

Recherche zum Thema Radon im Zusammenhang mit dem neuen Strahlenschutzgesetz (StrlSchG)

Auftragsarbeit des Radon-Labors für das
Umweltministerium Baden-Württemberg

Ingo Fesenbeck
Christian Naber
Christoph Wilhelm

Sicherheit und Umwelt

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	5
2. Auftragsbeschreibung	5
2.1. Literaturrecherche zu Radonreferenzwerten.....	5
2.2. Referenzwert 100 oder 300 Bq/m ³	5
2.3. Auswertung vorhandener Radonmesswerte aus der BuRG Datenbank	5
2.4. Zusammenhang zwischen Bodenluft- und Raumlufkonzentration	6
3. Einführung.....	6
3.1. Radon.....	6
3.2. Natürliche Strahlenexposition durch Radon	6
3.3. Radon im Gebäude	7
3.4. Definitionen	7
3.4.1. Referenzwert.....	7
3.4.2. Richtwert	7
3.4.3. Grenzwert.....	8
3.4.4. Zuordnung zu Grenz- bzw. Referenzwert	8
4. Literaturrecherche zu Radonreferenz- und Grenzwerten	8
4.1. Radonreferenzwerte in anderen Staaten in Europa sowie weltweit und deren Begründung.....	10
4.1.1. Schweiz.....	10
4.1.2. Österreich.....	10
4.1.3. Irland	10
4.1.4. Vereinigtes Königreich von Großbritannien und Nordirland.....	10
4.1.5. Vereinigte Staaten von Amerika	11
4.1.6. Italien und Südtirol.....	11
4.1.7. Frankreich.....	11
4.1.8. Dänemark	11
4.1.9. Belgien.....	11
4.1.10. Kanada	11
4.1.11. Norwegen	12
4.1.12. Finnland	12
4.1.13. Polen	12
4.1.14. Schweden.....	12
4.1.15. Tschechische Republik.....	12
4.2. Empfehlungen zur Sanierung und die vorgesehenen Fördermöglichkeiten.....	13

4.2.1.	Schweiz	13
4.2.2.	Österreich	13
4.2.3.	Irland	13
4.2.4.	Vereinigtes Königreich von Großbritannien und Nordirland	14
4.2.5.	Vereinigte Staaten von Amerika	14
4.2.6.	Italien.....	14
4.2.7.	Frankreich.....	14
4.2.8.	Dänemark	15
4.2.9.	Belgien	15
4.2.10.	Kanada	15
4.2.11.	Finnland	15
4.2.12.	Schweden.....	15
4.2.13.	Tschechische Republik.....	16
4.3.	Kommunikation in der Öffentlichkeit	16
4.3.1.	Schweiz	16
4.3.2.	Österreich.....	16
4.3.3.	Irland	16
4.3.4.	Vereinigtes Königreich von Großbritannien und Nordirland	16
4.3.5.	Vereinigte Staaten von Amerika	16
4.3.6.	Italien.....	17
4.3.7.	Frankreich.....	17
4.3.8.	Belgien	17
4.3.9.	Kanada.....	17
4.3.10.	Norwegen	17
4.3.11.	Finnland	17
4.3.12.	Schweden.....	18
4.3.13.	Tschechische Republik.....	18
5.	Referenzwert 100 oder 300 Bq/m ³	18
5.1.	Messtechnik.....	18
5.2.	Einflussfaktoren für unterschiedlich hohe Radonkonzentrationen	20
5.3.	Schlussfolgerung:.....	20
6.	Auswertung vorhandener Radonmesswerte in Baden-Württemberg.....	21
6.1.	Zugriff und Datengrundlage BuRG.....	21
6.2.	Sichtung der BuRG-Raumluftdaten	22
6.3.	Raumluft-Messdaten „Radon in baden-württembergischen Schulen“	22
6.4.	Daten Bodenluftkonzentration.....	23

6.5.	Auswertung der Raumluftmesswerte	23
6.6.	Vergleich der Bodenluft- und Raumluftmessungen	35
7.	Herangehensweise anderer Nationen zur Definition von Radonvorsorgegebieten.....	44
7.1.1.	USA	44
7.1.2.	Kanada.....	45
7.1.3.	Österreich.....	46
7.1.3.1.	Das österreichische nationale Radonprojekt	46
7.1.3.2.	Ausweisung von Radonvorsorgegebieten	47
8.	Zusammenfassung und Ausblick	48
9.	Quellenangaben	49

1. Einleitung

Das Land Baden-Württemberg, vertreten durch das Umweltministerium, hat das Radonlabor in der Stabstelle Sicherheit und Umwelt des Karlsruher Instituts für Technologie vor dem Hintergrund des neuen Strahlenschutzgesetzes und den damit verbundenen gesetzlichen Regelungen zum natürlich vorkommenden Radon-222 mit einer Recherche zu konkreten Fragen, die sich für das Umweltministerium ergeben, beauftragt. In diesem Bericht, der das Ergebnis dieses Auftrags ist, werden die Erkenntnisse und Ergebnisse der Recherche wiedergegeben. Die Gliederung orientiert sich sehr streng an dem vom Umweltministerium vergebenen Auftrag.

Die Meinungsäußerungen und Wertungen in diesem Bericht sind Aussagen des Auftragsnehmers und spiegeln nicht die Meinung des Umweltministeriums wider.

2. Auftragsbeschreibung

Diese Ausarbeitung wurde im Rahmen eines Werkvertrags zwischen dem Land Baden-Württemberg und dem KIT mit einer Laufzeit vom 22.06.2016 bis 30.11.2016 erstellt. Der Auftrag des Umweltministeriums gliedert sich in vier konkrete Fragestellungen, die nachfolgend wiedergegeben sind.

2.1. Literaturrecherche zu Radonreferenzwerten

Es soll eine Literaturrecherche zu Radonreferenzwerten in anderen Staaten in Europa sowie auf der ganzen Welt erstellt werden. Die Recherche soll auch die Empfehlungen zur Sanierung und die vorgesehenen Fördermöglichkeiten in diesen Ländern umfassen. Dabei sollen auch die Begründungen der Referenzwerte und die Grundlage für die Abschätzung des durch Radon ausgehenden Risikos sowie deren Kommunikation in der Öffentlichkeit betrachtet werden.

2.2. Referenzwert 100 oder 300 Bq/m³

Es soll überprüft werden, ob es aus messtechnischer Sicht Unsicherheiten/Unwägbarkeiten bei der Festlegung eines Referenzwertes von 100 Bq/m³ für Rn-222 in Aufenthaltsräumen gibt und, ob sich bei einem Wert von 300 Bq/m³ für Rn-222 diese geringer auswirken würden. Hierfür ist eine Abschätzung der messtechnischen Unwägbarkeiten bei beiden Referenzwerten zu erstellen.

2.3. Auswertung vorhandener Radonmesswerte aus der BuRG Datenbank

Die Daten für das Land Baden-Württemberg aus der BuRG (Bundeseinheitliche Datei „Radon in Gebäuden“) Datenbank sollen ausgewertet und bewertet werden. Dabei sollen insbesondere die Qualität und die Eignung der Messwerte im Hinblick auf die Aussagekraft für sogenannte Radonvorsorgegebiete geprüft werden. Es sollen die Anzahl der vorhandenen Messungen für die Ausweisung eines Radonvorsorgegebietes bewertet und ggf. Empfehlungen für noch benötigte Messungen ausgesprochen werden. Hierfür werden die Daten graphisch aufbereitet, kategorisiert und geeignet dargestellt. Soweit es möglich ist, sollen weitere Daten, die am KIT vorhanden sind, mit in die Betrachtung einbezogen werden.

2.4. Zusammenhang zwischen Bodenluft- und Raumlufkonzentration

Auf Basis der Auswertung aus Punkt 3 soll ein Vergleich der Bodenluftkarte BW mit Messdaten der Raumluf aus der BuRG-Datenbank sowie der betrachteten Radondaten aus dem KIT erstellt werden. Dieser Vergleich soll bewertet und Daten aus der Literatur gegenübergestellt werden. Es wird bewertet, ob die Bodenluftmessungen Rückschlüsse auf die Radon-Konzentration bis hin zu einer Überschreitung des Referenzwertes in Innenräumen zulassen.

3. Einführung

3.1. Radon

Mit durchschnittlich 1,1 mSv effektiver Dosis pro Jahr entsteht durch Radon und seine Folgeprodukte der größte Anteil der natürlichen Strahlenexposition bei der Bevölkerung. Mit unterschiedlichen Messprogrammen und Informationsveranstaltungen in den vergangenen Jahrzehnten konnte die Radonproblematik auch in der Öffentlichkeit publiziert werden.

Im Zuge der Umsetzung der neuen EU-Richtlinie 2013/59/EURATOM vom 17.01.2014 soll neben der Bestimmung der Radonexposition an Arbeitsplätzen in Zukunft auch die Radonexposition in öffentlichen und privaten Gebäude im deutschen Strahlenschutzrecht berücksichtigt werden. Die Definition eines Radon-Referenzwertes sowie die Einführung eines Radonmaßnahmenplans sollen die langfristigen Risiken der Radonexposition in den EU-Mitgliedsstaaten minimieren.

Im Rahmen dieser Radonrecherche sollen offene Fragestellungen in Bezug auf das neu entstehende Strahlenschutzgesetz für Baden-Württemberg beantwortet werden. Unter anderem werden in einer Literaturrecherche die Informationen zum Radonschutz in umliegenden EU-Ländern und weiteren Nationen zusammengetragen sowie Messwerte aus der BuRG-Datenbank für Baden-Württemberg ausgewertet. Ein weiterer Punkt der Radonrecherche besteht in der Betrachtung der Radon-Messtechnik und der messtechnischen Unsicherheit in Bezug auf den neu entstehenden Referenzwert.

3.2. Natürliche Strahlenexposition durch Radon

Die natürliche Strahlenbelastung des Menschen entsteht durch die Strahlung aus dem Boden und dem Weltall, durch die Aufnahme von natürlichen radioaktiven Stoffen über die Nahrung sowie durch die Inhalation des radioaktiven Edelgases Radon. Radon stammt aus dem Zerfall von Uran, das sich natürlicherweise in unserem Erdboden befindet. Das radioaktive Edelgas trägt mit seinen Folgeprodukten mit rund 50% zur natürlichen Strahlenexposition der Bevölkerung bei [72]. Über die Atmung (siehe Abbildung 1) gelangt Radon in die Lunge. Die von Radon und seinen Folgeprodukten ausgehende Alpha-Strahlung führt zu einer Strahlenexposition der Lunge. Diese Exposition ist neben dem Rauchen der zweitgrößte Risikofaktor für Lungenkrebs in Deutschland. Weiter zu beachten ist, dass Radon und Rauchen kein additives Risiko für eine Lungenkrebserkrankung ergibt. Bei ähnlicher Radonbelastung multipliziert sich das Risiko von Rauchern. Rund 5% aller Lungenkrebstote sind auf das radioaktive Edelgas zurückzuführen. Etwa 96% dieser Fälle sind Raucher [DAR] [72] [73].

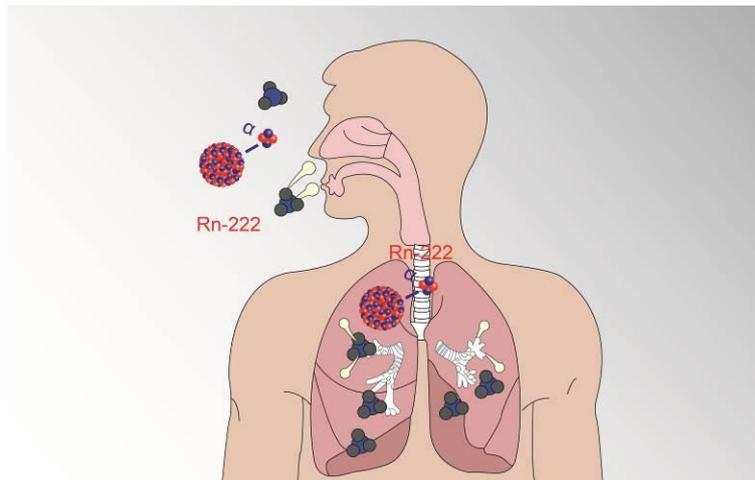


Abbildung 1: Inhalation von Radon und Radon-Folgeprodukten

3.3. Radon im Gebäude

Radon kann über Risse, Spalte oder Löcher aus dem Boden in das Gebäude gelangen. Dort reichert es sich in der Raumluft an. Je nach Bauweise, Alter und Zustand des Gebäudes kann die Radonkonzentration deutlich unterschiedliche Werte annehmen. Die Konzentration von Radon nimmt mit zunehmendem Stockwerk in der Regel ab. Sowohl die Luftwechselrate als auch die Gewohnheit der Nutzer (wie bspw. das Lüftungsverhalten) haben einen Einfluss auf die Radonkonzentration.

3.4. Definitionen

Da es in der weiteren Ausarbeitung immer wieder um Grenzwerte und Referenzwerte geht, sind hier die Definitionen wiedergegeben, die in dieser Ausarbeitung für die Begriffe verwendet werden.

3.4.1. Referenzwert

Für den Referenzwert wird die Definition aus dem Entwurf des Strahlenschutzgesetzes vom 14.09.2016 [StrlSchG] herangezogen. Dort lautet die Definition:

Referenzwert:

in bestehenden Expositionssituationen oder Notfallexpositionssituationen ein in diesem Gesetz oder einer aufgrund dieses Gesetzes erlassenen Rechtsverordnung festgelegter Wert, der als Maßstab für die Prüfung der Angemessenheit von Maßnahmen dient und dessen Unterschreitung unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls angestrebt wird mit dem Ziel, auch unterhalb des Referenzwerts die Exposition so gering wie möglich zu halten. Ein Referenzwert ist kein Grenzwert.

3.4.2. Richtwert

Da im Zusammenhang mit Radon sehr häufig in der Literatur von Richtwert gesprochen wird, sollte auch dieser Begriff betrachtet werden. Im Entwurf des neuen Strahlenschutzgesetzes ist hierzu keine Definition zu finden. Im Glossar zu den Messanleitungen findet sich folgende Definition:

Richtwert:

Im Strahlenschutz wird ein Richtwert – ebenso wie ein Grenzwert – mit dem Ziel festgelegt, die Strahlenexposition des Menschen zu begrenzen. Allerdings ist ein Richtwert gegenüber einem Grenzwert ein Wert mit anderen Rechtsfolgen. Während die Überschreitung eines Grenzwertes untersagt ist oder unmittelbare Handlungsmaßnahmen erfordert, sind bei Überschreitung von Richtwerten weitere Umstände oder Sachverhalte zu prüfen, ob bestimmte Maßnahmen einzuleiten oder vorzunehmen sind. Zu berücksichtigende Sachverhalte können z. B. soziale, ökonomische sowie gesundheitliche Aspekte sein. In diesem Zusammenhang wird auch der Begriff Maßnahmenwert verwendet. [BMUB]

Da zwischen den beiden Definitionen zu Referenzwert und Richtwert keine merklichen Unterschiede zu finden sind, werden diese beiden Begriffe in Bezug auf Radonwerte in Gebäuden als Synonym angesehen. Im weiteren Verlauf dieser Ausarbeitung wird daher immer der Begriff Referenzwert verwendet.

3.4.3. Grenzwert

Weder in der aktuellen Strahlenschutzverordnung noch im Entwurf des Strahlenschutzgesetzes ist eine Definition für Grenzwert zu finden. Als Grundlage für die Definition des Grenzwerts wird das Glossar der Messanleitungen, Herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt [BMUB], herangezogen. Dort lautet die Definition:

Grenzwert:

Auf dem Gebiet des Rechts ist ein Grenzwert ein Wert, der nicht überschritten werden darf. Nach der StrlSchV ist die Nichteinhaltung, d. h. die Überschreitung der durch Gesetz oder Rechtsverordnung festgesetzten Grenzwerte, eine rechtswidrige Handlung, die aufsichtsrechtliche Maßnahmen nach sich zieht. Prinzipiell ist auch auf dem Gebiet von Regeln und Richtlinien ein Grenzwert ein Wert, der nicht überschritten werden darf. Jedoch wird bei technischen Regeln, z. B. Regeln des Kerntechnischen Ausschusses, der Grenzwert auch als ein Schwellenwert, bei dem eine spezifische Maßnahme ergriffen werden muss, verstanden.

3.4.4. Zuordnung zu Grenz- bzw. Referenzwert

Sind in der nachfolgenden Literaturrecherche Werte in anderen Ländern genannt worden, so ist der Wert immer einer der Definitionen zugeordnet worden, die dem Sinn nach am besten passt. Der originale englische bzw. deutsche Begriff ist im Zweifel in eckiger Klammer mit genannt. Als Entscheidungsgrundlage für die Zuordnung wurde die Tatsache, dass das Überschreiten des Wertes ein Verbot mit rechtlichen Konsequenzen nach sich zieht herangezogen. Sobald rechtliche Konsequenzen beim Überschreiten des Wertes zu besorgen sind (zwangsweises Anordnen von Maßnahmen, Strafen) dann wird der genannte Wert als Grenzwert verstanden. Alle anderen Werte werden im Folgenden als Referenzwert bezeichnet, obwohl die Bezeichnungen in den Literaturquellen unterschiedlich sind (Richtwert, Planungsrichtwert, etc.).

4. Literaturrecherche zu Radonreferenz- und Grenzwerten

Im Rahmen der Radonrecherche werden die Informationen zum Radonschutz aus ausgewählten EU-Ländern und weiteren Nationen zusammengefasst. Es wird auf das Vorhandensein von Referenz- und Grenzwerten eingegangen. Zusätzlich werden die

Empfehlungen über Sanierungen, Fördermöglichkeiten zum Radonschutz sowie die Radon-Risikokommunikation in der Öffentlichkeit der einzelnen Staaten dokumentiert. Wurden für einzelne Staaten keine für die Radon-Recherche verwertbaren Informationen gefunden, ist dies im Text angegeben oder es wird ggfs. auf ein entsprechendes Unterkapitel verzichtet.

Die Informationen der Literaturrecherche wurden größtenteils aus den offiziellen Internetseiten der zuständigen behördlichen Stellen zusammengetragen. Zum Teil wurden weitere Quellen wie beispielsweise Internet-Auftritte von Radon-Messstellen und öffentlichen Vereinen zum Radonschutz herangezogen. Aufgrund der geringen zur Verfügung stehenden Bearbeitungszeit für die Recherche musste auf ein direktes Anschreiben der jeweiligen Landesbehörden und Landesämter verzichtet werden.

In die Literaturrecherche wurden die direkt an Deutschland anliegenden Länder Schweiz, Österreich, Frankreich, Polen, Tschechische Republik, Belgien, Dänemark sowie weitere Länder mit öffentlicher Radonkommunikation wie Irland, das Vereinigte Königreich, die Vereinigten Staaten von Amerika, Italien, Südtirol, Kanada, Norwegen, Finnland und Schweden aufgenommen.

In der Tabelle 1 sind die Radonreferenz- und Grenzwerte tabellarisch zusammengefasst. Bei den Werten handelt es sich in der Regel um Jahresmittelwerte. Ausführliche Informationen zu den einzelnen Werten und Ländern werden im darauffolgenden Kapitel beschrieben.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Radonreferenz- und Grenzwerte in ausgewählten EU-Ländern und weiteren Nationen

	Grenzwert	Referenzwert
Schweiz	Wohngebäude: 1000 Bq/m ³ Arbeitsplatz: 3000 Bq/m ³	400 Bq/m ³
Österreich	-	Neubau: 200 Bq/m ³ Altbau: 400 Bq/m ³
Irland	Arbeitsplatz: 400 Bq/m ³	Wohngebäude: 200 Bq/m ³
Vereinigtes Königreich	Wohngebäude: 200 Bq/m ³ Arbeitsplatz: 400 Bq/m ³	Wohngebäude: 100 Bq/m ³
Vereinigte Staaten	-	Wohngebäude: 148 Bq/m ³
Italien	Arbeitsplatz: 500 Bq/m ³	Neubau: 200 Bq/m ³
Südtirol	Arbeitsplatz: 500 Bq/m ³	Neubau: 200 Bq/m ³ Altbau: 400 Bq/m ³
Frankreich	Öffentliche Gebäude: 1000 Bq/m ³	Öffentliche Gebäude: 400 Bq/m ³
Dänemark	-	Neubau und Wohngebäude: 200 Bq/m ³
Belgien	-	400 Bq/m ³ ; Nach Umsetzung der RL 2013/59/Euratom 300 Bq/m ³
Kanada	-	Wohngebäude: 200 Bq/m ³
Norwegen	-	Wohngebäude: 200 Bq/m ³
Finnland	Neubau: 200 Bq/m ³	Altbau: 400 Bq/m ³
Polen	Neubau: 200 Bq/m ³	-

	Altbau gebaut nach 01.01.1998: 200 Bq/m ³ Altbau gebaut vor 01.01.1998: 400 Bq/m ³	
Schweden	Neubau: 200 Bq/m ³ Altbau: 400 Bq/m ³	Altbau: 200 Bq/m ³
Tschechische Republik	Altbau: 400 Bq/m ³	Neubau: 200 Bq/m ³ Arbeitsplatz: 1000 Bq/m ³

4.1. Radonreferenzwerte in anderen Staaten in Europa sowie weltweit und deren Begründung

4.1.1. Schweiz

In der Schweiz gibt es für Wohn- und Aufenthaltsräume einen über ein Jahr gemittelten gesetzlichen Grenzwert von 1000 Bq/m³. Dieser basiert auf den Empfehlungen der WHO von 1993. Für den Arbeitsbereich gilt ein über die monatliche Arbeitszeit gemittelter gesetzlicher Grenzwert von 3000 Bq/m³. Bei Neubauten, sowie Umbauten und Sanierungen gilt ein Referenzwert [„Richtwert“] von 400 Bq/m³, unter welchen die Radonkonzentration gebracht werden sollte. [1] [5]

4.1.2. Österreich

In Österreich gibt es keine gesetzlichen Grenzwerte, welche eingehalten werden müssen. Für Neubauten gilt ein Referenzwert [„Planungsrichtwert“] von 200 Bq/m³. Ab Radonkonzentrationen von 400 Bq/m³ wird eine Sanierung empfohlen [„Eingreifrichtwert“] [9]. Begründet sind die Werte auf der Aussage des Bundesamtes für Gesundheit und Frauen, dass bei Radonkonzentrationen von 500 bis 1500 Bq/m³ in Wohnbereichen ein Anstieg des Lungenkrebsrisikos zu erwarten ist, und dass die deutsche Strahlenschutzkommission im Jahr 1992 Referenzwerte für die Radonkonzentration in Innenräumen beschlossen hat [SSK].

