empfehlung

Beim Schutz der Bevölkerung in bestehenden Expositionssituationen sollen sowohl die allgemeinen Strahlenschutzgrundsätze als auch das Konzept zum Schutz vor Radon gleichberechtigt angewendet werden. Daraus folgt, dass die Inhalation von Radon von allen anderen Expositionspfaden getrennt betrachtet werden muss:

Empfehlung 1: Die SSK empfiehlt zur Einstufung einer radioaktiven Altlast gemäß §136 StrlSchG folgendes Vorgehen: Der Referenzwert für die effektive Dosis der Bevölkerung von 1 mSv im Kalenderjahr wird für alle Expositionspfade mit Ausnahme der Inhalation von Radon berechnet. Die Exposition durch Radon wird gesondert betrachtet.

Durch Empfehlung 1 wird Radon bei der Ermittlung der effektiven Dosis ausgenommen und somit der Absicht Rechnung getragen, eine Angleichung an das Konzept zum Schutz vor Radon zu erreichen. Der Schutz der Bevölkerung vor Radon wird durch folgende Referenzwerte mit Bezug auf die Aktivitätskonzentration gewährleistet:

Empfehlung 2: Die SSK empfiehlt zur Einstufung einer radioaktiven Altlast gemäß §136 StrlSchG in Ergänzung zum Referenzwert der effektiven Dosis gemäß

Empfehlung 1 zusätzlich folgende Referenzwerte für die über das Jahr gemittelte Radon-222-Aktivitätskonzentration anzuwenden:

- a) 300 Bq m⁻³ in der Luft in Aufenthaltsräumen,
- b) 80 Bq m⁻³ in der Luft an relevanten Einwirkstellen im Freien.

Die Überschreitung mindestens eines der in Empfehlung 1 und 2 genannten Referenzwerte führt somit zur Einstufung als radioaktive Altlast.

5 Begründung

5.1 Grundlegende Rahmenbedingungen

Die Regelungen zu radioaktiven Altlasten im Teil 4 Kapitel 4 Abschnitt 1 StrlSchG bezwecken den Schutz der Bevölkerung bei bestehenden Expositionssituationen, genau wie die Regelungen zum Schutz der Bevölkerung vor natürlich vorkommendem Radon (Teil 4 Kapitel 2 StrlSchG) oder die Regelungen zum Schutz vor Radioaktivität in Bauprodukten (Teil 4 Kapitel 3 StrlSchG). Neben dem Schutz haben sie aber auch den Zweck, Verantwortlichkeiten für eine Altlast festzulegen. Sowohl das Schutzniveau als auch die zugehörige Verantwortlichkeit müssen sich am Grundsatz der Verhältnismäßigkeit orientieren. Einzelpersonen, die von einer Altlastensituation betroffen sind, sollen den gleichen Schutz genießen wie Personen der Bevölkerung in anderen Expositionssituationen.

Für bestehende Expositionssituationen sind prinzipiell keine Grenzwerte vorgesehen. Als Instrument der Optimierung im Strahlenschutz dienen hier die Referenzwerte, die ein flexibles und an die Situation angepasstes Vorgehen im Prozess der Optimierung erlauben.

Für die Entscheidung, ob eine bestehende Expositionssituation aus Strahlenschutzgründen Maßnahmen erfordert, werden zwei unterschiedliche Bezugsgrößen benutzt.

- Der Dosisbezug, der bei der gegenwärtig gültigen Bestimmung radioaktiver Altlasten in § 136 Abs. 1 StrlSchG, aber auch im Zusammenhang mit der Radioaktivität in Baustoffen oder bei sonstigen bestehenden Expositionssituationen als Bewertungsmaßstab dient, bezieht sich auf eine zusätzliche Strahlenexposition aus einer kontrollierbaren Strahlungsquelle. Die zu ermittelnde Körper-Äquivalentdosis als Schutzgröße ist daher stets das Inkrement zusätzlich zu einer allgemeinen (natürlichen) Exposition („Nettowert“).
- Für Radon gilt demgegenüber der Bezug auf den Jahresmittelwert der Radon-222-Aktivitätskonzentration, wie er im StrlSchG zum Schutz der Bevölkerung vor natürlich vorkommendem Radon geregelt ist. Durch den Bezug auf einen „Bruttowert“ einer Messgröße (verursacht durch die Gesamtheit aller Radonquellen) unterscheidet sich dieser Ansatz grundlegend vom sonstigen, an der Körper-Äquivalentdosis (Schutzgröße) ausgerichteten Konzept des Strahlenschutzes.

Ein Vorteil der Verwendung der Körper-Äquivalentdosis als Schutzgröße ist die Anwendbarkeit für verschiedene Expositionssituationen und die Möglichkeit des Vergleichs der damit verbundenen Risiken. Der Vorteil der Verwendung der Messgröße Radon-222-Aktivitätskonzentration als Bezugsgröße der Optimierung ist deren einfachere Bestimmbarkeit. Trotz dieser unterschiedlichen Vorteile verfolgen beide Konzepte das gleiche Ziel.

Soweit im Rahmen der gesetzlichen Regelungen das Schutzniveau bei *geplanten* Expositionssituationen durch Grenzwerte der Körper-Äquivalentdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung festgelegt wird, werden Strahlenexpositionen aus Tätigkeiten, die weder genehmigungs- noch

anzeigebedürftig sind, nicht in die Ermittlung der Körper-Äquivalentdosis einbezogen. Kommt es bei einer beruflichen Tätigkeit, z. B. mit natürlich vorkommender Radioaktivität, zu einer Exposition von 0,9 mSv im Kalenderjahr, erfolgt keine Einstufung als beruflich exponierte Person (§ 56 StrlSchG). Wenn diese Person darüber hinaus in einem Haus wohnt, dessen Baumaterial den Anforderungen des § 133 StrlSchG genügt und als *bestehende* Expositionssituation zu einer weiteren, externen, Exposition von 0,9 mSv im Kalenderjahr führt, wird diese Exposition ebenfalls nicht berücksichtigt. Der Strahlenschutz gibt also keine generelle Begrenzung auf 1 mSv im Kalenderjahr vor. Diesem Sachverhalt trägt die SSK bei der Ausgestaltung dieser Empfehlung Rechnung.

