



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

SCHRIFTENREIHE REAKTORSICHERHEIT UND STRAHLENSCHUTZ

VALIDIERUNG DER REGIONALEN VERTEILUNG DER RADONKONZENTRATION IN HÄUSERN MITTELS RADONMESSUNGEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER BAUWEISE

BMU - 2004-641



WIR STEuern UM AUF ERNEUERBARE ENERGIEN.

BMU – 2004-641

**Validierung der regionalen Verteilung der
Radonkonzentration in Häusern mittels
Radonmessungen unter Berücksichtigung der Bauweise**

Bericht zum Forschungsvorhaben St. Sch. 4271

(Berichtszeitraum: 1.07.2001 – 30.06.2003)

Kemski, J., Klingel, R., Stegemann, R.

Kemski & Partner

Beratende Geologen

Alte Heerstraße 1, D-53121 Bonn

IMPRESSUM

Dieser Band enthält einen Abschlussbericht über ein vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördertes Vorhaben. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BMU übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Eigentümer behält sich alle Rechte an der weiteren Nutzung oder Vervielfältigung des Berichts vor.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der Auftragnehmer wieder und muss nicht mit der des BMU übereinstimmen.

Herausgeber:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Arbeitsgruppe RS I 1
Postfach 12 06 29
53048 Bonn

ISSN 1612-6386

Erscheinungsjahr: 2004

Kemski & Partner
Beratende Geologen
Alte Heerstraße 1, D-53121 Bonn

**Validierung der regionalen Verteilungen der Radonkonzentration in Häusern
mittels Radonmessungen unter Berücksichtigung der Bauweise**

Bericht zum Forschungsvorhaben St. Sch. 4271

(Berichtszeitraum: 1.7.2001 – 30.6.2003)

Kemski, J., Klingel, R., Stegemann, R.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.

**Validierung der regionalen Verteilungen der Radonkonzentration in Häusern
mittels Radonmessungen unter Berücksichtigung der Bauweise**

Bericht

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

Abstract

1	Einleitung	1
2	Zielsetzung	2
3	Planung, Organisation und Durchführung der Messkampagne	3
3.1	Auswahl der Untersuchungsgebiete	3
3.2	Planung und Organisation der Messkampagne	7
3.2.1	Allgemeine Vorgehensweise	7
3.2.2	Auswahl der Häuser	9
3.2.3	Fragebogen	10
3.3	Durchführung der Messkampagne	11
3.3.1	Akquisition der Teilnehmer	11
3.3.2	Versendung der Messunterlagen	13
3.3.3	Datenerfassung	14
3.3.4	Geographische und geologische Zuordnung der Gebäude	15
3.3.5	Rücksendung der Exposimeter	16
3.3.6	Auswertung der Exposimeter	17
3.3.7	Weitergabe der Ergebnisse	18

4	Messmethodik	19
5	Ergebnisse	21
5.1	Baucharakteristik der Häuser	22
5.1.1	Hausart	22
5.1.2	Bauweise	24
5.1.3	Haustyp	26
5.1.4	Baualter	28
5.1.5	Baumaterial	30
5.1.6	Bautenschutz	36
5.1.7	Raumnutzung	39
5.2	Messergebnisse	42
6	Validierung der geologischen Prognose	56

Zusammenfassung

In neun Bundesländern wurden insgesamt 6.000 Haushalte für Radonmessungen in Wohnräumen akquiriert. In jedem Haushalt sollten zwei Detektoren im Hauptaufenthaltsraum sowie in einem Kellerraum aufgestellt werden. Mit dem Datum dieses Berichtes liegen 4.260 Messergebnisse aus Kellerräumen, 4.971 Ergebnisse aus Erdgeschossräumen, 825 Ergebnisse aus der 1. Etage und 58 Ergebnisse aus höheren Etagen vor. Die durchschnittliche Rücklaufquote liegt damit bei ca. 86 %. Die Messwerte sind angenähert logarithmisch normalverteilt, die geometrischen Mittelwerte nehmen von 90 Bq/m³ für die Kellerräume über 61 Bq/m³ (Erdgeschoss), 50 Bq/m³ (1. Etage) bis hin zu 46 Bq/m³ für höhere Etagen ab. Insgesamt wurden 1.435 Messräume mit einer Radonkonzentration über 200 Bq/m³ und davon 652 Messräume über 400 Bq/m³ gefunden. Es gibt klare Unterschiede zwischen westlichen und östlichen Bundesländern, die im wesentlichen auf Unterschiede in der Bauausführung zurückzuführen sind. Die geometrischen Mittelwerte liegen in den östlichen Bundesländern um ca. einen Faktor 2, der Anteil an Überschreitungen von EU-Planungs- und EU-Referenzwert um ein Vielfaches höher.

Die Validierung der geologischen Prognose ist gelungen, eine positive Korrelation zwischen Bodenluft und Innenraumwerten vor allem bei einer Gruppierung nach geologischen Einheiten signifikant. Ein deutlicher Anstieg der Überschreitungshäufigkeiten von Planungs- und Referenzwert ist in den westlichen Bundesländern bei Radonaktivitätskonzentrationen in der Bodenluft über 150 kBq/m³, in den östlichen Bundesländern über 100 kBq/m³ zu erkennen.

Die Untersuchungen bestätigen, dass die Deutschlandkarte der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft als Planungsinstrument gut geeignet ist. Eine detaillierte Interpretation der Daten sollte allerdings auf der Grundlage einer kleinermaßstäblichen geologischen Karte bzw. Interpolation erfolgen.

Abstract

6.000 houses in nine federal states of Germany were acquired for radon measurements in dwellings. In each building two detectors should be exposed – one in the living room in the ground floor and one in the basement. Until now, 4.260 measurements in the basement, 4.971 measurements in the ground floor, 825 measurements in the first floor and 58 measurements in higher floors were carried out. So, about 86 % of all detectors were sent back by the participants. The results follow an approximately log-normal distribution. The geometric mean decreases from basement (90 Bq/m³) to higher floors (46 Bq/m³). In 1.435 rooms the radon level exceeds the European level for new buildings of 200 Bq/m³, in 652 rooms the level for existing buildings of 400 Bq/m³. In the eastern part of Germany (Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen) the radon activity concentrations in buildings were significantly higher than in the western part due to the differences in the building and construction type of the houses. The geometric mean in the eastern federal states are about two times higher, the percentage of rooms exceeding the level of 200 and 400 Bq/m³ is more than three times higher.

The prognosis of indoor radon concentrations based on geological informations could be validated. The positive correlation between the geometric mean of two independent data sets (indoor and soil gas radon concentrations) for geological units is highly significant. The percentage of houses exceeding the European levels for new and existing buildings increases for radon activity concentrations in soil gas above 150 kBq/m³ in the western federal states and above 100 kBq/m³ in the eastern federal states.

The interpolated map of soil gas radon for Germany is a useful tool for planning purposes. But, for the detailed interpretation of data on a local scale (municipality) large scaled geological maps should be used.

1 Einleitung

In den vergangenen Jahren wurde im Rahmen zahlreicher Forschungsvorhaben die Verteilung der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft in 1 m Tiefe in der Bundesrepublik Deutschland ermittelt und kartographisch dargestellt. Diese Karte kann als geologisches Prognoseinstrument für die Planung weiterer Messungen – sei es in der Boden- oder Raumluf – dienen. Des weiteren wurden Bergbauggebiete identifiziert, in denen mit erhöhten Radonkonzentrationen in Häusern gerechnet werden kann. Unabhängig davon wurden seit den 70er Jahren zahlreiche Langzeitmessungen der Radonaktivitätskonzentration in Gebäuden in allen Teilen Deutschlands durchgeführt, deren Ergebnisse beim Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) gesammelt werden.

Diese Boden- und Raumlufdaten wurden dazu verwendet, um Gemeinden namentlich aufzulisten, die bei zukünftigen Radonmesskampagnen vorrangig berücksichtigt werden sollten. Im Einzelnen wurde berücksichtigt, ob im Gemeindegebiet Bodenluftkonzentrationen über 80 kBq/m^3 zu erwarten sind und/oder ob innerhalb des Kreises bei Raumlufmessungen eine Überschreitung des EU-Referenzwertes von 400 Bq/m^3 im Jahresmittel im Erdgeschoss bereits aufgetreten oder aufgrund der geologischen Prognose zu erwarten ist. Die Gemeinden wurden in die Kategorien A = höchste Priorität, B = mittlere Priorität und C = niedrige Priorität eingeteilt. Auf der Grundlage dieser Liste wurden für das hier beschriebene Forschungsvorhaben St. Sch. 4271 die zu untersuchenden Gemeinden ausgesucht. Die Auswahl betrifft Gemeinden aller drei Kategorien.

2 Zielsetzung

Die Raumlufmesskampagne wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und unter fachlicher Betreuung des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt. Ziel war die Validierung von Gebieten mit geologisch oder bergbaulich bedingtem erhöhten Radonpotenzial mit Hilfe von Raumlufmessungen. Im Einzelnen sollten auf der Basis der gewonnenen Messwerte und unter Berücksichtigung der Bauweise der Häuser die Mittelwerte in den untersuchten Gemeinden berechnet sowie der relative Anteil an Gebäuden abgeschätzt werden, in denen der europäische Referenzwert von 400 Bq/m^3 im Jahresmittel im Aufenthaltsraum überschritten wird. Im Rahmen des Projektes sollten insgesamt 12.000 Raumlufmessungen in 240 Gemeinden in neun Bundesländern durchgeführt werden. In jeder Gemeinde sollten 25 Gebäude untersucht werden. Die Auswahl der Gemeinden erfolgte durch das BfS in Abstimmung mit den zuständigen Landesbehörden. Die organisatorischen Einzelheiten wurden durch den Auftragnehmer mit den jeweils zuständigen Kreis- und/oder Gemeindebehörden abgesprochen.

Die Messungen erfolgten mit Hilfe von Festkörperspurdetektoren (Exposimeter) nach DIN 25 706-1. Die Messdauer betrug ein Jahr. In jedem Haus sollten je ein Exposimeter im Erdgeschoss im Hauptaufenthaltsraum und ein Exposimeter im Keller - wenn möglich, auch in einem Aufenthaltsraum - exponiert werden. In einem Fragebogen wurden hausspezifische Daten erhoben, die nach einer Plausibilitätsprüfung in eine MS Access-Datenbank eingegeben wurden.

3 Planung, Organisation und Durchführung der Messkampagne

3.1 Auswahl der Untersuchungsgebiete

Für die Raumlufmessungen wurden in neun Bundesländern 240 Gemeinden aufgrund der o.g. Kriterien (s. Einleitung) ausgewählt und auf vier Lose verteilt (Tab. 1). Pro Los sollten in 60 Gemeinden in 1.500 Haushalten 3.000 Exposimeter ausgebracht werden. Los 1 bildeten die Bundesländer Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und Saarland, Los 2 die Bundesländer Hessen und Thüringen, Los 3 die Bundesländer Bayern und Baden-Württemberg und Los 4 die Bundesländer Sachsen und Sachsen-Anhalt. Um eine repräsentative Anzahl an Ergebnissen zu erhalten, wurde die Anzahl der Haushalte pro Gemeinde auf 25 festgelegt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass erfahrungsgemäß mit einer Rücklaufquote von ca. 90 % der ausgebrachten Exposimeter zu rechnen und die Zahl der letztendlich vorhandenen Messwerte daher niedriger ist.

		Gemeinden	Haushalte	Exposimeter
Los 1:	Nordrhein-Westfalen	20	500	1.000
	Rheinland-Pfalz	25	625	1.250
	Saarland	15	375	750
Los 2:	Hessen	20	500	1.000
	Thüringen	40	1.000	2.000
Los 3:	Baden-Württemberg	35	875	1.750
	Bayern	25	625	1.250
Los 4:	Sachsen	44	1.100	2.200
	Sachsen-Anhalt	16	400	800
Summe		240	6.000	12.000

Tab. 1: Vom Auftraggeber vorgegebene Planungsgrundlage für das Projekt

Die Exposimeter wurden durch zwei Unterauftragnehmer bereitgestellt und ausgewertet, um sicherzustellen, dass die benötigte Gesamtmenge von 12.000 Exposimetern fristgerecht geliefert und nach Beendigung der Messungen auch ausgewertet werden kann. Für die Lose 1 und 3 wurden die Exposimeter vom Unterauftragnehmer A, für die Lose 2 und 4 vom Unterauftragnehmer B bezogen.

Von der Planungsgrundlage musste im Laufe des Projektes abgewichen werden, da sich in einigen Gebieten die Durchführung der Messkampagne im vorgesehenen Umfang als unmöglich herausstellte.

Ein wesentlicher Grund hierfür lag in den Bedenken einiger zuständiger Verwaltungen gegenüber der Radonproblematik bzw. in der fehlenden Einsicht der kommunaler Behörden in die Notwendigkeit eines solchen Projektes. So wurde das Projekt in Nordrhein-Westfalen von einem Kreis nicht unterstützt, da "*aus fachlichen Gründen keine Erfordernis für die Messungen gesehen wurde*" und die Bevölkerung nicht durch Diskussionen zum Thema beunruhigt werden sollte. Die ausgewählten sechs Gemeinden aus diesem Kreis wurden aus diesem Grund durch sechs Gemeinden aus einem anderen Kreis ersetzt.

Darüber hinaus gab es vor allem in Baden-Württemberg, Hessen, Rheinland-Pfalz, Sachsen und Thüringen sachliche Beschränkungen. Ein Teil der in diesen Bundesländern für das Projekt vorgesehenen Gemeinden weisen einen Hausbestand von deutlich weniger als 400 Häusern auf. Dies hätte bedeutet, dass z.T. mehr als jeder zehnte Haushalt an der Messkampagne hätte teilnehmen müssen, um die Vorgabe von 25 Haushalten zu erfüllen. Dies ist in der Praxis mit vertretbarem Aufwand nicht umzusetzen. Daher wurde in Absprache mit dem BfS als neue Grundlage für die zu akquirierende Teilnehmerzahl die Wurzel aus der jeweiligen Anzahl der Gebäude pro Gemeinde herangezogen („Wurzel (n)-Prinzip“). Dies führte dazu, dass in Gemeinden mit einem geringen Hausbestand die Anzahl der zu akquirierenden Teilnehmer reduziert werden konnte. So ergab sich beispielsweise in einigen Gemeinden in Baden-Württemberg mit einem Hausbestand zwischen jeweils 73 und 83 Gebäuden nach dem Wurzel (n)-Prinzip eine zu akquirierende Teilnehmerzahl von neun Haushalten je Gemeinde. Umgekehrt konnte in Gemeinden mit einem großen Hausbestand die Anzahl entsprechend erhöht werden.

Aufgrund des mangelnden Interesses der Bewohner einiger Orte, die auch durch aufwändige Akquisitionsmaßnahmen nicht zur Teilnahme an dem Projekt zu bewegen waren, wurden in Absprache mit dem BfS in Baden-Württemberg, Hessen, Sachsen und Thüringen zusätzliche Gemeinden in das Messprogramm aufgenommen sowie Interessensbekundungen von Haushalten aus Nachbargemeinden der im Auftrag aufgelisteten Gemeinden und überzählige Haushalte aus Gemeinden, in denen bereits 25 Teilnehmer akquiriert wurden, berücksichtigt.

Nach Abschluss der Akquisitionstätigkeit nahmen insgesamt 6.000 Teilnehmer aus 421 Gemeinden an den Radonmessungen teil (Tab. 2). Die geographische Verteilung der Gemeinden zeigt Abb. 1.

		Planungs grundlage	Ersatz- gemeinden	Zusätzliche Meldungen	Gesamtzahl der Gemeinden
Los 1:	Nordrhein- Westfalen	20	-	13	33
	Rheinland- Pfalz	25	-	42	67
	Saarland	15	-	3	18
Los 2:	Hessen	20	1	14	35
	Thüringen	40	10	42	92
Los 3:	Baden- Württemberg	35	6	9	50
	Bayern	25	-	3	28
Los 4:	Sachsen	44	17	21	82
	Sachsen- Anhalt	16	-	-	16
Summe		240	34	147	421

Tab. 2: Anzahl der Gemeinden pro Los nach Akquisition

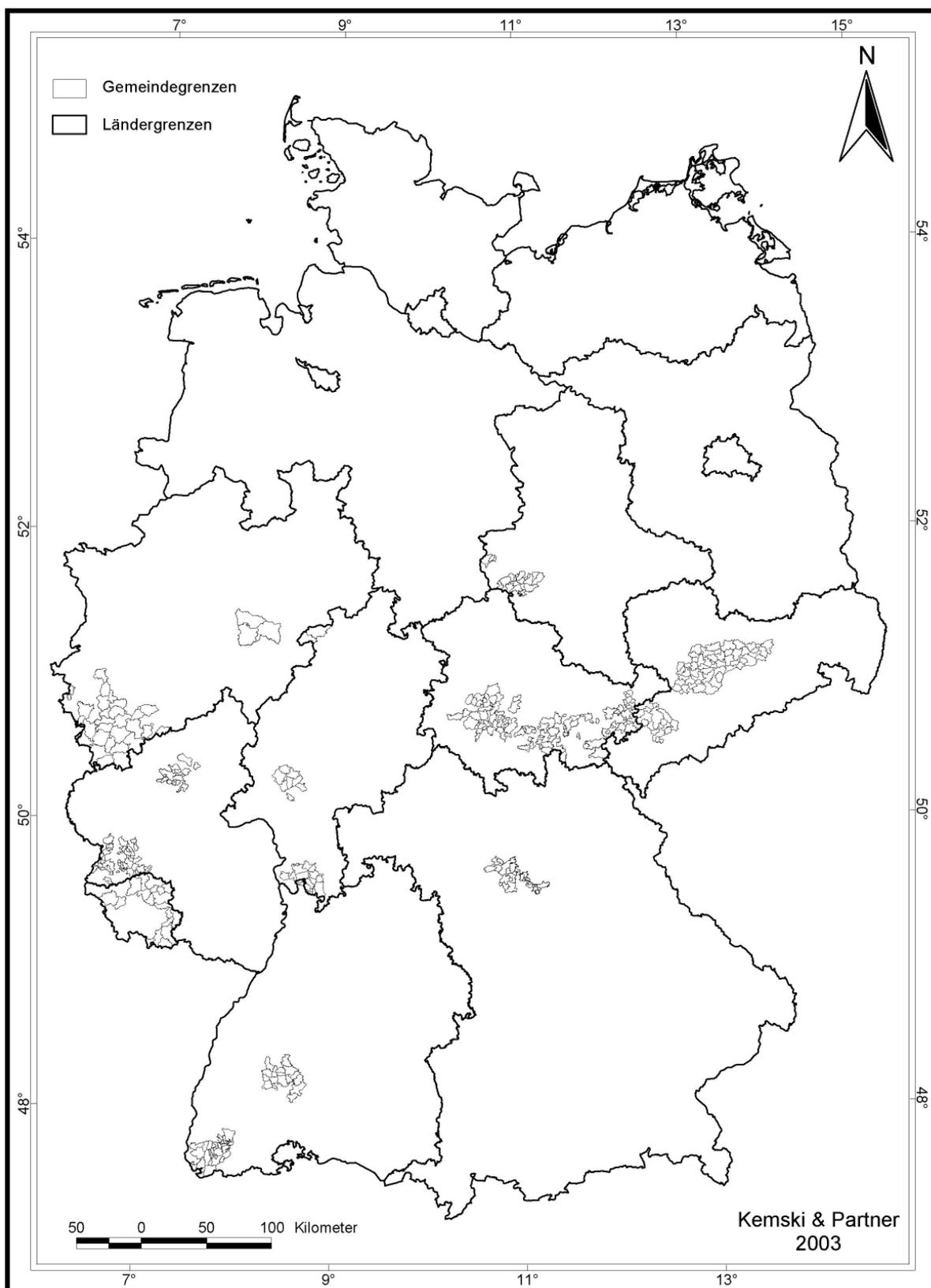


Abb. 1
Geographische Verteilung der untersuchten Gemeinden

3.2 Planung und Organisation der Messkampagne

3.2.1 Allgemeine Vorgehensweise

Die Bearbeitung des Vorhabens lässt sich in mehrere Phasen untergliedern, die zeitlich z.T. aufeinander folgend, z.T. parallel bearbeitet wurden. In allen Phasen des Vorhabens wurden der notwendige Datenschutz und die Datensicherheit gewährleistet.

- Phase 1:
In Phase 1 wurde die Messkampagne unter Berücksichtigung der Vorgaben des BfS geplant.
Bei der Akquisition der Teilnehmer wurden die zuständigen Behörden um Mithilfe gebeten. So wurden Aufrufe in Gemeindemitteilungen u.ä. veranlasst. Nach Bekanntgabe der Messkampagne in den jeweiligen Gemeinden konnten sich interessierte Haushalte telefonisch, schriftlich, per Email oder Fax anmelden.
- Phase 2:
In Phase 2 wurden die Exposimeter, der Fragebogen und eine Aufstellungsanleitung auf dem Postweg an die teilnehmenden Haushalte verschickt. Die Teilnehmer wurden gebeten, den Fragebogen unmittelbar nach Beginn der Messung zurückzusenden; ein entsprechend frankierter und adressierter Rückumschlag wurde dem Anschreiben beigelegt. Erfolgte innerhalb von 6 bis 8 Wochen nach Versendung der Exposimeter keine Rückmeldung durch die Teilnehmer, wurde eine gezielte Nachfrage gestartet.
- Phase 3:
In Phase 3 erfolgte die Datenerfassung. Unmittelbar nach Rücksendung der Fragebögen wurde zunächst die Vollständigkeit der Angaben kontrolliert, fehlende Informationen wurden ggf. nachträglich eingeholt. Die Daten wurden auf Plausibilität und Konsistenz geprüft und in die Datenbank eingegeben. Teilnehmer, die sich nicht zurückmeldeten, wurden gezielt per Brief und telefonisch angesprochen. Gab es trotz mehrmaligen Kontaktes keine Rückmeldung, wurden die Teilnehmer in der Datenbank gesperrt.
- Phase 4:
In Phase 4 wurden die Exposimeter auf dem Postweg eingesammelt und zeitnah zur Auswertung an die Unterauftragnehmer weitergeleitet. Diese Phase wurde um ein Jahr zeitversetzt zur Phase 2 durchgeführt. Entsprechend den Vorgaben des

BfS wurden anschließend die Messergebnisse paketweise an dieses übermittelt, um die Benachrichtigung der Teilnehmer über das Messergebnis in ihrem Haus zu ermöglichen. Teilnehmer, die trotz mehrfacher Aufforderung ihre Exposimeter nicht zurücksendeten, wurden in der Datenbank gesperrt.