4.1.3. Irland

In Irland liegt der gesetzliche Grenzwert für Radonkonzentrationen am Arbeitsplatz bei 400 Bq/m³ [17]. Für Wohnungen gilt ein Referenzwert von 200 Bq/m³, welcher bei der Entscheidung helfen soll, ob eine Wohnung saniert werden soll [16]. Der Referenzwert bildet laut „Environmental Protection Agency“ keine Grenze zwischen sicher und unsicher, sondern dient als Empfehlung, ab diesem Wert etwas gegen Radon zu unternehmen [63].

4.1.4. Vereinigtes Königreich von Großbritannien und Nordirland

Für Privatgebäude gilt im Vereinigten Königreich ein gesetzlicher Grenzwert von 200 Bq/m³ [„action level“]. Als Referenzwert für Neubauten und Sanierungen gelten 100 Bq/m³ [„target level“ bzw. „reference level“] [19]. Der gesetzliche Grenzwert für Arbeitsplätze beträgt 400 Bq/m³ [„Regulations apply“] [20]. Die „Health Protection Agency“ hält die Einteilung in „action level“ und „reference level“ als sinnvoll, da einerseits nicht der Eindruck von Sicherheit entsteht, sobald man das „action level“ unterschritten hat. Andererseits sollen Sanierungsmaßnahmen, welche die Radonkonzentration nicht unter das „action level“ reduzieren konnten, nicht zwangsläufig als fehlgeschlagen angesehen werden. Die „Health Protection Agency“ schlägt Hausbesitzern mit Radonkonzentrationen über dem „reference level“ vor, sich vermehrt Gedanken zu machen, die Konzentration zu senken, falls möglich

unter das „reference level“. Liegt die Radonkonzentration zwischen „action level“ und „reference level“, soll dem Risiko für die Personen im Haus entsprechend erwogen werden, die Konzentration zu senken. Das Risiko variiert stark zwischen Rauchern, ehemaligen Rauchern und Nichtrauchern [64].

4.1.5. Vereinigte Staaten von Amerika

In den USA liegt der Referenzwert für Radonkonzentrationen in Wohnungen bei 148 Bq/m^3 (4 pCi/L). Ein gesetzlicher Grenzwert besteht nicht [„EPA recommends“] [24]. Dem „Department of Housing and Urban Development“ zufolge werden Radonkonzentrationen unter 4 pCi/L (148 Bq/m^3) als akzeptabel betrachtet. Liegt die Konzentration über diesem Wert, sollten Maßnahmen zur Reduzierung der Radonkonzentration getroffen werden [28].

4.1.6. Italien und Südtirol

In Italien gilt für Arbeitsplätze ein gesetzlicher Grenzwert von 500 Bq/m^3 [„Eingreifschwelle“]. Für Neubauten gilt ein Referenzwert von 200 Bq/m^3 , welchen die Radonkonzentration nicht überschreiten sollte [„Richtwert“] [32] [34].

In Südtirol gilt für bestehende Gebäude ein Referenzwert von 400 Bq/m^3 für die Radonkonzentration. Für Neubauten gilt ebenfalls der Referenzwert von 200 Bq/m^3 [„Richtwert“]. Einen gesetzlichen Grenzwert gibt es für Arbeitsräume. Dieser beträgt 500 Bq/m^3 [„Eingreifschwelle“]. Eine Begründung und nähere Definition für den Grenz- und Referenzwert in Italien konnte nicht gefunden werden [32].

4.1.7. Frankreich

In Frankreich gibt es keinen gesetzlichen Grenzwert für Wohngebäude. Für öffentliche Gebäude gilt ein gesetzlicher Grenzwert von 1000 Bq/m^3 und ein Referenzwert von 400 Bq/m^3 [„Zielgrenzwert“] [69].

4.1.8. Dänemark

In Anlehnung an die EU-Empfehlung 90/143/Euratom sind Referenzwerte [„Richtwerte“] für Neubauten von 200 Bq/m^3 in Dänemark publiziert [EURATOM] [74].

4.1.9. Belgien

In Belgien ist der Referenzwert [„reference level“; „niveau de référence“] von 400 Bq/m^3 dokumentiert. Der Referenzwert soll im Zuge der Umsetzung von 2013/59/Euratom auf 300 Bq/m^3 gesetzt werden. Eine Begründung wird von der „agence fédérale de contrôle nucléaire“ nicht geliefert [TON] [75].

4.1.10. Kanada

Gebäude in Kanada sollten den Referenzwert von 200 Bq/m^3 nicht überschreiten [„Canadian Guideline“] [37]. Die ehemaligen Richtlinien aus dem Jahr 1988 (800 Bq/m^3) basierten auf Studien mit Minenarbeitern des Uranbergbaus, welche hohen Radonkonzentrationen ausgesetzt waren. Durch das Übertragen des Risikos vom Bergbau auf das Risiko in Wohnungen ergaben sich Abweichungen. Neue wissenschaftliche Studien über die Zusammenhänge zwischen der Radonkonzentration in der Raumluft und dem Risiko an Lungenkrebs zu erkranken, veranlassten die Regierung die Richtlinien im Jahr 2005 zu überdenken. Daraufhin wurden die überarbeiteten Richtlinien, eine Risikobewertung und

eine öffentliche Konsultation vom „Federal Provincial Territorial Radiation Protection Committee“ im Oktober 2006 genehmigt. Der Referenzwert von 200 Bq/m³ liegt somit unter den Referenzwerten der anderen Industriestaaten [65].

4.1.11. Norwegen

Die Konzentration des Radongases in Wohnräumen sollte den Referenzwert von 200 Bq/m³ (gemittelter Jahreswert) nicht überschreiten [„should be less“]. Überschreitet der gemittelte Jahreswert 100 Bq/m³, sollten Maßnahmen zur Reduzierung des Radongases durchgeführt werden (Optimierungsansatz). Eine Begründung für die publizierten Referenzwerte konnte nicht gefunden werden [43] [44].

4.1.12. Finnland

In bestehenden Gebäuden sollte die Radongaskonzentration den Wert von 400 Bq/m³ nicht übersteigen [„should not exceed“]. Für Neubauten gilt der gesetzliche Grenzwert von 200 Bq/m³ [„limit value“]. Eine Begründung für den nationalen Grenz- und Referenzwert konnte in der Literatur nicht gefunden werden [45].

4.1.13. Polen

Gebäude, welche in Polen nach dem 01.01.1998 gebaut wurden, dürfen den gesetzlichen Grenzwert von 200 Bq/m³ nicht überschreiten. Für Gebäude die vor diesem Datum errichtet wurden gilt ein gesetzlicher Grenzwert von 400 Bq/m³ [„Anordnung“, aus dem Polnischen übersetzt]. Eine Begründung über die Höhe der unterschiedlichen Grenzwerte geht aus der vorliegenden Literatur nicht hervor [48].

4.1.14. Schweden

In Schweden gilt für Neubauten der gesetzliche Grenzwert für die Radonkonzentration von 200 Bq/m³. Für bestehende Gebäude gilt ein gesetzlicher Grenzwert von 400 Bq/m³ [„Grenzwert“]. Der Referenzwert für bestehende Gebäude beträgt 200 Bq/m³ [„Richtwert“] [50]. Die „Swedish Radiation Protection Authority“ schätzt, dass jährlich 150 Tote durch die Senkung der Radonkonzentration in Wohnungen mit über 400 Bq/m³ auf 100 Bq/m³, vermieden werden können. Würde die Konzentration in allen Wohnungen mit Radonkonzentrationen zwischen 200 Bq/m³ und 400 Bq/m³ auf 100 Bq/m³ gesenkt werden, könnten weitere 50 Tote verhindert werden. Die „Swedish Radon Commission 2000“ berechnete, dass dadurch über eine Zeitspanne von 50 Jahren 4700 Leben, für einen Preis von 2800 Millionen SEK (285 Millionen EUR) gerettet werden [49].

4.1.15. Tschechische Republik

Der gesetzliche Grenzwert für bestehende Gebäude in Tschechien für Radongas beträgt 400 Bq/m³ [„action level“]. Für Neubauten gibt es einen Referenzwert von 200 Bq/m³ [„guidance level“]. Für Arbeitsplätze gilt der Referenzwert von 1000 Bq/m³ [„guidance level“]. Eine dazugehörige Begründung der Referenz- und Grenzwerte wird in der Literatur nicht geliefert [53] [54].

4.2. Empfehlungen zur Sanierung und die vorgesehenen Fördermöglichkeiten

4.2.1. Schweiz

Vom Bundesamt für Gesundheit wird zur Reduzierung der Radonkonzentration das Vermeiden von Unterdruck im Innern der Gebäude, die Hemmung des Radoneintritts vom Untergrund, die Unterbindung des Ausbreitens des Radongases im Wohnbereich und die Evakuierung des Radons aus dem Wohnbereich empfohlen [1]. Die Kosten dieser Sanierungen werden vom Hauseigentümer getragen [5].

4.2.2. Österreich

Vom Bundesamt für Gesundheit und Frauen werden folgende Maßnahmen zur Reduzierung des Radongases vorgeschlagen: Die einfachsten Methoden bei geringen Radongaskonzentrationen sind mehrmals tägliches Stoßlüften oder Querlüften (Durchzug). Eine erhöhte Bequemlichkeit bringt der Einbau einer Lüftungs-/Klimaanlage mit Frischluftbetrieb. Zur Verhinderung des Eindringens des Radons aus dem Untergrund sollen erdgebundene Räume gasdicht abgeschlossen werden. Hierzu werden offene Bodenanschlüsse verschlossen, Risse und Leitungs- und Rohrdurchführungen in Wänden und Böden abgedichtet. Weiterhin können Wohnräume gegen Keller abgedichtet werden. Das Einblasen frischer Luft und die damit verbundene Überdruckerzeugung verhindern, dass Luft aus dem Boden in das Gebäude gesaugt wird und senken somit die Radonkonzentration. Als beste, aber auch teuerste Methode zur Reduktion von Radon wird die Unterbodenbelüftung vorgeschlagen. Hierbei wird die Luft unter dem Fundament abgesaugt. Ähnlich zur Unterbodenbelüftung ist die Zwischenbodenabsaugung. Hierbei wird ein weiterer Boden, welcher gegen den Wohnraum abdichtet, in einigen Zentimetern Abstand gelegt und die Luft im Zwischenraum abgesaugt. Eine weitere Methode stellen Radonbrunnen dar. Hierbei werden Bohrungen im Boden in der Nähe des Gebäudes mit Absaugventilatoren verbunden [10].

In Österreich werden kostenlose Radonmessungen angeboten [6]. Zusätzlich fördern manche Bundesländer die Radonsanierung. In Oberösterreich werden Wohneinheiten mit ständig bewohnten Wohn- oder Schlafräumen nach einer verpflichtenden Beratung durch die Fachabteilung des Bundeslandes gefördert, wenn diese Radonkonzentrationen über 1000 Bq/m³ aufweisen. Hierbei sind 22 Prozent der Sanierungskosten anrechenbar, jedoch maximal 1454 Euro [11]. Ähnlich ist die Förderung in der Steiermark. Dort beträgt die maximal mögliche Förderung 1500 Euro [12].

4.2.3. Irland

Die „Environmental Protection Agency“ Irlands schlägt zur Reduzierung der Radonkonzentration in Innenräumen eine Unterbodenbelüftung vor. Für Radonkonzentrationen bis 400 Bq/m³ wird eine erhöhte Belüftung des Innenraumes und des Unterbodens, welche die Konzentration um durchschnittlich 50 Prozent senken, vorgeschlagen. Ebenfalls wird für Radonkonzentrationen bis 400 Bq/m³ ein passives Absaugsystem vorgeschlagen. Hierbei handelt es sich um ein Rohrsystem, welches mit Hilfe des über das Rohrende, außerhalb des Gebäudes, streichenden Windes Luft aus dem Gebäude saugt und somit die Radonkonzentration verringert. Als weitere Methode wird die Kombination aus passivem Absaugsystem und einem Ventilator aufgeführt. Der Ventilator verstärkt die Luftabsaugung und sorgt somit für eine stärkere Reduktion der Radonkonzentration [15].

In Irland gibt es keine Förderung, welche speziell auf Radonsanierungen abzielt. Generell können Sanierungen ab 5000 Euro Gesamtkosten mit 13,5 Prozent von der Steuer abgesetzt werden [18].

4.2.4. Vereinigtes Königreich von Großbritannien und Nordirland

„Public Health England“ schlägt als effektivste Methode zur Reduzierung der Radonkonzentration aktive Unterbodenbelüftungen und Zwischenbodenabsaugungen vor. Ebenfalls aufgeführt werden passive Varianten, welche zeitweise die Radonkonzentration senken. Eine weitere Methode ist die Überdruckerzeugung im Gebäude. Dabei wird Luft von der Dachfläche mit Hilfe eines Ventilators ins Gebäude geblasen [22]. Es gibt keine Förderungen für Radonschutzmaßnahmen im Vereinten Königreich [23].

4.2.5. Vereinigte Staaten von Amerika

Die „Environmental Protection Agency“ der Vereinigten Staaten von Amerika sieht die Unterbodenbelüftung als effektivste Methode zur Reduktion der Radonkonzentration. Zusätzlich sollen Risse im Fundament sowie andere Öffnungen abgedichtet werden, um die Methode noch effektiver zu machen [26] [EPA1].

In den USA gibt es keine spezielle Förderung für Radonsanierungen [30]. Es gibt jedoch verschiedene Fonds für Sanierungen [31].

4.2.6. Italien

Das Abdichten von Rissen und Rohrleitungen in Böden und Wänden mit Kontakt zum Erdreich werden als Maßnahmen zur Reduktion der Radonkonzentration in Gebäuden vorgeschlagen. Ebenfalls soll die Zwangsbelüftung von Kriechkellern Radon nach außen fördern und somit die Konzentration im Gebäude senken [35].

Die Südtiroler Landesagentur für Umwelt schlägt Lüften im Gebäude als erste, aber nur provisorische Maßnahme vor. Weiter werden gekippte Kellerfenster zur Verhinderung eines Unterdrucks im Haus als Folge des Kamineffektes aufgeführt. Das Abdichten von Rissen, Durchführungen und Fugen in Wänden und Böden soll das Eindringen von Radon ins Gebäude verhindern. Besitzt das Gebäude einen Naturkeller, so soll dieser nachbetoniert werden. Absaugen von Luft aus den Kellerräumen verhindert, dass radonhaltige Luft in obere Stockwerke eindringt. Als weitere Methoden zur Reduktion von Radon werden die Unterbodenbelüftung und die Zwischenbodenabsaugung vorgeschlagen. Eine weitere Methode ist die Überdruckerzeugung im Gebäude. Als selten angewendete Möglichkeit wird die Überdruckerzeugung im Unterboden aufgeführt. Hierbei soll die radonhaltige Luft unter dem Gebäude verdünnt werden und somit die in das Gebäude gelangende Radonmenge gesenkt werden. Belüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung können ebenfalls die Radonkonzentration im Gebäude senken. Dabei ist darauf zu achten, dass kein Unterdruck im Gebäude entsteht [33].

4.2.7. Frankreich

Als provisorische Maßnahmen zur Senkung der Radonkonzentration werden vom „Centre Scientifique et Technique du Bâtiment“ das Abdichten von Türen und Lüften empfohlen. Als effektiver wird das Abdichten bodenberührender Stellen des Gebäudes, das Belüften von

Kellerräumen und Kriechkellern, die Überdruckbelüftung von Wohnräumen mit Lüftungsanlagen und die Unterbodenbelüftung vorgeschlagen [70].

4.2.8. Dänemark

Von der „Danish Health Authority“ wird im Wesentlichen die Reduktion der Radonkonzentration mittels ausreichender Lüftung empfohlen. Zusätzlich werden einfache Maßnahmen bei Raumluftkonzentrationen unter 100 Bq/m^3 (Lüftung) und weitere Maßnahmen bei Konzentration unter 200 Bq/m^3 (Abdichtungsmaßnahmen) empfohlen. Ab Radonkonzentrationen größer 200 Bq/m^3 werden Maßnahmen wie technische Belüftungssysteme des Hauses angeraten [77].

4.2.9. Belgien

Als grundlegender Tipp zur Minimierung der Radonkonzentration wird von der „agence fédérale de contrôle nucléaire“ die ausreichende Lüftung vorgeschlagen. Für Neubauten sowie bei Renovierungsarbeiten ist Luftdichtigkeit zwischen Bodenplatte und Gebäude von größter Bedeutung. Über Sonderprogramme werden private Radonmessungen von der Förderagentur für Nuklearkontrolle (FANC) subventioniert, wodurch FANC ermächtigt wird, „die Messdaten und -ergebnisse zu verwenden, um die Radon-Statistiken und die Radon-Kartografie in Belgien in anonymisierter Form weiterzuentwickeln“ [76] [75].

4.2.10. Kanada

„Health Canada“ empfiehlt zur Reduktion der Radonkonzentration mehrere Methoden. Eine Möglichkeit bietet die Unterbodenbelüftung. Ist im Keller eines Gebäudes eine Pumpe zum Abpumpen von unerwünschtem Wasser vorhanden, kann diese laut „Health Canada“ umgebaut werden um Luft aus dem Unterboden abzusaugen. Ebenso können Drainagerohre zum Ableiten von Wasser an eine Absaugvorrichtung angeschlossen werden, um die Radonkonzentration im Gebäudeinneren zu reduzieren. In Gebäuden mit Kriechkellern kann auf dem Boden des Kellers eine Polyethylen-Folie angebracht werden um die Luft darunter abzusaugen. Das Verschließen von möglichen Eintrittsstellen des Radons kann die Radonkonzentration im Gebäude senken. Zur Reduktion der Radonkonzentration kann eine Belüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung eingebaut werden, welche die Belüftung des Gebäudes erhöht [40]. In Kanada gibt es keine Förderungen für Radonsanierungen [41] [42].

4.2.11. Finnland

In Finnland wird von der „Radiation and Nuclear Safety Authority“ vorgeschlagen, dass eine Unterbodenbelüftung errichtet wird, falls keine Drainagerohre unter dem Haus vorhanden sind. Zusätzlich sollten Risse abgedichtet werden. Des Weiteren werden Radonbrunnen, Kriechkellerbelüftung, erhöhte Belüftung des Kellers und Verbesserung der Belüftung genannt. Steuergutschriften sind für Kosten der Radonsanierungen möglich [46].

4.2.12. Schweden

In Schweden werden 50 Prozent der Radonsanierungskosten erstattet, wenn das Gebäude vom Eigentümer selbst bewohnt wird und Radonkonzentrationen über 200 Bq/m^3 aufweist. Maximal werden SEK 15000 (ca. 1540 Euro) erstattet [51].

4.2.13. Tschechische Republik

Als Maßnahme zur Senkung der Radonkonzentration wird das Abdichten von Rissen und Öffnungen empfohlen. Ebenso eine erhöhte Belüftung des Gebäudes. Dies kann unter anderem durch eine Belüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung erfolgen. Weitere Methoden zur Reduktion der Radonkonzentration sind die Unterbodenbelüftung und das Absaugen radonhaltiger Luft mit Hilfe von Drainagerohren [59] [60].