5.2 Begründung des Referenzwertes von 300 Bq pro m³ in Aufenthaltsräumen

Nach Auswertungen des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) beträgt die mittlere Radon-222-Aktivitätskonzentration in Wohnungen (Aufenthaltsräumen) in Deutschland ca. 50 Bq m⁻³. Ein Wert von 300 Bq m⁻³ wird nur in weniger als 2 % der Wohnungen überschritten (Petermann und Bossew 2021).

Da bei bergbaulichen oder industriellen Hinterlassenschaften gegenüber der allgemeinen Umweltradioaktivität erhöhte Radonkonzentrationen sowohl in Gebäuden als auch in der Umgebungsluft vorkommen können, ist im Zusammenhang mit radioaktiven Altlasten die Bewertung von Radon als Teil einer komplexen, über unterschiedliche Expositionspfade entstehenden Strahlenexposition die zu lösende Aufgabe. Dabei sollte der Strahlenschutz gleiche Maßstäbe und damit gleichen Schutz für alle Personen der Bevölkerung im gesamten Staatsgebiet sicherstellen.

Eine Bemessung des Strahlenschutzes bei Altlasten an der effektiven Dosis unter Einschluss von Radon würde bei Fällen, in denen Radon-222-Aktivitätskonzentrationen in Aufenthaltsräumen unter 300 Bq m⁻³ vorkommen, Maßnahmen begründen, die auf ein restriktiveres Schutzniveau gegenüber dem Vorkommen von Radon in Aufenthaltsräumen ohne Altlast hinauslaufen. Dieses Schutzniveau würde den Verursacher zu Maßnahmen verpflichten und ihn damit im Vergleich zu Verantwortlichen in anderen Fällen mit ähnlichen Expositionssituationen (z. B. Arbeitgeber als Verpflichtete nach § 131 StrlSchG) benachteiligen.

Bei einer ansonsten als Teil der allgemeinen Umweltradioaktivität tolerierten Radon-222-Aktivitätskonzentration unterhalb des Referenzwertes von 300 Bq m⁻³ in Aufenthaltsräumen, führt eine davon abweichende Bewertung bei Altlasten zu einer regulatorischen Asymmetrie, die vermieden werden sollte und durch die Empfehlungen 1 und 2 auch vermieden wird.

Um dem vorgenannten Ziel gerecht zu werden, ist daher der konzeptionelle Unterschied bei der Bewertung von bestehenden Expositionssituationen einerseits durch Radon und andererseits durch sonstige Radionuklide auch auf die Bewertung von Altlasten anzuwenden. Die Empfehlungen 1 und 2 setzen diesen Gedanken um.

Die SSK weist in diesem Zusammenhang ausdrücklich darauf hin, dass der Charakter des Referenzwertes als Instrument der Optimierung eine fallbezogene Ausgestaltung des Strahlenschutzes zulässt, bei der sowohl Konzentrationen über dem Referenzwert toleriert als auch Konzentrationen unterhalb des Referenzwertes im Rahmen der Optimierung abgesenkt werden können.

Ein separater Referenzwert für die Radon-222-Aktivitätskonzentration entbindet von der Notwendigkeit, Aktivitätskonzentrationen unterhalb dieses Wertes in Aufenthaltsräumen bei Altlastenverdachtsflächen daraufhin zu prüfen, ob sie durch eine Kontamination verursacht werden oder nicht. Übersteigt die Radon-222-Aktivitätskonzentration allerdings den Referenzwert,

sind Maßnahmen zur Reduzierung der Konzentration (ggf. auch nur der Exposition) aus Strahlenschutzgründen gerechtfertigt und, soweit mit verhältnismäßigen Mitteln umsetzbar, auch auszuführen.

In einem solchen Fall stellt sich die Frage nach den Ursachen und damit der Verantwortlichkeit. Erhöhte Radonkonzentrationen in Aufenthalts- oder Innenräumen von Gebäuden können auch eine Folge der natürlichen geologischen Beschaffenheit des Untergrundes in Verbindung mit der Beschaffenheit des Baukörpers sein. Für diesen Fall sind im Teil 4 Kapitel 2 StrlSchG die Verantwortlichkeiten geregelt.

Für die Zuweisung einer Verantwortung, wie sie mit der Altlastenregelung verbunden ist, sind anthropogene Veränderungen aus inzwischen (rechtlich) abgeschlossenen Tätigkeiten der entscheidende Bezug. Derartige Veränderungen können Ablagerungen radiumhaltiger Materialien oder radiumhaltiger radioaktiver Stoffe im unmittelbaren Umfeld von Gebäuden oder auch radiumhaltige Kontaminationen im Gebäude sein. Es können auch anthropogene Wegsamkeiten im Untergrund vorhanden sein, über die radonreiche Luft an Baukörper geführt werden kann. Dies kann erhöhte Radonkonzentration in Gebäuden verursachen (BfS 2019). Die im § 136 StrlSchG vorgenommene Beschränkung des Begriffs der radioaktiven Altlast auf durch abgeschlossene menschliche Betätigung kontaminierte Grundstücke, Teile von Grundstücken, Gebäude oder Gewässer deckt folglich bei einer Radonbelastung die möglichen anthropogenen Ursachen nicht ab. Die SSK sieht daher die Notwendigkeit, anthropogene Veränderungen außerhalb eines Gebäudes, insbesondere auch bergbaulich geschaffene Wegsamkeiten im Untergrund, die Ursache einer Referenzwertüberschreitung sind, in die Altlastendefinition einzubeziehen.