- Phase 5:

In Phase 5 wurden die Messergebnisse und Dateneingaben einer abschließenden Qualitätskontrolle unterzogen und die gewünschten gemeindebezogenen statistischen Parameter ermittelt. Anschließend wurden die Ergebnisse zusammenfassend in einem Abschlussbericht dokumentiert.

3.2.2 Auswahl der Häuser

Die Auswahl der Häuser erfolgte nach einer einheitlichen Vorgehensweise. Innerhalb der in Kapitel 3.1 aufgeführten Bundesländer wurden anhand der Gemeindefliste diejenigen Gemeinden festgelegt, in denen die Raumlufmessungen durchgeführt werden sollten. Bei den untersuchten Gebäuden sollte es sich aus Gründen der Vergleichbarkeit um Wohnhäuser handeln; öffentliche Gebäude sollten wegen der oftmals unterschiedlichen Bauweise und Nutzung nicht untersucht werden. Von besonderem Interesse waren daher Einfamilienhäuser, Doppelhaushälften oder Reihenhäuser. Bauweise und Alter spielten keine Rolle. In jedem Haus wurden nach Möglichkeit zwei Exosimeter platziert. Vorrangig sollte die Aktivitätskonzentration im Hauptaufenthaltsraum des Erdgeschosses ermittelt werden, da sich die Empfehlungen der nationalen und internationalen Strahlenschutzbehörden auf Aufenthaltsräume beziehen. Da der geologische Untergrund die Hauptquelle des Radon in Gebäuden darstellt, sollte parallel dazu die Radonkonzentration in einem Kellerraum mit erdberührten Wänden gemessen werden. Die Wahl der Räume wurde den Teilnehmern freigestellt; die Exosimeter sollten nicht in Räumen exponiert werden, in denen mit einem überdurchschnittlich hohen Luftaustausch zu rechnen ist (z.B.: Küche, Badezimmer, Flur, Waschküche, Heizungskeller). Während der gesamten Messzeit sollten die Räume in der üblichen Art und Weise genutzt werden.

3.2.3 Fragebogen

Nach Absprache mit dem BfS wurde ein Fragebogen zur Bauweise und Nutzung des Hauses entworfen. Abweichend zu bereits existierenden Fragebögen anderer Institutionen oder aus älteren Messkampagnen wurde besonderes Augenmerk auf Faktoren gelegt, die für den Radonübertritt aus dem Baugrund ins Gebäude von Bedeutung sind. So wurden Informationen über die Lage des Hauses (z.B.: Hang- oder Tallage, Anzahl der erdberührten Keller- und Erdgeschossräume), die Beschaffenheit des Baugrundes (z.B.: geologisches Ausgangssubstrat, Bodenart) und Bodeneigenschaften in unmittelbarer Nähe des Hauses (z.B.: Bodendurchfeuchtung, Bodenversiegelung) eingeholt. Desweiteren war die Bauweise des Kellers (z.B.: Baumaterial von Kellerwänden, -böden und -decke), das Vorhandensein von Rissen im Kellerboden und in -wänden, von Leitungsdurchführungen, eines Feuchteschutzes oder einer Wärmedämmung von Interesse.

Die Teilnehmer in Sachsen wurden im Fragebogen gebeten, ausdrücklich ihr Einverständnis zur Weitergabe ihrer persönlichen Daten an das zuständige Landesministerium zu erklären, da dieses die Daten für die Durchführung von Landesaufgaben verwenden wollte. Als eindeutige Zustimmung wurde ausschließlich das Ankreuzen der entsprechenden Frage im Fragebogen gewertet. Ein Nicht-Ankreuzen wurde als fehlende Zustimmung interpretiert!

3.3 Durchführung der Messkampagne

3.3.1 Akquisition der Teilnehmer

Bei der Akquisition der Teilnehmer wurden die zuständigen Behörden - in aller Regel handelte es sich um Kreis- bzw. Gemeindeverwaltungen - mit einem Informationsschreiben um Mithilfe bei der Kontaktaufnahme zu interessierten Haushalten gebeten. Mit den zuständigen Bearbeitern wurden die Rahmenbedingungen und die geeignete Vorgehensweise abgesprochen. So wurden sie beispielsweise gebeten, vorbereitete Pressemitteilungen in Gemeindeblättern o.ä. abzdrukken bzw. Anmeldeformulare in der Gemeindeverwaltung auszulegen oder auszuhängen. Das Angebot, Informationsveranstaltungen vor Ort innerhalb der Behörde oder für die Bevölkerung über den Hintergrund der Messkampagne und den derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstand der Radonproblematik durchzuführen, wurde von keiner Gemeinde wahrgenommen.

Die Teilnehmer wurden in den Pressemitteilungen gebeten, sich an der für sie kostenlosen Messkampagne als Testhaushalt zu beteiligen und sich telefonisch, per Brief bzw. Fax oder Email anzumelden. Vereinzelt erfolgte die Akquisition auch über persönliche Kontakte, z.B. über die Werbung von Ratsmitgliedern oder durch den örtlichen Bürgermeister. Zusätzlich wurde Kontakt zu den lokalen und überregionalen Zeitungen aufgenommen, mit der Bitte um Veröffentlichung eines Artikels über das Forschungsvorhaben inkl. eines Aufrufes an die Bevölkerung, sich an dem Messprogramm zu beteiligen. In Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz wurden Hörfunk-Interviews zum Thema durchgeführt. In Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Sachsen und Thüringen wurden vor Ort Informationsblätter verteilt und Bürgerinformationsgespräche geführt.

Obwohl die Messungen nur in privat genutzten Gebäuden durchgeführt werden sollten, wurden nach Absprache mit dem BfS in Gemeinden, die konkret um Messung in öffentlichen Gebäuden gebeten hatten, ein bis zwei öffentliche Gebäude untersucht; hierbei sollten jedoch vorwiegend Schulen oder Kindergärten berücksichtigt werden.

In Gemeinden, in denen die gewünschten Teilnehmerzahlen nur schwer zu erreichen waren, wurde versucht, über Kontakt zu Naturschutzverbänden, Parteien, Feuerwehren und Kindergärten Haushalte für eine Teilnahme an der Messkampagne zu interessieren. Desweiteren wurden Teilnehmer telefonisch über das Forschungsvorhaben informiert und um Teilnahme gebeten.

Nach Abschluss der Akquisition ergab sich die in Tab. 3 aufgelistete Verteilung der teilnehmenden Haushalte.

		Haushalte Planung	Haushalte Akquisition	Anzahl Exposimeter
Los 1:	Nordrhein- Westfalen	500	562	1.124
	Rheinland-Pfalz	625	605	1.210
	Saarland	375	388	776
Los 2:	Hessen	500	563	1.126
	Thüringen	1.000	935	1.870
Los 3:	Baden- Württemberg	875	786	1.572
	Bayern	625	659	1.318
Los 4:	Sachsen	1.100	1.098	2.196
	Sachsen-Anhalt	400	404	808
Summe		6.000	6.000	12.000

Tab. 3: Anzahl der Haushalte laut Planung und nach Akquisition

3.3.2 Versendung der Messunterlagen

Nach Sammlung der Adressen interessierter Haushalte wurden die notwendigen Messunterlagen zusammengestellt, die zusammen mit den Exposimetern verschickt werden. Die Auslieferung erfolgte auf dem Postweg. Jeder Teilnehmer an der Messkampagne erhielt ein Anschreiben, in dem die Ziele des Vorhabens sowie die notwendigen Informationen für die Durchführung der Messung erläutert wurden, zwei Exposimeter, eine Aufstellungsanleitung, einen Begleitzettel, auf dem aus Qualitäts-sicherungsgründen Aufstellort und Messdauer noch einmal separat notiert werden sollte, ein BfS-Informationsblatt über die Radonproblematik sowie einen Fragebogen mit topographischer Karte, in dem um Angaben zur Bauweise und Nutzung des Hauses gebeten wurde.

Die Teilnehmer wurden gebeten, den Fragebogen unmittelbar nach Beginn der Messung zurückzusenden; ein entsprechend frankierter und adressierter Rückumschlag war dem Anschreiben beigelegt.

Nach Versendung der Exposimeter wurde zeitnah in regelmäßigen Abständen routinemäßig geprüft, ob der Fragebogen zurückgesandt worden war und die Teilnehmer mit den Messungen begonnen haben, ggf. erfolgte eine Nachfrage und Erinnerung.

Nach Ablauf der Expositionszeit wurden die Exposimeter auf postalischem Wege eingesammelt und zur Auswertungsstelle weitergeleitet.

3.3.3 Datenerfassung

Bei der Datenerfassung wurden die Vollständigkeit und die Qualität der Angaben im Fragebogen geprüft. In mehr als 95 % aller Fälle waren die Angaben der Teilnehmer vollständig bzw. es bedurfte nur geringer Korrekturen. Lediglich in ca. 5 % aller Fälle mussten einige bzw. zahlreiche Ergänzungen vorgenommen werden.

Die Datenerfassung und -verwaltung erfolgte in einer vom BfS bereitgestellten und unter MS Access 97 erstellten Datenbank „Radonraumlufmessungen“. Alle Daten, die in die Datenbank eingegeben wurden, wurden vorher einer Plausibilitätskontrolle unterzogen. Die Reihenfolge der Dateneingabe und damit auch die Gestaltung der Formulare lehnten sich eng an den Organisationsablauf der Messungen an. Eingabemasken mit Listefeldern, aus denen nur vorgegebene Einträge ausgewählt werden können und die auf dem Inhalt des Fragebogens basieren, ermöglichten eine schnelle, standardisierte und Fehler-minimierende Erfassung der Daten. Konsistenz- und Doppelprüfungen verhinderten eine fehlerhafte Eingabe.

Alle Daten liegen dem Auftraggeber nach Abschluss des Vorhabens in dem vertraglich vereinbarten MS Access 97-Format vor.

3.3.4 Geographische und geologische Zuordnung der Gebäude

Besonderes Augenmerk wurde der exakten räumlichen Lokalisierung des Hauses gewidmet („Geocodierung“), in dem die Radonmessung stattgefunden hat. Erst dadurch wird eine verlässliche Zuordnung zu den oft kleinräumig wechselnden geologischen Einheiten im Untergrund ermöglicht. Dem Fragebogen war zu diesem Zweck ein Auszug aus der topographischen Karte beigelegt, auf dem die Lage des Hauses markiert werden sollte. Für diese Hauslage wurde eine geographische Koordinate (Rechts-/Hochwert) ermittelt. Diese Koordinaten stellen die Basis für die Darstellung der räumlichen Verteilung der untersuchten Gebäude innerhalb der Verwaltungseinheiten dar. Unabhängig vom Bundesland wurde auf diese Weise die Position von 76 % aller Häuser exakt bestimmt, für 19 % der Häuser konnte eine straßengenaue und für ca. 5 % eine ortsgenaue Bestimmung durchgeführt werden.

Auf Grundlage der Hauskoordinaten wurde aus geologischen Karten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) im Maßstab 1 : 200.000 (GK 200) jedem Gebäude eine geologische Einheit zugeordnet. Da die Benennung der Einheiten von Kartenblatt zu Kartenblatt unterschiedlich sein kann, musste anschließend für den gesamten Datenbestand eine Vereinheitlichung der Bezeichnungen vorgenommen werden. Resultat ist die Zuordnung aller Gebäude zu 20 unterschiedlichen geologischen Schichtgliedern. Diese korrespondieren mit den Einheiten der Deutschlandkarte der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft und ermöglichen somit einen unmittelbaren Vergleich.

3.3.5 Rücksendung der Exposimeter

Nach Ablauf der Expositionszeit von 12 Monaten wurden die Messgeräte per Post zurückgefordert, dafür wurde den Teilnehmern rechtzeitig ein frankierter Rückumschlag zugeschickt.

Im Laufe der Messkampagne zeigte sich, dass ca. 15 % der Exposimeter aus den verschiedensten Gründen nicht zurückgesandt und somit der Auswertung entzogen wurden. Gründe waren u.a. Umzug, Teilnehmer verstorben, Unterlagen nicht erhalten, kein Interesse mehr, Krankenhausaufenthalte, versehentliche Entsorgung der Exposimeter durch Personal, Kinder u.a., Hochwasserkatastrophe (in Sachsen), Exposimeter nicht mehr gefunden, auf Postweg verloren gegangen, Exposimeter vergessen aufzustellen. Die Rücklaufquote in den einzelnen Bundesländern ist Tab. 4 zu entnehmen. Die überdurchschnittlich geringe Rücklaufquote in Sachsen-Anhalt ist darin begründet, dass die Messkampagne von den dortigen Behörden (Kreisverwaltungen Quedlinburg und Wernigerode) zentral gesteuert wurde und die Teilnehmer nicht durch Akquisition unsererseits geworben, sondern uns Namenslisten von den Behörden übermittelt wurden. Im Laufe der Kampagne stellte sich heraus, dass viele Teilnehmer nicht ausreichend informiert waren, z.T. nicht einmal über die Weitergabe ihres Namens und ihrer Anschrift Kenntnis besaßen und dementsprechend eine Teilnahme nachträglich ablehnten.

		Akquirierte Haushalte	Zurückgemeldete Haushalte	Rücklaufquote [%]
Los 1:	Nordrhein-Westfalen	562	498	88,6
	Rheinland-Pfalz	605	526	86,9
	Saarland	388	338	87,1
Los 2:	Hessen	563	501	89,0
	Thüringen	935	793	84,8
Los 3:	Baden-Württemberg	786	693	88,2
	Bayern	659	586	88,9
Los 4:	Sachsen	1.098	933	85,0
	Sachsen-Anhalt	404	284	70,3
Summe		6.000	5.152	85,9

Tab. 4: Anzahl zurückgemeldeter Haushalte und Rücklaufquote

3.3.6 Auswertung der Exposimeter

Die Bereitstellung und Auswertung der Exposimeter erfolgte durch zwei Auswertestellen. Die Auswertung der Exposimeter erfolgte anonymisiert und dauerte in der Regel zwischen 4 und 5 Wochen.

3.3.7 Weitergabe der Ergebnisse

Unmittelbar nach der Auswertung wurden die Messergebnisse in einer vorher abgestimmten Form an das BfS weitergeleitet, da von dort die Benachrichtigung der Teilnehmer über das Messergebnis erfolgte. Aus datenschutzrechtlichen Gründen wurden die Teilnehmeradressen und die Ergebnisse getrennt voneinander an das BfS übermittelt; dort konnten die Daten anhand einer eindeutigen Kennziffer einander wieder zugeordnet werden.

4 Messmethodik

Die Raumluftradonmessungen erfolgten nach DIN 25706-1 mit Kernspurdetektoren, die von zwei Unterauftragnehmern geliefert wurden. Diese mussten ihre Qualifikation durch die erfolgreiche Teilnahme an nationalen und internationalen Ringvergleichen in anerkannten Institutionen (z.B.: BfS, PSI, NRPB) innerhalb der letzten Jahre nachweisen. Die beiden Vertragspartner nahmen zusätzlich an einem vom BfS durchgeführten Eignungstest für das zeitgleich laufende Forschungsprojekt St.Sch. 4251 teil. Hierbei wurden die Exposimeter in unterschiedlichen Konzentrationsbereichen über einen Zeitraum von ca. 4 Wochen exponiert. Die beiden Lieferanten erfüllten laut Mitteilung des BfS die gewünschten Anforderungen. Es kamen zwei verschiedene Exposimetermaterialien zum Einsatz: Makrofol (Unterauftragnehmer A) und CR-39 (Unterauftragnehmer B).

Die Exposimeter des Unterauftragnehmers A wurden einzeln in luftdicht verpackten Tüten geliefert, Tüte und Exposimeter waren mit einer eindeutigen Exposimeternummer versehen. Die Nachweisgrenze des Messverfahrens liegt bei einjähriger Exposition bei 3 Bq/m^3 ; Werte $< 3 \text{ Bq/m}^3$ wurden vom Unterauftragnehmer als nicht auswertbar angegeben. In Abhängigkeit von der Spurendichte wurde das Messergebnis vom Unterauftragnehmer mit den Bemerkungen „normal“, „hoch exponiert“, „sehr hoch exponiert“ oder „extrem hoch exponiert“ versehen. „Normal“ umfasst bei einjähriger Exposition eine Raumlufkonzentration bis ca. 500 Bq/m^3 und weist einen Fehlerbereich von $\pm 5 \%$ auf; „hoch exponiert“ umfasst den Konzentrationsbereich zwischen ca. 500 und 700 Bq/m^3 und weist einen Fehlerbereich von $\pm 25 \%$ auf. Die Kategorie „sehr hoch exponiert“ mit einem Konzentrationsbereich zwischen ca. 700 und 1.000 Bq/m^3 weist einen Fehlerbereich von $+ 40 \%$ auf, d.h. die Konzentrationen können 1.000 Bq/m^3 überschreiten. „Extrem hoch exponiert“ bedeutet, dass für die Raumlufkonzentration lediglich eine Untergrenze von 1.000 Bq/m^3 angegeben werden kann (schriftliche Mitteilung des Unterauftragnehmers). Die Responsekurve der Exposimeter, die die Zuordnung von Spurendichte und Exposition zeigt, ist in Abb. 2 dargestellt.

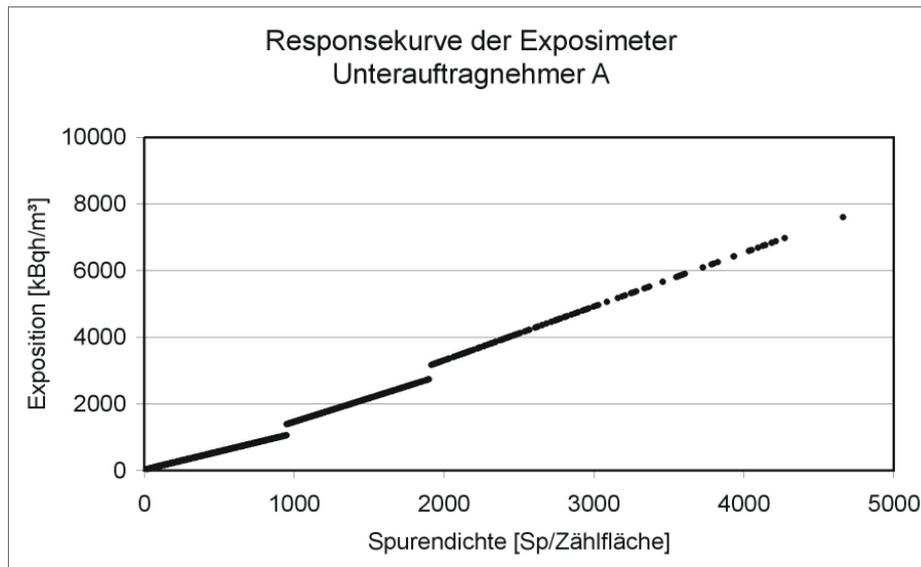


Abb. 2
Responsekurve der Expositometer des Unterauftragnehmers A

Die Expositometer des Unterauftragnehmers B wurden einzeln in luftdicht verpackten Tüten geliefert, Tüte und Expositometer waren mit einer eindeutigen Expositometernummer versehen. Die untere Nachweisgrenze des Messverfahrens liegt bei einjähriger Exposition bei 15 Bq/m^3 , die obere Bestimmungsgrenze bei ca. 10.000 Bq/m^3 . Die Responsekurve, die die Zuordnung von Spurendichte und Exposition zeigt, ist in Abb. 3 dargestellt.

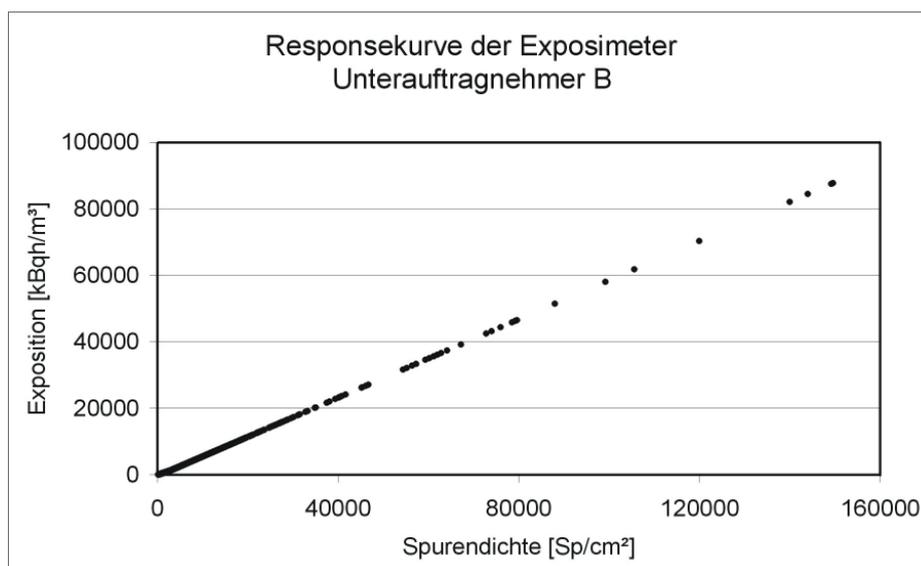


Abb. 3
Responsekurve der Expositometer des Unterauftragnehmers B

5 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden länderbezogen dargestellt und im erläuternden Text nur zusammenfassend beschrieben. Die detaillierte Auswertung liegt dem BMU vor. Dies ist sinnvoller als eine Auswertung nach Losen, da z.T. erhebliche Unterschiede innerhalb des Loses existieren.

Es soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die präsentierten Kennzahlen nicht typisch für ein Bundesland sein müssen, sondern nur eine Aussage über das Messgebiet zulassen, da eine sehr gezielte regionale Auswahl der Gemeinden für die Messkampagne stattgefunden hat. Eine bundeslandbezogene Hochrechnung der Ergebnisse ist nicht zulässig!

In den bisherigen Untersuchungen zur Radonbelastung von Häusern (Forschungsvorhaben St. Sch. 4187 und St. Sch. 4251) wurde die Interpretation der Messdaten eng mit der Baucharakteristik verknüpft. Eine Übersicht der wesentlichen Merkmale wird daher auch in diesem Bericht den Messwerten vorangestellt.

5.1 Baucharakteristik der Häuser

5.1.1 Hausart

Aufgrund der Zielsetzung dieses Projektes wurde der Untersuchungsschwerpunkt analog zu den Forschungsvorhaben St.Sch. 4187 und St.Sch. 4251 auf Gebäude gelegt, die für den ländlichen Bereich und Stadtrandlagen in Deutschland typisch sind. Dazu zählen insbesondere Einfamilienhäuser, Doppelhaushälften und Reihenhäuser. Mehrfamilienhäuser wurden ebenfalls berücksichtigt, hier wurde allerdings darauf geachtet, dass vornehmlich Messräume im Erdgeschoss und nur in Ausnahmefällen im 1. Stock untersucht wurden. Die Einbeziehung großer Wohnanlagen sowie dichter innerstädtischer Bebauung war nicht vorgesehen. In einigen Fällen wurden auf Wunsch der betroffenen Gemeinden auch öffentliche Gebäude in die Untersuchung einbezogen. Die Verteilung der Hausart ist in Abb. 4 dargestellt. Die freistehenden Einfamilienhäuser überwiegen deutlich mit 56 bis 72 % aller Wohngebäude. Reihenhäuser sind untergeordnet zwischen ca. 3 und 12 % vertreten, der Anteil an Doppelhaushälften liegt bei ca. 8 bis 16 %. Der Anteil an Mehrfamilienhäusern variiert deutlich zwischen ca. 8 und 23 %.

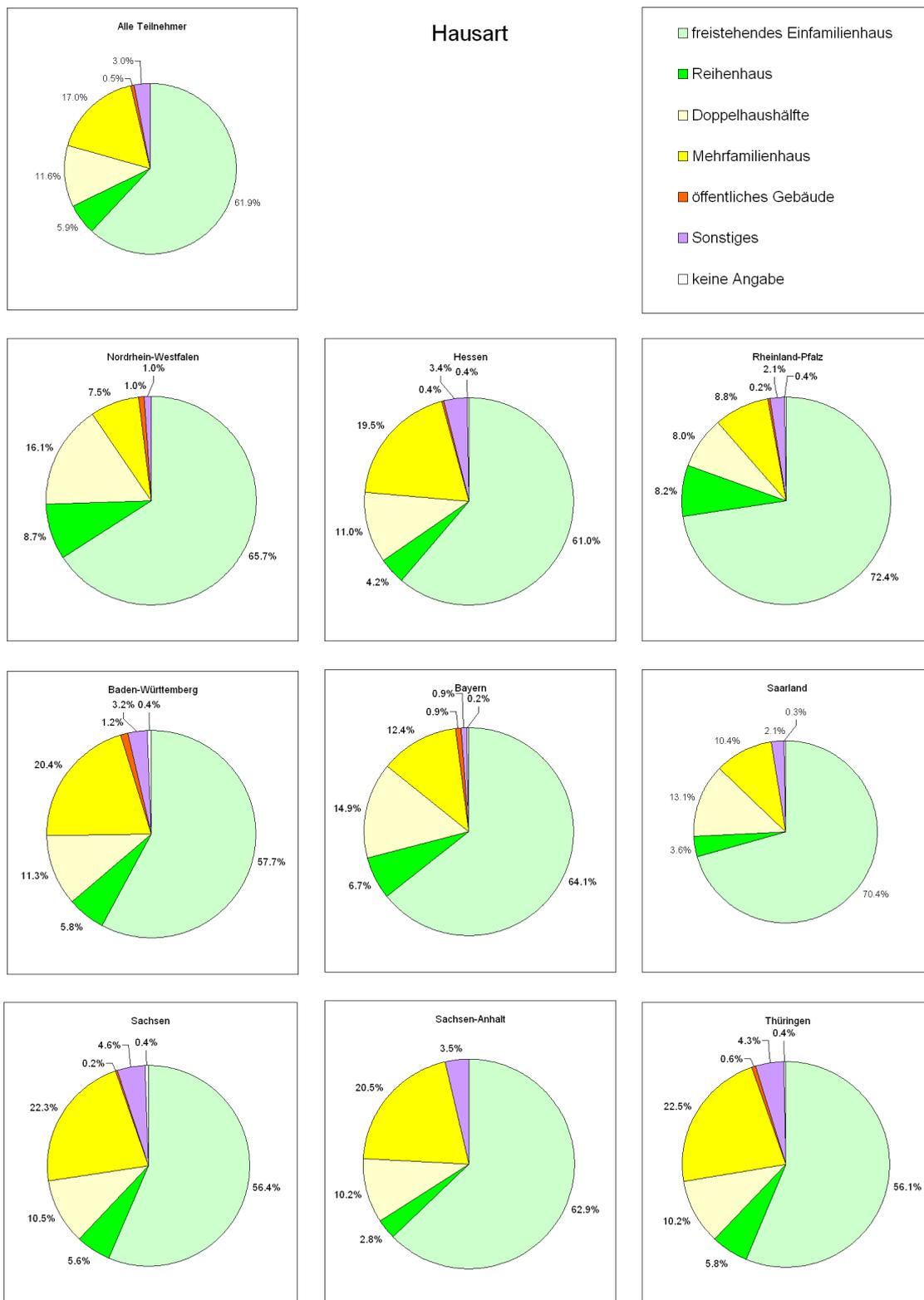


Abb. 4
Verteilung der Hausart

5.1.2 Bauweise

Massivbauweise überwiegt in allen Bundesländern deutlich (Abb. 5). Der Anteil an Holzhäusern liegt bei < 2 %, Fertighäuser sind mit mehr als 5 % vor allen in den westlichen Bundesländern vertreten. Fachwerkhäuser nehmen vor allen in Sachsen-Anhalt (ca. 33 %) und Thüringen (ca. 25 %) einen erheblichen Anteil ein.

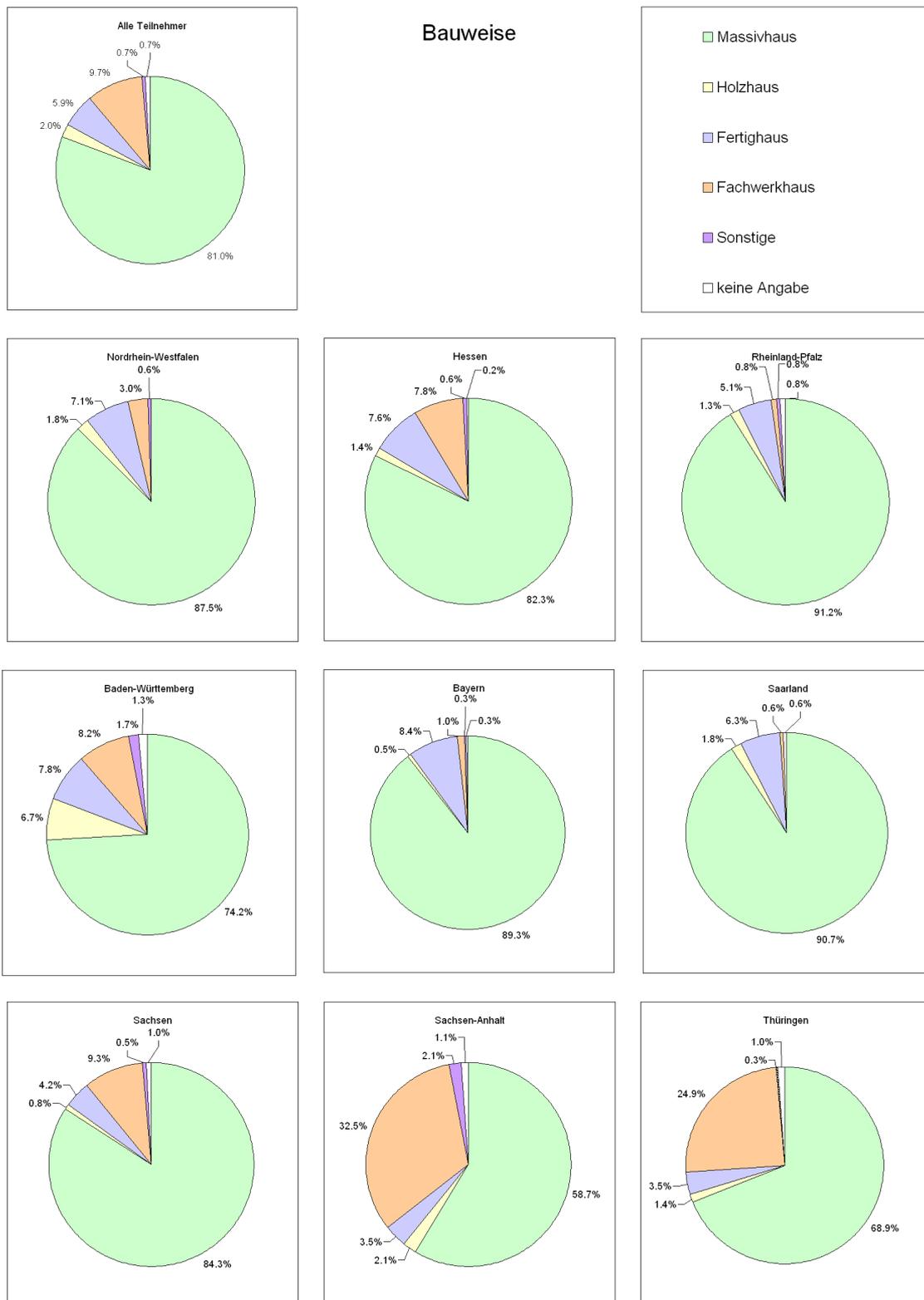


Abb. 5
Verteilung der Bauweise

5.1.3 Haustyp

Die Haustypen wurden nach der Geländemorphologie und der Unterkellerung unterschieden (Abb. 6). Während in den westlichen Bundesländern etwa zwei Drittel aller Häuser voll unterkellert sind, liegt dieser Anteil in den östlichen Bundesländern nur bei ca. 50 %. Teilunterkellerte Häuser sind dort mit 30 bis 40 % vertreten. Der Anteil nicht unterkellerten Gebäude schwankt nur gering zwischen 13 und 19 %.



Abb. 6
Verteilung des Haustyps

5.1.4 Baualter

Beim Alter der untersuchten Häuser ist eine deutliche West-Ost-Trennung zu erkennen (Abb. 7). Während im Westen immer mehr als zwei Drittel der Häuser nach 1960 erbaut wurden, liegt in den östlichen Bundesländern der Anteil an Gebäuden, die vor 1946 errichtet wurden, zwischen 55 und 60 %.



Abb. 7
Verteilung des Baualters

5.1.5 Baumaterial

Die Kategorisierung des Baumaterials wurde in Anlehnung an das Forschungsvorhaben St.Sch. 4251 durchgeführt. Im Fragebogen wird nicht nach dem "Hauptbaumaterial" gefragt, sondern es waren Mehrfachnennungen erlaubt. Bei der Auswertung wurde anschließend eine Kategorisierung des Baustoffgemenges durchgeführt, die sowohl die Diffusionsfähigkeit des Materials als auch die Radonexhalation berücksichtigt. Es wurde eine Unterscheidung in die sieben Kategorien A bis H vorgenommen (Tab. 5) Diese Reihenfolge spiegelt eine Rangklassifikation wider, innerhalb der jede nachfolgende Kategorie eine höhere Wertigkeit besitzt als die vorausgegangene und die von "wenig relevant für die Höhe der Radonkonzentration im Gebäude" (= A) bis "sehr relevant für die Höhe der Radonkonzentration im Gebäude" (= H) reicht. Für die Kellerdecke wurde die Frage mit der Art der Konstruktion verbunden, um den Migrationsweg besser einschätzen zu können.

Kategorie	Baumaterial
A	Holz, Lehm/Ton, Ziegel, Hochlochziegel, Porenbetonstein, Sonstige
B	Kalksandstein
C	nicht belegt
D	Beton
E	Schlackestein
F	Bimsstein
G	Naturstein (ausser Granit und Gneis)
H	Granit und Gneis

Tab. 5: Kategorisierung des Baumaterials

Die Baustoffe der Kategorien A bis D unterscheiden sich im Wesentlichen hinsichtlich ihrer Gasdurchlässigkeit. So besitzen in der Regel gegossene Betondecken eine geringere Durchlässigkeit als gemauerte Decken oder gar Holzkonstruktionen. Die Kategorien E bis H sind vor allem durch eine erfahrungsgemäß unterschiedlich starke Radonexhalation gekennzeichnet. Diese ist vor allem dann von Bedeutung, wenn Natursteine (besonders Granit) als Konstruktionsmaterial im Erdgeschoss oder im Kellerbereich verbaut werden, wie es z.B. in älteren Häusern häufig der Fall sein kann.

Zur Charakterisierung und Bewertung der Baumaterialien des gesamten Hauses wurden die Einzelangaben zu einem Summenparameter zusammengefasst, der die jeweils höchste Baumaterialeinstufung innerhalb des Gebäudes als die wichtigste

berücksichtigt (Abb. 8). Zur Verdeutlichung seien folgende konkrete Beispiele angeführt: Ein Haus, in dem an einer Stelle (z.B. in der Kellerdecke) gegossener Beton (D) verwendet wurde und alle anderen Materialien aus den Gruppen A bis B stammen, wird in die Kategorie D eingeordnet; ein Haus, in dem Granit als Konstruktionsmaterial (nicht Dekoration!) verbaut wurde, wird unabhängig von allen anderen verwendeten Baumaterialien in die Kategorie H eingestuft.



Abb. 8
Verteilung der Baumaterialien der Häuser

Das eingesetzte Baumaterial variiert sehr deutlich zwischen den Bundesländern. Auffällig ist für die östlichen Bundesländer der hohe Anteil an Natursteinverbauung, der deutlich über 40 % liegt, während hierfür die höchsten Zahlen im Westen in Rheinland-Pfalz (ca. 27 %) und im Saarland (ca. 21 %) erreicht werden. In Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und Saarland ist der Anteil an Verbauung von Bimssteinen mit jeweils über 30 % sehr hoch. Hessen, Baden-Württemberg und Bayern haben die höchsten Anteile an Beton im Baubestand (46 bis 71 %).

Neben der Gesamtbewertung werden exemplarisch die Bauausführungen der Kellerböden (Abb. 9) und Kellerdecken (Abb. 10) betrachtet. Beton ist in allen Bundesländern das häufigste Baumaterial für den Kellerboden, allerdings ist der Anteil an Lehm/Naturböden und Fels als Untergrund in Baden-Württemberg, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen sehr hoch. Sehr deutlich differenzieren sich die unterschiedlichen Baustile bei der Betrachtung der Kellerdecken. Hier steht nicht so sehr das Baumaterial als die Art der Ausführung im Blickpunkt. Während in den westlichen Bundesländern gegossene Betondecken zu mehr als 40 % vorhanden sind, liegt dieser Anteil in den östlichen Ländern nur bei 19 bis 27 %. Die klassischen Kappendecken sind in diesen Ländern zu mehr als einem Viertel vertreten. Dies liegt wohl auch wesentlich an dem hohen durchschnittlichen Baualter.

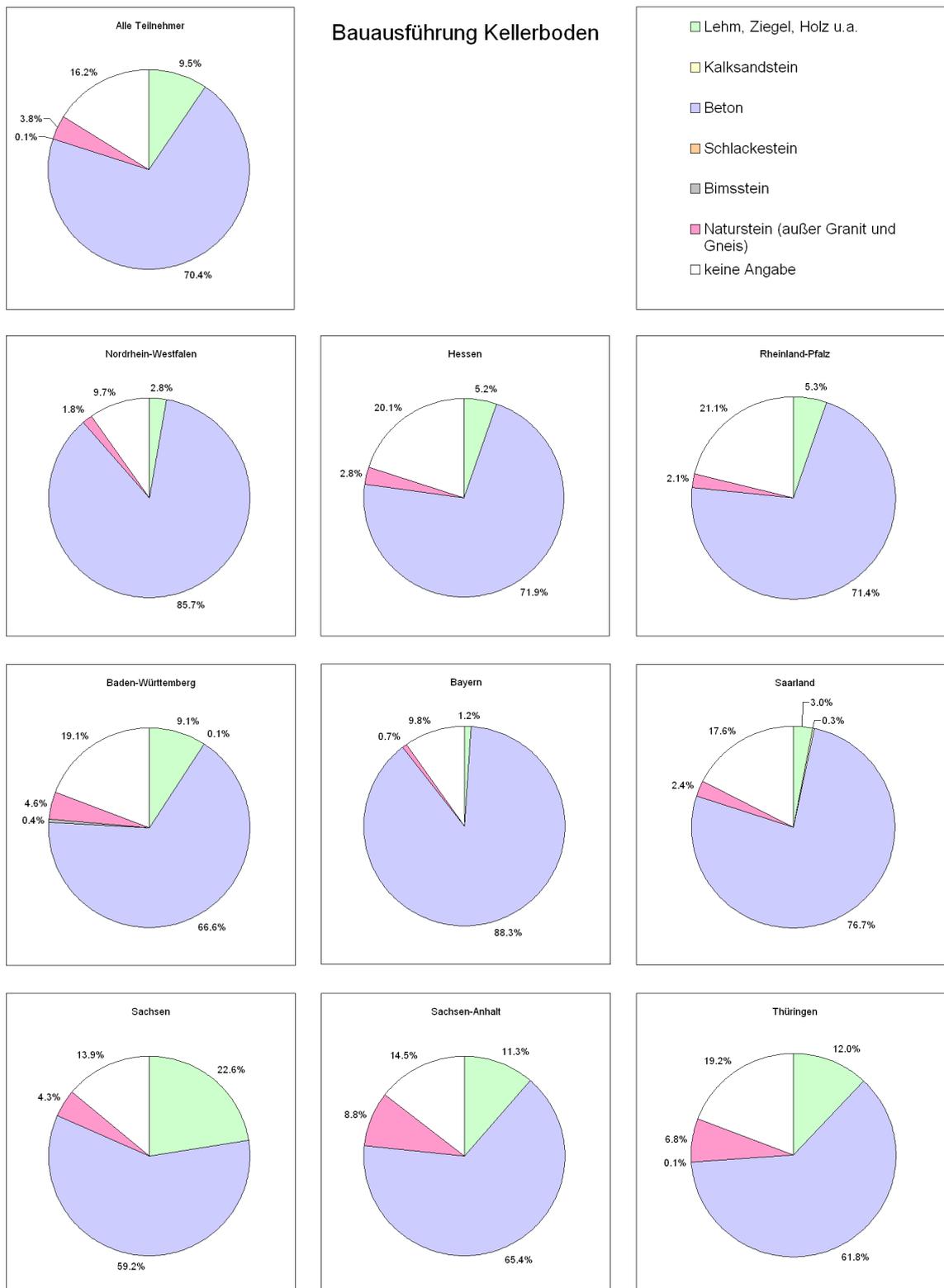


Abb. 9
Verteilung der Bauausführung des Kellerbodens



Abb. 10
Verteilung der Bauausführung der Kellerdecke

5.1.6 Bautenschutz

Die erdberührten Wände spielen für die Frage des Radoneintritts aus dem Baugrund eine wesentliche Rolle. Die Durchlässigkeit resp. Undurchlässigkeit wird stark durch das Vorhandensein von äußeren Abdichtungen beeinflusst. Aus diesem Grunde wird nachfolgend noch der Anteil an Feuchteschutz- (Abb. 11) bzw. Wärmedämmungsmaßnahmen (Abb. 12) angegeben. In beiden Abbildungen sind die Unterschiede zwischen den westlichen und östlichen Bundesländern deutlich zu erkennen.