Die Förderung kann pro Wohnung bis zu 6000 Euro betragen. Andere Gebäude, wie beispielsweise Kindergärten, können mit bis zu 60000 Euro gefördert werden. Radonmessgeräte werden kostenlos von den örtlichen Behörden gestellt. Diese sind vom Staat bezuschusst [61] [55].

4.3. Kommunikation in der Öffentlichkeit

4.3.1. Schweiz

Auf der Internetseite des Bundesamtes für Gesundheit (BAG) werden Schweizer Bürger über Radon informiert. Es wird erklärt, was Radon ist, wie es in Gebäude gelangt und dass es Lungenkrebs verursachen kann. Mit Hilfe der Radonkarte oder dem Suchfeld kann das Radonrisiko für die einzelnen Gemeinden der Schweiz eingesehen werden. Dabei wird zwischen geringem (eine Messung kann erwogen werden), mittlerem (eine Messung ist empfohlen) und hohem Radonrisiko (eine Radonmessung ist nötig) unterschieden. Weiter sind auf der Internetseite Informationen zur Radonmessung und Radonsanierung vorhanden [2][3][4].

Weitere Informationen zum Thema Radon werden bei Verbänden wie bspw. dem Hauseigentümergebiet Schweiz (HEV) für Hausbesitzer aktuell zur Verfügung gestellt [67].

4.3.2. Österreich

Das Ministerium für ein lebenswertes Österreich erklärt auf seiner Internetseite, was Radon ist und klärt mit Hilfe der Radonkarte für Österreich auf, ob sich Gemeinden in Radonrisikogebieten befinden, und somit eine Radonmessung nötig ist. Eine interaktive Präsentation klärt die Fragen, was Radon ist und wo es vorkommt, bringt dessen Wirkung näher und erläutert Mess- und Sanierungsmethoden sowie radonsicheres Bauen [8]. Die Broschüre des Bundesministeriums für Gesundheit und Frauen klärt ebenfalls über Radon auf [7].

4.3.3. Irland

Die „Environmental Protection Agency“ Irlands informiert auf ihrer Internetseite über Radon. Hierbei werden mit Hilfe von Videos auf Radon aufmerksam gemacht [13] [14] [15] [16] [17] [18].

4.3.4. Vereinigtes Königreich von Großbritannien und Nordirland

Auf der Internetseite von „Public Health England“ sind ausführliche Informationen über Radon zu finden. Teilweise findet die Information interaktiv statt. Private Firmen klären in ihren Werbevideos über Radonmessungen und -sanierungen auf [19] [20] [21] [22].

4.3.5. Vereinigte Staaten von Amerika

Die Broschüre der „Environmental Protection Agency“ der USA informiert mit vielen anschaulichen Bildern über Radon, die Radonmessung und, wie man die Radonkonzentration

senken kann [24]. Auf den Internetseiten des "U.S. Department of Housing and Urban Development" und „California Department of Public Health“ sind ebenfalls Informationen über Radon zu finden [28] [29]. Youtube-Videos des „Iowa Cancer Consortium“ klären über Radon und dessen Gefahren auf [25]. Die „Centers for Disease Control and Prevention“ berichten über Stephanie Foster vom „Geospatial Research, Analysis, and Services Program“ (GRASP) und Brian Tencza vom „Environmental Medicine Branch, des ATSDR“, welche Schüler besuchten, um sie über die Gefahr durch Radon aufzuklären [27].

4.3.6. Italien

Unter „www.radonmap.it“ wird über Radon informiert. Zusätzlich gibt es Youtube-Videos, welche auf das Radonproblem aufmerksam machen [36].

Auf der Internetseite der Landesagentur für Umwelt Südtirols findet man Informationen über Radon und das damit einhergehende Problem. Es gibt unter anderem viele Vorschläge zur Reduktion der Radonkonzentrationen in Gebäuden und eine Radonkarte aus dem Jahr 2003 [32] [33].

4.3.7. Frankreich

In Frankreich informiert das „Centre Scientifique et Technique du Bâtiment“ auf der zugehörigen Internetseite über Radon. Unter anderem werden Sanierungsmaßnahmen aufgeführt [71].

4.3.8. Belgien

Von der „agence fédérale de contrôle nucléaire“ wurde die Förderagentur für Nuklearkontrolle (FANC) gegründet. Diese soll die Bevölkerung auf die Radonproblematik sensibilisieren und Informationen zum Thema Radon weitergeben sowie Radonmessungen anbieten [76].

4.3.9. Kanada

In Kanada machen Youtube-Videos auf Radon aufmerksam. Hierfür erklärt unter anderem Mike Holmes, ein bekannter Heimwerker, welche Maßnahmen gegen Radon getroffen werden können [38]. Informationen über Radon und Maßnahmen zur Senkung der Konzentration gibt es auf den Internetseiten von „Health Canada“, „BREATHE the lung association“ und „Canada Radon“ [37] [42] [62]. In der Broschüre der „David Suzuki Foundation“ sind Informationen über Radon enthalten [39].

4.3.10. Norwegen

In Norwegen wird über die Internetseite der „Norwegian Radiation Protection Authority“ über Radon informiert [43][66].

4.3.11. Finnland

Informationen über Radon sind auf der Internetseite der finnischen „Radiation and Nuclear Safety Authority“ zu finden [45] [46].

4.3.12. Schweden

Durch die Internetseite der „Swedish Radiation Safety Authority“ wird über Radon informiert [47]. Im Rahmen von Empfehlungen zum Umgang mit Radon in Gebäuden, an welchen unter anderem die „Swedish Radiation Safety Authority“ beteiligt ist, wird angeregt, die Radonrisikokommunikation auf lokaler Ebene durchzuführen [49]. So informiert beispielsweise auch die Gemeinde Lycksele über Radon [51].

4.3.13. Tschechische Republik

In der Region von Jáchymov in Tschechien gibt es einen Radonlehrpfad, auf welchem man sich bei neun Stationen über Radon informieren kann. Informationen zum Radonlehrpfad sind auch online verfügbar [56] [57]. Eine Radonkarte ist auf der Internetseite des „Czech Geological Survey“ verfügbar [52]. Auf der Internetseite des tschechischen Radonprogramms sind Informationen über Radon verfügbar. [58]

5. Referenzwert 100 oder 300 Bq/m³

Zur Diskussion der Frage, ob aus messtechnischer Sicht die Unwägbarkeiten und Unsicherheiten bei einem Grenzwert von 100 oder 300 Bq/m³ mehr ins Gewicht fallen, sind die Messverfahren und die Messmethoden sowie deren Unsicherheiten zu betrachten. Neben den Unsicherheiten aus den Messmethoden ist die Variation der Radonkonzentration am Messort ebenfalls ein Einflussfaktor, der bei der Höhe des Referenzwerts und bei den Gesamtunsicherheiten zu berücksichtigen ist.

Folgende Faktoren haben einen Einfluss auf das Messergebnis einer Radonmessung:

- Messtechnik und Messverfahren
- Die Expositionsdauer am Messort

Weitere Faktoren können unter anderem zu unterschiedlich hohen Radonkonzentrationen am Messort führen:

- Die Gebäudestruktur
 - Alter und Beschaffenheit des Fundaments
 - Rohrdurchführungen und Risse
 - Energetisch saniert oder Altbau
 - Lage des Messortes im Gebäude (Keller, Erdgeschoss oder Obergeschoss)
- Das Lüftungsverfahren (Fensterlüftung oder technische Lüftungsanlage)
- Das Lüftungsverhalten
- Die Bodenluftkonzentration
- Die Witterungsbedingungen (bspw. Luftdruck, etc.)

5.1. Messtechnik

Grundsätzlich unterscheidet man bei der Messung der Radonkonzentration zwischen passiven und aktiven Messmethoden:

- Passive Radonmessungen werden u.a. mittels Kernspurdetektoren oder Aktivkohle durchgeführt. Im Gegensatz zur aktiven Messmethode wird bei der passiven Radonmessung ein Messgerät für einen längeren Zeitraum ausgelegt und anschließend in einem Labor ausgewertet. Das Messgerät selbst besitzt keine Anzeige. Die Messergebnisse der Radonkonzentration werden nach der zeitversetzten Auswertung ermittelt.
- Bei aktiven Radonmessgeräten wird die radonhaltige Luft über Ventilation oder Diffusion in eine Messkammer oder auf einen Filter befördert. Diese Messgeräte besitzen eine feste Stromversorgung oder eine Batterie und können i.d.R. die durchschnittliche Radonkonzentration über einen kurzen Zeitraum ermitteln. Die Radonkonzentration kann meist direkt am Messgerät abgelesen werden.



Abbildung 2: passive Radonmesstechnik; Karlsruher Radonexposimeter



Abbildung 3: aktive Radonmesstechnik; Alpha-GUARD

Da die aktiven Messgeräte nur einen Messwert für den aktuellen Zeitpunkt liefern, sind diese Messverfahren zwar für Studien zum Verhalten von Radonkonzentrationen in Abhängigkeit von örtlichen Gegebenheiten (z.B. Lüftungsverhalten) von Interesse. Für die Bewertung der Radonexposition sind diese aktiven Messverfahren eher ungeeignet. Im Weiteren wird nur noch auf passive Messverfahren und im speziellen auf die Messunsicherheiten der Karlsruher Radonexposimeter eingegangen.

Die Messunsicherheit wird gemäß den Vorgaben des GUM [GUM] und aus DIN ISO 11929 [DIN] bestimmt. Die messtechnische Unsicherheit entsteht durch die Unsicherheit des erweiterten Kalibrierfaktors (des Messsystems) und der Unsicherheit des Nulleffekts. Die Höhe der Messunsicherheit hängt im Wesentlichen von der Anzahl an Spuren, die durch die Radonfolgeprodukte auf der Messfolie entstanden sind, ab. Die Spurenanzahl ist damit abhängig von der Höhe der Radonkonzentration und der Expositionsdauer des Radonexposimeters. Typische Standardunsicherheiten ($k=1$) bei unterschiedlich hoher Radonkonzentration und unterschiedlich langer Expositionsdauer sind in der nachfolgenden Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2: Zusammenhang zwischen Radonkonzentration, Expositionsdauer und Messunsicherheit für das Karlsruher Exposimeter.

Radonkonzentration	Messunsicherheit bei einer Expositionsdauer von:		
	1 Monat	3 Monate	12 Monate
100 Bq/m³	15%	12%	11%
300 Bq/m³	12%	11%	10%
1000 Bq/m³	11%	10%	10%

Wie aus der Tabelle 2 zu ersehen ist, ist die Messunsicherheit beim Messverfahren nur unwesentlich von der Radonkonzentration abhängig. Selbst Radonkonzentrationen von 100 Bq/m^3 lassen sich mit einer Expositionsdauer von einem Monat bei einer Standardunsicherheit von 15% bestimmen. Viel wesentlicher sind die Unsicherheiten, die durch andere Einflussfaktoren als die Messung selbst zu Unsicherheiten bei der Bestimmung beitragen. Diese weiteren Einflussfaktoren sind auch bei der Bewertung von Messergebnissen wesentlich.

5.2. Einflussfaktoren für unterschiedlich hohe Radonkonzentrationen

In der Literatur sind viele Hinweise auf Umwelteinflüsse zu finden, die das Ergebnis der Radonexposition der Bewohner beeinflussen können. Neben den Umwelteinflüssen haben auch das individuelle Lüftungsverhalten und die Lüftungsart erhebliche Einflüsse.

So ist zum Beispiel in einer wissenschaftlichen Ausarbeitung von Dong Xie, Maili Liao und Kearfott [KJK] über Korrelationen von Radonkonzentrationen im Gebäude zu folgenden Parametern zu lesen:

- Luftfeuchtigkeit im Gebäude
- Außentemperatur
- Taupunkt
- Windgeschwindigkeit
- Außenluftdruck

Ebenso ist in dieser Arbeit eine höhere Radonkonzentration im Herbst und Winter im Vergleich zu Frühjahr und Sommer berichtet worden.

In einer Studie der Technischen Hochschule Mittelhessen (THM) [THM] wurde versucht, die Einflüsse auf die Radonkonzentration zu modellieren. Dabei sind im Wesentlichen die Zusammenhänge zwischen mittlerem Luftwechsel, aktueller Radonkonzentration und Radonquellstärke für den Raum untersucht worden. Ziel der Untersuchung war es, durch Messung der aktuellen Radonkonzentration mittels Kurzzeitmessungen und zusätzlicher gleichzeitiger Bestimmung der Luftaustauschrate auf die zu erwartende Radonexposition zurück zu schließen. In der Arbeit konnte der klare Zusammenhang zwischen Luftaustauschrate und Radonkonzentration aufgezeigt werden, dennoch war es nicht möglich, daraus eine zu erwartende Radonexposition mittels Kurzzeitmessung zuverlässig zu ermitteln.

5.3. Schlussfolgerung:

Die messtechnische Unsicherheit ist gering und Konzentrationen von nur 100 Bq/m^3 lassen sich in einer Expositionsdauer von einem Monat mit einer Messunsicherheit von 15% bestimmen. Ein großer Einfluss auf das Ergebnis entsteht durch die Umwelteinflüsse und das Nutzungsverhalten. Diese Einflussparameter lassen sich nur durch lange Expositionszeiten herausmitteln.

Fazit: Kurzzeitmessungen sind für die Bewertung der Radonexposition ungeeignet! Für eine sichere Bewertung der Radonexposition sollten Messdauern von 3 bis 6 Monate herangezogen werden.

6. Auswertung vorhandener Radonmesswerte in Baden-Württemberg

Im dritten Paket der Radonrecherche werden die vorhandenen Radon -Messwerte aus Baden-Württemberg zusammengetragen. Anschließend werden die Messpunkte im Hinblick auf die Ausweisung von Radonvorsorgegebieten gemäß dem Entwurf des neuen Strahlenschutzgesetzes ausgewertet. Bewertet werden

- Die Anzahl an vorhandenen Messwerten:
 - Aus Innenraummessungen (BuRG-Daten und „Radon in Schulen“-Daten)
 - Aus Bodenluftmessungen
- Die Messwerte im Hinblick auf die Aussagekraft für Radonvorsorgegebiete

und es wird

- ein Vergleich zwischen vorhandenen Radonbodenluftmessungen und Messwerten aus Radon in Innenräumen gezogen sowie
- Empfehlungen für neue, notwendige Messungen ausgesprochen.

Zur Auswertung der Daten werden die Ergebnisse der Radon Innenraummessungen des BWPLUS-Projekts „Radon in baden-württembergischen Schulen“ aus den Jahren 2015 und 2016 sowie den Messwerten aus der Bundeseinheitlichen Datei "Radon in Gebäuden" (BuRG) des Bundesamts für Strahlenschutz herangezogen. Weitere Werte konnten nicht herangezogen werden, da zum Beispiel für die vielen Messwerte, die im Auftrag für Privatpersonen oder Firmen gewonnen wurden, die Zustimmung zur Verwendung für wissenschaftliche Zwecke nicht über den individuellen Auftrag geben war. Es wurde zwar überlegt, diese Zustimmungen einzuholen, dies wurde aber verworfen, da der Aufwand jeden einzelnen Kunden des Radonlabors zu kontaktieren, zu erheblich gewesen wäre. Dazu kommt bei den Messungen noch die Schwierigkeit, dass der Messort nicht immer zweifelsfrei im Auftrag vermerkt ist, so dass die Details zu den Messungen für jeden einzelnen Auftrag noch hätten erhoben werden müssen. Dies wäre in der zur Verfügung stehenden Zeit nicht realisierbar gewesen. Außerdem können sich in der Zwischenzeit Änderungen am Gebäude ergeben haben, die Einfluss auf die Radonkonzentration haben, so dass fraglich ist, ob die Messwerte noch die heutige Situation vor Ort widerspiegeln.

6.1. Zugriff und Datengrundlage BuRG

Zum Erhalt der Radonmesswerte der BuRG-Datenbank wurde eine Anfrage an das Bundesamt für Strahlenschutz in Berlin, Köpenicker Allee 120 – 130, gesendet. Die übermittelten Daten des BfS beinhalten 4618 Datensätze. In Abbildung 4 ist ein Auszug der erhaltenen Daten grafisch abgebildet.

SID	GKZ	PLZ	Gemeinde	Ortsteil	Etage	Raumnutzung	Unterkellerung	Messwert	Messwertqualität	Messverfahren	Messprogramm
16439	8317126	77889	Seebach		Erdgeschoss	Wohn-/Esszimmer	keine	23		Festkörperspurdetektor	StSch 4187
16439	8317126	77889	Seebach		Keller		keine	20		Festkörperspurdetektor	StSch 4187
16440	8317102	77883	Ottenhöfen		Keller		keine	232		Festkörperspurdetektor	StSch 4187
16440	8317102	77883	Ottenhöfen		Erdgeschoss	Schlafzimmer	voll	10		Festkörperspurdetektor	StSch 4187
16441	8317089	77704	Oberkirch	Bottenau	Keller		keine	131		Festkörperspurdetektor	StSch 4187
16441	8317089	77704	Oberkirch	Bottenau	Erdgeschoss	Wohn-/Esszimmer	keine	32		Festkörperspurdetektor	StSch 4187

Abbildung 4: Auszug der erhaltenen Radondaten der BuRG-Datenbank

Zum einfacheren Verständnis der Datensätze sind in Tabelle 3 die einzelnen Datensätze mit Beispieleinträgen visualisiert und ihre Beschreibung dargestellt.

Tabelle 3: Beschreibung der BuRG-Datensätze mit Beispieleintrag

<i>Feldname</i>	<i>Datensatz</i>	<i>Beschreibung</i>
SID	16885	Datenbank-Verknüpfung zur GPS-Koordinate
GKZ	8215009	Gemeidekennzahl
PLZ	76646	Postleitzahl
Gemeinde	Bruchsal	Gemeindenamen
Ortsteil	„leer“	Falls anwendbar: Ortsteil
Etage	Erdgeschoss	Etage (i.d.R. „Erdgeschoss“, „Keller“ oder „1. Etage“)
Raumnutzung	Wohn-/Esszimmer	Art der Raumnutzung
Unterkellerung	Voll	Art der Unterkellerung
Messwert	48	Messwert; Einheit in Bq/m ³
Messwertqualität	„leer“	Einträge: „nur für Visualisierung nutzbar“, „uneingeschränkt nutzbar“ oder „leer“
Messverfahren	Festkörperspurdetektor	Messverfahren: Festkörperspurdetektor
Messprogramm	StSch 4187	Messprogramm: Messungen zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Radon in der Bodenluft und in Innenräumen, Zeitraum von 1998 bis 2001

6.2. Sichtung der BuRG-Raumluftdaten

Die erste Sichtung der übermittelten 4618 Datensätze ergab zum Teil offene Fragestellungen:

- Bei rund 150 Datensätzen ergab die Prüfung zwischen Postleitzahl und Ortsnamen Unstimmigkeiten in der Zuordnung (bspw. 52152 – Stuttgart)
- Die Verknüpfung der GPS-Koordinaten ist nicht beigefügt
- Messung:
 - Es ist keine Einheit für den Messwert angegeben
 - 213 Messwerte sind mit Radonkonzentrationen von 0 bis 9 angegeben
 - Die restlichen Messwerte sind im Bereich von 10 bis 8734
 - 4 Datensätze haben keine Messwerte
 - Es sind keine Unsicherheiten der Messwerte angegeben
 - Der Messzeitpunkt und die Messdauer sind nicht dokumentiert
 - 801 von 4618 Messwerte sind als Kurzzeitmessungen mittels Aktivkohle dokumentiert

Die insgesamt 801 Datensätze mit Messwerten, die mit einem Sammelzeitraum von nur 3 Tagen genommen wurden, lassen sich für eine Bewertung der Radonbelastung in Baden-Württemberg nicht heranziehen. Der Sammelzeitraum ist nicht aussagekräftig.

Da Geo-Koordinaten nicht zur Verfügung gestellt wurden, erfolgte die Auswertung der Daten hinsichtlich der Ortsangabe mit dem Feld ‚GKZ‘. Diese Gemeidekennzahl wurde als Zuordnung zu den Gemeiden verwendet.

6.3. Raumluft-Messdaten „Radon in baden-württembergischen Schulen“

Neben den Messdaten der BuRG-Datenbank werden die gewonnenen Messdaten des BWPLUS-Projekts „Radon in baden-württembergischen Schulen“ aus den Jahren 2015 und 2016 zur Auswertung herangezogen. Zum Zeitpunkt der Auswertung sind 2551 Messwerte aus 188 baden-württembergischen Schulen am KIT-Radonlabor ausgewertet.

Die Datensätze der Radonmesswerte umfassen eine große Anzahl von zusätzlichen Informationen, unter anderem den Gebäudetyp, das Gebäudealter, die Raumnutzung, etc. In Tabelle 4 sind die einzelnen Datensätze mit Beispielen dargestellt.