Die SSK weist ausdrücklich darauf hin, dass ein rein geografischer Bezug zu (Alt-)Bergbaugebieten nicht hinreichend ist, um nachzuweisen, dass eine den Referenzwert übersteigende Radon-222-Aktivitätskonzentration durch anthropogene Wegsamkeiten verursacht wird und damit als Altlast anzusehen ist. Ein entsprechender Verdacht sollte einzelfallbezogen geprüft und bewertet werden.

5.3 Einordnung des Radon-Referenzwertes von 300 Bq pro m³ in Risikobetrachtungen

Durch den Bezug auf die Radon-222-Aktivitätskonzentration werden methodische Unsicherheiten bei der Bestimmung von Dosiswerten durch Radon vermieden. Bereits in ihrer Empfehlung im Jahr 2017 wies die SSK auf einige konzeptionelle Brüche bei der Herleitung der von der ICRP neu vorgeschlagenen Radon-Dosiskoeffizienten sowie auf die damit verbundenen Unsicherheiten hin und kam zum Schluss, dass die in der ICRP-Publikation 115 (ICRP 2010) und ICRP-Publikation 126 (ICRP 2014) vorgeschlagenen Umrechnungen von Radon-Expositionswerten (in MBq h m⁻³ oder in WLM) zu Werten für die effektive Dosis (in mSv) erhebliche Unsicherheiten aufweisen (SSK 2017). Zudem konnten in den genannten ICRP-Veröffentlichungen neue Studien, insbesondere die WISMUT-Bergarbeiterstudien (Kreuzer et al. 2010, Kreuzer et al. 2017, Kreuzer et al. 2018, Kreuzer et al. 2021, Rage et al. 2020, Walsh et al. 2015), nicht berücksichtigt werden.

Der mit dem Referenzwert für die Radon-222-Aktivitätskonzentrationen von 300 Bq m⁻³ für Aufenthaltsräume gesetzte Maßstab ist beim derzeitigen Kenntnisstand angemessen. Grundlage für die Festsetzung eines Referenzwerts von 300 Bq m⁻³ durch die ICRP (ICRP 2010, ICRP 2014) sind Risikoschätzungen, die sich auf epidemiologische Studien an Uran-Bergarbeitern, vor allem aber auf gepoolte Studien zur radonexponierten Wohnbevölkerung mit Daten aus Europa (Darby et al. 2005), Nordamerika (Krewski et al. 2005, Krewski et al. 2006) und China (Lubin et al. 2004), stützen. Epidemiologische Studien zu den Kohorten der Beschäftigten der

SDAG Wismut wurden nicht berücksichtigt. In der Richtlinie 2013/59/Euratom (Euratom 2014) wurde gleichfalls der Referenzwert von 300 Bq m^{-3} festgelegt, der in das StrlSchG übernommen wurde. Im Gegensatz zu beruflichen Expositionen muss bei einer Wohnbevölkerung von einer permanenten, im Grunde lebenslangen Exposition, ausgegangen werden. Daher werden bei der Auswertung der Studien zur häuslichen Radonexposition viele Jahrzehnte umfassende Expositionsdauern zugrunde gelegt. Die ermittelten Risikoschätzer werden ohne expliziten Bezug auf die Expositionsdauer pro Aktivitätskonzentration angegeben.

Auf diese Weise ermittelte Risikoschätzer für die Inzidenz von Lungenkrebs werden in der Regel auf das zusätzliche relative Risiko ERR (excess relative risk) oder auf das lebenslange zusätzliche absolute Risiko LEAR (lifetime excess absolute risk) bezogen. Großes Gewicht bei der Ermittlung eines Risikowerts für die häusliche Radonexposition hat die europäische Studie (Darby et al. 2005), die ein ERR pro Aktivitätskonzentration von 0,16 pro 100 Bq m^{-3} liefert. Dieser Wert stellt eine Mittelung über beide Geschlechter und alle Altersklassen dar. Er ist für Raucher und Nichtraucher nahezu identisch.

Es ist zu beachten, dass die Risikoschätzungen zur Radonexposition, soweit sie auf epidemiologischen Daten basieren, ohne den Bezug auf die Studien zu den japanischen Atombombenüberlebenden (LSS, Life Span Study) auskommen und damit ohne Bezug auf die Organ-Äquivalentdosis oder auf die effektive Dosis abgeleitet werden. Das bedeutet, dass auch der Referenzwert von 300 Bq m^{-3} ohne diesen Bezug ermittelt und festgelegt wurde.

In Bezug auf den Referenzwert für bestehende Expositionssituationen entwirft die ICRP-Veröffentlichung 103 einen Bereich für Referenzwerte („band of constraints“) für Wohnräume („domestic dwellings“), den sie im Bereich von 1 mSv a^{-1} bis 20 mSv a^{-1} ansiedelt (ICRP 2007). Die SSK gibt an, dass für „... Krebserkrankungen mit einer effektiven Dosis von 100 mSv im Mittel ein zusätzliches Lebenszeitrisko von etwa 1 % zu erwarten ist. Für das Mortalitätsrisiko werden etwa halb so große absolute Risiken angegeben“ (SSK 2018). Damit ergibt sich ein Mortalitäts-Risikoeffizient von etwa 5 % pro Sv und ein Bereich für das „band of constraints“ für Wohnräume von $5 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ bis $1 \cdot 10^{-3} \text{ a}^{-1}$. Unterstellt man eine Expositionszeit von (mindestens) 30 Jahren, so ergibt das einen Risikobereich von 0,15 % bis 3 %⁶.

