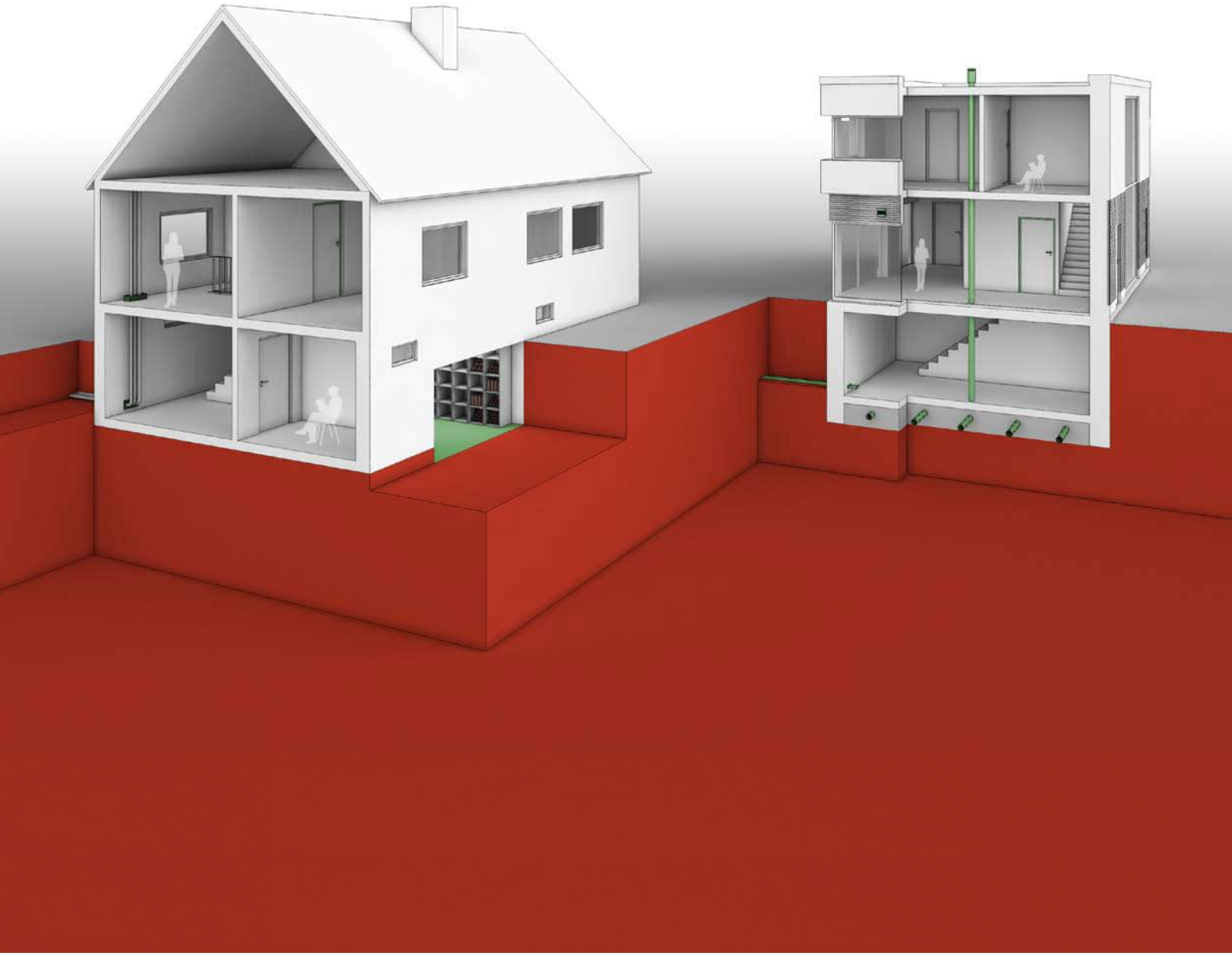
Radon-Handbuch Deutschland



| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

Bundesamt für Strahlenschutz

Impressum

Herausgeber:
Bundesamt für Strahlenschutz
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Postfach 10 01 49
D-38201 Salzgitter
Telefon: +49 (0)3018 333-0
Telefax: +49 (0)3018 333-1885
E-Mail: ePost@bfs.de
De-Mail: epost@bfs.de-mail.de
Internet: www.bfs.de

Redaktion:
Melanie Bartholomäus

Gestaltung:
Quermedia GmbH
Querallee 38
34119 Kassel

Bundesamt für Strahlenschutz (2019)

Einleitung

Das Radon-Handbuch zeigt auf, wie das Edelgas in Gebäude gelangt und welchen Einfluss typische Bauweisen und Gebäudeeigenschaften auf den Radongehalt in Innenräumen haben. Es erläutert bautechnische Regeln und zeigt auf, wie mit bautechnischen Mitteln und der Lüftungstechnik ein wirksamer Radonschutz an Gebäuden eingerichtet werden kann.

Das Radon-Handbuch informiert über das radioaktive Gas Radon, das aus dem Erdreich entweicht und sich in Gebäuden anreichern kann. Ein langjähriger Aufenthalt in Innenräumen mit erhöhter Radonkonzentration erhöht nachweislich das Lungenkrebsrisiko. Aus diesem Grund hat der Gesetzgeber den Radonschutz in das Strahlenschutzgesetz aufgenommen, das gemeinsam mit der neuen Strahlenschutzverordnung seit Ende 2018 vollständig in Kraft ist.
Das Vorkommen von Radon im Boden ist in Deutschland sehr unterschiedlich. Das Strahlenschutzgesetz verpflichtet die zuständigen Behörden zu ermitteln, in welchen Regionen in Deutschland das Radonvorkommen besonders hoch ist. In diesen Regionen muss an bestimmten Arbeitsplätzen verpflichtend gemessen werden, ob eine hohe Radonkonzentration in Gebäuden vorliegt. In solchen Gebäuden müssen ggf. gezielte Schutzmaßnahmen durchgeführt werden, die den Zutritt des radioaktiven Gases in das Gebäude unterbinden oder weitestgehend reduzieren.

Dieses Handbuch richtet sich an:

- alle Bürgerinnen und Bürger, die an weiterführenden Informationen zum Radonschutz interessiert sind,
- Hausbesitzer und Bauherren, die Immobilien- und Wohnungswirtschaft,
- Architekten, Bauingenieure, Gutachter, Planer sowie Handwerker und Techniker.

Inhalt

6 1. Das natürliche radioaktive Edelgas Radon

Eigenschaften 6

Radioaktivität 6

Anreicherung in Gebäuden 6

2. Gesundheitsrisiko 7

9 3. Vorkommen

Entstehung und Ausbreitung im Boden 9

Radon in der Außenluft 11

Eintritt in Gebäude 12

Freisetzung aus Baumaterialien 12

Radon im Trinkwasser 13

4. Radon in Gebäuden 14

Zeitlicher Verlauf der Radonkonzentration 14

Häufigkeitsverteilung 14

Gebäudeeigenschaften 15

Regionale Verteilung 16

18 5. Radonschutz im Strahlenschutzgesetz

19

6. Messung von Radon

Radonkonzentration in Aufenthaltsbereichen im Jahresmittel 19

Ermittlung der Radonkonzentration in Gebäuden 21

7. Radonschutzmaßnahmen 25

Allgemeine Hinweise 25

Ausgangssituation erfassen 26

Konzeptionelle Maßnahmen 28

Bautechnische Maßnahmen – Abdichtung gegen Radonzufuhr 29

Lüftungstechnische Maßnahmen 38

49

8. Planung und Bauausführung

Vorgehen 49

Prävention und Sanierung auf einen Blick 49

Radonprävention bei Neubauten 50

Radonsanierung bestehender Bauten 52

Synergien und Zielkonflikte 54

9. Schlusswort 55

56

10. Anhang

Reduktionspotenzial von Sanierungsmaßnahmen 56

Checkliste Beweissicherung/Hausbegehung 56

Quellen 59

1. Das natürliche radioaktive Edelgas Radon

Eigenschaften

Radon ist ein radioaktives chemisches Element. Das chemische Symbol ist Rn, die Ordnungszahl lautet 86. Im Periodensystem der Elemente steht es in der 8. Hauptgruppe und zählt damit zu den Edelgasen. Radon wurde 1900 von Friedrich Ernst Dorn entdeckt. Dorn nannte es zunächst Radium-Emanation (aus Radium „Herausgehendes“), später setzte sich die Bezeichnung Radon durch.

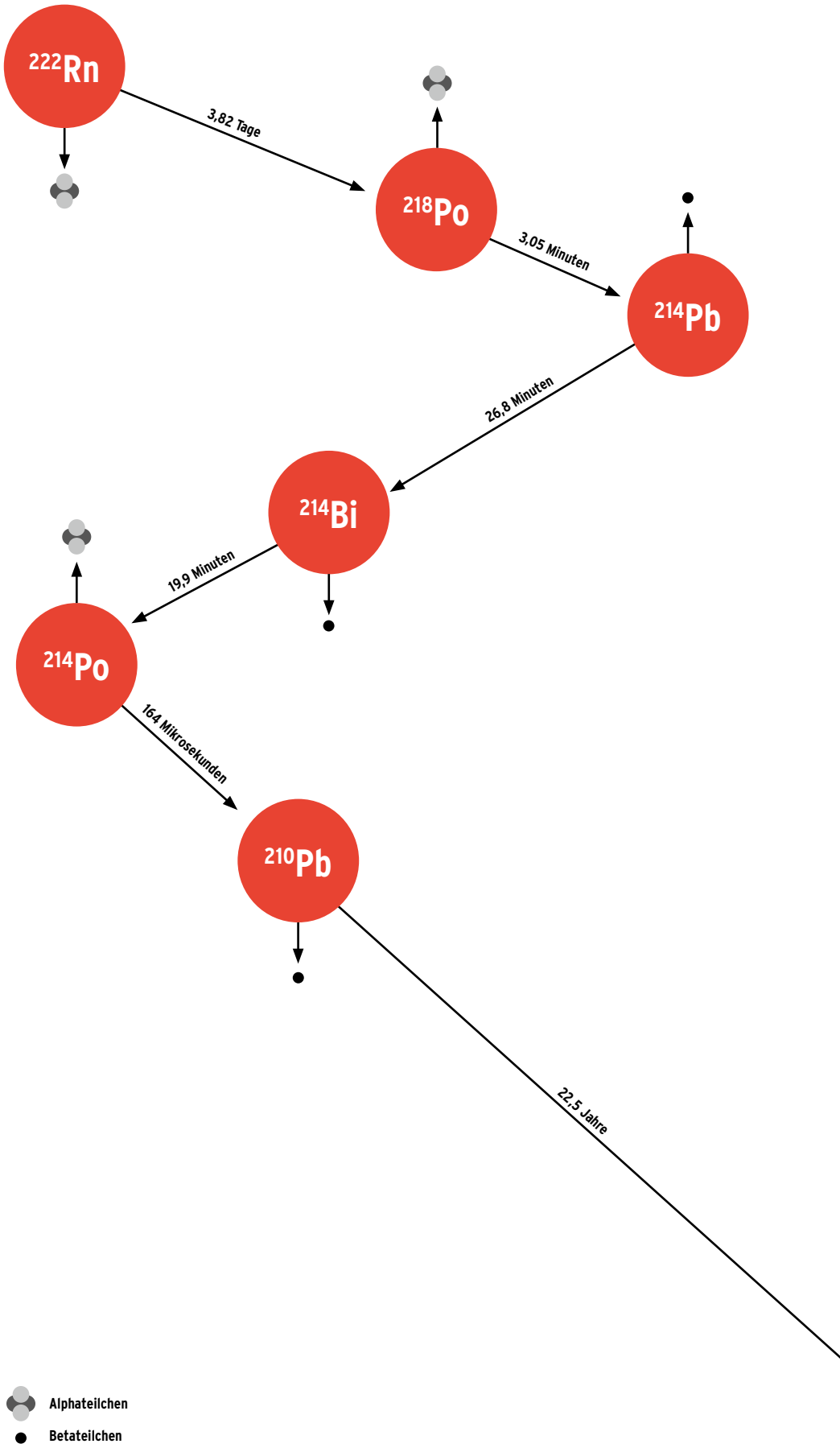
Radon ist farblos, geruchlos und geschmacklos. Wie alle anderen Edelgase geht Radon kaum chemische Verbindungen ein, ist aber wasser- und fettlöslich. Es besitzt folgende physikalische Eigenschaften:

Schmelzpunkt	**-71,1 °C**
Siedepunkt	**-61,8 °C**
Dichte	**9,73 g/l**
Elektronenkonfiguration	**$[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^{2}6p^{6}$**
Löslichkeit in Wasser bei 0 °C	**510 cm^3/kg**
Löslichkeit in Wasser bei 20 °C	**230 cm^3/kg**

Radioaktivität

In der Natur kommen die radioaktiven Isotope Radon-219, Radon-220 und Radon-222 vor. Radon-219 (Aktinon, Halbwertszeit 3,96 s) wird in der Zerfallsreihe des Uran-235, Radon-220 (Thoron, Halbwertszeit 55,6 s) in der des Thorium-232 und Radon-222 (Radon, 3,8 d) in der Zerfallsreihe des Uran-238 über mehrere Zwischenstufen durch α-Zerfall verschiedener Radiumisotope gebildet. Für die Strahlenexposition des Menschen ist vor allem das Isotop Radon-222 von Bedeutung. Beim Zerfall von Radon-222 entstehen weitere radioaktive Zerfallsprodukte. Es handelt sich dabei um verschiedene Isotope von Polonium, Bismut und Blei.
Das Maß dieser Aktivität ist das Becquerel (Bq), das die mittlere Anzahl der Atomkerne angibt, die pro Sekunde radioaktiv zerfallen. Die kurzlebigen Isotope, die beim Zerfall des Radons entstehen, schweben anfangs frei oder mit wenigen Wassermolekülen umgeben (freier Anteil) und später angelagert an feine Partikel (angelagerter Anteil) in der Luft.

Abb. 1.1: Zerfallsreihe des natürlichen, radioaktiven Isotops Radon-222 mit Halbwertszeiten



2. Gesundheitsrisiko

Von dort aus können sie sich auf allen Oberflächen ablagern. Werden Radon und seine kurzlebigen Zerfallsprodukte vom Menschen eingeatmet, wird das Edelgas Radon zum größten Teil wieder ausgeatmet.
Seine Zerfallsprodukte (dabei handelt es sich um die radioaktiven Schwermetalle Polonium-218, Bismut-214, Blei-214 und Polonium-214) werden jedoch im Atemtrakt abgelagert. Das Produkt aus der eingeatmeten Menge radioaktiver Teilchen und der Dauer, in der man diesen ausgesetzt ist, nennt man Exposition. Insbesondere die beim radioaktiven Zerfall freigesetzte α-Strahlung kann Zellen des Lungengewebes schädigen. Als Maß für diese Schädigung wird aus der Exposition die Dosis berechnet. Die Einheit ist das Sievert (Sv).

Anreicherung in Gebäuden

Die Jahresmittelwerte der Radon-Aktivitätskonzentration liegen gewöhnlich zwischen 5 Bq/m³ bis etwa 30 Bq/m³. Wissenschaftlich korrekt ist der Begriff Radon-Aktivitätskonzentration. Im vorliegenden Radon-Handbuch wird er aus Gründen der Verständlichkeit synonym mit dem Begriff Radonkonzentration verwendet.
Kleinräumig kommen jedoch auch höhere Konzentrationen vor. Der Jahresmittelwert der Radonkonzentration in Wohnräumen liegt in Deutschland bei durchschnittlich 50 Bq/m³. In Gebieten, in denen höhere Radonkonzentrationen in der Bodenluft vorkommen und gute Wegsamkeiten im Untergrund bestehen, kann sich Radon in Gebäuden anreichern, insbesondere wenn die bauliche Abdichtung gegenüber dem Baugrund nicht hergestellt ist. Dann können mehrere Hundert Bq/m³ Radon auftreten.
Jahresmittelwerte über 1.000 Bq/m³ in Aufenthalts- und Wohnräumen sind jedoch selten.
Aus der durchschnittlichen Radonkonzentration in Wohnräumen von 50 Bq/m³ ergibt sich eine jährliche effektive Dosis von 0,85 Millisievert (mSv), aus der mittleren Radonkonzentration im Freien eine jährliche effektive Dosis von etwa 0,2 mSv.

Biologische Wirkung

Radon und seine Zerfallsprodukte gelangen mit der Atemluft in den Atemtrakt. Während Radon selbst größtenteils wieder ausgeatmet wird, lagern sich die kurzlebigen Zerfallsprodukte (radioaktive Isotope der Elemente Polonium, Bismut und Blei) im Atemtrakt an und zerfallen dort vollständig.

Die dabei entstehende energiereiche Alphastrahlung trifft die strahlenempfindlichen Zellen der Lungen. Aufgrund der hohen biologischen Wirksamkeit dieser Alphastrahlung kann es zu einer Schädigung der Zellen und schließlich zu einer Lungenkrebserkrankung kommen.

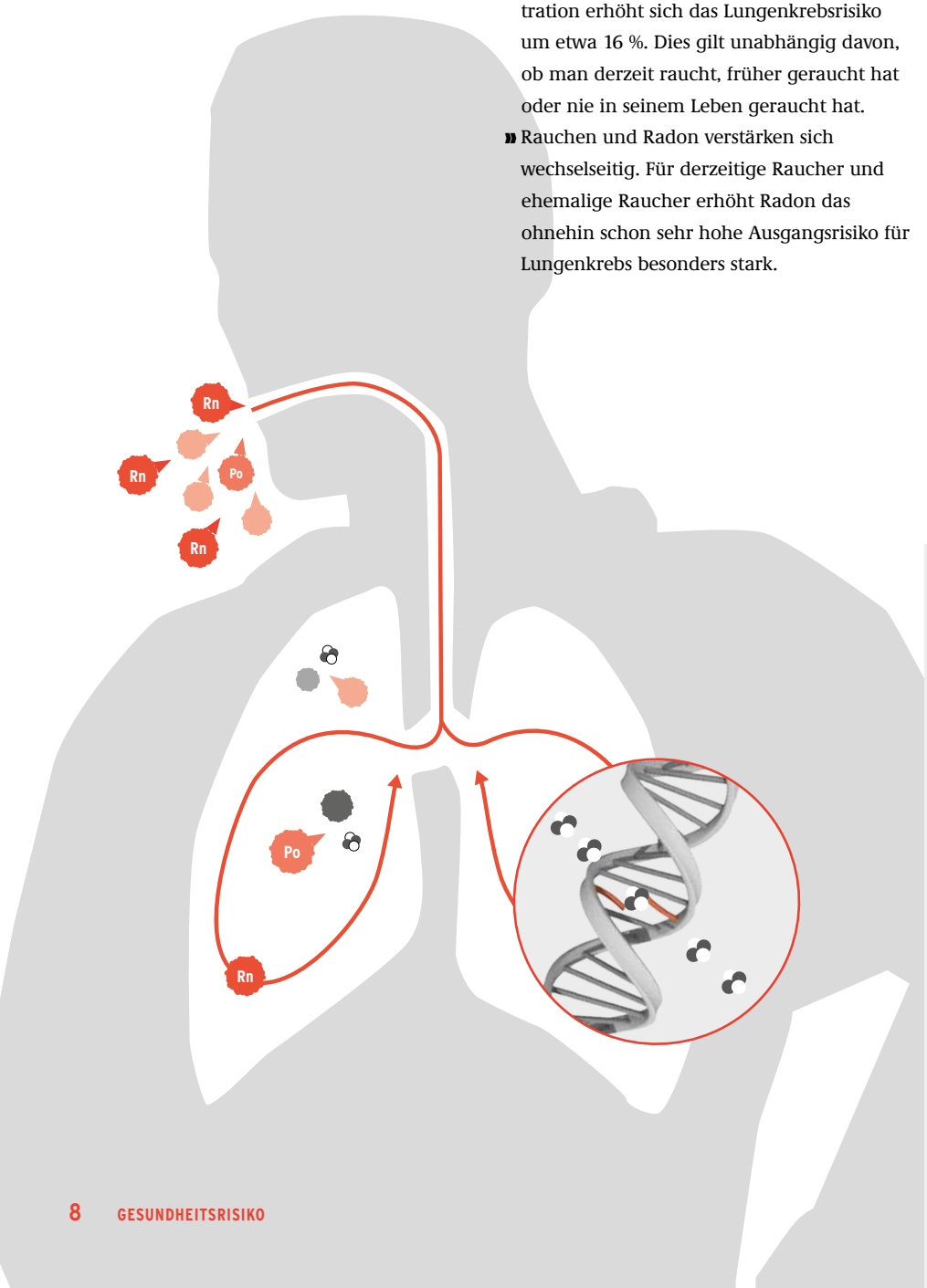
Gesundheitliche Effekte

Eine auffallende Häufung von Lungenerkrankungen bei jungen Bergarbeitern im Erzgebirge wurde bereits im 16. Jahrhundert beobachtet (ICRP 65, 1993 **[1]**) und ist unter dem Namen „Schneeberger Krankheit“ bekannt geworden. Erst einige Jahrhunderte später erkannte man, dass es sich bei der Erkrankung um Lungenkrebs handelte und dass das Einatmen von Radon und seinen Folgeprodukten die Ursache hierfür war. Der wissenschaftliche Nachweis für diesen Zusammenhang erfolgte über epidemiologische Studien an Bergarbeitern, die seit den 1960er Jahren durchgeführt wurden. Das internationale Krebsforschungszentrum der WHO in Lyon hat auf Basis der Ergebnisse der Bergarbeiterstudien 1988 Radon als nachgewiesen krebserregend für den Menschen eingestuft (IARC 1988 **[2]**).
Anfang der 80iger Jahre stellte sich die Frage, ob nicht die deutlich niedrigeren Radonkonzentrationen wie sie in Innenräumen vorkommen, auch mit einem gesundheitlichen Risiko verbunden sein können. In der Folge wurden deshalb in Europa, Nordamerika und China mehr als 20 große epidemiologische Studien durchgeführt, die das Lungenkrebsrisiko durch Radon in Wohnungen untersuchten. Darunter waren zwei große Studien aus Deutschland. Alle Untersuchungen zeigen übereinstimmend ein erhöhtes Lungenkrebsrisiko durch Radon in Wohnungen.
Die wichtigste und aussagekräftigste Studie ist die 2005 publizierte gemeinsame Auswertung von 13 europäischen Studien (Darby et al. 2005 **[3]**).

In die Studie gingen insgesamt 7.148 Lungenkrebspatienten und 14.208 Kontrollpersonen ohne diese Erkrankung ein. Bei den Studienteilnehmern wurde in allen Wohnungen, die in den letzten 35 Jahren bewohnt worden waren, die Radonkonzentrationen mindestens ein halbes Jahr lang gemessen. Ferner wurden alle Studienteilnehmer detailliert nach ihrem lebenslangen Rauchverhalten und anderen Risikofaktoren für Lungenkrebs wie zum Beispiel berufliche Asbestexpositionen befragt.
Die Ergebnisse dieser Studie bilden die wesentliche Grundlage für die 2005 erfolgte Neubewertung des radonbedingten Gesundheitsrisikos durch das BfS und die deutsche Strahlenschutzkommission (SSK) **[4]** sowie für die Bewertung durch die Weltgesundheitsorganisation in Genf (WHO, 2009) **[5]**.

Risikobewertung

- Radon in Wohnungen erhöht nachweislich das Lungenkrebsrisiko.
- Die Dauer und Höhe der Radonbelastung spielen für das Risiko eine Rolle. Alle Risikoabschätzungen zu Radon in Wohnungen beziehen sich auf eine langjährige Radonkonzentration (Durchschnittswert in Bq/m³ über etwa 20 bis 30 Jahre).
- Das Lungenkrebsrisiko steigt proportional zur langjährigen Radonkonzentration in der Wohnung, d. h. eine Verdopplung der Radonkonzentration verdoppelt das Risiko.
- Es gibt keinen Hinweis auf einen Schwellenwert, unterhalb dessen Radon ungefährlich wäre. Daher sollte in allen Wohnungen die Radonkonzentration reduziert werden, soweit dies mit vertretbarem Aufwand erreichbar ist.
- Pro 100 Bq/m³ langjähriger Radonkonzentration erhöht sich das Lungenkrebsrisiko um etwa 16 %. Dies gilt unabhängig davon, ob man derzeit raucht, früher geraucht hat oder nie in seinem Leben geraucht hat.
- Rauchen und Radon verstärken sich wechselseitig. Für derzeitige Raucher und ehemalige Raucher erhöht Radon das ohnehin schon sehr hohe Ausgangsrisiko für Lungenkrebs besonders stark.
- Radon erhöht aber auch nachweislich das Risiko für lebenslange Nichtraucher. Für diese ist Radon der wichtigste Risikofaktor für Lungenkrebs.
- Aus den Risikoabschätzungen und dem Wissen über die Verteilung der Radonkonzentrationen in Wohnungen in Deutschland lässt sich ableiten, dass Radon in Wohnungen etwa 5 % der Lungenkrebstodesfälle in Deutschland verursacht, das sind etwa 1.900 Todesfälle pro Jahr (Menzler et al. 2006 [6]).
- Damit ist Radon nach Rauchen der zweitwichtigste Risikofaktor für Lungenkrebs.
- Die Mehrzahl der radonbedingten Lungenkrebsfälle treten rechnerisch bei Personen auf, die niedrigen bis mittleren Radonkonzentrationen ausgesetzt sind, da diese Radonkonzentrationen in Wohnungen in Deutschland sehr viel häufiger auftreten als hohe.
- Radon führt auch für andere Organe als die Lunge zu einer gewissen Strahlenbelastung, insbesondere für den Hals-Nasen-Rachenraum und die Haut. Aber die resultierende Strahlendosis ist deutlich geringer als die der Lunge.
- Bis jetzt gibt es keine belastbaren Belege dafür, dass Radon in Wohnungen zu anderen Erkrankungen als Lungenkrebs führt.



[1] ICRP 65: International Commission on Radiological Protection (ICRP). Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65, Ann. ICRP 23, 2, 1993

[2] International Agency for Research on Cancer (1988): Man-made mineral fibres and radon. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Vol. 43, Lyon: IARC

[3] 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, Mäkeläinen 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. British Medical Journal 2005; 330:223

[4] SSK, Lungenkrebsrisiko durch Radonexpositionen in Wohnungen, Verabschiedet in der 199. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 21./22. April 2005

[5] WHO Handbook on Indoor Radon, WHO 2009

[6] Menzler S, Schaffrath-Rosario A, Wichmann HE, Kreienbrock L .Abschätzung des attributablen Lungenkrebsrisikos in Deutschland durch Radon in Wohnungen. Ecomed-Verlag, Landsberg, 2006

3. Vorkommen

Entstehung und Ausbreitung im Boden

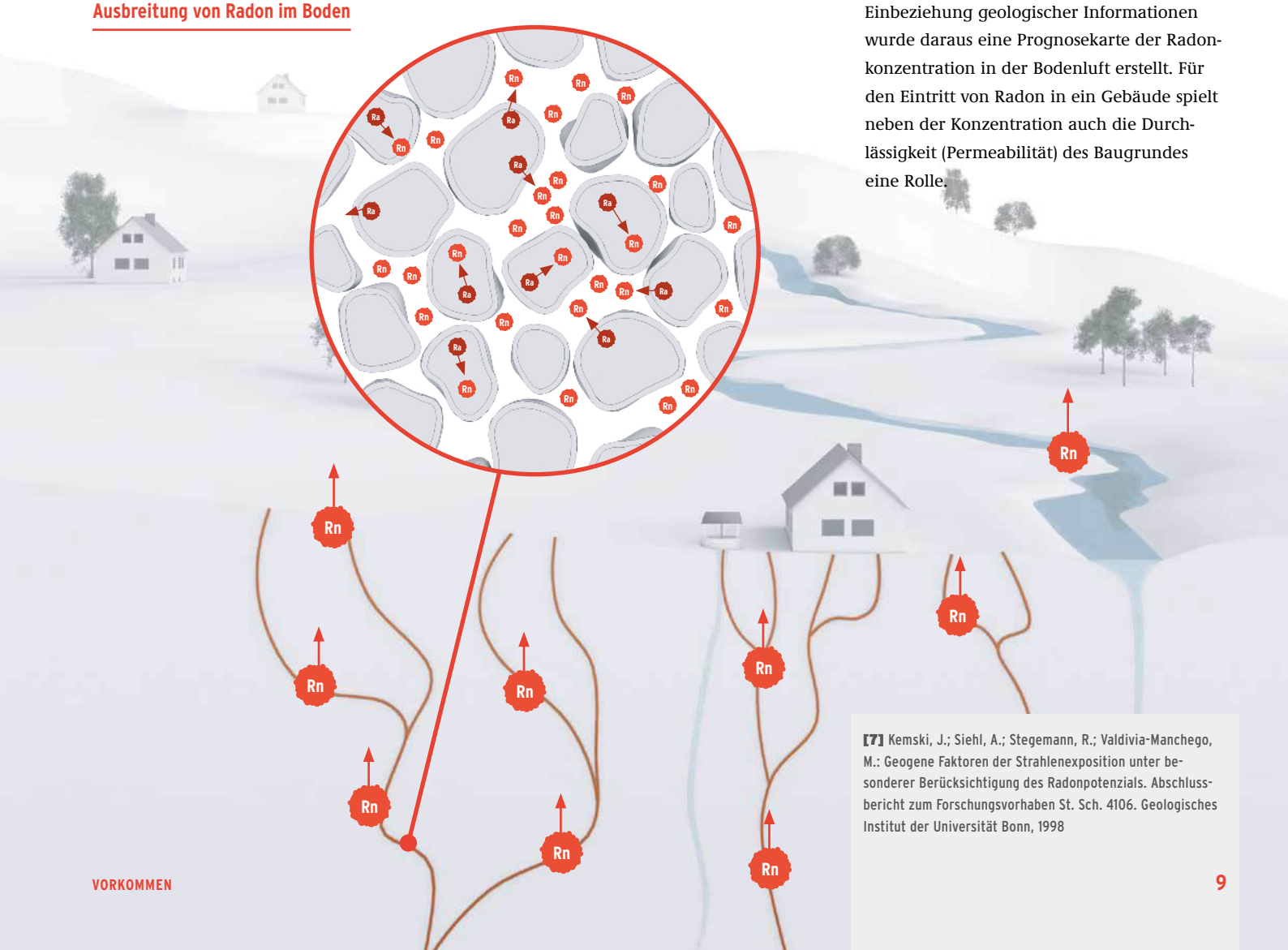
Alle Gesteine und Böden enthalten in unterschiedlichen Konzentrationen Uran und Radium. Die Konzentrationen dieser Stoffe in Gesteinen und Erden hängen von den gesteinsbildenden Prozessen, den geologischen Lagerungsbedingungen sowie den physikalisch-chemischen Eigenschaften der Radionuklide ab und weisen deshalb teilweise deutliche Unterschiede auf **[7]**. Während viele Gesteine nur geringe bis mittlere Radiumkonzentrationen enthalten (bis 40 Bq/kg), weisen Granite und Pegmatite wegen des verstärkten Einbaus von Uran in ihre Minerale meist höhere Gehalte auf. In Ausnahmefällen treten auch in Sedimentgesteinen hohe Uran- und Radiumgehalte auf (z. B.: Schwarz-, Alaunschiefer).

Das beim Zerfall des Radiums entstehende Radon kann z. T. in den Porenraum der Gesteine und Böden freigesetzt werden. Dieser Vorgang wird als Emanation bezeichnet. Der Anteil des freigesetzten Radons hängt u. a. von der Korngrößenverteilung der Minerale und vom Feuchtegehalt ab und kann über einen weiten Bereich variieren.
Die Uran- bzw. Radiumgehalte eines Minerals sind daher oft nur gering mit der Radonfreisetzung korreliert. Der Radontransport im Untergrund erfolgt weitgehend durch Diffusion. Bei der Diffusion erfolgt der Transport der Radonatome in den Zwischenräumen der Mineralkörner in Kapillaren und Feinporen, ausgelöst von Konzentrationsunterschieden. Die Reichweite des Radontransports hängt von der Art des Porenraummediums und der Ausprägung des Porenverbandes ab. Zusätzlich kann Radon gelöst in Wasser oder gemeinsam mit Bodengasen im Boden entlang lokal durchlässigerer Wegsamkeiten (Kluftsysteme, Verwerfungen, Schotterlagen) transportiert werden.

Dadurch kann es an Klüften, im Bereich von Bergsenkungen oder an der Grenze zweier Gesteinsarten zu lokal erhöhten Radonkonzentrationen im Boden kommen. Gemessen wird die Radonkonzentration in einem Meter Tiefe unter der Oberfläche. Aus etwa 2.300 solcher sogenannter Bodenluft-Messungen, die das BfS beauftragte und weiteren Datensätzen aus den Bundesländern wurde die Karte auf der nächsten Seite erstellt.

Typischerweise kommt in der Bodenluft Radon in Konzentrationen von mehreren Tausend Bq/m³ vor. Es gibt aber auch vereinzelt Stellen, wo in der Bodenluft mehr als eine Million Bq/m³ (>1 MBq/m³) auftreten. Um einen Überblick über die regionale Verteilung der Radonkonzentrationen in der Bodenluft zu gewinnen, wurden Messungen an rund 2.300 geologisch repräsentativen Messorten durchgeführt. Die Messorte geben einen Querschnitt über die Geologie wieder, wie sie in Deutschland vorkommt. Unter Einbeziehung geologischer Informationen wurde daraus eine Prognosekarte der Radonkonzentration in der Bodenluft erstellt. Für den Eintritt von Radon in ein Gebäude spielt neben der Konzentration auch die Durchlässigkeit (Permeabilität) des Baugrundes eine Rolle.