Tabelle 4: Beschreibung der „Radon in Schulen“-Datensätze mit Beispielen

<i>Feldname</i>	<i>Datensatz</i>	<i>Beschreibung</i>
GKZ	8119093	Gemeindekennzahl
PLZ	72534	Postleitzahl
Gemeinde	Hayingen	Gemeindenamen
Raumnutzung	Klassenzimmer	Art der Raumnutzung
Unterkellerung	1	Unterkellerung (ja; nein)
Messwert	103	Messwert; Einheit in Bq/m ³
Messunsicherheit	11	Relative Messunsicherheit mit dem Faktor k=1
Messverfahren	Kernspurdetektor	Messverfahren: Kernspurdetektor
Messprogramm	Radon in Schulen	Messprogramm: Radon in baden-württembergischen Schulen, Zeitraum von 2015 bis 2016

6.4. Daten Bodenluftkonzentration

Für die Bodenluftkonzentration wurden dem KIT 352 Datensätze mit Radon-222 Bodenluftwerten vom Bundesamt für Strahlenschutz zur Verfügung gestellt. Die Daten beinhalten folgende Felder:

Tabelle 5: Beschreibung der BuRG-Datensätze mit Beispielen

<i>Feldname</i>	<i>Datensatz</i>	<i>Bemerkung</i>
Projekt	StSch 4106	
Standort	StSch 4106 Deutschland Ergänzung 140	
Laenge	8.790	GPS Längenposition
Breite	48.670	GPS-Breitenposition
StandortGE	exakt bekannt	Für alle Werte ist der Standort exakt bekannt
Tiefe	100.00000	
Verfahren	Szintillationszähler	Einheitliches Verfahren für alle
Parameter	Rn-222 (Radon), 1 m Tiefe	Alle Daten als dieser Parameter, dennoch haben nicht alle eine Tiefe von 1 m
Einheit	kBq/m ³	Alle Daten in dieser Einheit
Messw_BL	76.00000	Messergebnis
MWQualität	uneingeschränkt nutzbar	Der selbe Eintrag für alle Werte

Im Gegensatz zu den Raumlufkonzentrationswerten beinhalten die Datensätze die geographischen Daten in den Feldern ‚Laenge‘ und ‚Breite‘. Die Einheit des Messwerts ist ebenfalls angegeben. Leider fehlt auch hier die Messunsicherheit des Wertes, so dass eine Beurteilung der Werte erschwert wird.

6.5. Auswertung der Raumlufmesswerte

Die wichtigste Frage, die es bei den Messwerten zu beantworten gibt, ist die Frage, wie viele Ergebnisse liegen vor und wie sind diese über das Land Baden-Württemberg verteilt. Dazu wurden die Radonmesswerte über die Gemeindekennzahl den Gemeinden zugeordnet.

Die ersten drei Abbildungen geben die Anzahl der Messwerte der BuRG-Datenbank und der zusätzlichen Messwerte des „Radon in Schulen“-Projekts wieder. Zunächst werden alle Messwerte der BuRG-Datenbank visualisiert. Die darauffolgende Abbildung zeigt alle verwertbaren Messwerte der BuRG-Daten aus Keller- und Erdgeschoss ohne Kurzzeitmesswerte. Als Datengrundlage für die dritte Abbildung werden alle verwertbaren Messwerte in Baden-Württemberg aus der BuRG-Datenbank und dem „Radon in Schulen“-Projekt herangezogen. Darunter gehören alle Langzeitmesswerte aus dem Keller- und Erdgeschoss beider Messdatensätze.

Als Kartengrundlage für die nachfolgenden Abbildungen werden die Vektordaten nach Verwaltungsgrenzen (Gemeinden) des Landesamts für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg verwendet [LGL].

Die Verteilung der Anzahl aller 4618 Radonmesswerte der BuRG-Datenbank ist in der Abbildung 5 dargestellt. Die nicht für eine Auswertung verwertbaren 3-Tages-Werte sind in dieser Abbildung ebenfalls enthalten.

Anzahl an Messungen pro Gemeinde

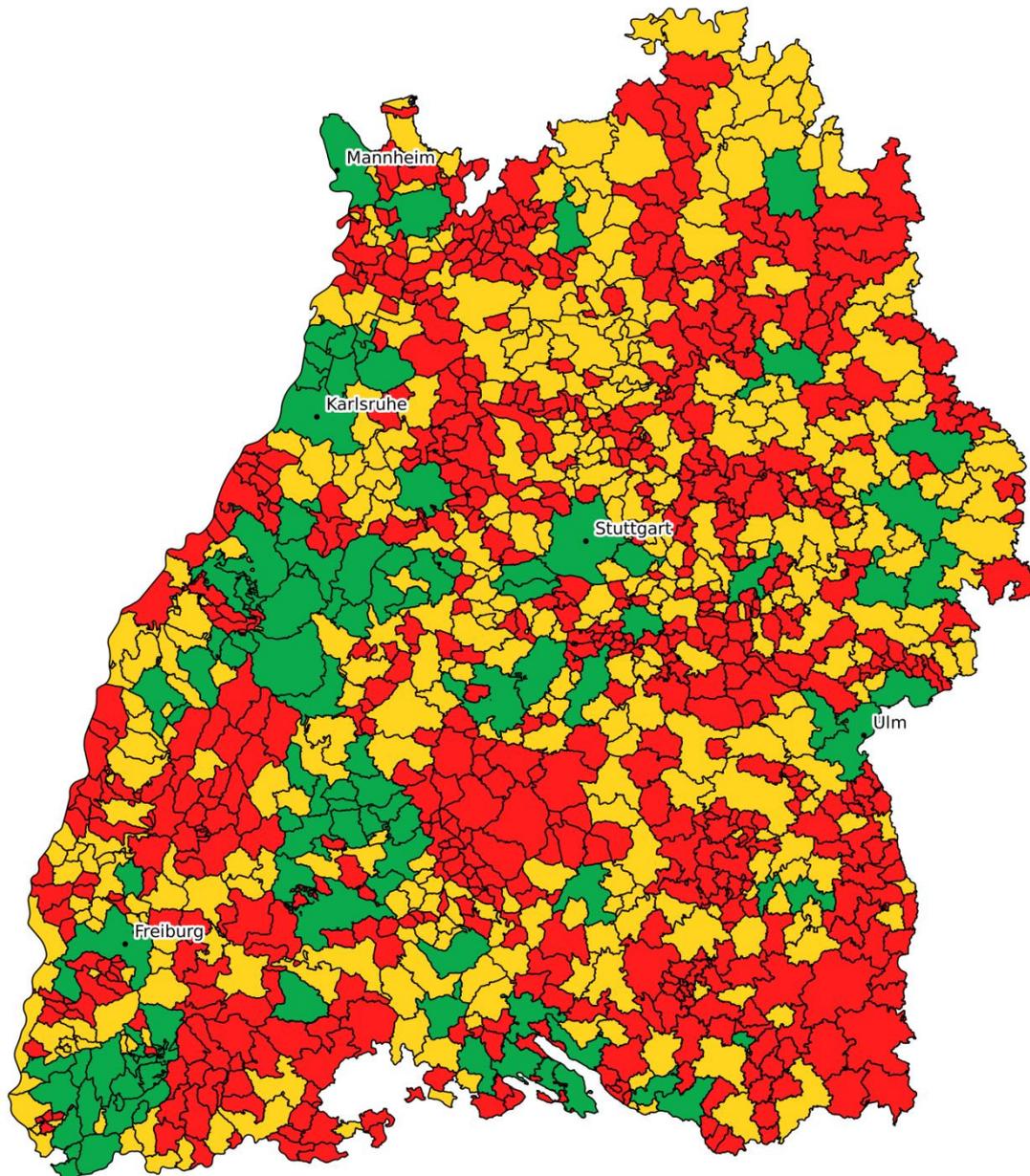


Abbildung 5: Verteilung aller Messwerte aus der BuRG-Datenbank, einschließlich der für eine Auswertung zur möglichen Radonexposition nicht verwertbaren 801 3-Tages-Werte je Gemeinde.

Abbildung 5 zeigt die Anzahl der Raumluftmessungen pro Gemeinde in Baden-Württemberg. In den rot markierten Gemeinden wurden keine Messungen durchgeführt. 603 von 1103 Gemeinden sind der Farbe Rot zugeordnet. Dies entspricht 54,7%. Für mehr als die Hälfte der Gemeinden kann bei Betrachtung dieses Datensatzes folglich keine Aussage über die Radonaktivitätskonzentration in der Raumluft getroffen werden.

In 394 Gemeinden wurden weniger als 10 Messungen durchgeführt. Diese wurden mit der Farbe Gelb markiert und entsprechen 35,7% der Gemeinden Baden-Württembergs. Da für die anschließende Einteilung der Messwerte in 5 verschiedene Klassen Mittelwerte der Messwerte innerhalb einer Gemeinde gebildet werden, kann davon ausgegangen werden, dass eine Messdichte geringer als 10 Messungen pro Gemeinde keinen für die gesamte Gemeinde repräsentativen Wert darstellt. Zusätzlich kann davon ausgegangen werden, dass mehrere Messungen in einem Gebäude durchgeführt wurden.

Wurden in einer Gemeinde 10 oder mehr Messungen durchgeführt, so kann von einer für die Gemeinde repräsentativen Messdichte die Rede sein. Diese Gemeinden werden grün markiert. Mit der Datengrundlage der BuRG-Datenbank ergeben sich hierfür 106 von 1103 Gemeinden. Somit wurden in lediglich 9,6% der Gemeinden Baden-Württembergs ausreichend Messungen zur Bewertung der Radonaktivitätskonzentration in der Raumluft durchgeführt.

Bei genauerer Betrachtung fallen einige Bereiche auf, in denen für nebeneinanderliegende Gemeinden repräsentative Werte vorhanden sind. Diese Bereiche sind im nördlichen Schwarzwald, im Kreis Karlsruhe, sofern dieser in Richtung Rhein betrachtet wird, im Kreis Lörrach, im Kreis Rottweil und im Kreis Tübingen.

Generell wenige Messungen wurden hingegen im Hohenlohe Kreis, im Landkreis Heilbronn, im Enzkreis, im Ludwigsburger Landkreis, im Rems-Murr-Kreis, im Zollernalbkreis, im Ravensburger Kreis und im Waldshuter Kreis durchgeführt. In diesen Landkreisen ist die Karte überwiegend rot. Grüne Felder sind, mit Ausnahme des Ravensburger Kreises, keine vorhanden.

Werden die nicht verwertbaren 801 3-Tages-Messwerte und die Messwerte, welche über Obergeschosse aufgenommen wurden, von der Auswertung ausgeschlossen, ergibt sich die Verteilung der Langzeitradonmessungen pro Gemeinde wie in Abbildung 6.

Anzahl an Messungen pro Gemeinde

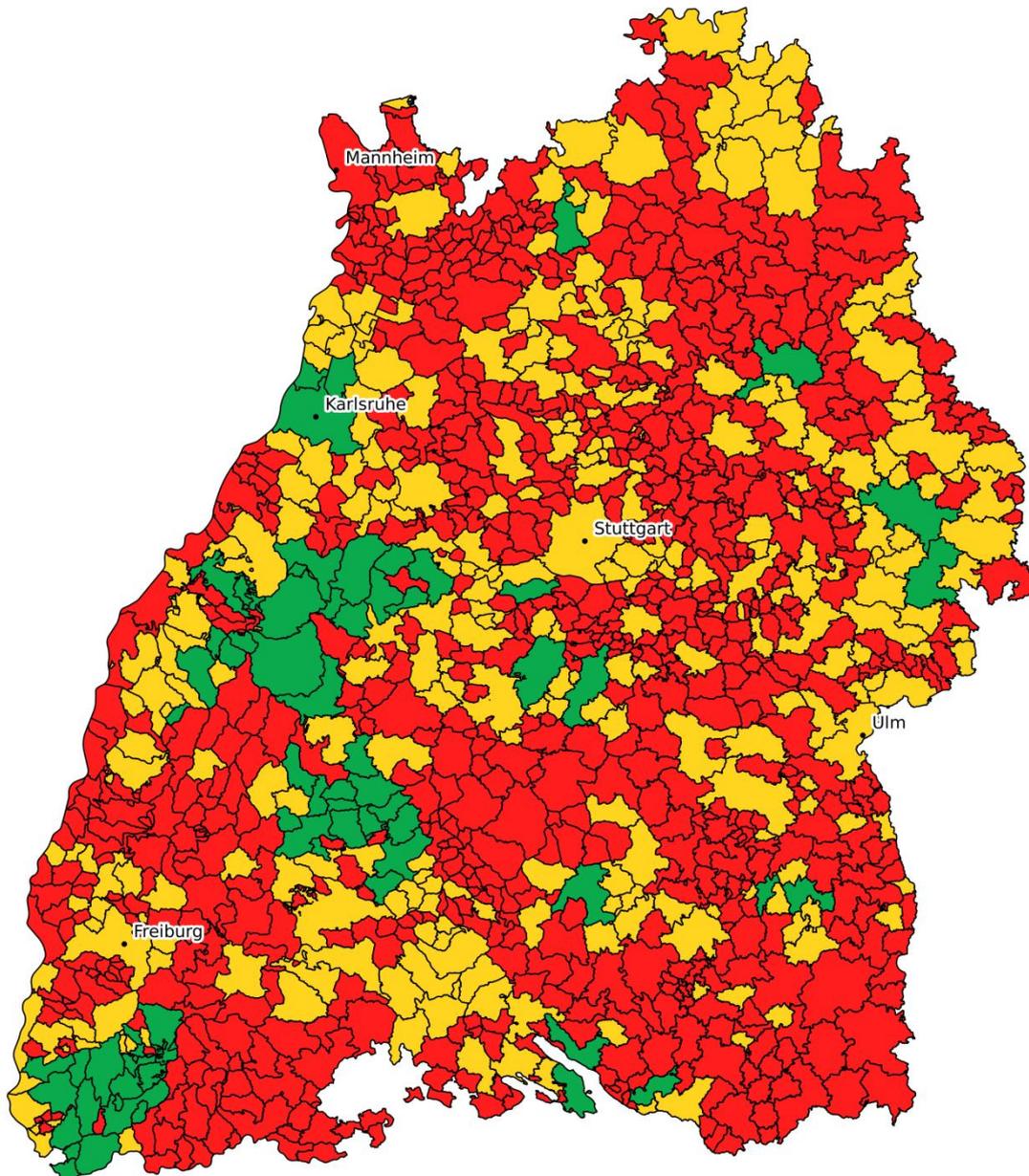


Abbildung 6: Verteilung der Langzeitmesswerte aus Keller- und Erdgeschoss der BuRG-Datenbank.

Da ausschließlich die Auswertung der Langzeitmessungen sinnvoll ist, werden die 801 Kurzzeitmesswerte der BuRG-Datenbank aus der Auswertung entfernt. Zudem wird festgelegt, dass ausschließlich Messwerte aus den Etagen „Erdgeschoss“ und „Untergeschoss“ ausgewertet werden, da die Radonaktivitätskonzentration üblicherweise mit der zunehmenden Etagenanzahl stark abnimmt. Der Einbezug der oberen Geschosse würde die Mittelwerte der Gemeinden absenken und die Radonsituation der vorliegenden Gemeinde verzerren.

Durch die Einbeziehung der Messwerte im Untergeschoss wird eine konservative Betrachtung der Gefährdung durch Radon vorgenommen. Die Anzahl der Messwerte, die in oberen Geschossen ermittelt wurden, beträgt 1065. Stellt man die Anzahl der Messungen pro Gemeinde mit den verwertbaren Datensätzen aus der BuRG-Datenbank dar, so ergibt sich Abbildung 6.

Aufgrund der geringeren Anzahl von Datensätzen wurden in 68,2% der Gemeinden Baden-Württembergs keine verwertbaren Raumluftmesswerte aufgenommen. 25,7% der Gemeinden wurde die Farbe Gelb zugeordnet. In nur 6,1% der Gemeinden wurden ausreichend Messungen mit Aussagekraft durchgeführt.

Im Vergleich zu Abbildung 5 kommen zu den Landkreisen, in denen in keiner Gemeinde ausreichend Messungen vorgenommen wurden der Main-Tauber-Kreis, Mannheim, Heidelberg, der Rhein-Neckar-Kreis, Baden-Baden, Stuttgart, der Landkreis Esslingen, der Landkreis Göppingen, Ulm, der Alb-Donau-Kreis, der Landkreis Tuttlingen sowie die Landkreise Emmendingen, der Breisgau-Hochschwarzwald und Freiburg hinzu. Abbildung 6 zeigt, dass die Definition von Radonvorsorgegebieten für Baden-Württemberg mittels der Raumluft-Datensätze der BuRG-Datenbank nicht möglich ist.

In der nachfolgenden Abbildung werden alle für die Auswertung verwendeten Datensätze aus der BuRG-Datenbank und des „Radon in Schulen“-Projekts (im Nachfolgenden „RiS“ genannt) visualisiert. Darunter fallen alle Langzeitmesswerte im Keller- und Erdgeschoss beider Datensätze. Dies bildet die Datengrundlage für die darauffolgende Bewertung der Messwerte für die Aussagekraft und mögliche Definition von Radonvorsorgegebieten.

Anzahl an Messungen pro Gemeinde

- Keine Messungen [737] ■ 10 und mehr Messungen [124]
■ Weniger als 10 Messungen [242]

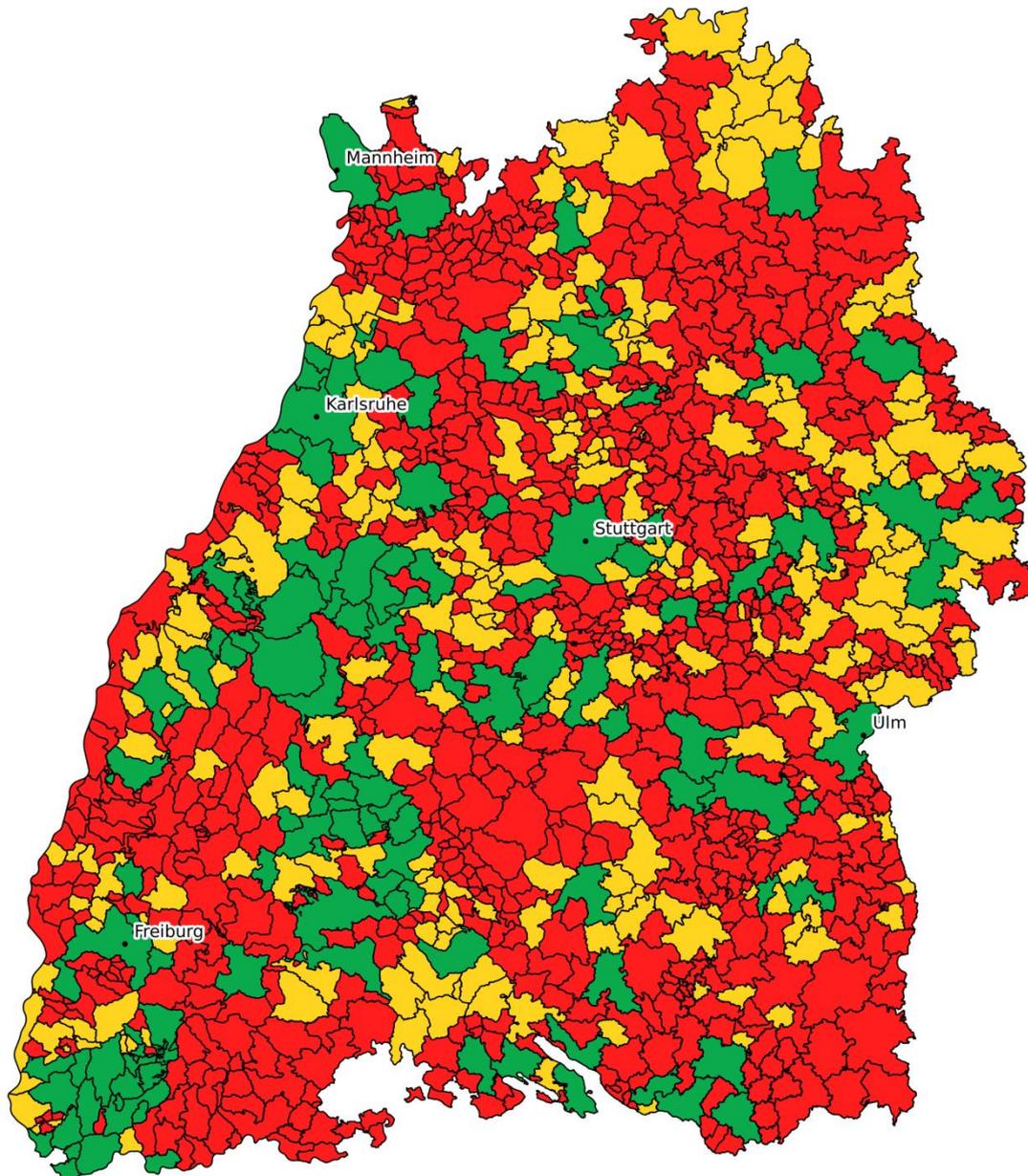


Abbildung 7: Verteilung der verwertbaren Messwerte aus der BuRG-Datenbank (Langzeitmesswerte) und den Datensätzen des „Radon in Schulen“-Projekts je Gemeinde. Es werden lediglich Radonmesswerte aus dem Keller und Erdgeschoss für die Auswertung abgebildet.