Abb. 11
Anteil an Feuchteschutzmaßnahmen

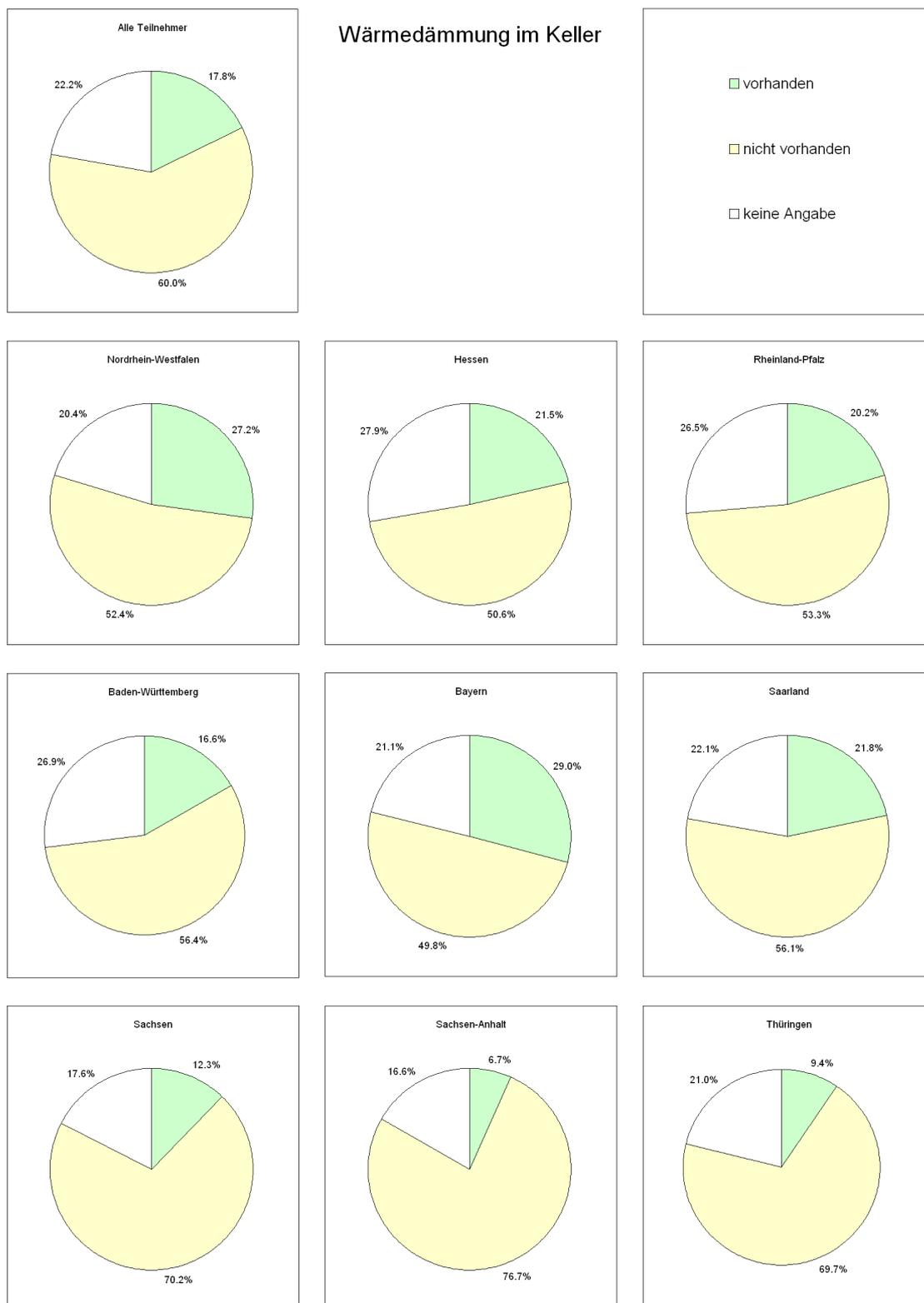


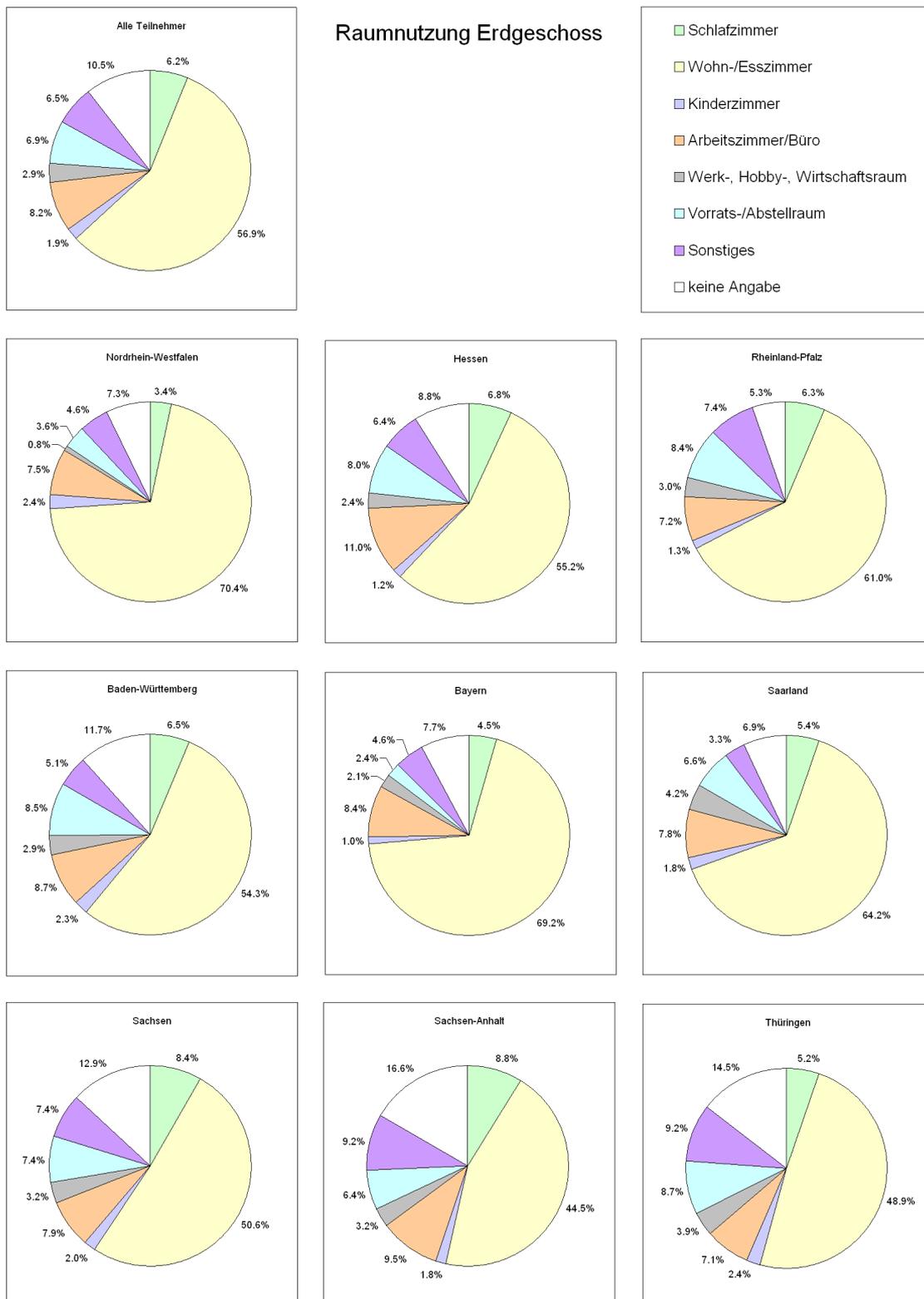
Abb. 12
Anteil an Wärmedämmungsmaßnahmen

5.1.7 Raumnutzung

Die Raumnutzung der Messräume wurde getrennt für Keller- und Erdgeschossräume betrachtet (Abb. 13 und 14). Sie kann als Indikator für die Aufenthaltsdauer in den jeweiligen Räumen angesehen werden. Es wurde eine Unterteilung in sieben Kategorien vorgenommen. Wohn-/Ess-, Schlaf-, Kinder- und Arbeitszimmer repräsentieren dabei Räume, bei denen von einer längeren Aufenthaltsdauer der Bewohner ausgegangen werden kann („Aufenthaltsräume“); Hobby- sowie Vorrats- und Abstellräume dagegen werden in der Regel nur kurzzeitig genutzt bzw. begangen. Alle übrigen Raumnutzungen (z.B.: Flur, Bad, Waschküche, Heizungsraum) wurden in der Kategorie „Sonstiges“ zusammengefasst. Die Nutzung der Messräume ist in allen Bundesländern sehr ähnlich. Auffallend ist, dass unabhängig vom Bundesland, trotz ausdrücklicher Bitte, die Exposimeter in Hauptaufenthaltsräumen zu platzieren, ca. ein Viertel der Messgeräte im Erdgeschoss in anderen Räumen aufgestellt wurde.



Abb. 13
Verteilung der Raumnutzung im Keller



Raumnutzungsart	Anteil
Schlafzimmer	6.5%
Wohn-/Esszimmer	54.3%
Kinderzimmer	2.3%
Arbeitszimmer/Büro	8.7%
Werk-, Hobby-, Wirtschaftsraum	2.9%
Vorrats-/Abstellraum	8.5%
Sonstiges	5.1%
keine Angabe	11.7%

Raumnutzungsart	Anteil
Schlafzimmer	4.5%
Wohn-/Esszimmer	69.2%
Kinderzimmer	1.0%
Arbeitszimmer/Büro	8.4%
Werk-, Hobby-, Wirtschaftsraum	2.1%
Vorrats-/Abstellraum	2.4%
Sonstiges	4.6%
keine Angabe	7.7%

Raumnutzungsart	Anteil
Schlafzimmer	5.4%
Wohn-/Esszimmer	64.2%
Kinderzimmer	1.8%
Arbeitszimmer/Büro	7.8%
Werk-, Hobby-, Wirtschaftsraum	4.2%
Vorrats-/Abstellraum	6.6%
Sonstiges	3.3%
keine Angabe	6.9%

Raumnutzungsart	Anteil
Schlafzimmer	8.4%
Wohn-/Esszimmer	50.6%
Kinderzimmer	2.0%
Arbeitszimmer/Büro	7.9%
Werk-, Hobby-, Wirtschaftsraum	3.2%
Vorrats-/Abstellraum	7.4%
Sonstiges	7.4%
keine Angabe	12.9%

Raumnutzungsart	Anteil
Schlafzimmer	8.8%
Wohn-/Esszimmer	44.5%
Kinderzimmer	1.8%
Arbeitszimmer/Büro	9.5%
Werk-, Hobby-, Wirtschaftsraum	3.2%
Vorrats-/Abstellraum	6.4%
Sonstiges	9.2%
keine Angabe	16.6%

Raumnutzungsart	Anteil
Schlafzimmer	5.2%
Wohn-/Esszimmer	48.9%
Kinderzimmer	2.4%
Arbeitszimmer/Büro	7.1%
Werk-, Hobby-, Wirtschaftsraum	3.9%
Vorrats-/Abstellraum	8.7%
Sonstiges	9.2%
keine Angabe	14.5%

Abb. 14
Verteilung der Raumnutzung im Erdgeschoss

5.2 Messergebnisse

Insgesamt liegen aus allen Gemeinden 4.260 Ergebnisse aus Kellerräumen, 4.971 Ergebnisse aus Erdgeschossräumen, 825 Ergebnisse aus der 1. Etage und 58 Ergebnisse aus höheren Etagen vor. Die graphische Darstellung im Wahrscheinlichkeitsnetz ist in Abb. 15 dargestellt, die statistischen Kennzahlen der Verteilungen sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

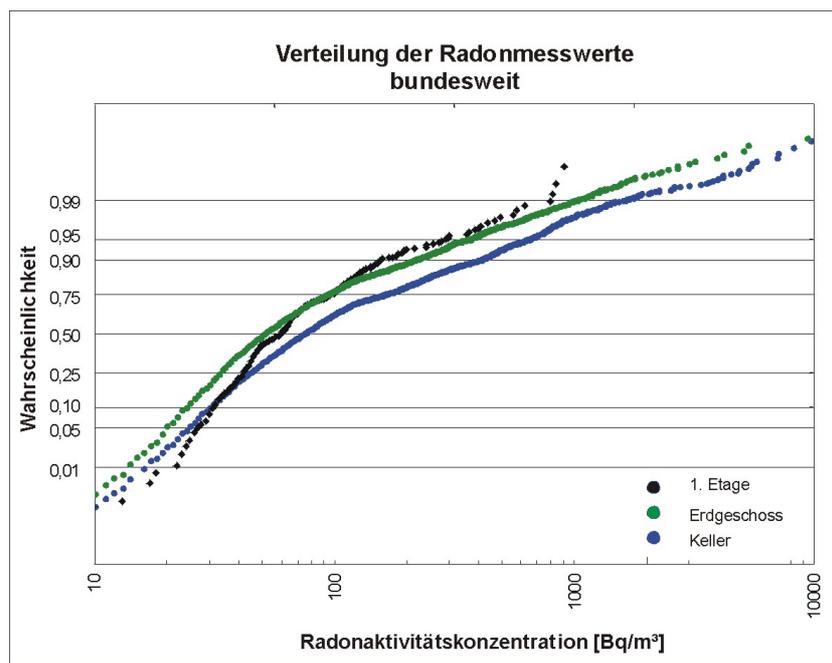


Abb. 15

Häufigkeitsverteilungen aller Radonmesswerte in den verschiedenen Etagen

Die Werte sind nur angenähert logarithmisch normalverteilt mit deutlichen Abweichungen im mittleren und oberen Bereich. Die geometrischen Mittelwerte nehmen von 90 Bq/m³ für die Kellerräume über 61 Bq/m³ (Erdgeschoss), 50 Bq/m³ (1. Etage) bis hin zu 46 Bq/m³ für höhere Etagen ab. Die Standardabweichung reduziert sich ebenfalls deutlich in der gleichen Richtung. Im gesamten Datenkollektiv wiesen 1.435 Messräume eine Radonkonzentration über 200 Bq/m³ und davon 652 Messräume eine Konzentration über 400 Bq/m³ auf.

Die bereits skizzierten Unterschiede in der Bausubstanz wirken sich sehr deutlich in den Radonkonzentrationen aus. Aus diesem Grunde wurde eine Trennung zwischen Messräumen in westlichen Bundesländern (Nordrhein-Westfalen, Hessen, Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg, Bayern, Saarland) und östlichen Bundesländern

(Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen) vorgenommen. Die Verteilungen weisen eklatante Unterschiede auf.

Alle Messorte	Anzahl	AM Bq/m ³	SD Bq/m ³	GM Bq/m ³	GSD	Median Bq/m ³	p90 Bq/m ³	p95 Bq/m ³	Maximum Bq/m ³	Anteil >200 Bq/m ³ %	Anteil > 400 Bq/m ³ %	Anteil >1000 Bq/m ³ %
Keller	4260	182	458	90	2,7	74	399	648	> 10000	20,3	10,0	2,0
Erdgeschoss	4971	111	302	61	2,4	51	214	367	> 10000	10,8	4,2	1,0
1. Etage	825	68	85	50	2,0	45	120	181	915	3,8	1,3	---
Höhere Etagen	58	69	110	46	2,2	45	107	196	813	3,4	1,7	---

Messorte in westl. Bundesländern	Anzahl	AM Bq/m ³	SD Bq/m ³	GM Bq/m ³	GSD	Median Bq/m ³	p90 Bq/m ³	p95 Bq/m ³	Maximum Bq/m ³	Anteil >200 Bq/m ³ %	Anteil > 400 Bq/m ³ %	Anteil >1000 Bq/m ³ %
Keller	2590	103	139	66	2,3	58	231	394	2022	12,4	4,9	0,1
Erdgeschoss	3071	62	119	45	2,0	40	104	180	5301	4,4	1,1	0,1
1. Etage	480	50	41	41	1,8	39	87	118	360	1,2	---	---
Höhere Etagen	23	49	49	36	2,1	34	76	193	196	---	---	---

Messorte in östl. Bundesländern	Anzahl	AM Bq/m ³	SD Bq/m ³	GM Bq/m ³	GSD	Median Bq/m ³	p90 Bq/m ³	p95 Bq/m ³	Maximum Bq/m ³	Anteil >200 Bq/m ³ %	Anteil > 400 Bq/m ³ %	Anteil >1000 Bq/m ³ %
Keller	1670	305	693	145	2,9	118	659	1008	> 10000	32,5	17,8	5,0
Erdgeschoss	1900	190	454	100	2,6	81	382	655	> 10000	21,2	9,3	2,6
1. Etage	345	93	118	66	2,0	60	156	292	915	7,2	3,2	---
Höhere Etagen	35	82	135	54	2,1	51	107	276	813	5,7	2,8	---

Tab. 6

Kennwerte der Radonmessungen – unterschieden nach Etage - für den Gesamtdatenbestand und getrennt für die westlichen und östlichen Bundesländer (AM = arithmetisches Mittel, SD = Standardabweichung, GM = geometrisches Mittel, GSD = geometrische Standardabweichung, p90 = 90-Perzentil, p95 = 95-Perzentil; diese Abkürzungen gelten auch für alle folgenden Tabellen)

Die geometrischen Mittelwerte der Radonaktivitätskonzentrationen in den östlichen Bundesländern sind ungefähr doppelt so hoch wie in den westlichen Bundesländern, der Anteil an Messwertüberschreitungen für Planungs- und Referenzwert liegen um ein Vielfaches höher. Die Gegenüberstellung der Verteilungen in Abb. 16 und 17 zeigt sehr eindrücklich die erhebliche Differenz.

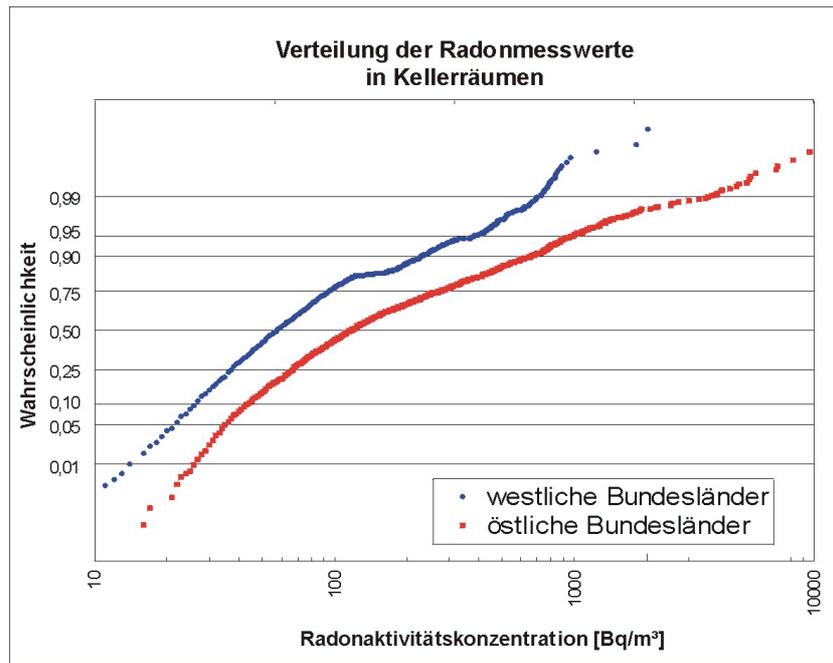


Abb. 16
Häufigkeitsverteilungen der Radonmesswerte im Keller

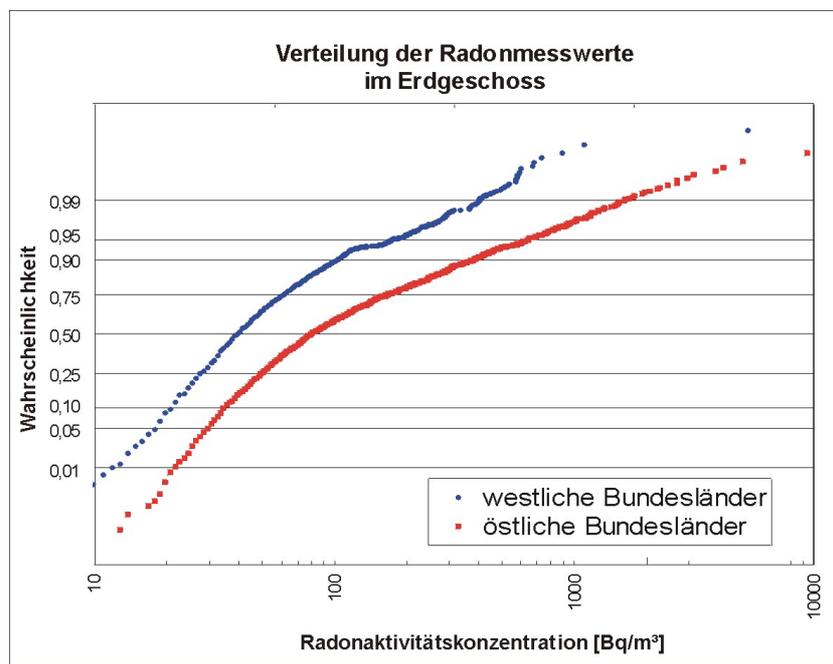


Abb. 17
Häufigkeitsverteilungen der Radonmesswerte im Erdgeschoss

Um diese Unterschiede besser einschätzen zu können, erfolgt eine getrennte Betrachtung der Verteilungen nach den Baumerkmale (siehe Kap. 5.1). Dabei wird auf die Ergebnisse der Forschungsvorhaben St. Sch. 4187 und St. Sch. 4251 zurückgegriffen, in denen die wesentlichen, die Radonmigration ins Gebäude bestimmenden Parameter identifiziert wurden. Abb. 18 zeigt den Einfluss des Haustypes auf die Innenraumkonzentrationen, wobei die Art der Unterkellerung der wesentliche Faktor ist.

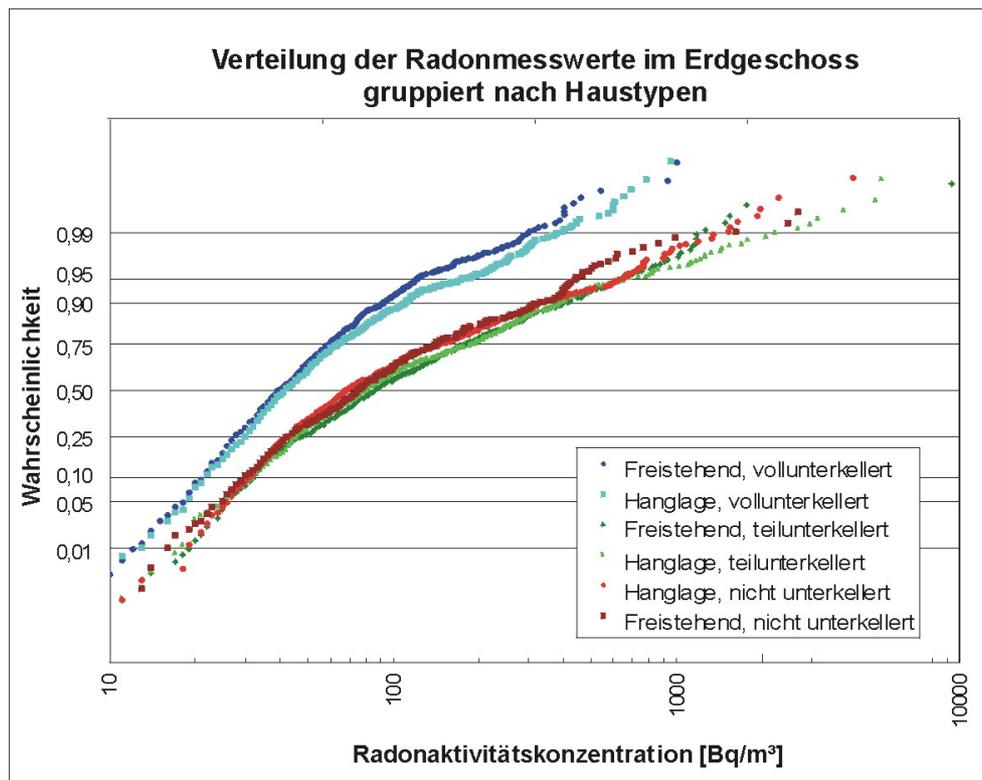


Abb. 18
Häufigkeitsverteilungen der Radonmesswerte im Erdgeschoss in Abhängigkeit vom Haustyp

Die Verteilungen der vollunterkellerten Gebäude sind deutlich zu niedrigeren Radonwerten verschoben. Interessanterweise bestehen zwischen teilunterkellerten und nicht-unterkellerten Häusern nur sehr geringe Unterschiede.

Die Art des Baumaterials (Abb. 19) ist ebenfalls von sehr großer Bedeutung. Gebäude mit Beton als Baumaterial und ohne Natursteinverbauung sind weniger radonbelastet als die übrigen Gebäude.