Abb. 3.1: Entstehung und Ausbreitung von Radon im Boden



[7] Kemski, J.; Siehl, A.; Stegemann, R.; Valdivia-Manchego, M.: Geogene Faktoren der Strahlenexposition unter besonderer Berücksichtigung des Radonpotenzials. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben St. Sch. 4106. Geologisches Institut der Universität Bonn, 1998

Abb. 3.2: Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft (Quelle: BfS, eigene Berechnungen)

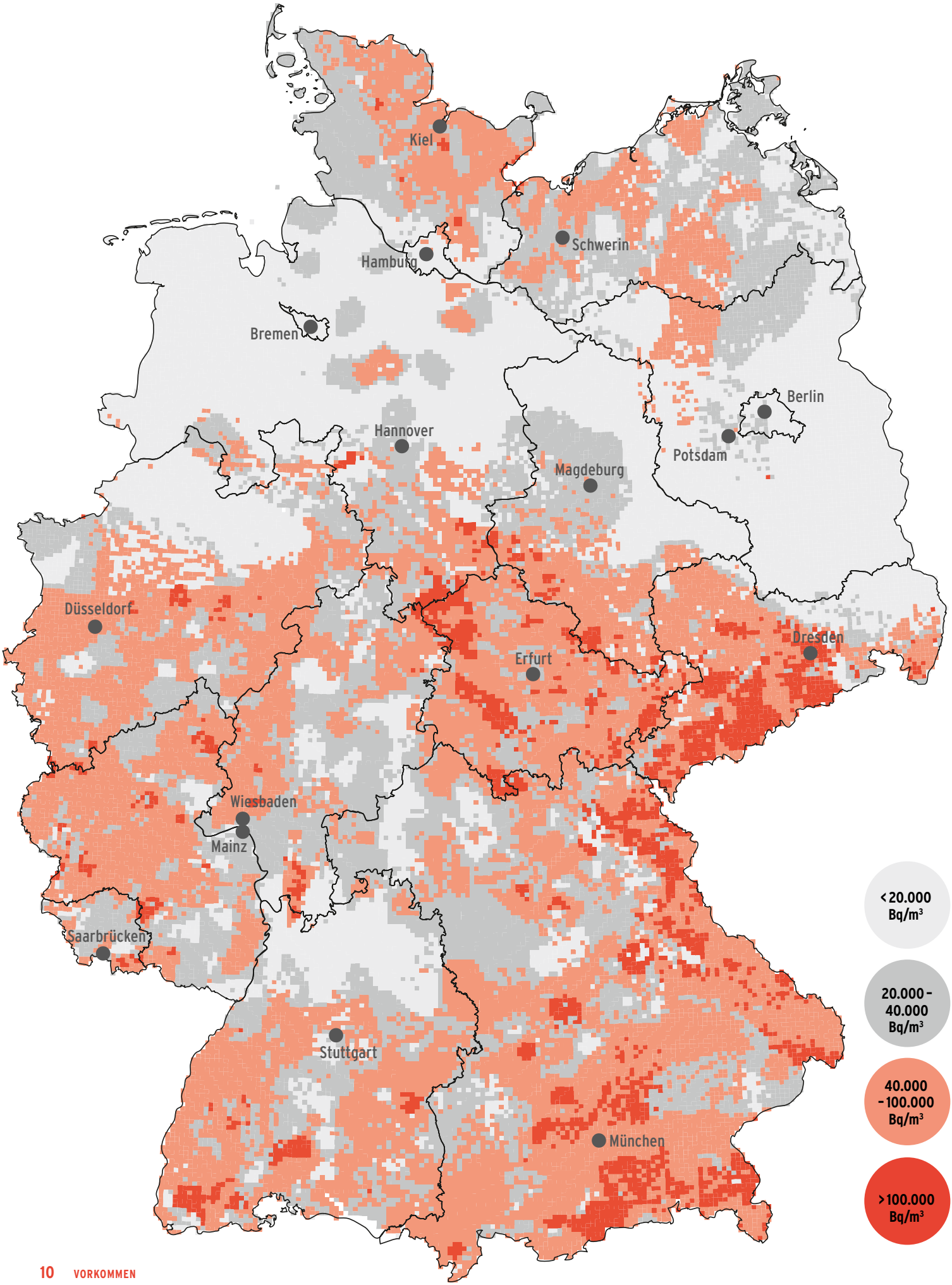
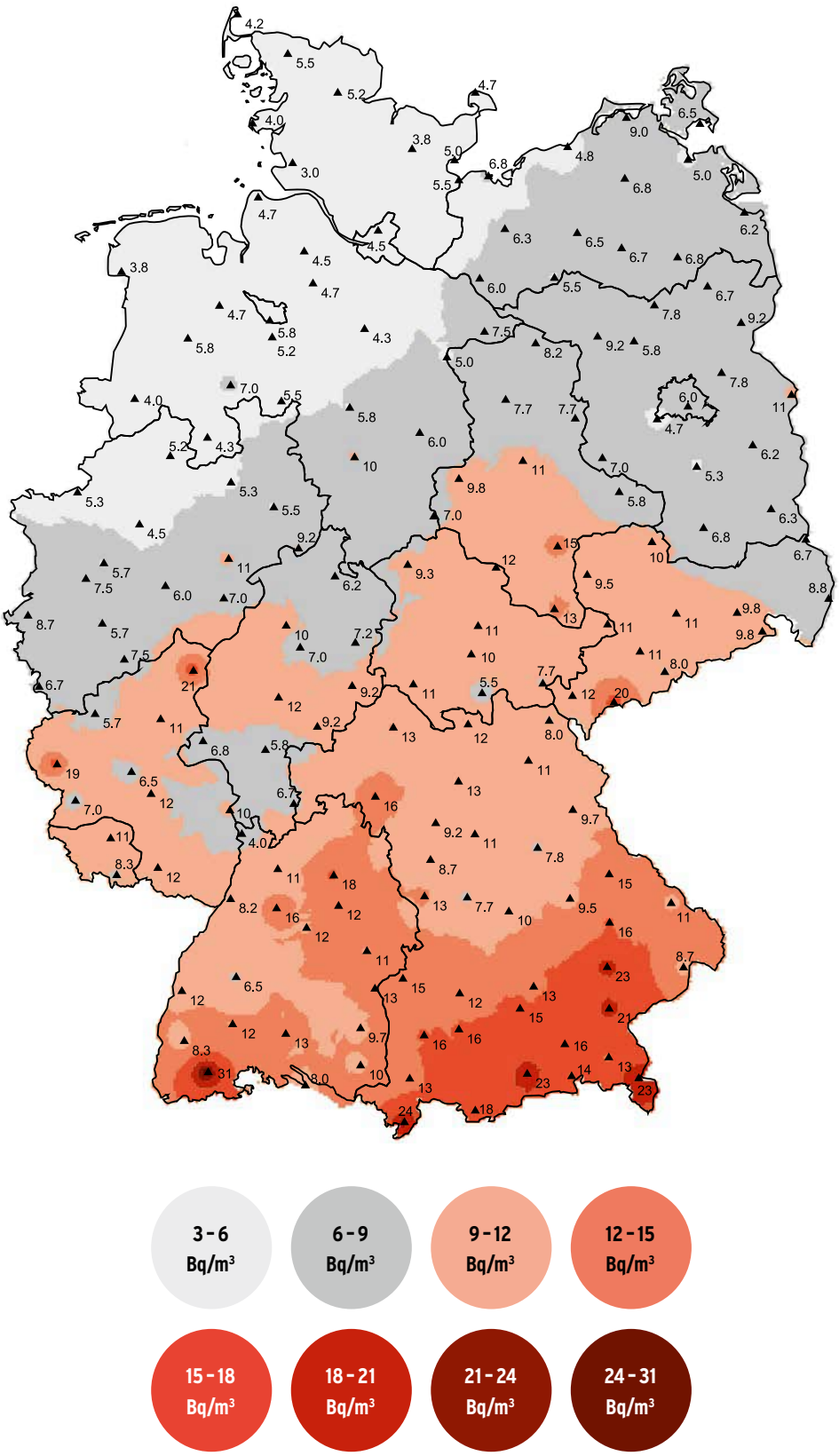


Abb. 3.3: Radon-222-Konzentration in der bodennahen Atmosphäre in Bq/m³



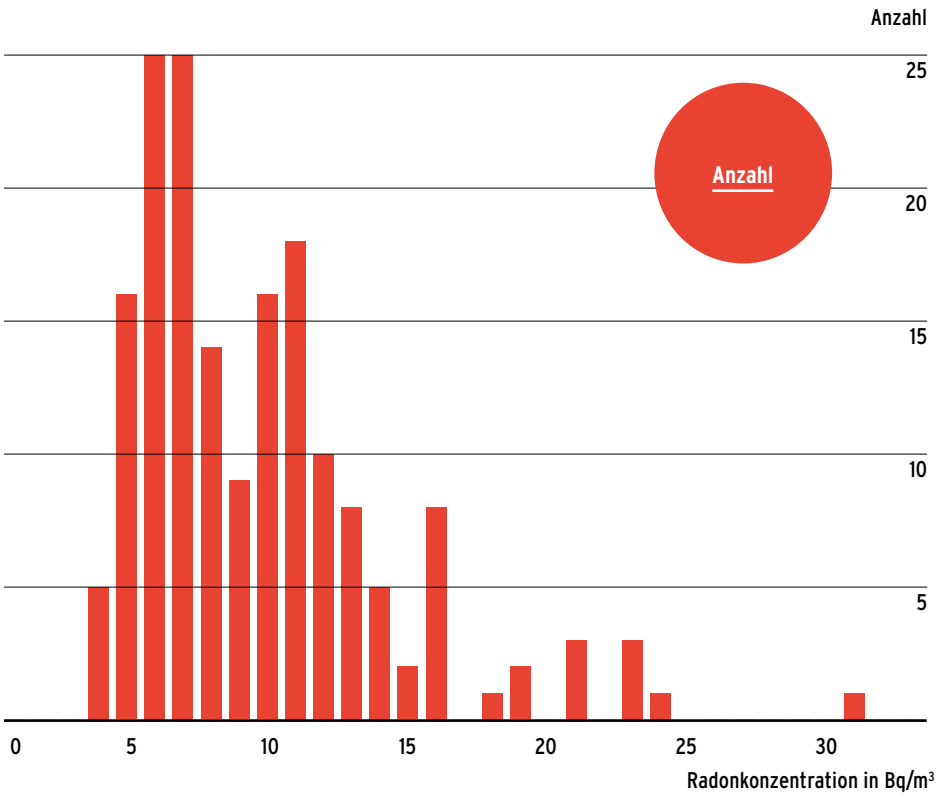
Radon in der Außenluft

Es ist aus mehreren Gründen wichtig, die Radonkonzentration im Freien zu kennen. Einerseits ist dies ein kleiner, aber nicht zu vernachlässigender Beitrag für die Strahlenexposition der Bevölkerung und andererseits stellt die Radonkonzentration im Freien auch eine Grenze für die Möglichkeiten dar, die Radonkonzentration in Gebäuden zu verringern. Wegen der Abhängigkeit der Radon-222-Konzentration im Freien von den meteorologischen Bedingungen und den dadurch bedingten tages- und jahreszeitlichen Schwankungen können gesicherte Mittelwerte nur durch Langzeitmessungen gewonnen werden. Mit Unterstützung des Deutschen Wetterdienstes (DWD) wurde im Rahmen einer Forschungskooperation für einige Jahre ein temporäres Messnetz aufgebaut und betrieben. Dieses Messnetz bestand aus 173 Messpunkten, die gleichmäßig über Deutschland verteilt waren **[8]**. Die gemessenen Jahresmittelwerte der Radon-222-Konzentration umfassen einen Bereich von 3 Bq/m³ bis 42 Bq/m³.

Zur Übersicht ist auf der folgenden Seite die Häufigkeitsverteilung aller Jahresmittelwerte der Radon-222-Konzentration dargestellt. Für das Gesamtgebiet der Bundesrepublik Deutschland ergibt sich eine mittlere Radonkonzentration in der bodennahen Luft von (9 ±1) Bq/m³. Die Messergebnisse zeigen einen Unterschied zwischen den nördlichen und südlichen Regionen Deutschlands.

So werden insbesondere die küstennahen Standorte offensichtlich durch radonarme Luftmassen der Nord- und Ostsee beeinflusst. Die hier gemessenen Radon-222-Konzentrationen liegen alle z. T. deutlich unter dem für das Gesamtgebiet errechneten Mittelwert von 9 Bq/m³. Aber auch an den küstenferneren Messstellen im norddeutschen Tiefland wurden nur Radon-222-Konzentrationen unterhalb oder im Bereich des Mittelwertes von 9 Bq/m³ gemessen. Die höheren Konzentrationen sind erwartungsgemäß in den weiter südlich gelegenen Regionen Deutschlands zu beobachten. Dabei treten die höchsten Radon-222-Konzentrationen in Gebieten mit natürlich erhöhten spezifischen Radium-226-Aktivitäten der oberflächennahen Gesteine auf.

Abb. 3.4: Verteilung der an den Messpunkten vorliegenden Freiluftkonzentrationen (Mittelwert aller Messungen an jedem Standort)



Freisetzung aus Baumaterialien

In allen Steinen und Erden kommt Radium vor. Radon als Zerfallsprodukt von Radium entsteht deshalb in den mineralischen Baustoffen laufend neu, wird aus den Oberflächen freigesetzt und trägt zur Radonkonzentration in Räumen bei. Allerdings ist die Menge des freigesetzten Radons in der Regel klein. Unter normalen Bedingungen tragen die Raum umschließenden aktuellen Baustoffe mit maximal 15 Bq/m³ zur Radonkonzentration in der Raumluft bei. Oftmals ist der Anteil deutlich geringer. **[9]**.
In einigen Ländern haben sich einzelne Baustoffe als wesentliche Radonquelle erwiesen. So wurde etwa in Schweden ein Porenbeton aus Alaunschiefer eingesetzt, der ein Vielfaches mehr als übliche Baustoffe an Radon freigesetzt hat **[10]**. Die Produktion wurde wegen der hohen Radioaktivität untersagt. In Großbritannien wurde ein spezieller Chemiegips (Rückstand der Phosphorsäureherstellung aus Phosphoriterzen) verwendet, der zu erhöhten Radonkonzentrationen in Häusern führte. In Deutschland wurden bisher lediglich in einigen Häusern in Bergbaugebieten Baumaterialien vorgefunden, die maßgeblich zur dortigen Radonbelastung beitrugen.

Eintritt in Gebäude

Wie viel Radon aus dem Gebäudeuntergrund in ein Gebäude eindringen kann, hängt einerseits von der verfügbaren Radonmenge und andererseits von dessen Ankopplung an den Untergrund ab. Die verfügbare Radonmenge wird durch die Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft und die Nachlieferung des Radons durch den verwitterten Bereich des Bodens (die sogenannte Lockerzone) oder entlang bevorzugter Wegsamkeiten im Gestein bestimmt. Die Ankopplung des Gebäudes an den Untergrund ist abhängig von der Bauweise, dem Bauzustand und der Nutzung. Weiterhin spielt die Auswahl der Baumaterialien eine Rolle. Diese Eigenschaften sind entscheidend für das Vorhandensein von Eintrittspfaden und deren Durchlässigkeit für radonhaltige Bodenluft. Ein weiterer für den Radoneintritt verantwortlicher Prozess ist die großflächige Diffusion durch Kellerböden und -wände.
Die auf diesem Weg in Gebäude gelangende Radonmenge ist jedoch begrenzt, kann aber zu leicht erhöhten Radonkonzentrationen in Innenräumen führen.

Darüber hinaus kann radonhaltige Bodenluft über Undichtigkeiten (Fugen, Risse) aus dem Gebäudeuntergrund in die angrenzenden Räume einströmen und sich im ganzen Haus ausbreiten.

Angetrieben wird dieser Prozess durch den Unterdruck, der in Gebäuden gegenüber ihrer Umgebung vorliegt. Diese Druckdifferenz ist auf die Temperaturdifferenz zwischen Innenräumen und der Außenluft sowie auf den um das Gebäude strömenden Wind zurückzuführen. Bereits durch einen geringen Unterdruck im Gebäude wird die radonhaltige Bodenluft aus einem Umkreis von ca. 10 bis 20 Metern angesaugt.

Der Optimierungsspielraum zur Senkung der Radonbelastung durch die gezielte Wahl von Baumaterialien bzw. Baumaterialoberflächen liegt durchschnittlich im Bereich von 10 bis 15 Bq/m³.

FACHINFORMATION

In den Gebäuden herrscht Unterdruck gegenüber ihrer Umgebung. Ursache dafür ist die Temperaturdifferenz zwischen Innenräumen und der Außenluft sowie Luftbewegungen um das Gebäude. Ein geringer Unterdruck im Gebäude reicht aus, um die radonhaltige Bodenluft aus einem Umkreis von ca. 10 bis 20 Metern anzusaugen.

Tab. 3.1: Radiumkonzentration und Radonexhalationsraten ausgewählter Baustoffe [9]

Baumaterial	Konzentration des Radium-226 in Bq/kg	Radon-Exhalationsrate in Bq/(m² h)
Kalkstein	<10 – 40	0,9 – 11
Ziegel, Klinker	40 – 150	1 – 10
Naturbims	<20 – 200	0,6 – 6
Hüttenschlacke	10 – 2.100	0,4 – 0,7
Beton	20 – 200	2 – 20
Porenbeton	10 – 130	1 – 3
Porenbeton mit Alaunschiefer	600 – 2.600	50 – 200
Naturgips	<10 – 70	0,2

Radon im Trinkwasser

Da Radon in Wasser gut löslich ist, wird es vom Grundwasser aufgenommen und mit diesem transportiert. Bei der Wasserverwendung (z. B. beim Duschen, in Waschmaschinen und Geschirrspülern) kann es in die Raumluft freigesetzt werden. In der Regel trägt dies nur mit wenigen Bq/m³ zum Jahresdurchschnitt der Radonkonzentration in Räumen bei. Unter besonderen geologischen Bedingungen, z. B. in Granitgebieten oder Gebieten mit Uranerzvorkommen, kann die Wasserverwendung aus individuellen Brunnen einige 10 Bq/m³ zur Radonkonzentration in Wohnräumen beitragen. Im Hinblick auf die Notwendigkeit von Maßnahmen zur Vermeidung oder Senkung erhöhter Radonkonzentrationen ist in Deutschland der Beitrag von Radon aus dem Wasser meist unbedeutend **[14]**.

FACHINFORMATION

DIE RADONABGABE AUS DEM BAUSTOFF

Baustoffe geben in unterschiedlichem Maße Radon ab. Dies wird mit der Radonexhalationsrate [in Bq/(m² h)] zum Ausdruck gebracht. Die Radonexhalationsrate hängt wiederum von der Radiumkonzentration im Material, der Porosität und Porenstruktur und teilweise sogar von der Bauteilfeuchte ab. Je weniger Radium ein Material enthält, umso weniger Radon kann entstehen und je undurchlässiger ein Material ist, desto mehr Radon zerfällt noch innerhalb des Baustoffes in das nicht flüchtige Polonium, das sich im Baustoff einlagert und somit nicht zur Belastung der Atemluft beitragen kann. Tabelle 3.1 zeigt Radiumkonzentrationen und Radonexhalationsraten einiger Baustoffe. Die spezifischen Radium-226-Aktivitäten gängiger mineralischer Baustoffe liegen zum größten Teil im Bereich von <10 bis 200 Bq/kg und die Exhalationsraten zwischen 0,2 und 10 Bq/(m² h) **[11,12]**.

DAS OBERFLÄCHEN-VOLUMEN-VERHÄLTNIS, DER LUFTWECHSEL

Die Radonkonzentration in Innenräumen hängt davon ab, wie viele Quadratmeter exhalierender Oberfläche pro Kubikmeter Raumvolumen wirksam sind. Dieses Verhältnis ist bei kleinen Räumen ungünstiger als bei großen. Allerdings bestehen oft nur Teile, bspw. die Wände, aus mineralischen Baustoffen. Die Raum umschließenden Bauteiloberflächen sind etwa konstante Radonquellen, da die Radonexhalation aus Bauteilen nicht wesentlich von den Druckverhältnissen im Gebäude abhängig ist, sondern durch Diffusion bestimmt wird.

Der Luftwechsel führt zu einem direkten Verdünnungseffekt, wenn die Radonkonzentration der Außenluft niedriger als die im betreffenden Raum ist.

Die Radonkonzentration in einem Raum wird beschrieben durch:

$$C_R = \frac{\Phi \cdot A + V \cdot K \cdot C_A}{(\lambda + K) \cdot V}$$

mit

C_R: Rn-Konzentration in der Raumluft in Bq/m³

C_A: Rn-Konzentration in der Außenluft in Bq/m³

A: exhalierende Oberfläche in m²

V: Raumvolumen in m³

K: Luftaustauschrate in h^{-1}

Φ: Rn-Exhalationsrate in Bq $m^{-2} h^{-1}$

λ: Zerfallskonstante des Radons 0,0076 h^{-1}

Wird in Betracht gezogen, dass gemäß DIN 1946-6 die für den gesamten Wohnbereich notwendige Luftaustauschrate 0,5 h^{-1} beträgt **[13]**, vereinfacht sich die oben genannte Gleichung wegen

$\lambda \ll K$ zu:

$$C_R(Rn) = \frac{\Phi \cdot A}{K \cdot V} + C_A(Rn)$$

[8] Kümmel, M., Dushe, C., Gehrcke, K.; Ermittlung der Exposition der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland durch Radon in der freien Atmosphäre, TÜV Media GmbH, 2010

[9] Gehrcke, K., Hoffmann, B., Schkade, U., Schmidt, V., Wichterey, K.; Natürliche Radioaktivität in Baumaterialien und die daraus resultierende Strahlenexposition. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) 2012 (http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-201210099810)

[10] Clavensjö, B.; Akerblom, G.: The Radon Book. ISBN 91-540-5649-7, Ljunglöfs Offset AB, Stockholm 1994

[11] Keller, G.; Hoffmann, B.; Feigenspan, T.: Radon Permeability and Radon Exhalation of Building Materials. Radon in the Living Environment. In: Radon in the Living Environment, Proceedings, Athens, 19 – 23 April 1999

[12] Folkerts, K.H., Keller, G.; Muth, H.: An Experimental Study on the Diffusion and Exhalation of 222Rn and 220Rn from Building Materials. Radiation Protection Dosimetry, Vol. 9, No. 1, 1984

[13] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 1946-6 Raumlufttechnik – Teil 6: Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung, Abnahme, Mai 2009

[14] SSK, Strahlenexposition durch Radon-222 im Trinkwasser, Empfehlung der Strahlenschutzkommission. Verabschiedet in der 188. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 02. Dezember 2003

4. Radon in Gebäuden

Zeitlicher Verlauf der Radonkonzentration

ABBILDUNGSHINWEIS

Abbildung 4.1 zeigt, wie schnell die Radonkonzentration in einem Raum nach längerer Lüftungsdauer wieder ansteigen kann. Bei der Lüftung mit offenen Fenstern tauscht sich die Raumluft innerhalb kurzer Zeit fast vollständig aus und das Radon verschwindet nahezu.

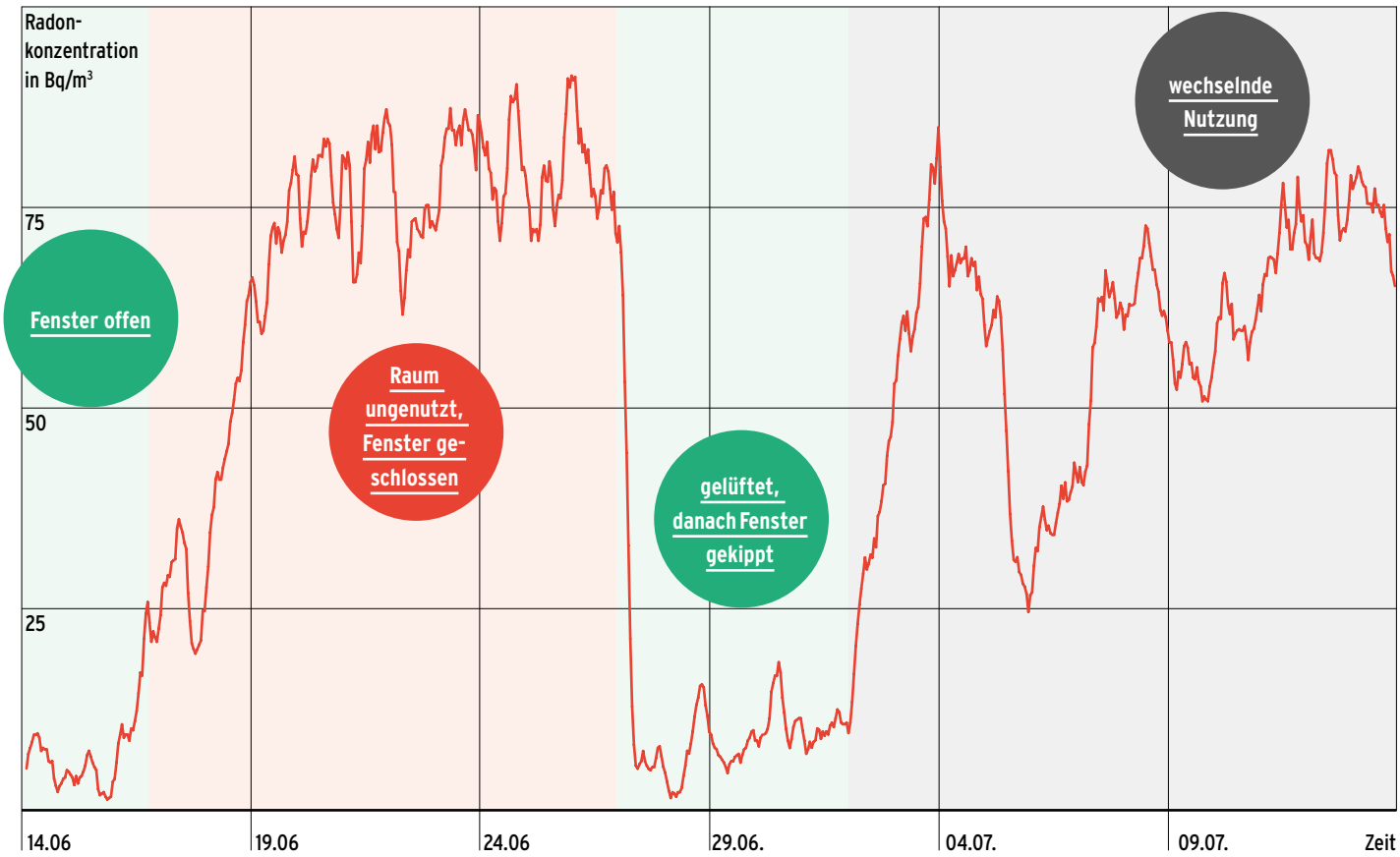
Radon in Innenräumen dringt vor allem aus dem Untergrund ein. Geringe Mengen kommen aus der Außenluft, aus Baustoffen oder aus dem Trinkwasser. Durch Lüften mit weit geöffneten Fenstern entweicht der größte Teil des Radons in die Außenluft. Sind die Fenster geschlossen, hängt die Anreicherung des Radons in Innenräumen von verschiedenen Faktoren ab. Starke Temperaturunterschiede zwischen innen und außen oder unterschiedliche Luftdruckverhältnisse begünstigen die Anreicherung von Radon. Grundsätzlich unterliegt die Radonkonzentration in Innenräumen zeitlichen Schwankungen. Typisch sind auch saisonale Veränderungen mit höheren Werten im Winter. Dazu kommen tageszeitliche Schwankungen, die meist zu den höchsten Werten in den frühen Morgenstunden führen. Markante Witterungsereignisse, intensives Lüften oder längere Abwesenheiten der Bewohner nehmen ebenfalls Einfluss auf den Zeitverlauf der Radonkonzentration.

Häufigkeitsverteilung

Vom Baugrund in das Gebäudeinnere gelangendes Radon kann sich vor allem über Treppenaufgänge, Kabelkanäle und Versorgungsschächte, aber auch durch Geschossdecken im Haus ausbreiten. Die in verschiedenen Untersuchungen gemessenen Radonkonzentrationen umfassen einen weiten Bereich. Der Jahresmittelwert beträgt in Aufenthaltsräumen durchschnittlich 50 Bq/m³. Werte über 100 Bq/m³ sind deutschlandweit in rund 10 % und Werte über 300 Bq/m³ in rund 1,5 % der Aufenthaltsräume im Erdgeschoss von Ein- und Zweifamilienhäusern anzutreffen. Für Aufenthaltsräume in höheren Etagen nehmen diese Anteile ab.

In seltenen Fällen wurden Radonkonzentrationen über 1.000 Bq/m³ bis zu Einzelfällen mit einigen Tausend Bq/m³ in den Wohnräumen gemessen. Derartig hohe Radonkonzentrationen traten in Gebäuden auf, in denen Luft aus Schutthalden des Bergbaus oder aus Untertagebereichen gelangte.
Die typischen Quellen des Zutritts von Radon in Gebäuden wie der Baugrund, das Baumaterial, die Umgebungsluft und das Trinkwasser und die damit zusammenhängenden Radonkonzentrationen sind in Tabelle 4.1 aufgeführt.

Abb. 4.1: Beispiel für die Auswirkung verschiedener Lüftungen auf die Radonkonzentration in einem Raum



FACHINFORMATION

Um den Einfluss der Gebäudeeigenschaften und der Nutzung auf die Radonkonzentration zu beschreiben, wurde der Transferfaktor Bodenluft-Raumluft definiert. Die in Untersuchungen berechneten Transferfaktoren variieren in einem Bereich von 0,1 ‰ bis ca. 50 ‰. Der Medianwert für Kellerräume liegt bei 1,5 ‰, für Referenzräume im Erdgeschoss (Räume in einem Massivhaus, unterkellert, Verwendung von Beton, kein Einsatz von Natursteinen) bei 0,95 ‰. Für Räume, die ein oder mehrere dieser Merkmale nicht aufweisen, liegt der Medianwert höher. Die Ermittlung von Transferfaktorverteilungen für Räume in verschiedenen Etagen und unterschiedliche Gebäudeeigenschaften ermöglicht Prognosen von Häufigkeiten erhöhter Radonkonzentrationen für Gebiete von Landkreisen und Kommunen unter Berücksichtigung des lokalen Gebäudebestandes **[15]**.

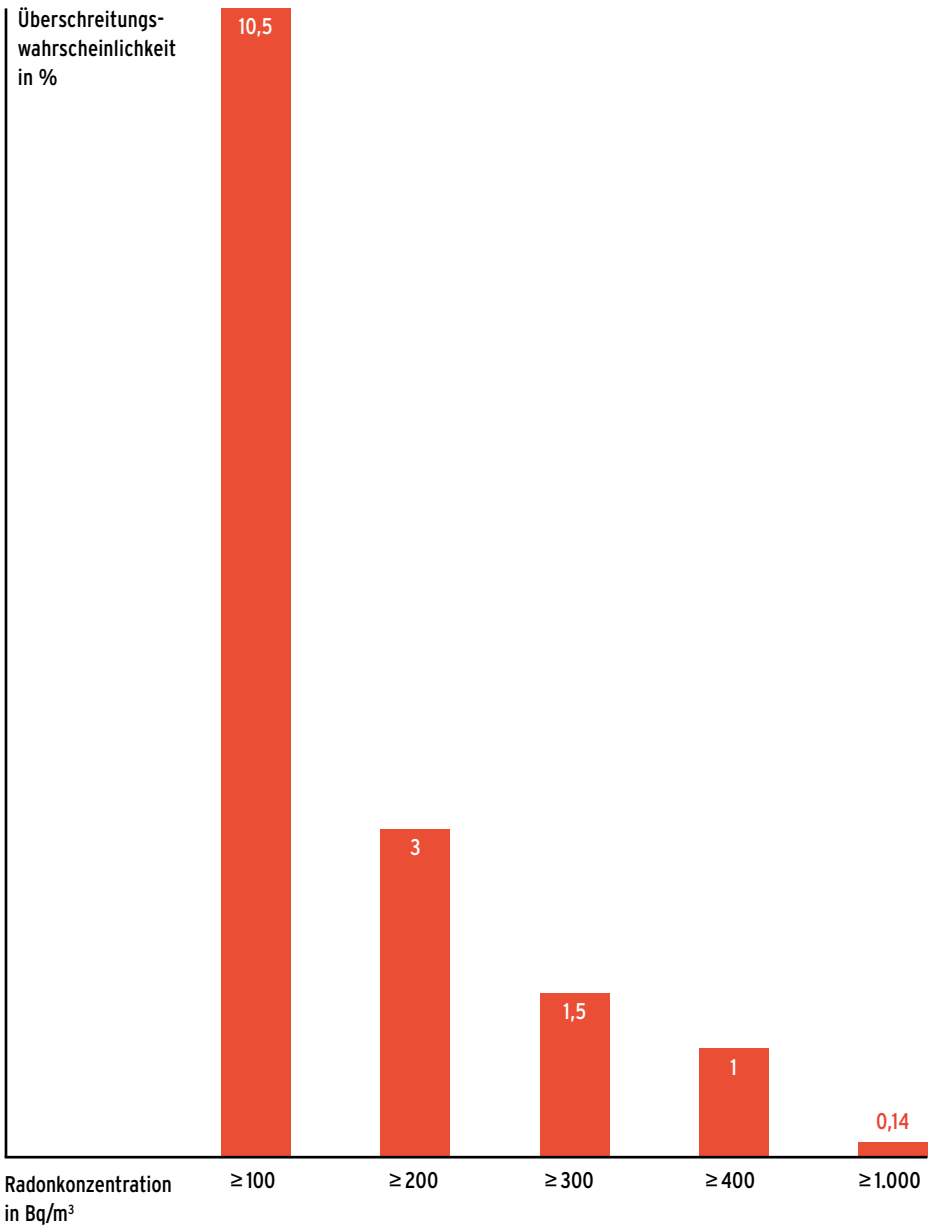
Tab. 4.1: Übersicht der durch unterschiedliche Quellen in Wohnräumen verursachten Radonkonzentration

Radonquelle	Radonkonzentration in Wohnräumen in Bq/m³	
	üblicher Bereich	Maximum
Baugrund	10 – 2.000	> 30.000
Baumaterial	< 10 – 70	< 2.000
Umgebungsluft	5 – 30	< 250
Wasser	< 10	< 100

Gebäudeeigenschaften

Die bei Messungen ermittelten Radonkonzentrationen variieren über einen weiten Bereich und sind maßgeblich von den Eigenschaften des jeweiligen Gebäudes abhängig. Räume im Erdgeschoss von nicht oder nur teilweise unterkellerten Gebäuden weisen im Durchschnitt höhere Radonkonzentrationen auf als solche in voll unterkellerten Gebäuden. Die Verwendung der Baumaterialien sowie die Bauausführungen von Kellerwänden, Kellerböden und der Kellerdecke beeinflussen die Radonkonzentration. Die Verwendung von Beton weist im Durchschnitt die niedrigsten Werte auf. Günstig wirkt sich auch ein Feuchtigkeitsschutz für Bodenplatte und erdberührte Wände aus.

Abb. 4.2: Radonkonzentrationen in Bq/m³ in Aufenthaltsräumen im Erdgeschoss von Ein- und Zweifamilienhäusern (Quelle: Untersuchung des BfS [16])



[15] Kemski, J., Klingel, R., Stegemann, R.; Konzeption eines DV-Projektes zur Bewertung des Radonpotenzials im Boden und der Prognose der Radonkonzentration in Gebäuden.
Teil 1 Boden- und Raumluftmessungen Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben St.Sch. 4251, Bonn, 2003

[16] Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung: Jahresbericht 2015 Herausgeber: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), 28-Jul-2017, urn:nbn:de:0221-2017072814305

Regionale Verteilung

In Gebieten mit höheren Radonkonzentrationen in der Bodenluft und radondurchlässigem Baugrund sind erhöhte Radonkonzentrationen in Gebäuden häufiger anzutreffen. In eng begrenzten Gebieten kommt es vor, dass in der Hälfte aller Gebäude Radonkonzentrationen über 100 Bq/m³ vorherrschen. Werte von 1.000 Bq/m³ in Aufenthaltsräumen sind jedoch auch dort selten. Da die Radonkonzentration in einem Gebäude und auch innerhalb seiner Räume von vielen Faktoren abhängig ist, kann nur durch Messungen ihre tatsächliche Höhe ermittelt werden.

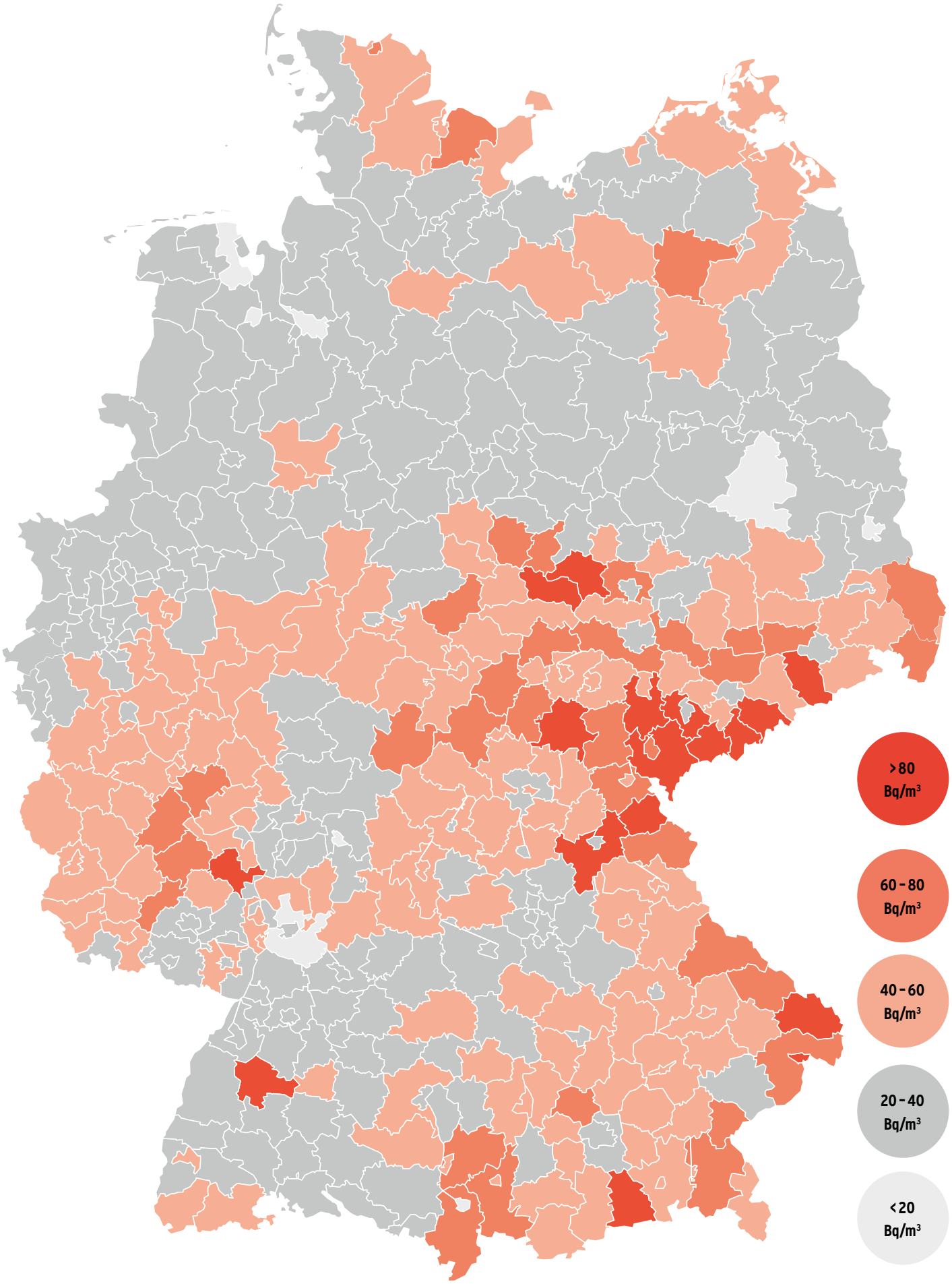
Die arithmetischen Mittelwerte und Überschreitungshäufigkeiten ausgewählter Schwellen der Radonkonzentration in Erdgeschoßräumen für Bundesländer sind in Tabelle 4.2 zusammengestellt.

Bisherige Messkampagnen haben gezeigt, dass erhöhte Radonwerte in bestimmten Gebieten in Deutschland deutlich häufiger anzutreffen sind als in anderen Regionen. Die kartografische Zusammenstellung der Ergebnisse von Messungen und statistischen Modellierungen ist in Abb. 4.3 abgebildet. Einzelheiten sind in **[6]** beschrieben.

Tab. 4.2: Mittelwerte und Überschreitungshäufigkeiten der Radonkonzentration in Erdgeschossräumen für Bundesländer (Quelle: BfS, eigene Berechnung)

Bundesland	Anteil Gebäude in %				Anzahl der untersuchten Gebäude
	≥ 100 Bq/m³	≥ 200 Bq/m³	≥ 400 Bq/m³	≥ 1.000 Bq/m³	
Schleswig-Holstein	7	1,0	0,3	0,007	423
Hamburg	4	0,4	0,1	0,004	177
Niedersachsen	4	0,4	0,1	0,004	1409
Bremen	3	0,1	0,04	0,002	50
Nordrhein-Westfahlen	7	1,0	0,3	0,007	5860
Hessen	7	1,1	0,3	0,007	944
Rheinland-Pfalz	8	1,4	0,4	0,009	2377
Baden-Württemberg	13	3,3	1,1	0,15	1826
Bayern	15	4,7	1,6	0,2	5337
Saarland	6	0,9	0,24	0,007	1157
Berlin	3	0,2	0,06	0,003	380
Brandenburg	7	2,5	0,84	0,12	216
Mecklenburg-Vorpommern	15	6,3	2,1	0,3	123
Sachsen	29	13	4,6	0,8	4914
Sachsen-Anhalt	16	6,7	2,3	0,4	724
Thüringen	27	12	4,2	0,7	2592
Deutschland	10,5	3,0	1,00	0,14	28509

Abb. 4.3: Durchschnittliche Radonkonzentrationen (geometrischer Mittelwert über Landkreise, Stand 2006) in Wohnungen in Deutschland (nach Menzler et al.) [6]



5. Radonschutz im Strahlenschutzrecht

Der Schutz vor Radon ist im Strahlenschutzgesetz und in der Strahlenschutzverordnung geregelt. Das Gesetz sieht verschiedene Maßnahmen vor, um die Gesundheit von Menschen in Gebieten mit hohem Radon-Vorkommen zu schützen.
Als Richtschnur für eine hohe Konzentration von Radon in Innenräumen ist im Strahlenschutzgesetz ein Wert von 300 Becquerel pro Kubikmeter festgelegt. Wird dieser sogenannte Referenzwert überschritten, sollten Maßnahmen ergriffen werden, um die Radonkonzentration im Gebäude zu senken. Da Radon bekanntermaßen regional in unterschiedlichen Größenordnungen anzutreffen ist, sind die Bundesländer verpflichtet worden, bis Ende 2020 zu ermitteln und bekanntzugeben, in welchen Gebieten besonders viel Radon in Häusern zu erwarten ist. Das Gesetz besagt, dass solche Gebiete auszuweisen sind, in denen der Referenzwert von 300 Becquerel pro Kubikmeter in einer „beträchtlichen Zahl von Gebäuden mit Aufenthaltsräumen oder Arbeitsplätzen“ überschritten wird. In diesen sogenannten Radonvorsorgegebieten gelten unterschiedliche Regelungen zum Schutz vor Radon – je nachdem, ob es sich um ein Wohngebäude oder einen Arbeitsplatz handelt.
In bestehenden Wohngebäuden ist der Radonschutz freiwillig. Eigentümer und Bewohner können freiwillig Maßnahmen ergreifen, um die Radon-Konzentration im Gebäude zu senken. Das Strahlenschutzgesetz sieht für sie keine Pflicht zum Handeln vor. Für Neubauten besteht für Bauherren die grundsätzliche Pflicht, durch bauliche Maßnahmen weitgehend zu verhindern, dass Radon in das Gebäude eindringt. Wird in einem sogenannten Radonvorsorgegebiet gebaut, sind weitere Maßnahmen einzuhalten. Die Strahlenschutzverordnung weist dazu Maßnahmen wie die gezielte Beeinflussung der Luftdruckdifferenz zwischen Gebäudeinnerem und Bodenluft, die Begrenzung der Rissbildung in Wänden und Böden mit Erdkontakt, die Verwendung diffusionshemmender Betonsorten und anderer geeigneter Dämm-Materialien oder das Absaugen von Radon an Randfugen oder unter Abdichtungen aus.