Die Lebenszeitriskiken für Lungenkrebs betragen für die Gesamtbevölkerung in Deutschland etwa 3,9 % für Frauen und 5,3% für Männer (RKI und GEKID 2019). Ein zusätzliches relatives Risiko (ERR) pro Aktivitätskonzentration von 0,16 pro 100 Bq m^{-3} ergibt ein lebenslanges zusätzliches absolutes Risiko (LEAR) pro Aktivitätskonzentration von 0,6 % pro 100 Bq m^{-3} , also von 1,8 % für den Referenzwert von 300 Bq m^{-3} . Bezogen auf den in der ICRP-Publikation 103 angegebenen Bereich der Referenzwerte (s. o.) liegt der festgelegte Referenzwert für die Radon-222-Aktivitätskonzentration im mittleren Bereich.

5.4 Begründung des Referenzwertes von 80 Becquerel pro m^3 im Freien

Altlastenbedingt erhöhte Radon-Aktivitätskonzentrationen im Freien unterscheiden sich von denen in Gebäuden durch eine stärkere Vermischung in der Atmosphäre. Nach Angaben des BfS liegt die Radon-222-Aktivitätskonzentration im Freien in Deutschland zwischen 3 Bq m^{-3} und 31 Bq m^{-3} und kann durch eine logarithmische Normalverteilung mit einem geometrischen Mittelwert von $8,2 \text{ Bq m}^{-3}$ mit einer geometrischen Standardabweichung von $1,9 \text{ Bq m}^{-3}$ angenähert werden (Kümmel et al. 2014). Dem gegenüber steht der sechsfach höhere übers Jahr gemittelte und auf Standard-Wohnbedingungen korrigierte geometrische Mittelwert von Radon

⁶ Diese Abschätzung beruht auf Annahme der LNT-Hypothese auch in einem Dosisbereich, in dem die Gültigkeit nicht nachgewiesen wurde.

in Wohnungen in Höhe von 45 Bq m^{-3} (Petermann und Bossew 2021). Die 25te und 75te Perzentile liegen bei 27 Bq m^{-3} bzw. 68 Bq m^{-3} .

Eine Radon-222-Aktivitätskonzentration an relevanten Einwirkstellen im Freien von 80 Bq m^{-3} wurde bereits 1994 durch die SSK als Richtwert zur Überprüfung des Einflusses von Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaus in Sachsen und Thüringen vorgeschlagen (SSK 1994). Als relevante Einwirkstellen sieht die SSK unverändert nächstgelegene Wohngebiete, mögliche Bebauungsgebiete und ständige Aufenthaltsbereiche an. Der für die Prüfung der Einhaltung des Richtwertes zu messende Wert schloss den natürlichen Hintergrundbeitrag zur Radon-Aktivitätskonzentration im Freien ein. Der Wert orientierte sich am oberen Ende des Normalbereiches der natürlichen Variationsbreite der Radon-Aktivitätskonzentration im Freien.

In der Genehmigungspraxis zur Stilllegung und Sanierung der Betriebsanlagen und Betriebsstätten des Uranerzbergbaus fand die SSK-Empfehlung 1994 nur kurzzeitig Anwendung. Anstelle dessen wurde die Anwendung des Richtwertes von 1 mSv a^{-1} unter Einschluss des radonbedingten Anteils an der effektiven Dosis praktiziert. Von dieser Vorgehensweise wendet sich die SSK mit der vorliegenden Empfehlung wieder ab.

Der in der Empfehlung 2b) vorgeschlagene Referenzwert der Radon-222-Aktivitätskonzentrationen wird als hinreichender Beleg für eine signifikant erhöhte Radonkonzentration im Freien angesehen. Derartige Radon-Aktivitätskonzentrationen sind vor allem von Halden und Tagesöffnungen des Uranbergbaus und des Altbergbaus bekannt. Die SSK sieht die weitere Nutzung dieses Referenzwertes aufgrund der bisherigen Erfahrungen unabhängig von Dosis- oder Risikobetrachtungen als geeignet an, um bei radioaktiven Hinterlassenschaften die Strahlenexposition zu reduzieren.

Eine Radon-Aktivitätskonzentrationen im Freien von 80 Bq m^{-3} übersteigt den Bereich der natürlicherweise vorkommenden Werte in Deutschland mit einem Maximalwert von 31 Bq m^{-3} (Kümmel et al. 2014) um mehr als das Doppelte. Extrapoliert mit dem auf Messdaten basierenden Log-Normal-Modell des BfS (Kümmel et al. 2014) entspricht das dem 99,8ten Perzentil. Bei langfristig gemittelten Messwerten dieser Höhe kann eine natürliche Ursache damit praktisch ausgeschlossen werden. Unabhängig von der damit verbundenen Radonexposition hält es die SSK für angemessen, in Fällen, in denen solche Konzentrationen an relevanten Einwirkstellen vorkommen, Maßnahmen zu ergreifen, die mit angemessenen Mitteln eine Reduzierung anstreben.

Durch den in der Empfehlung 2b vorgeschlagenen Referenzwert wird gewährleistet, dass das bisher bei der Stilllegung und Sanierung der Hinterlassenschaften des Uranbergbaus angestrebte Schutzniveau (ca. 50 Bq m^{-3} über dem Hintergrund) beibehalten werden kann. Da die Empfehlungen 1 und 2 ausschließlich dem Schutz von Einzelpersonen der Bevölkerung bei radioaktiven Altlasten dienen, hält es die SSK für erforderlich, den Ort der Beurteilung, für den der Referenzwert der Empfehlung 2b gelten soll, im Einzelfall unter Bezug auf die relevanten Einwirkstellen festzulegen. Die SSK weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass ihre Empfehlungen sich nicht auf Strahlenexpositionen von Arbeitskräften beziehen, für die nach § 145 Abs. 1 StrlSchG bei Sanierungs- und sonstigen Maßnahmen zur Verhinderung und Verminderung der Exposition bei radioaktiven Altlasten vor Beginn der Maßnahmen eine Abschätzung der Körper-Äquivalentdosis durchzuführen ist.