Dem Auftrag des Umweltministeriums folgend, wurden für die Auswertung der vorhandenen Radonmessungen in Innenräumen die Datensätze aus der KIT internen Datenbank „Radon in Baden-Württembergischen Schulen“ hinzugezogen. Abbildung 7 stellt die Anzahl der verwertbaren Messungen pro Gemeinde aus der RiS-Datenbank und der BuRG-Datenbank dar. Aus der BuRG-Datenbank wurden ausschließlich die verwertbaren 2752 Datensätze herangezogen. Die RiS-Datenbank wurde vollständig ausgewertet, da aufgrund der Anleitung

zur Detektorplatzierung davon ausgegangen werden kann, dass alle 2551 Messungen entweder im Erdgeschoss oder im Untergeschoss durchgeführt wurden. Trotz der Hinzunahme der RiS-Datenbank wurden in 66,8% der Gemeinden keine Messungen vorgenommen. Zu wenige Messungen für eine repräsentative Messdichte sind noch immer in 21,9% der Gemeinden zu finden. Grün markiert wurden damit nur 11,2% der Gemeinden. Der Vergleich der verschiedenen Datensätze, die in Abbildung 5 bis Abbildung 7 verwendet wurden, ist in Tabelle 6 veranschaulicht.

Tabelle 6: Anzahl und Verteilung der Radonmesswerte aufgrund unterschiedlicher Datensätze in Baden-Württemberg

	Alle Datensätze der BuRG-Datenbank	Verwertbare Datensätze der BuRG-Datenbank	Verwertbare Datensätze aus BuRG-Datenbank + RiS-Datenbank
Anzahl Messpunkte	4618	2752	5303
Keine Messung pro Gemeinde	54,7%	68,2%	66,8%
Weniger als 10 Messungen pro Gemeinde	35,7%	25,7%	21,9%
10 und mehr Messungen pro Gemeinde	9,6%	6,1%	11,2%

Aufgrund der vielen Datensätze der BuRG-Datenbank, deren Auswertung nicht zielführend ist, wird die Datengrundlage durch die Reduzierung dieser deutlich schlechter. Die Hinzunahme der RiS-Daten verringert zwar den Anteil der Gemeinden, in denen keine Messung vorgenommen wurde, nur minimal, erhöht jedoch den Anteil der Gemeinden, in denen 10 oder mehr Messungen durchgeführt wurden, signifikant.

Als Landkreise, in denen in keiner Gemeinde ausreichend Messwerte vorhanden sind, resultieren somit der Rhein-Neckar-Kreis, der Hohenlohe Kreis, der Enzkreis und der Zollernalbkreis. In den Landkreisen Karlsruhe, Calw, Tübingen, Rottweil, Lörrach, Konstanz sowie im Ostalbkreis und im Bodenseekreis wurden verhältnismäßig viele Messungen durchgeführt.

Zusammenfassend kann über die Anzahl der Messungen pro Gemeinde ausgesagt werden, dass die Messwertdichte für eine Festlegung von Radonvorsorgegebieten aufgrund der vorhandenen und auswertbaren Innenraummesswerte nicht ausreichend ist.

Abbildung 7 veranschaulicht alle verwertbaren Datensätze der beiden zur Verfügung stehenden Datenbanken. Diese Datensätze werden ebenso für die folgenden Auswertungen und Abbildungen verwendet. Nach der Dokumentation der vorhandenen Messungen wird in der nachfolgenden Abbildung die Höhe der Messwerte im Gemeindedurchschnitt visualisiert. Als Datengrundlage dienen wie in Abbildung 7 alle Radon-Langzeitmesswerte im Keller- und Erdgeschoss der beiden Datensätze. Gemeinden ohne verfügbare oder für die Auswertung geeignete Radon-Messwerte sind in Grau hinterlegt.

Gemeindemittelwert der Radonkonzentration [Bq/m³]

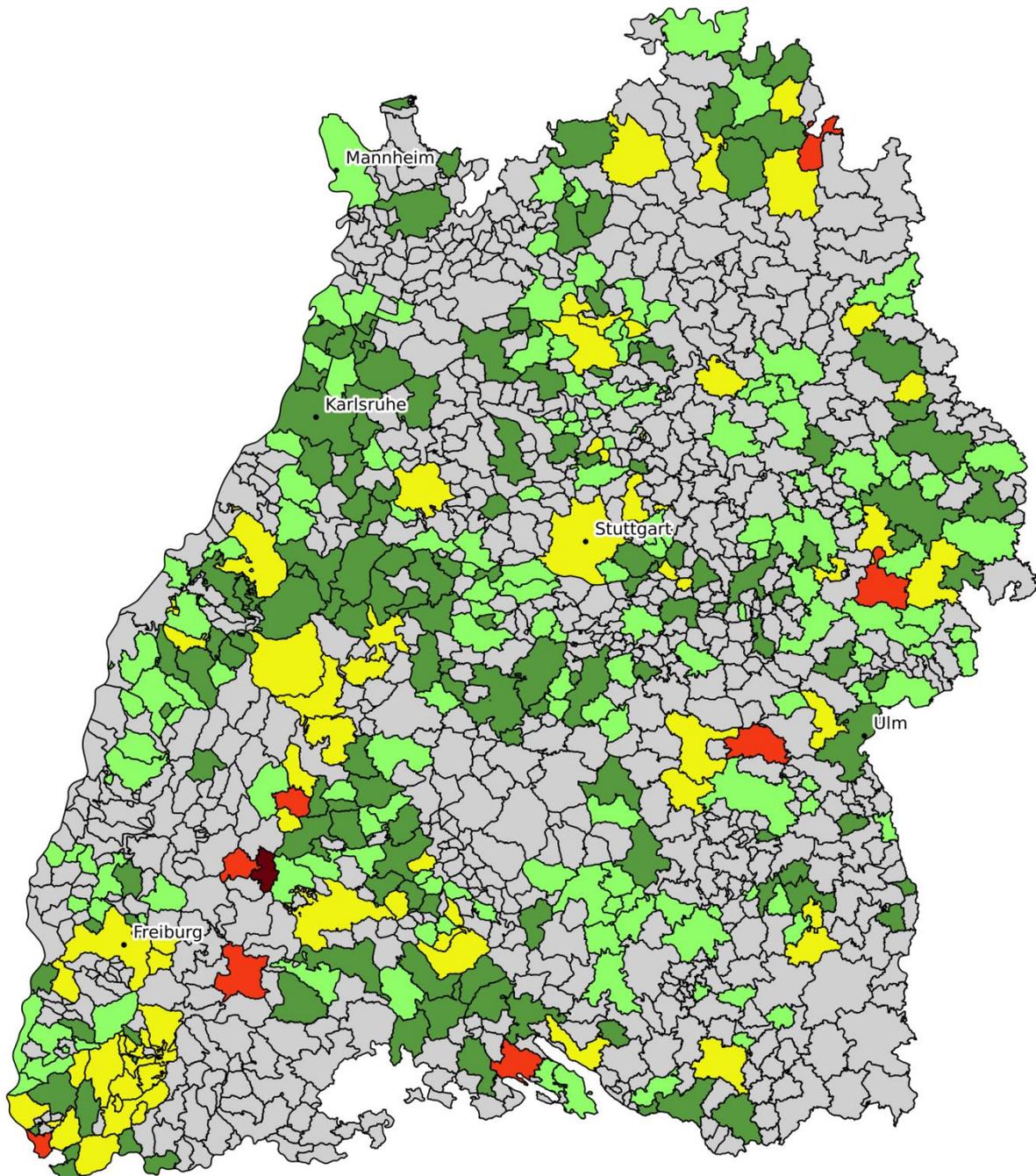
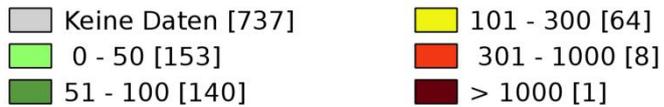


Abbildung 8: Mittlere Rn-222-Aktivitätskonzentration pro Gemeinde im Keller- und Erdgeschoss. Es wurden lediglich Radon-Langzeitmessungen ausgewertet.

Nach der Betrachtung der Verteilung der Messungen, werden nun die Messwerte einbezogen. Innerhalb jeder Gemeinde werden die vorhandenen Messwerte aufsummiert und durch die Anzahl der Messungen geteilt. Es wurden die Daten der Messungen aus

Abbildung 7 verwendet. Es entsteht ein Mittelwert, der bei weniger als 10 Messungen nicht mehr als repräsentativ gesehen werden kann (vgl. Abbildung 7 bzw. Abb. Der Veröffentlichung zum Österreichischen Radonprogramm [ÖNRAP]). Da bei einem Großteil der Messungen keine weiteren Informationen zum Messzeitpunkt (bspw. Heizperiode), der Messdauer (Jahresmessung, 3-Monats-Messung, etc.) bekannt sind sowie keine genauen Informationen zur Gebäudestruktur und Raumnutzung (bspw. Teilunterkellert, Hanglage, Aufenthaltsraum etc.) übergeben wurden, wurden alle Messwerte als gleichwertig definiert und über alle Werte gleich gemittelt.

Die Mittelwerte wurden für die Darstellung auf einer Karte in sechs Klassen eingeteilt:

- Grau: keine Daten vorhanden
- Dunkelgrün: Die Gemeinde weist einen Mittelwert von 0 – 50 Bq/m³ auf. Bei einer ausreichenden Anzahl von Messungen, kann definiert werden, dass die Gemeinde keiner erhöhten Gefährdung durch Radon ausgesetzt ist
- Hellgrün: Die Gemeinde weist einen Mittelwert von 51 – 100 Bq/m³ auf. In Abhängigkeit von der Anzahl der Messwerte und der Unsicherheit könnte eine hellgrüne Gemeinde auch in Dunkelgrün oder Gelb eingestuft werden.
- Gelb: Die Gemeinde weist einen Mittelwert von 101- 300 Bq/m³ auf. Eine gelbe Gemeinde sollte hinsichtlich ihrer Messwertanzahl genauer betrachtet werden. Sind zu wenige Messungen vorhanden, so kann keine Aussage über die Gemeinde getroffen werden.
- Rot: Die Gemeinde weist einen Mittelwert von 301 – 1000 Bq/m³ auf. Besonders in roten Gemeinden sollte die Anzahl der Messungen überprüft werden.
 - Ein Mittelwert über 300 Bq/m³ bedeutet entweder eine in der Luft der Innenräume der Gemeinden erhöhte Radonaktivitätskonzentration oder,
 - dass nur wenige Messungen durchgeführt wurden, die erhöhte Messwerte aufwiesen und somit nicht den Mittelwert der Radonkonzentration der Gemeinde repräsentieren. Ist eine zu geringe Messwertdichte innerhalb der Gemeinde vorhanden, so sind weitere Messungen notwendig, um die Einstufung der Gemeinde in rot zu bestätigen oder eine Fehleinstufung festzustellen.
- Dunkelrot: Die Gemeinde weist einen Mittelwert von über 1000 Bq/m³ auf. Die Repräsentativität der Messwerte sollte betrachtet werden.
- Gemeinden, die in Abbildung 7 rot markiert waren, sind nun grau dargestellt, da ohne Messwerte kein Mittelwert dieser gebildet werden kann. Dies trifft auf 66,8% der Gemeinden zu.
- 13,9% der Gemeinden sind der Farbe dunkelgrün zugeordnet. Diese können, sofern ausreichend Messwerte vorhanden sind, hinsichtlich der Radonthematik vernachlässigt werden.
- 12,7% der Gemeinden sind der Farbe hellgrün zugeordnet. Hellgrüne Gemeinden werden in dieser Auswertung nicht gesondert betrachtet, da sich der Mittelwert unter der 100 Bq/m³ Grenze befindet.
- 5,9 % der Gemeinden sind gelb markiert. Befindet sich eine einzelne gelbe Gemeinde innerhalb mehrerer grüner Gemeinden, so sollte eine genauere Betrachtung dieser vorgenommen werden.

Genauer betrachtet wird die Stadt Pforzheim. In Pforzheim wurde der Mittelwert aus 46 Datensätzen gebildet. Der Mittelwert ist damit repräsentativ. In den umliegenden Gemeinden, die mit der Farbe dunkelgrün markiert wurden, wurden pro Gemeinde jeweils

maximal vier Messungen vorgenommen. In der Gemeinde Remchingen wurde sogar nur eine Messung durchgeführt. In den hellgrünen Gemeinden, die um Pforzheim liegen, wurden mehr Messwerte aufgenommen. In Neuenbürg wurde siebenmal gemessen, in Straubenhardt zweimal. In den Gemeinden östlich von Pforzheim fehlen jegliche Messungen.

Im Falle Pforzheim weist der Mittelwert darauf hin, dass man die geringen mittleren Raumluftaktivitätskonzentrationen der umliegenden Gemeinden nicht auf den gesamten Landkreis (Enzkreis) interpolieren darf. Für die Einschätzung der Gefährdung durch Radon im Enzkreis sind weitere Messungen östlich von Pforzheim notwendig.

Eine weitere gelbe Gemeinde innerhalb grüner Gemeinden ist Stimpfach. In Stimpfach wurde eine Messung im Keller durchgeführt. Diese ergab 131 Bq/m^3 . Da es die einzige Messung in Stimpfach ist, stellt dieser Wert auch den Mittelwert für die Gemeinde dar. Einige umliegende Gemeinden sind grün markiert. Tabelle 7 stellt einige in der Nähe von Stimpfach liegende Gemeinden dar. Diese sind mit vollständig der Farbe Grün zugeordnet

Tabelle 7: Anzahl Radonmessungen in umliegenden Gemeinden von Stimpfach

Gemeinde	Anzahl verwertbarer Datensätze
Jagstzell	2
Ellwangen	6
Crailsheim	30
Neuler	2
Abtsgmünd	1
Sulzbach-Laufen	1
Gaildorf	2
Rosengarten	1
Michelbach	3
Schwäbisch Hall	10

Im Landkreis Schwäbisch Hall stellt sich der Sachverhalt genau umgekehrt dar. Durch weitere Messungen könnte bestätigt werden, dass Stimpfach und Kirchberg an der Jagst fälschlicherweise gelb markiert wurden. Werden für die umliegenden Gemeinden, in denen keine Messungen vorhanden sind, ebenfalls geringe mittlere Radonaktivitätskonzentrationen ermittelt, so kann über den Landkreis Schwäbisch Hall interpoliert werden. Die Folge der Interpolierung wäre die Verringerung der notwendigen Messdichte im Vergleich zu anderen Landkreisen. Zusätzlich könnte der gesamte Landkreis in die Kategorie grün eingeordnet werden.

Die Möglichkeit zu interpolieren ergibt sich auch bei einzelnen grünen Gemeinden zwischen mehreren gelben. Dies kann möglicherweise im Landkreis Tuttlingen der Fall sein. In den dunkelgrünen Gemeinden Seitingen-Oberflacht und Rietheim-Weilheim wurde nur 2, beziehungsweise 1 Mal gemessen. Umliegend befinden sich die gelben Gemeinden Wurmlingen (1 Messung), Tuttlingen (37 Messungen), Dürbheim (3 Messungen) und Trossingen (13 Messungen). Mit weiteren Messungen in den beiden dunkelgrünen Gemeinden und den nicht gemessenen Gemeinden könnte überprüft werden, ob eine Interpolierung möglich und sinnvoll ist. In diesem Falle würde dem Landkreis Tuttlingen die Farbe Gelb zugeordnet werden.

Durch weitere Messungen im Land Baden-Württemberg, könnte festgestellt werden, ob diese Methoden zur Interpolierung in anderen als den hier genannten Landkreisen oder Bereichen anwendbar sind.

0,7 % der Gemeinden sind rot markiert. Diese bedürfen aufgrund der hohen Wahrscheinlichkeit einer Überschreitung des Referenzwertes von 300 Bq/m³ einer detaillierten Betrachtung.

Im Nordosten von Baden-Württemberg befindet sich die rote Gemeinde Igersheim. In Igersheim wurde eine Messung im Erdgeschoss durchgeführt. Die Aktivitätskonzentration betrug 348 Bq/m³. Drei weitere Messungen wurden in höheren Etagen durchgeführt. Diese sind nicht in der Auswertung enthalten. Der Mittelwert der Gemeinde Igersheim ergibt somit 348 Bq/m³. Dadurch wird die Gemeinde mit rot markiert. Durch einige weitere Messungen kann diese Einstufung vermutlich als falsch identifiziert werden. Diese sollten allerdings unbedingt repräsentativ durchgeführt werden.

In Steinheim am Albuch, einer rot markierten Gemeinde nördlich von Ulm ergibt sich dieselbe Situation. In der Gemeinde wurden 11 Messungen durchgeführt. 9 davon befinden sich in den Obergeschossen. Zur Auswertung wurden nur zwei Datensätze herangezogen. Diese besitzen die Werte 698 Bq/m³ und 1149 Bq/m³. Durch die Durchführung zusätzlicher Messungen in dieser Gemeinde könnte die Zuordnung zur Farbe Rot möglicherweise verworfen werden.

In Schelklingen, der roten Gemeinde westlich von Ulm, wurde ebenfalls nur eine Messung durchgeführt.

In der ebenfalls rot markierten Gemeinde Schiltach im Landkreis Rottweil wurden sechs verwertbare Messungen durchgeführt, von denen drei der Messwerte die 300 Bq/m³ überschreiten. Nordwestlich im Schwarzwald-Baar-Kreis liegt die rote Gemeinde Schonach. Zur Veranschaulichung sind die Messwerte, die in Schonach aufgenommen wurden, in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Radonmessungen und Messwerte der Gemeinde Schonach

Etage	Unterkellerung	Messwert
-1		60
0		67
0	voll	136
-1	keine	2085

Drei der vier Messwerte liegen unterhalb des angestrebten Referenzwertes von 300 Bq/m³. Der vierte Wert stellt nun einen Ausreißer dar. Für die Einschätzung der Gefährdung durch Radon in Schonach müssten weitere Messungen durchgeführt werden, damit festgestellt werden kann, ob es sich bei dem Ausreißer um einen Einzelwert handelt oder dieser in anderen Gebäuden reproduziert werden kann.

Östlich neben der Gemeinde Schonach befindet sich die Gemeinde Triberg. Triberg ist die einzige Gemeinde in Baden-Württemberg, die einen Durchschnitt von über 1000 Bq/m³ aufweist und somit mit der Farbe dunkelrot markiert wurde. Hier stehen zwei verwertbare

Datensätze der BuRG-Datenbank und 11 Datensätze aus der RiS-Datenbank zur Verfügung. Die Messwerte aus der BuRG-Datenbank geben weniger als 150 Bq/m^3 an. Die Messungen der RiS Datenbank wurden in einer Realschule in Triberg durchgeführt. Aufgrund der sehr hohen Aktivitätskonzentrationen in der Raumluft der Schule sollten in Triberg weitere Gebäude auf Radon untersucht werden, damit definiert werden kann, ob das Problem nur die Schule betrifft oder die ganze Gemeinde.

Im Osten von Freiburg befindet sich die Gemeinde Titisee-Neustadt, die ebenfalls der roten Farbe zugeteilt wurde. Es wurden 24 Messwerte aufgenommen. Da in keiner angrenzenden Gemeinde eine Messung durchgeführt wurde, ist schwer einzuschätzen, ob sich die dortige Radonproblematik nur auf die Gemeinde bezieht oder auf den gesamten östlichen Teil des Landkreises Breisgau-Hochschwarzwald.

Im Südwesten Baden-Württembergs befindet sich die rote Gemeinde Weil am Rhein. In der Gemeinde wurden 75 Messungen durchgeführt. Im Rahmen des RiS-Projektes wurden in fünf Schulen Messwerte ermittelt. Aufgrund der großen Anzahl der Messungen an verschiedenen Standorten innerhalb der Gemeinde wird empfohlen, die umliegenden Gemeinden ebenfalls genauer zu betrachten. In der nebenliegenden gelben Gemeinde Lörrach wurden ebenfalls viele Messungen durchgeführt, sodass die beiden Gemeinden und gegebenenfalls die umliegenden Gemeinden zu einem Radonvorsorgegebiet definiert werden könnten.

Die letzte rot markierte Gemeinde ist Radolfzell und befindet sich am Bodensee. Von 20 verwertbaren Messwerten liegen 19 unter 120 Bq/m^3 . Der übrige Wert gibt eine Raumluftkonzentration von 8734 Bq/m^3 an. Durch den hohen Ausreißer entsteht in Radolfzell ein Mittelwert von 450 Bq/m^3 . Das Beispiel Radolfzell veranschaulicht, dass es auch in einem Gebiet mit einer generell geringen Radongefährdung Gebäude oder Wohnungen geben kann, die stark von der Radonproblematik betroffen sind. Ausreißer wie diese könnten durch mehr Messungen, durch das Zusammennehmen mehrerer Gemeinden oder der Analyse ganzer Landkreise ausgeglichen werden. Dies hat jedoch zur Folge, dass auch die zu definierenden Radonvorsorgegebiete größere Gebiete umfassen und möglicherweise Gemeinden mit einschließen, die von der Radonproblematik nicht betroffen sind.