Werden Gebäude, die sich in einem Radonvorsorgegebiet befinden, zum Arbeiten genutzt, sind die für die jeweiligen Arbeitsplätze Verantwortlichen verpflichtet, die Radonkonzentration an Arbeitsplätzen im Keller und im Erdgeschoss zu ermitteln. Gleiches gilt für Arbeitsplätze nach § 127 StrSchG Anlage 8 (z. B. untertägige Bergwerke, Radonheilbäder, Anlagen der Wassergewinnung). Hier muss die Radonkonzentration grundsätzlich gemessen werden. Überschreitet die Konzentration von Radon an diesen Arbeitsplätzen den Referenzwert von 300 Becquerel pro Kubikmeter, müssen unverzüglich Maßnahmen zur Radon-Reduzierung eingeleitet werden. Eine Ausnahme hiervon ist nur unter engen Voraussetzungen möglich. Der Erfolg dieser Maßnahmen muss anschließend entsprechend der gesetzlichen Fristen durch eine Messung nachgewiesen werden.

Lässt sich die Radonkonzentration am Arbeitsplatz nicht unter 300 Becquerel pro Kubikmeter senken, muss der Arbeitsplatz den zuständigen Strahlenschutzbehörden der Bundesländer gemeldet werden. Darüber hinaus muss der Arbeitgeber die zu erwartende Strahlendosis für die Beschäftigten an diesem Arbeitsplatz abschätzen. Ab einer zu erwartenden Dosis von 6 Millisievert pro Jahr greifen die Regelungen des beruflichen Strahlenschutzes.

Wird ein betroffener Arbeitsplatz im Rahmen des beruflichen Strahlenschutzes überwacht, ist der Arbeitgeber dazu verpflichtet, die Beschäftigten an diesem Arbeitsplatz sowohl im Strahlenschutzregister des BfS als auch bei der zuständigen amtlichen Messstelle zu registrieren. Informationen zur Registrierung im Strahlenschutzregister des BfS sind unter www.bfs.de/ssr zu finden. Detaillierte Informationen sowie die Dosimeter für die betroffenen Arbeitsplätze werden von behördlich bestimmten Messstellen bereitgestellt.
Das Gesetz stellt an die zuständigen Behörden auf Bundes- und Landesebene die grundlegende Aufgabe, Bürgerinnen und Bürger über Gesundheitsrisiken durch Radon zu informieren und sie für Schutzmaßnahmen zu gewinnen. Eine Beschreibung der Umsetzung dieser Informationspflicht ist Teil eines Maßnahmenplans, der durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit unter Beteiligung der Länder erstellt wurde, und die langfristigen Ziele zum Schutz von Bevölkerung und Beschäftigten vor einer Radonexposition definitiert.

FACHINFORMATION

Radonkonzentration in Innenräumen
In Deutschland treten in Innenräumen im Durchschnitt etwa 50 Bq/m³ Radon auf. Auf der wissenschaftlichen Grundlage zahlreicher internationaler Studien ist es aus Sicht des Bundesamts für Strahlenschutz (BfS) sinnvoll, Maßnahmen zur Reduzierung des Radongehalts ab einem Wert von 100 Bq/m³ im Jahresmittel in viel genutzten Innenräumen in Betracht zu ziehen. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) teilt die Fachposition des BfS.
Mit der Anwendung von möglichen Maßnahmen, wie sie im Folgenden erläutert werden, kann in der Regel dieser Wert erreicht werden. Dahingegen ist die deutliche Unterschreitung von 100 Bq/m³ Radon in Räumen mit hohen Werten oft nur durch extremen Aufwand möglich.

6. Messung von Radon

Radonkonzentration in Aufenthaltsbereichen im Jahresmittel

Die gesicherte Einschätzung der Radonbelastung in Gebäuden lässt sich nur mit Messungen ermitteln. Dabei sollten die Jahresmittelwerte der Radonkonzentration in den wichtigsten Aufenthaltsräumen erhoben werden, um über die Notwendigkeit von Radonschutzmaßnahmen entscheiden zu können. Wenn die Messungen zu hohen Ergebnissen führen, sollten auch die Anforderungen an Umfang und dauerhafte Effizienz der Schutzmaßnahmen ein hohes Niveau anstreben.

Das erhöhte Gesundheitsrisiko resultiert aus jahrzehntelanger Radonexposition. Aufgrund der langen Aufenthaltsdauern kommt den Aufenthaltsräumen ein besonderes Augenmerk zu. Der Planung von Messungen sollte die Charakterisierung der vorhandenen Räume in einem Gebäude vorausgehen. Aufenthaltsräume sind gemäß Strahlenschutzgesetz **[17]** Innenräume, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Einzelpersonen der Bevölkerung bestimmt sind, zum Beispiel in einer Schule, einem Krankenhaus, einem Kindergarten oder zum Wohnen.

Die Radonkonzentration in Aufenthaltsräumen ist nicht nur von den Radonquellen und den Ausbreitungswegen des Radons, sondern in hohem Maße auch von den Wetterverhältnissen, der Art der Raumnutzung, Raumklimatisierung und Lüftung sowie dem Nutzerverhalten abhängig und unterliegt deshalb starken zeitlichen Schwankungen.

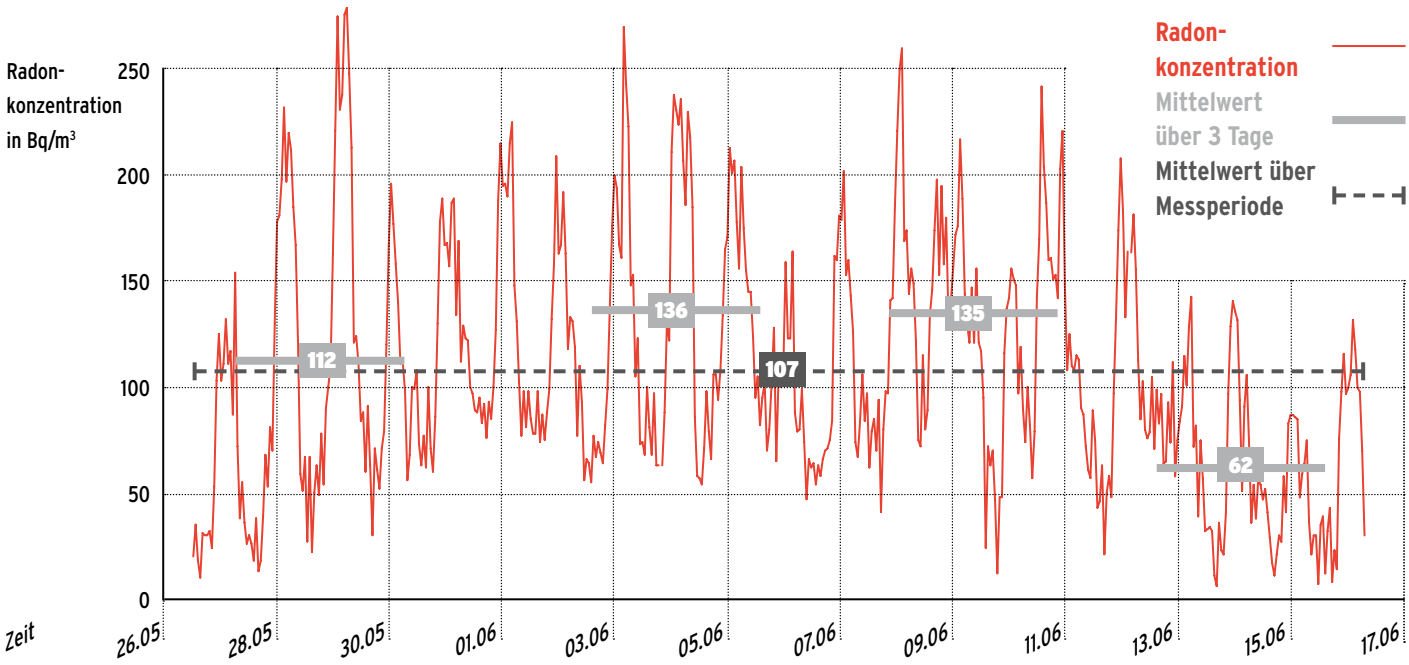
Messungen sollen möglichst über die Dauer von einem Jahr erfolgen.

In den Ländern Sachsen und Bayern werden Radonfachpersonen qualifiziert. Auch andere Bundesländer planen die Einführung von solchen berufli-chen Zertifikaten. Die Radonfachpersonen verfügen über die notwendigen Kenntnisse von Messtechnik und Messmethoden, um fachgerechte Messungen zu begleiten. Das BfS beteiligt sich an Qualifikationsmaßnahmen für Radonfachpersonen und empfiehlt, bei Fragen und Unsicherheiten bezüglich Radonmessungen und späterer Reduzierungsmaßnahmen die Beratung durch solche Fachleute zu suchen.

Diese können für bestimmte Arten des sehr unterschiedlichen Spektrums von Aufenthaltsräumen typisch und zyklisch sein, z. B. bestimmt durch Zeiten der Nutzung und Nichtnutzung.

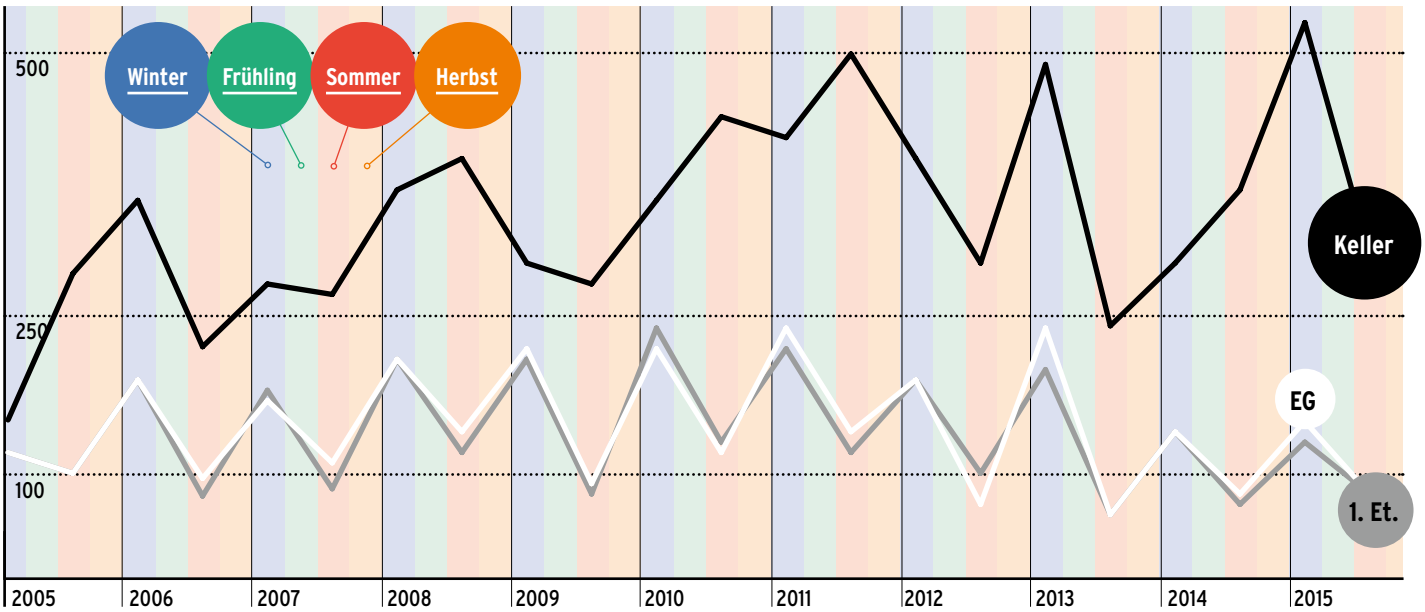
Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Jahresmittelwert in einem Raum im Vergleich zum Mittelwert über viele Jahre mit einer Standardabweichung von etwa 30 % variiert. Das bedeutet: In einem Raum, in dem im Jahresmittel 120 Bq/m³ gemessen werden, ist mit einer Wahrscheinlichkeit von rund 70 % damit zu rechnen, dass die Radonkonzentration im vorangegangenen Jahr oder im Folgejahr in den Bereich 90 Bq/m³ bis 150 Bq/m³ einzuordnen ist.

Abb. 6.1: Zeitlicher Verlauf der Radonkonzentration (Beispiel) und Mittelwerte über 3 Tage



[17] Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz – StrlSchG), Ausfertigungsdatum: 27.06.2017

Abb. 6.2: Jahreszeitliche Variation der Radonmittelwerte



Empfohlene Geräte und Methoden

Aufgrund der in Aufenthaltsräumen üblicherweise herrschenden klimatischen Bedingungen können handelsübliche Messgeräte problemlos eingesetzt werden. Durch die Messungen sollen die bei tatsächlicher Raumnutzung vorliegenden Radonkonzentrationen bestimmt werden. Daher kommen nur Methoden und Geräte in Frage, welche die Raumnutzung und die raumklimatischen Verhältnisse nicht beeinflussen.
Damit die Bestimmung des Jahresmittels zuverlässig erfolgen kann, sollten die eingesetzten Messgeräte folgende Bedingungen erfüllen:
Nachweisgrenze: 20 Bq/m³
Maximale relative Messabweichung der Einzelmessung von einem Referenzwert bei Kalibrierungen
bei 100 Bq/m³: ≤ 30 %
bei 200 Bq/m³: ≤ 25 %
bei 1.000 Bq/m³: ≤ 20 %
Kernspurdetektoren in Diffusionskammern (Exposimeter) liefern zuverlässige Ergebnisse und werden zur Bestimmung der Radonkonzentration in Gebäuden empfohlen.

Qualitätssicherung

Um hochwertige Messergebnisse zu erzielen, sollte beim Einsatz von integrierenden (passiven) Radon-Messgeräten, beispielsweise Kernspurdetektoren, die Empfehlungen der DIN 11665-4 und bei Verwendung von elektronischen Radon-Messgeräten die Empfehlungen der DIN 61577-2 **[18]** beachtet werden. Außerdem sind die zu den Geräten gehörenden speziellen technischen Anleitungen zu berücksichtigen. Die Techniker, die die Messungen durchführen, sollten über eine angemessene Qualifikation verfügen. Dazu sind Kenntnisse auf den Gebieten des Strahlenschutzes und der Messtechnik notwendig.
Anforderungen an die Qualitätssicherung werden insbesondere vom Gesetzgeber für Radonmessungen an Arbeitsplätzen in Innenräumen gestellt. In der neuen Strahlenschutzverordnung, Teil 4, Kapitel 1, Abschnitt 2, § 155, ist festgelegt, dass für diese Messungen entsprechende Messgeräte von einer vom Bundesamt für Strahlenschutz anerkannten Stelle angefordert und nach deren Vorgaben einzusetzen sind. Es sind auch fachliche Kriterien für die Anerkennung gesetzlich vorgegeben, die der Anbieter von Messungen zu erfüllen hat. Im Weiteren sind die anerkannten Stellen u. a. verpflichtet, mit ihren passiven Messgeräten regelmäßig an nationalen Vergleichsprüfungen teilzunehmen, um bundeseinheitliche Qualitätsstandards zu gewährleisten. Bei elektronischen Messgeräten sind sie verpflichtet, aller zwei Jahre die Kalibrierungen der Geräte zu aktualisieren. Die Kalibrierungen sind bei einem akkreditierten Kalibrierlaboratorium durchführen zu lassen. Das Bundesamt für Strahlenschutz veröffentlicht und aktualisiert die Liste der anerkannten Stellen auf seiner Internetseite.
Für Radonmessungen in Aufenthaltsräumen und in Wohngebäuden gelten diese strikten Arbeitsplatz-Regelungen zur Qualitätssicherung der Messungen nicht. Jedoch wird empfohlen, auch für diese Messungen die notwendigen Messgeräte von einer anerkannten Stellen anzufordern, da neben der gesicherten Messwertqualität auch eine Bewertung des Messergebnisses erfolgt.

Methodische Hinweise zur Verwendung von Exposimetern mit Kernspurdetektoren

Jedes Exposimeter sollte einzeln radondicht verpackt sein. Die maximale Lagerzeit der Exposimeter vor dem Einsatz sollte auch bei luftdichter Verpackung drei Monate nicht überschreiten. Während der Exposition sind die Gerätestandorte grundsätzlich beizubehalten. Kurzzeitige Änderungen des Aufstellortes im Untersuchungsraum sind tolerabel. Die Messstellen sollen Laborbücher über den Ausgang, Eingang und die Auswertung der Detektoren führen.

Bewertung der Messergebnisse, Berichterstattung

Im Rahmen der Bewertung des Messergebnisses wird geprüft, ob der Referenzwert von 300 Bq/m³ unterschritten wird. Bei deutlicher Unterschreitung sind keine weiteren Handlungen notwendig. Bei Messwerten oberhalb des Referenzwertes ist eine detaillierte Betrachtung der Situation sinnvoll.
Folgende Informationen sollten dem Auftraggeber mitgeteilt werden:

- Messmethode
- Messgeräte-Nr.
- Etage und Raum
- Expositionszeitraum
- Die in jedem Raum gemessene Radonkonzentration in Bq/m³
- Der den Aufenthaltsbereich charakterisierende Jahresmittelwert der Radonkonzentration in Bq/m³
- Messunsicherheit

Die Bewertung der Messergebnisse soll es dem Auftraggeber ermöglichen, sachkundig über die Durchführung von Radonschutzmaßnahmen entscheiden zu können.

Deshalb sollten die sich aus den Messwerten ergebenden Empfehlungen detailliert mögliche Schutzmaßnahmen nennen.

Dokumentation, Speicherung, Verarbeitung und Weitergabe der Ergebnisse

Die Ergebnisse von Radonmessungen in Aufenthaltsräumen sind in Verbindung mit Namen und Adressen personenbezogene Daten. Sie unterliegen den Datenschutzgesetzen des Bundes **[19]** und der Länder. Generell sind die Nutzer und Eigentümer der Aufenthaltsräume sowie bei gewerblicher Nutzung eventuelle Arbeitgeber berechtigt, die Messergebnisse und deren Bewertung zu erfahren. Darüber hinaus darf eine Weitergabe nur in dem gesetzlich festgelegten Rahmen erfolgen. Wenn zum Zwecke der Messwertinterpretation und der Ableitung von Hinweisen, die über den „Referenzwertevergleich“ hinausgehen, Zusatzinformationen zu den Gebäuden eingeholt werden, ist auf die Freiwilligkeit dieser Angaben hinzuweisen.

Ermittlung der Radonkonzentration in Gebäuden

Zielstellung

Wenn auf der Grundlage geeigneter Messungen erhöhte Radonkonzentrationen in Aufenthaltsbereichen festgestellt wurden, ist die Ermittlung der Ursachen eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg von Schutzmaßnahmen.

Zu den Ursachen erhöhter Radonkonzentrationen in Aufenthaltsbereichen zählen:

- die Radonquellen,
- die Eintrittswege des Radons in einen oder mehrere Aufenthaltsräume,
- die Ausbreitungswege des Radons innerhalb der Gebäude.

Charakterisierung der Untersuchungsobjekte

Da die Bauweise, das Alter sowie die Nutzung und Lage der Innenräume in Gebäuden grundsätzlich sehr unterschiedlich sind, kann es keine allgemein gültige Methodik zur Ermittlung der Ursachen erhöhter Radonkonzentrationen geben. Der Einzelfall mit seinen baulichen Besonderheiten und speziellen technischen Bedingungen spielt bei der Ursachenerforschung ebenso eine Rolle wie das Nutzerverhalten und die damit verbundenen zeitlichen Variationen der Radonwerte. Für die Exposition von Bewohnern bzw. Nutzern der betreffenden Gebäudebereiche, die für die Einordnung der Messwerte von großer Bedeutung ist, spielt auch die Aufenthaltsdauer eine wichtige Rolle.

Für eine erhöhte Radonkonzentration im Gebäudeinneren können zahlreiche Quellen verantwortlich sein:

- in erster Linie: ein geogen erhöhtes Radonpotenzial im Gebäudeuntergrund.
- Regional: oberflächennahe Grubenbaue, die an die Gebäude heranführen oder in geringer Entfernung von den Gebäuden verlaufen (z. B. Stollen aus dem historischen oder umgehenden Bergbau) und Halden bzw. Geländeauffüllungen mit Haldenmaterial als Baugrund.
- Selten, in der Regel bei älteren Gebäuden: verbautes Material mit erhöhter Radiumkonzentration.
- Oder Material mit erhöhter Radiumkonzentration, das zur Gründung oder Hinterfüllung der Gebäude verwendet wurde.
- Regional in seltenen Fällen: Wasser mit einer Radonkonzentration über 1.000 Bq/l **[20]**.
- Regional an speziellen Standorten (z. B. Haldennähe): erhöhte Radonkonzentration in der Umgebungsluft des Hauses.

Wesentliche Radon-Eintrittspfade für Bodenradon:

- nicht ausreichend dichter erdberührter Gebäudebereich (z. B. Fußboden und Mauern des Kellers),
- Undichtheiten in Wänden und Böden.
- Materialunstetigkeitsstellen, z. B. neben Ver- und Entsorgungsleitungen,
- mit dem Haus verbundene Kanalisationssysteme.

Wesentliche Ausbreitungspfade des Radons innerhalb der Gebäude:

- freie bauliche Verbindungen innerhalb der Gebäude (Treppenbereiche, Türen, Versorgungsschächte, Rohrführungen),
- nicht radondichte Geschossdecken,
- undichtes Mauerwerk,
- Materialundichtheiten und -unstetigkeitsstellen.

[18] DIN ISO 11665-4: 2013 - Deutsches Institut für Normung Messung der Radioaktivität in der Umwelt-Luft: Radon-222, Teil 4: Integrierendes Messverfahren zur Bestimmung des Durchschnittwertes der Aktivitätskonzentration mittels passiver Probenahme und zeitversetzter Auswertung; DIN EN 61577-2: 2017 – Deutsches Institut für Normung Strahlenschutz-Messgeräte – Geräte für die Messung von Radon und Radon-Folgeprodukten – Teil 2: Besondere Anforderungen für Messgeräte für Rn-222 und Rn-220

[19] Bundesdatenschutzgesetz vom 20. Dezember 1990 (BGBl. I S. 2954), aktualisierte Fassung vom Januar 2000

[20] Nazaroff, W. W.; Doyle, S. M.; Nero, A. V.; Sextro, R. G. , Radon Entry via Potable Water. In: Nazaroff, W. W.; Nero, A. V.: Radon and its Decay Products in Indoor Air.

Die physikalischen Ursachen für die Radonausbreitung im Gebäude sind Luftdruckgradienten sowie Konzentrations-unterschiede des Radons zwischen den einzelnen Hausbereichen.

Grundlagen

Zur Ermittlung der Ursachen erhöhter Radonkonzentration in Gebäuden ist die Kenntnis standortspezifischer Informationen zur geologischen und bergbaulichen Situation sowie zu den bodenphysikalischen Gegebenheiten maßgeblich. Auskunft erteilt die zuständige Fachbehörde, die meist auf Landesebene angesiedelt ist (z. B. Bergämter oder Landesämter für Umwelt und Geologie). Fragen, ob für die Aufstandsfläche und die nähere Umgebung des Gebäudes Hinweise auf bergbauliche Hinterlassenschaften (Bergsenkungen, Halden, oberflächennahe bergmännische Auffahrungen u. ä.) oder auf die Verwendung von Haldenmaterial sowie anderer mineralischer Rückstände aus Industrieprozessen als Baustoff oder zur Geländeauffüllung vorliegen, sollten Teil der Ursachenermittlung sein.

FACHINFORMATION

Grundsätzlich tragen Kenntnisse über regional typische Radonquellen dazu bei, Messungen im betreffenden Gebäude bzw. in seiner Umgebung auf ein Minimum beschränken zu können. Weitere Untersuchungen sind häufig nicht mehr notwendig oder können auf begrenzte Schwerpunkte konzentriert werden.
Beim Einsatz von Radon-Kurzzeitmessungen zur Ursachenermittlung von hohen Radonkonzentrationen muss auf die meteorologischen Bedingungen unmittelbar vor und während der Messung sowie das Heizungs-/Lüftungsregime im Gebäude geachtet werden. Es besteht die Möglichkeit, dass sich wegen kurzzeitig atypischer Verhältnisse (z. B. vorherige Raumlüftung) Fehlbeurteilungen der Freisetzung des Radons in das Gebäude und der Radonausbreitung im Gebäude ergeben. Langzeit-Messungen sind grundsätzlich weniger fehleranfällig als Kurzzeit-Messungen, da sie atypische Phänomene eher statistisch ausgleichen.

Zusätzlich sollten bezüglich der Radonsituation wichtige Besonderheiten zur Geschichte des Gebäudes (Um- und Ausbau) und der Hausumgebung in Erfahrung gebracht werden.
Die nachfolgend vorgestellten technischen Untersuchungsmethoden haben sich bei der Ermittlung der Ursachen erhöhter Radonkonzentrationen in Gebäuden bewährt. Messungen des Radongehalts in der Raumluft und in der Gebäudeumgebung stehen dabei im Mittelpunkt.. Der sinnvolle Umfang und die Ausgestaltung des konkreten messtechnischen Vorgehens sind wesentlich abhängig vom Erfahrungsstand der Ausführenden.

Messung der Radonkonzentration in der Raumluft

Wenn Messungen der Radonkonzentration in nur einem Teil des Gebäudes durchgeführt und dabei erhöhte Werte vorgefunden wurden, sollten im nächsten Schritt Messungen in allen Räumen, mindestens in den Aufenthaltsräumen des Hauses erfolgen. Diese können sich dann über kürzere Zeiträume als ein Jahr erstrecken.

Aus den Ergebnissen der Raumluftuntersuchungen lassen sich oft bereits erste Rückschlüsse auf die Quellen und Ausbreitungswege des Radons ziehen und Empfehlungen zur Minimierung der Radonexposition ableiten.

Radon-Sniffing

An markanten Rissen und Unstetigkeitsstellen im Material durchgeführtes Radon-Sniffing (Aufspüren von begrenzten Radon-Eintrittsstellen mittels Luft ansaugender Sonden) kann Hinweise darüber geben, ob diese Stellen für die Radonausbreitung relevant sind. Radon-Sniffing ist außerdem einsetzbar für das Auffinden von zunächst nicht als relevant erachteten radonführenden Rissen in Wänden und Böden.

PRAXISTIPP

Aus Gründen der Vergleichbarkeit aller in einem Gebäude gemessenen Radonwerte sollten auch die bereits untersuchten Räume gleichzeitig in die erneute Messreihe einbezogen werden. Zweckmäßigerweise werden die Messungen, insbesondere in Aufenthaltsräumen, so durchgeführt, dass die Ergebnisse nach einer Sanierung als Grundlage zur Bewertung des Sanierungserfolges genutzt werden können. In nur zeitweilig von Personen genutzten Räumen sind Messungen von besonderer Bedeutung, welche die zeitlichen Änderungen der Radonkonzentration anzeigen. Erhöhte Radonkonzentrationen während der Nichtnutzungszeiten von Räumen tragen nicht zur Strahlenexposition bei. Ist die Radonkonzentration im Kellergeschoss oder anderen erdberührenden Bereichen des Gebäudes höher als in den darüber liegenden Etagen, weist dies in der Regel auf eine ungenügende Dichtheit des Hauses gegenüber Radon aus dem Boden hin.

Messung der Gamma-Ortsdosisleistung (ODL)

Mit ODL-Messungen wird das Ziel verfolgt, Materialien mit erhöhten Radium-226-Konzentrationen festzustellen.
Deshalb sollten ODL-Messungen erfolgen:

- in der näheren Umgebung des Gebäudes zur Suche nach Anschüttungen von Material mit erhöhter Konzentration des Radium-226 sowie zur Suche nach ausstreichenden Gängen und Schichten mit erhöhter Radiumkonzentration oder anderen geogen bedingten Radiumanomalien. Achtung: Die Detektionstiefe beträgt nur ca. 30 cm.
- innerhalb des Gebäudes zum Lokalisieren von Bau- und Füllstoffen mit erhöhter Konzentration von Radium-226.

Als primärer Messpunkt sollte die Raummitte in einer Höhe von 1 m oberhalb des Fußbodens gewählt werden. Sekundäre Messpunkte sollten ein repräsentatives Abbild der ODL in 10 cm Entfernung vom Boden, der Decke und den Wandflächen des Raumes liefern. Als Indiz für erhöhte Radiumkonzentrationen im Material können ODL >170 nSv/h gelten.
An Messorten mit anomalen ODL-Werten können die Exhalationsraten gemessen werden oder es sind Materialproben (Putz

PRAXISTIPP

Bei Radonkonzentrationen oberhalb von 1.000 Bq/m³ sind die betreffenden Räume vor der Ausführung der ODL-Messungen intensiv zu lüften.

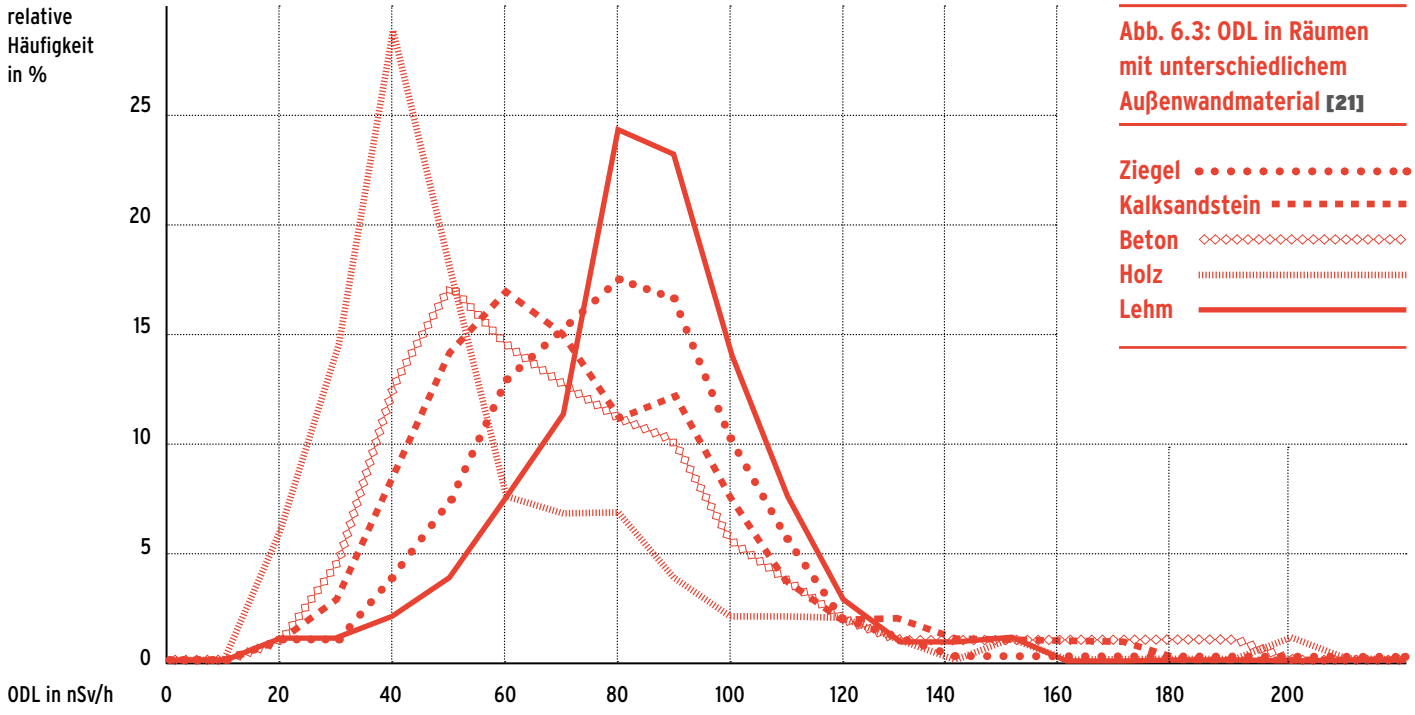


Abb. 6.3: ODL in Räumen mit unterschiedlichem Außenwandmaterial [21]

und darunter liegendes Material getrennt) zur Bestimmung der Radium-226-Konzentration zu entnehmen. Bei nachgewiesenen erhöhten Konzentrationen des Radium-226 sollte die Radonexhalationsrate an dem Probenmaterial untersucht werden.
Zur Orientierung sind in Abb. 6.3 die Häufigkeitsverteilungen der ODL in Räumen mit unterschiedlichem Außenwandmaterial zusammengestellt **[21]**.

Die Nachweisgrenze der ODL-Messungen muss bei <50 nSv/h liegen.
An die ODL-Messgeräte sind folgende Anforderungen zu stellen:

- lineares Ansprechvermögen im Bereich zwischen der unteren Messbereichsgrenze und 500 nSv/h,
- Kalibrierung von einer autorisierten Stelle in einem geeigneten Energiebereich, Verwendung bauartzugelassener Geräte.

Messung des Anstiegs der Radonkonzentration

Durch das Messen des Anstiegs der Radonkonzentration in vorher belüfteten Räumen ist der Radonzustrom in Bq/h bestimmbar. Bei parallelen Messungen in mehreren Räumen können wesentliche Erkenntnisse über die Radonquellen, die Eintrittspfade des Radons in die Gebäude und die Ausbreitungswege des Radons im Gebäude gewonnen werden.

Dazu sollte spätestens 30 Minuten nach Abschluss einer intensiven Belüftung der zu untersuchenden Räume mit Außenluft mit der zeitaufgelösten Messung der Radon-Raumluftkonzentration begonnen werden.

Während der gesamten Messung ist für einen dichten Abschluss des Raumes, insbesondere der Fenster, Türen und anderer Öffnungen zu sorgen. Erforderlichenfalls ist deren Dichtheit durch zusätzlich angebrachte Klebestreifen sicherzustellen.
Die Messungen sollten bis zum deutlichen Abflachen des Anstieges der Konzentration des Radons durchgeführt werden.

Messung der Radonkonzentration in der Bodenluft

Radonmessungen in der Bodenluft empfehlen sich insbesondere bei Feststellung von erhöhten Radonkonzentrationen im Kellergeschoss oder im nicht unterkellerten Hausbereich. Sie können Aufschluss über ein geogen oder anthropogen erhöhtes Radonpotenzial am Gebäudestandort geben.
Die Messpunkte sollten sich jeweils in ca. 1 m Abstand vom Gebäude befinden. Je Gebäudeseite wird mindestens eine aus 1 m Tiefe entnommene Bodenluftprobe analysiert. Bei unbefestigtem Kellerfußboden bietet sich die Entnahme von Bodenluft aus dem darunter gelegenen Bodenbereich an.

Neben der Radonkonzentration sollte auch die Gasdurchlässigkeit (Permeabilität) der betreffenden Bodenschicht beachtet werden. Zur Permeabilitätsbestimmung eignen sich z. B. Messungen an ungestörten Bodenproben, Differenzdruckmessungen (in situ) oder zu einer geeigneten Klassifizierung führende Ingenieursmethoden, z. B. Korngrößenanalysen.

Messungen unter Anwendung eines Spurengasmesssystems mit Einsatz von Indikatorgasen

Eine Ergänzung der zeitaufgelösten Radonmessungen können der Einsatz von Indikatorgasen und sogenannte Spurengasmesssystemen oder von passiven PFT (Polyfluorcarbon-Tracergas)-Methoden sein, die eine quantitative Beschreibung von Austauschvorgängen zwischen Gebäude- und Außenluft und zwischen verschiedenen Räumen in dem betreffenden Gebäude ermöglichen. Durch diese Untersuchungen lassen sich detaillierte Erkenntnisse zur Bestimmung der Ausbreitungswege sowie der Transportströme des Radons gewinnen.

PRAXISTIPP

Die Messungen beginnen zweckmäßigerweise am späten Nachmittag oder gegen Abend, um den üblicherweise nachts vorkommenden Anstieg der Radonkonzentration für eine konservative Beurteilung der Situation zu nutzen.

[21] Lehmann, R.: Strahlenbelastung durch natürliche Radionuklide in Baumaterialien, fossilen Brennstoffen und Düngemitteln, in: Agemar Siehl (Hrsg.), Umweltradioaktivität, Berlin : Ernst, 1996

PRAXISTIPP

Bodenluftmessungen sind generell nicht in gefrorenen oder stark durchnässten Böden auszuführen.

Untersuchungen mit Tracergas erfordern den Einsatz von aufwändigen Gerätesystemen und setzen eine entsprechende Sachkunde bei der Realisierung der Messungen und bei der Interpretation der Ergebnisse voraus.

Der Vergleich der Luftwechselzahl eines Raumes mit der simultan ermittelten Radonkonzentration ermöglicht Aussagen darüber, inwieweit mit einer verstärkten Raumlüftung die Radonkonzentration des Raumes reduziert werden kann bzw. mit welchen Konzentrationserhöhungen des Radon-222 bei einer reduzierten Luftwechselzahl, z. B. nach dem Einbau dichterer Fenster, zu rechnen ist.
Bei zwangsbelüfteten Räumen (z. B. Gewerberäume mit technologisch bzw. arbeitshygienisch erforderlichen Absaug- und Belüftungsanlagen) geben derartige Untersuchungen Aufschluss über die Funktions- und Leistungsfähigkeit der installierten lufttechnischen Anlagen und deren Einfluss auf die sich in Abhängigkeit von ihrer Fahrweise einstellende Radon-Raumluftkonzentration. Die Methodik ist ausführlicher in einer VDI-Publikation **[22]** beschrieben.

Qualitätssicherung

Als Voraussetzung für die Durchführung der Untersuchungen ist eine ausreichende Qualifikation der für diese Arbeiten Verantwortlichen notwendig. Es sind insbesondere Kenntnisse auf den Gebieten Radon und Strahlenschutz sowie praktische Erfahrungen beim Umgang mit der zum Einsatz gelangenden speziellen Messtechnik erforderlich. Grundsätzlich sind die VDI-Richtlinie „Messen von Innenluftverunreinigungen – Allgemeine Aspekte der Messstrategie“ **[23]** sowie die Messungen betreffende Normen, z. B. DIN ISO 11665-8 „Methodik zur Erstbewertung sowie für zusätzliche Untersuchungen in Gebäuden“ **[18]** zu beachten. Die Dokumentation über die Messungen muss neben anderen Angaben enthalten:

- die Gebäudeadresse,
- eine ausführliche Beschreibung (eventuell mit Fotodokumentation) wichtiger, die Ursachen erhöhter Radonkonzentration bestimmender Faktoren, z. B. Unterkellerung, Kellerbeschaffenheit, baulicher Zustand, Durchführung von Ver- und Entsorgungsleitungen, Baumaterial, Verbindung des Kellers mit den darüber liegenden Etagen,
- eine Skizze zur Lage der Messpunkte in den untersuchten Räumen,
- Angaben über relevante meteorologische Parameter (Windgeschwindigkeit und -richtung, Lufttemperatur im Gebäude und im Freien, Luftdruck und seine Tendenz, Niederschlag). Diese können von amtlichen, möglichst nahe gelegenen Messstationen in Erfahrung gebracht oder vor Ort gemessen werden.