6 Konsequenzen hinsichtlich bisheriger Praktiken

Die gegenwärtige Begriffsbestimmung der radioaktiven Altlast führt mit dem Bewertungsmaßstab der effektiven Dosis unter Einschluss von Radon dazu, dass unterschiedliche

Schutzkriterien für Personen auf Altlastenverdachtsflächen und für sonstige Personen, die außerhalb solcher Flächen leben, zur Anwendung kommen.

Mit dem auf Messgrößen der Radon-222-Aktivitätskonzentration aufbauenden Referenzwerten wird der Strahlenschutz harmonisiert. Die daraus formal konstruierbaren Strahlendosen von Personen, die auf oder in der Nähe von Altlastenverdachtsflächen leben, die jedoch keine radioaktive Altlast sind, bilden keinen Widerspruch zum Gesamtsystem des Strahlenschutzes. Auch andere Strahlendosen, die unterhalb von Grenz- oder Referenzwerten liegen, sind nicht zu berücksichtigen, wie z. B. Expositionen aus beruflichen Tätigkeiten von weniger als 1 mSv im Kalenderjahr, die in Innenräumen mit weniger als 300 Bq m⁻³ Radon ausgeführt werden (§ 55 StrlSchG). Die SSK weist an dieser Stelle darauf hin, dass durch das Konzept der Referenzwerte ein Handeln auch dann anzustreben ist, wenn die Exposition unterhalb der Referenzwerte mit angemessenen Mitteln weiter reduziert werden kann.

7 Literatur

- BfS 1999 Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen - Bergbau: Teil Radon). urn:nbn:de:0221-201006222423
- BfS 2010 Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaulicher Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen Bergbau). März 2010. urn:nbn:de:0221-20100329966/3
- BfS 2018 Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Umweltradioaktivität in der Bundesrepublik Deutschland: Bericht der Leitstellen des Bundes und des Bundesamtes für Strahlenschutz; Stand 2017, Daten und Bewertung. Oktober 2018. urn:nbn:de:0221-2018100516201
- BfS 2019 Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Radon-Handbuch Deutschland. https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschuere_n/ion/radon-handbuch.pdf, zuletzt aufgerufen am 10.02.2022
- Darby et al. 2005 Darby S, Hill D, Auvinen A, Barros-Dios JM, Baysson H, Bochicchio F, Deo H, Falk R, Forastiere F, Hakama M, Heid I, Kreienbrock L, Kreuzer M, Lagarde F, Makelainen I, Muirhead C, Oberaigner W, Pershagen G, Ruano-Ravina A, Ruosteenoja E, Rosario AS, Tirmarche M, Tomasek L, Whitley E, Wichmann HE, Doll R. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. BMJ. 2005 Jan 29;330(7485):223, doi: 10.1136/bmj.38308.477650.63, Epub 2004/12/23
- Euratom 2014 Rat der Europäischen Union. Richtlinie 2013/59/Euratom des Rates der Europäischen Union vom 5. Dezember 2013 zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung und zur Aufhebung der Richtlinien 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom und 2003/122/Euratom. Amtsblatt der Europäischen Union, L 13/1, 17.01.2014

- Gellermann 2010 Gellermann R. Radiologische Industrialtlasten: Situation, Intervention und Nachhaltigkeit. In: Intervention und Nachhaltigkeit im Strahlenschutz - Klausurtagung der Strahlenschutzkommission am 13./14. November 2008: Veröffentlichung der Strahlenschutzkommission, Band 65. H. Hoffmann GmbH Fachverlag, 2010, ISBN 978-3-87344-159-0
- ICRP 2007 International Commission on Radiological Protection (ICRP). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann ICRP 37(2-4):1-332, Elsevier, Oxford, 2007, ISBN 9780702030482, doi: 10.1016/j.icrp.2007.10.003
- ICRP 2010 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115. Ann ICRP 40(1):1-64, Elsevier, Oxford, 2010, ISBN 9780702049774, doi: 10.1016/j.icrp.2011.08.011
- ICRP 2014 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126. Ann ICRP 43(3):5-73, Sage Publishing, London, 2014, ISBN 9781473916586, doi: 10.1177/0146645314542212
- Kreuzer et al. 2010 Kreuzer M, Schnelzer M, Tschense A, Walsh L, Grosche B. Cohort profile: the German uranium miners cohort study (WISMUT cohort), 1946-2003. Int J Epidemiol. 2010 Aug;39(4):980-7, doi: 10.1093/ije/dyp216, Epub 2009/06/06
- Kreuzer et al. 2017 Kreuzer M, Sobotzki C, Fenske N, Marsh JW, Schnelzer M. Leukaemia mortality and low-dose ionising radiation in the WISMUT uranium miner cohort (1946–2013). Occupational and Environmental Medicine. 2017;74(4):252-8, doi: 10.1136/oemed-2016-103795
- Kreuzer et al. 2018 Kreuzer M, Sobotzki C, Schnelzer M, Fenske N. Factors Modifying the Radon-Related Lung Cancer Risk at Low Exposures and Exposure Rates among German Uranium Miners. Radiat Res. 2018 Feb;189(2):165-76, doi: 10.1667/RR14889.1, Epub 2017/12/08
- Kreuzer et al. 2021 Kreuzer M, Deffner V, Schnelzer M, Fenske N. Mortality in Underground Miners in a Former Uranium Ore Mine - Results of a Cohort Study Among Former Employees of Wismut AG in Saxony and Thuringia. Dtsch Arztebl International. 2021 January 29, 2021;118(4):41-8, doi: 10.3238/arztebl.m2021.0001
- Krewski et al. 2005 Krewski D, Lubin JH, Zielinski JM, Alavanja M, Catalan VS, Field RW, Klotz JB, Letourneau EG, Lynch CF, Lyon JI, Sandler DP, Schoenberg JB, Steck DJ, Stolwijk JA, Weinberg C, Wilcox HB. Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case-control studies. Epidemiology. 2005 Mar;16(2):137-45, doi: 10.1097/01.ede.0000152522.80261.e3, Epub 2005/02/11

- Krewski et al. 2006 Krewski D, Lubin JH, Zielinski JM, Alavanja M, Catalan VS, Field RW, Klotz JB, Letourneau EG, Lynch CF, Lyon JL, Sandler DP, Schoenberg JB, Steck DJ, Stolwijk JA, Weinberg C, Wilcox HB. A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer. *J Toxicol Environ Health A*. 2006 Apr;69(7):533-97, doi: 10.1080/15287390500260945, Epub 2006/04/13
- Kümmel et al. 2014 Kümmel M, Dushe C, Müller S, Gehrcke K. Outdoor (222)Rn-concentrations in Germany - part 2 - former mining areas. *J Environ Radioact*. 2014 Jun;132:131-7, doi: 10.1016/j.jenvrad.2014.01.011, Epub 2014/02/11
- Lubin et al. 2004 Lubin JH, Wang ZY, Boice JD, Jr., Xu ZY, Blot WJ, De Wang L, Kleinerman RA. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. *Int J Cancer*. 2004 Mar;109(1):132-7, doi: 10.1002/ijc.11683, Epub 2004/01/22
- Petermann und Bossew 2021 Petermann E, Bossew P. Mapping indoor radon hazard in Germany: The geogenic component. *Science of the Total Environment*. 2021;780, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146601>
- Rage et al. 2020 Rage E, Richardson DB, Demers PA, Do M, Fenske N, Kreuzer M, Samet J, Wiggins C, Schubauer-Berigan MK, Kelly-Reif K, Tomasek L, Zablotska LB, Laurier D. PUMA - pooled uranium miners analysis: cohort profile. *Occup Environ Med*. 2020 Mar;77(3):194-200, doi: 10.1136/oemed-2019-105981, Epub 2020/02/02
- RKI und GEKID 2019 Zentrum für Krebsregisterdaten im Robert Koch-Institut (RKI) und die Gesellschaft der epidemiologischen Krebsregister in Deutschland e.V (GEKID) (RKI, GEKID). Krebs in Deutschland für 2015/2016. 12. Ausgabe, Robert Koch-Institut (Hrsg), Berlin, Custom 8
- SSK 1988 Strahlenschutzkommission (SSK). Strahlenschutzgrundsätze zur Begrenzung der Bevölkerung durch Radon und seine Zerfallsprodukte, verabschiedet in der 84. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 30. Juni 1988. Bekanntmachung im Nr. 208 vom 05.11.1988
- SSK 1991 Strahlenschutzkommission (SSK). Strahlenschutzgrundsätze für die Verwahrung, Nutzung oder Freigabe von kontaminierten Materialien, Gebäuden, Flächen oder Halden aus dem Uranerzbergbau, verabschiedet in der 107. Sitzung der SSK am 12./13.12.1991. Bekanntmachung im BAnz Nr. 43 vom 03.03.1992

- SSK 1994 Strahlenschutzkommission (SSK). Grundsätze zur Bewertung der Strahlenexposition infolge von Radonexpositionen aus bergbaulichen Hinterlassenschaften in den Uranerzbergbaubereichen Sachsens und Thüringens, Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 126. Sitzung der SSK am 22. September 1994. Bekanntmachung im BAnz Nr. 158 vom 23.08.1995
- SSK 2017 Strahlenschutzkommission (SSK). Radon-Dosiskoeffizienten. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 290. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 5. /6. Dezember 2017. Bekanntmachung im BAnz AT 24.05.2018 B3. urn:nbn:de:101:1-2018103111265357503494
- SSK 2018 Strahlenschutzkommission (SSK). Grundlagen zur Begründung von Grenzwerten für beruflich strahlenexponierte Personen. Empfehlung der Strahlenschutzkommission mit wissenschaftlicher Begründung, verabschiedet im Umlaufverfahren am 7. September 2018. Bekanntmachung im BAnz AT 14.11.2019 B5
- StrlSchG 2017 Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz - StrlSchG) vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), das zuletzt durch Artikel 11 des Gesetzes vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2510) geändert worden ist
- StrlSchV 2018 Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 29. November 2018. BGBl. I S. 2034, 2036, die durch Artikel 1 der Verordnung vom 27. März 2020 (BGBl. I S. 748) geändert worden ist
- UNSCEAR 2019 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and effects and risks of ionizing radiation, UNSCEAR 2019 Report to the General Assembly with Scientific Annexes A: Evaluation of selected health effects and inference of risk due to radiation exposure and B: Lung cancer from exposure to radon. United Nations, New York, Custom 8, ISBN 978-92-1-139184-8
- Walsh et al. 2015 Walsh L, Grosche B, Schnelzer M, Tschense A, Sogl M, Kreuzer M. A review of the results from the German Wismut uranium miners cohort. Radiat Prot Dosimetry. 2015 Apr;164(1-2):147-53, doi: 10.1093/rpd/ncu281, Epub 2014/10/01

Glossar

Aktivitätskonzentration Quotient aus der Aktivität eines Stoffes und dem Volumen dieses Stoffes. Die Einheit der Aktivitätskonzentration ist Bq m^{-3} . Bezeichnen A die Aktivität und V das Volumen des Stoffes, so ergibt sich die Aktivitätskonzentration zu:

$$A_{\text{konz}} = \frac{A}{V}$$

Bestehende Expositionssituation Bestehende Expositionssituationen sind Situationen, die bereits bestehen, wenn eine Entscheidung über ihre Kontrolle getroffen werden muss. Eingeschlossen sind z. B. auch Situationen, die natürliche Strahlung und Rückstände früherer Tätigkeiten betreffen.