Zusammenfassend verdeutlicht Abbildung 8 die geringe Messdichte innerhalb Baden-Württembergs. Die obigen Aussagen konnten nur in Bereichen getroffen werden, in denen bereits relativ viele Messungen vorgenommen wurden. Für die Festlegung von Radonvorsorgegebieten ist eine größere Datengrundlage notwendig.

6.6. Vergleich der Bodenluft- und Raumluftmessungen

Neben den vorhandenen Radon-Innenraum-Messwerten werden die Bodenluftmesswerte des Bundesamts für Strahlenschutz ausgewertet. In der nachfolgenden Abbildung sind die vorhandenen Messungen pro Gemeinde dokumentiert. Es folgen die Auswertung und der Vergleich der vorhandenen Bodenluft-Messungen in Bezug auf die bereits bewerteten Radon-Innenraum-Messungen.

Anzahl an Messungen pro Gemeinde

- Keine Messungen [911]
- Weniger als 10 Messungen [188]
- 10 und mehr Messungen [4]
- Messpunkt

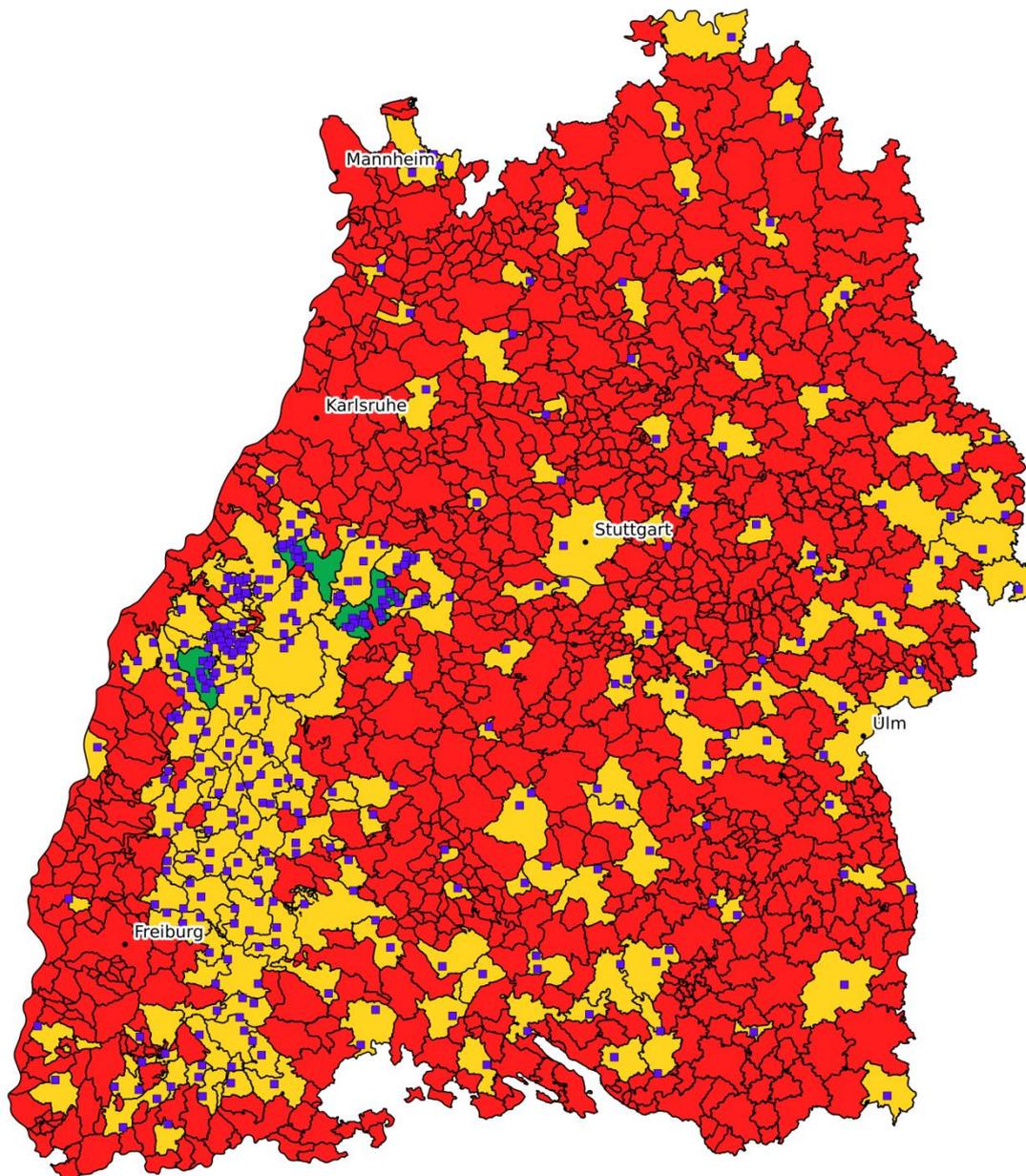


Abbildung 9: Verteilung der Radon-Bodenluftmesswerte aus der BuRG-Datenbank bezogen auf die Gemeindekennzahl.

Abbildung 9 zeigt die Anzahl der Bodenluftmessungen pro Gemeinde. Bei den Bodenluftmessdaten handelt es sich um 352 Datensätze. In der Karte sind die Orte der Messungen durch blaue Vierecke markiert. In 82,6% der Gemeinden wurde keine Bodenluftmessung durchgeführt. In wenigen Gemeinden außerhalb des Schwarzwaldes wurden mehr als eine Messung vorgenommen. Nur in 4 von 1103 Gemeinden stehen 10 oder mehr Messwerte zur Verfügung.

Zwei Drittel der gesamten Bodenluftmessungen wurden im Schwarzwald durchgeführt. In diesem Gebiet liegt daher eine verwertbare Messwertdichte vor. Das übrige Drittel der Messungen verteilt sich auf die Fläche von ganz Baden-Württemberg. Die Messwertdichte ist abgesehen vom Schwarzwald als gering anzusehen.

Für eine Festlegung der Radonvorsorgegebiete ausschließlich durch Bodenluftmessungen sind weitere Messungen in Baden-Württemberg notwendig. Die vorhandenen Bodenluftdaten eignen sich hingegen zur Festlegung von Gemeinden, in denen eine höhere Messdichte der Raumluftdaten notwendig ist.

In der nachfolgenden Abbildung 10 wird das Vorhandensein von Radoninnenraummessungen und Radonbodenluftmessungen visualisiert. Die Abbildung soll veranschaulichen, in welchen Bereichen/Gemeinden welche Radondatengrundlagen vorhanden sind.

Vorhandene Daten in den Gemeinden

- Keine Daten vorhanden [608]
- Nur Raumluftdaten vorhanden [303]
- Nur Bodenluftdaten vorhanden [94]
- Raumluft- und Bodenluftdaten vorhanden [98]

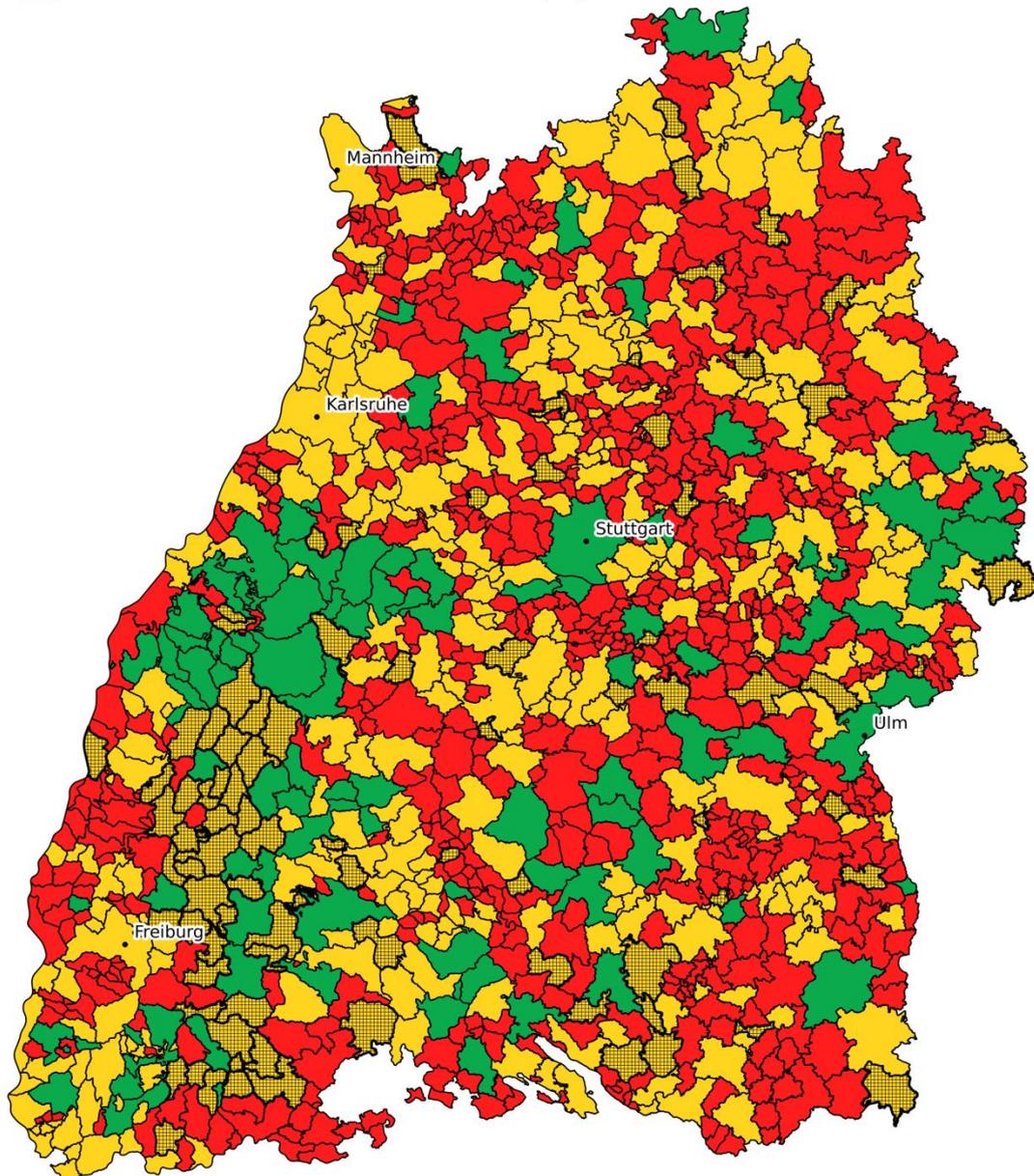


Abbildung 10: Vorhandensein von Radonmesswerten in Raum- und/oder Bodenluft bezogen auf die Gemeindekennzahl.

Abbildung 10 stellt anschaulich dar, in welchen Gemeinden in Baden-Württemberg Messdaten welcher Art vorhanden sind. Die Datengrundlage besteht dabei aus den Langzeitmessungen der BuRG-Datenbank aus Keller- und Erdgeschoss, der gesamten RiS-Datenbank sowie den Bodenluftdaten.

In 55% der Gemeinden wurden keine Radonmessungen durchgeführt. Auffällig ist der Nordschwarzwald, in dem eine solide Messdatendichte besteht. Fraglich ist, weshalb im

Mittel- und Südschwarzwald eine hohe Zahl an Bodenluftmessungen durchgeführt wurde, jedoch keinerlei Raumlufdaten vorhanden sind. Zudem können, wie bei Abbildung 9 erläutert, alleinige Bodenluftmessdaten nicht zur Definition von Radonvorsorgegebieten empfohlen werden. Die Gemeinden, in denen bisher nur eine Bodenluftmessung durchgeführt wurde (gelb schraffiert) müssen folglich, in Abhängigkeit des Messwertes der Bodenluftmessung, durch die Durchführung von Raumlufmessungen genauer betrachtet werden.

Ein weiterer Punkt der Auswertung der Radonmessungen in Baden-Württemberg beinhaltet den Vergleich der Messwerte von Radon-Raumlufdaten und bereits durchgeführten Radonbodenluftmessungen. In Abbildung 11 ist die durchschnittliche Radonkonzentration der Langzeitmessungen im Keller- und Erdgeschoss der BuRG- und RiS-Datenbank je Gemeinde zusammen mit der Höhe der Radonbodenluftmessung visualisiert. Zur Auswertung der vorhandenen Daten werden Teilbereiche der Abbildung vergrößert und näher betrachtet.

Radonkonzentration

Bodenluftdaten [kBq/m³] [352]

- 0-20 [78]
- 21-50 [165]
- 51 - 100 [86]
- 101-300 [22]
- 301-1000 [1]

Gemeindemittelwert [Bq/m³] [1103]

- Keine Daten [737]
- 0 - 50 [153]
- 51 - 100 [140]
- 101 - 300 [64]
- 301 - 1000 [8]
- > 1000 [1]

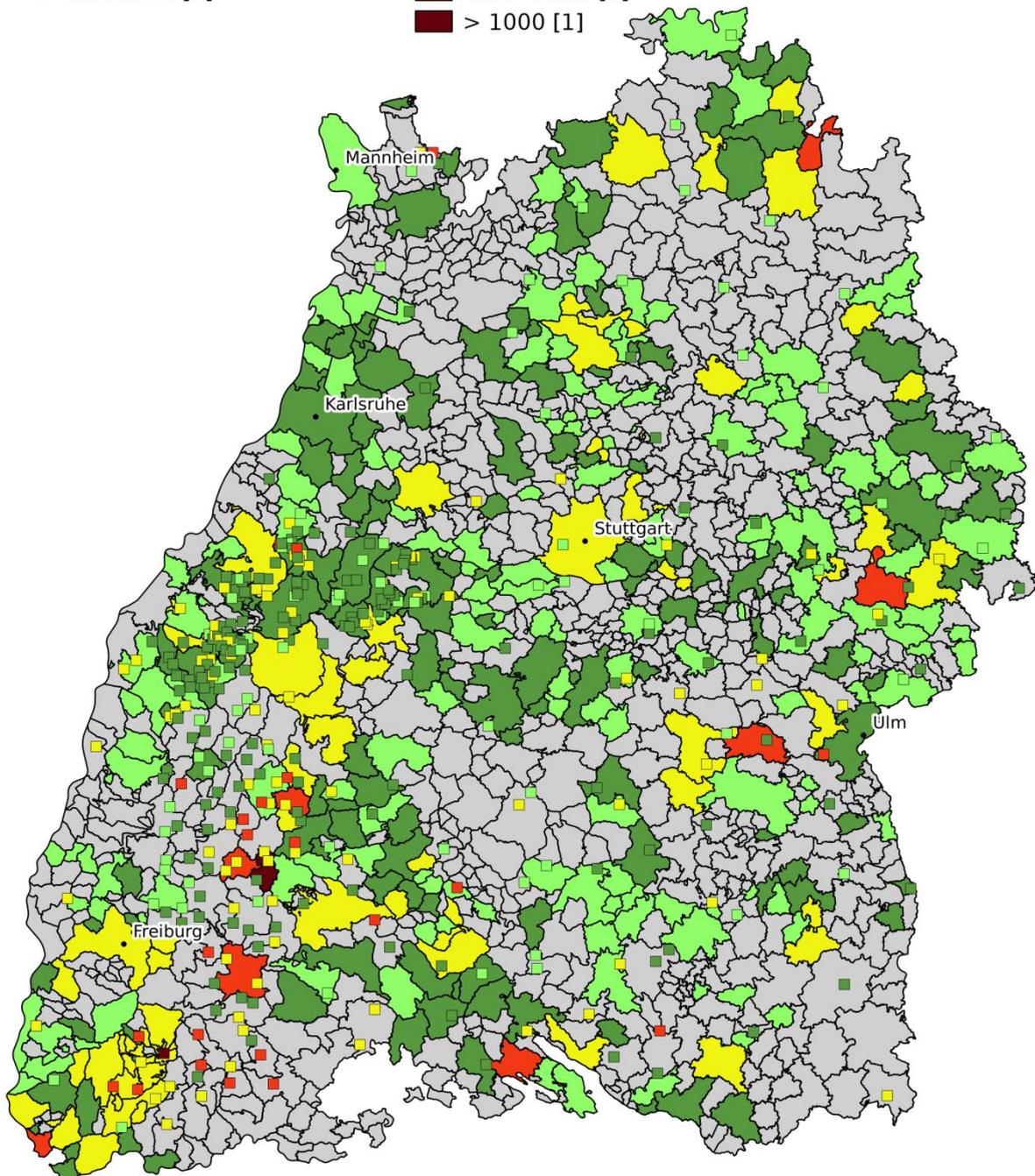


Abbildung 11: Vergleich der mittleren Rn-222-Aktivitätskonzentration pro Gemeinde im Keller- und Erdgeschoss zu den Radonbodenluftmessungen der BuRG-Datenbank.

Abbildung 11 stellt eine Kombination der Karten aus Abbildung 8 und Abbildung 9 dar. Zusätzlich enthält sie die Information, wie hoch die Werte der einzelnen Bodenluftmessungen sind.

Abgesehen davon, dass die Messdichte in Baden-Württemberg allgemein erhöht werden sollte, weisen die Bodenluftmessungen auf Gemeinden und Gebiete hin, denen man sich mit besonderem Augenmerk widmen sollte:

In Gemeinden, in denen der Bodenluftmesswert in die Kategorie gelb eingeordnet wurde, sollten Raumluftmessungen vorhanden sein. Ist dies nicht der Fall, so wird empfohlen, dort Messungen durchzuführen. Dies gilt auch für den Fall, dass in der Gemeinde zu wenige Messwerte vorhanden sind.

Gesondert betrachtet werden grüne Bodenluftpunkte, die sich innerhalb einer roten Gemeinde befinden. Dies trifft auf zwei rote Gemeinden in der Nähe von Ulm zu. Wie bereits beschrieben, wurden dort nur eine oder zwei Radonraumluft-Messungen durchgeführt, sodass die rote Zuordnung (der Raumluft) fehlerbehaftet sein kann.

Radonkonzentration

Bodenluftdaten [kBq/m ³] [352]	Gemeindemittelwert [Bq/m ³] [1103]
0-20 [78]	Keine Daten [737]
21-50 [165]	0 - 50 [153]
51 - 100 [86]	51 - 100 [140]
101-300 [22]	101 - 300 [64]
301-1000 [1]	301 - 1000 [8]
	> 1000 [1]

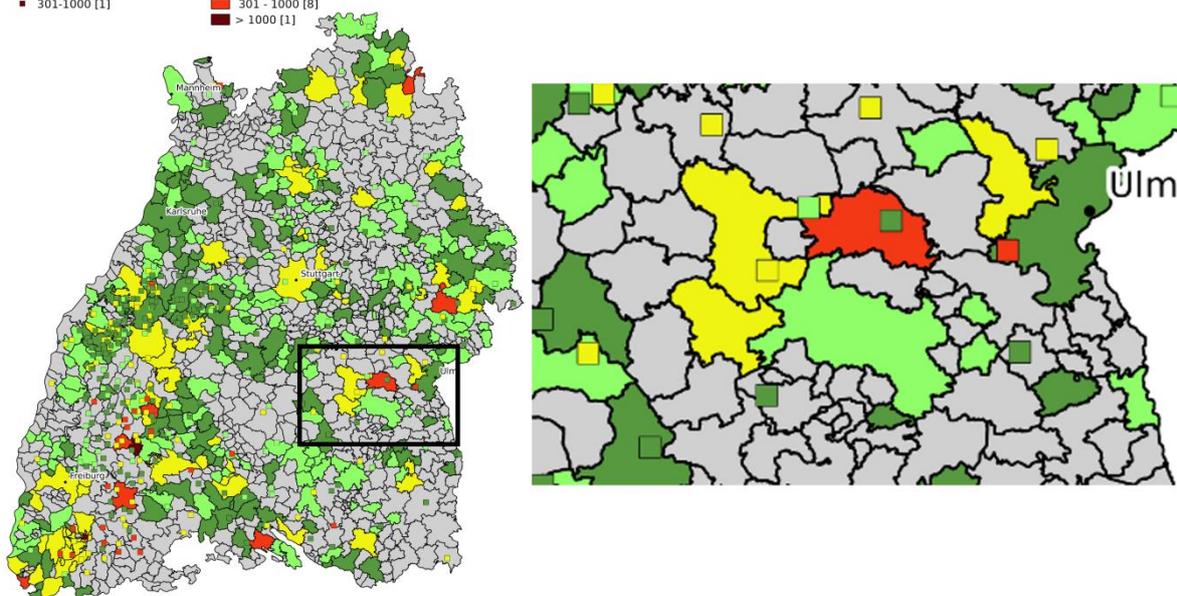


Abbildung 12: Ausschnitt Ulm aus Abbildung 11 zur genaueren Einzelfallbetrachtung

Ebenso sollten rote Bodenluftpunkte in grünen oder sogar grauen Gemeinden beachtet werden. Dies ist in Ulm in der Nähe der Gemeindegrenzen zu Erbach und Blaubeuren der Fall. Da in Ulm 61 Raumluftmessungen durchgeführt wurden, ist diesen eher Beachtung zu schenken als einem einzelnen Bodenluftwert. Der Bodenluftwert könnte mit einer wiederholten Bodenluftmessung validiert werden. Zudem sollten in Erbach und Blaubeuren Raumluftmessungen durchgeführt werden, damit festgestellt werden kann, ob die erhöhten Bodenluftaktivitätskonzentrationen bspw. Ausreißer sind.