Bewertung der Messergebnisse

In der Bewertung der Messergebnisse müssen die Quellen, Eintrittspfade und Ausbreitungswege des Radons so quantifiziert dargestellt werden, dass auf dieser Grundlage die Erstellung eines optimalen Sanierungsprojektes möglich ist. Bei der Bewertung der Ergebnisse von Radon-Kurzzeitmessungen ist zu beachten, dass z. B. der Radon-Eintritt und die Radonausbreitung in den Gebäuden sowie die Konzentrationen des Radons während der Messungen mitunter deutlich vom Jahresmittel abweichen. Es ist ein Vergleich der meteorologischen Momentanwerte mit den typischen Mittelwerten über ein Jahr, die von den Wetterstationen erhältlich sind, zu empfehlen.

Messungen begleitend zu Sanierungsmaßnahmen

Allgemeines

Eine Entscheidung für Maßnahmen zur Verminderung der Radonkonzentration in der Raumluft basiert auf vorangegangenen Messungen. Unter Berücksichtigung der Radonquellen und der Eintrittswege des Radons in die Gebäude sowie seiner Ausbreitungswege in den Häusern wird ein Sanierungsprojekt erstellt.

Sanierungsbegleitende Messungen

Messungen in Begleitung von Sanierungsarbeiten dienen der laufenden Qualitätssicherung und sollten die effiziente Ausführung der Sanierungsmaßnahmen dokumentieren. Hierbei kann es notwendig sein, neben den Radonkonzentrationen auch andere Parameter und Randbedingungen wie z. B. Raumart, Nutzung und Wetter hinreichend genau zu erfassen.

Messungen vor Beginn der Sanierungsarbeiten (Projektierungsphase) zur

- Prüfung der Radondichtheit von Materialien und von baulichen Konstruktionselementen, wie z. B. Türen,
- Prüfung des vollständigen Ausbaus von Material mit erhöhter Radium-226-Konzentration.

Messungen während der Sanierungsarbeiten (Ausführungsphase) dienen der Überprüfung

- der Radondichtheit neu eingebauter Konstruktionselemente,
- der Dichtheit von Radon-Sperrschichten (z. B. Erkennen von Leckagen sowie von unvollständigen Verklebungen oder Verschweißungen mehrerer Abdichtbahnen) bzw. der Wirksamkeit von Injektionen,
- der Radondichtheit von Übergangsbereichen zwischen eingebrachten Sperrschichten und/oder der übrigen Bauwerkskonstruktion,
- der Radondichtheit im Bereich von Boden-, Wand- und Deckendurchdringungen durch Versorgungs-/ Entsorgungsleitungen und andere technische Einrichtungen,
- der Wirksamkeit von lüftungstechnischen Anlagen und der Radondichtheit ihrer Verbindungsstellen.

Messungen nach Abschluss der Sanierungsarbeiten (Bewertungsphase) für

- abschließende Messungen der Radonkonzentration in Räumen zur Bewertung des Sanierungserfolges vor der Projektabnahme.
- Einsatz schneller Messverfahren wie eine Blower-Door-Messung in der Abluft **[23, 24]**.
- Untersuchungen zur Optimierung des Betriebes lüftungstechnischer Systeme.

[22] VDI 4300 Blatt 1 Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Allgemeine Aspekte der Meßstrategie, Dezember 1995

[23] DIN EN 13829 Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden. Differenzdruckverfahren

[24] Maringer, F.; Akis, M.C.; Kaineder, H.; Kindl, P.; Kralik, C.; Lettner, H.; Ringer, W.; Stadtmann, H.; Winkler, R., Ein robustes und schnelles Verfahren zur Abschätzung der langzeitlich mittleren Radonkonzentration in einem Gebäude (erweiterte Blower-Door-Methode). Tagungsband der 30. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz „Radioaktivität und Umwelt“, Lindau am Bodensee, 28.09. – 02.10.1998

7. Radonschutzmaßnahmen

Allgemeine Hinweise

Der Radonschutz bei Neubauten wie bei der Sanierung von bestehenden Gebäuden erfolgt nach den gleichen Grundsätzen und nach ähnlichen Methoden.
Bei Neubauvorhaben können angemessene Schutzmaßnahmen zuverlässig definiert werden, die bei ordentlicher Ausführung durch sachkundige Firmen grundsätzlich zum Erfolg führen. Die Maßnahmen sind technisch und finanziell sicher kalkulierbar. Der Aufwand ist selbst in Gebieten mit hoher Radonkonzentration in der Bodenluft und bei anspruchsvollen Bauvorhaben verhältnismäßig gering.
Bei der Sanierung bestehender Gebäude ist ein Abwägen von alternativen Möglichkeiten unumgänglich und der Sanierungserfolg im ersten Anlauf nicht immer sicher.

Jedes zu sanierende Gebäude erfordert eine auf den Einzelfall bezogene technische Lösung.

Während in einigen Fällen z. B. bereits das regelmäßige Benutzen bestehender Lüftungsöffnungen das Problem lösen kann, erbringt in anderen Fällen sogar der Einbau eines ventilatorbetriebenen Abluftsystems keine ausreichenden Resultate, weil z. B. irgendeine Besonderheit anfangs nicht erkennbar war. Folglich ist der Aufwand nicht in jedem Fall klar absehbar. Besonders bei alten Häusern empfiehlt sich deshalb für den Bauherrn eine dem Gebäudewert gerecht werdende finanzielle Obergrenze für Maßnahmen zur Senkung der Radonkonzentration festzulegen, um unangemessene Kosten zu vermeiden. Jeder Sanierung sollte unbedingt die Erkundung der Ursachen einer erhöhten Radonkonzentration vorangehen (s. ausführlich Kap. 8).

Bei den in den folgenden Abschnitten dargestellten Radonschutzmaßnahmen wird zwischen Neubau und Sanierung unterschieden. Für Neubauten und für die Sanierung bestehender Gebäude können die nachstehenden strategischen Grundregeln eine sachgerechte Festlegung durchzuführender Maßnahmen erleichtern.

1. Ausgangslage erfassen

Jedes Haus besitzt seine individuellen Bedingungen, die ausschlaggebend für die Radonkonzentration sind. Außer auf die verschiedenen möglichen Quellen des Radons ist darauf zu achten, dass sich jedes Haus in einem spezifischen Umfeld befindet (Permeabilität des Baugrundes, Beeinflussung durch Bergbau, Grundwasserstand etc.) und jedes Objekt seine baulichen Besonderheiten aufweist (z. B. Bauzustand, innere Gebäudestruktur, Fundamentausbildung, Gebäudeisolierung etc). Bei bestehenden Häusern sollte die Analyse dieser Faktoren ein den Messungen der Radonkonzentration gleichrangiger Teil bei der Vorbereitung von Schutzmaßnahmen sein.

2. Konzeptionelle Maßnahmen

In der frühen Planungsphase von Bauarbeiten sind wichtige Entscheidungen zu fällen, die beim Neubau aber auch beim Um- und Ausbau bestehender Gebäude das Radonproblem maßgeblich beeinflussen, günstigenfalls sogar lösen können. Dazu gehören z. B. „Architektenlösungen“ wie geeignete Strukturierung der Gebäude, Anordnung von Räumen mit geringer Aufenthaltsdauer im Kellerbereich sowie gezielte Beeinflussung der Luftdruckverhältnisse im Gebäude. Insbesondere in Gebieten mit hohem Radonvorkommen sollten sich Hauseigentümer durch Messungen eine Übersicht über die in ihrem Haus vorhandene Radonkonzentration verschaffen.

3. Bautechnische Maßnahmen

Durch radondichte Baukonstruktionen und Bauelemente bei Neubauten und durch Abdichtungsmaßnahmen bei Sanierungen, z. B. Abdichten von Leitungsführungen aus dem Baugrund oder Abdichtung von Verbindungstüren gegen radonbelastete Räume, kann das Eindringen von Radon und seine Ausbreitung innerhalb des Gebäudes verhindert werden.
Zudem sind die Maßnahmen so zu konzipieren, dass schädliche Kondenswasserbildungen vermieden werden.

4. Lüftungstechnische Maßnahmen

Durch gezielten Aufbau definierter Druckdifferenzen (Unterdruck, Überdruck) kann das Eindringen von Radon in Gebäude reduziert, in Idealfällen unterbunden werden. Z. B. kann mit geeigneten Öffnungen oder Lüftungssystemen die Drucksituation im Gebäude bzw. zwischen Gebäudeinnerem und dem Gebäudeuntergrund in der gewünschten Weise beeinflusst werden. Insbesondere bei Überdruckbetrieb muss darauf geachtet werden, dass bei niedrigen Außentemperaturen keine gebäudeschädigenden Kondenswasserbildungen in bestimmten Hausbereichen, z. B. in den Außenwänden, auftreten.

5. Erfolgskontrolle

Nur durch die Kontrolle und wenn möglich messtechnische Überprüfung der Qualität durchgeführter Arbeiten herrscht Gewissheit, ob die getroffenen Maßnahmen auch tatsächlich wirksam sind. Es ist stets zweckmäßig, bereits vor Abschluss der Gesamtmaßnahme technische Details oder bestimmte Bauabschnitte sorgfältig auf ihre Wirksamkeit hin zu prüfen. Es muss z. B. vermieden werden, dass hinsichtlich ihrer Materialart und Verarbeitbarkeit nicht geeignete oder bereits beschädigte Folien und unzureichend verklebte/verschweißte Folienbahnen ein- und überbaut werden.

Technische Maßnahmen zum Radonschutz haben wie jede Komponente im Haus nur eine beschränkte Lebensdauer und müssen natürlich auch von Zeit zu Zeit gewartet werden, um ihre Funktionsfähigkeit zu erhalten. Auch bei einem Besitzerwechsel sollte der Nachnutzer über die Notwendigkeit des Radonschutzes und die Funktion der Einrichtung informiert werden.

PRAXISTIPP

Sind weiterführende Maßnahmen erforderlich, muss ein Fachberater hinzugezogen werden. Nur wenn professionell saniert wird, kann die Radonkonzentration dauerhaft gesenkt werden. Das zeigen die Erfahrungen im europäischen Ausland.

Ausgangssituation erfassen

Neubauten

Eine Reihe von Rahmenbedingungen und Vorgaben für ein Bauvorhaben beeinflussen auch die Schutzmaßnahmen vor Radon. Prävention ist kostengünstiger und meist erfolgreicher als nachträgliche Sanierung. Werden die folgenden Fragen im Vorfeld der eigentlichen Projektierung abgeklärt, können wirksame und kostenoptimale Lösungen leichter gefunden werden.

Befindet sich das Grundstück in einem Gebiet mit erhöhten Radonkonzentrationen in der Bodenluft?
Auskunft über bekannte Besonderheiten der Radonsituation erteilen die Kommunalverwaltungen. Die Bewertung der Radonsituation kann Teil des Gutachtens zur Baugrunduntersuchung sein. Die verfügbaren Angaben hängen vom Stand der Untersuchungen ab.

Liegt das Baugrundstück in einem Radonvorsorgebiet und sind Hinweise über die durchschnittliche Radonsituation bekannt?
Da aber jeder Baustandort durch seine spezifischen Gegebenheiten von dieser durchschnittlichen Situation abweichen kann und jedes Projekt bauliche Besonderheiten aufweist, ist der Bauherr gut beraten, vor der Planung im Rahmen der Baugrunduntersuchung auch die Radonsituation einschätzen zu lassen. Bei der Überlegung über eine messtechnische Standortuntersuchung sollte vor allem bei Ein- oder Zweifamilienhäusern geprüft werden, ob die damit verbundenen Kosten in einem angemessenen Verhältnis zum Radonschutz stehen. Auf der Grundlage der standortspezifischen Kenntnisse sollte in einem frühen Planungsstadium mit dem Architekten beraten werden, wie sichergestellt werden kann, dass nach der Fertigstellung des Gebäudes der Wert von 100 Bq/m³ Radon in Aufenthaltsbereichen nicht überschritten wird.

Gibt es Radonprobleme in der Nachbarschaft?
Die Situation von Nachbarhäusern kann nicht ohne Weiteres übertragen werden. Man sollte sie jedoch kennen. Sie gibt Hinweise über den erweiterten Standortbereich und erleichtert die Entscheidung über Präventivmaßnahmen gegen Bodenradon durch Vergleich der Baugrundverhältnisse. Ggf. kann dann auf eine spezifische und kostenaufwändige Standorterkundung mittels Messungen verzichtet werden.

Wird die Baugrube aus dem Fels gesprengt oder liegt sie außerhalb der Gebiete mit besonders geringer Radonbelastung in einem Aufschüttungs-, Kies- oder Sandgebiet?
Zerklüfteter oder gasdurchlässiger Baugrund besitzt, soweit es sich nicht um Standorte in Gebieten mit besonders geringer Radonbelastung handelt, ein vergrößertes Risiko des Eindringens von Radon in Gebäude.

Befindet sich das Fundament in dauernd feuchtem oder bindigem Boden?
Eine Baugrube in tiefgründig bindigem Material bietet gute Voraussetzungen für eine geringe Radonkonzentration in Gebäuden. Ausgenommen sind solche Fälle, wo es sich um Zersatz von sauren, magmatischen Gesteinen handelt wie z. B. Granit.

Bestehende Gebäude

Die Sanierung bestehender Gebäude mit erhöhter Radonkonzentration in Innenräumen ist in der Regel schwieriger, das Ergebnis kann ungewiss sein und die Maßnahmen sind meist aufwändiger als eine korrekt durchgeführte Radonprävention bei Neubauten. Bei bestehenden Gebäuden ist die Ausgangslage durch sehr vielfältige Sachverhalte bestimmt, die sich auf Möglichkeiten zur Sanierung unmittelbar auswirken.

Grundsätzlich stellt sich die Frage, in welchen Gebäuden eine erhöhte Wahrscheinlichkeit besteht, dass erhöhte Radonkonzentrationen in Aufenthaltsräumen vorkommen. Eine erhöhte Radonkonzentration in Innenräumen ist sehr häufig in Gebäuden anzutreffen, die in Gebieten mit großen Radonvorkommen liegen.

Messungen der Radonkonzentration in bestehenden Gebäuden werden außerdem auch dann dringend empfohlen, wenn eines der folgenden Kriterien zutrifft:

- Vor 1960 errichtet.
- Nicht über eine durchgehende, bewehrte Fundamentplatte verfügend.
- Nicht oder nur teilweise unterkellerte Aufenthaltsbereiche oder an Aufenthaltsbereiche grenzende Räume.
- Natursteine als wesentliches Konstruktionsmaterial verbaut.
- Feuchteprobleme im erdberührten Bereich
- Im erdberührten Bereich schadhaft (z. B. durch Bergsenkung).
- Durchführungen von Ver- und Entsorgungsleitungen im erdberührten Bereich, die nicht gesondert abgedichtet sind.

Welche Räume im Gebäude sind bevorzugt radonbelastet?
Erhöhte Radonkonzentrationen sind in der Regel ein Problem von Räumen mit Bodenkontakt oder in Bodennähe, also in Kellergeschossen, in nicht unterkellerten Hausbereichen und an Hanglagen. Betroffen sind aber auch Räume über Kellern oder Hohlräumen. Unter besonderen Voraussetzungen, wie etwa bei offenen Treppenhäusern zum Kellergeschoss, sehr durchlässigen Deckenkonstruktionen (z. B. Holzbalken, Tonhohlkörper), Versorgungsschächten oder Leerrohren zwischen den Geschossen, kann wegen des thermischen Auftriebes radonhaltige Luft auch in Obergeschosse transportiert werden.

Sind die Messwerte plausibel, zuverlässig und genügend aussagekräftig und sind weitere Räume vorhanden, die noch ausgemessen werden sollten?
Oft werden Radonmessungen gemäß „Fernanleitung“ durch die Bewohner selbst durchgeführt (Vorbereiten, Platzieren und Einpacken der Detektoren). Dabei sind Fehler nicht auszuschließen. Vor aufwändigen Sanierungsmaßnahmen sollten bereits erfolgte Messungen unbedingt validiert werden. Hierzu gehört die Prüfung der Plausibilität der Messwerte. Dies gilt im Besonderen, wenn in unteren Etagen niedrigere Radonkonzentrationen gemessen wurden als in höheren Etagen des gleichen Hauses. Beim Auftreten erhöhter Radonkonzentration sollten auch Messungen in Räumen erfolgen (vor allem im Keller und Erdgeschoss), in denen bislang keine Untersuchungen durchgeführt wurden.

Wie ist die bauliche Ausgangslage?

Je besser die spezifischen Kenntnisse über bauliche Detailfragen, desto präziser kann die Analyse des Radonproblems erfolgen und umso gezielter und erfolgreicher wird die Radonsanierung sein. Möglichst genaue Informationen über Konstruktion, Materialien, Eintrittswege des Radons in die Räume und Ausbreitungswege innerhalb der Häuser sollten erfasst, überprüft und in einer fachgerechten Baudokumentation festgehalten werden (siehe Checkliste im Anhang).
Eine möglichst umfassende Kenntnis der radonspezifischen Ausgangslage bildet die Grundlage für die Planung von angemessenen Radonschutzmaßnahmen. So können Maßnahmen zur Abdichtung und lüftungstechnische Lösungen vorgesehen werden, die unter den gegebenen Umständen realisierbar und gleichzeitig kostengünstig und wirksam sind.

Welche sonstigen Sanierungsmaßnahmen sind vorgesehen bzw. welche Um-, Aus- oder Anbauabsichten bestehen?

Vor allem für umfangreichere Radonsanierungen sollte ein detaillierter Ablaufplan der Arbeiten (Bauarbeiten und Kontrollmessungen) erstellt werden. Hierbei sollten am Haus vorgesehene Baumaßnahmen konzeptionell berücksichtigt und in der Ausführung möglichst mit der Radonsanierung gekoppelt werden.

PRAXISTIPP

Gebäude, die mit einer kontrollierten Wohnraumlüftung ausgestattet sind, weisen oftmals eine geringe Radonkonzentration auf, da für eine kontinuierliche Außenluftzufuhr gesorgt wird. Wird ein Haus energetisch saniert, sollte man Radon in der Planung der Maßnahmen berücksichtigen. Oftmals werden durch die Maßnahmen zur Energieeinsparung der Luftwechsel mit der Außenluft reduziert, wodurch die Konzentration von Innenraumschadstoffen, darunter auch von Radon, zunimmt. Es existieren Maßnahmen, die eine hohe energetische Effizienz aufweisen und für einen ausreichenden Luftwechsel sorgen.

Konzeptionelle Maßnahmen

Vorausschauende Planung

Im Laufe der Planung und Projektierung von Neubau- und Sanierungsvorhaben werden viele Entscheidungen gefällt, die die Exposition durch Radon erhöhen oder vermindern können. In Radonvorsorgebieten sollte in der Planungsphase bei baulichen sowie heizungs-/lüftungstechnischen Maßnahmen immer hinterfragt werden, wie die anstehende Entscheidung die Radonkonzentration im Haus oder die Radonexposition der Nutzer beeinflussen kann. Jede Strategie, die Aufenthaltsräume vom Erdreich „abzukoppeln", ist hilfreich.
Indem man Möglichkeiten bedenkt, wie der Gebäudekörper gegen das Eindringen von Radon abgedichtet werden kann, wird im Sinne einer vorausschauenden Planung ein wirksamer Schutz vor erhöhter Radonexposition konzipiert.

Beispiele:

- **Verzicht auf den Ausbau von Kellerräumen zu Aufenthaltsräumen in Radonvorsorgebieten**
  Während beim Neubau jedes Radonproblem durch geeignete Prävention vermeidbar ist, kann der nachträgliche Um- oder Ausbau und selbst eine Modernisierung von Kellerräumen in Radonvorsorgebieten, bspw. infolge eines veränderten Heizungs-/Lüftungsregimes oder von neu installierten Ver-/Entsorgungsleitungen und Rohren, die Radonsituation verändern.
- **Angemessene Prävention beim Neubau**
  Es sollte beim Neubau garantiert werden, dass auch in planmäßig nur zu Lagerzwecken genutzten Kellerräumen keine erhöhte Radonkonzentration auftritt. Für den Fall eines späteren Ausbaus als Aufenthaltsräume ist damit grundsätzlich vorgesorgt.
- **Keine offenen Verbindungen zwischen Kellerräumen und Wohnbereichen**
  Bis ins Kellergeschoss offene Treppenhäuser begünstigen die Radonausbreitung im gesamten Haus. Kellerbereiche sollten deshalb in Radonvorsorgebieten mindestens durch eine dichte Tür von der Wohnung abgetrennt sein. Noch besser ist ein separater Kellerzugang von außen.

PRAXISTIPP

Übrigens: Die Qualität von Obst, Gemüse, Getränken etc. wird durch deren Lagerung in radonbelasteten Räumen nicht beeinflusst. Ist eine Nutzung als Hobbyraum mit nur zeitweiligem Aufenthalt vorgesehen, kann in vielen Fällen bereits durch gezieltes Lüften des Raumes die Radonkonzentration während der Aufenthaltszeit auf ein niedriges Niveau gebracht werden.

- **Raumnutzung und Radonkonzentration aufeinander abstimmen**
  Oft unterscheiden sich die Raumnutzungen durch deutlich unterschiedliche Aufenthaltszeiten. Da die Radonexposition neben der Konzentration durch die Aufenthaltszeit der Personen bestimmt wird, sollten Räume mit erhöhter Radonkonzentration für Nutzungen mit geringerer Aufenthaltsdauer konzipiert werden (siehe oben und nicht als Wohn-, Schlaf- oder Kinderzimmer), z. B. als Abstell- und Lagerraum. Dies sollte besonders bei der Nutzung des Kellerbereiches bedacht werden.

Wärmeschutz, Heizung und Lüftung

Zu den zentralen Aufgaben eines Gebäudes gehört es, Schutz vor Kälte und Zugluft in den Aufenthaltsräumen zu bieten. Wie oben verdeutlicht wurde, besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Radonkonzentration und der Austauschrate zwischen der Gebäudeinnenluft mit der Außenluft sowie der pro Zeiteinheit in das Gebäude eintretenden Radonaktivität. Beide Parameter werden wesentlich durch das Heizungs-/Lüftungssystem im Gebäude bestimmt. In Radonvorsorgebieten sollte in der Planungsphase bei allen sich auf das Heizungs-/Lüftungsregime auswirkenden Maßnahmen (z. B. zur Energieeinsparung) hinterfragt werden, wie diese die Radonkonzentration im Haus beeinflussen können. Vor allem sind die Auswirkungen auf die Druckverteilung im Haus zu beachten. Auch energetische Sanierungen verändern oft die Austauschrate zwischen der Gebäudeinnenluft mit der Außenluft. Deshalb sind bei deren Planung mögliche Auswirkungen auf die künftige Radonsituation im Gebäude zu berücksichtigen und ggf. zusätzliche Maßnahmen vorzusehen.

Leitungsführungen

Jede Durchdringung der Bauteile zum Erdreich hin stellt eine potentielle Eintrittsstelle für Radon dar, egal ob die Leitungen starr eingegossen oder dauerelastisch abgedichtet werden.
Wasser- und Gasleitungen, Ölleitungen von erdverlegten Tanks etc. sollten, wenn möglich, durch die Wände und nicht durch den Boden zugeführt werden. Dasselbe gilt grundsätzlich auch für kleinere Leitungsdurchführungen wie Elektro- oder Antennenkabel. Oft verlaufen gerade diese Kabeldurchführungen in Leerrohren, die nicht versiegelt wurden. Bei seitlichen Leitungsdurchführungen besteht meist eine Belüftung von oben (Kies-Hinterfüllung, Sickerplatten). Eine Durchführung durch die Wand anstatt durch den Boden ist jedoch kein Ersatz für eine gute Abdichtung.
Die Abwasserleitungen sollten den Kellerboden an möglichst wenigen Stellen durchstoßen. Die einzelnen Stränge sollten deshalb oberhalb des Kellerbodens zusammengeführt werden. Die Auffüllungen der Aushubkanäle für die Ver- und Entsorgungsleitungen im Erdreich erschließen ein großes Bodenvolumen und stellen ein Radon-Sammelsystem dar. Das Kanalisationsprojekt sollte deshalb möglichst wenige, unverzweigte Kanalisationsleitungen im Erdreich vorsehen. Erdsonden für Wärmepumpen bilden Radonsammelschächte erster Güte. Sie sollten nicht unter, sondern deutlich neben dem Gebäude angeordnet werden. Rohrzuführungen ins Gebäude können dann relativ einfach abgedichtet und Bodenradon bereits außerhalb des Gebäudes abgeführt werden. Bei der Anwendung von Erdwärmetauschern im saugenden Betrieb muss darauf geachtet werden, dass kein Bodenradon in die Häuser eingetragen wird.

Natürliche Unterlüftung

Die Luft in den oberen Bereichen des Erdbodens steht in Abhängigkeit von der Luftdurchlässigkeit des Bodens in ständigem Austausch mit der freien Atmosphäre. Es lohnt sich, diesen natürlichen Austausch zu nutzen, indem die luftdurchlässige, kapillarbrechende Schicht unter der Fundamentplatte gezielt mit der ebenfalls gut durchlässigen Seitenhinterfüllung verbunden wird. Auf diese Weise kann die Radonkonzentration in der Bodenluft unter dem Gebäude verringert werden.

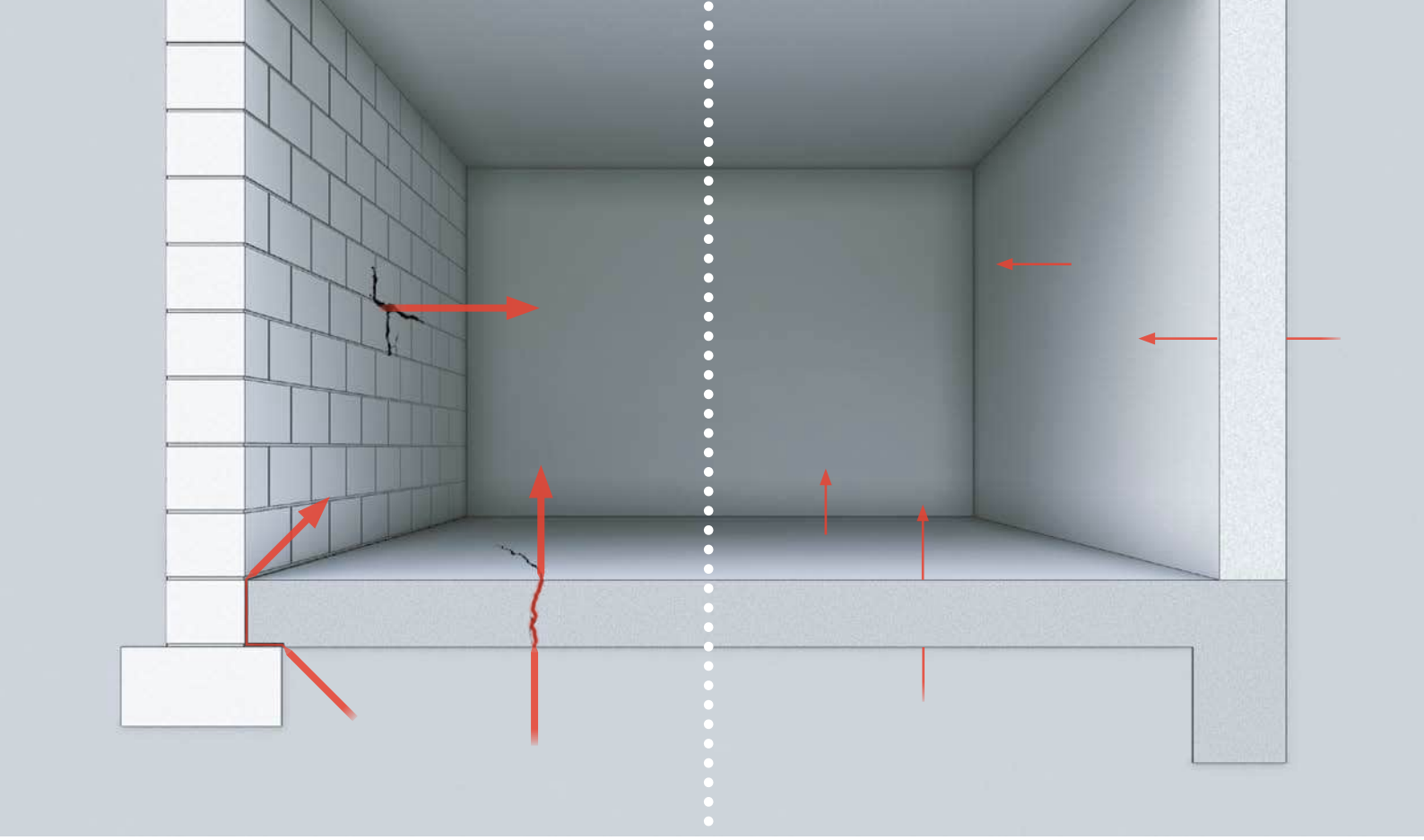


Abb. 7.1:
Eindringen von radonhaltiger Bodenluft durch Leckstellen (links) und Diffusion von Radon durch Bauteile hindurch (rechts)

Bautechnische Maßnahmen – Abdichtung gegen Radonzufuhr

Um die Gebäude vor Radon aus dem Erdreich zu schützen, sollte man sich vor der Projektierung konkreter Maßnahmen ein klares Bild davon machen, wo die Dichtungsschicht verlaufen soll. Wie beim Schutz gegen Bodenfeuchte muss auch der Radonschutz eine geschlossene „Gebäudeumhüllung“ gegen das Erdreich bilden.

Konvektion oder Diffusion?

Radon kann auf zwei Arten aus dem Baugrund in das Gebäude gelangen:

- als Bestandteil von Bodenluft, die in Folge von Unterdruck im Gebäude gegenüber dem Boden konvektiv durch Leckstellen oder Öffnungen in den erdberührenden Bauteilen eindringt,
- indem es auf Grund eines Konzentrationsgefälles durch Boden und Wände diffundiert. Die Radongasdiffusion ist prinzipiell vergleichbar mit der im Bauwesen bekannten Wasserdampfdiffusion. Die Ausbreitung erfolgt in beiden Fällen in Richtung der niedrigeren Konzentrationen (Abb. 7.1).

Die Gasdurchlässigkeit eines Materials ist abhängig von dessen Struktur und den Eigenschaften des jeweiligen Gases. Edelgase wie Radon diffundieren als Einzelatome besonders gut durch poröse Stoffe. Völlig radondicht sind dagegen nur wenige Materialien, z. B. Metalle und Glas, die jedoch zur Hausabdichtung ungeeignet sind. Grundsätzlich empfehlen sich Mehrschichtgasbarrieren. Bei der Beurteilung der Dichtigkeit von Materialien gegenüber Radon ist die Halbwertszeit des Radons von 3,8 Tagen zu berücksichtigen. Wenn z. B. die durchschnittliche Diffusionszeit von Radonatomen durch ein Bauteil mehrere Halbwertszeiten beträgt, findet der radioaktive Zerfall hauptsächlich innerhalb dieses Bauteils statt. Die entstehenden Zerfallsprodukte des Radons sind nicht mehr gasförmig und bleiben im Bauteil gebunden, gelangen also nicht in die Raumluft und sind somit unschädlich.
Der Begriff “radondicht” ist nicht verbindlich festgelegt. Ein mittlerweile akzeptierter Vorschlag lautet, ein Material als radondicht zu bezeichnen, wenn die Materialdicke mindestens das Dreifache der Diffusionslänge beträgt **[25]**.

[25] Keller, G.; Hoffmann, B.; Feigenspan, Th.: „Radon permeability and radon exhalation of building materials“, Science of the total environment 272(1-3), pp. 85-89 (2001), doi: 10.1016/S0048-9697(01)00669-6

Es sind Folien und Abdichtungsbahnen auf unterschiedlicher Materialbasis im Handel erhältlich, die nach dieser Definition radondicht sind (siehe Tabelle 7.1). Die Radondichtigkeit ist natürlich nicht mehr gegeben, wenn eine Dichtungsbahn oder Beschichtung Risse aufweist, an Wänden nicht dicht angeschlossen ist oder Überlappungen benachbarter Bahnen nicht gasdicht verklebt oder verschweißt wurden. In dieser Hinsicht bestehen besonders bei relativ spröden oder mit der Zeit versprödenden Beschichtungen große Vorbehalte.

Für beträchtlich erhöhte Radonkonzentrationen in Gebäuden ist vor allem der konvektive Radontransport durch Undichtigkeiten des Bauwerks gegenüber dem Baugrund von Bedeutung. Wichtig ist deshalb die Unterbindung der Radonausbreitung durch Leckagen.

Radon-Leckstellen

Ob radonhaltige Bodenluft ins Haus eindringen kann hängt davon ab, wie fugen- und rissfrei die erdberührenden Bauteile und Beschichtungen sind. Bereits kleine Leckageflächen in der Größenordnung von 1 cm^2 im Kellerfußboden können bei hohen Radonkonzentrationen in der Bodenluft zu erhöhten Radonwerten im Keller führen. Dieser Effekt kommt durch die relativ hohe Aktivität des Radongases zustande, wodurch bereits kleine Radongasvolumina eine verhältnismäßig hohe Radioaktivitätskonzentration nach sich ziehen können.

Zahlreiche Undichtigkeiten ermöglichen den Zutritt von Radon:

- Risse und Fugen in Böden und Wänden
- Durchführungen von Kabeln, Leitungen und Leerrohren
- Abwasserrohre
- Bodenschächte und Kontrollöffnungen
- Licht- und andere Schächte an Wänden im erdberührten Bereich
- Kamine
- Keller mit Naturböden wie Erde, Kies, Bruchstein
- durchlässige Konstruktionen (Holzbalkendecken und Tonhohlkörperdecken, Deckenplatten)

FACHINFORMATION

Die bisherigen Erfahrungen haben gezeigt, dass bei Sanierungen der Erfolg von Dichtungsmaßnahmen mit einer erheblichen Unsicherheit belastet ist. Abdichtungsmaßnahmen müssen deshalb gewissenhaft konzipiert und mit ganz besonderer Sorgfalt ausgeführt werden. Z. T. sind sie erst in Kombination mit lüftungstechnischen Maßnahmen effektiv. Häufig kann jedoch schon das gasdichte Verschließen offensichtlicher Undichtigkeiten, das eine vergleichsweise kostengünstige Maßnahme darstellt, das Radonproblem lösen oder zumindest deutlich abmindern.

Abdichtungsvarianten

Die Abdichtung von bestehenden Gebäuden ebenso wie die radondichte Erstellung von Neubauten sollte immer eine Mehrfachstrategie umfassen, um den unterschiedlichen Leckagearten, die an jedem Gebäude vorkommen oder neu entstehen können, zu begegnen. Folgende Maßnahmen bieten sich an:

- Absperren des Erdreichs mit Dichtungsbahnen
- Dichtungsbahnen und Anstrichdichtungen in und an Bauteilen
- Dichten von Fugen, Rissen, Löchern und Durchbrüchen
- Dichten von Öffnungen (Türen, Fenstern, Klappen, Deckel etc.)

Die in den folgenden Abschnitten gezeigten Konstruktionen sollen einen Überblick über die baukonstruktiven und bautechnischen Ansätze geben. Die Palette der Möglichkeiten ist in diesem Bereich sehr breit. Stets sollte sorgfältig geprüft werden, welche Lösungen der vorliegenden Radonproblematik am besten gerecht werden. Weil Radon farb- und geruchlos ist und Schäden oder nachlassende Dichtigkeit nicht wie bei Feuchte an den Oberflächen des Baumaterials ersichtlich werden, sondern nur durch weitere Messungen nachgewiesen werden können, sollte besonders auf Qualität und Dauerhaftigkeit geachtet werden. Dichtungsbahnen und Beschichtungen müssen bspw. ihren Dienst über viele Jahrzehnte leisten. Sie dürfen weder verrotten, verspröden noch weggequetscht oder im Bauablauf bzw. der Gebäudenutzung beschädigt werden **[26]**.

Tabelle 7.1: Radondiffusivität von Baumaterialien – in unbeschädigtem, rissfreiem Zustand [25]

	radondicht	nicht radondicht
PEHD (1 mm)	Dichtungsbahnen	
PVC legiert (1 mm)	Dichtungsbahnen	
Polymerbitumen (5 mm)	Dichtungsbahnen	
Kunstharzlack (0,2 mm)	Anstriche, Beschichtungen	
Epoxydharz (3 mm)	Anstriche, Beschichtungen	
Normalbeton (100 mm)	Baumaterialien	
Kalksandstein (150 mm)	Baumaterialien	
Gips (100 mm)	Baumaterialien	
Mauerziegel (150 mm)	Baumaterialien	

[26] Normenausschuss Bauwesen im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Bauwerksabdichtungen. DIN 18195, 2011-12

Flächenhafte Abdichtungsmaßnahmen

Für die Zielsetzung, den Eintritt von Radon zuverlässig und dauerhaft zu unterbinden oder wenigstens nur in geringem Maße zuzulassen, versprechen flächendeckende Abdichtungsmaßnahmen gute Erfolgsaussichten.

Absperren des Erdreiches mit Dichtungsbahnen (bei Neubauten)

Das Verlegen von Dichtungsbahnen in Baugruben unterhalb des Fundamentes ist eine bekannte Technik zur Prävention gegen Feuchteschäden, aber auch zum Schutz vor eindringenden Gasen, z. B. bei Bauten über Deponien. Diese Technik kann auch gegen das Eindringen von Radongas angewendet werden. Bauteile, die wasserdicht ausgeführt werden, sind meist auch gleichzeitig weitgehend radondicht. In Baugebieten mit hoch liegendem Grund- oder Schichtwasserspiegel ist deshalb der notwendige Feuchteschutz auch ein guter Radonschutz.

Das Verlegen von Dichtungsbahnen in Baugruben unterhalb des Fundamentes ist eine bekannte Technik zur Prävention gegen Feuchteschäden, aber auch zum Schutz vor eindringenden Gasen wie Radon.

Der Einsatz von großflächig und gasdicht verlegten Dichtungsbahnen außenseitig an Gebäuden ist angemessen, wenn sich das Bauvorhaben in einem Radonvorsorgebiet befindet bzw. der erdberührte Bereich nicht als „weiße Wanne“ erstellt wird. Die Lösungen umfassen nicht nur flächige Abdichtungen, sondern auch Spezialbauteile und Konstruktionen für dichte Rohrdurchführungen, Dehnungsfugen etc.