Detriment Das Detriment wird auch als schadensgewichtetes Risiko bezeichnet. Das Detriment ist das Produkt aus nominellem Risikokoeffizient und Schadensqualität. Die Einheit ist Sv^{-1} . Das Detriment hängt von einer Vielzahl von Einflussparametern ab. In die Berechnung gehen für jedes Organ oder Gewebe insbesondere ein: die Inzidenzwahrscheinlichkeit, der Letalitätsfaktor, der Verlust an Lebensqualität sowie der relative Verlust an Lebenserwartung.

Dosiskoeffizient (interne Dosimetrie) Der Dosiskoeffizient für die interne Dosimetrie ist der Quotient aus Folge-Organ-Äquivalentdosis oder effektiver Folgedosis und einer zugeführten Aktivität. Die Einheit des Dosiskoeffizient ist Sv Bq^{-1} .

Der Dosiskoeffizient wird in der Berechnung der Dosis nach der Zufuhr von Radionukliden verwendet.

Effektive Dosis E Die effektive Dosis ist die Summe der mit den zugehörigen, von der ICRP empfohlenen und in der StrlSchV festgelegten Gewebe-Wichtungsfaktoren w_T multiplizierten Organ-Äquivalentdosen H_T in relevanten Organen und Geweben

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

H_T ist die Organ-Äquivalentdosis in einem Gewebe oder Organ T ; w_T ist der Gewebewichtungsfaktor, w_R der Strahlungswichtungsfaktor. Die Einheit der effektiven Dosis ist J kg^{-1} . Um deutlich zu machen, dass es sich um eine gewichtete Dosisgröße handelt, wird wie bei der Äquivalentdosis, anstelle von Gray (Gy) die Einheit Sievert (Sv) verwendet.

Einzelpersonen der Bevölkerung Person, soweit sie nicht einer beruflichen Exposition oder einer medizinischen Exposition ausgesetzt ist.

geogene Radioaktivität Als geogene Radioaktivität bezeichnet man Radioaktivität, die ihren Ursprung in den primordialen Radionukliden hat. Die wichtigsten sind ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th und ^{40}K .

Geplante Expositionssituation Geplante Expositionssituationen sind Situationen, die den geplanten Betrieb von Quellen einschließlich der Stilllegung, der Beseitigung von radioaktivem Abfall und der Sanierung zuvor belasteter Gebiete mit sich bringen. Laufende Tätigkeiten werden als geplante Expositionssituationen behandelt.

Grenzwert (Strahlenexposition) Grenzwerte dienen der Begrenzung der gesetzlich zulässigen Strahlenexposition in geplanten Expositionssituationen der Bevölkerung und von beruflich strahlenexponierten Personen. Die Einhaltung der gesetzlichen

Grenzwerte wird behördlich überwacht. Dosisbezugsgrößen sind Werte der effektiven Dosis je Kalenderjahr; für Schutzmaßnahmen bei einer Strahlenexposition von Teilen des Körpers legt das Strahlenschutzgesetz zusätzlich Grenzwerte für einzelne Organe fest.

Kontamination (radioaktive) Kontamination ist eine unerwünschte Verunreinigung durch radioaktive Stoffe.

kontrollierbare Quelle Eine kontrollierbare Quelle ist eine Quelle radioaktiver Stoffe oder ionisierender Strahlung, die z. B. im Rahmen einer geplanten Expositionssituation eingesetzt werden soll.

Körper-Äquivalentdosis (früher Körperdosis) Die Körper-Äquivalentdosis ist ein Sammelbegriff für Organ-Äquivalentdosis und effektive Dosis. Von der ICRP benutzte Dosisgröße für den Strahlenschutz, die es ermöglicht, die Exposition des menschlichen Körpers durch ionisierende Strahlung zu quantifizieren. Der Begriff umfasst Ganz- und Teilkörper-Bestrahlung sowohl von außen als auch von innen.

lebenslanges zusätzliches absolutes Risiko, LEAR (Life-time Excess Absolute Risk) Das zusätzliche absolute Risiko bezogen auf die gesamte Lebenszeit (auch Zusätzliche Absolute Wahrscheinlichkeit genannt) für das Eintreten eines stochastischen Effekts wird angenähert durch die Anzahl von Fällen (z. B. Lungenkreiserkrankungen) pro Anzahl der Personen in einer Bezugspopulation.

natürliche Zerfallsreihen Die beim Zerfall der sehr langlebigen natürlichen Radionuklide ^{238}U (Halbwertszeit 4,5 Mrd. Jahre), ^{235}U (Halbwertszeit 0,7 Mrd. Jahre) und ^{232}Th (Halbwertszeit 14 Mrd. Jahre) entstehenden Nuklide sind wieder radioaktiv, so dass sie ihrerseits wieder zerfallen. So entstehen sogenannte Zerfallsreihen, die erst enden, wenn ein nicht mehr radioaktives Nuklid entsteht. Vom ^{238}U geht die Uran-Radium-Zerfallsreihe aus, die über 18 Zwischenstufen beim stabilen ^{206}Pb endet. ^{235}U steht am Anfang der Uran-Actinium-Zerfallsreihe, die über 15 Radionuklide zum ^{207}Pb führt. Mit zehn Zwischenstufen ist die bei ^{232}Th beginnende und zum ^{208}Pb führende Thorium-Zerfallsreihe die kürzeste.