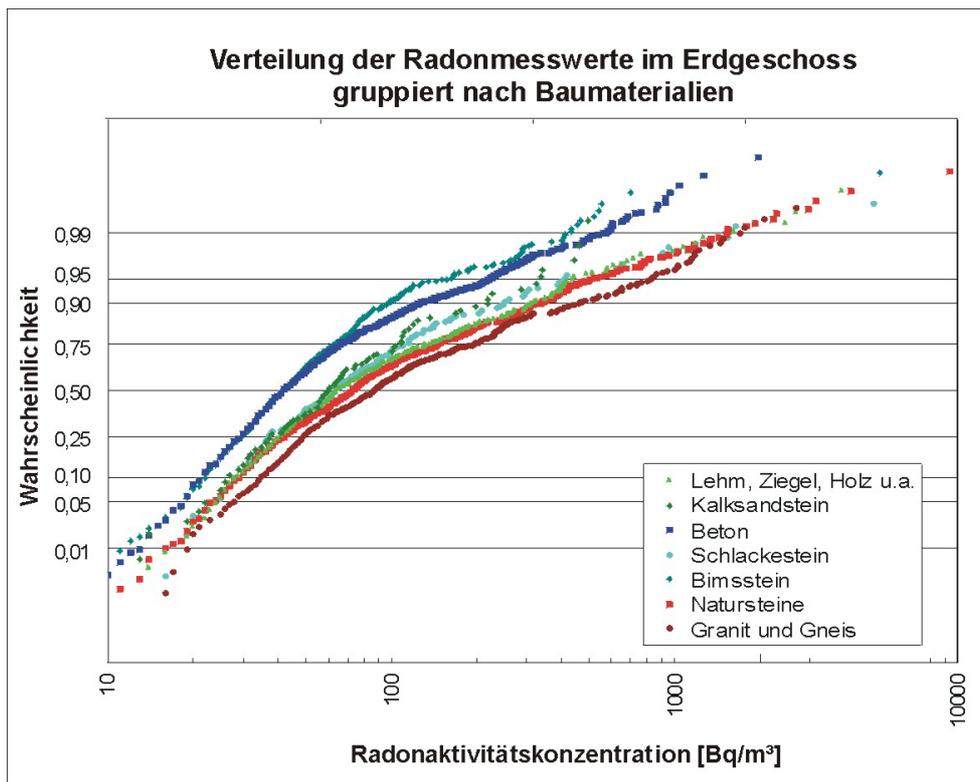


Abb. 19
Häufigkeitsverteilungen der Radonmesswerte im Erdgeschoss in Abhängigkeit vom Baumaterial

Der Einfluss des Baumaterials Beton kommt noch deutlicher zum Ausdruck, wenn man die entscheidende Schnittstelle zwischen Haus und Baugrund bzw. die Migrationswege vom Keller ins Erdgeschoss betrachtet. In den Abbildungen 20 und 21 sind die Verteilungen jeweils unter Berücksichtigung der Bauausführung des Kellerbodens sowie der Kellerdecke dargestellt. Sehr deutlich wird der erhebliche migrationshemmende Effekt von Beton gegenüber den anderen Materialien.

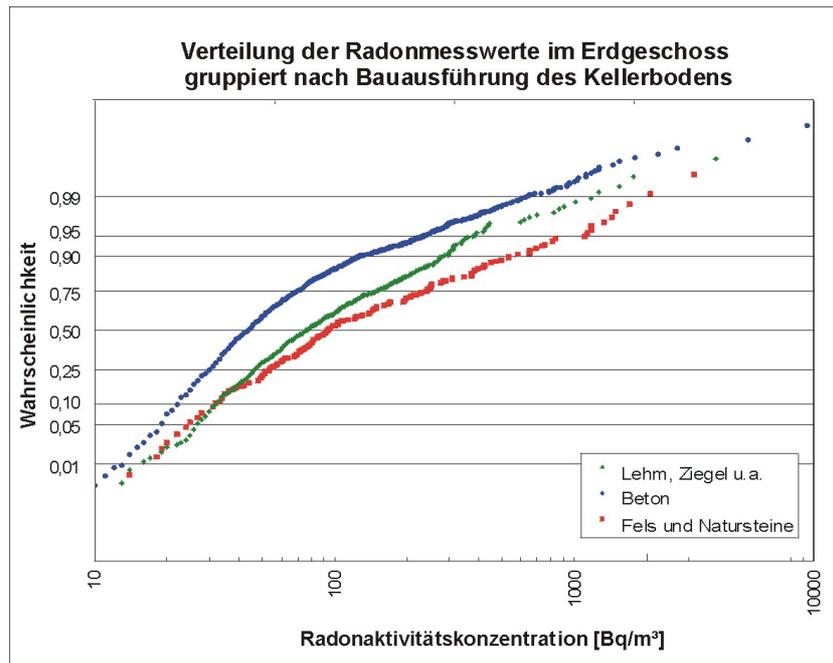


Abb. 20
Häufigkeitsverteilungen der Radonmesswerte im Erdgeschoss bei unterschiedlichem Kellerboden

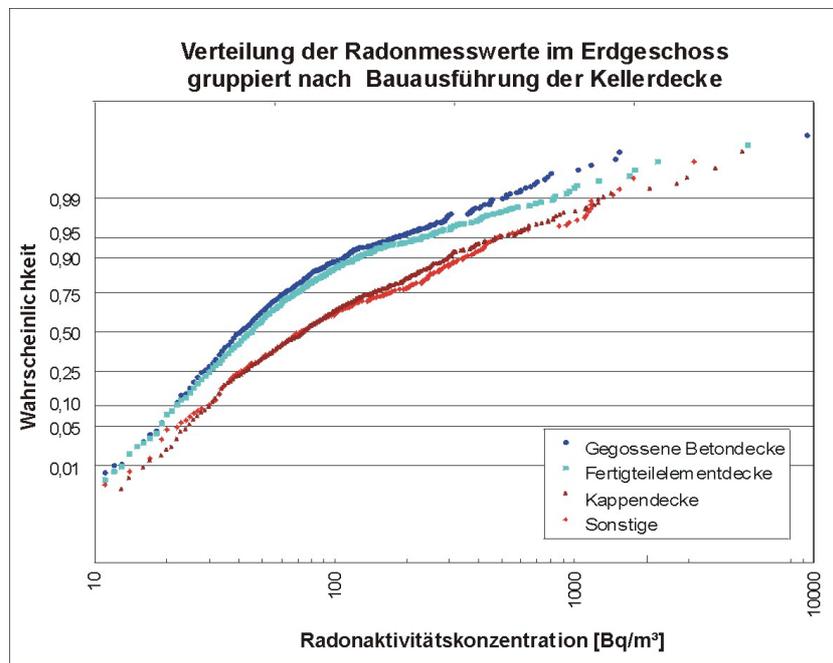


Abb. 21
Häufigkeitsverteilungen der Radonmesswerte im Erdgeschoss bei unterschiedlicher Kellerdecke

Die gleiche Wirkung besitzt ein Feuchteschutz im erdberührten Bereich. Abb. 22 zeigt die klare Schutzwirkung solcher Maßnahmen auch gegenüber dem Radoneintritt ins Gebäude.

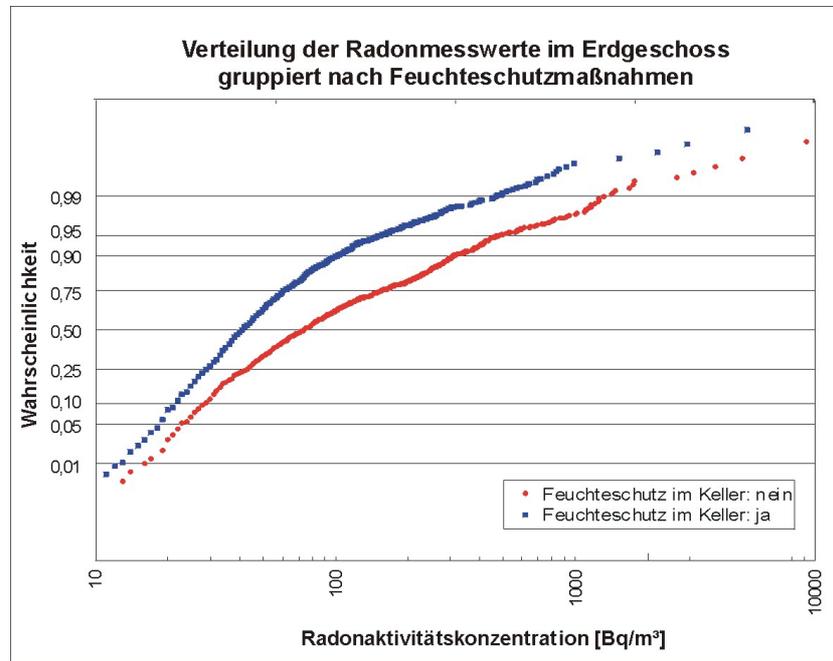


Abb. 22
Häufigkeitsverteilungen der Radonmesswerte im Erdgeschoss in Abhängigkeit vom Feuchteschutz

Die Unterschiede in Bauausführung und Bausubstanz (vgl. Kap. 5.1) bedingen erhebliche Variationen bei der Radonbelastung eines Hauses. Die deutlichen Differenzen in den Verteilungen der Radonaktivitätskonzentration zwischen den westlichen und östlichen Bundesländern sind in starkem Maße darauf zurückzuführen.

Um Regionen unabhängig von der Bausubstanz vergleichen zu können, wurde in den o.g. Forschungsvorhaben ein „Referenzraum“ definiert, der durch Angleichung der wichtigsten Bauparameter eine identische Bewertungsgrundlage liefert. Dieser Referenzraum liegt im Erdgeschoss eines vollunterkellerten Hauses, das als Baumaterial Beton aufweist und in dem keine Natursteine als Konstruktionsmaterial verbaut wurden. In Abbildung 23 sind die Verteilungen der Radonmesswerte in den Referenzräumen für die östlichen und westlichen Bundesländer dargestellt.

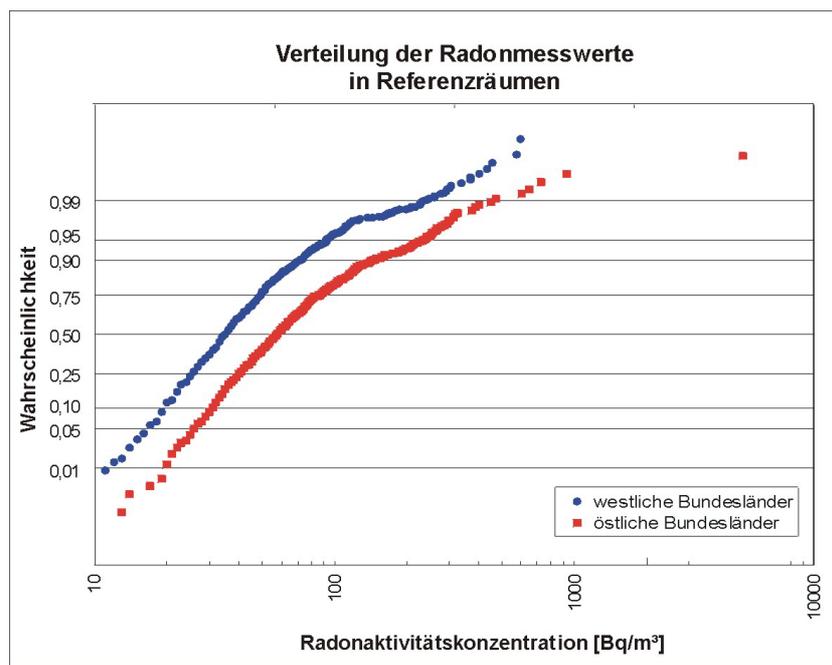


Abb. 23
Häufigkeitsverteilungen der Radonmesswerte in Referenz-
räumen

Erstaunlicherweise ist auch hier eine erhebliche Diskrepanz festzustellen. Um zu überprüfen, ob hierfür höhere Bodenluftwerte der Grund sind, wurden die aus der Deutschlandkarte der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft interpolierten Bodenluftwerte den Häusern zugeordnet und die Verteilungen für die Referenzräume im Wahrscheinlichkeitsnetz dargestellt (Abb. 24).

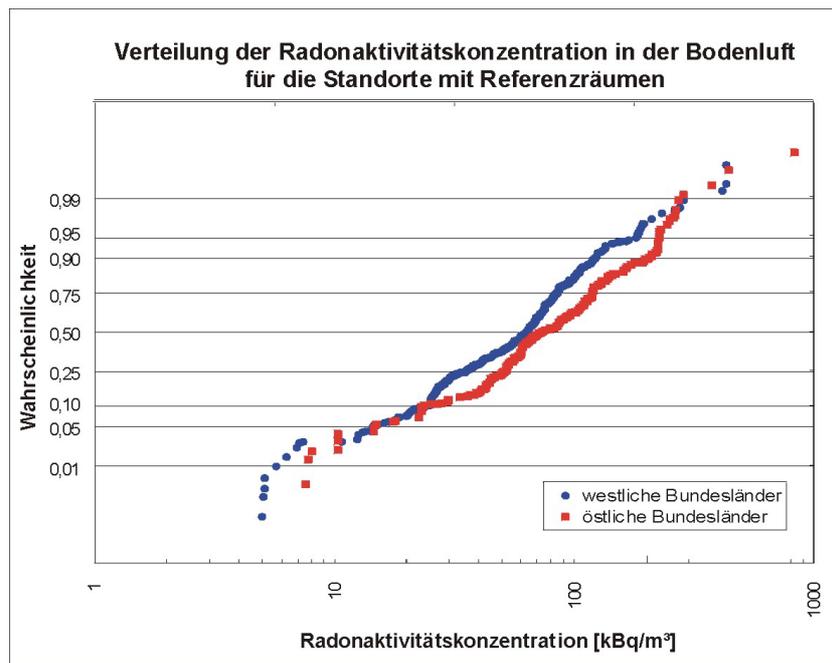


Abb. 24
Häufigkeitsverteilungen der Radonaktivitätskonzentration
in der Bodenluft an Standorten der Referenzräume

Die Unterschiede sind jedoch nicht ausschließlich auf höhere Radonkonzentrationen in der Bodenluft zurückzuführen. Dies bedeutet, dass durch die Art der Bauausführung (z.B. Verarbeitung und Art des Betons, Fugenabdichtungen) in den östlichen Bundesländern ein höherer Radontransfer vom Boden in die Gebäude vorhanden ist als in den westlichen Bundesländern. Die bisher für die westlichen Bundesländer erarbeiteten Transferfaktoren sind damit in den östlichen Bundesländern nicht anzuwenden. Dies wird im nachfolgenden Kapitel 6 bei einer Auswertung der Messergebnisse unter Berücksichtigung der Bodenluftaktivitätskonzentrationen noch deutlicher. Prognosen sind mit den bisher erarbeiteten Instrumenten in den östlichen Bundesländern nur nach eingehender Modifizierung möglich.

Das Baualter wurde bisher nicht betrachtet, da es in vielen Fällen als Synonym für die Art der Bauausführung steht. So sind ältere Häuser häufiger in Fachwerktechnik erbaut und besitzen im Keller meist Kappendecken statt gegossenen Betondecken. Für Referenzräume ist eine solche Auswertung u.E. aber zulässig, da hier eine vergleichbare Bausubstanz betrachtet wird. In Abbildung 25 sind die Messwerte für alle Referenzräume in Abhängigkeit vom Baualter dargestellt.

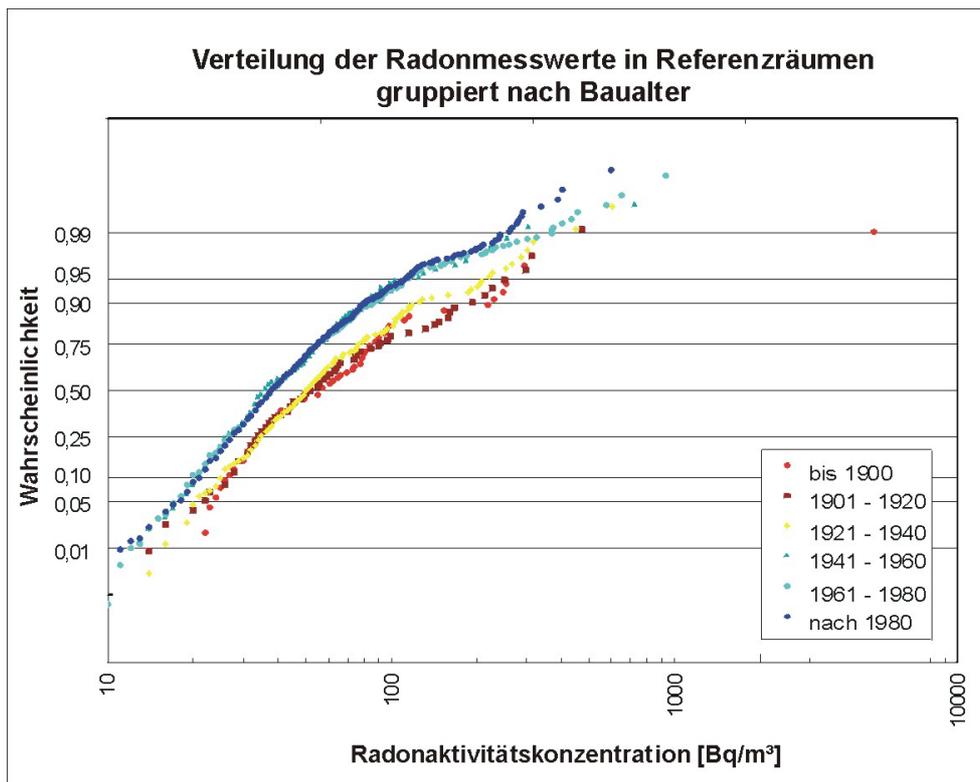


Abb. 25

Baualterabhängige Häufigkeitsverteilungen der Radonmesswerte in Referenzräumen

Eine Zweiteilung ist deutlich erkennbar. Die Messwertverteilungen für Gebäude, die nach 1941 gebaut wurden, weisen nahezu keinen Unterschied auf. Die Verteilungen für ältere Gebäude sind klar zu höheren Werten verschoben. Eine gesonderte Betrachtung nach westlichen und östlichen Bundesländern (Abb. 26 und 27) zeigt mit einer Ausnahme die gleiche Tendenz: Die Gebäude in den östlichen Bundesländern, die zwischen 1961 und 1980 gebaut wurden, haben deutlich höhere Radonaktivitätskonzentrationen als jüngere und vielfach auch als ältere Gebäude. Dies sollte bei weiteren Messkampagnen unbedingt berücksichtigt werden.

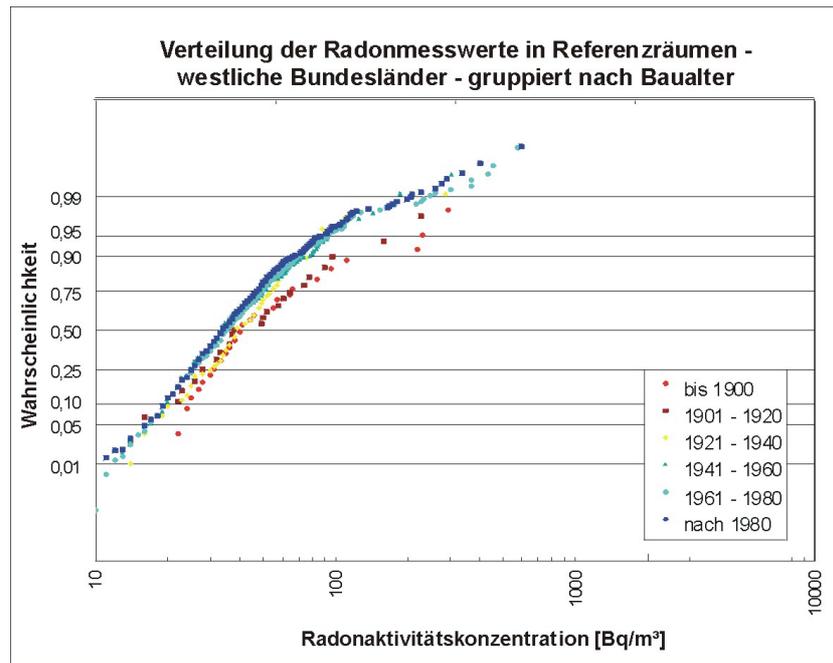


Abb. 26

Baualterabhängige Häufigkeitsverteilungen der Radonmesswerte in Referenzräumen (westliche Bundesländer)

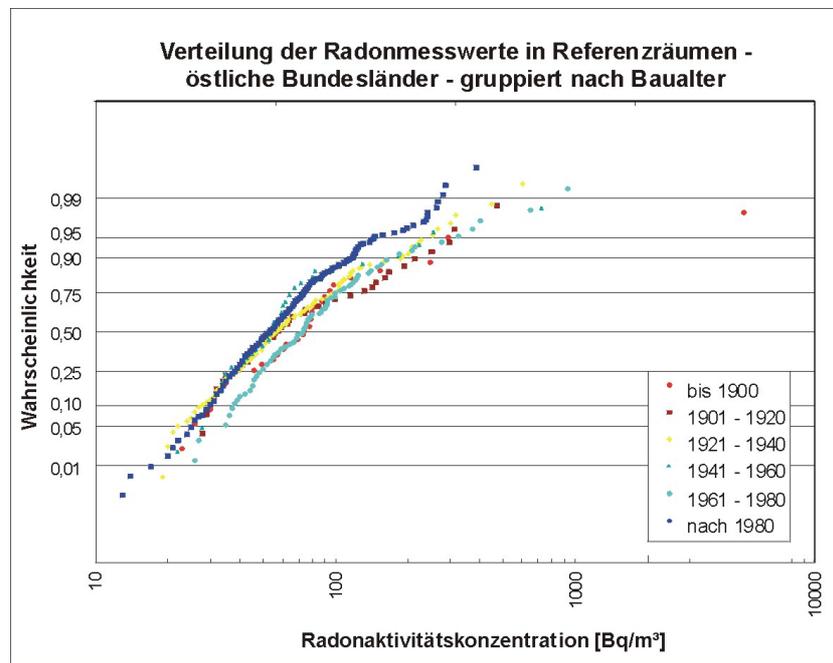


Abb. 27

Baualterabhängige Häufigkeitsverteilungen der Radonmesswerte in Referenzräumen (östliche Bundesländer)

Eine weitergehende detaillierte Betrachtung der Messregionen in den einzelnen Bundesländern (Tab. 7, Abb. 28 bis 30) bringt die Unterschiede zwischen westlichen oder östlichen Bundesländer noch einmal klar zum Ausdruck, zeigt aber auch die innerhalb der Gruppen vorhandenen unterschiedlichen Verteilungen.