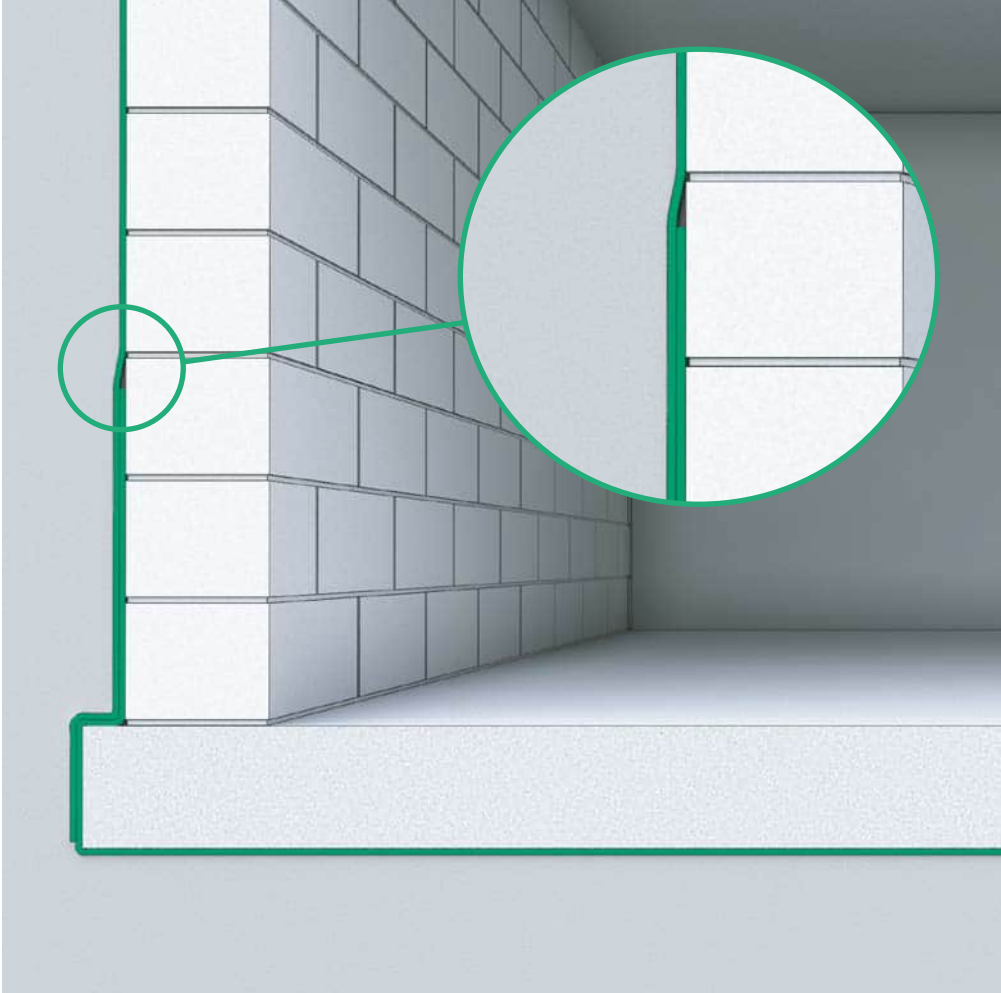


Abb. 7.2:
Außenseitige Abdichtung mit Dichtungsbahnen unter der Fundamentplatte (Neubauten)

Außerhalb von Radonvorsorgebieten bieten durchgängig armierte Betonkonstruktionen und Abdichtungen, wie sie in erdberührten Bereichen gegen von außen angreifende Bodenfeuchte angewendet werden, z. B. nach DIN 18195-4 Bauwerksabdichtungen, Ausgabe 2011-12, genügend Sicherheit vor Radon aus dem Baugrund. Abdichtungen im Bereich der Baugrube können mittels kunststoffmodifizierter Polymerbitumen-Dichtungsbahnen oder mittels Kunststoff-Dichtungsbahnen erfolgen. Zur Planung und Ausführung von Abdichtungen mit Dichtungsbahnen ist das Einbeziehen von Experten notwendig.

PRAXISTIPP

Bauprodukte, die dem Feuchtigkeitsschutz von Bauteilen/Bauwerken dienen, sind gemäß Bauproduktengesetz bauaufsichtlich relevant. Gemäß Bauregelliste A des Deutschen Instituts für Bautechnik sind für Abdichtmaterialien im erdberührten Bereich Verwendbarkeits- bzw. Übereinstimmungsnachweise erforderlich.

Außenseitige Abdichtung mit Dichtungsbahnen

Eine Folie wird in der Baugrube verlegt und nach Erstellung des Untergeschosses an den Wänden hochgeführt (Abb. 7.2). Sickerpackung und -leitung befinden sich außerhalb der Abdichtung. Es muss sorgfältig mit dem Anbieter der Dichtungsbahnen und den Verarbeitern abgesprochen werden, welcher Verlegegrund (Feinplanierung, Sand, Magerbetonsohle mit Trennlagen etc.) erforderlich ist und welche Belastungsdifferenzen zulässig sind. In Radonvorsorgebieten sind Fundamentplatten den Streifen- oder Einzelfundamenten vorzuziehen. Generell ist darauf zu achten, dass die Dichtungsbahnen nicht beschädigt werden, indem scharfkantige Abwinkelungen vermieden werden.

Perimeterdämmung
Die außenseitige Wärmedämmung im Erdreich ist eine bewährte Konstruktion für einen lückenlosen Wärmeschutz. Das Untergeschoss kann dabei als beheizter Raum oder als unbeheizter, aber warmseitiger Pufferraum konzipiert werden. Die üblichen Konstruktionen, die Fundamentplatte auf entsprechend druckfestes Dämmmaterial (Schaumglas oder extrudiertes Polystyrol) zu betonieren, schaffen noch keine überall ausreichende Radondichtigkeit. In Radonverdachtsgebieten sollte zusätzlich eine Folie verlegt und seitlich sorgfältig auf die Deckschicht der Perimeterdämmung der Außenwand geklebt werden.

Raumseitige Flächenabdichtung
Zur Sanierung bestehender Bauten können flächige Abdichtungen oft nur raumseitig angebracht werden (Abb. 7.3). Im Normalfall führt die raumseitige Abdichtung allerdings zu einem wesentlich größeren Anteil an Anschlüssen und Nahtstellen, die erhöhte Undichtigkeitsrisiken bergen, wie etwa Innenwände, Treppenaufgänge etc. Bei Neubauten sollten deshalb Konstruktionen mit raumseitiger Abdichtung vermieden werden.

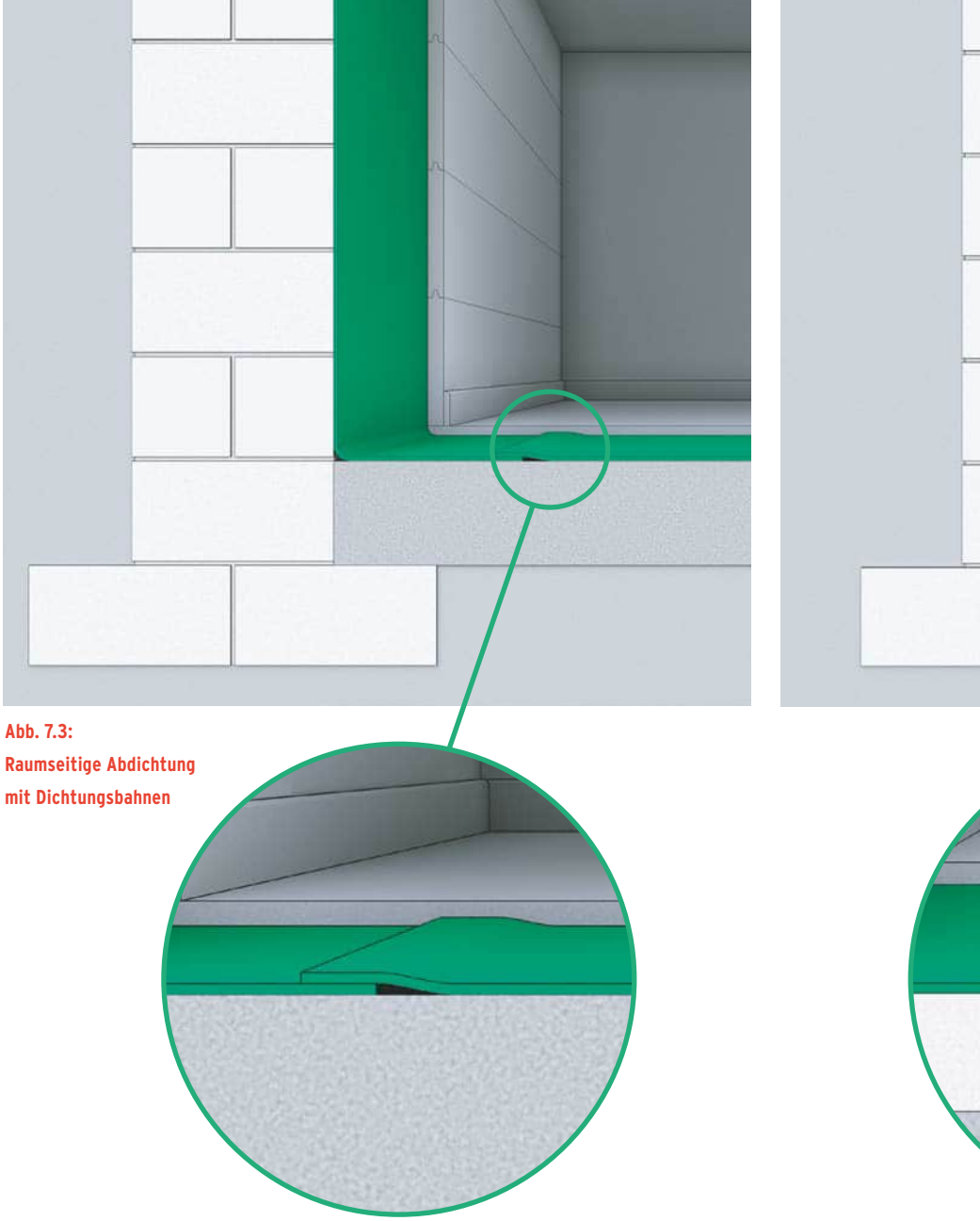


Abb. 7.3:
Raumseitige Abdichtung mit Dichtungsbahnen

Auch bei Innenabdichtungen gilt grundsätzlich: Geeignet ist, was auch für Feuchteschutz taugt.

Spröde Dichtungsschlämme können keine Bewegungsrisse überbrücken und Dichtungsbahnen wirken nur, wenn sie sauber und lückenlos verklebt oder verschweißt sind. Umgekehrt gibt es raumseitige Radonsanierungsmöglichkeiten, die nicht vom Feuchteschutz inspiriert zu sein brauchen. Bei Bauteilen, die gegen das Erdreich wärmegedämmt sind, kann die Dampfsperre auch den Radonschutz übernehmen.
Eine funktionsfähige Radonsperrschicht aus feuchtebeständigem Material erfüllt in jedem Fall auch die Anforderungen an die bautechnisch geforderten Sperrschichten gegen Bodenfeuchte.

Feuchteschutz-Dichtungsbahnen als Radonschutz
Es gibt verschiedene Konstruktionen und Systeme mit Dichtungsbahnen, die zum Schutz vor eindringender Feuchte verlegt werden. Sie sind meist geeignet, auch den Radonzutritt zu blockieren. Dieselben Eigenschaften, die für eine gute Tauglichkeit gegen eindringende Feuchtigkeit gefordert sind, sind in verstärktem Maß für den Radonschutz nötig: sauberes Abkleben entlang der Nahtstellen, fugenlos verklebte oder verschweißte Dichtungsbahnen und sorgfältige Ausführung der Anschlüsse an Bauteile, Leitungen. Dichtungsbahnen müssen raumseitig verkleidet werden. Dabei ist zu beachten, dass die Dichtungsbahnen nicht unsachgemäß durch Befestigungsmittel der Verkleidung verletzt werden. Zudem muss auf einen sauber abgeklebten Anschluss an der Kellerdecke geachtet werden, was vor allem bei Leichtkonstruktionen (Holzbalkendecken) aufwändig und unsicher sein kann.

Dampfsperren
Bei Bauteilen, die gegen das Erdreich wärmegedämmt sind, ist warmseitig der Dämmschicht eine Dampfsperre oder eine in ausreichendem Maße dampfbremsende Schicht nötig, damit in der Konstruktion kein Kondensat anfällt. Dampfdichte oder stark dampfbremsende Bauteilschichten (äquivalente Luftschichtdicke von mehr als 10 m) sind auch eine ausreichende Radonsperre, obwohl die Ausbreitungseigenschaften des Radons und Dampfes in Materialien nicht identisch sind (Abb. 7.4). Für die Radondichtigkeit ist die leckagedichte Montage der Dampfsperre von noch größerer Bedeutung als für den Wasserdampf.

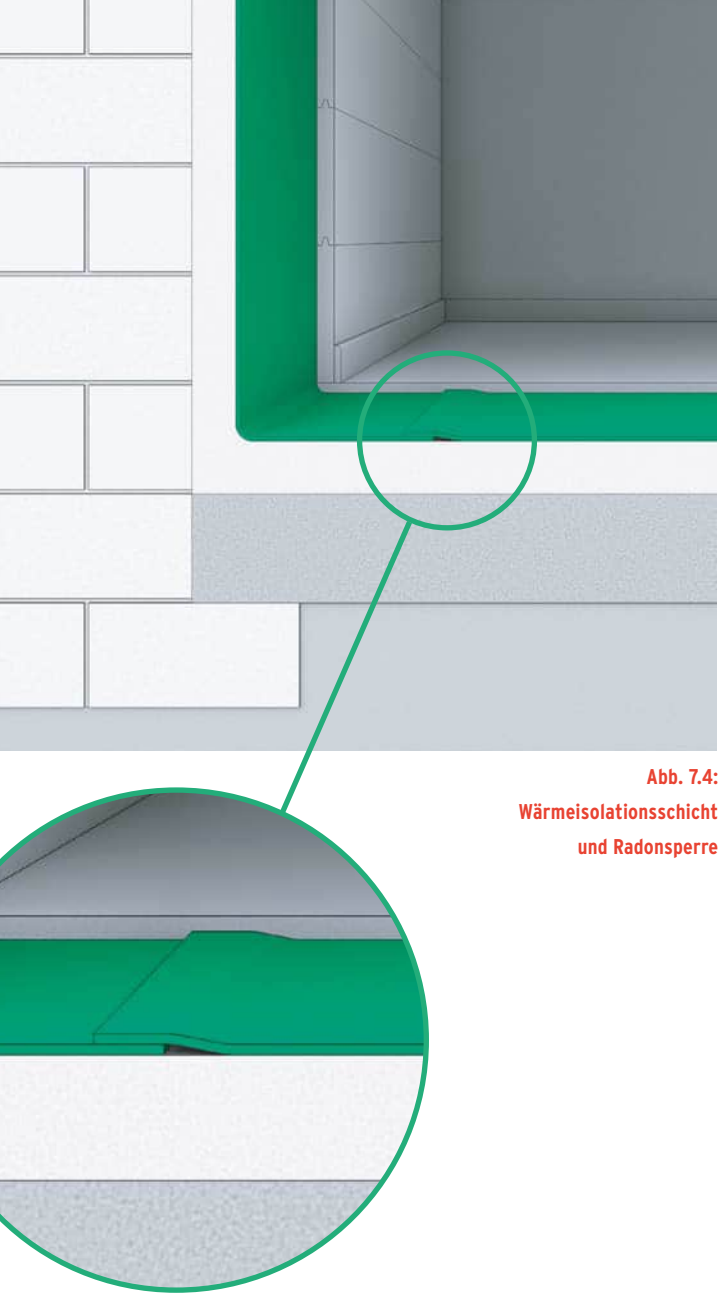


Abb. 7.4: Wärmeisolationsschicht und Radonsperre

Abb. 7.5: Beschichtungen mit Dichtungsschlämmen und Anstrichen

Beschichtungen, Anstriche

Gegen eindringende Feuchtigkeit werden oft flüssige oder plastische Beschichtungen, z. B. kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtungen eingesetzt. Sie wirken auch als Radonbremse, solange sie rissfrei und unverletzt bleiben (Abb. 7.5). Generell müssen die entsprechenden Voraussetzungen gegeben sein und Verwendungsvorschriften eingehalten werden, wie z. B. geeignete Grundierung des Mauerwerkes. Schutzschichten müssen die Abdichtmassen vor Beschädigung schützen. Als unterstützende Maßnahmen kommen dichte Innenverkleidungen, bspw. Fliesen, Dichtungstapeten auf der Grundlage von Alufolie oder gasbremsende Anstrichsysteme, wie Chlorkautschuklack in Frage.

Die Kontrolle der Dichtigkeit von Beschichtungen ist schwierig. Undichtigkeiten sind oft so klein und unscheinbar, dass sie nicht augenscheinlich sind, sondern lediglich durch eine erhöhte Radonkonzentration oder einen erneut raschen Anstieg der Radonkonzentration nach dem intensiven Lüften des Raumes zu vermuten sind. Zur Ortung dieser Undichtigkeiten gibt es spezielle Messmethoden, z. B. Radon-Sniffing oder das Messen der Radon-Exhalationsrate.

Deckenkonstruktionen gegen Aufenthaltsräume

Wenn die Radonbelastung in den Kellerräumen nur in unbefriedigendem Maße abgesenkt werden kann, muss für eine gasdichte Trennung zum Wohnbereich gesorgt werden. Die Kellerdecke unter den Aufenthaltsräumen und die aufsteigenden Wände müssen dicht ausgeführt werden. Stahlbetondecken können in der Fläche als genügend radondicht betrachtet werden. Bei alten Massivdecken aber auch Decken aus einzelnen Betonplatten kann nicht ausgeschlossen werden, dass Ausbreitungspfade über Fugen oder die Auflage im Mauerwerk vorhanden sind, die lokal abgedichtet werden müssen. Bei Leichtbaudecken (Balkendecken) sollte genau untersucht werden, welche Schicht die Luft- bzw. Radonsperrung übernimmt und ob diese an allen Anschluss- und Nahtstellen dicht ist.

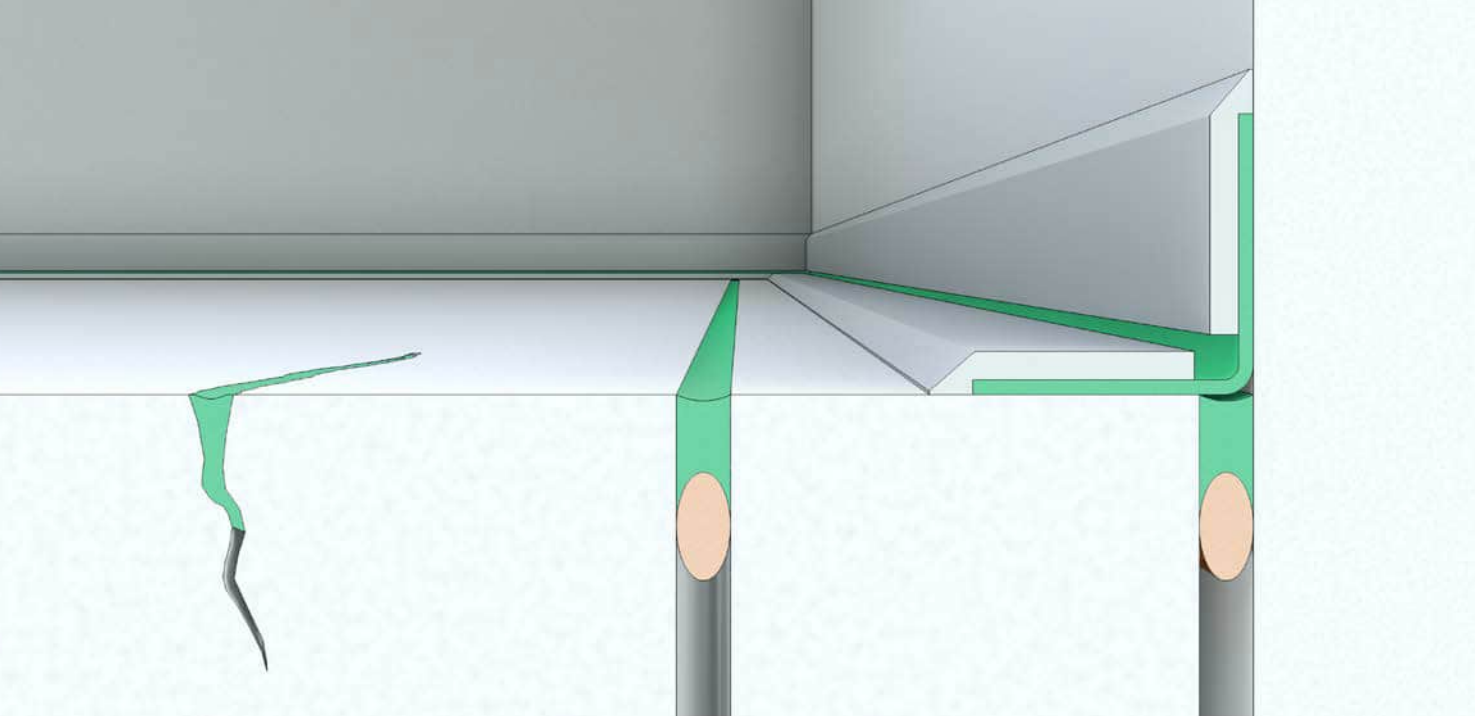


Abb. 7.6:
Überbrücken von Dehnungsfugen

Abdichten von Durchführungen, Löchern und Rissen

Die Abdichtung von Böden, Decken und Wänden ist nur wirksam, wenn die Vielzahl von Öffnungen, gewollte und ungewollte, fachgerecht abgedichtet ist. Im Folgenden werden Hinweise zu den unterschiedlichen Dichtungsmöglichkeiten gegeben, soweit sie allgemein gültig oder von besonderer Relevanz für den Radonschutz sind. Es gibt eine große Fülle unterschiedlicher Dichtungsmaterialien, deren Materialqualität und Lebensdauer ebenso beachtet werden sollte wie ihre fachgerechte Verwendung (Abb. 7.6).

Abb. 7.7:
Abdichten eines Bodenablaufs

Dauerelastische Kittmassen

Dauerelastische Kitte sind geeignet, Ritzen, Fugen (bspw. Anschlüsse von Rohrdurchführungen) und kleine Löcher abzudichten, selbst wenn sie in geringem Maße Bewegungen aufweisen (z. B. Temperaturdehnungen, Abb. 7.7). Je nach Situation werden verschiedene dauerelastische Materialien eingesetzt (Silikon, Acryl, Polysulfid etc.). Beim Einbau sind die Fugenflanken zu reinigen und eventuell zu erweitern, um eine bleibende Haftung zu erreichen. Es kann vorkommen, dass die Fugentiefe hinterfüllt werden muss, um eine optimale Fugendimension zu modellieren. Je nach Ausgangslage und Material sind weitere Vorarbeiten an der Fuge notwendig (Randmodellierung, Haftgrund-Voranstrich etc.). Wenn die Anwendung entsprechend fachgerecht und sorgfältig erfolgt, können Undichtheiten von geübten Heimwerkern selbst behoben werden.

Elastische Fugen- und Klebebänder

Besonders für die gasdichte Verbindung von Bauteilen, etwa von Dichtungsbahnen an Decken oder von Bodenbelägen zu Wandverkleidungsplatten, aber auch für die Überbrückung von Dehnungsfugen, sind elastische Fugen- und Klebebänder geeignet (Abb. 7.8). Einseitig selbstklebende Bänder sind in der Regel nicht für eine dauerhafte gasdichte Verbindung geeignet. Doppelseitige Klebebänder, z. B. Butylklebstreifen, sollten, wenn möglich, auf der Klebestelle mechanisch verpresst werden. So kann etwa die Verklebung von zwei Polyäthylen-Dichtungsbahnen mit Butylklebeband unter eine Lattung verlegt werden, welche die Verklebung dauerhaft anpresst. Klebebänder sollten auf keinen Fall Zugbelastungen ausgesetzt werden, nicht einmal durch das Eigengewicht der Folie. Sehr leistungsfähig sind die in verschiedenen Materialien und Qualitäten angebotenen Fugendichtungsbänder, die mit flüssigen oder plastischen Klebern auf die zu verbindenden Bauteile aufgeklebt werden.

Leitungsdurchführung in Leerrohren

Rohr- und Kabeldurchführungen können durch Rohrhülsen erfolgen, welche mit der Dichtungsfolie durch Verschweißen oder Verkleben verbunden werden. Das Leerrohr mit den Kabeln bzw. Leitungen ist mit dauerelastischem Dichtungsmaterial zu verpressen. Für die Durchführung von Leitungen durch Außenwände ist die Verwendung handelsüblicher, gasundurchlässiger Dichtungselemente zu empfehlen (Abb. 7.9).

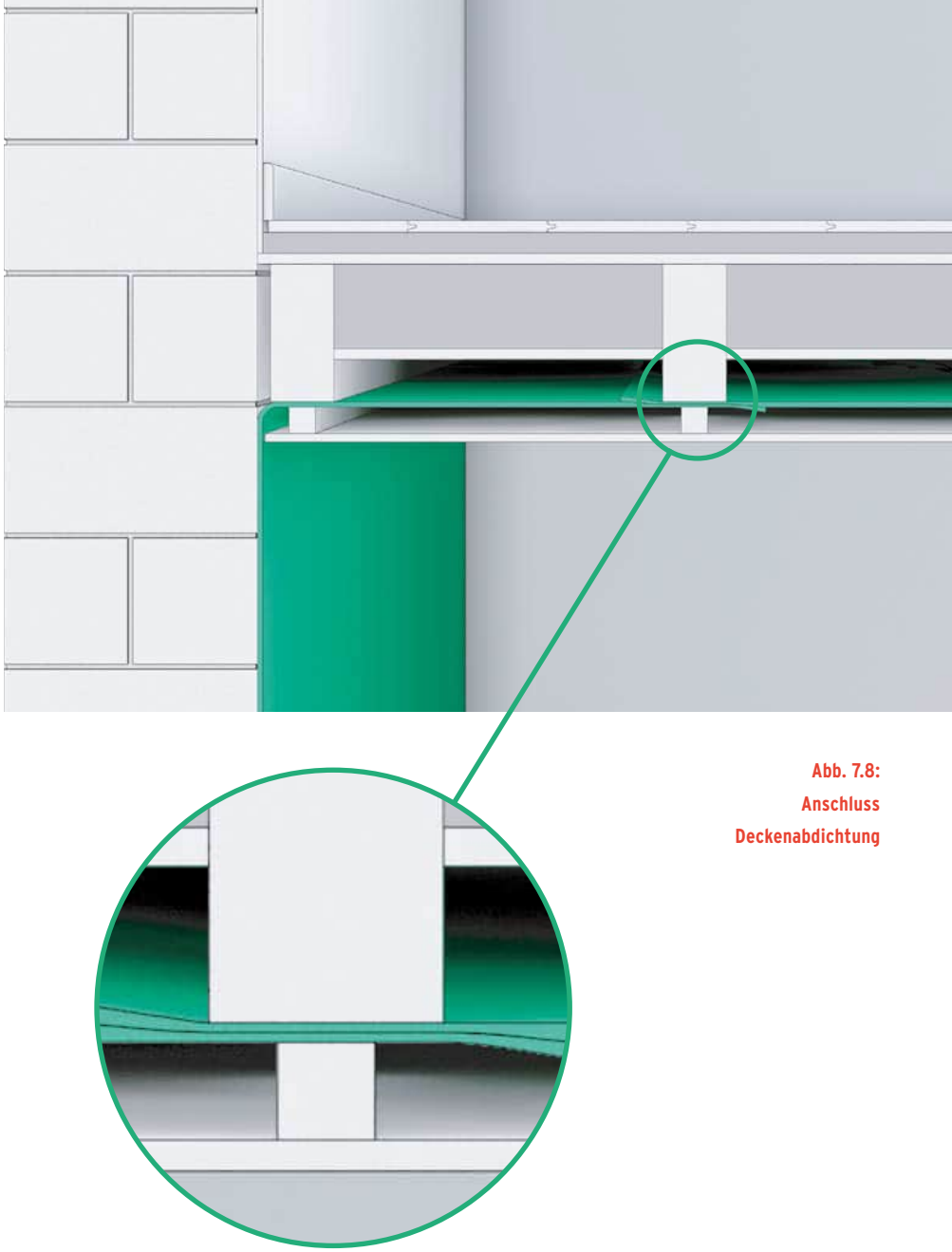
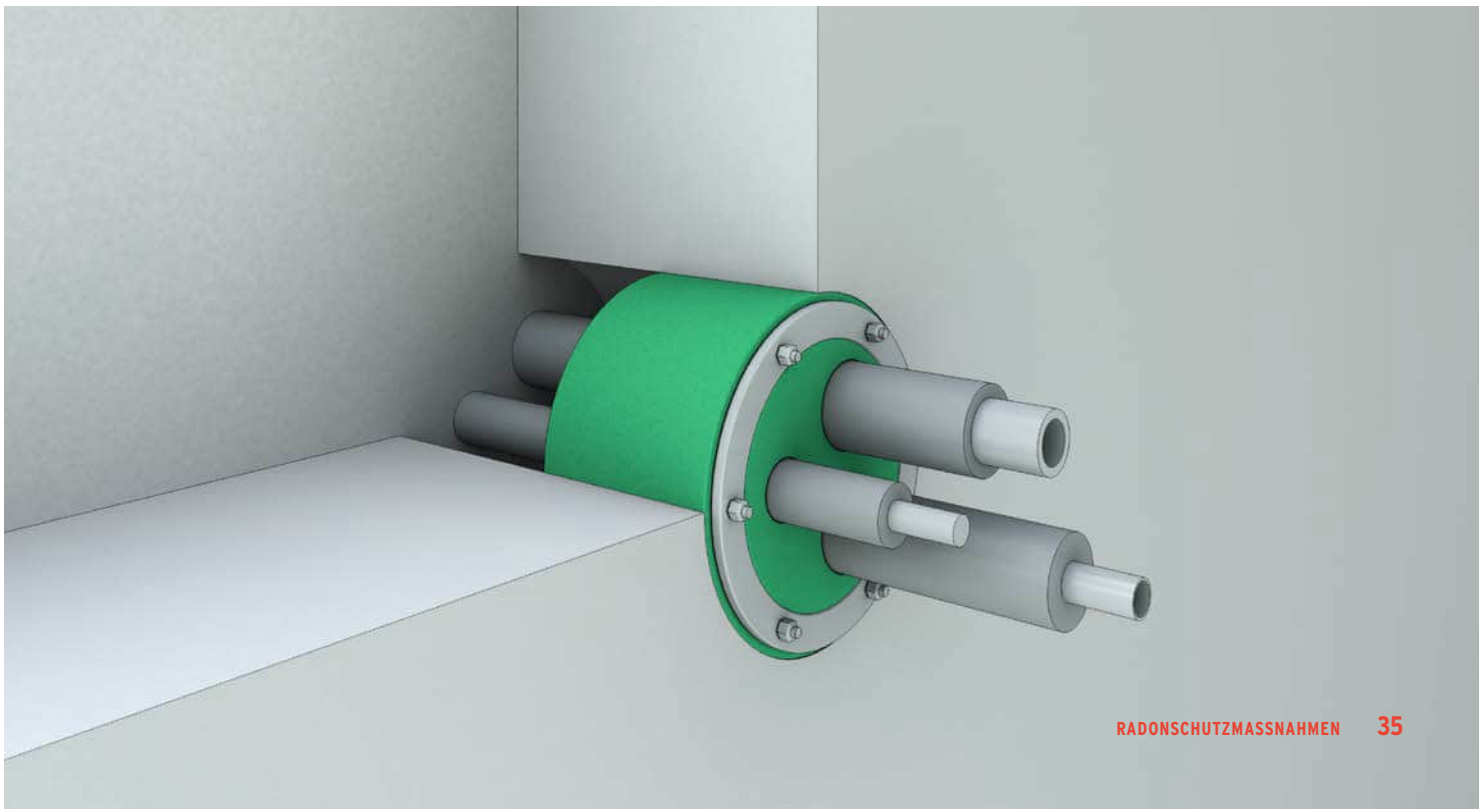


Abb. 7.8: Anschluss Deckenabdichtung

Abb. 7.9: Fachgerechte Abdichtung der Dichtungsbahnen bei Durchstoßungen



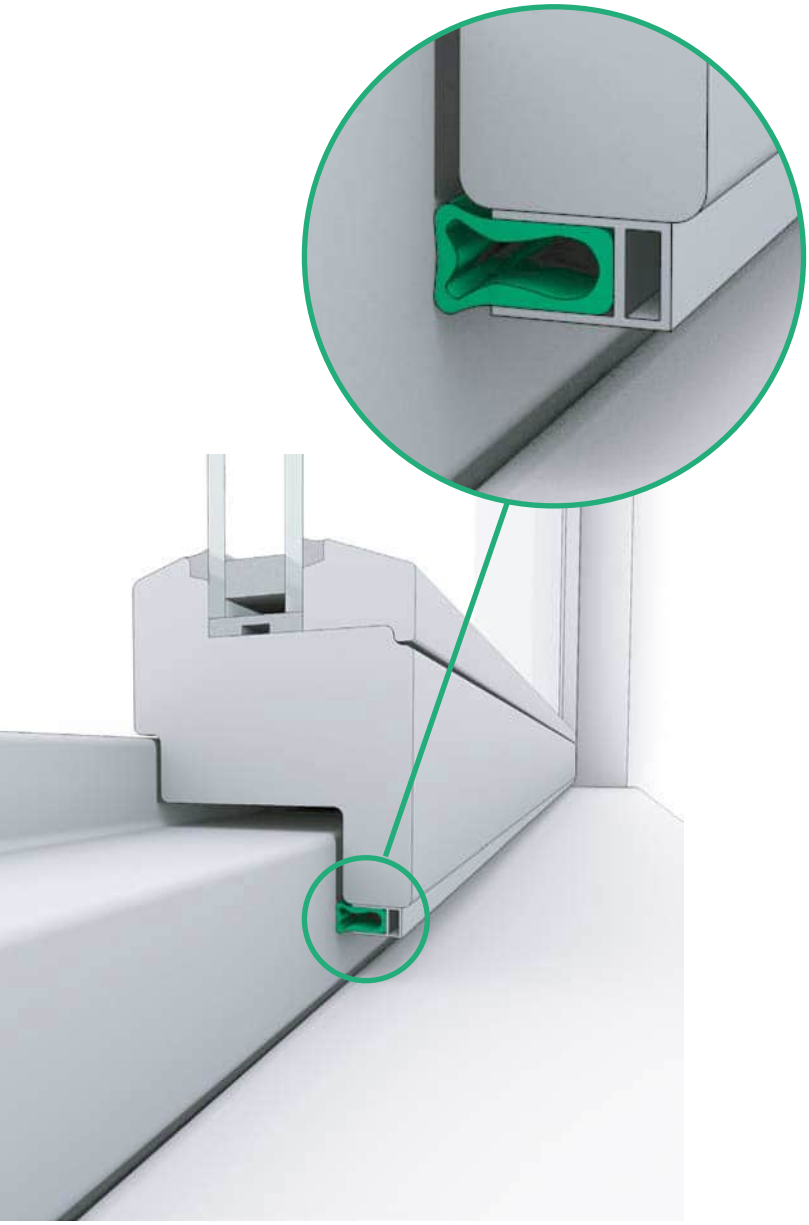


Abb. 7.10:
Elastische Dichtungsprofile, eingenutet oder in aufgesetzten Metallprofilen

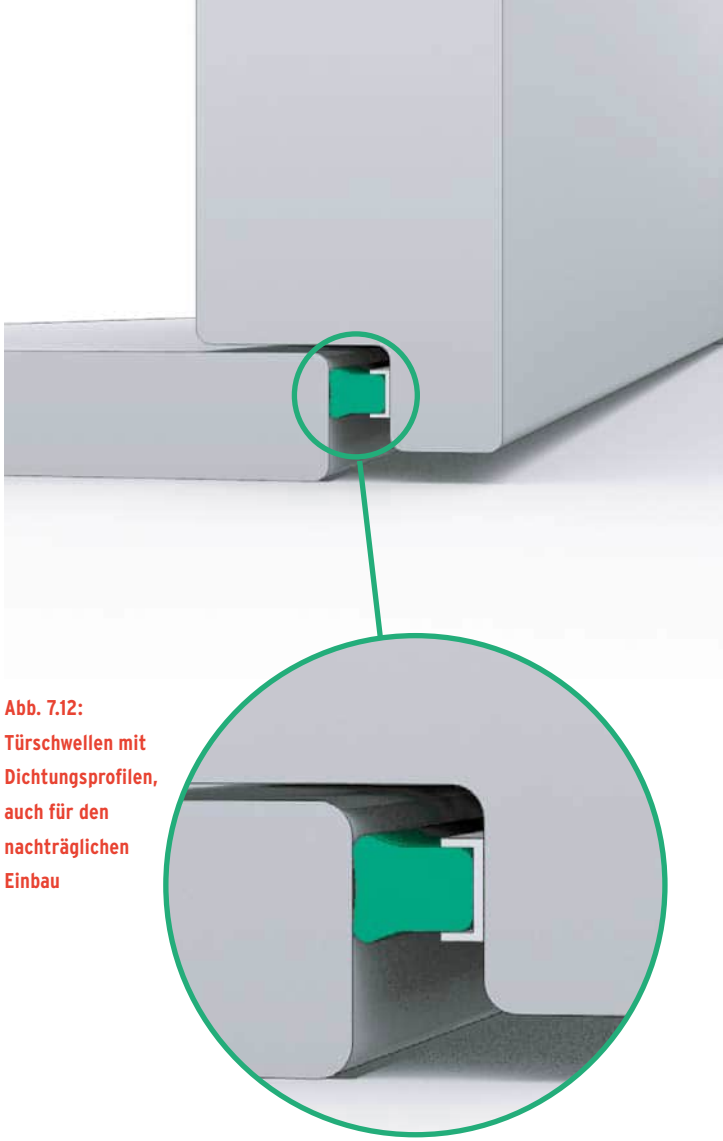


Abb. 7.12:
Türschwellen mit Dichtungsprofilen, auch für den nachträglichen Einbau

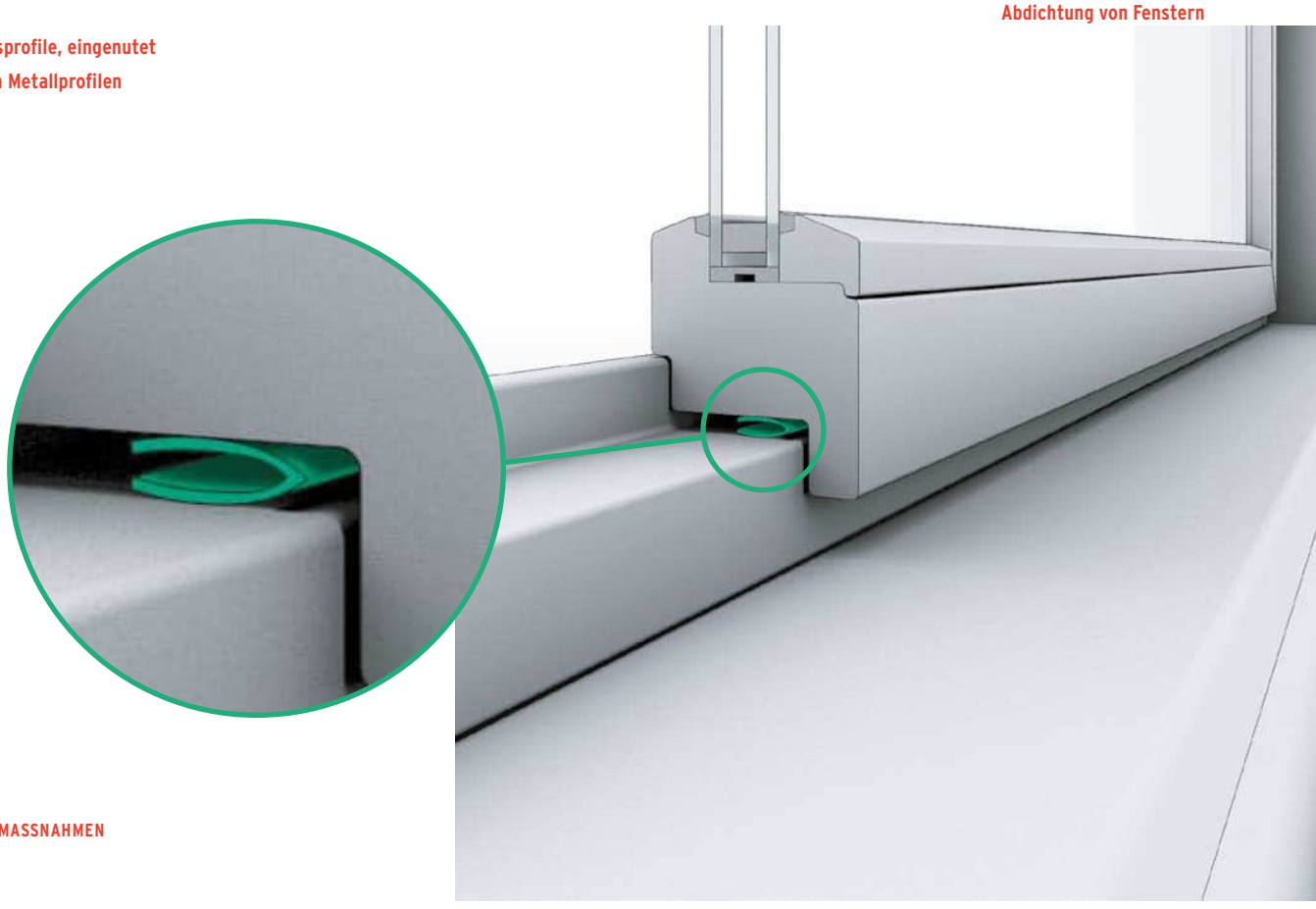


Abb. 7.11:
V-Dichtungen für die nachträgliche Abdichtung von Fenstern

Dichten von Türen, Klappen, Schachtdeckeln u. ä.