Optimierung im Strahlenschutz Optimierung ist ein Vorgehen zum Erreichen eines Schutz- und Sicherheitsgrads, bei dem tatsächliche Expositionen und die Wahrscheinlichkeit und Höhe potenzieller Expositionen so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar werden (ALARA). Dabei sollen wirtschaftliche und gesellschaftliche Faktoren berücksichtigt werden. Die Optimierung ist eins der Grundsätze des Strahlenschutzes.

Organ-Äquivalentdosis H_T Die Organ-Äquivalentdosis H_T ist das Produkt aus der mittleren Energiedosis in einem Organ, Gewebe oder Körperteil und dem Strahlungswichtungsfaktor w_R nach ICRP. Die Werte des Strahlungswichtungsfaktors w_R nach ICRP richten sich nach Art und Qualität der Strahlung (Photonen, Elektronen, Neutronen, Protonen, Alpha-Teilchen).

Radioaktive Altlasten Radioaktive Altlasten sind durch abgeschlossene menschliche Betätigung kontaminierte Grundstücke, Teile von Grundstücken, Gebäude oder Gewässer, wenn von der Kontamination eine Exposition verursacht wird oder werden kann, durch die für Einzelpersonen der Bevölkerung der Referenzwert der effektiven Dosis von 1 Millisievert im Kalenderjahr überschritten wird.

Radon-Exposition Die Radon-Exposition P ist ein Oberbegriff für die Kumulierte Radon-Aktivitätskonzentration P_A und die Kumulierte potenzielle Alpha-Energiekonzentration P_{PAEC} .

- 1 WLM entspricht für die Gleichgewichtsäquivalentkonzentration von Radon $6,37 \cdot 10^5 \text{ Bq h m}^{-3}$.
- 1 Bq m^{-3} Radon am Arbeitsplatz während eines Jahres führt zu einer Radon-Exposition P_A von $1,26 \cdot 10^{-3} \text{ WLM} = 1,12 \cdot 10^{-5} \text{ J h m}^{-3}$ oder $2,00 \cdot 10^3 \text{ Bq h m}^{-3}$ unter der Annahme einer Arbeitszeit von 2 000 h pro Jahr in Innenräumen bei einem Gleichgewichtsfaktor $F = 0,4$ (ICRP 65, 1993).
- 1 Bq m^{-3} Radon in Wohnräumen während eines Jahres führt zu einer Radon-Exposition von $4,4 \cdot 10^{-3} \text{ WLM} = 3,89 \cdot 10^{-5} \text{ J h m}^{-3}$ oder $7,00 \cdot 10^3 \text{ Bq h m}^{-3}$ unter der Annahme eines Aufenthalts von 7 000 h im Jahr in Innenräumen bei einem Gleichgewichtsfaktor $F = 0,4$ (ICRP 65, 1993).

Referenzwert (bei Notfallexpositionssituationen oder in bestehenden Expositionssituationen)

Der Referenzwert bei Notfallexpositionen oder bestehenden kontrollierbaren Expositionssituationen gibt den Dosis- oder Risikowert an, bei dessen Überschreitung Expositionen als unangemessen betrachtet werden und bei dessen Unterschreitung eine Optimierung des Schutzes durchgeführt werden soll. Der genaue Zahlenwert, der als Referenzwert gewählt wird, hängt von den jeweiligen Umständen der betrachteten Exposition ab. Man spricht dann ggf. auch von Richtwert oder Maßnahmenwert.

Schutzgröße Schutzgrößen zur Verwendung im Strahlenschutz, einschließlich der Risikoabschätzung sind die Organ-Äquivalentdosis und effektive Dosis. Sie bilden für Energiedosen weit unterhalb der Schwellen für deterministische Strahlenschäden eine Grundlage zur Abschätzung der Wahrscheinlichkeit stochastischer Strahlenwirkungen. Die Einheit dieser Dosisgrößen ist das Sievert (Sv).

Working Level Month (WLM) Working Level Month ist die Einheit für die Radon-Exposition, die ein Arbeiter während eines Monats (170 Arbeitsstunden) bei 1 WL (Working Level) erhält. Die Einheit WLM ist keine SI-Einheit und sollte nicht mehr Verwendung finden.

Working Level (WL) Working Level ist die Einheit für jede Kombination von ^{222}Rn und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten in einem Liter Luft, die eine potenzielle Alpha-Energie von $1,3 \cdot 10^5 \text{ MeV} = 2,08 \cdot 10^{-5} \text{ J}$ emittiert. Diese historisch im Rahmen von Studien zu Arbeitern im Uranerzabbau verwendete Einheit ist keine SI-Einheit und sollte nicht mehr Verwendung finden.

Zerfallsprodukte Als Zerfallsprodukte werden die beim radioaktiven Zerfall entstehende Tochternuklide bezeichnet. Diese können stabil oder radioaktiv sein. Siehe auch Zerfallsreihen. Im Allgemeinen sind die beim Zerfall dieser Nuklide emittierten Teilchen (alpha-Teilchen, beta-Teilchen, Photonen, Neutrinos, Neutronen) mit diesem Begriff nicht gemeint.

zusätzliches relatives Risiko, ERR Das zusätzliche relative Risiko ist der um 1 verminderte Quotient aus der Rate eines Ereignisses (z. B. Krankheit oder Tod) in einer exponierten Population und der in einer nicht exponierten Population. Es wird häufig ausgedrückt als ERR pro Dosis (1 Gy^{-1} oder 1 Sv^{-1})