Ein ähnlicher Fall tritt in Böttingen im Landkreis Tuttlingen auf. Da in Böttingen selbst, sowie den umliegenden Gemeinden wenige Messwerte vorhanden sind, sollten auch hier Raumluftmessungen durchgeführt werden. Mit dem roten Bodenluftpunkt sollte genauso verfahren werden, wie in dem in Ulm.

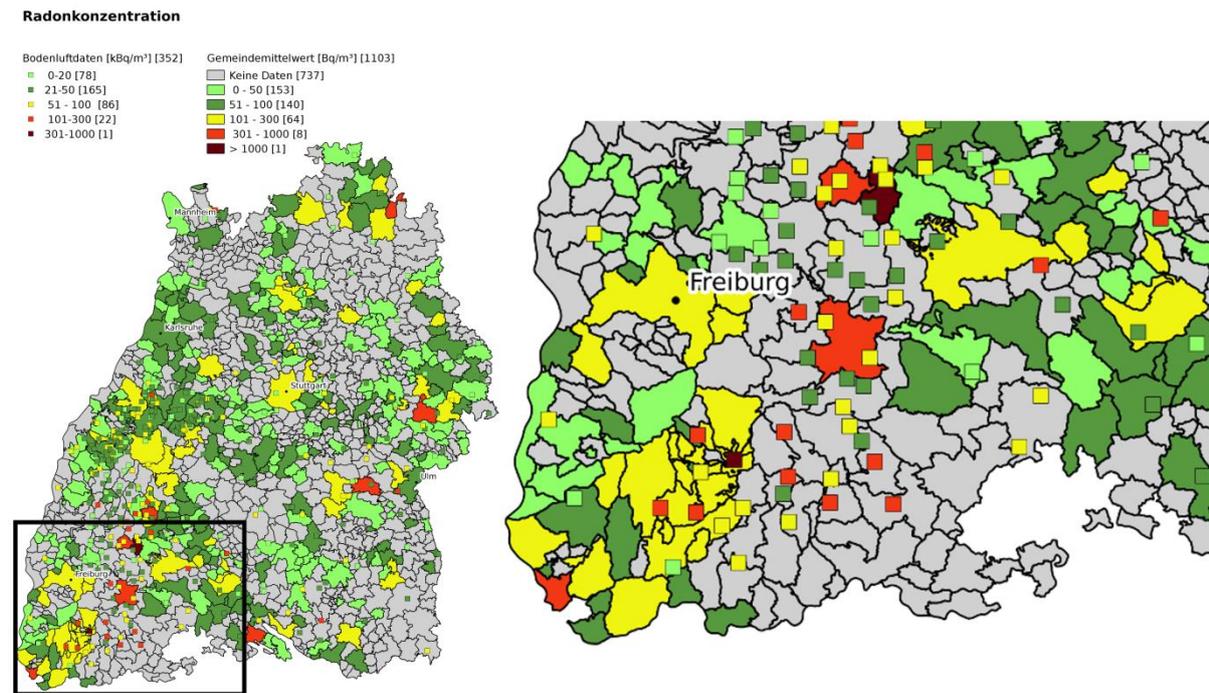


Abbildung 13: Ausschnitt aus dem südwestlichen Baden-Württemberg zur genaueren Einzelfallbetrachtung

In der grünen Gemeinde Gernsbach, in der 75 verwertbare Datensätze zur Raumluft und mehr als 10 Datensätze zur Bodenluft ausgewertet wurden, befinden sich neben grünen und gelben Bodenluftpunkten auch zwei rote Markierungen.

In grauen Gemeinden, in denen sich rote Bodenluftpunkte befinden, sollten Messungen der Radon-Raumluft vorgenommen werden. Dies ist beispielsweise am gemeinsamen Eckpunkt der drei Landkreise Sigmaringen, Ravensburg und dem Bodenseekreis der Fall.

Obwohl in den gelb markierten Gemeinden in Abbildung 13 durchschnittlich mehr als 10 Raumluftmessungen durchgeführt wurden und zudem gelbe, rote und sogar der einzige dunkelrote Bodenluftmesspunkt Baden-Württembergs festgestellt werden konnten, wurden in einem Großteil der Gemeinden keine Raumluftmessungen durchgeführt. Hinzuzufügen ist die Lage im südlichen Teil des Schwarzwaldes, in dem grundsätzlich mit höheren Messwerten zu rechnen ist als in flachen Gebieten Baden-Württembergs. Zur Festlegung von Radonvorsorgegebieten ist die Durchführung von Raumluftmessungen in den grauen Gemeinden in Abbildung 13 notwendig.

Ein weiterer Bereich im Schwarzwald, in dem viele Bodenluftmessungen allerdings nur wenige bis gar keine Raumluftmessungen vorgenommen wurden, befindet sich nordöstlich der Stadt Freiburg. Ein vergrößerter Ausschnitt dieses Bereiches ist in Abbildung 14 dargestellt. Mittig der Karte sind für den Schwarzwald ungewöhnlich viele nicht gemessene Gemeinden vorhanden. Daneben befinden sich grüne, zwei gelbe, zwei rote und sogar die einzige dunkelrote Gemeinde Baden-Württembergs, sowie viele Bodenluftmesspunkte aller Farbkategorien. Weitere Radonraumluftmessungen sollten zur Festlegung von Radonvorsorgegebieten durchgeführt werden.

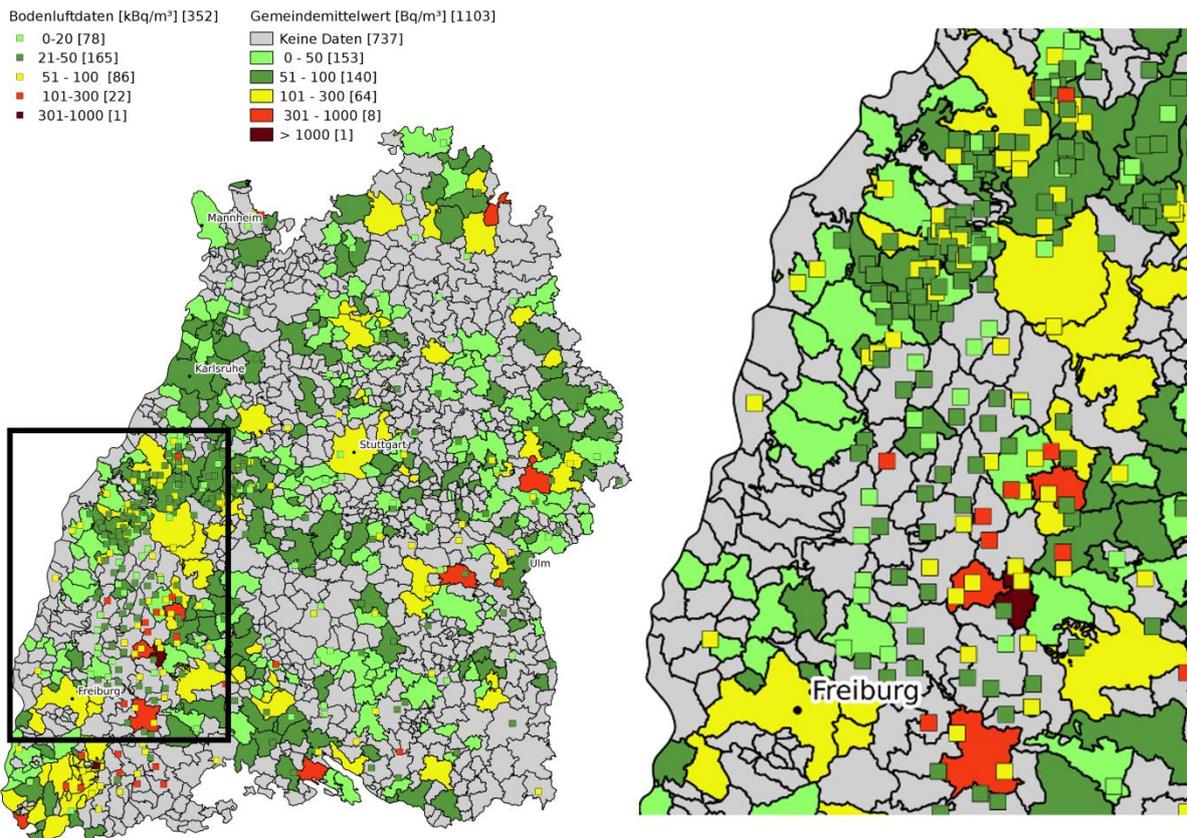
Radonkonzentration

Abbildung 14: : Ausschnitt aus dem nördlichen Freiburg und dem Nordschwarzwald zur genaueren Einzelfallbetrachtung

Zusammenfassend verdeutlicht die Karte aus Abbildung 11, in welchen Gemeinden bevorzugt Messungen durchgeführt werden sollten. Die Karte zeigt ebenso, dass erhöhte Radonbodenluft- oder Raumlufaktiviätskonzentrationen in ganz Baden-Württemberg vorhanden sind.

Die Festlegung von Radonvorsorgegebieten kann zwar die Vorhersage, in welchen Gemeinden oder Landkreisen verstärkt mit erhöhten Werten zu rechnen ist, erleichtern, allerdings kann in diesen Vorsorgegebieten die tatsächliche Gefährdung durch Radon in einem Gebäude nicht vorhergesagt werden.

Die Richtlinie 2013/59/Euratom verpflichtet die Mitgliedsstaaten in Artikel 103 Absatz 3 Gebiete zu ermitteln, für die erwartet wird, dass die Radonkonzentration (im Jahresmittel) in einer beträchtlichen Zahl von Gebäuden den einschlägigen nationalen Referenzwert überschreitet. Wie die Gebiete ermittelt werden sollen, geht aus der Richtlinie nicht hervor, so dass jeder Mitgliedsstaat das Vorgehen und die Vorgehensweise selbst wählen kann. Für die Bundesrepublik Deutschland ist noch nicht öffentlich bekannt, wie die Gebiete ermittelt und festgelegt werden. Eine Rolle dabei wird sicherlich die prognostische Karte zur Radonkonzentration in der Bodenluft des Bundesamtes für Strahlenschutz spielen, die seit Jahren publiziert ist und u. a. auf der Homepage des BfS betrachtet werden kann. Die Karte basiert auf den vorhandenen Radonbodenluftmesswerten aus der BuRG-Datenbank, deren baden-württembergisch bezogener Datenbankauszug in Kapitel 6 zusammengefasst und näher beschrieben ist. Wie in Kapitel 6.6 dargelegt, handelt es sich dabei um landesweit 352

Datensätze (Messorte) mit dem Schwerpunkt im Schwarzwald (s. Abbildung 9). In den übrigen Landesteilen Baden-Württembergs liegen nur sporadisch Messungen der Radonkonzentration in der Bodenluft vor, so dass für eine Gebietsermittlung und -festlegung die Datenbasis als unzureichend bezeichnet werden muss. Sollte ein solcher Ansatz für die Gebietsermittlung und -festlegung weiterverfolgt werden, wären weitere Messungen in nicht unerheblichem Umfang notwendig.

7. Herangehensweise anderer Nationen zur Definition von Radonvorsorgegebieten

Im Folgenden wird (soweit bereits bekannt) die Herangehensweise in anderen Staaten beschrieben. Derzeitig gibt es zwei Ansätze:

1. Ansatz:

Radongebiete werden mittels Messungen der Aktivitätskonzentration in der Raumluft ermittelt. Überschreitet ein festgelegter Prozentsatz der Gebäude den Referenzwert, so wird das Gebiet als Radonvorsorgegebiet definiert. Die ICRP empfiehlt, ein Gebiet als Radonvorsorgegebiet zu definieren, sobald mehr als 1% der Häuser die 10-fache Höhe des Referenzwertes erreicht haben.

2. Ansatz:

Radongebiete werden über das geogene Radonpotential definiert. Anschließend wird eine Verifizierung durch Indoor-Messungen durchgeführt.

Ansatz 1 wird hauptsächlich von Großbritannien, Österreich und der Schweiz umgesetzt. Ansatz 2 verfolgen Schweden, die Tschechische Republik, die USA und Kanada [GI].

Im Folgenden werden die Strategien und momentanen Entwicklungen der USA, von Kanada und von Österreich aufgeführt.

7.1.1. USA

Auf der Homepage der United States Environmental Protection Agency (EPA) ist eine Karte der Radon-Zonen der USA zu finden (Abbildung 15). Die Karte wurde aufgrund von folgenden Faktoren erstellt:

- Mittlere Radonaktivitätskonzentration in Innenräumen
- Urananteil des Bodens
- Geologische Informationen (Bodenbeschaffenheit)
- Permeabilität des Bodens

Aufgrund dieser Faktoren wurden die Gebiete der USA in drei Zonen eingeteilt:

Zone 1: die durchschnittliche Radonaktivitätskonzentration beträgt über 4 pCi/L (148 Bq/m³)

Zone 2: die durchschnittliche Radonaktivitätskonzentration beträgt zwischen 2 pCi/L (74 Bq/m³) und 4 pCi/L (148 Bq/m³)

Zone 3: die durchschnittliche Radonaktivitätskonzentration beträgt unter 2 pCi/L (74 Bq/m³)

Zunächst wurden die USA in etwa 360 geologische Gebiete unterteilt, in denen Messungen durchgeführt wurden. Anschließend extrapolierte die EPA die Informationen, um eine Karte der gesamten USA zu erhalten (siehe hierzu [EPA2] Seite 9ff.). Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Karte nicht für die Einschätzung der Gefährdung durch Radon in einzelnen Gebäuden zu verwenden ist. In jeder der drei Zonen wurden erhöhte Radonlevel festgestellt. Unabhängig von der geographischen Lage sollte jedes Gebäude auf Radon getestet werden [EPA2].

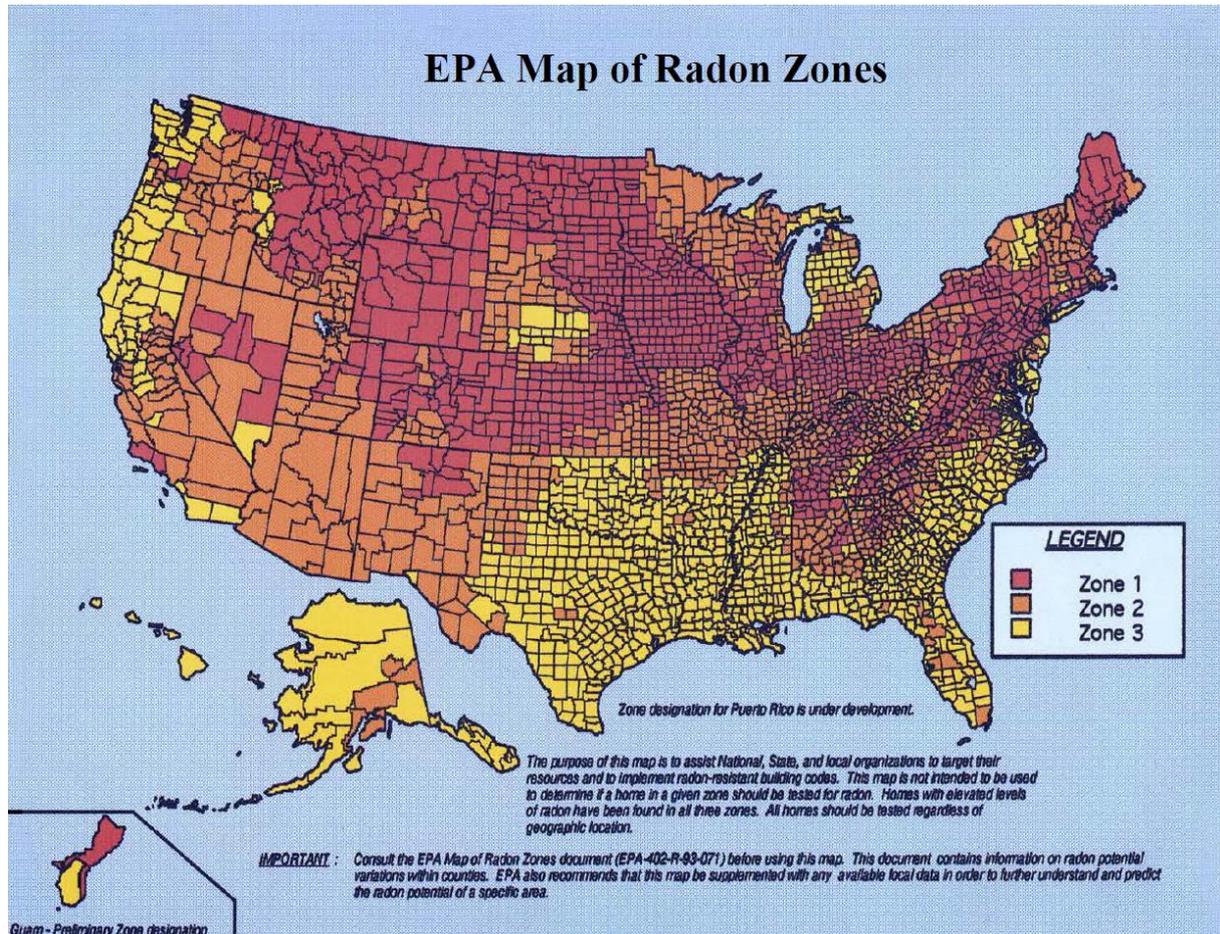


Abbildung 15: EPA Radon-Zonen der USA [EPA2]

7.1.2. Kanada

Kanada erstellte bereits 2011 eine detaillierte Karte des Radon-Potentials und orientierte sich dabei an extrapolierten geologischen Daten der USA. Kanada verwendete dieselben Methoden, die auch die EPA nutzt, um die Radonzonen-Karte für die USA zu erstellen (Abbildung 16) [HC][68].

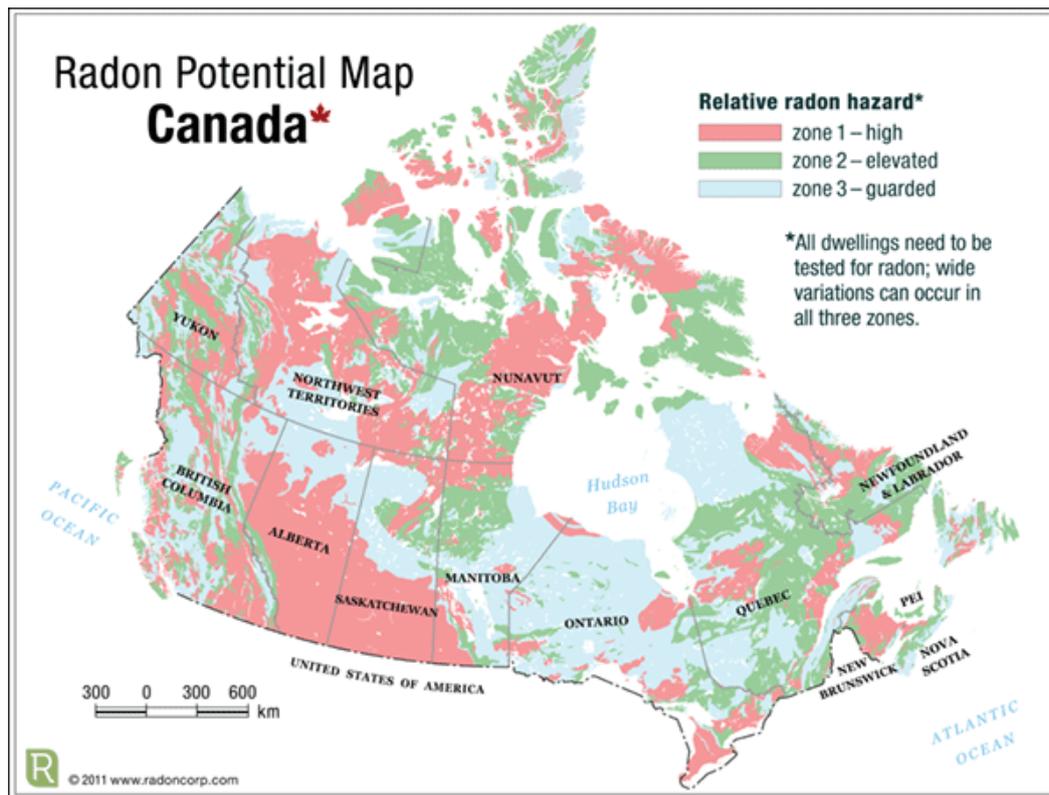


Abbildung 16: Radon-Potential-Karte Kanada [68]

7.1.3. Österreich

7.1.3.1. Das österreichische nationale Radonprojekt

In Österreich wurde bereits eine große Kampagne zum Thema Radon durchgeführt. Diese nannte sich „das österreichische nationale Radonprojekt“ (ÖNRAP) und wurde bis 2003 bearbeitet. Im Zuge des Projektes wurden ungefähr 20000 Wohnungen in Österreich auf erhöhte Radonwerte untersucht. Die Wohnungen wurden entsprechend der Bevölkerungsdichte ausgewählt. In ländlichen Gebieten wurde pro 700 Personen eine Wohnung untersucht. Dies entspricht ungefähr jedem 200ten Haushalt. Da durch eine erhöhte Messdichte in Großstädten keine wesentliche Verbesserung des Wissensstandes entsteht, wurde in Großstädten pro 7000 Personen eine Wohnung untersucht.

Die Wohnungen wurden rein statistisch über das Telefonbuch ausgewählt. Pro Gemeinde wurden somit mindestens zwei Messungen durchgeführt. Die Betreuung der Bewohner fand nicht über eine Fernverbindung statt, sondern über Interviewer, die themenspezifisch fortgebildet wurden. Dadurch ergab sich eine Rücklaufquote von 95-100%.

Die Bewohner der ausgewählten Wohnungen erhielten für die Langzeitmessung mindestens zwei Kernspurdetektoren, die sie an repräsentativen Standorten in den zwei meistgenutzten Räumen positionieren sollten. Meist handelte es sich dabei um das Wohn- und das Schlafzimmer. Messungen im Keller waren nicht vorgesehen, da diese zwar das geogene Radonpotential besser darstellen, allerdings nicht die tatsächliche Belastung der Bewohner. Zusätzlich mussten die Bewohner Fragebögen ausfüllen, die Informationen über die durchgeführte Messung geben:

- genauer Standort des Detektors
- Messzeitraum

- Stockwerk
- Bauweise des Gebäudes
- Aufenthaltszeit
- Zusätzliche Fragen zur Überprüfung der Repräsentativität

Nach Durchführung der Messungen wurde eine Definition für das Radonpotenzial eingeführt. Somit ist das Radonpotenzial der „Erwartungswert für die über das Jahr gemittelte Radonkonzentration in einem, in üblicher Weise genutzten Wohnraum im Erdgeschoß in einem nicht oder nur teilweise unterkellerten Haus, das nicht aus Stein erbaut ist, wobei die Wohnung von zwei Erwachsenen und weniger als zwei Kindern bewohnt ist und keine einfachen Fenster aufweist.“

Messsituationen die nicht der Normsituation entsprachen, wurden mit für die Region spezifischen Korrekturfaktoren extrapoliert.

Anschließend wurden die Ergebnisse auf einer Karte von Österreich dargestellt (Abbildung 17).

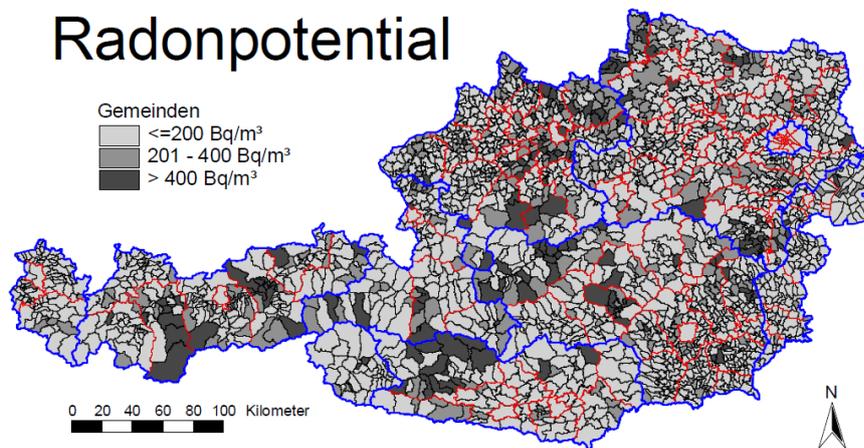


Abbildung 17: Radonpotential in Österreich [ÖNARP]

Aufgrund der strukturierten und konsequenten Durchführung der logisch geplanten Messkampagne ist Österreich durchaus als Vorbild für den Umgang mit dem Thema Radon zu sehen.

7.1.3.2. Ausweisung von Radonvorsorgegebieten

Zur Aktualisierung wurde das Projekt „ÖNARP“ stetig weitergeführt. Derzeit hat die Österreichische Agentur für Ernährungssicherheit (AGES) in Österreich Messkampagnen für die Bundesländer Oberösterreich und Steiermark bereits durchgeführt. Hierbei wurden in Oberösterreich 6500 Wohnungen und in der Steiermark 8000 Wohnen für die Messkampagne ausgewählt. Die Gesamtstrategie der Österreicher ist in der Abbildung 18 wiedergeben.

Strategie - Verdichtungsmessungen



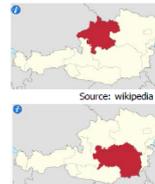
Erweiterung der **Innenraum-Radonmessungen in Wohnungen** österreichweit

Strategie:

- Auswahl der Messstellen geografisch - Berücksichtigung von Rasterzellen, Geologie, Gemeinden
- 6 Monate Messzeit (halb Winter, halb Sommer) mit Kernspurdetektoren
- 2 (meistbenutzte) Räume, bevorzugt im Erdgeschoss
- Fragebögen (Gebäudedaten)
- Messungen in den Häusern/Wohnungen der **Mitglieder der Freiwilligen Feuerwehren** (hierarchisch, kosteneffizient, Multipliers, viele Mitglieder (z.B. in OÖ: 90.000, ds. 6%))

Ziel: ca. 70.000 Messungen (35.000 Wohnungen) in Österreich, finanziert vom BMLFUW

Pilotprojekt in **Oberösterreich** (2013-2015)



und **Steiermark** (2014-2016)

www.ages.at

10

Abbildung 18: Strategie zur Messung des Radonpotentials in Österreich. Auszug aus einem Vortrag der AGES.

Nimmt man Österreich als Vorbild, dann würde sich für Baden-Württemberg bei einer Einwohnerzahl von 10,5 Millionen (Österreich 8,7 Millionen) ein Aufwand von ca. 85 000 Messungen ergeben.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Für Baden-Württemberg stehen zur Bewertung der Radonexposition in Wohnhäusern aktuell nur 5303 aussagekräftige Raumlufdatensätze zur Verfügung. Zusätzlich zu den Raumlufmesswerten sind insgesamt 352 Radon-Bodenluftmesswerte für das Land erstellt worden. Diese Bodenluftdatensätze sind nicht gleichmäßig über das Land verteilt. Bei der Auswertung der Radoninnenraum-Messwerte ergibt sich, dass für 737 Gemeinden keine verwertbaren Messwerte vorliegen (siehe Tabelle 6). In 64 Gemeinden ist der gebildete Mittelwert im Bereich zwischen 100 und 300 Bq/m³ und 9 Gemeinden weisen Mittelwerte über 300 Bq/m³ Radon auf (siehe Abbildung 8). Die gebildeten Mittelwerte sind zum Teil auf sehr wenige Einzelmessungen abgestützt und in manchen Gemeinden liegt lediglich 1 Messwert zugrunde.

Bei der Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Radonbodenluft-Messwerten und gemittelten Raumlufmesswerten in Kapitel 6.6 konnte die Aussage des Bundesamts für Strahlenschutz, dass es hier nur eine bedingte Korrelation gibt, bestätigt werden. Es gibt durchaus auch Radon-Innenraum-Konzentrationen über 300 Bq/m³ in Gebieten, die niedrige Radonbodenluftkonzentrationen aufweisen (siehe unter anderem Abbildung 12).

Eine Ausweisung von Radonvorsorgegebieten in Baden-Württemberg auf Basis der aktuell vorliegenden Datenbasis ist als fragwürdig anzusehen. Sollte die Ausweisung der Radonvorsorgegebiete in Baden-Württemberg auf Basis der Radon-Bodenluft-Messwerte erfolgen, dann sind hierfür weitere Messungen nötig. Die Festlegung der hierfür erforderlichen Messpunkte sollte in einem kleinen Projekt erfolgen um zu gewährleisten, dass die Messpunkte auch die wichtigen Orte abdecken. An der grundsätzlichen Aussage,

dass diese Radon-Bodenluftmesswerte nur bedingt für die Ausweisung der Radonvorsorgegebiete geeignet sind, ändert sich dennoch nichts.

Es wird als viel zielführender angesehen, wenn die Ausweisung der Radonvorsorgegebiete auf Basis von Radoninnenraummessungen erfolgen würde. Die Datenlage für die Radoninnenraumkonzentration in Baden-Württemberg müsste hierzu aber deutlich verbessert werden. Dazu könnten die Ansätze, wie sie in den Ländern Belgien oder Österreich gewählt wurden, durchaus als Vorbild dienen. In Belgien werden Messungen in privaten Häusern vom Staat mit 33% bezuschusst, dafür muss der Eigentümer des Hauses der weiteren Verwendung der Ergebnisse für statistische Auswertungen zustimmen. In Österreich wird eine flächendeckende Messkampagne, die zu 100% staatlich finanziert ist, durchgeführt. Diese Vorgehensweise hat den erheblichen Vorteil, dass alle Parameter der Messkampagne in der Hand der Projektleitung liegen. Damit ist gewährleistet, dass die Messdaten auch zielorientiert erhoben werden.

Die Öffentlichkeitsarbeit ist ein weiterer Punkt, der zu diskutieren ist. Wenn eine Karte mit Radonvorsorgegebieten für Baden-Württemberg veröffentlicht wird, ist mit einem erheblichen Öffentlichkeitsinteresse zu rechnen. Hierfür sollte schon im Vorfeld die Öffentlichkeitsarbeit zum Thema „Radon in Häusern“ vorbereitet werden.

9. Quellenangaben

- [1] <http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00046/00161/index.html?lang=de> 29.07.2016 20:35
- [2] <http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00046/00158/index.html?lang=de> 29.07.2016 20:38
- [3] <http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00046/11952/index.html?lang=de> 29.07.2016 20:48
- [4] <http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00046/> 14.08.2016 19:15
- [5] <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19940157/index.html#a110> 11.09.2016 9:30
- [6] <http://www.ages.at/service/service-strahlenschutz/radonmessung-im-privathaushalt> 29.07.2016 21:15
- [7] <http://www.bmgf.gv.at/cms/home/attachments/0/5/4/CH1238/CMS1253800995913/radoninformation1.pdf> 14.08.2016 19:00
- [8] <https://www.bmlfuw.gv.at/umwelt/strahlen-atom/radon.html> 14.08.2016 19:30
- [9] <http://www.bmgf.gv.at/cms/home/attachments/0/5/4/CH1238/CMS1253800995913/radoninformation1.pdf> 30.07.2016 15:20
- [10] <http://www.bmgf.gv.at/cms/home/attachments/0/5/4/CH1238/CMS1253800995913/radoninformation1.pdf> 21.08.2016 12:00
- [11] <https://www.land-oberoesterreich.gv.at/22588.htm#Abwicklung22635> 11.09.2016 10:15
- [12] <http://www.wohnbau.steiermark.at/cms/beitrag/12118418/117878091/> 11.09.2016 11:00
- [13] <https://www.youtube.com/watch?v=z75znh9SDus> 07.09.2016 9:30
- [14] <http://www.epa.ie/radiation/radon/home/> 27.09.2016 17:30

- [15] <http://www.epa.ie/radiation/radon/fix/> 27.09.2016 18:20
- [16] <http://www.epa.ie/radiation/radon/home/> 27.09.2016 18:10
- [17] <http://www.epa.ie/radiation/radon/workplace/> 27.09.2016 18:00
- [18] <http://www.epa.ie/radiation/radon/fix/> 28.09.2016 14:00
- [19] <http://www.ukradon.org/information/level> 30.07.2016 16:30
- [20] <http://www.ukradon.org/information/workplace> 28.09.2016 15:30
- [21] <http://www.ukradon.org/services/> 30.07.2016 16:45
- [22] <http://www.ukradon.org/information/reducelevels> 21.08.2016 13:00
- [23] <https://www.cornwall.gov.uk/environment-and-planning/environmental-protection/environmental-protection-radon/radon-faqs/#RadonFAQ10> 13.10.2016 14:30
- [24] https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-02/documents/2012_a_citizens_guide_to_radon.pdf 30.07.2016 17:30
- [25] <https://www.youtube.com/watch?v=DXn5s7-QCJY> 14.09.2016 10:45
- [26] https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-02/documents/2012_a_citizens_guide_to_radon.pdf 21.08.2016 15:00
- [27] <https://blogs.cdc.gov/yourhealthyenvironment/2016/08/24/radon-is-real/> 07.09.2016 11:10
- [28] http://portal.hud.gov/hudportal/HUD?src=/program_offices/healthy_homes/healthyhomes/radon 11.09.2016 16:30
- [29] <https://www.cdph.ca.gov/HealthInfo/environhealth/Pages/RadonFix.aspx> 14.09.2016 11:30
- [30] https://www.colorado.gov/pacific/sites/default/files/HM_radon-guide-for-financing-mitigation_1.pdf 29.09.2016 8:00
- [31] <https://www.epa.gov/radon/state-indoor-radon-grant-sirg-program> 13.10.2016 11:45
- [32] <http://www.provinz.bz.it/umweltagentur/strahlungen/gesetze-radon.asp> 30.07.2016 19:16
- [33] <http://www.provinz.bz.it/umweltagentur/strahlungen/gegenmassnahmen.asp> 21.08.2016 15:40
- [34] <http://www.radioprotection.org/articles/radiopro/abs/2016/01/radiopro150033/radiopro150033.html> 19.08.2016 13:00
- [35] <https://www.radonmap.it/radon-description> 19.08.2016 13:00
- [36] <https://www.radonmap.it/> 22.08.2016 8:45
- [37] http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/radiation/radon_canadians-canadiens/index-eng.php#tphp 07.08.2016 16:00
- [38] https://youtu.be/66_s80cRcZE 14.08.2016 17:00
- [39] http://www.davidsuzuki.org/publications/downloads/2015/revisiting_canadas_radon_guideline.pdf 19.08.2016 13:20
- [40] http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/radiation/radon_canadians-canadiens/index-eng.php#tphp 22.08.2016 9:10
- [41] <http://greenbudget.ca/wp-content/uploads/2016/01/GBC-Radon.pdf> 14.09.2016 10:00
- [42] <https://www.lung.ca/radon> 29.09.2016 9:45
- [43] <http://www.nrpa.no/en/topic-articles/91211/facts-about-radon> 07.08.2016 17:50
- [44] https://www.dibk.no/globalassets/byggeregler/regulations_on_technical_requirements_for_building_works.pdf 29.09.2016 10:00

- [45] <http://www.stuk.fi/web/en/topics/radon/maximum-levels-and-regulations-concerning-radon-in-dwellings> 07.08.2016 18:10
- [46] <http://www.stuk.fi/web/en/topics/radon/radon-mitigation> 11.10.2016 15:20
- [47] <http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se>
- [48] K.A. Pachocki, B. Gorzkowski, Z. Różycki, E. Wilejczyk, J. Smoter (2000): Radon ^{222}Rn w budynkach mieszkalnych Świeradowa Zdroju i Czerniawy Zdroju [Indoor radon ^{222}Rn of Świeradów Zdrój and Czerniawa Zdrój], Roczn. Panstw. Zakł. Hig., 51(3), S. 291-298
- [49] <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Global/Pressmeddelanden/2009/Background%20slutversion.pdf> 20.08.2016 11:30
- [50] http://www.radon-info.de/shtml/rn_europa_se.shtml 21.08.2016 10:00
- [51] <http://www.lycksele.se/templates/Page.aspx?id=7097> 12.10.2016 11:30
- [52] <http://www.geology.cz> 17.09.2016 12:00
- [53] <http://www.geology.cz/spec-papers/obsah/no19/19-2.pdf> 20.08.2016 16:15
- [54] REGULATION No. 307/2002 Coll. of the State Office for Nuclear Safety vom 13.06.2002
- [55] <http://www.radon-symposium.de/wp-content/uploads/2015/10/Hurst.pdf> 07.09.2016 8:30
- [56] <http://www.radonovastezka.cz/index.php?lmut=en&part=home> 07.09.2016 10:00
- [57] <http://www.radonovastezka.cz/download/files/flyer.pdf> 07.09.2016 10:00
- [58] <http://www.radonovyprogram.cz/> 17.09.2016 11:45
- [59] <http://www.radonovyprogram.cz/radon/opatreni-proti-radonu.html> 28.09.2016 11:30
- [60] <http://www.radonovyprogram.cz/radonovyprogram/images/clanky/vyprop.pdf> 25.10.2016 17:00
- [61] RADON PROGRAM OF THE CZECH REPUBLIC, K. Petrová and E. Pravdová, Radiation Protection Dosimetry (2014), Vol. 160, No. 1–3, pp. 27–29
- [62] canadaradon.com 20.11.2016 18:00
- [63] http://www.epa.ie/pubs/reports/radiation/RPII_Pamphlet_Radon_Health.pdf 08.11.16 10:40
- [64] http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20110109132023/http://hpa.org.uk/web/hpawebfile/hpaweb_c/1274093496162 13.11.2016 11:00
- [65] http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/radiation/radon/faq_fq-eng.php#indoor 11.11.2016 17:20
- [66] <http://www.nrpa.no/en/topic-articles/91211/facts-about-radon> 11.11.2016 17:45
- [67] <https://www.hausinfo.ch/de/home/gebaeude/gesund-bauen-wohnen/gebaeudebedingte-krankheitsbilder/radon-belastung.html> 08.11.16 9:45
- [68] <http://radonkit.ca/radon-gas-map-for-canada-potential-radon-levels-across-canada/> 14.11.2016
- [69] http://extranet.cstb.fr/sites/radon/Pages/Lieux_publics.aspx 22.11.16 18:00
- [70] http://extranet.cstb.fr/sites/radon/Pages/protection_batiments_existants.aspx 22.11.16 17:00
- [71] http://extranet.cstb.fr/sites/radon/Pages/G%C3%A9n%C3%A9ralit%C3%A9s_Rn.aspx 22.11.16 18:30

- [72] <http://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/natuerliche-strahlenbelastung/natuerliche-strahlenbelastung.html> 24.11.2016 08:05
- [73] http://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2006/Lungenkrebsrisiko_RadoninHaeusern.pdf 24.11.2016 08:06
- [74] http://www.radon-info.de/shtml/rn_europa_dk.shtml 24.11.2016
- [75] <http://www.afcn.fgov.be/fr/news/842.aspx?LG=1> 24.11.2016
- [76] <http://www.actionradon.be/?lang=DE> 24.11.2016
- [77] <https://sst.dk/da/straalebeskyttelse/radioaktivitet/radon> 24.11.2016
- [BfS] <http://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/boden/radon-karte.html> 13.10.2016
- [BMUB] Glossar zu den Messanleitungen für die Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt und externer Strahlung; September 2009
- [DAR] Darby et al., Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies, *BMJ* 2005; 330:223
- [DIN] Deutsches Institut für Normung: Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Vertrauensbereichs) bei Messungen ionisierender Strahlung, 2010
- [EPA1] United States Environmental Protection Agency (EPA): A citizen's guide to radon, January 2005
- [EPA2] EPA: EPA's map of radon zones – National summary, September 1993
- [EURATOM] Empfehlung der Kommission zum Schutz der Bevölkerung vor Radonexposition innerhalb von Gebäuden, Februar 1990
- [GI] Geologisches Institut der Universität Bonn: Das geogene Radon-Potential, Joachim Kemski, Ralf Klingel, Agemar Siehl, Beratende Geologen
- [GUM] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 2008
- [HC] Health Canada: Radon reduction guide for Canadians, May 2014
- [KJK] Dong Xie, Maili Liao, Kimberlee J. Kearfott: Influence of environmental factors on indoor radon concentration levels in the basement and ground floor of a building – A case study
- [LGL] Datenquelle für Geobasisdaten: LGL, www.lgl-bw.de
- [SSK] Band 19: Die Exposition durch Radon und seine Zerfallsprodukte in Wohnungen in der Bundesrepublik Deutschland und deren Bewertung, Oktober 1992
- [StrlSchG] Entwurf: Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz (StrlSchG)), September 2016
- [THM] Technische Hochschule Mittelhessen: Radon emission rate and analysis of its influencing parameters, March 2016
- [TON] F. Tondeur, G. Cinelli, B. Dehandschutter: HIGH RADON AREAS IN THE WALLOON REGION OF BELGIUM, May 2015
- [ÖNARP] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft/ Bundesministerium für Gesundheit, Familie und Jugend: Das österreichische nationale Radonprojekt – ÖNRAP, Projekt-Endbericht