Wenn die erhöhte Radonbelastung im Keller nicht ausreichend abgesenkt werden kann, etwa weil nicht auf den Naturbodenkeller verzichtet werden soll, weil sich schlecht abzudichtende Revisionsschächte im Kellerboden befinden oder sich durchgeführte Dichtungsmaßnahmen als nicht ausreichend wirksam gegenüber Radon aus dem Gebäudeuntergrund erwiesen haben, müssen die Trennbauteile zu den Aufenthaltsräumen wirkungsvoll abgedichtet werden. Dazu gehören in erster Linie die Verbindungstüren. Das können Kellertüren sein, aber auch Türen zu Treppenhäusern, die ins Untergeschoss führen.
Die Fugendurchlässigkeit ist vor allem für Fenster ein definierter Begriff, auf den auch bezüglich der Radondichtigkeit zurückgegriffen werden kann **[24,27]**.
So kann für Türen, die radonbelastete Räume abschließen sollen, ein Fugendurchlasskoeffizient a ≤ 0,2 m^3 / m·h·Pa verlangt werden.
Fenster und Türen mit erhöhten Schalldämmwerten weisen auch eine gute Luft- und damit Radondichtigkeit auf. Wie beim Schallschutz muss aber auch sehr darauf geachtet werden, dass der Einbau sorgfältig und sachgerecht erfolgt. Im Gegensatz dazu sind Brandschutztüren nicht besonders dicht. Elastische Dichtungsprofile sind wegen ihrer geringen Feuerbeständigkeit kein Bestandteil von Brandschutzkonzepten, da eine erhöhte Gasdichtigkeit aus Sicht des Brandschutzes auch nicht vordringlich ist. Sollen Türen, Klappen, Schachtdeckel und ähnliche Elemente radondicht ausgebildet sein, ist Folgendes zu beachten:

Elastische Dichtungsprofile

Um bewegliche Bauteile wie z. B. Türen bzw. deren Falze abzudichten, sind elastische Dichtungsprofile (Lippen- oder Hohlkammerprofile) einzusetzen (Abb. 7.10–7.13). Allerdings müssen Dichtungsprofil und Falz aufeinander abgestimmt sein. Außerdem muss die Dichtung fachgerecht eingepasst sein. Grundsätzlich genügt eine umlaufende Dichtung. Auf die bei hohen Schallschutzanforderungen übliche zweite Dichtung kann im Normalfall verzichtet werden. Wenn im Keller hohe Belastungen bleiben (über 1.000 Bq/m^3) und die betreffende Tür häufig benutzt wird (Hauptabgangstür zum Keller), kann eine zweite Falzdichtung sinnvoll sein.
Werden bestehende Türen (oder Klappen) nachträglich mit elastischen Dichtungsprofilen ausgerüstet, muss darauf geachtet werden, dass die Profile fachgerecht umlaufend eingenutet werden und dass die Tür stabil genug ist, z. B. keine übermäßigen jahreszeitlichen Verformungen auftreten, die die Dichtungswirkung beeinträchtigen.
Zwei Aspekte sollten bei Bauteilen, die geöffnet werden können, besonders beachtet werden:

- Elastische Dichtungen lassen mit der Zeit in ihrer Wirkung nach und sollten periodisch ersetzt, auf jeden Fall aber überprüft werden (alle 5 bis 8 Jahre).
- Abgedichtete Türen sind nur dicht, wenn sie geschlossen sind. Das ist zwar trivial, wird jedoch oft vergessen. Bei wichtigeren Verbindungen (Kellertür) bietet sich der Einbau eines automatischen Türschließers an.

Einfache V-Dichtungen zum nachträglichen Einkleben in Fenster- und Türfalze können die Luftaustauschraten erheblich absenken. Als Dichtungsmaßnahme gegen Radon sind sie aber unbefriedigend. Schwellen von Türen, die eine hohe Radondichtigkeit gewährleisten müssen, sollten wenn möglich als Anschlag ausgebildet und mit einem elastischen Dichtungsprofil ausgerüstet sein, das mit den seitlichen Falzdichtungen verbunden ist (Abb. 7.12). Schleifdichtungen aus Bürsten-, aber auch aus Elastomer-Material, sind ungenügend. Die beweglichen Anpress-Schwellendichtungen mit Hohlkammerprofilen dichten relativ gut ab (Abb. 7.13). Allerdings muss die Stelle, an welcher das Profil auf den Boden abgesetzt wird, glatt und eben sein. Es muss besonders darauf geachtet werden, dass seitlich möglichst keine Löcher entstehen.
Die Forderung nach hohem Schalldämmmaß bietet diesbezüglich guten Schutz.

Schlüssellöcher

Kellertüren mit alten Schlössern weisen oft sehr große Schlüssellöcher auf. Bei einer Radonsanierung sollten Schlösser mit minimaler Öffnung oder Schließmechanismus eingebaut werden.

Abb. 7.13: Bewegliche Anpress-Schwellendichtung

[27] DIN – Deutsches Institut für Normung: Fenster, Fugendurchlässigkeit, Schlagregendichtheit und mechanische Beanspruchung; Anforderungen und Prüfung. DIN 18055, 2014-11

Lüftungstechnische Maßnahmen

Der Stand der Technik hat zahlreiche lüftungstechnische Varianten hervorgebracht, die die Druckverhältnisse im und am Gebäude so beeinflussen, dass radonhaltige Bodenluft (Luft aus dem Baugrund) nicht in das Gebäudeinnere gesaugt wird. Andere Techniken verringern oder verdünnen den Radonanteil in der Raumluft auf ein akzeptables Maß.

Radonhaltige Bodenluft dringt vor allem in das Gebäude ein, wenn ein Druckgefälle vom Erdreich zum Gebäudeinneren besteht. Das Druckgefälle hat verschiedene Ursachen.

- In jedem Gebäude besteht ein Temperatur bedingtes Druckgefälle (Schornsteineffekt). Diese natürliche Druckdifferenz tritt im Winter stärker auf, ist in jedem einzelnen Geschoss oder über mehrere Etagen wirksam und kann durch Einbauten wie Lift- oder Lüftungsschächte verstärkt werden.
- Unterdruck erhöhend wirken sich auch technische Anlagen wie Abluftventilatoren für Badezimmer, Küchenabzüge etc. aus, wenn ungenügende Nachströmöffnungen vorhanden sind.
- Heizkessel, Gasdurchlauferhitzer, Öfen und Kamine erzeugen durch den Schornsteinzug ebenfalls Unterdruck, wenn sie keine separate Verbrennungsluftzufuhr von außen besitzen. Der Kaminzug ist in der Regel auch wirksam, wenn kein Feuer brennt, da dicht schließende Öfen oder Kaminklappen die Ausnahme bilden.
  Der Wind kann die Radonproblematik durch Beeinflussung der Druckverhältnisse im Haus erheblich verschärfen. Der Einfluss des Windes ist stark von der Lage des Hauses und der Gebäudehüllendichtigkeit abhängig.

Je nach Temperaturdifferenz zwischen innen und außen, Windverhältnissen und Luftdurchlässigkeit zwischen den einzelnen Stockwerken können sich im Bodenbereich von Gebäuden beachtliche Unterdruckwerte einstellen. Bei fünf Metern Gebäudehöhe und einer Temperaturdifferenz von 20° Celsius zwischen innen und außen kann sich auf dem Erdgeschossboden ein Unterdruck aufbauen, der mehrere Kubikmeter Luft pro Stunde durch einen Riss von einem Meter Länge und einem Millimeter Breite saugen kann. Durch gebäudethermische Einflüsse kann je nach Verhältnissen Bodenluft mit erhöhtem Radongehalt in die Keller und möglicherweise sogar bis in die oberen Stockwerke gesaugt werden. Windeffekte können dort eine Rolle spielen, wo sie stark und regelmäßig auftreten.

Die möglichen Lüftungsstrategien können fünf Prinzipien zugeordnet werden:

- Unterdruck erzeugende Faktoren eliminieren
- Unterdruck unter dem Gebäude aufrecht erhalten
- künstlichen Überdruck im Gebäude erzeugen
- Abführen radonhaltiger Luft aus dem Keller
- Abführen radonhaltiger Luft aus Aufenthaltsräumen

Undichtigkeiten in der Gebäudehülle bewirken einen erhöhten Luftwechsel und damit tendenziell eine Verdünnung der Radonkonzentration. Gleichzeitig kann aber die Situation im Untergeschoss durch entstehenden Unterdruck verschlechtert werden, so dass vermehrt Radon nachfließt.

Ausschlaggebend ist die hausinterne Drucksituation. Diese wird von der Verteilung der Leckagen über die Gebäudehöhe sowie durch die Anordnung und Verbindung der Aufenthaltsräume mit dem Kellergeschoss und die Durchlässigkeit über die Geschosse hinweg bestimmt. Undichte Boden-/Deckenkonstruktionen, offene Treppenhäuser oder Schächte und Abluftanlagen stellen die entscheidenden Ausbreitungswege dar. Abdichtungen am richtigen Ort, nämlich im oberen Bereich des Gebäudes, verbessern die Unterdrucksituation am Kellerboden ebenso wie Zuluftöffnungen im Erdgeschoss. In vielen Fällen genügt es, permanente Öffnungen zu schaffen oder sicherzustellen, dass radonbelastete Hohl- oder Kellerräume zuverlässig gelüftet werden.

Kommt ein Ventilator zum Einsatz, spricht man von aktiver Lüftung. Wird die Radonluft über das Dach abgeleitet, kann unter Umständen auf einen Ventilator verzichtet und die Entlüftung dem thermischen Auftrieb überlassen werden. Aktive Systeme haben zwei schwerwiegende Nachteile:

- Sie benötigen eine Stromversorgung. Ein Ventilator mit 30 Watt (W) Dauerleistung verbraucht im Jahr etwa 260 Kilowattstunden. Ventilatoren müssen gewartet werden und haben eine deutlich kürzere Lebenserwartung als das Gebäude selbst.
- Bei aktiven Systemen muss immer damit gerechnet werden, dass sie aus irgendeinem Grund nicht funktionieren. Aktive Lüftungssysteme sollten immer erst in einer zweiten Stufe eingerichtet werden, wenn passive Systeme keinen genügenden Erfolg erbracht haben. Je nach Ausgangslage ist es zweckmäßig, Voraussetzungen für eine eventuelle Nachrüstung mit einem Ventilator zu schaffen. Im Handel werden Systeme angeboten, bei denen der Ventilator erst bei Überschreitung einer bestimmten Radonkonzentration zu arbeiten beginnt.

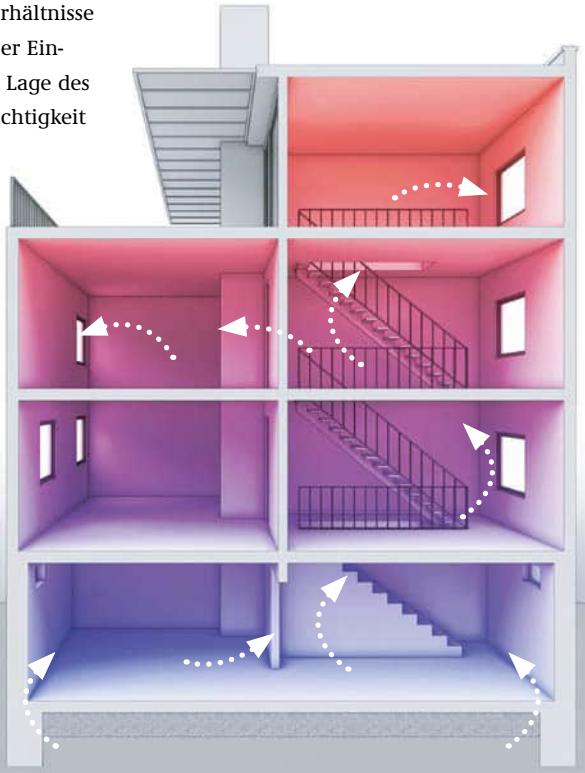


Abb. 7.14:
Unterdruck an der Gebäudesohle durch thermischen Auftrieb

Abb. 7.15:
Unterdruckerzeugende Elemente wie Abluftanlagen, Kamine etc.

Unterdruck eliminieren

Die Druckdifferenz zwischen Bodenluft und Kellerluft ist die treibende Kraft für die Radoninfiltration (Abb. 7.15). Es ist daher folgerichtig, dass in jedem Fall als erstes die für den Unterdruck im Gebäude verantwortlichen Faktoren identifiziert und so weit wie möglich beseitigt werden. Bei Neubauprojekten sollten die in den Gebäuden entstehenden Druckverhältnisse bereits konzeptionell bedacht werden. Bei bestehenden Gebäuden kann dies von einfachen „Bedienungsmaßnahmen“, wie Öffnen von Fenstern und Klappen, bis zu größeren baulichen Eingriffen reichen.

Oberirdische Nachströmöffnungen schaffen

Wohnräume mit Abluftanlagen in Toilette und Küche ohne Nachströmöffnungen können Unterdrücke von 20 Pa und mehr erzeugen. Je nach Situation kann sich dieser Unterdruck bis an die erdberührenden Bauteile auswirken und radonhaltige Bodenluft ansaugen. Oberirdische Nachströmöffnungen, Ventile und -durchlässe stellen gegenüber Abluftanlagen ohne Luftnachströmung eine Verbesserung dar. Deren Einsatz ist aber in Gebieten mit erhöhtem Radonpotenzial im Untergrund nicht geeignet, wenn ein Unterdruck nötig ist, um sie zu öffnen.

Bei Sanierungen muss zumindest darauf geachtet werden, dass die Nachströmöffnungen großzügig dimensioniert werden. Außerdem sollten sie mit Maßnahmen zur Erhöhung der Dichtigkeit gegenüber den erdberührenden Räumen kombiniert werden.

Direkte Außenluftzufuhr für Öfen und Kessel

Öfen, Kamine etc., die sich in Aufenthaltsräumen befinden, sollten schon aus Energie- und Gesundheitsgründen mit direkter Außenluftzufuhr ausgerüstet werden. Auch in den übrigen Räumen ist die direkte Außenluftzufuhr zum Brennraum des Ofens oder Heizkessels heute Stand der Technik und sollte Bestandteil dieser Einbauten sein (Abb. 7.16).

Dichte Rauchrohrklappen

Kaminklappen sind im Normalfall aus Sicherheitsgründen nicht dichtschließend. Sie unterbinden deshalb auch den Kaminzug und den daraus entstehenden Unterdruck nur unzureichend. Die zuständigen Schornsteinfeger können für nur kurzzeitig betriebene Feuerungen in dauernd beaufsichtigten Räumen dichtschließende Kamin- oder Rauchrohrklappen bewilligen. Dies gilt für neue und bestehende Kamine und Einzelöfen, aber nicht für Koch- und Zentralheizungsherde. In Radonvorsorgebieten sollten Kamine und Zimmeröfen nach Rücksprache mit den zuständigen Stellen unbedingt mit dichtschließenden Rauchrohrklappen ausgerüstet werden.

Zu berücksichtigen ist, dass bei Vorhandensein geeignet positionierter Nachströmöffnungen durch die Kaminwirkung auch ein verstärkter Luftaustausch bewirkt werden kann, der wiederum durch den Verdünnungseffekt zu einer Reduzierung der Radonkonzentration in den betroffenen Räumen führt. Eine fachgerechte Situationseinschätzung ist auch in diesen Fällen wichtig.

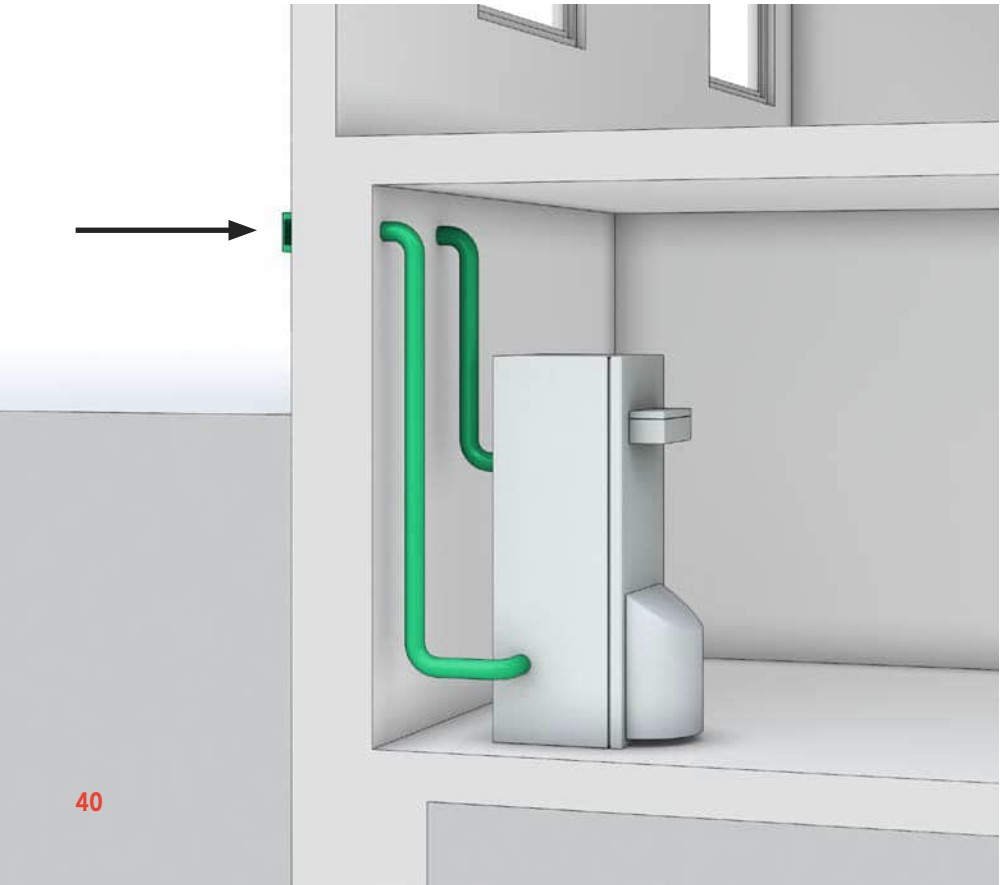
Luftabsaugung unter dem Gebäude

Beim Absaugen von Luft aus dem Bereich unmittelbar unter der Gebäudegrundfläche wird passiv oder aktiv (ventilatorbetrieben) radonbelastete Bodenluft abgeführt. Damit werden zwei verschiedene Wirkungen angestrebt:

- In Hohlräumen oder in den Erdschichten unter dem Gebäude wird ein Unterdruck (gegenüber dem atmosphärischen Druck im Keller oder in anderen erdberührenden Hausbereichen) aufgebaut. Auf diese Weise kann mit geringer Förderleistung und sehr kleinen Volumenströmen verhindert werden, dass Bodenluft in das Gebäude einfließt.
- Vorhandene oder nachträglich eingebrachte Hohlräume unter dem Gebäude oder sehr durchlässige Füllungen werden belüftet. Die nachfließende Frischluft verdünnt die aus dem Untergrund austretenden Radonmengen. Voraussetzung dafür sind entsprechende Möglichkeiten für das Nachströmen von Luft aus der freien Atmosphäre in die Hohlräume.

Beide Verfahren haben, abhängig von den Bodenverhältnissen und den vorhandenen baulichen Voraussetzungen, ihre Berechtigung. Die Unterdruckhaltung unter dem Gebäude ist als Variante mit den größeren Erfolgsaussichten anzusehen und ist auch durch entsprechende Wahl der Leistungsparameter flexibel an die örtlichen und gebäudetechnischen Gegebenheiten anzupassen. Die für beide Varianten weitgehend identische konstruktive Gestaltung, z. B. von Rohrleitungssystemen (Drainagen), bietet die Möglichkeit, im Rahmen einer Testphase die geeignetere Lösung zu ermitteln.
Wenn sich das Erdreich oder die Hinterfüllung als so durchlässig erweist, dass der vorgesehene Unterdruck nicht mit vernünftigem Aufwand erzeugt werden kann, wird ein Radonschutzeffekt durch die Spülung mit Außenluft oder durch die Kombination beider oben genannter Effekte erreicht.

Abb. 7.16:
Direkte Außenluftzufuhr zum Brenner



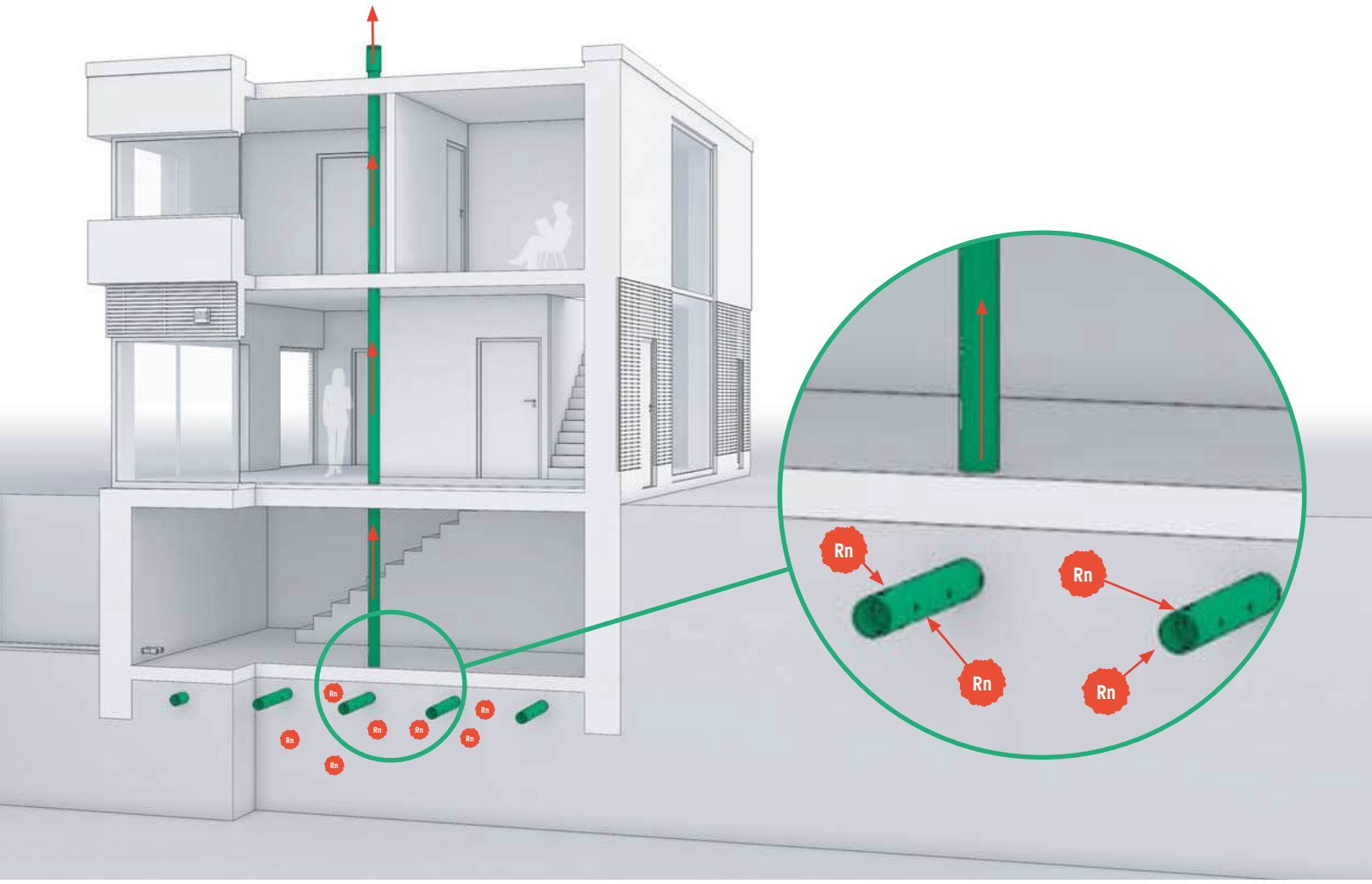


Abb. 7.17: Bodenentlüftung unter der Gebäudesohle mittels Drainagesystem

Bei Anwendung der Belüftungsvariante ist jedoch unbedingt die Gefahr einer Unterkühlung des Gebäudes bis hin zum Risiko von Frostschäden durch Ausdehnung des gefrorenen Bodens oder die Gefahr des Einfrierens von Wasser führenden Leitungen zu berücksichtigen. Wie bei den Abdichtungsmaßnahmen muss auch bei der Unterlüftung der Gebäude darauf geachtet werden, dass das ganze Gebäude mit einbezogen wird und nicht nur einzelne Räume. Technisch sind die folgenden Situationen zu unterscheiden:

Entlüftung von Hohlräumen unter dem Gebäude
Unter den Wohnräumen nicht unterkellerter Gebäude befindet sich im Allgemeinen ein Hohlraum, weil dies ein probates Mittel ist, Feuchteprobleme zu vermeiden. Normalerweise werden diese Hohlräume auch mit Belüftungsöffnungen ausgestattet. Die Vergrößerung und optimale Anordnung der Lüftungsöffnungen kann bereits für eine ausreichende Radonableitung genügen. Wenn nicht, kann ein einfacher Kleinventilator vorgesehen werden. Wird ein Kleinventilator eingesetzt, kann unter Umständen bewusst auf eine Nachströmöffnung verzichtet und allein auf den Unterdruckeffekt gesetzt werden. Der Ventilator sollte im Unterdruckbetrieb arbeiten (bis -40 Pa), energieeffizient und geräuscharm sein.

Auch unter Terrassenhäusern sind oft durchgängige Hohlräume zu finden, die manchmal sogar bekriechbar sind. Neben Lüftungsöffnungen beim untersten und obersten Terrassenhaus kann es notwendig sein, die Hohlräume auch von der Seite her zu öffnen, damit in den langen Luftströmen keine Radonanreicherung erfolgen kann.

Bodenentlüftung mit Drainageleitungen unter der Gebäudesohle
Radonhaltige Bodenluft wird mit einem Röhrensystem (Drainagerohre oder Flachkanäle mit perforierter Unterseite) erfasst und ins Freie geleitet (Abb. 7.17). Die Wirksamkeit hängt entscheidend davon ab, ob gegenüber den darüber liegenden Räumen oder den nicht unterkellerten Erdgeschossräumen vollflächig ein Unterdruck erzielt werden kann. Das Bodenmaterial sollte eine hohe Luftdurchlässigkeit aufweisen, damit der Drainageeffekt voll zum Tragen kommt. Sehr nützlich ist es, wenn Kies als Drainageschicht eingebracht werden kann. Je dichter der Boden, desto feinmaschiger muss das Rohrnetz verlegt werden. Die Rohre können unter Umständen auch im Bohrverfahren eingebracht werden. Bei sehr durchlässigen Böden kann es sinnvoll sein, unter das Röhrensystem eine Folie über die ganze Fläche zu verlegen. Dies behindert das Nachströmen der Bodenluft, wodurch sich ein Unterdruck aufbaut.
Eine weitere Möglichkeit bildet die Kombination von horizontalen und vertikalen Drainageleitungen im Bereich von erdberührten Wänden und Fußböden. Diese Möglichkeit kann z. B. bei starker Hanglage des Gebäudes Vorteile bieten.

FACHINFORMATION

Durch das Einpressen der Drainagerohre beim Bohrverfahren wird das umgebende Erdreich voden unter der Gebäudesohle aufgebaut wird. Voraussetzung für eine ausreichende Wirksamkeit ist somit eine nicht bindige Bodenstruktur.

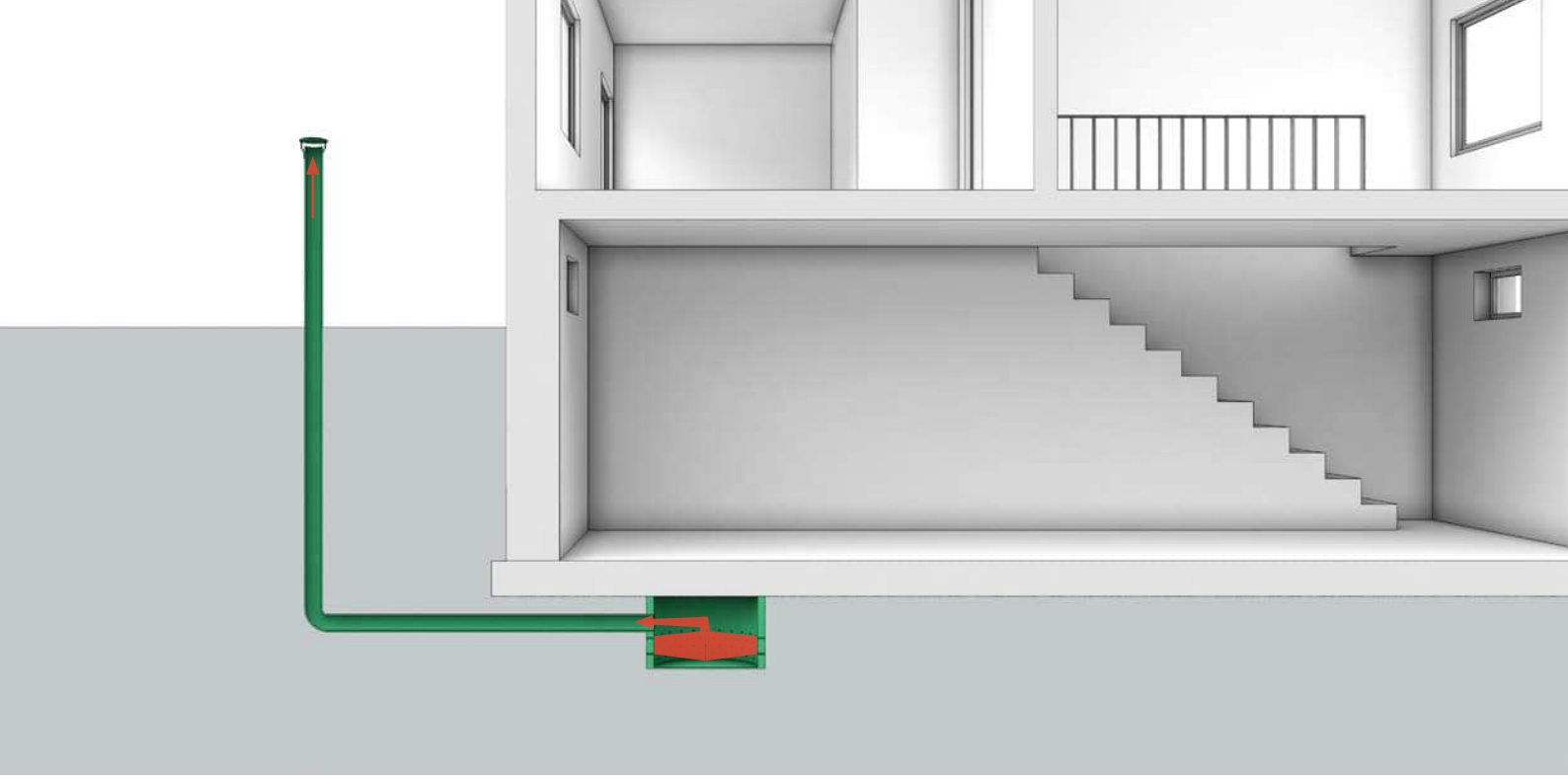


Abb. 7.18:
Bodenentlüftung unter der Gebäudesohle mittels Sammelschacht

Bodenentlüftung mit zentralem Sammelschacht
Die Bodenluft wird unterhalb von bestehenden Fußbodenkonstruktionen in einem Schacht (Radonbrunnen) gesammelt und abgesaugt (Abb. 7.18). Das Verfahren ist wirksam, wenn unter der Gebäudegründungskonstruktion (z. B. armierte Betonbodenplatte, Holzfußboden auf Lagerhölzern) ein zusammenhängender durchgängiger Hohlraum existiert oder wenn der Untergrund eine hohe Permeabilität aufweist (z. B. Kies). Bei ungünstigen Verhältnissen müssen mehrere Schächte gesetzt werden.

Abb. 7.19:
Unterdruckerzeugung unter der Bodenplatte durch Absaugkanal entlang der Bodenplattenfuge

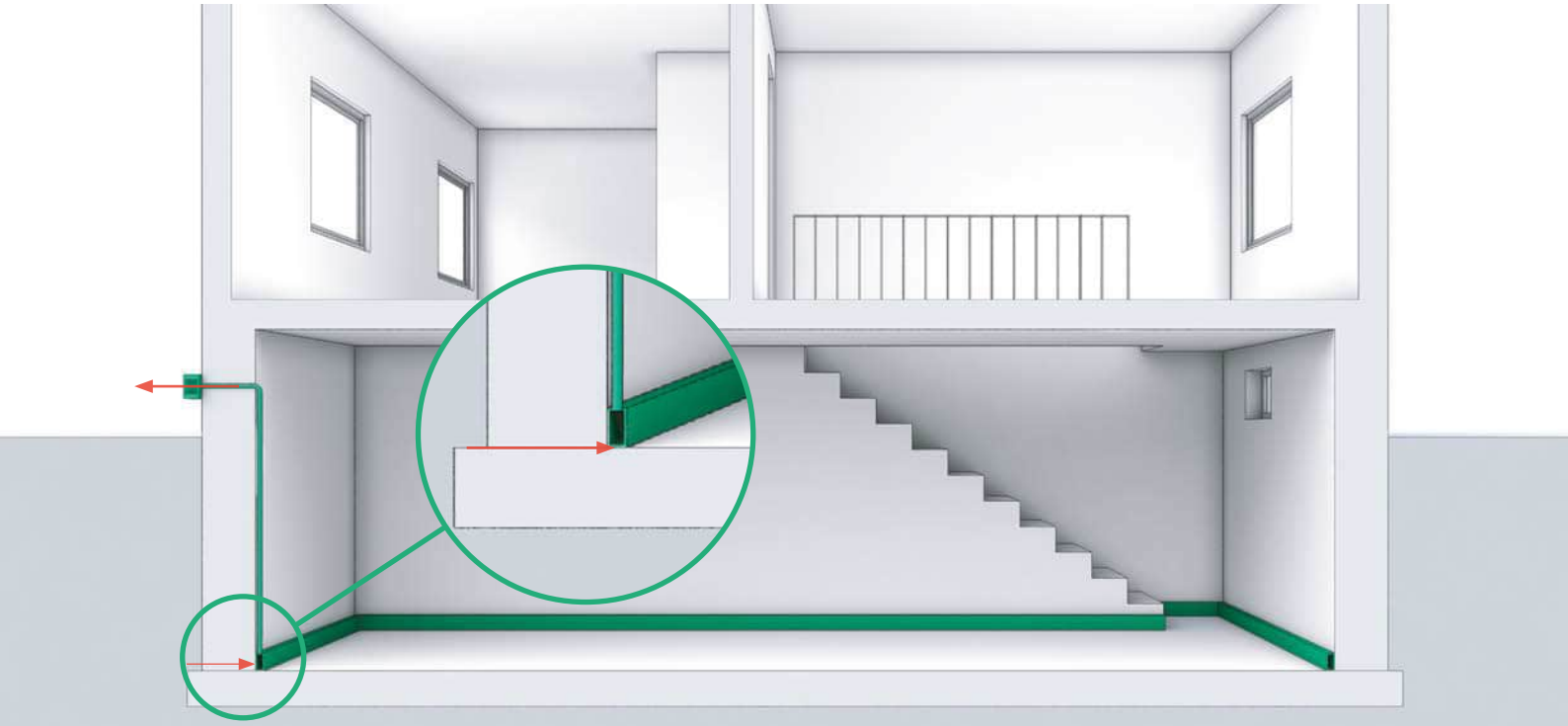
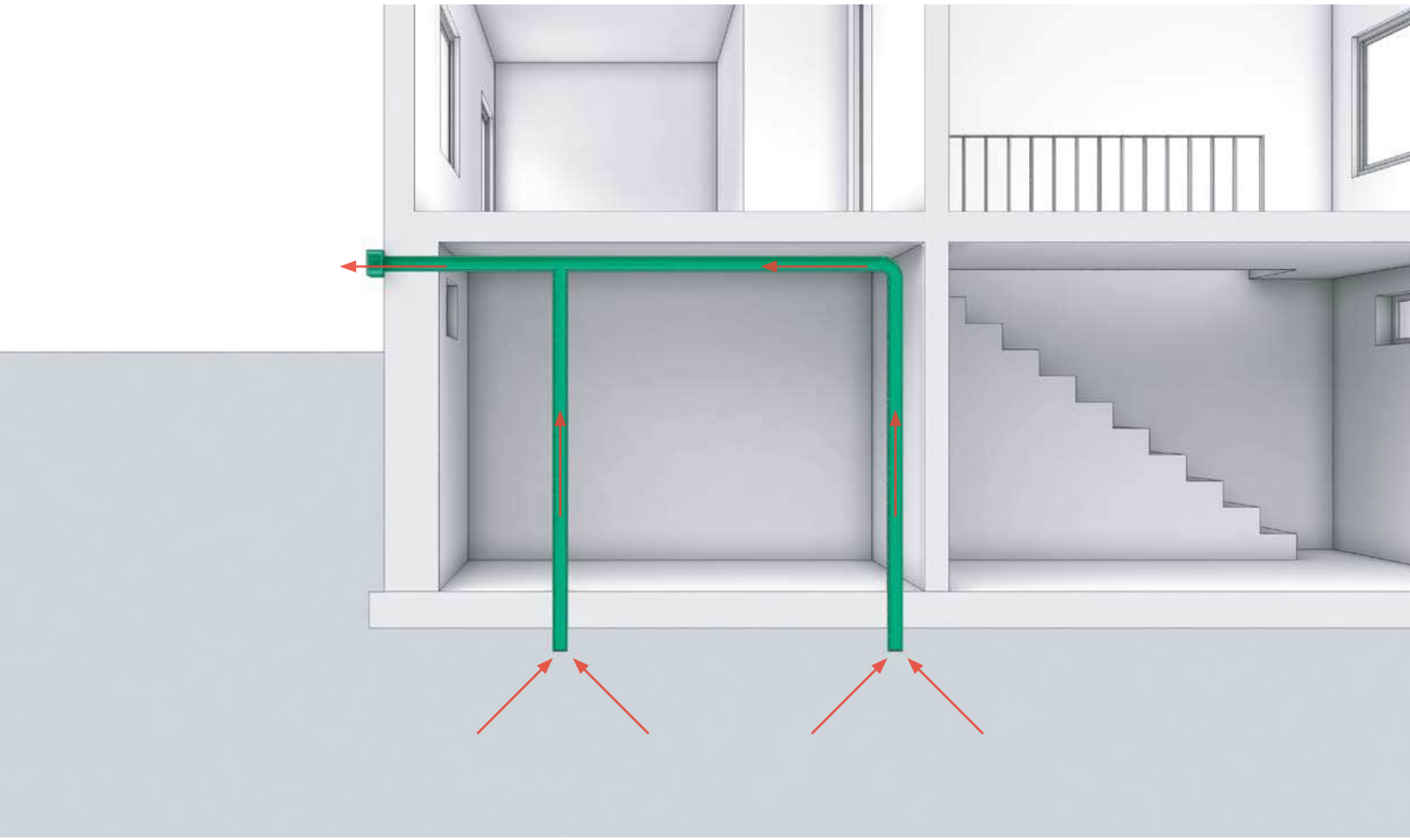


Abb. 7.20:
Bodenentlüftung unter der Gebäudesohle mittels einzelner Ansaugstellen



Bodenentlüftung mit Sammelkanal
Ein Kanal sammelt durch linienförmige Stellen wie z. B. Fugen eindringende radonhaltige Bodenluft (Abb. 7.19). Ein Ventilator erzeugt im Kanal einen kleinen Unterdruck und bläst die angesaugte Bodenluft via Abluftkanal ins Freie. Diese Methode ist nur anwendbar bei bautechnisch einfach lokalisierbaren Eintrittsstellen, insbesondere bei starren Dehnungsfugen zwischen Außenwänden und dichter Bodenplatte. Oftmals ist die fehlende Berücksichtigung der Wände ein problematischer Schwachpunkt.