Kellerräume	Anzahl	AM Bq/m ³	SD Bq/m ³	GM Bq/m ³	GSD	Median Bq/m ³	p90 Bq/m ³	p95 Bq/m ³	Maximum Bq/m ³	Anteil >200 Bq/m ³ %	Anteil > 400 Bq/m ³ %	Anteil >1000 Bq/m ³ %
Nordrhein-Westfalen	435	89	100	61	2.3	55	222	312	740	11.7	3.2	---
Hessen	398	138	210	85	2.4	75	266	586	2022	14.3	7.3	0.8
Rheinland-Pfalz	389	101	117	68	2.3	58	245	304	783	14.9	4.1	---
Baden-Württemberg	570	139	163	84	2.7	70	383	516	850	21.6	9.5	---
Bayern	521	67	80	51	1.9	48	107	175	777	3.6	1.5	---
Saarland	277	69	79	52	1.9	49	109	199	640	4.7	2.2	---
Sachsen	787	290	646	134	2.9	106	648	1015	7100	29.1	16.5	5.3
Sachsen-Anhalt	227	279	475	152	2.7	130	649	848	4493	36.1	17.6	3.5
Thüringen	656	332	801	157	2.9	132	694	1016	> 10000	35.4	19.5	5.2

Erdgeschossräume	Anzahl	AM Bq/m ³	SD Bq/m ³	GM Bq/m ³	GSD	Median Bq/m ³	p90 Bq/m ³	p95 Bq/m ³	Maximum Bq/m ³	Anteil >200 Bq/m ³ %	Anteil > 400 Bq/m ³ %	Anteil >1000 Bq/m ³ %
Nordrhein-Westfalen	494	50	51	38	1.9	36	79	159	400	2.8	---	---
Hessen	489	82	252	54	2.0	47	126	174	5301	4.5	1.6	0.4
Rheinland-Pfalz	535	65	64	50	1.9	45	110	192	503	4.5	0.6	---
Baden-Württemberg	659	80	103	52	2.3	44	197	291	733	9.7	2.9	---
Bayern	561	38	23	34	1.6	33	60	74	272	0.5	---	---
Saarland	331	52	56	41	1.8	37	82	102	544	2.7	0.9	---
Sachsen	898	193	472	98	2.7	79	399	706	> 10000	21.3	9.8	2.9
Sachsen-Anhalt	269	139	240	84	2.4	75	269	452	2682	16.0	6.7	1.1
Thüringen	731	205	488	110	2.6	90	391	678	9380	23.0	9.7	2.9

Referenzräume	Anzahl	AM Bq/m ³	SD Bq/m ³	GM Bq/m ³	GSD	Median Bq/m ³	p90 Bq/m ³	p95 Bq/m ³	Maximum Bq/m ³	Anteil >200 Bq/m ³ %	Anteil > 400 Bq/m ³ %	Anteil >1000 Bq/m ³ %
Nordrhein-Westfalen	322	42	41	34	1.8	33	63	79	400	1.9	---	---
Hessen	241	55	48	46	1.7	43	91	117	454	2.1	0.4	---
Rheinland-Pfalz	258	47	36	40	1.7	38	71	97	368	1.2	---	---
Baden-Württemberg	324	53	64	39	2.0	36	93	116	601	3.1	0.9	---
Bayern	421	35	19	32	1.6	32	52	65	209	0.2	---	---
Saarland	191	39	21	35	1.6	33	60	74	216	0.5	---	---
Sachsen	282	77	74	60	1.9	54	156	225	650	6.7	0.4	---
Sachsen-Anhalt	67	81	76	60	2.0	53	195	243	452	9.0	1.5	---
Thüringen	261	104	322	68	1.9	64	130	229	5085	6.5	1.9	0.4

Tab. 7

Kennwerte der Radonmessungen in den verschiedenen Bundesländern – unterschieden nach Etage (Erklärung der Abkürzungen s. Tab. 6)

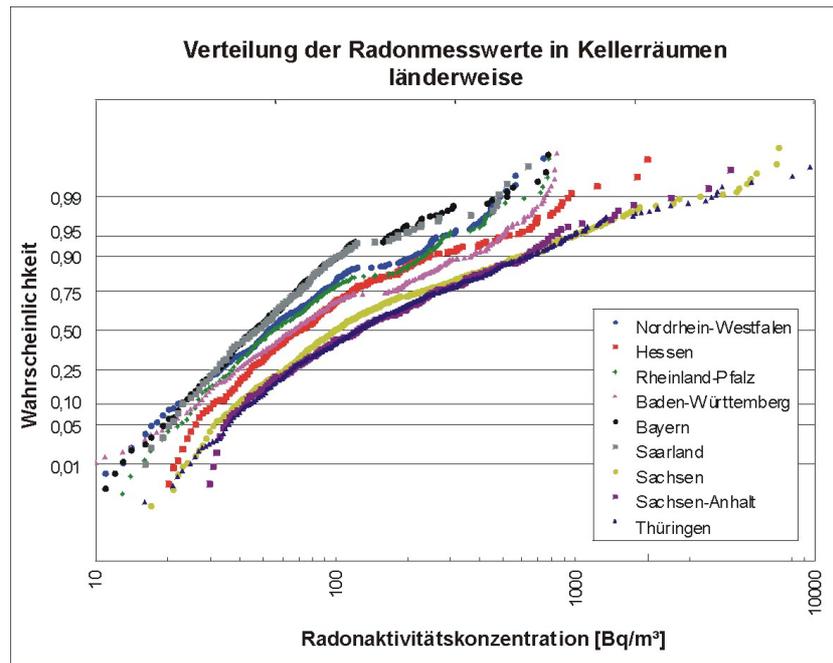


Abb. 28
Bundeslandabhängige Häufigkeitsverteilungen der Radonmesswerte im Keller

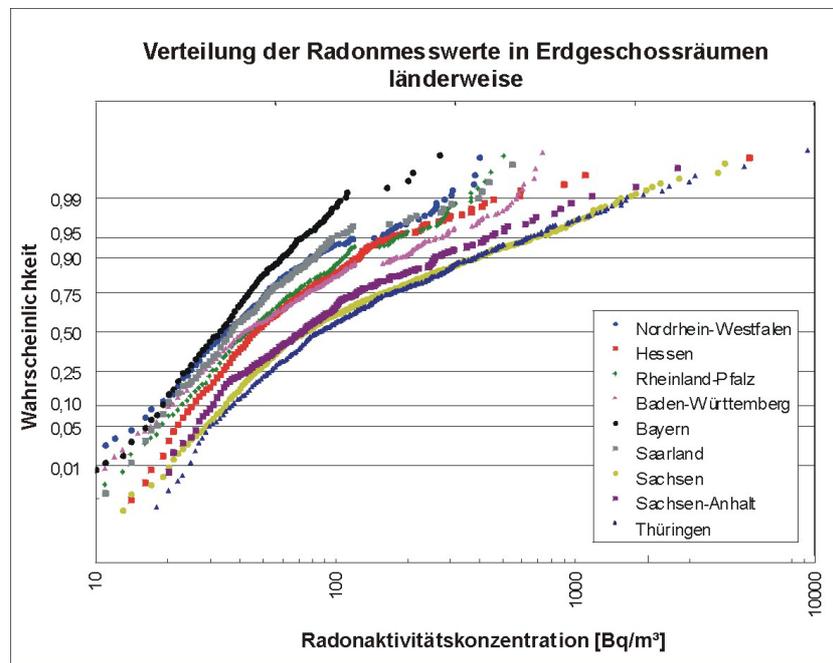


Abb. 29
Bundeslandabhängige Häufigkeitsverteilungen der Radonmesswerte im Erdgeschoss

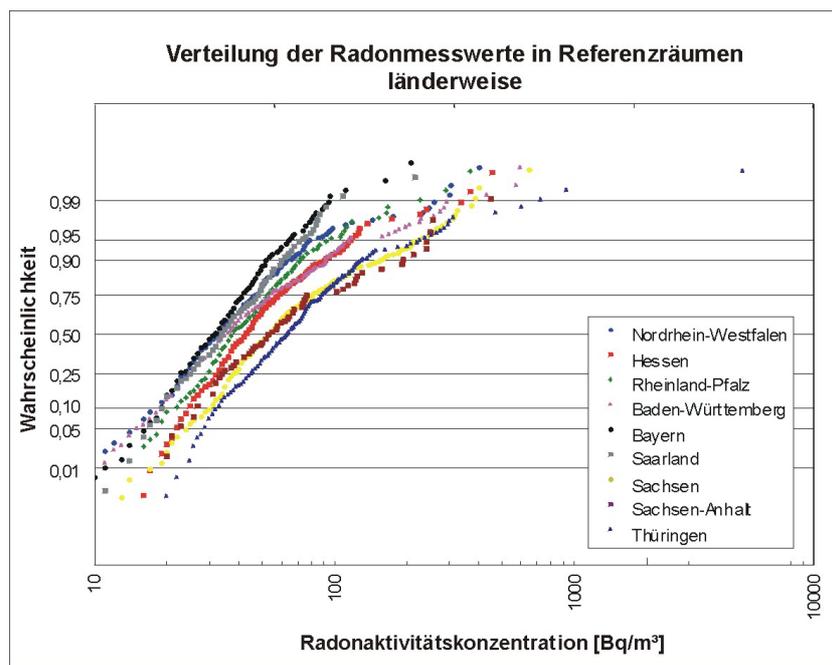


Abb. 30
Bundeslandabhängige Häufigkeitsverteilungen der Radonmesswerte im Referenzraum

Die gemeindebezogenen Auswertungen liegen dem BMU vor.

6 Validierung der geologischen Prognose

Die Auswahl der untersuchten Gemeinden erfolgte - wie bereits dargestellt - auch unter geologischen Gesichtspunkten. Die Basis der geologischen Auswahl beruht dabei auf der Tatsache, dass unterschiedliche geologische Einheiten ein unterschiedliches Radonpotenzial besitzen. Zwischen der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft und der Radonaktivitätskonzentration in der Raumluf besteht ein klarer linearer Zusammenhang, wenn man die geologischen Einheiten betrachtet. In Gebäuden über Einheiten mit hohen Radonaktivitätskonzentrationen in der Bodenluft treten gehäuft hohe Radonbelastungen in der Raumluf auf. Dies wurde in Forschungsvorhaben in den letzten Jahren eindeutig nachgewiesen. Dabei ist die Prognose für ein einzelnes Haus sehr schwierig, bei Betrachtung einer Anzahl von Gebäudemesswerten einer geologischen Einheit ist der Zusammenhang zwischen den Verteilungskenngrößen aber unstrittig. Um für den vorliegenden Datenbestand eine solche Auswertung durchführen zu können, wurde zunächst jedem Haus die Geologie des Hausstandortes zugewiesen. Basis hierfür war die Geologische Karte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1 : 200.000 (GK 200).

Bundesweit gibt es bisher nur eine einzige Kartengrundlage, in der Aspekte des geogenen Radonpotenzials berücksichtigt werden und die einen Vergleich mit der Geologie ermöglicht. Hierbei handelt es sich um die interpolierte Karte der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft in 1 m Tiefe in der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1 : 2.000.000. Die Interpolation beruht auf der Zusammenfassung geologischer Einheiten zu Schichtgliedern gleicher Radon"provinienz". Die z.T. sehr viel detailliertere - jedoch auch von Kartenblatt zu Kartenblatt variierende - geologische Zuordnung aus der o.g. GK 200 wurde daher in diese gröbere Einteilung „übersetzt“. In Tabelle 8 ist die Anzahl der Standorte über den insgesamt 20 unterschiedenen geologisch-petrographischen Schichtgliedern aufgelistet. Die jeweils zugehörigen statistischen Kenngrößen der Raumlufmesswerte sind in den Tabellen 9 bis 11 dargestellt.

Standorte	Anzahl	Anteil %
Quartär	1662	32.4
Tertiär	25	0.5
Kreide	17	0.3
Jura	82	1.6
Keuper	475	9.3
Muschelkalk	287	5.6
Buntsandstein	276	5.4
Zechstein	57	1.1
Rotliegend	273	5.3
Karbon	220	4.3
Devon	687	13.4
Silur	35	0.7
Ordoviz	291	5.7
Kambrium	15	0.3
Proterozoikum	2	0.0
Metamorphite	202	3.9
basische Plutonite	91	1.8
basische Vulkanite	54	1.1
saure Plutonite	356	6.9
saure Vulkanite	22	0.4

Tab. 8
Gebäudestandorte und
Geologie

Kellerräume	Anzahl	AM Bq/m ³	SD Bq/m ³	GM Bq/m ³	GSD	Median Bq/m ³	p90 Bq/m ³	p95 Bq/m ³	Maximum Bq/m ³	Anteil >200 Bq/m ³ %	Anteil >400 Bq/m ³ %	Anteil >1000 Bq/m ³ %
Quartär	1384	134	252	80	2.4	72	279	461	5271	15.6	6.2	1.0
Tertiär	22	83	84	62	2.1	65	116	123	431	4.5	4.5	---
Kreide	12	80	53	67	1.9	61	143	198	198	---	---	---
Jura	70	87	138	54	2.3	52	136	227	777	7.1	4.3	---
Keuper	412	70	74	53	1.9	50	113	193	696	4.4	1.5	---
Muschelkalk	224	131	297	72	2.6	61	245	372	3752	16.1	4.9	0.9
Buntsandstein	245	112	200	67	2.4	52	257	457	2540	13.1	6.5	0.4
Zechstein	50	218	232	138	2.6	122	643	734	902	34.0	16.0	---
Rotliegend	229	156	265	86	2.6	72	335	744	2238	14.8	8.7	2.6
Karbon	179	218	422	110	2.9	96	484	753	4493	26.3	14.0	2.8
Devon	562	178	492	90	2.7	74	368	577	9677	22.4	9.4	1.6
Silur	26	579	1046	287	3.1	326	891	1082	5477	53.8	46.2	7.7
Ordoviz	236	351	946	161	2.9	135	700	999	10560	34.7	20.8	4.7
Kambrium	14	87	83	58	2.6	53	234	263	263	14.3	---	---
Proterozoikum	1								873	100.0	100.0	---
Metamorphite	169	245	484	136	2.7	105	528	786	5738	36.1	16.0	2.4
basische Plutonite	84	413	914	155	3.5	112	997	1684	7100	32.1	21.4	9.5
basische Vulkanite	43	293	426	144	3.3	152	744	1188	2242	34.9	23.3	7.0
saure Plutonite	278	406	789	179	3.3	149	843	1450	6987	43.5	27.0	7.6
saure Vulkanite	20	415	898	171	3.4	174	595	2423	4149	45.0	20.0	5.0

Tab. 9
Geologieabhängige Kennwerte der Radonmessungen im Keller (Erklärung
der Abkürzungen s. Tab. 6)

Erdgeschossräume	Anzahl	AM Bq/m ³	SD Bq/m ³	GM Bq/m ³	GSD	Median Bq/m ³	p90 Bq/m ³	p95 Bq/m ³	Maximum Bq/m ³	Anteil >200 Bq/m ³ %	Anteil > 400 Bq/m ³ %	Anteil >1000 Bq/m ³ %
Quartär	1630	85	137	56	2.2	49	172	277	2682	8.2	2.6	0.4
Tertiär	26	39	18	34	1.7	38	68	69	73	---	---	---
Kreide	19	67	44	56	1.8	48	146	171	171	---	---	---
Jura	80	53	61	40	1.9	38	81	162	387	5.0	---	---
Keuper	464	40	29	35	1.7	35	66	82	413	0.6	0.2	---
Muschelkalk	279	69	75	51	2.0	46	118	229	688	6.8	0.7	---
Buntsandstein	258	56	65	42	2.0	38	104	167	604	3.5	0.8	---
Zechstein	53	217	433	97	2.9	73	485	1355	2467	18.9	15.1	5.7
Rotliegend	262	79	83	58	2.1	54	178	249	678	8.0	1.5	---
Karbon	219	145	230	78	2.8	69	367	621	1788	17.8	9.1	1.4
Devon	665	105	312	60	2.3	52	174	288	5301	8.3	2.9	0.9
Silur	37	281	275	201	2.2	171	754	1026	1152	40.5	16.2	5.4
Ordoviz	282	242	656	116	2.8	104	406	766	9380	25.5	10.3	3.9
Kambrium	16	75	92	41	3.2	36	197	361	361	6.3	---	---
Proterozoikum	3	203	250	119	3.4	63			492	33.3	33.3	---
Metamorphite	192	195	408	98	2.7	78	340	674	4210	23.4	9.4	2.1
basische Plutonite	86	179	453	92	2.5	81	272	419	3930	17.4	5.8	2.3
basische Vulkanite	51	132	197	74	2.7	67	196	763	906	9.8	7.8	---
saure Plutonite	329	231	645	101	3.1	73	573	825	10367	26.1	14.0	4.3
saure Vulkanite	20	198	253	119	2.7	114	468	831	1118	25.0	10.0	5.0

Tab. 10

Geologieabhängige Kennwerte der Radonmessungen im Erdgeschoss
(Erklärung der Abkürzungen s. Tab. 6)

Referenzräume	Anzahl	AM Bq/m ³	SD Bq/m ³	GM Bq/m ³	GSD	Median Bq/m ³	p90 Bq/m ³	p95 Bq/m ³	Maximum Bq/m ³	Anteil >200 Bq/m ³ %	Anteil > 400 Bq/m ³ %	Anteil >1000 Bq/m ³ %
Quartär	790	49	44	40	1.8	38	79	105	433	2.2	0.1	---
Tertiär	18	37	18	33	1.7	37	68	69	69	---	---	---
Kreide	6	46	16	44	1.4	47	73	73	73	---	---	---
Jura	45	39	20	35	1.6	33	58	76	112	---	---	---
Keuper	340	36	19	32	1.6	33	55	68	209	0.3	---	---
Muschelkalk	141	45	29	39	1.7	38	71	92	216	1.4	---	---
Buntsandstein	150	49	61	37	1.9	34	75	108	604	2.0	0.7	---
Zechstein	21	87	103	63	2.1	60	99	279	471	9.5	4.8	---
Rotliegend	118	52	39	43	1.8	43	86	96	289	1.7	---	---
Karbon	86	62	62	46	2.1	44	118	176	452	3.5	1.2	---
Devon	330	73	282	47	1.9	42	107	128	5085	3.6	0.6	0.3
Silur	6	150	96	127	1.9	119	316	316	316	33.3	---	---
Ordoviz	88	101	130	72	2.1	65	187	268	931	9.1	2.3	---
Kambrium	7	32	26	26	2.1	22	87	87	87	---	---	---
Proterozoikum	0											
Metamorphite	68	68	54	55	1.9	48	153	210	264	5.9	---	---
basische Plutonite	43	89	76	69	2.0	64	199	235	388	9.3	---	---
basische Vulkanite	22	57	39	45	2.1	44	115	126	139	---	---	---
saure Plutonite	109	83	106	57	2.2	50	168	241	650	7.3	2.8	---
saure Vulkanite	8	74	51	58	2.2	55	165	165	165	---	---	---

Tab. 11

Geologieabhängige Kennwerte der Radonmessungen im Referenzraum
(Erklärung der Abkürzungen s. Tab. 6)

Der Karte der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft liegen insgesamt Messungen an über 4.000 Bodenluftmessorten zugrunde, deren statistische Kennwerte Tabelle 12 zu entnehmen sind.

	Anzahl	AM kBq/m ³	SD kBq/m ³	GM kBq/m ³	GSD	Median kBq/m ³	p90 kBq/m ³	p95 kBq/m ³	Maximum kBq/m ³
Quartär	511	32	40	19	2.8	20	76	89	479
Tertiär	136	40	27	29	2.7	37	77	94	131
Kreide	61	42	107	23	2.5	23	52	82	841
Jura	153	38	34	25	2.8	27	78	97	244
Keuper	204	32	38	21	2.7	25	67	96	392
Muschelkalk	187	45	35	31	2.6	36	96	116	221
Buntsandstein	304	35	32	24	2.5	26	74	97	246
Zechstein	40	63	39	50	2.1	55	111	122	189
Rotliegend	134	47	52	29	2.9	29	101	152	371
Karbon	275	54	84	38	2.2	39	88	113	922
Devon	366	40	37	30	2.2	33	72	87	433
Silur	15	77	91	47	3.0	45	147	369	369
Ordoviz	118	80	79	58	2.2	60	146	198	621
Kambrium	50	83	55	68	1.9	70	144	188	316
Metamorphite	524	55	50	41	2.3	42	106	134	535
basische Plutonite	15	47	23	40	1.9	49	69	87	87
basische Vulkanite	43	34	28	25	2.3	25	62	94	130
saure Plutonite	496	126	155	76	2.8	73	266	396	1134
saure Vulkanite	54	88	111	52	2.9	55	166	272	702
GIQuartär	286	38	32	26	2.6	30	85	95	202
QKreideAlpen	10	70	60	49	2.5	41	157	183	183
QTriasAlpen	35	60	47	43	2.5	49	103	188	213

Tab. 12

Geologieabhängige Kennwerte der Radonmessungen in der Bodenluft in Deutschland (Erklärung der Abkürzungen s. Tab. 6; GIQuartär = quartäre Glazialablagerungen, QKreideAlpen = Quartär über kretazischen Sedimentgesteinen in den Alpen, QTriasAlpen = Quartär über triassischen Sedimentgesteinen in den Alpen)

Die beiden unabhängigen Datensätze – Bodenluft- und Raumlufmessungen – können miteinander verglichen werden. In Abbildung 31 sind die geometrischen Mittelwerte von Bodenluft und Kellerräumen gegenübergestellt. Die Kellerräume wurden als Vergleichsdatsatz ausgewählt, weil hier die maßgebliche Schnittstelle des Hauses zum Baugrund liegt und die Zusammenhänge daher am deutlichsten herauszustellen sind. Für Erdgeschossräume sind die Abhängigkeiten durch die Pufferwirkung des Kellers deutlich abgeschwächt.

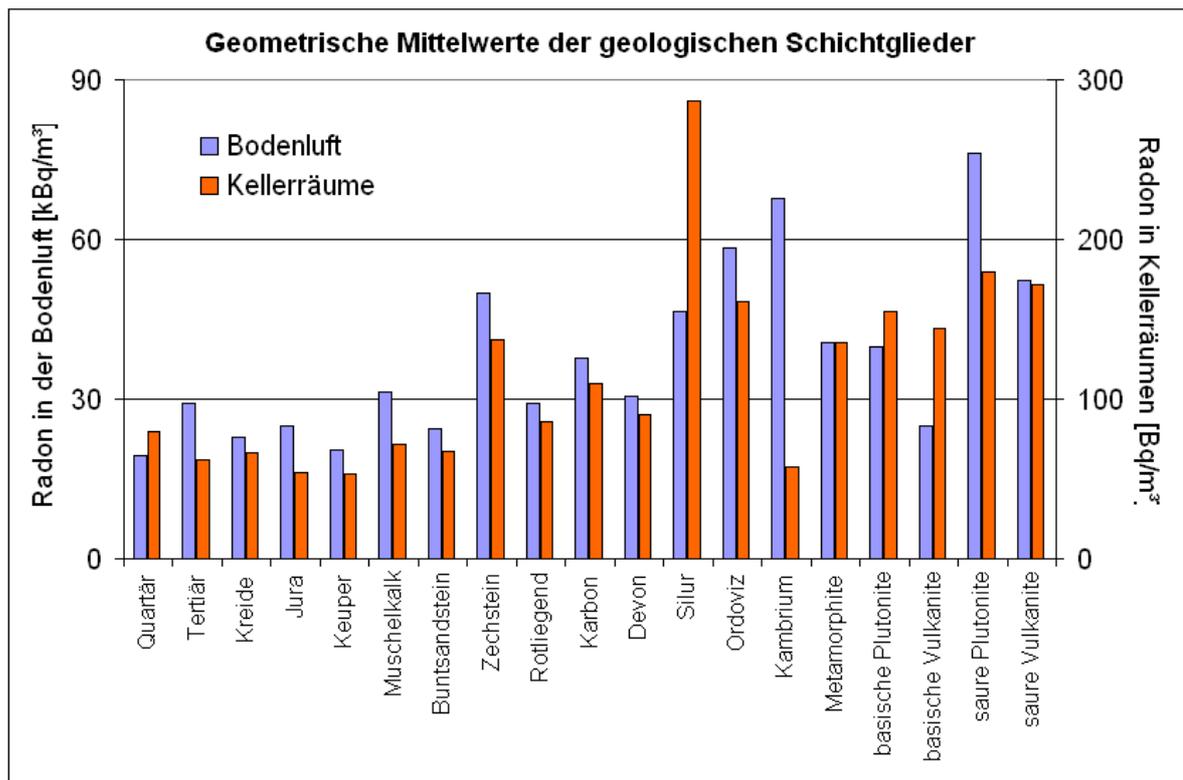


Abb. 31

Geologieabhängiger Vergleich der geometrischen Mittelwerte der Bodenluft- und Raumluftmessungen

Bis auf wenige Ausnahmen ist eine sehr gute Übereinstimmung der geometrischen Mittelwerte gegeben. Größere Abweichungen gibt es für das Silur, das Kambrium, die basischen Vulkanite und die sauren Plutonite. Im Falle des Silur sind die Raumluftwerte deutlich höher als das geometrische Mittel der Bodenluftwerte erwarten ließe. Dies ist sicherlich darauf zurückzuführen, dass hier allein 16 von 26 Messwerten aus einer einzigen Gemeinde stammen, die in einem der Zentren des Uranerzabbaues in Thüringen liegt. Diese Häuser wurden überwiegend vor 1900 und unter Einsatz der örtlich vorhandenen Natursteine erbaut. Für das Kambrium sind insgesamt nur 14 Messwerte in Häusern vorhanden, wodurch die Aussagekraft des Mittelwertes sehr stark eingeschränkt ist. Für die basischen Vulkanite liegen Bodenluftmesswerte vor allem aus dem Westen der Bundesrepublik Deutschland vor, wohingegen ein großer Teil der Raumluftmessungen in Gebäuden über den paläozoischen Gesteinen in Thüringen und Sachsen durchgeführt wurde. Bei den sauren Plutoniten liegen sehr viele Bodenluftmessungen über Graniten mit hohem geogenem Radonpotenzial vor (z.B.: Fichtelgebirge, Oberpfalz, Bayerischer Wald), während im Rah-

men der hier betrachteten bundesweiten Raumlufmessungen meist Häuser über weniger radonhöffigen Graniten untersucht wurden.

Ein weiteres Beispiel für die klaren Zusammenhänge zwischen Bodenluft und Raumluf ist den Streudiagrammen in Abbildung 32 zu entnehmen: Die geometrischen Mittelwerte der Bodenluftmessungen über den o.g. geologischen Schichtgliedern sind den Überschreitungshäufigkeiten von 400 Bq/m³ im Gebäude gegenübergestellt. Auf die Berechnung einer Regression wurde verzichtet, da die Mittelwerte für das Kambrium und das Silur den linearen Zusammenhang verzerren würden.

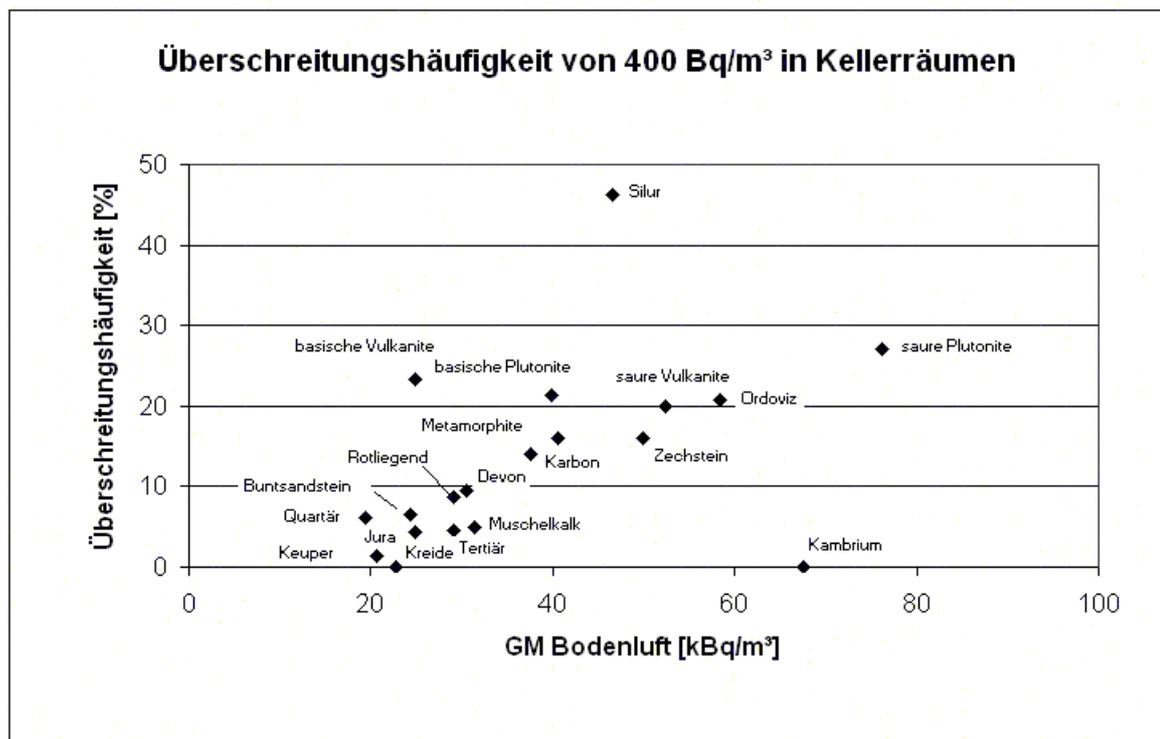
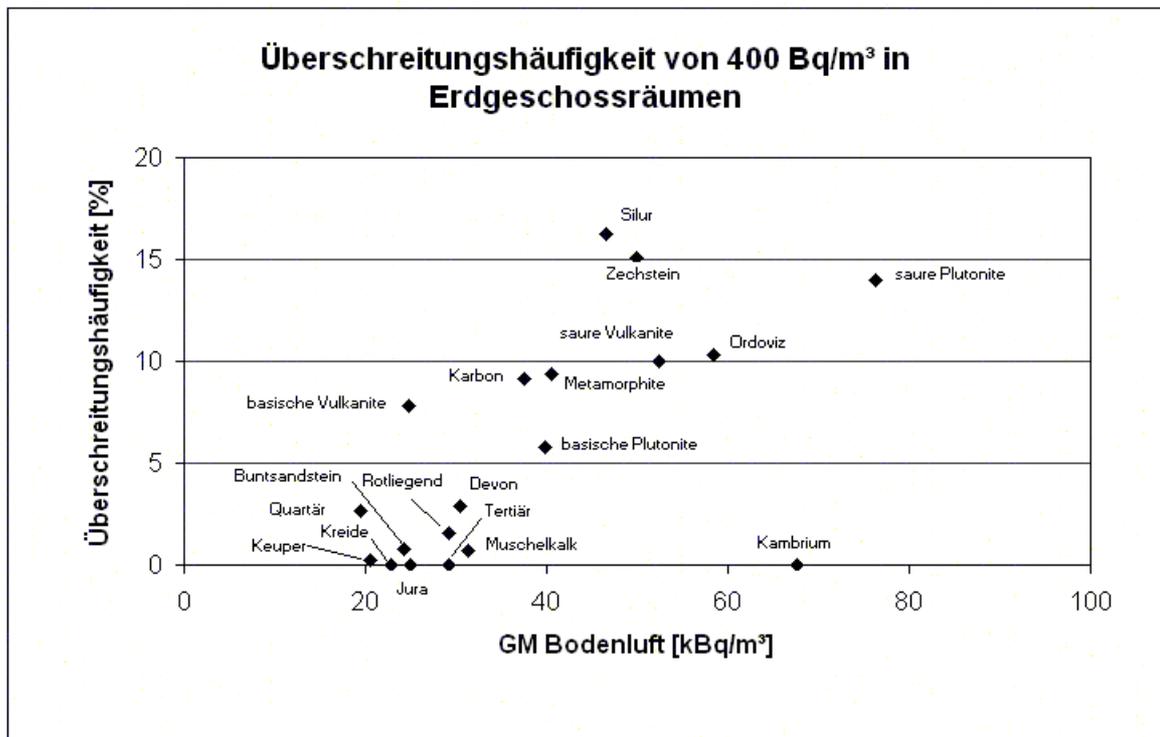


Abb. 32
 Geologieabhängiger Vergleich der Überschreitungshäufigkeit von 400 Bq/m³ im Erdgeschoss und im Keller in Abhängigkeit vom geometrischen Mittelwert der Bodenluft

Neben der Möglichkeit der Nutzung des unabhängigen Datensatzes der Bodenluftmessungen kann auch aufgrund der exakten räumlichen Lokalisierung der Gebäude eine Zuordnung von Raumluf- und Bodenluftkonzentration (letztere auf Grundlage der interpolierten Deutschlandkarte) durchgeführt werden. Eine solche Zuordnung ist mit der gebotenen Vorsicht zu interpretieren, da die kleinmaßstäbliche Deutschlandkarte lediglich als Planungsinstrument gedacht ist und eine exakte Zuordnung zu einem einzelnen Haus gerade **nicht** in der Intention der Verfasser lag. Eine mögliche weitere Interpretation der hier vorliegenden Raumlufmessungen sollte ausschließlich auf einer Kartengrundlage 1 : 200.000 und einer auf dieser Basis durchgeführten Interpolation stattfinden. Da zur Zeit aber kein detaillierterer, auf gleicher Grundlage erhobener Datensatz für die verschiedenen Regionen der bundesweiten Raumlufmessungen vorhanden ist, soll versucht werden, einige Zusammenhänge herauszustellen. Die Lage der untersuchten Gemeinden in Deutschland ist in Abbildung 33 dargestellt.

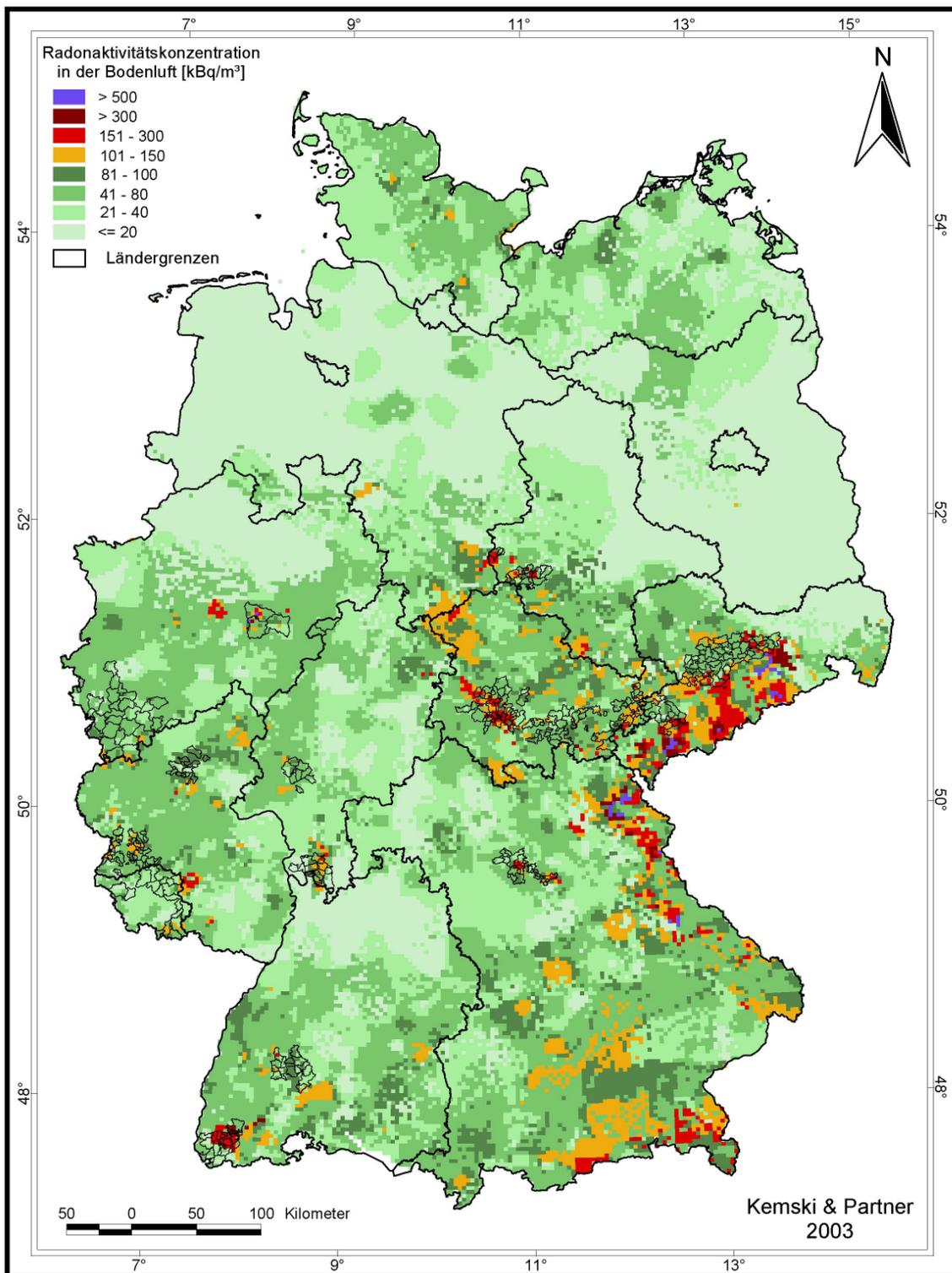


Abb. 33

Lage der untersuchten Gemeinden in Deutschland (im Hintergrund die Karte der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft)

Die länderbezogene Aufteilung der den Hausstandorten zugeordneten interpolierten Radonwerte in der Bodenluft werden in Abbildung 34 dargestellt.

Zunächst ist festzustellen, dass trotz der Auswahlkriterien nach der Gemeindefliste (s. Einleitung) ein hoher Prozentsatz an Häusern vorhanden ist, die in Gebieten mit Radonaktivitätskonzentrationen in Bodenluft unterhalb von 80 kBq/m^3 liegen. Dieser Anteil liegt im Mittel bei ca. 60 % und variiert zwischen 45 und 82 %. Dies hat seinen Grund darin, dass die Deutschlandkarte der Bodenluftkonzentrationen für Detailuntersuchungen auf Gemeindeebene wegen ihres zu kleinen Maßstabes eine zu grobe Auflösung bietet und durch Karten größeren Maßstabes untersetzt werden muss. Wegen der baulichen Unterschiede werden für die folgenden Darstellungen die Daten wieder für östliche und westliche Bundesländer getrennt bewertet. In den Abbildungen 35 bis 38 sind die geometrischen Mittelwerte für Keller- und Erdgeschossräume sowie die Überschreitungshäufigkeiten von 200 Bq/m^3 , 400 Bq/m^3 und 1.000 Bq/m^3 angegeben.

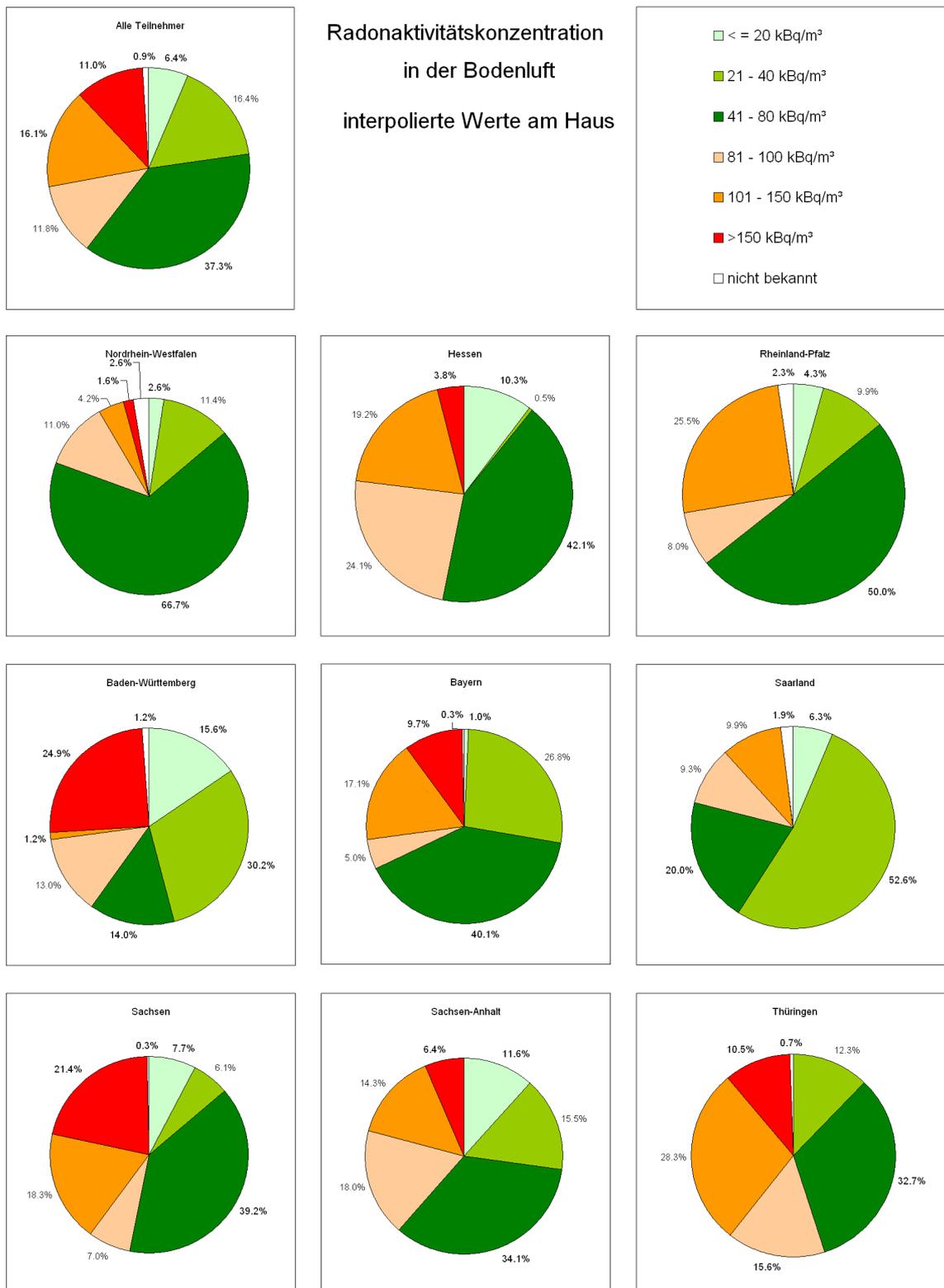


Abb. 34
Verteilung der Klassen der Bodenluftaktivitätskonzentrationen an den Standorten der untersuchten Gebäude

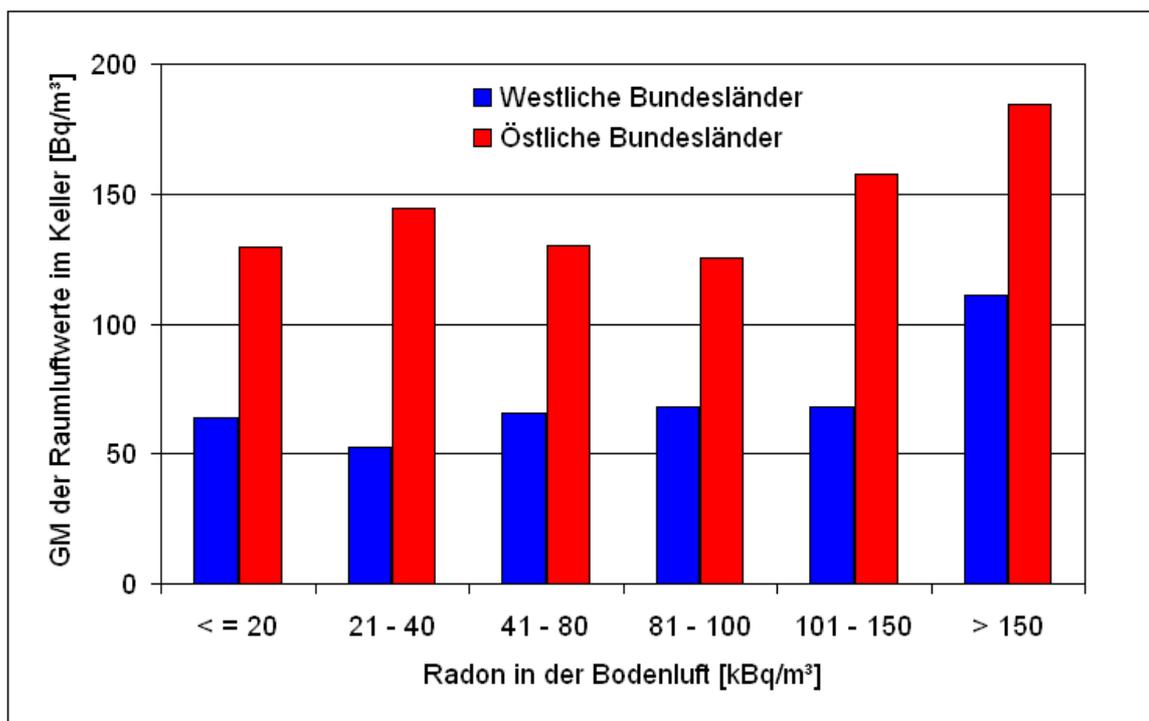
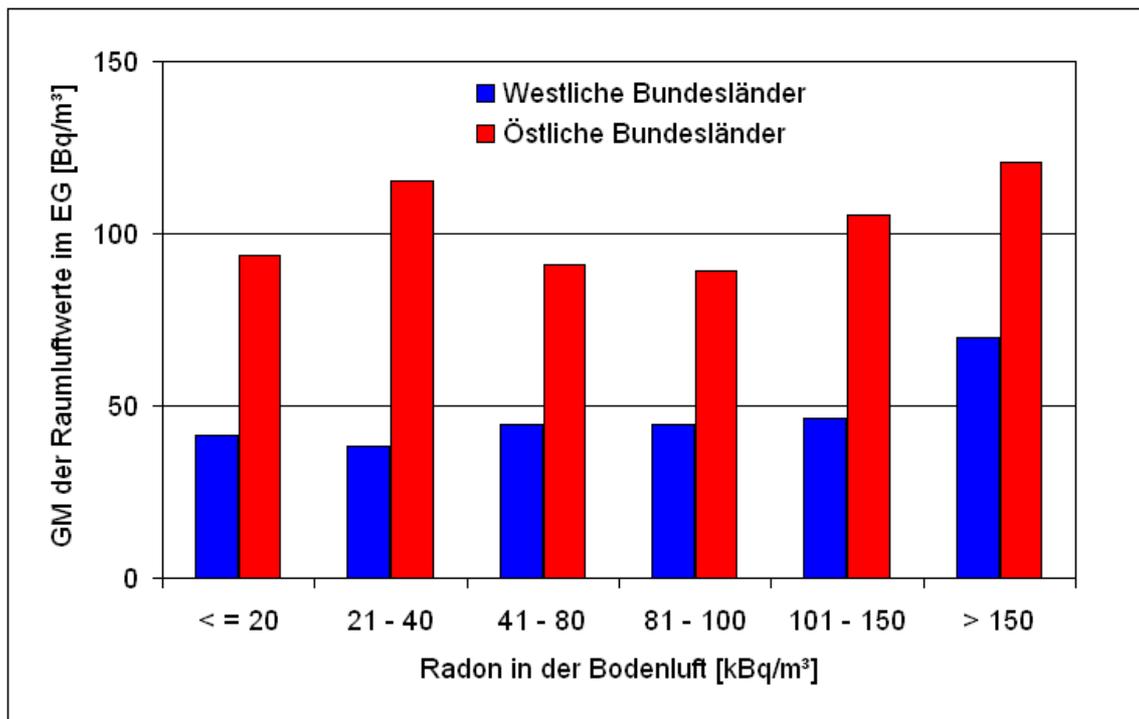


Abb. 35

Vergleich zwischen der Radonkonzentration in der Bodenluft und dem geometrischen Mittelwert (GM) der Raumluftgehalte im Keller

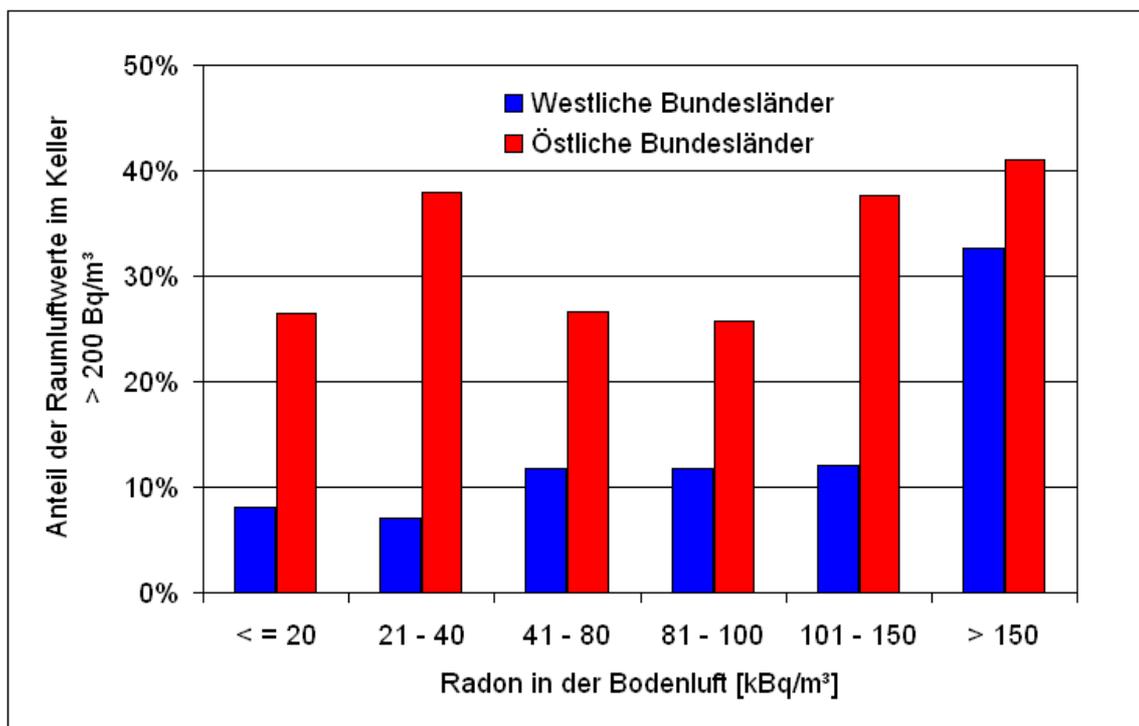
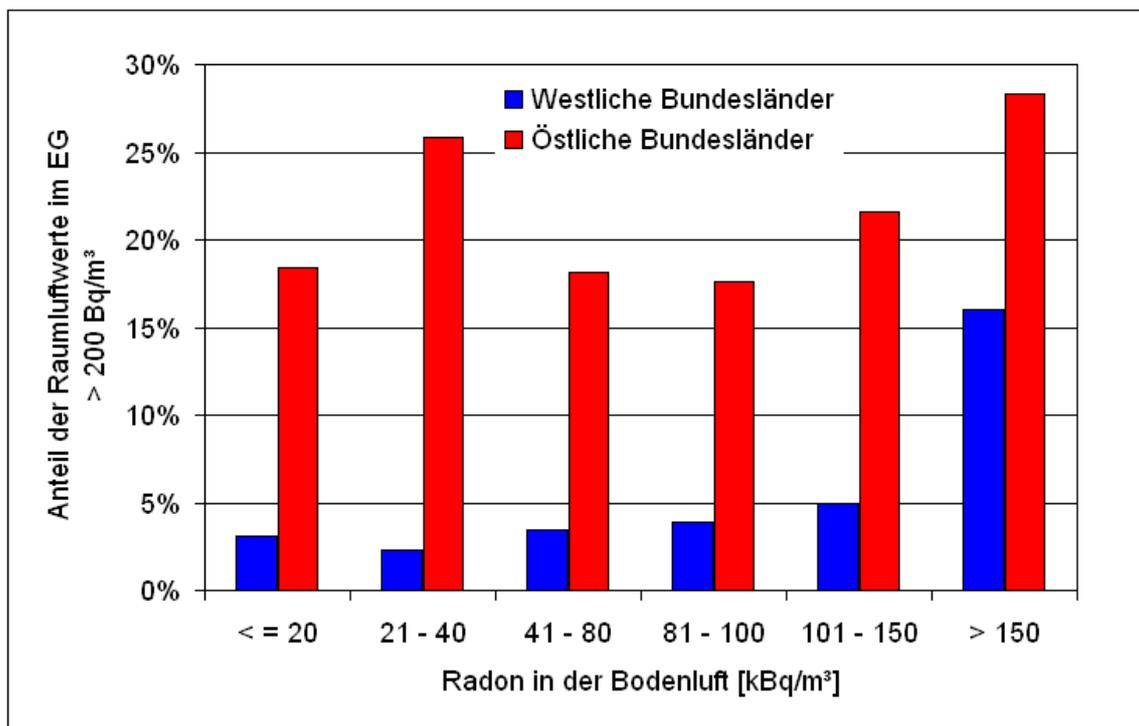


Abb. 36

Vergleich zwischen der Radonkonzentration in der Bodenluft und dem Anteil der Raumluftgehalte über 200 Bq/m³

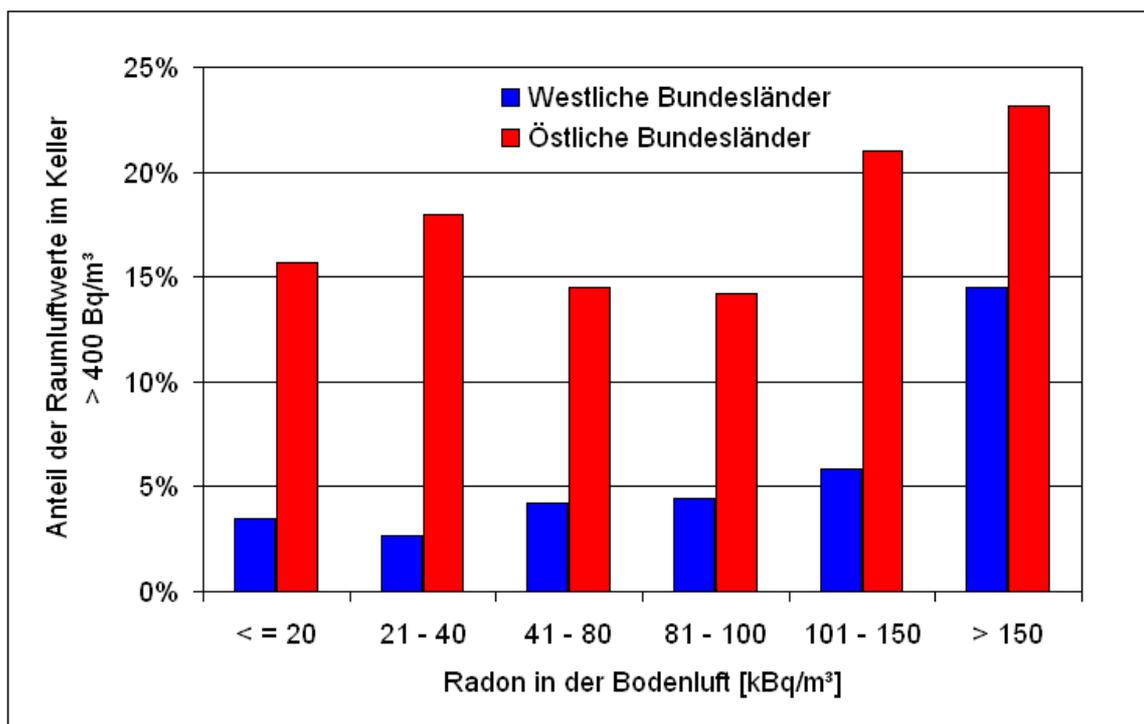
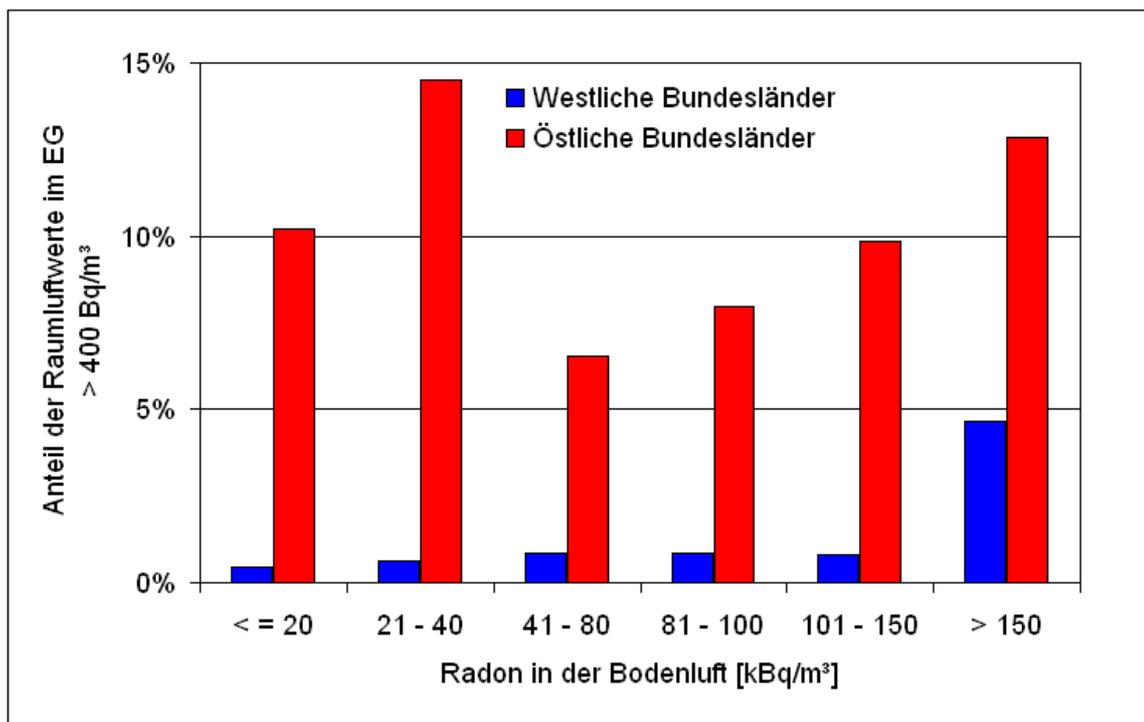


Abb. 37
 Vergleich zwischen der Radonkonzentration in der Bodenluft und dem Anteil der Raumluftgehalte über 400 Bq/m³

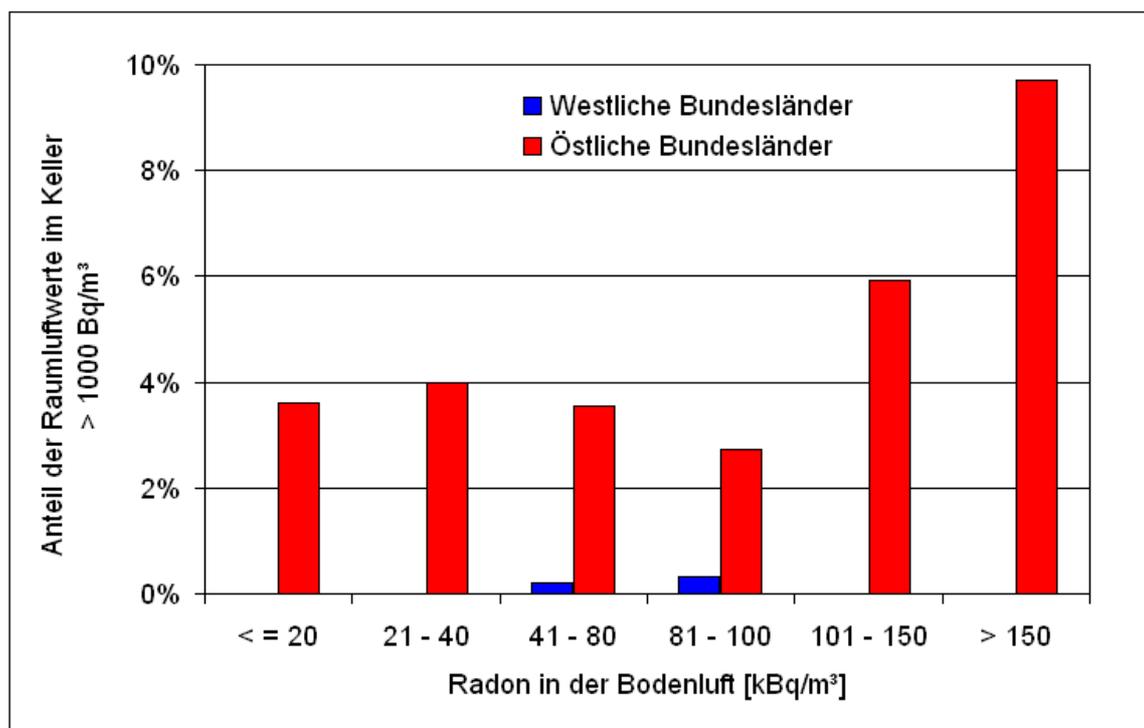
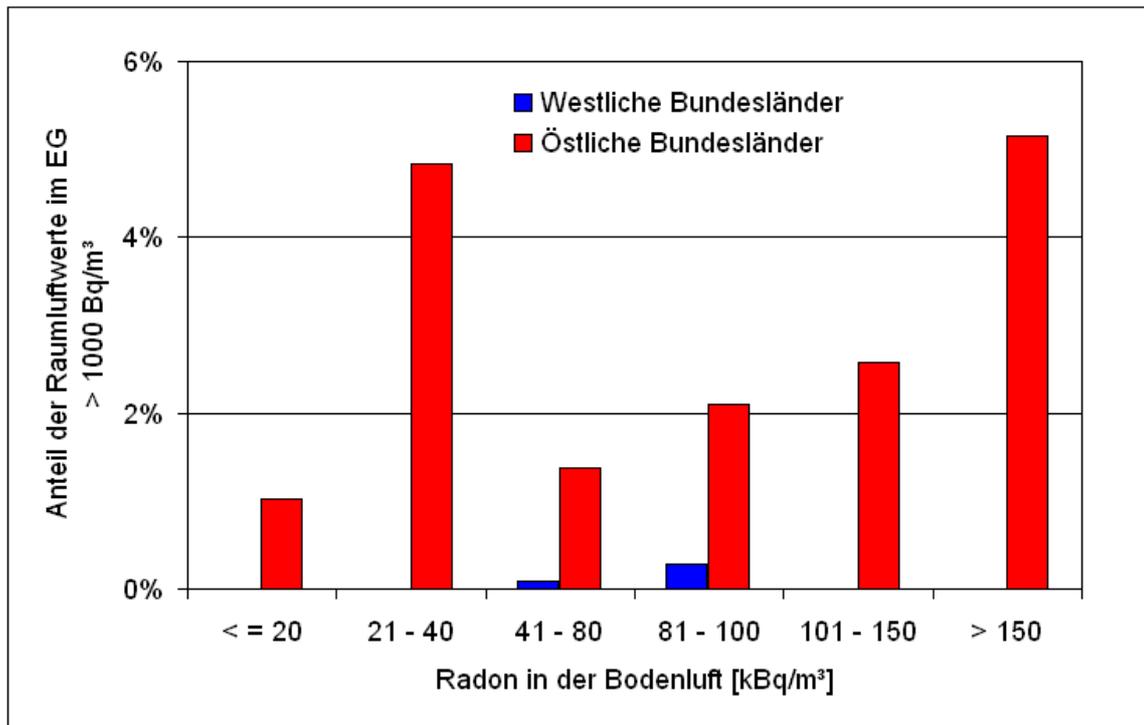


Abb. 38

Vergleich zwischen der Radonkonzentration in der Bodenluft und dem Anteil der Raumluftgehalte über 1.000 Bq/m³

Deutlich ist der Unterschied zwischen den beiden Gruppen zu erkennen. Dies belegt eindrücklich, dass bei gleich starker Radonquelle im Boden unterschiedliche Radonkonzentrationen in den Häusern vorkommen und damit die Transferfaktoren in den östlichen Bundesländern deutlich höher als in den westlichen Bundesländern sind. Sowohl die geometrischen Mittelwerte als auch die Überschreitungshäufigkeiten von 200 bzw. 400 Bq/m³ nehmen mit steigender Bodenluftkonzentration zu.

Eine Ausnahme bildet die Klasse der Bodenluftkonzentration zwischen 21 und 40 kBq/m³ in den östlichen Bundesländern, in der überdurchschnittlich hohe Anteile vorhanden sind. Hier wirkt sich die fehlende Differenzierung der kleinräumig stark variierenden Geologie des paläozoischen Gebirgssockels aus. Dies sei am Beispiel der Überschreitungshäufigkeit von 1.000 Bq/m³ erläutert. Der hohe Anteil von ca. 5 % der Erdgeschossräume ist ausschließlich auf Messungen in zwei Ortschaften zurückzuführen. Der Deutschlandkarte der Bodenluftkonzentrationen liegen hier als geologische Grundlage für die Interpolation die Schichtglieder Ordoviz und Silur zugrunde, während bei einer kleinräumigen Betrachtung der Geologie das Schichtglied des Lederschiefers erkennbar wird, der aufgrund seiner anormalen Urankonzentrationen als Lagerstätte gilt.

Für die westlichen Bundesländer wird ein deutlicher Anstieg in der Überschreitungshäufigkeit erst bei sehr hohen Bodenluftkonzentrationen über 150 kBq/m³ erkennbar. Der bisher vorgeschlagene Wert von 100 kBq/m³ in der Bodenluft zur Empfehlung zusätzlicher baulicher Schutzmaßnahmen ist damit im Sinne einer konservativen Richtlinie und bei Beachtung der vorhandenen Fehlergrenzen sinnvoll und notwendig.

Insgesamt haben die nun vorliegenden Messungen die geologische Prognose bestätigt und gezeigt, dass die Deutschlandkarte der Bodenluftkonzentrationen als Planungsinstrument gut geeignet ist. Bei der Durchführung zukünftiger Untersuchungen auf Gemeindeebene ist allerdings darauf zu achten, dass größerer Wert auf die exakte Lokalisierung der zu untersuchenden Gebiete (hohe Radonkonzentrationen in der Bodenluft) gelegt bzw. bei kleinräumig variierender Geologie die geologische Kartengrundlage GK 200 bei der Vorauswahl von Gemeinden einbezogen wird.