Bodenentlüftung an einzelnen Stellen
Wenn vom Gebäuderaum her genügend Platz für Absaug- und Sammelrohre vorhanden ist, kann es in bestehenden Gebäuden einfacher sein, die Bodenluft über mehrere Rohre, die dicht durch den Kellerboden geführt werden, abzusaugen. (Abb. 7.20)

Bodenentlüftung mit zwei Dichtungsbahnen (Neubauten in Radonvorsorgebieten)

Bei Bodenentlüftungen muss auf möglichst gute Dichtigkeit der Fußbodenkonstruktion geachtet werden. Bei Neubauten kann diese Abdichtung mit einer durchgehenden Folie unter dem Fußbodenaufbau erfolgen. Die Ansaugstellen für die Bodenluft befinden sich oberhalb der Folie. Allerdings geschieht dies mit geringen Luftmengen, was auch eine übermäßige Auskühlung im Winter verhindert.

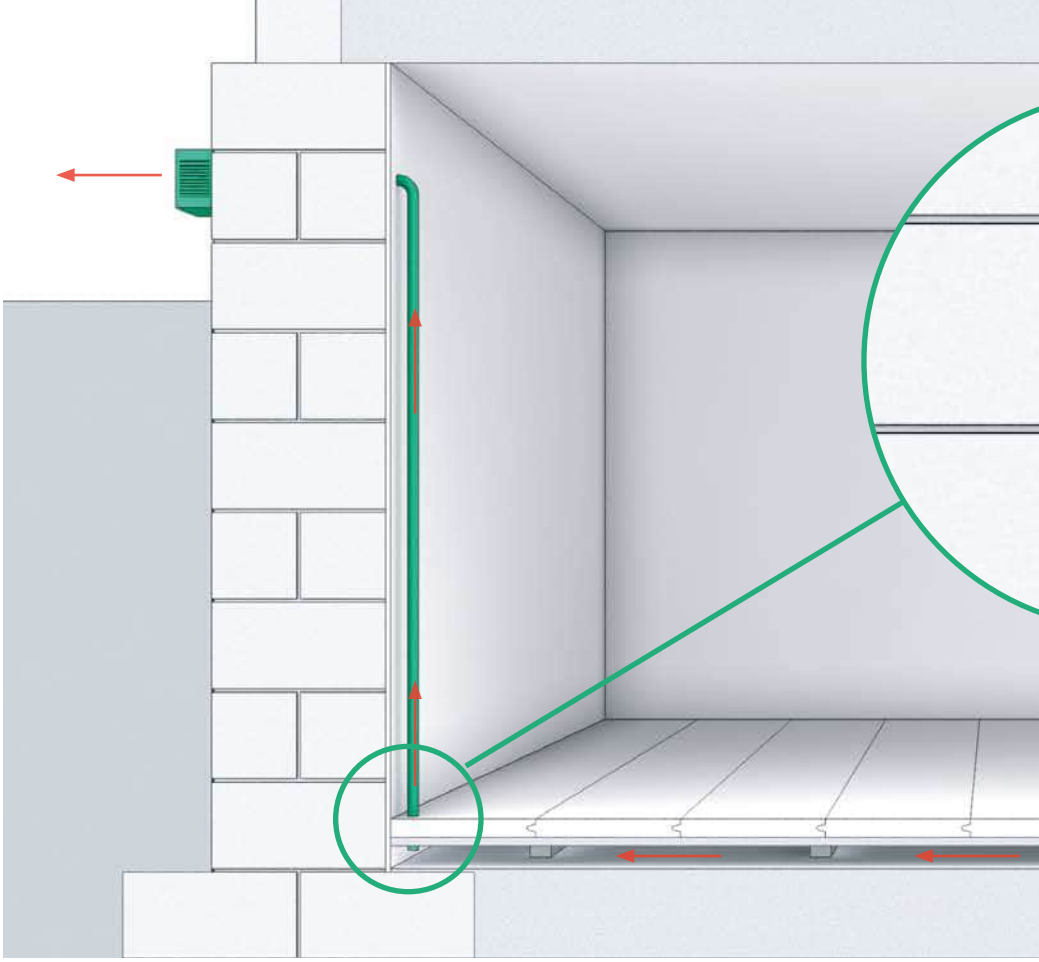


Abb. 7.21:
Entlüftung von bestehenden Hohlräumen

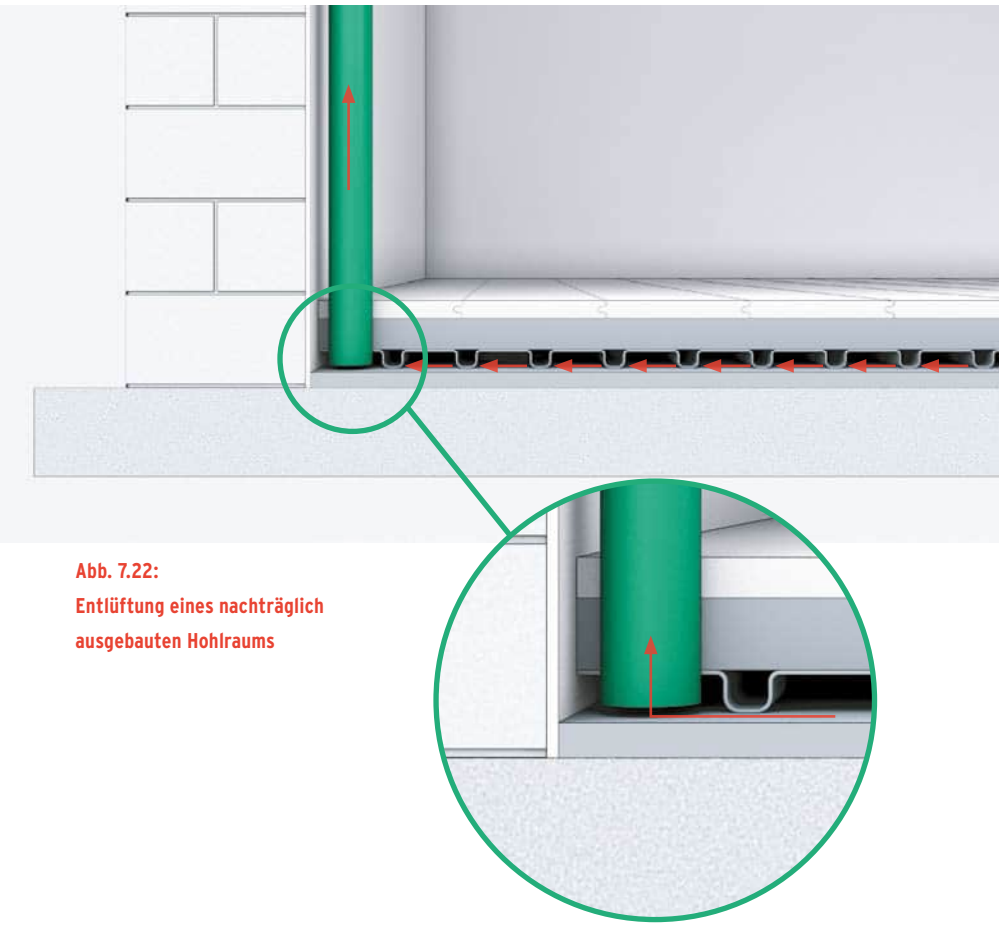
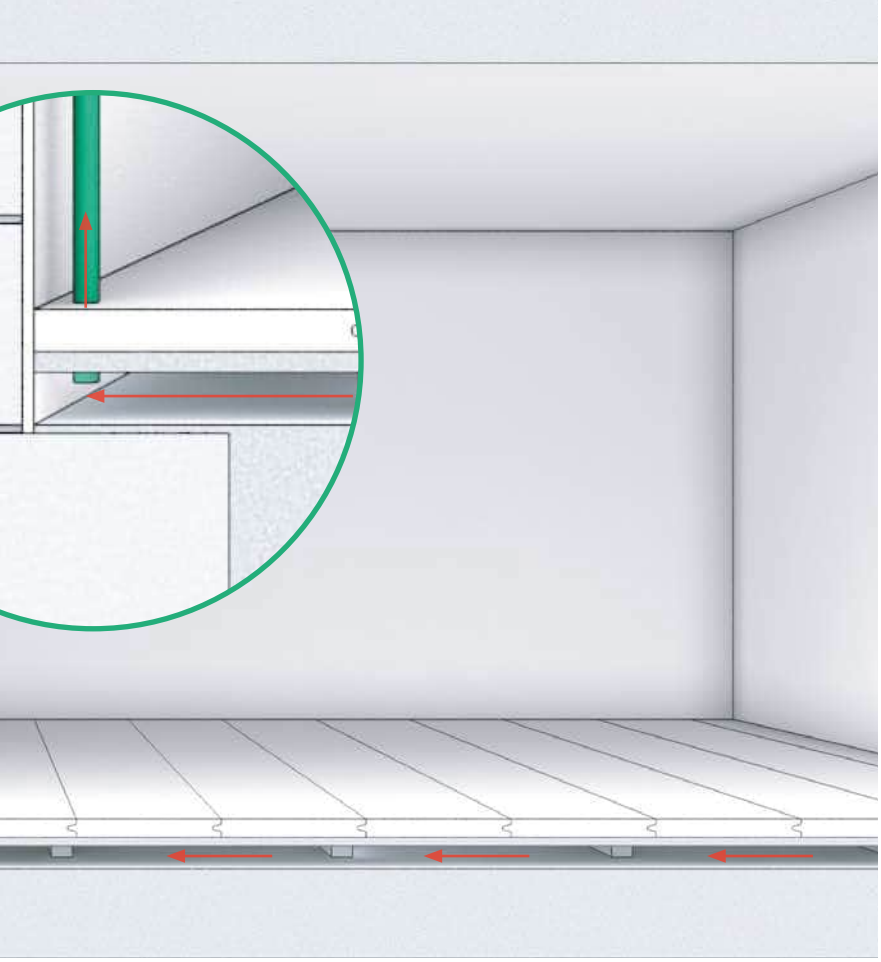


Abb. 7.22:
Entlüftung eines nachträglich ausgebauten Hohlraums

Entlüftung von Hohlbodenkonstruktionen

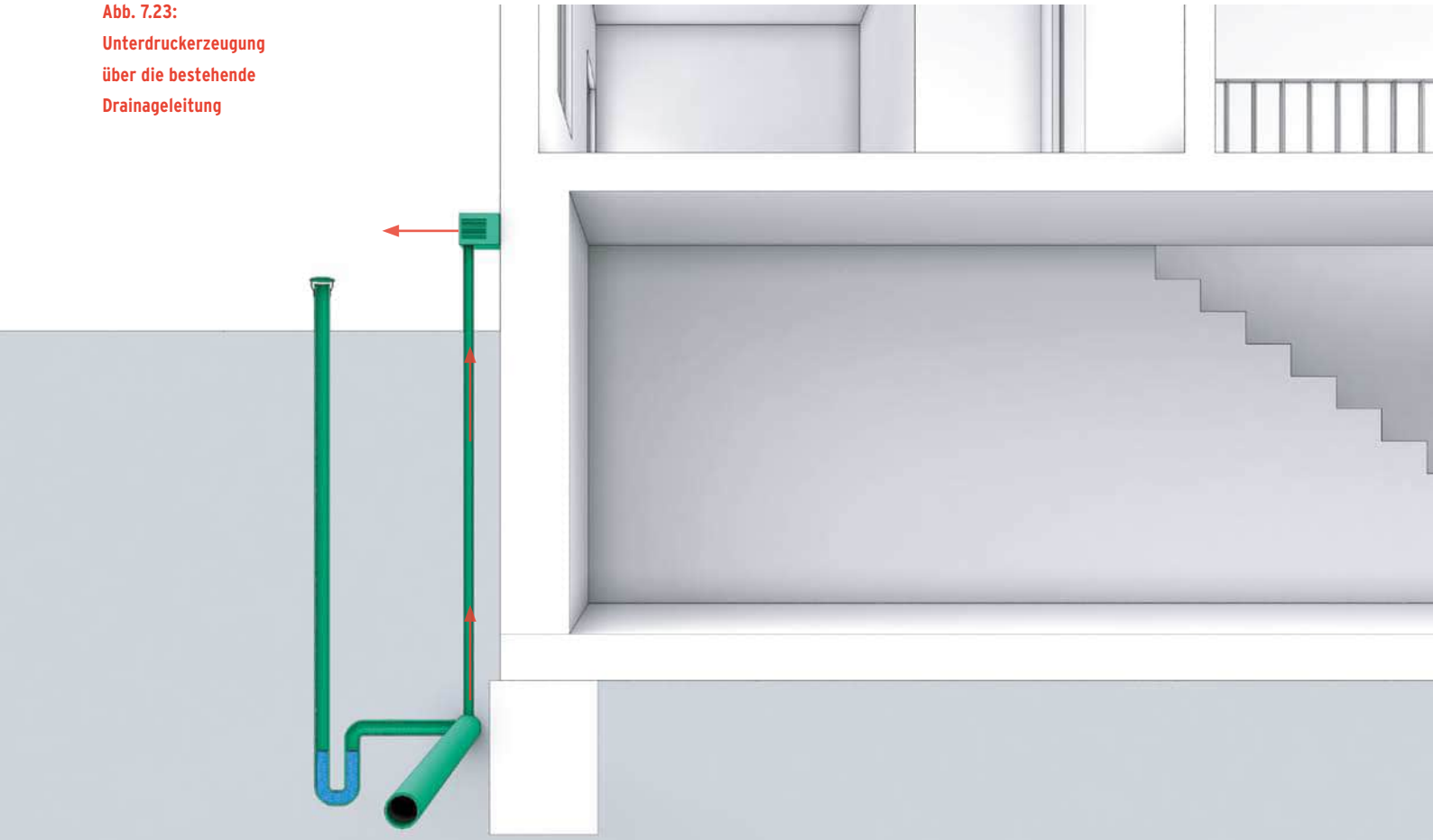
Bei bestehenden Bauten kann es einfacher sein, einen neuen Hohlboden einzubauen und diesen Hohlraum mit Unterdruck zu entlüften anstatt die Bodenluft mit Drainagerohren oder Radonbrunnen unter der Bodenkonstruktion zu sammeln (Abb. 7.21 und 7.22). Hohlbodenkonstruktionen können in verschiedenster Weise erstellt werden. Es sind auch verschiedene Fertigfabrikate auf dem Markt, deren Haupteinsatzgebiet im Bürobereich liegt, wo der Hohlboden als Installationsbereich genutzt wird. Eine besonders geringe Aufbauhöhe wird erreicht, wenn Drainageplatten oder -matten als Unterbodenkonstruktion eingesetzt werden. Sperrschichten in den aufsteigenden Wänden mit geeigneter Anschlusskonstruktion an den Hohlboden sind unbedingt vorzusehen.



Bodenentlüftung über eine bestehende Drainageleitung

Mit einem Abluftventilator wird Bodenluft aus einer vorhandenen Drainageleitung abgesaugt (Abb. 7.23). Bestehende Drainagen bilden allerdings ein System, dessen luft-technisches Verhalten meist unbekannt ist und das von Fall zu Fall stark variiert. In jedem Fall sind Siphons gegen Luftzufuhr aus dem öffentlichen Kanalisationsnetz erforderlich. Bei Sanierungen sollte ein Entlüftungsversuch mit provisorischem Abdichten der Kanalisationsverbindung vorgenommen werden.

Abb. 7.23: Unterdruckerzeugung über die bestehende Drainageleitung



Radonbrunnen außerhalb des Gebäudes

Je nach Bodenbeschaffenheit wurden gute Erfahrungen mit Radonbrunnen gemacht, die außerhalb des Gebäudes errichtet werden. Vor allem bei einer dichten Deckschicht über permeablem Boden (z. B. Lehmschicht über Sand/Kies) baut sich ein ausgedehnter Unterdruckbereich im Erdreich der Umgebung des Brunnens und damit auch unter dem Gebäude auf. Freistehende Radonbrunnen können zu einer kostengünstigen Radonsanierung führen, wobei an den Gebäuden selbst keine baulichen Eingriffe nötig sind. Unter günstigen Bedingungen kann ein Radonbrunnen zur Entlastung mehrerer Gebäude ausreichend sein. Der Energieaufwand für den unerlässlichen Betrieb eines Ventilators ist bei dieser Lösung jedoch vergleichsweise hoch. Außerdem werden im Allgemeinen spezielle Maßnahmen zur Geräuschdämmung erforderlich.

Künstlicher Überdruck im Gebäude

Um radonhaltige Bodenluft am Eindringen ins Gebäude zu hindern, kann anstelle eines Unterdruckes unter der Bodenplatte im Gebäudeinneren ein leichter Überdruck erzeugt werden.
Der Einsatz einer Lüftungsanlage im Wohnbereich ist zweckmäßig. Einfache mechanische Wohnungslüftungen mit Wärmerückgewinnung oder Luft/Luft-Wärmepumpen wurden in den letzten Jahren in Niedrigenergiehäusern mit gutem Erfolg eingesetzt. Sie sparen Energie und bieten einen hohen Frischluftkomfort.
Lüftungsanlagen mit Zu- und Abluftkanälen finden im Wohnungsbau zunehmend Verbreitung. Sie werden normalerweise so betrieben, dass Zu- und Abluftmenge gleich groß sind. Oft wird die Abluftförderung etwas größer gehalten, damit ein geringer Unterdruck in den Räumen entsteht. Zur Lösung von Radonproblemen ist die Zuluftmenge etwas größer als die Abluftmenge einzuregeln, um einen Überdruck im Gebäude bzw. in den Räumen zu erzielen. Dieser sollte den Wert von ca. 2 Pa nicht überschreiten.

Lüften des Kellers

Wenn vornehmlich Radon aus dem Untergeschoss in den Wohnbereich des Gebäudes eintritt, kann versucht werden, durch einen erhöhten Luftwechsel im Untergeschoss (z. B. durch Querlüftung) die Radonkonzentration soweit zu verringern, dass kein wesentlicher Radontransport vom Keller in die Aufenthaltsbereiche stattfinden kann. Im Haus entstehende Unterdrücke können im Keller nicht wirksam werden. Wenn ein Abluftventilator eingesetzt wird, kann sich als Nebeneffekt ein Unterdruck im Keller aufbauen, der bei bestehenden Undichtigkeiten den Zustrom von Bodenluft vergrößert. Der Unterdruck wirkt aber auch gegenüber den Aufenthaltsräumen, so dass das Radon von dort ferngehalten und ins Freie geblasen wird.
Das Problem liegt darin, dass Kellerlüftungen im Winter zu starker Auskühlung führen können. Um dies zu vermeiden werden die Fenster geschlossen und Ventilatoren abgestellt, obwohl wegen des thermischen Auftriebes der vergleichsweise warmen Kellerluft gerade im Winter leicht geöffnete Kellerfenster zu einer starken Entlüftung führen.
Auf eine gute Wärmedämmung der Bauteile gegen die beheizten Räume (Kellerdecke, Treppenhauswände und Treppenunterseite etc.) sowie von Heizleitungen ist zu achten.
Das Lüften von Kellerräumen ist im Allgemeinen nur als Provisorium bis zur Realisierung endgültiger Maßnahmen zu empfehlen.

Kontrollierte Luftzufuhr zu Brennräumen

Kontrolliertes Zuführen von Außenluft zum Heizkessel vermindert den Unterdruck durch Gebläsebrenner und Kaminzug im Heizungsraum. Bei einem Kamin oder einem Ofen soll mit einer großzügig dimensionierten Frischluftzufuhr (lichte Weite ca. 15 cm) verhindert werden, dass im Keller- und Erdgeschossbereich Unterdruck entsteht und radonbelastete Luft in bewohnte Räume angesaugt wird.

Lüftung von Aufenthaltsräumen

Wenn das Eindringen von Radon nicht in genügendem Maße zu verhindern ist, kann versucht werden, die Radonkonzentration durch erhöhten Luftwechsel zu verdünnen (Abb. 7.24). Da im Winter mit erhöhtem Luftwechsel durch vermehrtes Öffnen der Fenster die Zimmertemperatur sinkt und die Heizkosten steigen, ist dies nur als vorläufige Maßnahme bis zu einer endgültigen Sanierung zu empfehlen. Günstiger ist der Einbau einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Der Abluft wird vor Abgabe ins Freie mittels Wärmetauscher oder Wärmepumpe die Wärme entzogen und an die Frischluft übertragen. Mit derartigen Anlagen sind auch im Winter hohe Luftwechsel ohne übermäßige Energieverluste möglich. Zudem ist der Luftwechsel ununterbrochen gewährleistet und nicht vom Benutzerverhalten abhängig. Eine verstärkte Außenluftzufuhr führt bei niedrigen Außentemperaturen jedoch zu einer erheblichen Reduzierung der Raumluftfeuchte, so dass Probleme infolge sehr trockener Luft in den Räumen auftreten können.

Technische Hinweise zu den Lüftungsstrategien

Allgemeines

International sind schon einige tausend Radonsanierungen bzw. -präventionen mit lüftungstechnischen Einrichtungen ausgeführt worden. Da die Ausgangslagen wie gezeigt sehr unterschiedlich sind, ist die Übertragung von angewendeten Maßnahmen nicht generell möglich. Jeder Einzelfall sollte für sich betrachtet und entsprechend sollte der Einsatz von Technik individuell festgelegt werden. Die folgenden Hinweise sollen bei der Projektierung und Ausführung lüftungstechnischer Anlagen helfen.

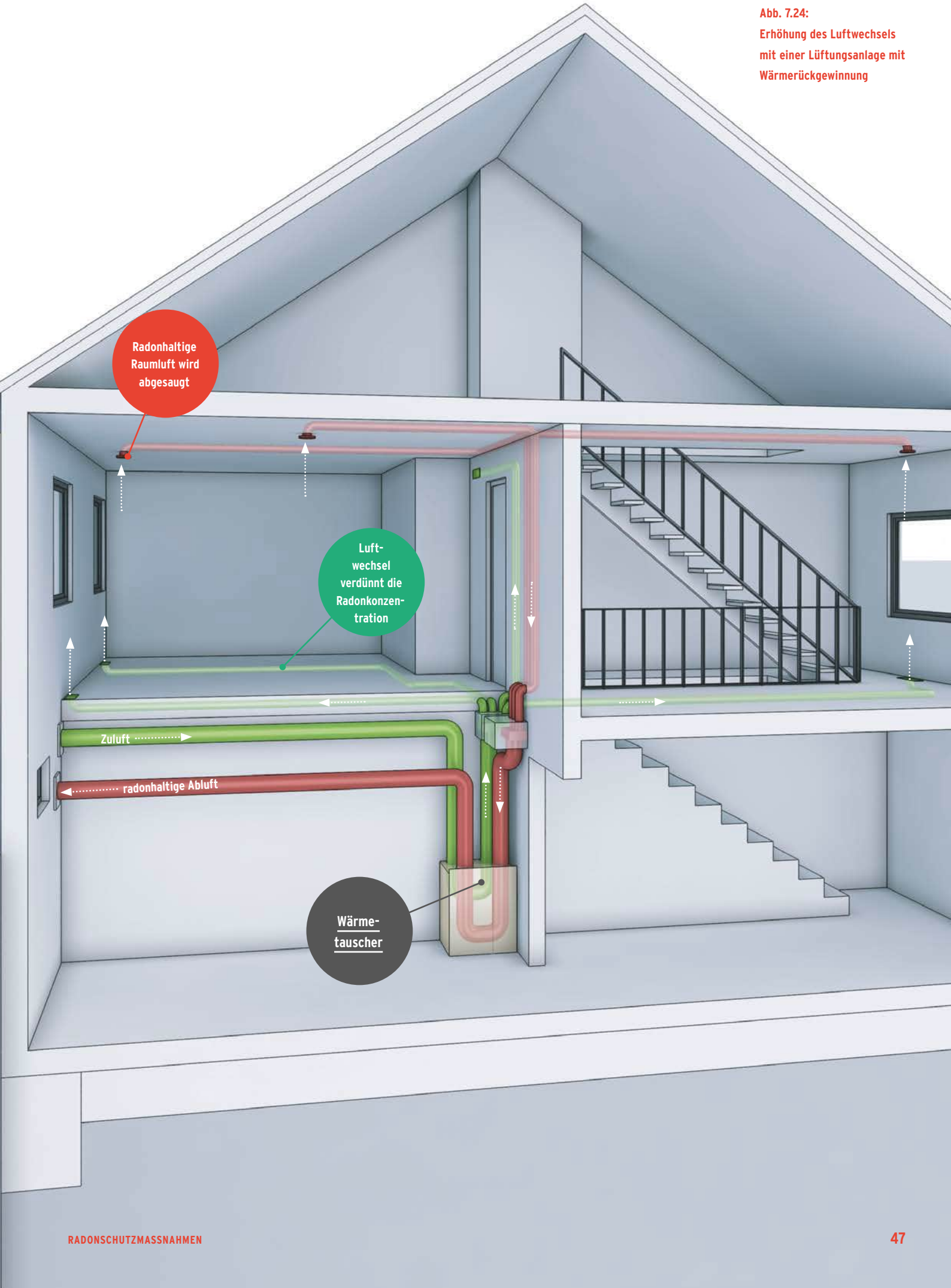


Abb. 7.24:
Erhöhung des Luftwechsels mit einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung

Abluftanlagen

Bei Abluftanlagen muss sorgfältig darauf geachtet werden, dass der Ersatz der abgesaugten Luft gezielt und nicht über undefinierte Undichtigkeiten in der Gebäudehülle erfolgt. Oberirdische Nachströmöffnungen, -ventile und -durchlässe können in Gebäuden mit erhöhten Radonwerten nicht auf die notwendigerweise geringen Druckverluste von unter 1 Pa dimensioniert werden. Eine Verbesserung gegenüber Abluftanlagen ohne Luftnachströmung tritt zwar ein, Unterdruckwerte von 5 bis 10 Pa, wie sie beim Betrieb von Nachströmeinbauten auftreten, sind aber nicht optimal. Für diese Fälle wäre ein Zuluftventilator oder ein Zu- und Abluftgerät (es gibt Zimmergeräte mit Wärmerückgewinnung) einzusetzen. Die Auslegebedingung für Nachströmventile gemäß DIN 1946-6E, wonach bei Vorhandensein von raumluftabhängigen Feuerungen max. 4 Pa, in allen übrigen Fällen 8 Pa Unterdruck nicht überschritten werden darf, ist in Gebieten mit erhöhtem Radonpotenzial für das Erd- und das erste Obergeschoss nicht ratsam. Nachströmöffnungen mit Filter müssen regelmäßig gemäß den Werksangaben gewartet werden. Soll die Dichtheit der Gebäudehülle bestimmt oder Luftlecks geortet werden, kann eine sogenannte „nL50-Messung" weiterhelfen.

Zuluft-Erdregister

Erdregister zur Vorwärmung der Zuluft für Lüftungsanlagen scheinen gemäß heutigem Kenntnisstand bezüglich Radonbelastung unempfindlich zu sein, wenn sie als geschlossene Rohre (Kunststoff) ausgeführt werden. In jedem Fall sollten Kunststoffrohre mit gasdichten Stößen eingesetzt werden. Mit erheblichem Radonrisiko belastet und deshalb möglichst zu vermeiden ist in Radonvorsorgebieten das Ansaugen von Luft über Drainagerohre oder Sickerleitungen.

Thermischer Auftrieb statt Ventilatoren

Führt der Abluftkanal durch unbeheizte Räume (z. B. Dachboden), ist Wärmedämmung erforderlich, um Kondensat zu vermeiden.

Betrieb und Wartung

Zu jeder Lüftungsanlage gehört eine klare Dokumentation und einfache Bedienungsanleitung. Der Radonaspekt und die sich daraus ergebenden besonderen Kontrollaufgaben, bspw. die periodische Überprüfung der Luftvolumenströme, sollten genauso wahrgenommen werden wie die periodische Messung des Radongehalts in den Wohnräumen.

Ventilatoren

Wird ein Ventilator eingesetzt, soll aufgrund der speziellen Anforderungen ein möglichst optimales Produkt gewählt werden.
Die Anforderungen sind:

- hohe Lebensdauer
  Wegen des erforderlichen Dauerbetriebes sollte auf entsprechend ausgelegte Geräte geachtet werden. Es gibt Geräte, für die eine Mindestlebensdauer von 80.000 Stunden angegeben wird.
- Reguliermöglichkeit
  Für die Ersteinstellung und für etwaiges späteres Nachregulieren sollte die Möglichkeit einer Drehzahleinstellung bestehen. Eine einfache Möglichkeit mit gutem Wirkungsgrad besteht bei Gleichstrommotoren (elektronisch kommutierte Motoren). Es ist nicht hilfreich, aus Sicherheitsüberlegungen einen überdimensionierten Ventilator einzubauen, der dann jahrelang mit schlechtesten Wirkungsgraden im Teillastbetrieb läuft (Werte unter 5 % sind keine Seltenheit).
- Betriebsanzeige
  Weil der Radongehalt bei Anlageausfall schnell wieder ansteigt, muss an sichtbarer Stelle eine Betriebsanzeige (z. B. eine Signallampe in der Wohnung) vorhanden sein.
- hoher Wirkungsgrad
  Zwischen den verschiedenen Ventilatortypen gibt es bis zu fünffache Wirkungsgraddifferenzen. Es ist wichtig, einen möglichst effizienten Ventilator einzusetzen. Bei 10 Jahren Betriebszeit können Betriebskostenunterschiede in der Größenordnung von über 500 € und mehr entstehen.
- Leistung, Fördermenge und Energieverbrauch
  Die Anlagenkennwerte schwanken im Einzelfall sehr stark, da sie von Undichtigkeiten, der Bodenpermeabilität und den Strömungsdistanzen abhängig sind. Durchschnittswerte erfolgreicher Sanierungen (Radonbrunnen, Gebäudeunterlüftungen) erzeugen unter dem Gebäude Unterdrücke in der Größenordnung von 5-10 Pa. Die elektrische Leistungsaufnahme der für Einfamilienhäuser eingesetzten Ventilatoren liegt zwischen 20 und 100 W.
- Leckluftströmungen vermeiden
  Zur Vermeidung von Leckluftströmungen (Austritt von radonhaltiger Luft ins Gebäude) ist darauf zu achten, dass der Ventilator außerhalb der Aufenthaltsräume montiert wird und dass die druckseitigen Kanäle nicht durch Aufenthaltsräume führen. Schwachstellen können die Rohrverbindungen sein. Bei hohen Dichtigkeitsanforderungen sind deshalb verschweißte Kunststoffrohre zu bevorzugen.
- Schallschutz
  Zur Vermeidung von Geräuschbelästigungen durch den Lüftungsbetrieb sind häufig Schallschutzmaßnahmen erforderlich (z. B. schallgeschützte Ventilatoren). Es ist zweckmäßig, den Ventilator im Dachraum unterzubringen, wo er wettergeschützt und auch hinsichtlich Schallausbreitung gut abschirmbar ist. Die Montage ist auch außerhalb der Gebäudehülle möglich, wenn damit keine unzumutbare Schallbelästigung der Nachbarn verbunden ist. Die Befestigung der Rohre und Lüfter soll elastisch erfolgen, um bei größeren Ventilatoren Körperschallübertragungen zu verhindern. Bei Kleinventilatoren stellt der Luftschallpegel eher ein mögliches Problem dar. In diesem Fall ist eine Platzreserve für den Einbau eines Schalldämpfers ratsam.
- Kondensat
  Beim Einbau von Lüftungssystemen mit Ventilatoren müssen nachteilige Auswirkungen von Kondenswasserbildungen vermieden werden. Bei ungedämmten Lüftungsrohren kann Kondensat im Innern und an der Oberfläche auftreten. Deshalb sollten folgende Maßnahmen erfolgen:
  - Erforderlichenfalls Wärmedämmung der in Gebäude und Dachraum geführten Rohre,
  - Einbau von Kondensatableitungen in das Steigrohr, um das Eindringen von Kondensat in den Ventilator und eventuell in die Baukonstruktion zu verhindern,
  - Leitungen mit durchgängiger Steigung, damit das Kondensat in den Schacht abfließt,
  - eventuell Anlage von Kondensatgruben im frostfreien Bereich unterhalb der Steigleitungen zur Aufnahme von Kondensat, das im Abluftrohr entsteht.

8. Planung und Bauausführung

Das vorangegangene Kapitel hat ausführlich Möglichkeiten aufgeführt, Maßnahmen für einen wirksamen Radonschutz im Neubau wie im Bestand zu konzipieren. Hier soll nun abschließend ein Überblick über grundlegende Aspekte des Radonschutzes bei der Planung und Bauausführung gegeben werden.

Vorgehen

Konzeptionelle Abdichtungs- und Lüftungsmaßnahmen sollten sowohl bei Neubauten wie auch bei Sanierungen aufeinander abgestimmt und zu sinnvollen Strategien verbunden werden. Die Planung der Präventionsmaßnahmen bei Neubauvorhaben unterscheidet sich deutlich von jener bei der Sanierung bestehender Gebäude. Für ein zweckmäßiges Vorgehen lassen sich jedoch für beide Kategorien fünf Grundschritte festhalten.

Radonbelastung beurteilen

Bei Neubauten sind Informationen von zuständigen Stellen über die Radonbelastung des Gebietes zu beschaffen, in dem gebaut werden soll. Bei bestehenden Gebäuden sollten Ergebnisse von Radonmessungen die Grundlage der Maßnahmenplanung bilden. Die Höhe der Radonbelastung bestimmt, ob Maßnahmen nötig sind bzw. mit welchem Aufwand und in welchem Zeitrahmen diese Baumaßnahmen durchgeführt werden sollten.

Ausweichmöglichkeiten festhalten

In der frühen Planungsphase kann abgewogen werden, ob es sinnvoll erscheint, „dem Radon auszuweichen“. Zur Diskussion gestellt werden kann z. B. der Verzicht auf Arbeits-, Wohn- und Aufenthaltsräume im Kellerbereich. Eine Tiefgarage kann aufgrund der einzubauenden Lüftungstechnik wesentlich zur Senkung der Radonkonzentration im Keller und dem darüber liegenden Wohnbereich beitragen.

Geordnete und abgestufte Maßnahmenpakete einsetzen

Je nach Radonbelastung und baulicher Ausgangslage sollten die vorgesehenen Maßnahmen zu abgestimmten Paketen zusammengestellt werden. Es bietet sich dabei die vorgenannte Einteilung nach konzeptionellen, bautechnischen sowie lüftungstechnischen Maßnahmen an. Vor allem bei Sanierungen ist es zweckmäßig, mit einfachen Maßnahmen zu beginnen und deren Erfolg zu überprüfen. Erforderlichenfalls können weitere Verbesserungsstufen vorgesehen werden.

Ausführung überwachen

Ähnlich wie bei anderen Spezialausführungen am Bau, z. B. dem Einbau einer Dämmschicht, sollten die Maßnahmen zum Radonschutz von der Bauleitung und Bauführung besonders überwacht werden. Zwischenabnahmen von ausgeführten Abdichtungen sollten vorgeschrieben und durchgeführt werden, bevor weitere Arbeiten ausgeführt werden, die Nachbesserungen oder Ergänzungen erschweren oder verhindern.

Erfolg kontrollieren

Allein die Messung der Radonkonzentration nach Abschluss der Arbeiten gibt Aufschluss über den Erfolg der Radonschutzmaßnahmen. Zur Überprüfung des Erfolges einzelner Arbeitsetappen können allerdings auch andere Messungen empfohlen werden. Messungen, die in Begleitung von Radonschutzmaßnahmen beim Neubau und bei Sanierungen angewendet werden können, sind auf Seite 35 zusammengefasst.

Prävention und Sanierung auf einen Blick

Auf den folgenden beiden Doppelseiten wird der Verlauf einer zweckmäßigen Radonprävention bei Neubauvorhaben und das erfolgversprechende Vorgehen bei einer Radonsanierung bestehender Gebäude in grafischer Übersicht gezeigt. Typische Maßnahmen sind tabellarisch zusammengefasst.

Radonprävention bei Neubauten

Es ist zweckmäßig, die Radonprävention je nach Ausgangslage mit unterschiedlichem Aufwand zu betreiben. Ob keine Vorkehrungen, ein „Standard-Gebäudeschutz“ oder eine „besondere Radonprävention“ angezeigt sind, hängt in erster Linie davon ab, wie hoch die Radonbelastung im Gebiet des Baustandortes von den zuständigen Stellen angegeben wird. Zusätzlich können die besonderen Gegebenheiten berücksichtigt werden, die in der Baugrube angetroffen werden.
Die folgende Auswahl von häufigen und typischen Maßnahmen illustriert, was zur Radonprävention bei Neubauten gehören kann.
Es handelt sich dabei um eine Auswahlliste. Wenn die konzeptionelle Maßnahme, keine Wohn-/Aufenthaltsräume im Untergeschoss anzuordnen, realisiert wird, können häufig viele weitere Maßnahmen entfallen.
Letzten Endes kann nur am konkreten Objekt das passende Maßnahmenpaket zusammengestellt werden. Dabei geben auch die einschlägigen Normen wesentliche Orientierungshilfen (z. B. **[28,29]**).

Standard-Gebäudeschutz

Strategische Planung und Vorstudien

- dichte Bodenkontruktion und Schutz gegen Bodenfeuchte gemäß DIN

Vorprojekt und Projekt

- Beton-Fundamentplatte 2 und außen liegende Dichtungsbahnen 3 bzw. Beschichtungen
- möglichst wenige Durchdringungen der Gebäudehülle durch Leitungen, Schächte etc. im erdberührten Bereich
- eventuell zweite Dichtungsebene: Stahlbetondecken über Untergeschoss und abgeschlossener Kelleraufgang
- Schächte (Leitungen, Lifte) und Kamine so planen, dass sie nicht zu Transportkanälen für Radon in Aufenthaltsräumen werden (zusammengefasst, abdichtbar)
- Raum- und Lüftungskonzept, das möglichst keinen Unterdruck im Unter- und Erdgeschoss erzeugt, Nutzungsgerechte Frischluftmenge nach DIN 1946 **[15]** 4
- Abluftanalagen im Bereich des Unter-/Erdgeschosses sofern nötig, als Zu- und Abluftsystem mit Überdruck konzipieren
- Wandkonstruktion und Baumaterial so wählen, dass darin keine vertikale Radonausbreitung erfolgt

Realisierung der geplanten Maßnahmen

- separate Abnahme ausgeführter Dichtungsarbeiten

Nutzung

- Radonmessung zur Erfolgskontrolle, Information der Bewohner bzw. Betreiber sowie Instruktion und Dokumentation über installierte Maßnahmen, insbesondere technische Einrichtungen

[28] DIN 18195 Teil 1 bis 12 und Beiblatt 1 (2010 – 2011) Bauwerksabdichtungen

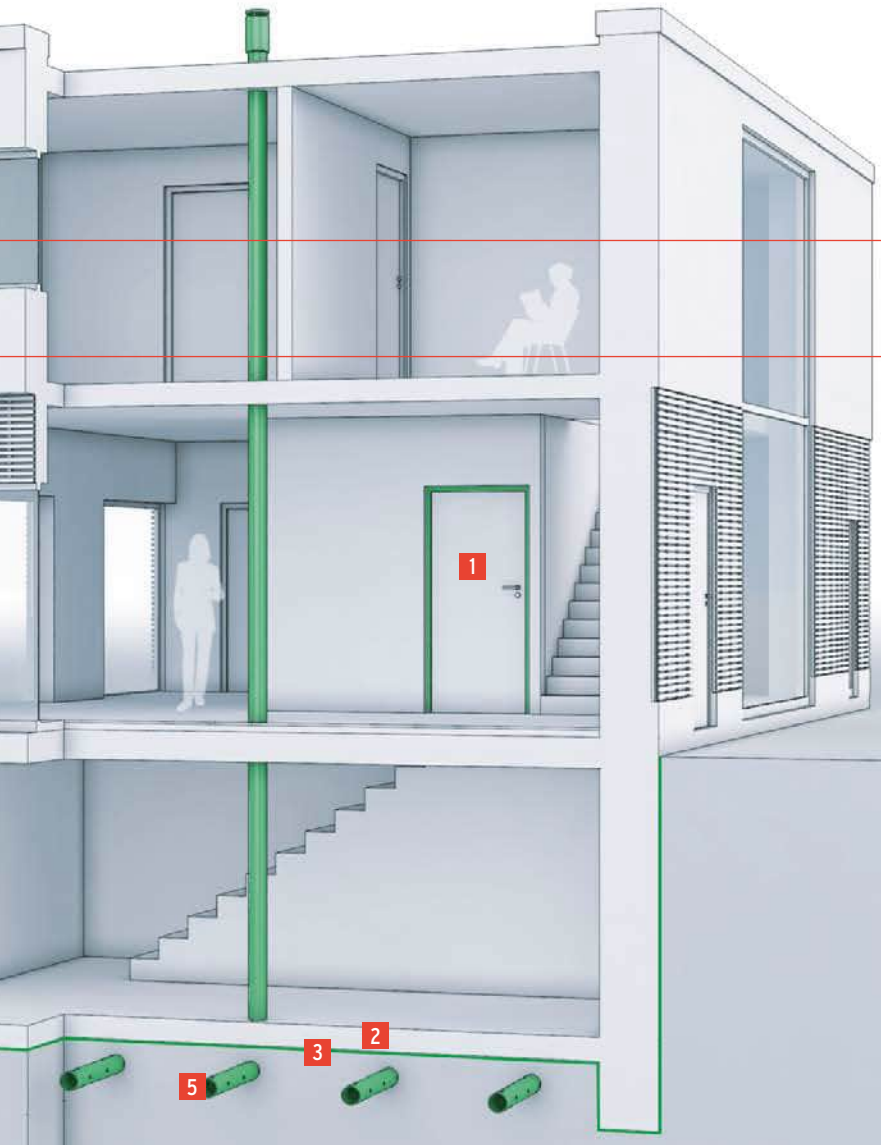
[29] DIN EN 1992-1-1:2011-01 Titel (deutsch): Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau

Strategische Planung und Vorstudien

- keine offenen Verbindungen vom Untergeschoss zu darüber liegenden Etagen
- Abschluss des Treppenhauses gegen das Untergeschoss vorsehen 1

Vorprojekt und Projekt

- bewehrte Fundamentplatte
- unter dem Fundament vorbereitete Absaugstelle in einer Kies-Zwischenlage
- sekundäre Dichtungsperimeter (Kellerdecke/Kelleraufgang) durchgängig vorsehen
- Radondrainageleitung unter der Gebäudesohle mit Anschlussmöglichkeit für die spätere eventuelle Absaugung von Bodenluft 5
- Einbau von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung prüfen und planen
- zusätzliche Sperrschichten in den Wänden vorsehen



Realisierung der geplanten Maßnahmen

- separate Abnahme lüftungstechnischer Maßnahmen

Nutzung

- Inbetriebsetzung lüftungstechnischer Anlagen und Einweisung der Anwender, zweite und periodische Kontrollmessungen im Fünfjahresabstand

Radonsanierung bestehender Bauten

Wie bei Neubauvorhaben bestimmt die Ausgangslage auch bei bestehenden Bauten wesentlich, welche Maßnahmen zur Radonsanierung zum Einsatz kommen sollten. Um zusätzliche Planungssicherheit zu erreichen, sollten neben den eingeholten Informationen über die Radonbelastung des Gebietes konkrete Messungen im Gebäude durchgeführt werden. Auch legen bestimmte Bautypen sowie das Alter eines Gebäudes nahe, dass Sanierungsmaßnahmen angezeigt sein könnten.
Sind Umbau- oder Sanierungsarbeiten in den Unter- und Erdgeschossräumen vorgesehen, sollten darauf abgestimmte Radonschutzmaßnahmen überdacht werden. Insbesondere bei Veränderungen des Heizungs-/Lüftungssystems lassen sich solche Schutzmaßnahmen gut integrieren.
Bei bautechnischer Totalrekonstruktion sind wesentlich konsequentere Radonschutzmaßnahmen realisierbar, als wenn das Gebäude allein aus Gründen der Radonbelastung saniert wird. Mehr noch als bei der Radonprävention bei Neubauten ist es bei der Sanierung bestehender Bauten sinnvoll, stufenweise vorzugehen und konzeptionell zwischen einer „einfachen Radonsanierung“ und einer „umfassenden Radonsanierung“ zu unterscheiden. (Siehe dazu auch die Begehungs-Checkliste im Anhang).
Besonders vorteilhaft durchzuführen ist eine Radonsanierung, wenn ein Gebäude ohnehin renoviert/rekonstruiert wird. Wenn eine erhöhte Radonkonzentration erst nach Beendigung von baulichen Maßnahmen entdeckt wird, ist die Durchführung von Radonschutzmaßnahmen in der Regel deutlich aufwändiger. Es kann daher bei bestehenden Gebäuden angezeigt sein, mit einem Paket von kostengünstigen Sofortmaßnahmen die Situation zu verbessern, bis mit endgültigen Maßnahmen Abhilfe geschaffen wird.
Oft erweisen sich diese einfachen Sofortmaßnahmen als so erfolgreich, dass keine weiteren Maßnahmen erforderlich sind. Als einfach gelten solche Maßnahmen, die keine schwerwiegenden Eingriffe in die Gebäudestruktur erfordern, in der Regel kurzfristig realisierbar sind und vergleichsweise geringfügige Kosten verursachen. Typische Beispiele:

- Abdichten von Fugen und Ritzen mit Dichtungsmassen.
- Verzicht (eventuell nur vorübergehend) auf Aufenthaltsräume im Untergeschoss.
- Gezieltes Lüftungsverhalten (Kellerfenster oder Kellerluken nach draußen offen halten, Kellertür geschlossen halten etc.).
- Thermischen Auftrieb vom Treppenhaus und von Abluftanlagen durch Nachströmöffnung im Erdgeschoss brechen (Klappe).
- Passive oder aktive Belüftung von Kriechkellern und Unterbodenhohlräumen.
- Türabdichtungen und Türschließer anbringen.

Einfache Radonsanierung

Strategische Planung und Vorstudien

- keine offenen Verbindungen vom Untergeschoss in darüber liegende Geschosse 1

Vorprojekt und Projekt

- Festlegen von primärem und sekundärem Dichtungsperimeter
- Wahl der Dichtungsmittel (Dichtungsbahnen, Beschichtungen, Fugendichtungen etc.)
- Maßnahmen zur Entspannung des Unterdrucks im Untergeschoss konzipieren (Nachströmöffnungen für Abluftanlagen, Treppenhausauftrieb etc.)

Realisierung der geplanten Maßnahmen

- direkte Verbrennungsluftzufuhr für Heizkessel, Öfen, Kamine installieren.
- dichte Rauchrohrklappen bei Einzelöfen, sofern zulässig
- Abdichtungen von Durchstoßungen, Fugen und Ritzen an Bauteilen gegen Erdreich (primärer Dichtungsperimeter); je nach Ausgangslage mit Fugendichtungsmitteln (Kitte, Dichtungsbänder) oder mit flächigen Abdichtungen (Dichtungsbahnen, Beschichtungen)
- Abdichten von Wänden, Decken und Türen zwischen Aufenthalts- und Kellerräumen (sekundärer Dichtungsperimeter)
- Abdichten und/oder direkte Außenluftzufuhr im Untergeschoss für mehrgeschossige Schächte

Nutzung

- Messungen zur Erfolgskontrolle, Information der Bewohner bzw. Betreiber sowie Instruktion und Dokumentation über installierte Maßnahmen, insbesondere technische Einrichtungen
- Inbetriebnahme und Abnahme lüftungstechnischer Anlagen
- Zweite und eventuell periodische Kontrollmessungen im Fünfjahresabstand (vor allem wenn ehemals Konzentrationen über 1.000 Bq/m³ vorhanden waren)

Umfassende Radonsanierung

Strategische Planung und Vorstudien

2 • Aufenthaltsräume im Untergeschoss nur mit speziellen Maßnahmen
• außen liegender Kellerabgang
3 • keine Naturbodenkeller ohne spezielle Maßnahmen
4 • Abschluss des Treppenhauses gegen das Untergeschoss vorsehen
• Umfassende lüftungstechnische Maßnahmen

Vorprojekt und Projekt

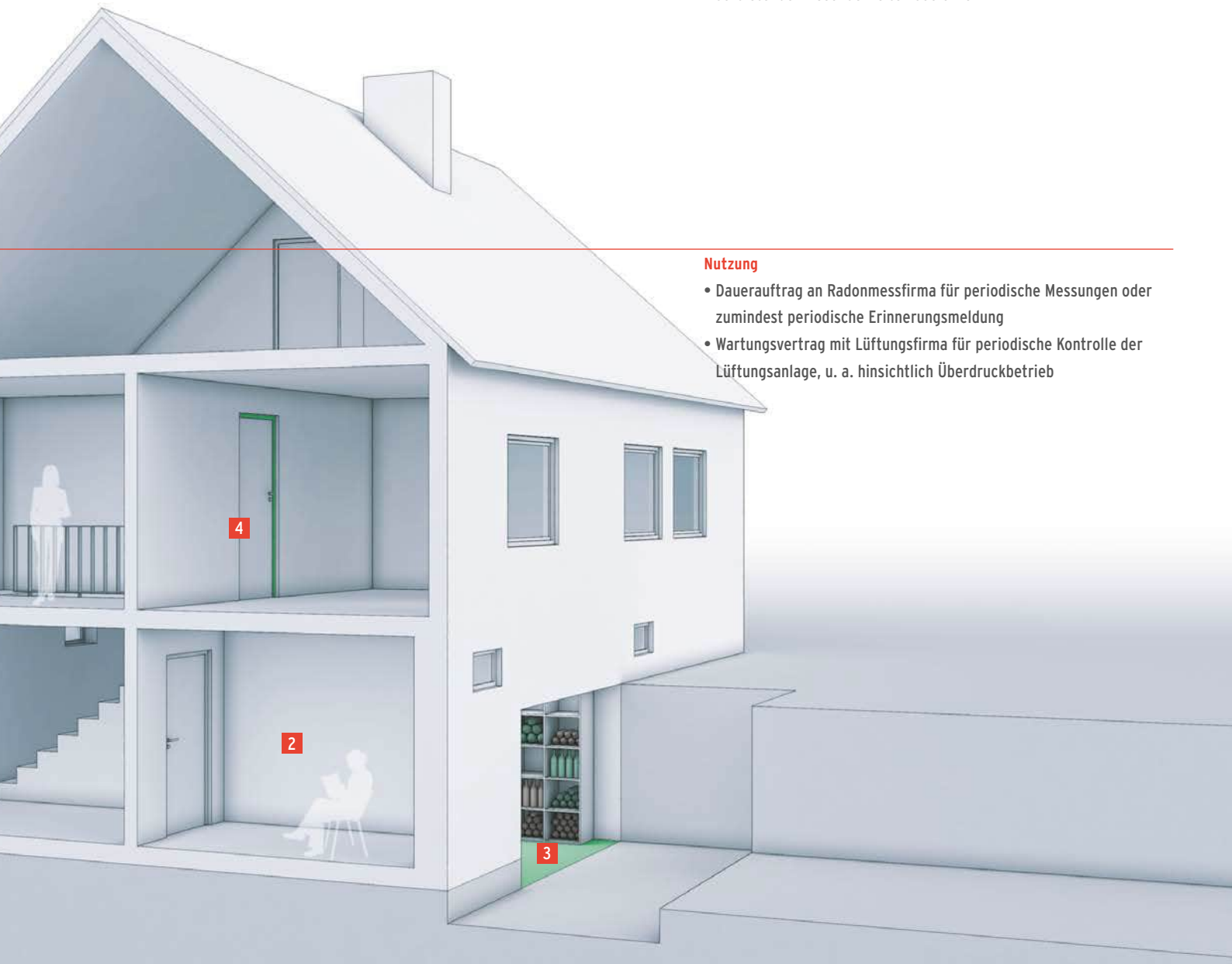
• Möglichkeiten zur Unterdruckerzeugung unter dem Gebäude prüfen und planen (Schacht, Rohrregister); eventuell Versuch mit Sickerleitung anordnen
• Einbau von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung prüfen und planen

Realisierung der geplanten Maßnahmen

• Lüftungstechnische Anlagen gemäß Projekt und bei der Sanierung auftretenden Besonderheiten ausführen

Nutzung

• Dauerauftrag an Radonmessfirma für periodische Messungen oder zumindest periodische Erinnerungsmeldung
• Wartungsvertrag mit Lüftungsfirma für periodische Kontrolle der Lüftungsanlage, u. a. hinsichtlich Überdruckbetrieb

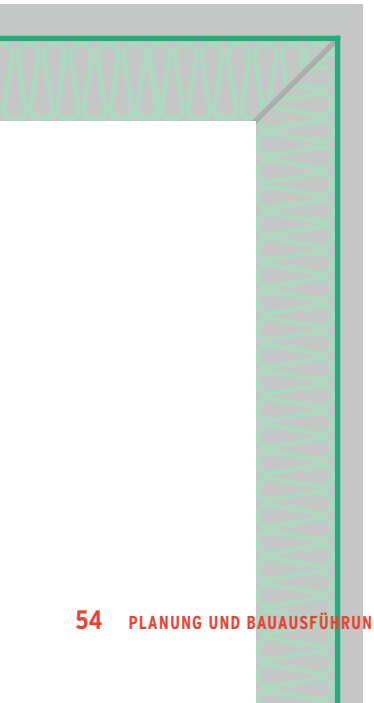


Synergien und Zielkonflikte

Radonprävention bei Neubauten und Radonsanierung von bestehenden Gebäuden ist eine Bauaufgabe, die erst seit wenigen Jahren ernsthaft in die Planung einbezogen wird. Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass ein befriedigender Radonschutz in der Regel keinen allzu großen Zusatzaufwand verursachen muss, besonders wenn seine Planung systematisch und kompetent angegangen wird. Es hat sich auch gezeigt, dass kaum Zielkonflikte zu anderen Planungszielen bestehen, sondern vielfach Synergien genutzt werden können.

Wärmeschutz

Aus der Sicht eines optimalen Wärmeschutzes ist es wünschenswert (bzw. gemäß Wärmeschutzverordnung sogar notwendig), eine klare Abgrenzung zwischen beheizten und unbeheizten Räumen zu definieren und die Gebäudehülle gegen Wärmeverluste zu dämmen. Diese Abgrenzung fällt in der Regel mit der primären oder sekundären Dichtungsebene gegen Radon zusammen. Radondichte Dämmschichten erfüllen meist auch die Anforderungen an den Wärmeschutz. Achtung: Vorsicht ist geboten, wenn die Gebäudehülle isoliert und damit der Luftaustausch herabgesetzt wird oder neue Heizungssysteme eingebaut werden, ohne eventuelle Wegsamkeiten für Radon aus dem Boden abzudichten. In diesem Fall könnte die Radonkonzentration im wärmegedämmten Haus über der liegen, die im alten Zustand festgestellt worden ist.



Luftdichtigkeit

Die Frischluftzufuhr sollte über dafür vorgesehene Öffnungen oder lüftungstechnische Anlagen erfolgen und die Herkunft der Frischluft sollte ebenso definiert sein wie die Abgabe der Fortluft. Die beheizten Räume sollten prinzipiell von einer Luftdichtigkeitsschicht umgeben sein, die einen geschlossenen geometrischen Körper bildet. Dies entspricht genau dem, was auch ein leistungsfähiger Radonschutz braucht. Ein Luftwechsel über undefinierte Undichtigkeiten in der Gebäudehülle, wie er bei vielen unsanierten Altbauten vorkommt, entspricht nicht den Anforderungen des Radonschutzes.

Feuchte- und Grundwasserschutz

Die Bauteilsicherung gegen eindringende Feuchtigkeit verläuft vollständig im Sinne des Radonschutzes. Der Unterschied besteht im Wesentlichen darin, dass beim Feuchteschutz Undichtigkeiten sehr gut und rasch lokalisiert und nachgebessert werden können, während Radonlecks sehr viel schwieriger aufzufinden sind. Äußerste Exaktheit ist daher bei den Abdichtungsarbeiten erforderlich.

Schallschutz

Schallbrücken haben eine ähnliche Wirkungsweise wie Radonleckstellen. Bereits kleine Löcher und Öffnungen verringern den Schutz einer Maßnahme erheblich. Bewährte Schalldämmelemente können daher auch zur Radondichtigkeit beitragen, etwa als Schallschutztüren zwischen Untergeschoss und Aufenthaltsräumen.

Die Liste solcher Beispiele ließe sich fortsetzen auf den Planungsfeldern, die zu bearbeiten sind, von Architektur bis Zivilschutz. Sie werden in der Regel durch die Anforderungen an den Radonschutz nicht eingeschränkt. Eventuelle Wechselwirkungen sollten jedoch stets bedacht werden.

Brandschutz

Der Brandschutz arbeitet ebenso wie der Radonschutz mit Abschlüssen. Für normale Brandrisiken werden allerdings keine rauchgasdichten Öffnungselemente verlangt. Elastische Dichtungen, wie sie aus der Sicht des Radonschutzes erwünscht sind, stehen wegen ihrer Brennbarkeit den Anliegen des Brandschutzes sogar oft entgegen. Echte Konflikte ergeben sich dadurch aber nicht. Schwieriger ist die Situation bei den Rauchrohr- und Kaminklappen, die nur dicht schließend ausgeführt werden dürfen, wenn die betreffende Feuerstelle kurzzeitig betrieben wird und unter dauernder Aufsicht steht (Auskunft erteilen die Schornsteinfegermeister). Damit bleibt als einzige Möglichkeit zum Aufheben der Unterdruckwirkung von Öfen und Kaminen, dass eine Außenluftzufuhr eingebaut wird. Bei bestehenden Einrichtungen kann jedoch häufig keine Außenluftzufuhr ergänzt werden. Bei solchen Unwegsamkeiten bleibt nur die Abwägung zwischen dem Verzicht auf die Nutzung der Einrichtung und dem Gesundheitsrisiko, das von eindringendem Radon ausgeht.

Geruch, Hygiene, Gesundheit

Eine Folge von Feuchtigkeit oder unzulänglichem Luftwechsel bzw. ihrer Kombination ist Modergeruch. Ein solcher Geruch kann ein Hinweis darauf sein, dass auch Radon im betreffenden Raum in erhöhter Konzentration vorliegt. Eine fachgerechte Radonsanierung sollte dazu führen, dass gleichzeitig eventuell vorhandene Feuchte- und Luftwechsel-Unzulänglichkeiten behoben und somit störende Gerüche und feuchtes Innenklima mit mikrobiellen Folgerisiken tendenziell reduziert werden.

9. Schlusswort

Die Gefahr für unsere Gesundheit, die von Radon und seinen Zerfallsprodukten ausgeht, lässt sich nicht unmittelbar erkennen. Seine Existenz kann nur durch Messungen nachgewiesen werden. Wie kann die Gefahr von natürlicher Radioaktivität in einer Art und Weise vermittelt werden, die zum Handeln veranlasst, jedoch keine Ängste in der Bevölkerung auslöst? Denn wir können die Gefahr nicht sehen, wir können sie nicht riechen oder schmecken. Unsere Sinnesorgane helfen uns beim Radon nicht weiter. Die Radioaktivität, die das Radon naturwissenschaftlich auszeichnet, kann wiederum in Teilen der Bevölkerung Ängste aufgrund einer möglichen „Verstrahlung", und wegen unmittelbarer Gefahren für Leib und Leben auslösen. Die psychosozialen Folgen solcher Ängste haben nicht selten negative Auswirkungen auf die Gesundheit der Betroffenen. Diese Zusammenhänge haben Eingang in neue gesetzliche Regelungen gefunden. In Zukunft gilt es, Bürgerinnen und Bürger verstärkt durch sachliche Informationen, die auf dem Stand von Wissenschaft und Technik beruhen, über das Risiko aufzuklären und Handlungsmöglichkeiten aufzuzeigen, sich und seine Familie, die Bewohner eines Hauses ebenso wie Betriebsangehörige oder Nutzer öffentlicher Gebäude weitestgehend zu schützen. Das vorliegende Handbuch will dazu einen Beitrag leisten.
Das Radon-Handbuch richtet sich an alle interessierten Bürgerinnen und Bürger, die „tiefer" in das Thema eindringen wollen. Darüber hinaus bietet es Hauseigentümern und Bauherren ebenso wie Architekten und Ingenieuren anschauliche Beispiele, wie ein effektiver Radonschutz in die Nutzung der Innenräume eines Hauses, den Baukörper und die Gebäudetechnik integriert werden kann.

Jede Maßnahme
gegen Radon im Gebäude
schützt Leben.

10. Anhang

Reduktionspotenzial von Sanierungsmaßnahmen

Sanierungsmethode	Erreichbare Reduzierungen der Radonkonzentration	Bemerkungen
Einfache Abdichtmaßnahmen	0 bis 25 %	Anwendung im Bereich bis zu 1.000 Bq/m³
Unterdruckhaltung in Kellern, Kellerentlüftung mittels Kleinventilator	50 bis 80 %	
Aufwendige Isolierschichten in oder auf Fußböden ohne Einbeziehung der Wände	30 bis 80 %	
Aufwendige Isolierschichten in oder auf Fußböden mit Einbeziehung der Wände	50 bis 90 %	Wände durchgängig mit Folie gesperrt
Unterdruckhaltung innerhalb von Fußboden-konstruktionen mit Einbeziehung der Wände	10 bis 90 %	Ergebnis stark abhängig von der Art der anschließenden Wände
Unterdruckhaltung unter dem Gebäude (Drainagesystem Punktabsaugungen)	10 bis 95 %	Abhängig von Bodenpermeabilität und Lage der Drainagerohre
Aufwändige Isolierungen im neu eingebrachten Fuß-boden, Unterdruckhaltung unter dem Gebäude	bis 99 %	Bis auf unvermeidbare Schwachstellen lückenlose Isolierschicht durch das gesamte Gebäude

Checkliste Beweissicherung/ Hausbegehung

Das BfS empfiehlt, Gebäude mit Radon-konzentrationen über 100 Bq/m³ in Aufenthaltsbereichen zu analysieren, um ggf. eine erfolgversprechende Sanierung in die Wege leiten zu können. Die nachfolgende Checkliste bietet eine Hilfe für diese Erfassung und Analyse des Zustandes (Beweissicherung). Bei der Begehung ist es wichtig, sich die denkbaren Ursachen einer erhöhten Radonkonzentration und die möglichen Eindring- und Ausbreitungswege des Radongases vorzustellen und aufzuspüren. Für die zu planenden Sanierungsschritte ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Transportwege des Radongases erkannt und ggf. mit Messungen überprüft und in ihrer Bedeutung quantifiziert werden.

Bauteil/Bauelement	Wahrnehmung/Prüfung	Hinweise
Abgrenzungen	Welche Bauteile und Räume grenzen an das Erdreich? Sind alle Flächen bekannt und erfasst? Welche Bauteile grenzen die Aufenthaltsräume gegen andere Räume ab, z. B. die zu Lagerzwecken genutzten Kellerräume?	Wenn Dichtungsmaßnahmen durchgeführt werden sollen, ist es nötig, sich den Verlauf der Grenzflächen präzise festzustellen und in die Dichtmaßnahmen in vollem Umfang einzubeziehen.
Keller	Modergeruch und Feuchte deuten auf ungenügenden Luftwechsel und/oder Feuchtestellen hin.	Messung der Radonkonzentration in den betroffenen Räumen.
Aufenthaltsräume	Geruch und Feuchte in Aufenthaltsräumen.	Insbesondere bei Aufenthaltsräumen direkt über Erdreich gilt dasselbe wie bei Kellerräumen. In unterkellerten Erdgeschossräumen kann es ein Indiz für eindringende, möglicherweise radonbelastete Kellerluft sein.
Boden im untersten Geschoss	Aus welchen Materialien besteht die Fußbodenkonstruktion zum Erdreich hin (Naturboden, Dielenbretter, Platten, Steine, durchgehende Bodenplatte aus Beton)? Sind Risse oder Löcher vorhanden? Wie kann die Fugenbeschaffenheit beurteilt werden?	Es gilt, flächige, linienförmige oder punktuelle Schwachstellen als mögliche Leckagezonen ausfindig zu machen. Deren Zustand ist genau zu prüfen. Die Abdichtungswürdigkeit und -möglichkeit ist zu bewerten. Dabei sollen alle Kelleraußenwände oder Wände, die an Aufenthaltsräume angrenzen, als Gesamtes beurteilt werden. Sind Möglichkeiten der Bodenentlüftung vorhanden?
Kellerwände gegen das Erdreich	Aus welchen Materialien bestehen die Wandkonstruktionen in den einzelnen Kellerräumen (z. B. Hohlwände, Bruchstein, Stahlbeton)? Kann auf die Gründung geschlossen werden? Sind Risse, Löcher sichtbar? In welchem Zustand sind die Anschlussfugen an den Boden und die Decke?	Es gilt, flächige, linienförmige oder punktuelle Schwachstellen als mögliche Leckagezonen ausfindig zu machen. Der Zustand ist genau zu prüfen.
Kellerwände gegen Aufenthaltsräume	Aus welchen Materialien und in welchem Zustand sind die Wände? Wie sehen die Fugen zwischen den einzelnen Bauelementen und die umlaufenden Anschlüsse der Decken an die Wände aus?	Vor allem der obere Abschluss von Zwischenwänden ist oft undicht. Bei Holz-Ständerkonstruktionen oft die ganze Wand. Wandkonstruktionen aus Hohlkammersteinen o. ä. bzw. zwei- oder mehrschalige Wände bilden ideale Ausbreitungspfade und können die Ursache für erhöhte Radonkonzentrationen in den oberen Gebäudebereichen sein.
Kellerfenster, Lüftungsöffnungen	Aus welchem Material bestehen sie und in welchem Zustand befinden sie sich? Führen die Fenster direkt nach außen, werden sie meist offen oder geschlossen gehalten? Gibt es sonstige Lüftungsöffnungen in den Außenwänden?	Die Lüftungsmöglichkeiten, aber auch die überwiegende Lüftungssituation sind genau zu protokollieren und zu analysieren.
Leitungen von/nach außen:	Sind Leitungen und Rohre (Elektrohauptstrang, TV-Kabel, Gashauptstrang, Telefonkabel, Wasser-/Abwasserrohre, Ölleitung von erdverlegtem Tank, Lüftungsleitung von Erdregistern, Erdsondenleitung der Wärmepumpe, Außenwitterungsfühler, Bodenabflüsse in Waschküche etc.) in sich radondicht und zum Mauerwerk/Fußboden hin radondicht verlegt?	In praktisch jedem Kellerraum sind Rohre und Leitungen anzutreffen. Von außen kommend können große Bodenvolumina als „Radoneinzugsgebiet" in Frage kommen und erhebliche „Radonfrachten" in das Gebäude bringen.

Bauteil/Bauelement	Wahrnehmung/Prüfung	Hinweise
Rohre und Leitungen im Gebäudeinneren	Gebäudeinneres: Elektroleitungen, Abwasserfallstrang, Kalt-, Warmwasserrohre, Telefonkabel, Gasrohre, TV-Kabel, Schornsteine, Heizungsrohre.	Dabei können Etagen übersprungen werden.
Heizung	Wie wird die Verbrennungsluft zugeführt? Welche Klappen und Öffnungen weist der Schornstein auf? Ist die Explosionsklappe des Schornsteins geschlossen?	Im Keller sollten Ursachen, die zu Unterdruck führen, unterbunden werden. Öffnungen zum Druckausgleich schaffen.
Kriechkeller	In welchem konstruktiven und baulichen Zustand befindet sich der Kriechkeller? Ist er belüftet?	Geschlossene Kriechkeller oder unter dem Haus liegende Hohlräume können hohe Radonkonzentrationen aufweisen.
Kellerdecke/Boden	Wie ist die Deckenkonstruktion in den einzelnen Kellerräumen (Holzbalken, Ausmauerungen, ausgefachte Stahlträger, Stahlbetondecke)? Sind Risse, Löcher sichtbar? Ist die Deckenkonstruktion in allen Kellerräumen einsehbar? In welchem Zustand sind die Anschlussfugen an die Wände? Wie ist die Beschaffenheit der Fugen? Kann ein Luftzug festgestellt werden? Wie sind der Fußbodenaufbau und dessen seitliche Anschlüsse in den darüber liegenden Räumen zu bewerten?	Es kann sein, dass der Hauptradonpfad durch oder entlang der Fugen vom Keller in darüber liegende Aufenthaltsräume führt. Insbesondere Leichtbau-Zwischendecken (z. B. Holzbalkendecken) sind oft sehr durchlässig.
Kellertüren	Ist das Untergeschoss über eine einzige Tür oder mehrere Zu-/Ausgänge erschlossen? Sind Aufenthaltsräume unmittelbar angrenzend? Wie sind die Türen beschaffen? Sind sie auch im Schwellenbereich dicht schließend? Können sie mit umlaufenden Dichtungen versehen werden? Können die Schlüssellöcher durch einen Sicherheitszylinder ersetzt werden? Wie sind die Türrahmen befestigt? Können sie nachträglich abgedichtet werden?	Je nach Situation ist den Kellertüren besondere Beachtung zu schenken. Allein durch ein Bartschlüsselloch können z. B. erhebliche Radongasfrachten strömen.
Kelleraufgang	Führt der Kelleraufgang in einen Hauskorridor, nach außen oder direkt in den Wohnbereich?	Ursachen, die in Folge Unterdrucks im Haus zum Ansaugen von Bodenradon führen, müssen erkannt und beseitigt werden.
Lufttechnische Anlagen	Kann die Innentreppe verschlossen werden?	Es ist die Drucksituation im Gebäude (zu unterschiedlichen Tages- und Jahreszeiten!) zu analysieren und es sind Hypothesen für die daraus abzuleitenden Maßnahmen zu formulieren.
Allgemeine Drucksituation, Luftströmungen im Gebäude	Befinden sich im Keller Abluftventilatoren (z. B. in der Waschküche)? Sind die Wohnräume an ventilatorbetriebene Abluftanlagen angeschlossen, z. B. Küche oder Bad/WC? Wie ist die Nachströmung sichergestellt?	Die Feuerräume von Öfen und Kaminen sollten gegen den Raum hin dicht abschließbar sein und die Verbrennungsluft sollte in großzügig dimensionierten Zuleitungen von außen herangeführt werden.
Kamine, Öfen	Ist der natürliche thermische Auftrieb über mehrere Geschosse wirksam? Wie beurteilen Sie die allgemeine Gebäudedichtheit? Gibt es andere unterdruckerzeugende Elemente wie Schächte, Kamine, Öfen etc.?	
	Woher stammt die Verbrennungsluft für Einzelöfen, Kamine etc.?	

Quellen

[1] ICRP 65: International Commission on Radiological Protection (ICRP). Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65, Ann. ICRP 23, 2, 1993

[2] International Agency for Research on Cancer (1988): Man-made mineral fibres and radon. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Vol. 43, Lyon: IARC

[3] 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, Mäkeläinen 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. British Medical Journal 2005; 330:223

[4] SSK, Lungenkrebsrisiko durch Radonexpositionen in Wohnungen, Verabschiedet in der 199. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 21./22. April 2005

[5] WHO Handbook on Indoor Radon, WHO 2009

[6] Menzler S, Schaffrath-Rosario A, Wichmann HE, Kreienbrock L .Abschätzung des attributablen Lungenkrebsrisikos in Deutschland durch Radon in Wohnungen. Ecomed-Verlag, Landsberg, 2006

[7] Kemski, J.; Siehl, A.; Stegemann, R.; Valdivia-Manchego, M.: Geogene Faktoren der Strahlenexposition unter besonderer Berücksichtigung des Radonpotenzials. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben St. Sch. 4106. Geologisches Institut der Universität Bonn, 1998

[8] Kümmel, M., Dushe, C., Gehrcke, K.; Ermittlung der Exposition der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland durch Radon in der freien Atmosphäre, TÜV Media GmbH, 2010

[9] Gehrcke, K., Hoffmann, B., Schkade, U., Schmidt, V., Wichterey, K.; Natürliche Radioaktivität in Baumaterialien und die daraus resultierende Strahlenexposition. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) 2012 (http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-201210099810)

[10] Clavensjö, B.; Akerblom, G.: The Radon Book. ISBN 91-540-5649-7, Ljunglöfs Offset AB, Stockholm 1994

[11] Keller, G.; Hoffmann, B.; Feigenspan, T.: Radon Permeability and Radon Exhalation of Building Materials. Radon in the Living Environment. In: Radon in the Living Environment, Proceedings, Athens, 19 – 23 April 1999

[12] Folkerts, K.H., Keller, G.; Muth, H.: An Experimental Study on the Diffusion and Exhalation of 222Rn and 220Rn from Building Materials. Radiation Protection Dosimetry, Vol. 9, No. 1, 1984

[13] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 1946-6 Raumlufttechnik – Teil 6: Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung, Abnahme, Mai 2009

[14] SSK, Strahlenexposition durch Radon-222 im Trinkwasser, Empfehlung der Strahlenschutzkommission. Verabschiedet in der 188. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 02. Dezember 2003

[15] Kemski, J., Klingel, R., Stegemann, R.; Konzeption eines DV-Projektes zur Bewertung des Radonpotenzials im Boden und der Prognose der Radonkonzentration in Gebäuden. Teil 1 Boden- und Raumluftmessungen, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben St.Sch. 4251, Bonn, 2003

[16] Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung: Jahresbericht 2015, Herausgeber: Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), 28-Jul-2017, urn:nbn:de:0221-2017072814305

[17] Kommentar zur Landesbauordnung Baden-Württemberg, 3. Aufl., 16. Lfg. September 1999

[18] DIN ISO 11665-4: 2013 - Deutsches Institut für Normung Messung der Radioaktivität in der Umwelt-Luft: Radon-222, Teil 4: Integrierendes Messverfahren zur Bestimmung des Durchschnittwertes der Aktivitätskonzentration mittels passiver Probenahme und zeitversetzter Auswertung;
DIN EN 61577-2: 2017 – Deutsches Institut für Normung Strahlenschutz-Messgeräte – Geräte für die Messung von Radon und Radon-Folgeprodukten – Teil 2: Besondere Anforderungen für Messgeräte für Rn-222 und Rn-220

[19] Bundesdatenschutzgesetz vom 20. Dezember 1990 (BGBl. I S. 2954), aktualisierte Fassung vom Januar 2000

[20] Nazaroff, W. W.; Doyle, S. M.; Nero, A. V.; Sextro, R. G. , Radon Entry via Potable Water. In: Nazaroff, W. W.; Nero, A. V.: Radon and its Decay Products in Indoor Air.

[21] John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1988

[22] VDI 4300 Blatt 1: Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Allgemeine Aspekte der Meßstrategie, Dezember 1995

[23] DIN EN 13829: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden. Differenzdruckverfahren

[24] Maringer, F.; Akis, M.C.; Kaineder, H.; Kindl, P.; Kralik, C.; Lettner, H.; Ringer, W.; Stadtmann, H.; Winkler, R., Ein robustes und schnelles Verfahren zur Abschätzung der langzeitlich mittleren Radonkonzentration in einem Gebäude (erweiterte Blower-Door-Methode). Tagungsband der 30. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz „Radioaktivität und Umwelt", Lindau am Bodensee, 28.09. – 02.10.1998

[25] Keller, G.: Die Radon-Diffusion als Kriterium für radondichte Bau- und Isoliermaterialien. In: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Forschung zum Problemkreis „Radon", Vortragsmanuskripte des 12. Statusgespräches, Berlin, 26./27. Oktober 1999, Bonn, Dezember 1999

[26] Normenausschuss Bauwesen im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Bauwerksabdichtungen. DIN 18195, 2011-12

[27] DIN – Deutsches Institut für Normung: Fenster, Fugendurchlässigkeit, Schlagregendichtheit und mechanische Beanspruchung; Anforderungen und Prüfung. DIN 18055, 2014-11

[28] DIN 18195 Teil 1 bis 12 und Beiblatt 1 (2010 – 2011) Bauwerksabdichtungen

[29] DIN EN 1992-1-1:2011-01 Titel (deutsch): Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau