



Ausweisung von Radon- vorsorgegebieten in Sachsen

Schriftenreihe, Heft 17/2020



Die Ausweisung von Gebieten nach § 121 Strahlenschutzgesetz (Radonvorsorgegebiete) im Freistaat Sachsen

Dr. Thomas Heinrich, Mandy Alisch-Mark, Tobias Geib, Stefan Friedemann, Janett Pezenka
Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Gesetzliche Grundlagen	7
3	Methodik des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) nach BOSSEW (2018)	8
4	Methodik der Ausweisung der Radonvorsorgegebiete in Sachsen	10
4.1	Geologische Klassifizierung für den Freistaat Sachsen.....	10
4.2	Radon in der Bodenluft.....	13
4.2.1	Verfahren zur Messung der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft	14
4.2.2	Vorliegende Daten zur Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft.....	15
4.3	Radon in Innenräumen.....	17
4.3.1	Verfahren zur Messung der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen	17
4.3.2	Vorliegende und verwendete Daten zur Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen	18
4.4	Auswertung der Messdaten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft.....	21
4.4.1	Erstellung der Karte der Erwartungswerte der Bodenradonkonzentration in Sachsen.....	21
4.4.2	Auswertung des Datenbestandes Bodenradon zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete	26
4.5	Auswertung der Messdaten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen.....	30
4.5.1	Selektion der verwendeten Daten zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete.....	30
4.5.2	Auswertung des Datenbestandes Radon in Innenräumen zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete	32
4.5.3	Verifizierung der Methodik der Ausweisung der Radonvorsorgegebiete anhand weiterer Datensätze.....	35
5	Ermittlung der Radonvorsorgegebiete	40
5.1	Karte der als Radonvorsorgegebiete ausgewiesenen Gemeinden.....	43
5.2	Vergleich der Methodik der Ausweisung der Radonvorsorgegebiete mit der Methodik des Bundesamtes für Strahlenschutz nach BOSSEW (2018) und PETERMANN (2019).....	45
5.3	Robustheit der angewendeten Methodik zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete	46
5.4	Diskussion einzelner Gemeinden	46
6	Zusammenfassung und Ausblick	48
Literaturverzeichnis		50
A 1	Anhang	52
A 1.1	Liste der geologischen Einheiten in den Karten GK 200 vereinfacht und reklassifiziert, sowie GK 200 original.....	52
A 1.2	Statistische Kenngrößen aus Radonmessungen in der Bodenluft.....	55
A 1.3	Statistische Kenngrößen aus Radonmessungen in Innenräumen.....	57
A 1.4	Liste der auszuweisenden Gemeinden	58

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammenfassung der GK 200 zu 30 geologischen Einheiten in der vereinfachten Geologischen Karte "GK 200 vereinfacht";	11
Abbildung 2: Ursprüngliche geologische Einheiten (GK 200), die zu den geologischen Einheiten "Saure Vulkanite" zusammengefasst wurden ("GK 200 vereinfacht", 2010).....	12
Abbildung 3: Ursprüngliche geologische Einheiten (GK 200), die zur geologischen Einheit "Aufschüttungen / Tagebaue" zusammengefasst wurden	13
Abbildung 4: Anordnung der Bohrungen zur Entnahme der Bodenluft an einem Messpunkt	14
Abbildung 5: Schematischer Aufbau der Probenahmeeinrichtung zur Absaugung der Bodenluft in Lucas-Zellen.....	15
Abbildung 6: Messpunkte für Messungen der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft im Freistaat Sachsen im Rahmen des Messprogrammes zur Erstellung der Bodenradonkarte	16
Abbildung 7: Exposimeter mit Kernspurdetektor.....	18
Abbildung 8: Ermittelte Häufigkeitsverteilung der Gaspermeabilität im Boden.....	22
Abbildung 9: Karte der Erwartungswerte der Radonkonzentration in der Bodenluft in 1 m Tiefe	23
Abbildung 10: Kartenausschnitt aus der Karte der Erwartungswerte der Radonkonzentration in der Bodenluft	24
Abbildung 11: Häufigkeitsverteilung der Radon-222- Aktivitätskonzentration in der Bodenluft, zugeordnet zu den 32 geologischen Einheiten, aufsteigend sortiert nach dem QR40.....	27
Abbildung 12: Zusammenhang zwischen QR40 und Median der Werte der Radon-222- Aktivitätskonzentration in der Bodenluft zugeordnet zu den geologischen Einheiten der Kategorien "Unauffällig", "Auffällig" und "Erhöht".	28
Abbildung 13: Häufigkeitsverteilung der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft auf der Bodenradonvergleichsfläche sowie in der gesamten geologischen Einheit "Phyllite"......	30
Abbildung 14: Relative Häufigkeiten der Werte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Räumen im Erdgeschoss voll-unterkellerten kleiner Häuser (Referenzsituation) zusammengefasst in den Kategorien der geologischen Einheiten.	32
Abbildung 15: Zusammenhang von Median der Radon-222-Aktivitätskonzentration und Referenzwertüberschreitungshäufigkeit unterteilt nach Kategorie der geologischen Einheit für Innenräume im Erdgeschoss voll-unterkellerten Wohnhäuser.	34
Abbildung 16: Zusammenhang von Median der Radon-222-Aktivitätskonzentration und Referenzwertüberschreitungshäufigkeit unterteilt nach Kategorie der geologischen Einheit für Innenräume im Keller von Wohnhäusern.....	37
Abbildung 17: Abhängigkeit der Überschreitungshäufigkeit des Referenzwertes in mindestens einem Raum in einer Schule oder einer anderen Erziehungs- und Bildungseinrichtung von der mittleren Anzahl der ausgelegten Exposimeter	38
Abbildung 18: Zusammenhang von Median der Radon-222-Aktivitätskonzentration und Referenzwertüberschreitungshäufigkeit unterteilt nach Kategorie der geologischen Einheit für Innenräume im Erdgeschoss großer Gebäude	39
Abbildung 19: Zusammenhang des Quantilsrang von 40 kBq/m ³ und der Referenzwertüberschreitungshäufigkeit, gemittelt über mehrere geologische Einheiten.....	41
Abbildung 20: Schematische Darstellung der Entscheidung zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete.....	42
Abbildung 21: Schematische Darstellung des Einflusses der als "Erhöht" klassifizierten Flächen (rote Elemente) auf die Überschreitungswahrscheinlichkeit ermittelt über die gesamte Gemeindefläche.....	42
Abbildung 22: Schematische Darstellung der Entscheidung zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete, wenn als "Erhöht" klassifizierte Flächen in einer Gemeinde vorkommen.....	43
Abbildung 23: Karte der nach § 121 STRAHLENSCHUTZGESETZ ausgewiesenen Gebiete im Freistaat Sachsen.	44
Abbildung 24: Vergleich des Modells der Prognose des geogenen Radonpotentials in Deutschland nach BOSSEW (2018) und der Ausweisung von Radonvorsorgegebieten im Freistaat Sachsen.	45
Abbildung 25: Kartenausschnitt des geogenen Radonpotentials nach PETERMANN (2019)	45

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Datenbestände aus verschiedenen Messprogrammen des Freistaates Sachsen zur Messung der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft.....	15
Tabelle 2: Übersicht über die Datenbestände aus verschiedenen Messprogrammen des Freistaates Sachsen zur Messung der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen.	20
Tabelle 3: Statistische Kenndaten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft in den geologischen Einheiten "Auenterrassen" und "Pleistozäne Flussterrassen".	24
Tabelle 4: Messwerte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft in der Gemeinde Arzberg im Landkreis Nordsachsen im Rahmen verschiedener Messprogramme.	25
Tabelle 5: Statistische Kenngrößen der Messungen der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft auf der Referenzfläche sowie in der gesamten geologischen Einheit "Phyllite".	29
Tabelle 6: Vergleich der Mittelwerte der Radon-222-Aktivitätskonzentration und Überschreitungshäufigkeiten des Referenzwertes in Abhängigkeit der selektierten Räume in unterschiedlichen Messprogrammen.	31
Tabelle 7: Vorliegende Datensätze zur Verifizierung der Methodik zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete und ermittelte Referenzwertüberschreitungshäufigkeiten (RWÜ) in den als "Unauffällig", "Auffällig" und "Erhöht" klassifizierten geologischen Einheiten.	35
Tabelle 8: Skalierung von Datensätzen aus verschiedenen Literaturquellen sowie von Messdaten aus dem Datenbestand von Messprogrammen des Freistaates Sachsen. Die arithmetischen Mittelwerte der Radonmessungen in den unterschiedlichen Etagen wurden ins Verhältnis gesetzt.	36
Tabelle 9: Zuordnung der geologischen Einheiten der GK 200 original zu der vereinfachten und reklassifizierten GK 200.....	52
Tabelle 10: Statistische Kenngrößen der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft der geologischen Einheiten aus dem Datensatz Bodenradondaten zur Erstellung der Bodenradonkarte Sachsen.	55
Tabelle 11: Die statistischen Kenndaten der Messdaten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen im Erdgeschoss voll-unterkellerten kleiner Gebäude	57
Tabelle 12: Tabellarische Liste der nach § 121 STRLSCHG in Sachsen auszuweisenden Gemeinden	58

Abkürzungsverzeichnis

BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BfUL	Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft
Bq/m ³	Becquerel pro Kubikmeter Luft
EG	Erdgeschoss
GK 200	Geologische Karte des Freistaates Sachsen im Maßstab 1:200.000
GK 400	Geologische Karte des Freistaates Sachsen im Maßstab 1:400.000
GK 1000	Geologische Karte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1:1.000.000
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
OT	Ortsteil
QR	Quantilsrang eines bestimmten Wertes
RP	Radonpotential
RWÜ	Referenzwertüberschreitung
StrlSchG	Strahlenschutzgesetz
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung

1 Einleitung

Mit der Umsetzung der europäischen RICHTLINIE 2013/59/EURATOM DES RATES im neuen STRAHLENSCHUTZGESETZ (STRLSCHG) vom 27. Juni 2017 wurde eine umfassende Überarbeitung und Neuordnung des Strahlenschutzrechtes vorgenommen.

In der bisherigen Gesetzgebung wurde der Schutz vor erhöhter Exposition durch Radon-222 nur an bestimmten Arbeitsplätzen betrachtet, wie z. B. an Arbeitsfeldern in untertägigen Bergwerken, Schächten und Höhlen, in Radonheilbädern und -heilstollen, sowie in Anlagen zur Wassergewinnung und -aufbereitung. Um eine weitreichende Senkung der Exposition durch Radon-222 für die Bevölkerung zu erreichen, sind darüber hinaus in der aktuellen Strahlenschutzgesetzgebung erweiterte Regelungen zum Schutz vor dem radioaktiven Edelgas und seinen gesundheitlichen Risiken verankert worden. Das STRLSCHG schreibt verpflichtende Maßnahmen fest, die sowohl den Neubau von Gebäuden als auch Arbeitsplätze in Innenräumen betreffen.

Als zentrales Element wurde ein Referenzwert für die Radon-222-Aktivitätskonzentration von 300 Becquerel pro Kubikmeter Luft (Bq/m^3) in Aufenthaltsräumen von Gebäuden sowie an Arbeitsplätzen in Innenräumen festgelegt (§ 124 bzw. § 126 STRLSCHG). Grundsätzlich soll für alle Gebäude der Zutritt von Radon in das Gebäude weitgehend verhindert oder deutlich erschwert werden. In Gebieten mit hohem Radonvorkommen sind darüber hinaus zusätzliche bauliche Maßnahmen bei Neubauten zu ergreifen, die in der STRAHLENSCHUTZVERORDNUNG konkretisiert wurden (§ 154 STRLSCHV). Außerdem besteht in diesen Gebieten die Verpflichtung zur Messung der Radon-222-Aktivitätskonzentration für alle Arbeitsplätze, wenn sich diese in Keller- oder Erdgeschossräumen befinden.

Die Bundesländer sind verpflichtet, Gebiete mit hohem Radonvorkommen als sogenannte Radonvorsorgegebiete auszuweisen. Das sind Gebiete in denen erwartet wird, dass die über das Jahr gemittelte Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Luft in einer beträchtlichen Anzahl von Gebäuden den Referenzwert überschreitet. Die Ausweisung soll dabei auf Grundlage einer wissenschaftlich basierten Methode und unter Verwendung von geeigneten Daten erfolgen.

In dem vorliegenden Heft sollen die wissenschaftlichen Hintergründe sowie die Datengrundlagen für die Ausweisung der Radonvorsorgegebiete im Freistaat Sachsen umfassend dargelegt und diskutiert werden.

2 Gesetzliche Grundlagen

Nach § 121 Absatz 1 STRLSCHG hat die zuständige Behörde durch Allgemeinverfügung innerhalb von 2 Jahren nach Inkrafttreten einer Rechtsverordnung nach § 121 Absatz 2 STRLSCHG Gebiete festzulegen, für die erwartet wird, dass die über das Jahr gemittelte Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Luft in einer beträchtlichen Anzahl von Gebäuden mit Aufenthaltsräumen oder Arbeitsplätzen den Referenzwert nach § 124 bzw. § 126 des STRLSCHG von 300 Becquerel pro Kubikmeter (Bq/m^3) überschreitet.

Im Freistaat Sachsen ist nach § 2 des SÄCHSISCHEN ATOM- UND STRAHLENSCHUTZAUSFÜHRUNGSGESETZES vom 2. August 2019 die zuständige Behörde für die Festlegung der Gebiete nach § 121 STRLSCHG das Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG).

Die Rechtsverordnung nach § 121 Absatz 2 STRLSCHG ist am 31.12.2018 in Kraft getreten, damit sind von der zuständigen Behörde bis 31. Dezember 2020 die Gebiete nach § 121 Absatz 1 STRLSCHG per Allgemeinverfügung festzulegen.

In § 153 STRLSCHV sind die grundlegenden Regeln zur Festlegung der Gebiete nach § 121 Absatz 1 STRLSCHG konkretisiert. Die Ausweisung der Gebiete hat auf Grundlage einer wissenschaftlich basierten Methode zu erfolgen,

die unter Zugrundelegung geeigneter Daten Vorhersagen hinsichtlich der Überschreitung des Referenzwertes nach § 124 oder § 126 des STRLSCHG in der Luft von Aufenthaltsräumen oder Arbeitsplätzen in Innenräumen ermöglicht. Als geeignete Daten nach § 153 STRLSCHV gelten insbesondere geologische Daten, Messdaten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft, Messdaten der Bodenpermeabilität, Messdaten zur Radon-222-Aktivitätskonzentration in Aufenthaltsräumen oder an Arbeitsplätzen in Innenräumen sowie Fernerkundungsdaten.

Die zuständige Behörde kann nach § 153 Absatz 2 STRLSCHV von einer Überschreitung des Referenzwertes nach § 124 bzw. § 126 STRLSCHG der Jahresmittelwerte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in einer beträchtlichen Anzahl von Gebäuden in der Luft in Aufenthaltsräumen oder an Arbeitsplätzen ausgehen, wenn auf mindestens 75 Prozent des auszuweisenden Gebietes in mindestens 10 Prozent der Gebäude eine Überschreitung des Referenzwertes erwartet wird.

Die Ausweisung der Gebiete hat nach § 153 Absatz 3 STRLSCHV innerhalb der in dem Land bestehenden Verwaltungsgrenzen zu erfolgen¹.

Die erforderlichen Daten für die Festlegung der Gebiete nach § 121 Absatz 1 Satz 1 des STRLSCHG sowie zur Überprüfung der Gebietsfestlegung nach § 121 Absatz 1 Satz 3 STRLSCHG sind laut § 153 Absatz 4 STRLSCHV von der zuständigen Behörde zu erheben. Hierfür sind die erforderlichen Messungen und Probenahmen durchzuführen oder vorhandene Daten hinzuzuziehen.

3 Methodik des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) nach Bossew (2018)

Vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) wurde im Jahre 2018 im Hinblick auf die Ausweisung der Gebiete nach § 121 STRLSCHG ein Bericht zur Prognose des geogenen Radonpotentials in Deutschland und der Ableitung eines Schwellenwertes zur Ausweisung von Radonvorsorgegebieten veröffentlicht (BOSSEW, 2018). In dieser Publikation wurde das Verfahren beschrieben, mit der die Erstellung der deutschlandweiten Prognosekarte des geogenen Radonpotentials erfolgte. Die räumliche Verteilung des Radonpotentials wurde dabei mittels geostatistischer Methoden an vorhandenen Messdaten errechnet. Außerdem wurde das Vorgehen zur Ermittlung eines Schwellenwertes des Radonpotentials vorgestellt, dessen Überschreitung eine Ausweisung eines Gebietes nach § 121 STRLSCHG bzw. nach § 153 STRLSCHV kennzeichnet. Dieses Verfahren stellt ein mögliches wissenschaftlich basiertes Vorgehen dar, welches die gesetzlichen Anforderungen zur Festlegung dieser Gebiete nach der STRLSCHV erfüllt und wird in diesem Kapitel näher beschrieben.

Bundesweit beträgt die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit der Überschreitung des Referenzwertes 3 % (BOSSEW, 2018). Nach der STRLSCHV kann von einer Überschreitung des Referenzwertes der Radon-222-Aktivitätskonzentration von 300 Bq/m³ in einer beträchtlichen Anzahl von Gebäuden in der Luft in Aufenthaltsräumen oder Arbeitsplätzen ausgegangen werden, wenn nach der Prognose nach § 153 Absatz 1 STRLSCHV auf mindestens 75 % der Fläche des Gebietes in mindestens 10 % der Anzahl der Gebäude der Referenzwert überschritten wird. Dies entspricht also in etwa der dreifachen Wahrscheinlichkeit der Überschreitung des Referenzwertes im Vergleich zum bundesweiten Durchschnitt und führt zur Ausweisung als Radonvorsorgegebiet.

Bei der Prognose zur Ausweisung der Gebiete sollen die Klassifizierungsfehler der 1. Art (Gebiet wird ausgewiesen obwohl es keines ist) sowie der 2. Art (Gebiet wird nicht ausgewiesen, obwohl es eines ist) dabei maximal 10 % betragen (BOSSEW, 2018). Da beide Fehlerarten voneinander abhängig sind, führt diese Forderung zu einer trinomialen Klassifizierung, d. h. neben auszuweisenden Gebieten und nicht-auszuweisenden Gebieten wird daher

¹ im BEGRÜNDUNGSTEXT ZUR STRLSCHV sind hier "Verwaltungseinheiten" genannt.

in der Publikation des BfS (BOSSEW, 2018) eine weitere Klasse als nach den Kriterien und gemäß der Datenlage „nicht-entscheidbar“ klassifiziert. In der in dem Bericht veröffentlichten Karte der Prognose der Verteilung des Radonpotentials in Deutschland wird auf Grund der begrenzten Qualität und Quantität der vorhandenen Daten eine Rasterauflösung von 10 x 10 km vertreten. Es lagen für ganz Deutschland ca. 60.000 Messwerte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Innenraumluft vor, die aus Daten verschiedener Projekte und sonstiger Quellen bestanden.

Die Radonkonzentration in einem Innenraum hängt neben dem geogenen Radonpotential stark von den Eigenschaften des Gebäudes sowie der Lage und Nutzung des Raumes ab. Daher wurde vom Bundesamt für Strahlenschutz eine Referenzsituation für die Prognose von Überschreitungswahrscheinlichkeiten des Referenzwertes definiert, die sich auf einen Aufenthaltsraum im Erdgeschoss eines voll-unterkellerten Massivhauses bezieht. Der für die Ableitung des Schwellenwertes zur Ausweisung der Gebiete nach § 121 STRLSCHG verwendete Datensatz in diesem Bericht wurde daher gefiltert oder mittels einer Modellierung an die Referenzsituation angepasst und auf 15.563 Messwerte mit genauen Koordinaten bereinigt. Die Modellierung der Daten erfolgte anhand einer Skalierung von Messdaten aus höheren Etagen, die auf der in Deutschland üblichen Verteilung der Konzentrationsverhältnisse zwischen Erd- und Obergeschossdaten basierte (BOSSEW, 2018).

Außerdem wurden Messwerte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft von 3741 Orten im gesamten Bundesgebiet verwendet (BOSSEW, 2018). Die Messungen dazu erfolgten im Rahmen der Erarbeitung der Prognosekarte der Radonkonzentration in der Bodenluft. Für die Erstellung der Karte zur Prognose der Verteilung des Radonpotentials in Deutschland mit Schwellenwerten entsprechend der Kriterien zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete wurde statt der Aktivitätskonzentration in der Bodenluft das Radonpotential RP zur Modellierung herangezogen (vgl. Gleichung 1).

$$RP = \frac{C}{-\log_{10} k - 10} \quad (1)$$

RP = Radonpotential

C = Radonkonzentration in der Bodenluft in Kilo-Becquerel pro Kubikmeter (kBq/m³)

k = Gaspermeabilität des Bodens in Quadratmeter (m²)

Das Radonpotential berücksichtigt demnach neben der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft die Gasdurchlässigkeit des jeweiligen Untergrundes. Zur Bestimmung des Radonpotentials RP wurden die Messungen der Gaspermeabilität an den Messorten parallel zu den Messungen der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft durchgeführt.

Für die Erstellung der Karte der Prognose des geogenen Radonpotentials in Deutschland (BOSSEW, 2018) wurden den ermittelten Werten des Radonpotentials geologische Klassen zugeordnet. Dafür wurden die geologischen Einheiten gemäß der Geologischen Karte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1:1.000.000 (GK 1000) anhand der Verteilung des Radonpotentials klassifiziert. Die Werte des Radonpotentials wurden durch Division durch das geometrische Mittel aller vorhandenen Werte der gleichen geologischen Einheit normalisiert. Mit Hilfe geostatistischer Methoden erfolgte eine räumliche Interpolation der Daten zur Schätzung der deutschlandweiten Verteilung des Radonpotentials. Zur Ableitung eines Schwellenwertes, oberhalb dessen ein Gebiet sicher nach § 121 Absatz 1 STRLSCHG auszuweisen ist, wurde die prognostizierte räumliche Verteilung des Radonpotentials mit den Daten der Radonkonzentration in Innenräumen verknüpft. Dies führte zur Bestimmung eines Schwellenwertes von RP ~ 44 als untere Schwelle für ein nach § 121 STRLSCHG sicher auszuweisendes Gebiet mit einer Fehlerklassifizierungsrate < 10 %. Bei einem RP < 20 kann mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % davon ausgegangen werden, dass die Kriterien für eine Ausweisung des Gebietes nach § 121 STRLSCHG nicht erfüllt werden. Bei RP > 20 < 44 kann das BfS-Modell keine gesicherte Aussage treffen, ob die Wahrscheinlichkeit der Über-

schreitung des Referenzwertes in mehr als 10 % der Gebäude vorliegt, hier sind nach BOSSEW (2018) weitergehende Untersuchungen und Datenerhebungen erforderlich.

4 Methodik der Ausweisung der Radonvorsorgegebiete in Sachsen

Im Freistaat Sachsen liegen weitere umfangreiche Datenerhebungen zur Charakterisierung der Radonsituation vor. Unterschiedliche Messprogramme führten zu einer Verdichtung der Datenlage zur Radon-222-Aktivitätskonzentration sowohl in der Bodenluft als auch in Innenräumen. Im folgenden Kapitel wird die Datengrundlage dargelegt und die angewandte Vorgehensweise der Ausweisung der Radonvorsorgegebiete in Sachsen beschrieben, die in Anlehnung an die Methodik des BfS (BOSSEW, 2018) erfolgte. Die Datenlage rechtfertigt dabei sowohl eine verfeinerte Auflösung der Karte als auch eine Ausweisung der Radonvorsorgegebiete auf Gemeindeebene.

4.1 Geologische Klassifizierung für den Freistaat Sachsen

Für die Ausweisung der Radonvorsorgegebiete im Freistaat Sachsen erfolgte im ersten Schritt eine geologische Klassifizierung. Die Grundlage der Betrachtung der geologischen Einheiten bildete die blattschnittfreie Geologische Karte im Maßstab 1:200.000 (GK 200) des Freistaates Sachsen. Im Rahmen des Projektes „Neuberechnung der Karte der Radonkonzentration in der Bodenluft für das Territorium des Freistaates Sachsen“, welches durch die Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft in Auftrag gegeben wurde, entstand eine vereinfachte Version der GK 200 („GK 200 vereinfacht“, Abbildung 1), die sich an der vereinfachten Version der Geologischen Karte im Maßstab 1:400.000 (GK 400) des Freistaates Sachsen orientierte. Für die "GK 200 vereinfacht" wurden die 90 geologischen Einheiten der GK 200 in Zusammenarbeit mit dem Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) unter dem Gesichtspunkt des geogenen Radonpotentials zu 30 Einheiten zusammengefasst (KEMSKI, 2010).

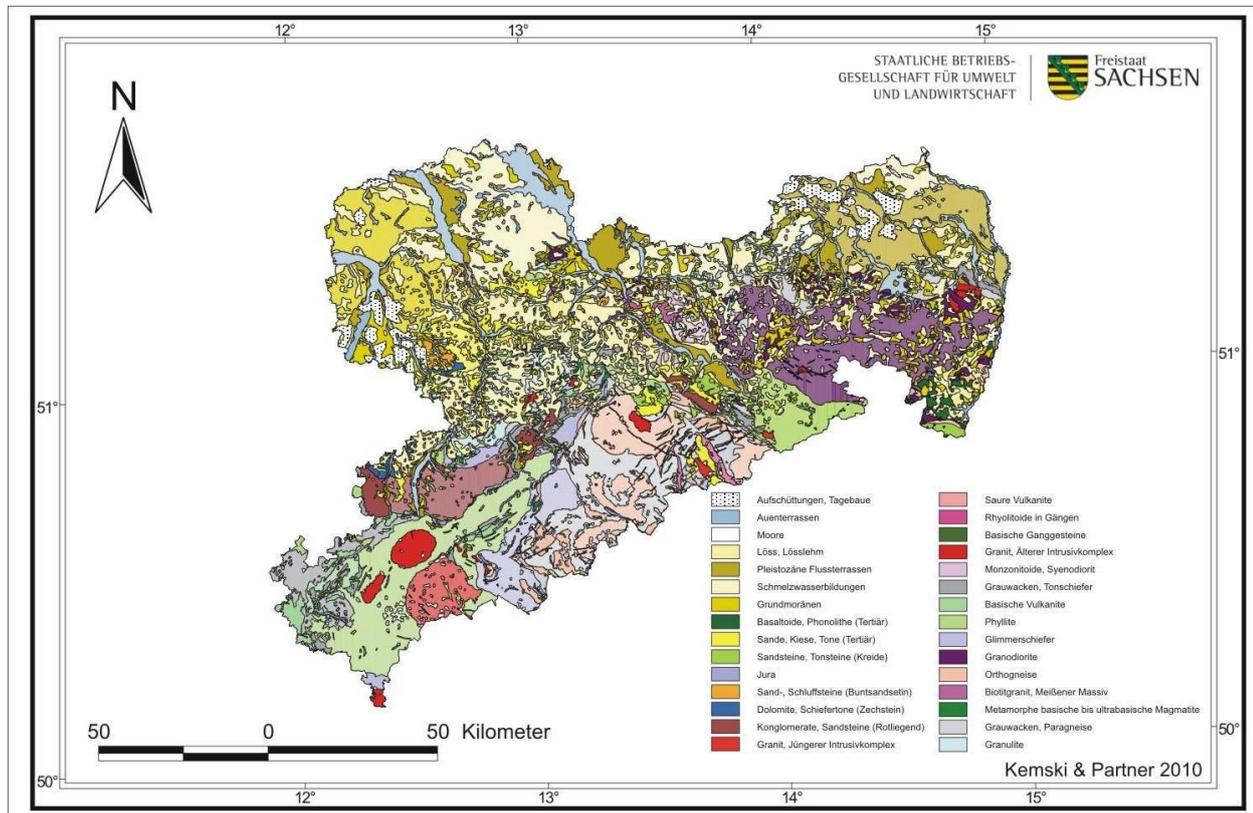


Abbildung 1: Zusammenfassung der GK 200 zu 30 geologischen Einheiten in der vereinfachten Geologischen Karte "GK 200 vereinfacht"; KEMSKI (2010).

Im Zuge der Betrachtung der vereinfachten geologischen Karten und der gewonnenen Daten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft im Hinblick auf die im Freistaat Sachsen angewendete Methodik zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete wurden zwei geologische Einheiten reklassifiziert und dabei wieder in getrennte Einheiten aufgespalten. Die geologische Einheit „Saure Vulkanite“ wies eine ungewöhnliche Verteilung der Messwerte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft auf. Es zeigten sich zwei Cluster, eines im niedrigen und eines im hohen Aktivitätskonzentrationsbereich. Es konnte eine Korrelation der unterschiedlichen Aktivitätskonzentrationsniveaus mit den ursprünglichen geologischen Einheiten, die zur geologischen Einheit „Saure Vulkanite“ zusammengefasst wurden, erkannt werden. Die Messwerte im südlichen Vorkommensgebiet sind generell höher als die im nordwestlichen Vorkommensgebiet. Daher wurde die geologische Einheit „saure Vulkanite“ in die beiden auch geografisch getrennten geologischen Einheiten „Saure Vulkanite mit hohem Tuffanteil“ und "Saure Vulkanite mit niedrigem Tuffanteil“ aufgespalten (Abbildung 2).

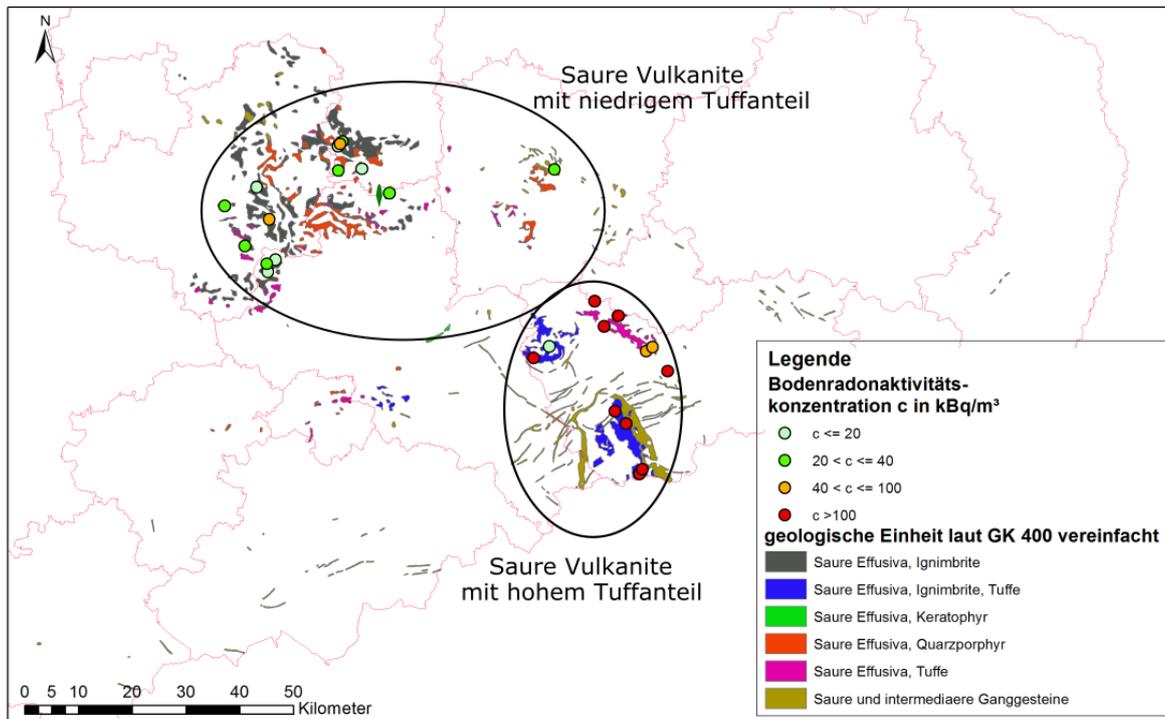


Abbildung 2: Ursprüngliche geologische Einheiten (GK 200), die zu den geologischen Einheiten "Saure Vulkanite" zusammengefasst wurden ("GK 200 vereinfacht", 2010). Die Reklassifizierung trennt diese geologische Einheit wieder in die geografisch getrennten Teile "Saure Vulkanite mit hohem Tuffanteil" bzw. "Saure Vulkanite mit niedrigem Tuffanteil".

Bei der geologischen Einheit „Aufschüttungen / Tagebaue“ aus der vereinfachten Geologischen Karte "GK 200 vereinfacht" erfolgte ebenfalls eine Reklassifizierung in Anlehnung an die ursprüngliche Karte GK 200, auch hier wurde eine Aufspaltung vorgenommen in die Einheiten „Tagebau, verfüllt“ und „Künstliche Aufschüttungen“ (Abbildung 3). Beide geologische Einheiten unterscheiden sich in der Fläche, die ein einzelnes Objekt einnimmt, außerdem in der vertikalen Umlagerung des Materials sowie in einer unterschiedlichen Bebauungsdichte. Die geologische Einheit "Tagebau, verfüllt" umfasst eine deutlich größere Fläche im Vergleich zu der Einheit "Künstliche Aufschüttungen" und ist auch aufgrund der verfüllten Restlöcher als unauffällig in Bezug auf die Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft einzuschätzen. Dagegen sind in der geologischen Einheit "Künstliche Aufschüttungen" in größerem Umfang Stoffe aus unterirdischem Bergbau abgelagert, die potentiell einen höheren Urananteil aufweisen.

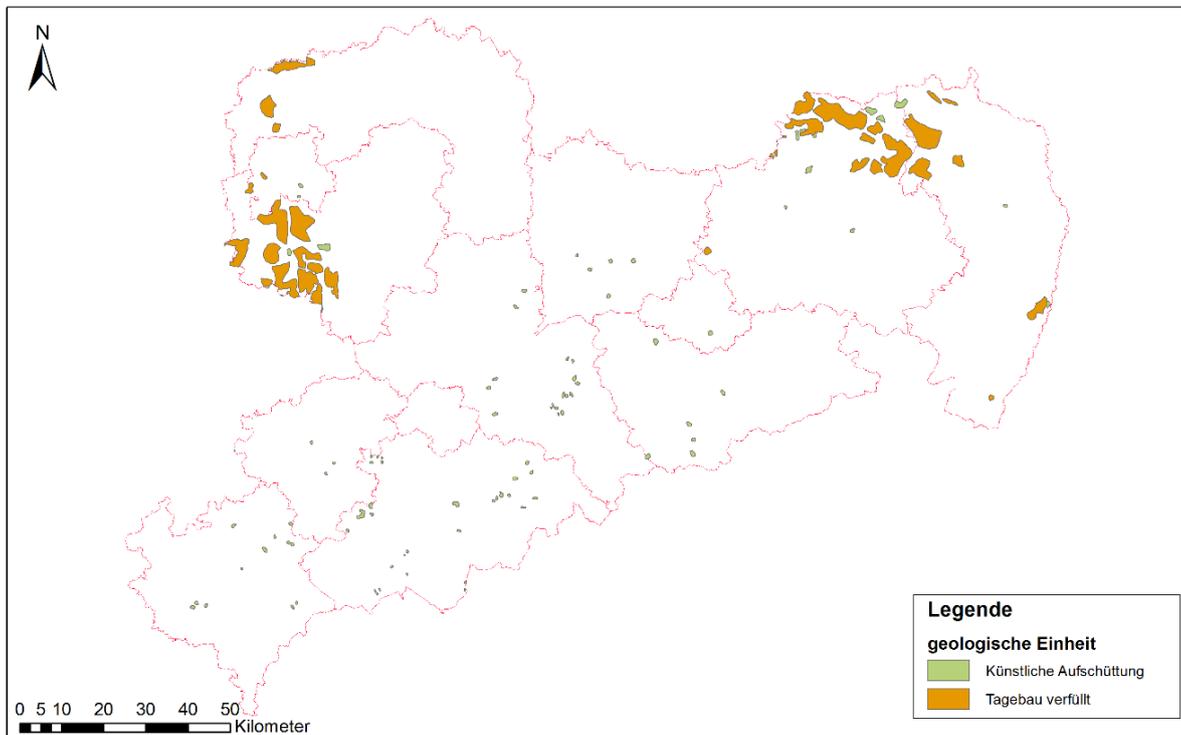


Abbildung 3: Ursprüngliche geologische Einheiten (GK 200), die zur geologischen Einheit "Aufschüttungen / Tagebaue" zusammengefasst wurden (GK 200 vereinfacht, Kemski 2010). Die Reklassifizierung führte wieder zu einer getrennten Betrachtung dieser beiden geologischen Einheiten.

Im Freistaat Sachsen dient demnach als Grundlage für die Ausweisung der Radonvorsorgegebiete die geologische Klassifizierung des Territoriums des Freistaates Sachsen in 32 geologische Einheiten in Anlehnung an die vereinfachte Geologische Karte "GK 200 vereinfacht". Eine zusammenfassende Tabelle zu den Zuordnungen der geologischen Einheiten der originalen GK 200 im Vergleich zu der vereinfachten und reklassifizierten Version befindet sich im Anhang in der Tabelle 9.

4.2 Radon in der Bodenluft

Radon-222 bildet sich als Folgeprodukt durch den radioaktiven Zerfall von Uran-238 im Boden. Die Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft hängt somit direkt mit dem Gehalt von Uran-238 im Boden zusammen. Der Übergang von Radon-222 aus dem Festgestein, in welchem es gebildet wird, in die umgebende Bodenluft wird als Emanation bezeichnet. Hierbei können Radon-222-Aktivitätskonzentrationen in der Bodenluft von wenigen 1.000 Bq/m^3 bis weit über mehrere 100.000 Bq/m^3 auftreten. Die Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft ist neben dem Urangehalt außerdem von weiteren vorliegenden bodenspezifischen Parametern, wie z. B. der Korngrößenverteilung abhängig. Das gebildete Radon-222 wird zum Teil aufgrund von Druck- und Konzentrationsunterschieden an die äußere Umgebung (Außenluft oder Innenraumluft) abgegeben. Der restliche Teil des Radon-222 zerfällt im Boden und verbleibt dort in Form der festen Folgeprodukte.

Die Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft stellt neben der Bauweise sowie den Lüftungs- bzw. Nutzungsbedingungen eines Gebäudes einen bedeutenden Einflussfaktor auf die Radonkonzentration in Innenräumen dar. Daher sind unter anderem die Messdaten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft nach § 153 STRLSCHV als geeignete Werte für die Vorhersagen zur Überschreitung des Referenzwertes nach § 124 und § 126 STRLSCHG anzusehen.

4.2.1 Verfahren zur Messung der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft

Die Bestimmung der in der Bodenluft vorhandenen Radon-222-Aktivitätskonzentration kann über verschiedene Messverfahren erfolgen. Die Absaugung der radonhaltigen Bodenluft über eine in das Erdreich eingebrachte Sonde und die Bestimmung der Radon-222-Aktivitätskonzentration in dieser Probe ist ein mögliches Verfahren. Diese Bestimmungsmethode wurde zum Beispiel für die Erstellung der Deutschlandkarte "Prognose der Radonkonzentration in der Bodenluft in einem Meter Tiefe" des Bundesamtes für Strahlenschutz (KEMSKI, 2004b; BFS, 2020) und darauf aufbauend auch zum Zwecke der Datengewinnung für die Erstellung der sächsischen Karte der "Erwartungswerte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft im 1 x 1 km-Raster" genutzt. Das Verfahren ist in der Veröffentlichung von KEMSKI (2002) ausführlich beschrieben und soll im Folgenden nur kurz erläutert werden.

Zu Beginn der Messprogramme zur Bestimmung der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft werden Flächen für die Beprobung selektiert, welche sowohl die gewünschte geologische Einheit aufweisen und zudem eine ausreichend große Beprobungsfläche vorweisen können. Ein Messpunkt besteht aus drei Bohrungen, die dreiecksförmig entsprechend Abbildung 4 angeordnet werden. Die Bohrungen werden bis zu einer Tiefe von 1 m unter Geländeoberkante abgeteuft. Die Absaugung der Bodenluft aus höheren Bodenschichten ist nicht zielführend, da die Bodenluft in diesem Bereich starken meteorologischen Schwankungen unterliegt.

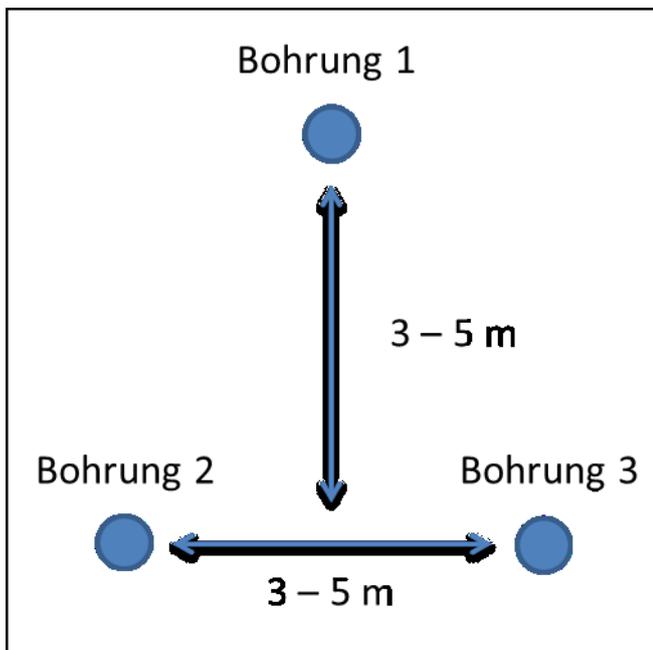


Abbildung 4: Anordnung der Bohrungen zur Entnahme der Bodenluft an einem Messpunkt (nach KEMSKI, 2002).

Der Probenahmeaufbau ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt. Die Packer-Sonde wird in das Bohrloch eingebracht und die radonhaltige Bodenluft hin zur Lucas-Zelle abgesaugt. Je Bohrung werden nach KEMSKI (2002) drei Lucas-Zellen befüllt. Somit werden an jedem Messpunkt 9 Proben der Bodenluft gewonnen. Des Weiteren werden an jedem Messpunkt die Umgebungsparameter wie Luftdruck, Niederschlag, Bodenfeuchte und Gaspermeabilität bestimmt. Die Auswertung der Lucas-Zellen erfolgt im Labor mittels eines Szintillationszählers. Aus den Ergebnissen der drei Lucas-Zellen eines Bohrloches wird der Mittelwert bestimmt. Der Maximalwert der drei Bohrungen wird dem jeweiligen Messpunkt zugeordnet.

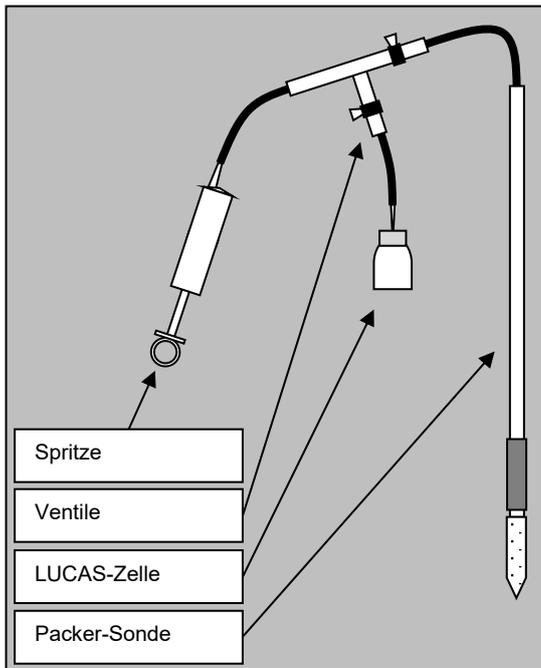


Abbildung 5: Schematischer Aufbau der Probenahmeeinrichtung zur Absaugung der Bodenluft in Lucas-Zellen.

Bei der Probenahme der Bodenluft kann ebenfalls die Gaspermeabilität im Boden bestimmt werden. Dies erfolgt über den Anschluss der Packersonde an ein Gaspermeameter. Das Permeameter sowie die Packer-Sonde werden dabei mit einem vordefinierten Druck von Druckluft durchströmt. Je nach Beschaffenheit des Bodens stellt sich ein Durchfluss ein, der am Permeameter abgelesen werden kann. Anhand des ermittelten Durchflusses kann dann die Permeabilität errechnet werden (KEMSKI, 2010).

4.2.2 Vorliegende Daten zur Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft

Dem Freistaat Sachsen liegen Messwerte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft zu ca. 1000 Messpunkten vor, welche im Rahmen verschiedener Messprogramme gewonnen wurden. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Messprogramme und die dabei erfassten Daten.

Tabelle 1: Übersicht über die Datenbestände aus verschiedenen Messprogrammen des Freistaates Sachsen zur Messung der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft.

Messprogramm	Projekt	Messmethode	Anzahl Messpunkte
Bodenradondaten zur Bodenradonkarte Sachsen	Erstellung einer Bodenradonkarte für Sachsen	Lucas-Zellen	981
Sonderprogramm "Arzberg"	Prüfung eines isolierten hohen Messwertes	Lucas-Zellen	5
Bodenradonvergleichsfläche	Durchführung von Vergleichsmessungen	Verschiedene	~ 20 (mit 472 Messwerten)

Die größte Datenmenge hinsichtlich der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft wurde im Rahmen der Erstellung der sächsischen Karte der Erwartungswerte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft gewonnen. Ziel des Projektes war es, eine Prognosekarte zu erstellen, die auf den geologischen Gegebenheiten sowie auf der gemessenen Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft in 1 m Tiefe beruht. Dafür wurden neben den bereits vorhandenen 373 Messpunkten, die im Rahmen eines Forschungsprojektes des Bundes zur Erstellung einer Deutschlandkarte zur Radon-Konzentration im Boden untersucht wurden, 697 weitere Messungen der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft durch die Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL) durchgeführt. Nach der Filterung dieser Daten hinsichtlich ihrer Plausibilität und der Lage der Messpunkte wurden insgesamt 981 verwertbare Datensätze für die Erstellung der Bodenradonkarte Sachsens erhalten. Die Messungen erfolgten mittels Lucas-Zellen entsprechend des im Kapitel 4.2.1 dargestellten Ablaufs. Dabei wurde gleichzeitig die Bestimmung der Gaspermeabilität an 570 der beprobten Messpunkte durchgeführt.

Die gesamten Messpunkte aus dem Messprogramm sind in der Abbildung 6 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Messungen räumlich über das Territorium des gesamten Freistaates Sachsen verteilt durchgeführt wurden, und auch einige Daten von Messpunkten aus Thüringen und Bayern als zusätzliche Stützpunkte zur Verfügung stehen. Eine besonders hohe Messpunktdichte wurde in den Bereichen des Erzgebirges, Chemnitz, dem Vogtland, sowie der Region um Dresden und der Sächsischen Schweiz erreicht. Die Auswahl der Messorte erfolgte zunächst nach geologischen Gesichtspunkten; bei den Messungen zur Verdichtung der Datenlage zur Erstellung der sächsischen Karte der Erwartungswerte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft erfolgte die Auswahl gemeindebezogen und konzentrierte sich auf Messorte, in denen die Datenlage als unsicher angesehen wurde (KEMSKI, 2010).

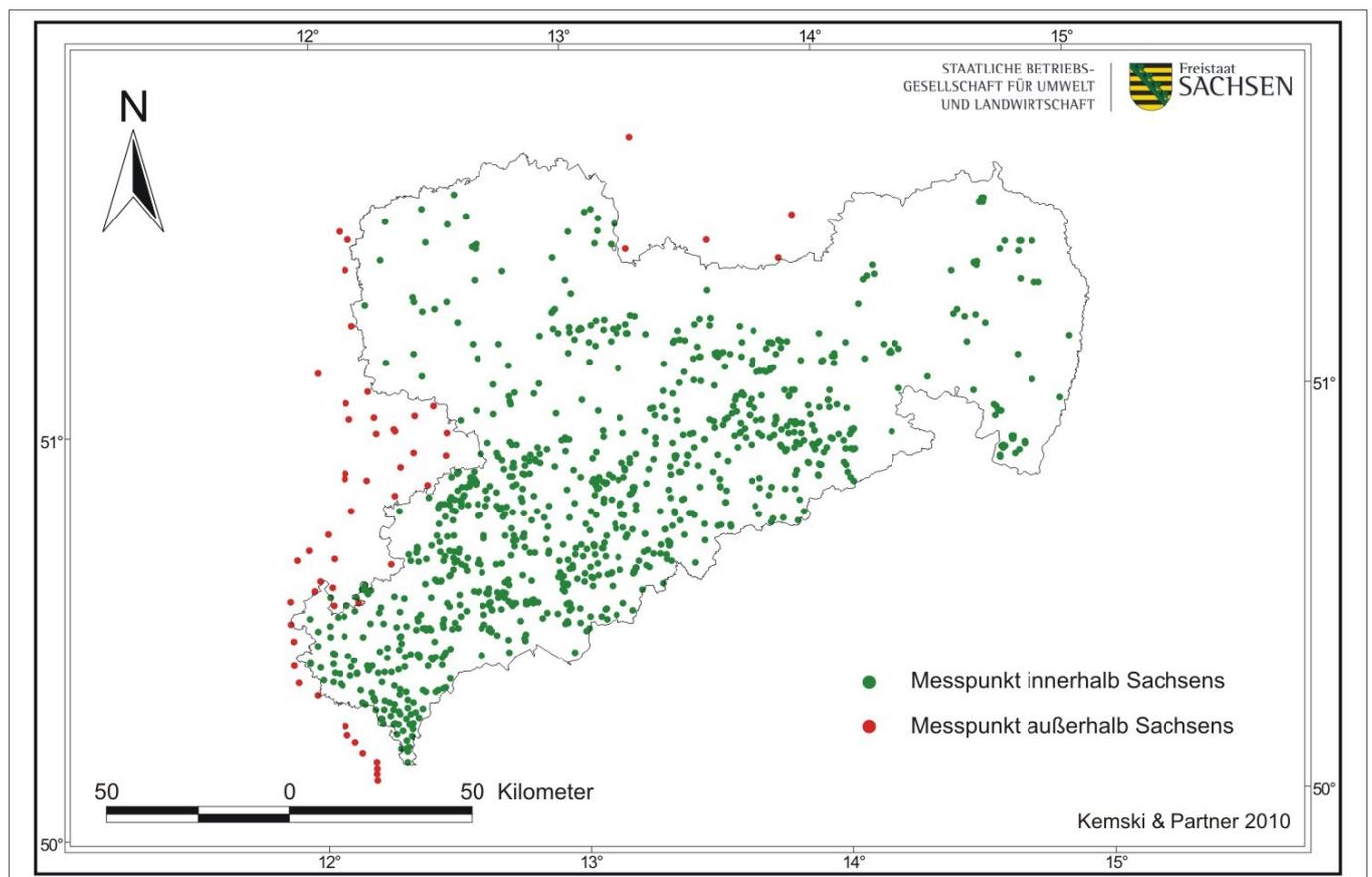


Abbildung 6: Messpunkte für Messungen der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft im Freistaat Sachsen im Rahmen des Messprogrammes zur Erstellung der Bodenradonkarte; KEMSKI (2010).

Im Sondermessprogramm „Arzberg“ wurde zusätzlich durch fünf weitere Messungen der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft mittels Lucas-Zellen die Dichte der Messwerte in dieser nordsächsischen Gemeinde erhöht, da hier bei der Auswertung der Daten im Rahmen der Erstellung der Bodenradonkarte für das Territorium

des Freistaates Sachsen eine spezielle Eigenart der abstandsgewichteten Interpolation sichtbar wurde. Bei diesem Berechnungsmodell, welches für die Erstellung der Karte verwendet wurde, kann in Einzelfällen, in denen nur eine geringe Anzahl von Messwerten vorliegt, ein Messwert zu einem unerwünscht hohen Einfluss innerhalb des Rasters führen, auch wenn dieser Messwert im Rahmen der für diese geologische Einheit erwarteten Spannweite liegt. Eine Erhöhung der Messpunktdichte vermindert dagegen die Gefahr, dass sich einzelne herausragende gemessene Minima oder Maxima der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft scheinbar in die benachbarten Flächen ausbreiten.

Des Weiteren liegen noch Messungen der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft von einer Bodenradonvergleichsfläche vor, an welcher Bodenradonmessungen u. a. durch unterschiedliche Institutionen und zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt wurden.

Somit stehen im Freistaat Sachsen zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete die erhobenen Daten aus dem Messprogramm "Bodenradon zur Bodenradonkarte Sachsen" als Datenbasis zur Verfügung. Die Ergebnisse der beiden Messprogramme "Sonderprogramm Arzberg" und "Bodenradonvergleichsfläche" dienen vor allem der Verifizierung der im Rahmen des Messprogramms zur Erstellung der sächsischen Bodenradonkarte gewonnenen Daten und liefern wertvolle Erkenntnisse und Erfahrungen im Bezug auf die Messungen der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft und auch der Vergleichbarkeit der verschiedenen Messmethoden.

4.3 Radon in Innenräumen

4.3.1 Verfahren zur Messung der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen

Langzeitmessungen der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen werden in der Regel mit Exposimetern mit Kernspurdetektoren durchgeführt. Der Detektor ist ein strahlungsempfindlicher Kunststoff-Chip oder eine Folie und befindet sich in einem Kunststoffgehäuse (Abbildung 7). Die radonhaltige Luft diffundiert durch die Gehäusewand in das Innere der Messkammer, während die an Staubpartikel gelagerten Radonfolgeprodukte zurückgehalten werden. Die vom Radon und seinen Folgeprodukten beim radioaktiven Zerfall im Inneren der Messkammer ausgesandten Alphateilchen zerstören einen Teil der chemischen Bindungen des Detektormaterials. In einem Ätzbad löst sich der Kunststoff allmählich auf, was an den Auftreffstellen der Alphateilchen besonders schnell geht. Es entstehen Spuren, die sich mit dem Mikroskop erkennen und mit Bildanalyseverfahren zählen lassen. Ihre Anzahl ist ein Maß für die mittlere Radon-222-Aktivitätskonzentration während des Messzeitraums.



Abbildung 7: Exposimeter mit Kernspurdetektor.

Die Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Raumluft ist gekennzeichnet durch deutliche tageszeit- und witterungsabhängige sowie insbesondere saisonale Schwankungen. Langzeitmessungen mit Exposimetern sind kostengünstig und einfach durchführbar und geben die tatsächliche, im Mittel vorherrschende Radonbelastung über einen bestimmten Zeitraum wieder. Durchgeführt als Jahresmittelwertmessung ist ein Vergleich mit dem gesetzlichen Referenzwert als Entscheidungsgrundlage für Maßnahmen möglich. Für die Gebietsausweisung nach § 121 STRLSCHG werden Messergebnisse der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen neben weiteren möglichen Daten als geeignete Werte zur Vorhersage der Überschreitung des Referenzwertes nach § 124 und § 126 STRLSCHG erachtet.

4.3.2 Vorliegende und verwendete Daten zur Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen

Für die Durchführung von Radon-222-Aktivitätsmessungen in der Raumluft gab es mit Ausnahme von Messungen an Arbeitsplätzen in bestimmten Arbeitsfeldern nach der alten Strahlenschutzgesetzgebung keinen verpflichtenden rechtlichen Rahmen. Die Teilnahme an Projekten und Messprogrammen des Freistaates Sachsen zur Schaffung einer Datenbasis für die Einschätzung der Radonwerte in Gebäuden erfolgte daher auf freiwilliger Basis. Die Messprogramme richteten sich an staatliche und kommunale Eigentümer bzw. Träger von Gebäuden und Einrichtungen bzw. an Eigentümer und Nutzer von Wohngebäuden.

Im Rahmen der sächsischen Messprogramme zur Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Innenraumluft wurden im Vorfeld der Messungen in unterschiedlichem Umfang Informationen zu Bauweise und Nutzung der untersuchten Gebäude anhand standardisierter Fragebögen erhoben. Die Anzahl der zur Verfügung gestellten Exposimeter für die Räume eines Gebäudes ergab sich dabei aus den Angaben in entsprechenden Gebäudefragebögen sowie einem festgelegten Verteilungsschlüssel, der eine optimale Einschätzung des Gebäudes gewährleistete, bzw. aus den Zielstellungen der jeweiligen Projekte. Den Teilnehmern wurden die Messgeräte mit entsprechenden Vorgaben u. a. zur Verteilung im Gebäude und zur Positionierung im Raum zur Verfügung gestellt. Die Exposimeter wurden in der Regel durch die Teilnehmer selbst ausgelegt, nach Ende der Messzeit zurückgeschickt und in den Laboren der Messgeräteanbieter ausgewertet. Grundsätzlich kommen bei den aktuellen Messungen im Rahmen der Messprogramme des Freistaates Sachsen ausschließlich Messgeräte einer akkreditierten und vom Bundesamt für Strahlenschutz nach § 155 Absatz 4 STRLSCHV anerkannten Stelle zum Einsatz. Zum Zeitpunkt der Messungen zur Erstellung der Karte "Prognose zur Radonbetroffenheit von Gebäuden in Sachsen – Kartierung der Überschreitungswahrscheinlichkeit von Referenzwerten" (Projekt Nr. 1 in der Tabelle 2) existierten noch keine

dieser vom Bundesamt für Strahlenschutz anerkannten Stellen, diese Daten wurden vom BfS bzw. von den Auftragnehmern der sächsischen Behörden mit vergleichbaren Messverfahren und einer ähnlichen Qualitätssicherung erhoben (KEMSKI, 2011).

Die Tabelle 2 gibt einen Überblick über die zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete verwendete Datengrundlage zur Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen von Gebäuden aus verschiedenen Projekten und Messprogrammen des Freistaates Sachsen.

Tabelle 2: Übersicht über die Datenbestände aus verschiedenen Messprogrammen des Freistaates Sachsen zur Messung der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen.

Nr.	Projekt/ Messprogramm	Anlass/ Zielstellung	Zeitraum der Daten- gewinnun- g	Daten- erhebung durch	Gesamte Anzahl der Exposimeter- Datensätze	Davon Anteile gefilterter Datensätze
1	Prognose zur Radonbetroffenheit von Gebäuden in Sachsen – Kartierung der Überschreitungswahrscheinlichkeit von Referenzwerten	Zusammenfassung verschiedener Messprogramme zur Darstellung von Überschreitungshäufigkeiten von Innenraumkonzentrationen	1991 - 2005	BfS, BfUL, Auftragnehmer sächsischer Behörden	5788	3506 ¹
						1a) 586 ²
						1b) 969 ³
2	Radonmessungen in 44 Häusern (vollständige Datensätze)	Ermittlung möglichst vollständiger Datensätze zur Beurteilung der Radonsituation in einem Gebäude und ihrem Zustandekommen infolge des Radonpotentials im Untergrund, der durch das Gebäude gegebenen Einflussfaktoren und der Gebäudenutzung	2009 - 2016	BfUL	283	80 ¹
						2a) 24 ²
3	Radonmessungen in Gebieten über unterirdischen Hohlräumen	Erfassung der Radonsituation in Wohngebäuden, die sich in Gebieten über natürlichen oder bergbaulich verursachten Hohlräumen befinden	ab 2017	BfUL	560 (Stand 26.07.2020)	215 ¹
						3a) 80 ²
4	Radonmessungen in öffentlichen Gebäuden	Erfassung der Radonsituation in Sachsen sowie zur Erweiterung der Datenbasis	ab 2012	BfUL	60 (Stand 27.07.2020)	46 ¹
						43 ⁴
5	Radonmessungen in Schulen und anderen Erziehungs- und Bildungseinrichtungen	Erfassung der Radonsituation in Sachsen und Erweiterung der Datenbasis vor der Einführung des StrlSchG	ab 2015, vereinzelt schon vorher	BfUL	3133 (Stand 05.05.2020)	2510 ¹
						1639 ⁴
6	Radonmessungen an Arbeitsplätzen	Ausmessung der Dienststellen der dem Sächsischen Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft nachgeordneten Behörden, da diese Arbeitsplätze geeignete Objekte zur flächenhaften Übersichtsmessung darstellen;	ab 2017	BfUL	382 (Stand 27.07.2020)	323 ¹
						273 ⁴

¹ aus Gesamtdatensatz gefilterte Datensätze aus Räumen in Kellern oder Erdgeschossen

² aus Gesamtdatensatz gefilterte Daten aus Räumen im Erdgeschoss voll-unterkellertes "kleiner" Häuser

³ aus Gesamtdatensatz gefilterte Daten aus Kellerräumen

⁴ aus Gesamtdatensatz gefilterte Daten aus Räumen im Erdgeschoss

Den umfangreichsten Datensatz an Messungen zur Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Innenraumluft stellen die Daten aus dem Projekt „Prognose zur Radonbetroffenheit von Gebäuden in Sachsen – Kartierung der Überschreitungswahrscheinlichkeit von Referenzwerten“ dar (Datensatz Nr. 1, Tabelle 2). Diese Daten stammen aus verschiedenen Projekten, die in Sachsen von Bundes- und Landesbehörden, Kommunen oder privaten

Auftragnehmern durchgeführt wurden. Im Rahmen eines Fremdleistungsvorhabens wurde dieser Datensatz im Jahr 2011 zusammengefasst und zur Erstellung einer Prognosekarte zur Radonbetroffenheit von Gebäuden in Sachsen aufbereitet und ausgewertet (KEMSKI, 2011). Hierfür standen 8856 Datensätze zu Raumluftmessungen in 4202 Gebäuden in Sachsen zur Verfügung (KEMSKI, 2011). Dieser Datenbestand wurde bereinigt, indem u. a. Datensätze mit einer Messzeit kleiner 80 Tage sowie bei Mehrfachmessungen der jeweils niedrigere Raumluftmesswert auf derselben Etage entfernt wurden. Nach der Bereinigung blieben 5788 Datensätze übrig, 3506 davon in Keller- und Erdgeschossräumen. Für die Ausweisung der Radonvorsorgegebiete im Freistaat Sachsen wurden dann aus diesem Datenbestand 586 Datensätze selektiert (Datensatz 1a, Tabelle 2), die aus Erdgeschossräumen in voll-unterkellerten kleinen Häusern, wie z. B. Ein- und Mehrfamilienhäusern, Reihenhäusern sowie Doppelhaushälften stammen, und somit der Referenzsituation aus der Veröffentlichung nach BOSSEW (2018) entsprechen. In der Regel handelte es sich bei diesen Räumen um Aufenthaltsräume, beim Fehlen eines Aufenthaltsraumes in der untersuchten Etage wurde der Nicht-Aufenthaltsraum mit dem höchsten Raumluftmesswert herangezogen.

Die Daten aus den Messprogrammen Nr. 2 - 6 in der Tabelle 2 weichen insbesondere hinsichtlich des Gebäudetyps, der Nutzungsbedingungen oder der Art der Auswertung von denen des Messprogrammes Nr. 1a ab. Daher wurden diese Datensätze nicht direkt zur Ausweisung der Gebiete nach § 121 STRLSCHG herangezogen, sondern zur Plausibilisierung der Ergebnisse der Gebietsausweisung eingesetzt.

Dazu wurde in den Datensätzen Nr. 2 und 3 analog dem Vorgehen im Datensatz Nr. 1 pro Etage nur ein Messwert verwendet und zwar jeweils der maximale Messwert eines Aufenthaltsraumes der Etage. Im Falle des Fehlens eines untersuchten Aufenthaltsraumes in einer Etage wurde ebenfalls wie im Datensatz Nr. 1 der größte vorhandene Messwert ausgewählt. Für die Verifizierung der Ausweisung der Radonvorsorgegebiete im Freistaat Sachsen wurden außerdem aus den Datensätzen Nr. 2 und 3 nur die Daten aus voll-unterkellerten Häusern eingesetzt (Datensatz 2a und 3a).

Die Datensätze Nr. 4 bis 6 beziehen sich überwiegend auf große, öffentliche Gebäude, Schulen bzw. Arbeitsplätze. Diese Gebäude weisen in der Regel eine von den Wohnhäusern abweichende Art der Nutzung auf. Von diesen Daten wurden zur Verifizierung alle Messwerte einer Etage selektiert, unabhängig von der Art der Unterkellerung. In Kapitel 4.5 wird diese Vorgehensweise näher beschrieben und begründet.

4.4 Auswertung der Messdaten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft

4.4.1 Erstellung der Karte der Erwartungswerte der Bodenradonkonzentration in Sachsen (KEMSKI, 2010)

In der Veröffentlichung des Bundesamtes für Strahlenschutz zur Prognose des geogenen Radonpotentials in Deutschland und der Ableitung eines Schwellenwertes zur Ausweisung von Radonvorsorgegebieten (BOSSEW, 2018) wird, wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, vorgeschlagen, ein Gebiet als Radonvorsorgegebiet nach § 121 STRLSCHG auszuweisen, wenn das Radonpotential den Schwellenwert von RP 44 überschreitet. Das Radonpotential wird aus der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft in 1 m Tiefe und der Gaspermeabilität des Bodens nach Gleichung 1 (vgl. Kapitel 3) ermittelt.

Für die Erstellung der Karte der Erwartungswerte der Bodenradonkonzentration im Freistaat Sachsen (KEMSKI, 2010) standen Messwerte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft von 981 Messpunkten zur Verfügung. Parallel dazu lagen von 570 der 981 Messpunkte ebenfalls Messwerte der Gaspermeabilität vor. Die Auswertungen zeigten eine überwiegend hohe Gasdurchlässigkeit der Böden von $> 10^{-12} \text{ m}^2$ (Abbildung 8). Undurchlässige, stark bindige Böden treten dagegen selten auf (KEMSKI, 2010). Für Böden mit einer Gaspermeabilität von ca. 10^{-11} m^2 ergibt sich nach Gleichung 1 für die Berechnung des Radonpotentials ein Divisor von 1, weshalb

das Radonpotential bei diesem Wert zahlenmäßig der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft in kBq/m³ entspricht.

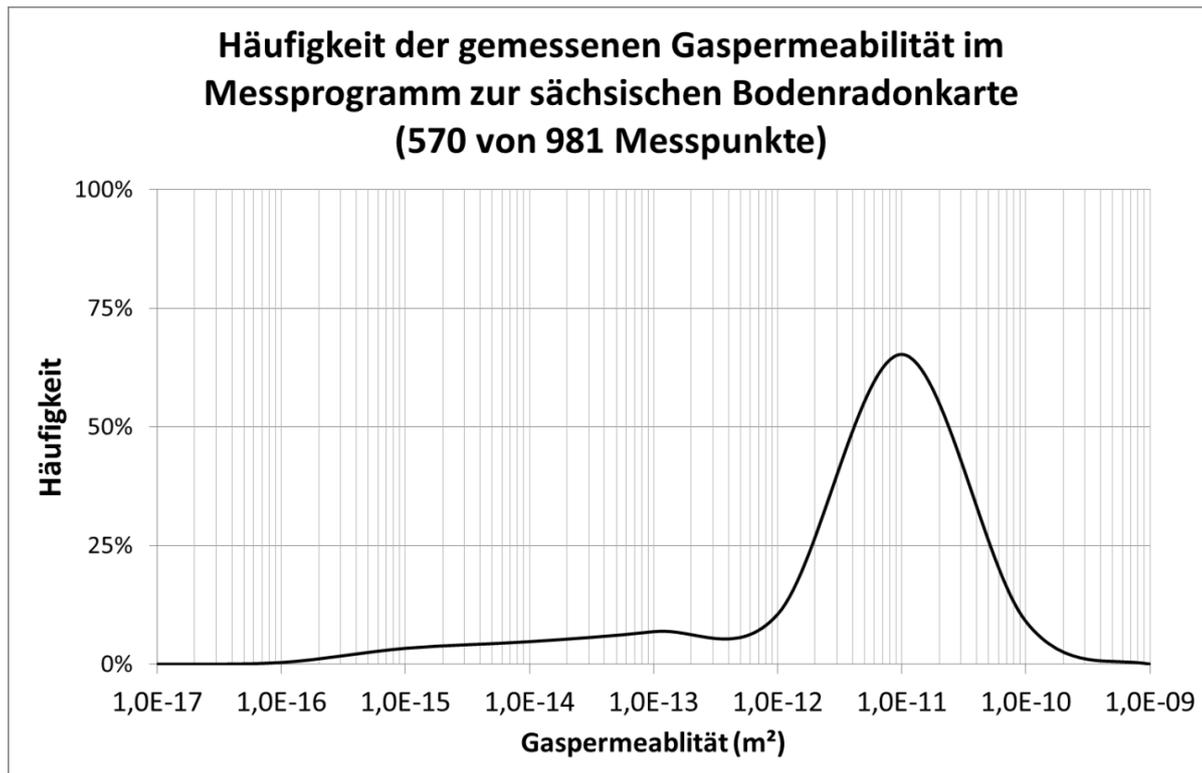


Abbildung 8: Ermittelte Häufigkeitsverteilung der Gaspermeabilität im Boden.

Aus diesem Grund wurden bei der Erstellung der Karte der Erwartungswerte der Radonkonzentration in der Bodenluft für den Freistaat Sachsen ausschließlich die Daten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft verwendet. Eine Nutzung des Radonpotentials anstelle der Radon-222-Aktivitätskonzentration hätte eine signifikante Reduzierung des vorhandenen Datensatzes um ca. 30 % zur Folge, was gleichzeitig zu einer Erhöhung der statistischen Unsicherheit führt. Der Fehler durch eine mögliche Überbewertung des Radonpotentials nur anhand der Nutzung der Daten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft wird im Vergleich dazu als geringfügig eingeschätzt.

Für die Erstellung der Karte der Erwartungswerte der Radonkonzentration in der Bodenluft wurde zunächst über die Fläche des Freistaates Sachsen ein regelmäßiges Raster mit einer Rastergröße von 1 x 1 km generiert und die 981 Messwerte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft flächenhaft abstandsgewichtet auf die erzeugten 18.427 Rasterelemente interpoliert. Dafür wurde jedem Rasterelement eine geologische Einheit zugewiesen und die Messwerte zwischen den drei am nächsten gelegenen Messorten innerhalb einer geologischen Einheit auf Basis des Rasters invers abstandsgewichtet interpoliert. Bei einem Ort, ohne Messpunkte wurde der Wert durch ein gewichtetes Mittel der benachbarten gemessenen Werte geschätzt (KEMSKI, 2010).

Abhängig von den so zugeordneten interpolierten Messwerten zu den Rasterelementen wurden die Rasterquadrate eingefärbt: verschiedene Grüntöne für Radon-222-Aktivitätskonzentrationen von < 20 kBq/m³ bzw. 21 – 40 kBq/m³, orange Rasterfelder bei Radon-222-Aktivitätskonzentrationen von 41-100 kBq/m³, sowie rote Quadrate bei Radon-222-Aktivitätskonzentrationen von > 100 kBq/m³. Grau eingefärbt wurden Rasterelemente, bei denen innerhalb eines Umkreises von bis zu 20 km kein weiterer Messwert in der gleichen geologischen Einheit verfügbar war. Es konnte eine Karte erstellt werden mit einer im Vergleich zur Deutschlandkarte der Radonkonzentration in der Bodenluft stark verfeinerten Auflösung (Abbildung 9).

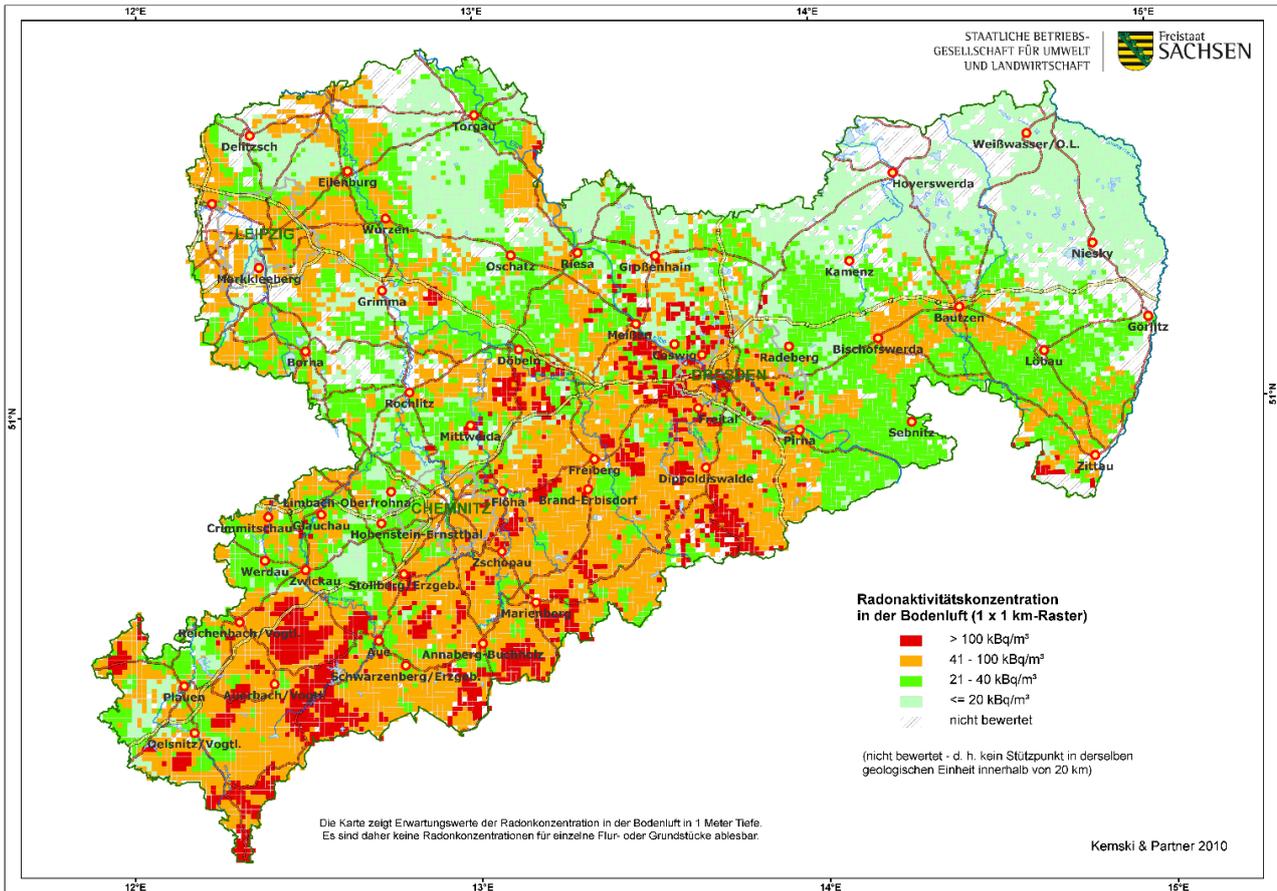


Abbildung 9: Karte der Erwartungswerte der Radonkonzentration in der Bodenluft in 1 m Tiefe (KEMSKI, 2010).

Die sächsische Karte der Erwartungswerte der Radonkonzentration in der Bodenluft zeigt jeweils die regional zu erwartende Situation in einem Raster mit einer Auflösung von 1 x 1 km. Aus dieser Karte lässt sich jedoch keine Aussage zu einzelnen Gebäuden oder Grundstücken ableiten, da die für die Interpolation verwendeten Daten regional stark variieren können.

Einfluss der Messpunktdichte bei der abstandsgewichteten Interpolation der Messdaten

Das Berechnungsmodell zur Erstellung der Karte kann insbesondere in Gebieten mit niedriger Messpunktdichte lokal zu einem starken Einfluss hoher oder niedriger Radon-222-Aktivitätskonzentrationen führen. Dies ist auf die Art der Interpolation der Messdaten zurückzuführen, d. h. in welcher Art die Zuordnung der Messdaten zu einem Rasterelement erfolgt. Der einem Rasterelement zugeordnete Wert wird dabei aus den Messdaten der drei benachbarten Messpunkte innerhalb einer geologischen Einheit invers abstandsgewichtet mit dem Quadrat der Entfernung interpoliert. In Einzelfällen, in denen nur eine geringe Anzahl von Messwerten vorliegt, können diese zu einem unerwünscht hohen Einfluss innerhalb des Rasters führen, lokale Maxima bzw. Minima bleiben in der Darstellung erhalten.

Dieser Effekt des angewandten Berechnungsmodells wurde am Beispiel der Gemeinde Arzberg im Landkreis Nordsachsen gezeigt. Am Rande der Gemeinde Arzberg im Ortsteil Stehla wurde in der geologischen Einheit "Auenterrassen" ein lokales Maximum mit einem Messwert der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft von 116,6 kBq/m³ gemessen. Dies führte dazu, dass in der Karte der Erwartungswerte der Bodenradonkonzentration in dieser Gemeinde rote Rasterquadrate ausgewiesen wurden (Abbildung 10). Außerdem werden die rot eingefärbten Rasterelemente von orange gefärbten Elementen umrahmt, jedoch lassen die geologischen Einheiten "Auenterrassen" sowie "Pleistozäne Flussterrassen" in diesem Gebiet auf ein geringes Vorkommen von Radon in der Bodenluft schließen. Da jedoch im näheren Umkreis keine weiteren Messwerte der entsprechenden

geologischen Einheit "Auenterrassen" vorhanden waren, breitete sich dieses gemessene lokale Maximum der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft scheinbar in die umgebende Fläche in der Karte aus.

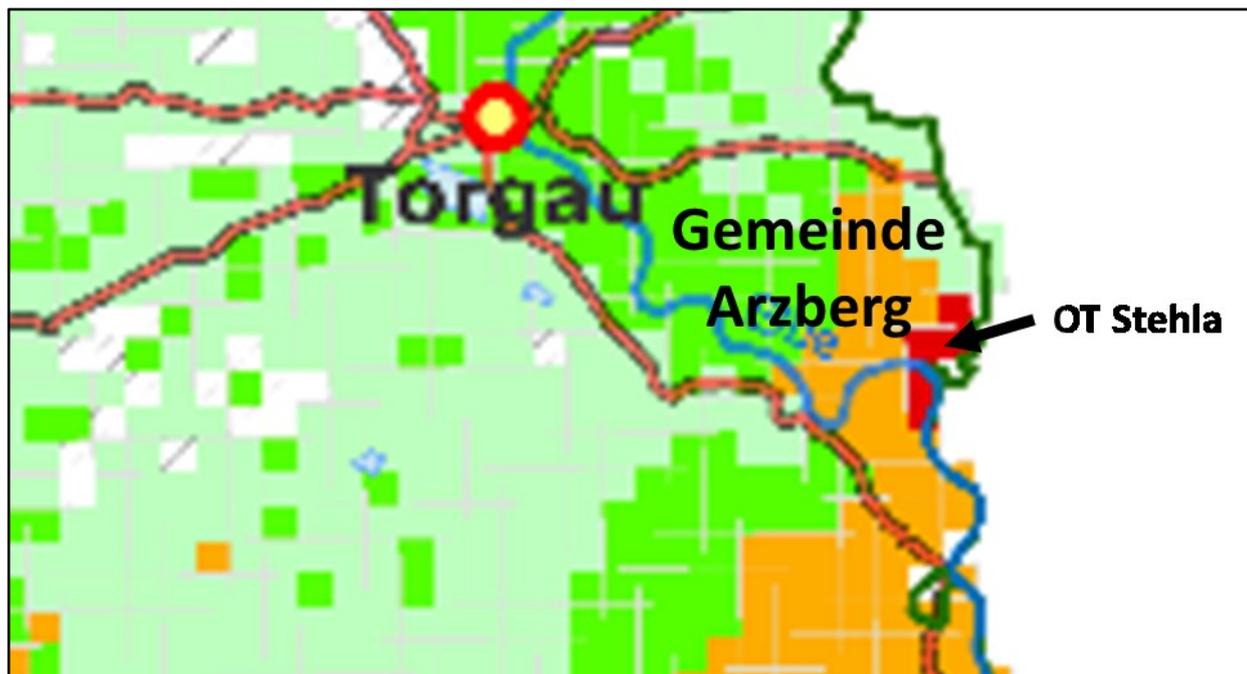


Abbildung 10: Kartenausschnitt aus der Karte der Erwartungswerte der Radonkonzentration in der Bodenluft (KEMSKI, 2010) bei der Gemeinde Arzberg im Landkreis Nordsachsen.

Die statistischen Kenndaten der Messungen der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft in der Tabelle 3 zeigen dagegen, dass der Median aller Messwerte in der geologischen Einheit "Auenterrassen" im Freistaat Sachsen 31 kBq/m³ ergibt, und das 10 %-Quantil bei 6 kBq/m³ sowie das 90 %-Quantil bei 79 Bq/m³ ermittelt wurde. Dies bedeutet, dass 90 % aller Messwerte in der geologischen Einheit "Auenterrassen" kleinere Werte als 79 kBq/m³ annehmen werden.

Tabelle 3: Statistische Kenndaten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft in den geologischen Einheiten "Auenterrassen" und "Pleistozäne Flussterrassen".

Geologische Einheit	10 % Quantil ² [kBq/m ³]	Arithmetisches Mittel [kBq/m ³]	Median ³ [kBq/m ³]	Geometrisches Mittel [kBq/m ³]	90 %-Quantil ⁴ [kBq/m ³]
Auenterrassen	6	38	31	28	79
Pleistozäne Flussterrassen	5	39	21	21	77

Daher wurden im Rahmen des Sondermessprogrammes "Arzberg" fünf weitere Messungen der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft in dieser Gemeinde durchgeführt, um die Messpunktdichte lokal zu erhöhen, sowie den Einfluss der Messpunktdichte auf das Berechnungsmodell zu zeigen, das zur Erstellung der sächsischen Karte der Erwartungswerte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft verwendet wurde.

Die Messungen wurden in einer Entfernung von 0,09 - 7,6 km zum bereits beprobten Messpunkt mit dem ermittelten Wert von 116,6 kBq/m³ vorgenommen (Tabelle 4). Drei der Messpunkte wurden der geologischen Einheit

² Das 10 %-Quantil gibt als Schwellenwert an, dass 10 % der Werte kleiner sind als dieser Wert, 90 % der Werte sind größer.

³ Der Median entspricht dem 50 %-Quantil, das heißt 50 % der Werte sind kleiner, und 50 % der Werte sind größer als der Median; der Median hat damit den Quantilsrang 50 % (QR50).

⁴ Das 90 %-Quantil gibt als Schwellenwert an, dass 90 % der Werte kleiner sind als dieser Wert, 10 % der Werte sind größer.

"Auenterrassen" zugeordnet, zwei weitere Probenahmen erfolgten in der Einheit "Pleistozäne Flussterrassen" (Tabelle 4).

Tabelle 4: Messwerte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft in der Gemeinde Arzberg im Landkreis Nordsachsen im Rahmen verschiedener Messprogramme.

Messpunkt	Koordinaten	Jahr der Probenahme	Entfernung zum Messpunkt 09B7145RB [km]	Radon-222-Aktivitätskonzentration [kBq/m ³]	Permeabilität k [m ²] [Stufe]	Bodenfeuchte [%]	Geologische Einheit nach "GK 200 vereinfacht"
09B7145RB	RW 374386 / HW 5706410	2009	-	116,6	1,00E-11	- (feucht)	Auenterrassen
1826492RB	RW 374308 / HW 5706377	2018	0,09	33,7	7,30E-12	28,0	Auenterrassen
1826493RB	RW 373770 / HW 5706307	2018	0,6	25,5	3,65E-12	32,5	Auenterrassen
1826494RB	RW 374441 / HW 5709469	2018	3,1	7,2	9,73E-12	7,2	Pleistozäne Flussterrassen
1826495RB	RW 368034 / HW 5710646	2018	7,6	35,8	7,30E-12	-	Auenterrassen
1826496RB	RW 370171 / HW 5710120	2018	5,6	34,0	1,09E-11	13,7	Pleistozäne Flussterrassen

Die Auswertungen zeigen, dass die im Rahmen des Sondermessprogrammes "Arzberg" ermittelten Messwerte in der geologischen Einheit "Auenterrassen" mit Werten von 25,5 - 35,8 kBq/m³ den Erwartungen der statistischen Kenndaten dieser geologischen Einheit entsprechen, und der ermittelte Wert von 116,6 kBq/m³ in der Gemeinde Arzberg als lokales Maximum einzuschätzen ist. Auch in den weiteren Messpunkten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft, die der geologischen Einheit "Pleistozäne Flussterrassen" zuzuordnen waren, wurden Messwerte von 7 - 34 kBq/m³ ermittelt, die den Erwartungen der statistischen Kenngrößen dieser geologischen Einheit entsprechen.

Bei einer erneuten abstandsgewichteten Interpolation der Daten nach Erhöhung der Messpunktdichte würden die Rasterquadrate in der Gemeinde Arzberg mit einem Wert von deutlich weniger als 100 kBq/m³ bewertet und damit mit orange gefärbten Rasterquadraten anstelle der roten Rasterelemente dargestellt. Die benachbarten Quadrate würden durch die höhere Messpunktdichte ebenfalls mit niedrigeren Konzentrationen bewertet. Somit wurde beispielhaft in der Gemeinde Arzberg gezeigt, dass durch eine Erhöhung der Messpunktdichte der Einfluss des lokalen Maximums bei der Berechnung der Karte mittels des Modells der abstandsgewichteten Interpolation der Messwerte begrenzt wird, da in der Umgebung keine weiteren Maxima gefunden wurden (Tabelle 4).

Am Beispiel der Gemeinde Arzberg konnte also gezeigt werden, dass dieses zur Erstellung der Karte der Erwartungswerte der Radonkonzentration in der Bodenluft eingesetzte Berechnungsmodell über die abstandsgewichtete Interpolation der am nächsten gelegenen Messpunkte eine starke Abhängigkeit von der Messpunktdichte einer Region aufweist. Außerdem ist der Einfluss lokaler Minima oder Maxima in der jeweiligen Region sehr signifikant, was aber insbesondere in Gebieten mit niedriger Messpunktdichte deutlicher auffällt, und hier auch zudem noch zusätzlich verstärkt wird.

Aus diesem Grund wurde für die Ausweisung der Radonvorsorgegebiete im Freistaat Sachsen ein Modell gewählt, das die statistischen Kenndaten aller Messwerte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft den entsprechenden geologischen Einheiten zuordnet, was zu einer robusteren statistischen Auswertung führt.

4.4.2 Auswertung des Datenbestandes Bodenradon zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete

Die Charakterisierung der geologischen Einheiten über statistische Kenngrößen der Radon-222-Aktivitätskonzentrationen in der Bodenluft ist im Vergleich zu der abstandsgewichteten Interpolation der Messwerte der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft einer geologischen Einheit eine Methode, eine für die entsprechende geologische Einheit genauere und statistisch bestätigte Bewertung zu erhalten. Der Einfluss lokaler Maxima bzw. Minima der Messwerte wird bei dieser Betrachtungsweise angemessen berücksichtigt, führt jedoch nicht zu lokalen Über- bzw. Unterbewertungen von Regionen. Bei dieser Methode werden statistische Kenngrößen, wie der Median, das 10 %- und 90 %-Quantil, sowie Quantilsränge zu bestimmten Werten über alle Messwerte innerhalb einer geologischen Einheit erhoben. Der Quantilsrang eines bestimmten Wertes gibt dabei an, wieviel Prozent der Messwerte kleiner als dieser Wert sind.

Für die Ausweisung der Radonvorsorgegebiete im Freistaat Sachsen wurden für die Werte der Radon-222-Aktivitätskonzentrationen in der Bodenluft aus dem Datensatz zur Erstellung der sächsischen Karte der Erwartungswerte der Bodenradonkonzentration in jeder geologischen Einheit unter anderem die statistischen Kenngrößen Median, 10 %- und 90 %-Quantil sowie Quantilsränge von 40 kBq/m³ (QR40) bzw. von 100 kBq/m³ (QR100) bestimmt. Eine Tabelle mit diesen Daten befindet sich im Anhang (Tabelle 10).

Der Wert von 40 kBq/m³ der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft stellt dabei einen empirisch ermittelten Wert dar, ab dem Schutzmaßnahmen vor dem Eintritt von Radon ins Gebäude bereits seit vielen Jahren empfohlen werden. Eine Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft von 100 kBq/m³ galt vor der Einführung gesetzlicher Regelungen durch das Strahlenschutzgesetz als Markung zur Ergreifung umfangreicher Schutzmaßnahmen bei der Errichtung von Gebäuden.

In der Abbildung 11 ist die Verteilung der Messwerte der Radon-222-Aktivitätskonzentrationen in der Bodenluft kategorisiert in "kleiner als 40 kBq/m³" (QR40), "40 - 100 kBq/m³" (QR100) sowie "größer als 100 kBq/m³" zugeordnet zu den 32 geologischen Einheiten von links nach rechts aufsteigend geordnet nach dem Quantilsrang von 40 kBq/m³ dargestellt.

In der Darstellung der Häufigkeitsverteilung sind die Messwerte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft < 40 kBq/m³ als grüne Anteile der Balken, Messwerte zwischen 40 kBq/m³ und 100 kBq/m³ als gelbe Anteile, sowie Werte > 100 kBq/m³ als rote Anteile abgebildet. Schraffiert dargestellt sind geologische Einheiten mit weniger als 10 Messwerten, dies sind in der Regel auch geologische Einheiten mit sehr kleinen Flächenanteilen im Gesamtterritorium des Freistaates Sachsen.

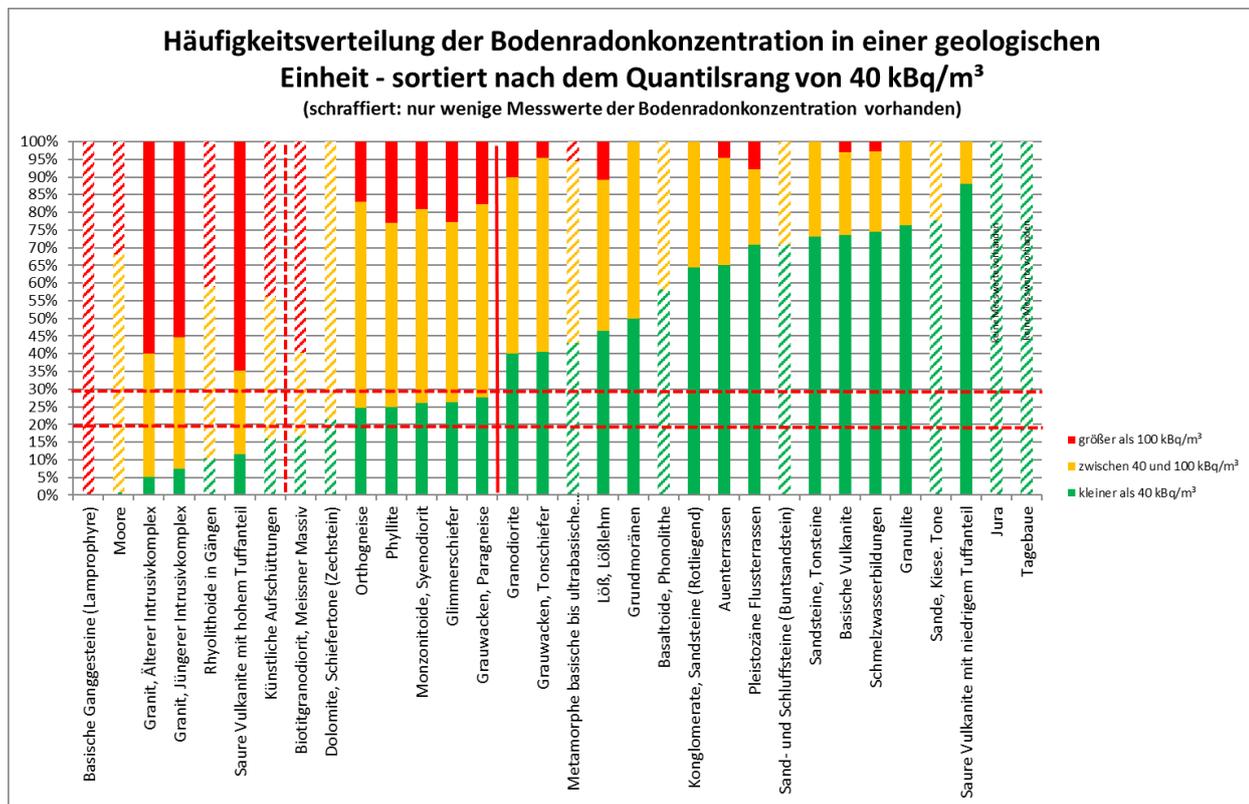


Abbildung 11: Häufigkeitsverteilung der Radon-222- Aktivitätskonzentration in der Bodenluft, zugeordnet zu den 32 geologischen Einheiten, aufsteigend sortiert nach dem QR40.

Bei der Auswertung der Daten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Innenraumlufte, die ebenfalls den geologischen Einheiten zugeordnet wurden (vgl. Kapitel 4.5.2), konnte zudem eine grundsätzliche Korrelation gezeigt werden, dass die Häufigkeit der Überschreitung des Referenzwertes in Innenräumen mit zunehmenden QR40 der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft abnimmt. Der QR40 stellt also einen Parameter dar, der die geologische Einheit charakterisiert und ebenfalls eine Prognose der Referenzwertüberschreitungshäufigkeit der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen ermöglicht. Anhand der Korrelation werden die geologischen Einheiten mit einem QR40 < 20 % als „Erhöht“ klassifiziert⁵. Dies betrifft die geologischen Einheiten Basische Ganggesteine (Lamprophyre); Moore; Granit, älterer Intrusivkomplex; Granit, jüngerer Intrusivkomplex; Rhyolithoide in Gängen; Saure Vulkanite mit hohem Tuffanteil; sowie Künstliche Aufschüttungen. Charakteristisch für diese Gruppe sind ein hoher Anteil an Messwerten > 100 kBq/m³ bzw. > 40 kBq/m³ und ein QR40 < 20 %. Die geologischen Einheiten Dolomite, Schiefertone (Zechstein); Orthogneise; Phyllite; Monzonitoide, Syenodiorit; Glimmerschiefer; sowie Grauwacken, Paragneise werden als „Auffällig“ klassifiziert aufgrund des ermittelten QR40 von ca. 20 – 30 %. Zusätzlich wird die geologische Einheit Biotitgranodiorit, Meissner Massiv ebenfalls der Kategorie „Auffällig“ zugeordnet anstelle der Kategorie „Erhöht“. Diese abweichende Einordnung erfolgte, da der QR40 dieser geologischen Einheit noch im Grenzbereich zur Klassifizierung der als „Auffällig“ zusammengefassten geologischen Einheiten liegt, und sich aus den Auswertungen der vorliegenden Messungen der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Innenraumlufte von Gebäuden in dieser geologischen Einheit ein im Vergleich zu den Daten der als "Erhöht" eingestuft geologischen Einheiten niedrigerer Median im Datensatz der Innenräume im Erdgeschoss voll-unterkellerten Häuser sowie eine geringere Referenzwertüberschreitungshäufigkeit ergibt (vgl. Tabelle 11 im Anhang). So beträgt der Median der Messungen der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Erdgeschossräumen kleiner voll-unterkellerten Wohnhäuser in der geologischen Einheit Biotitgranodiorit, Meissner Massiv 62 Bq/m³ mit einer Überschreitungshäufigkeit des Referenzwertes von 300 Bq/m³ von 13 %. Diese

⁵ Beträgt der Quantilsrang von 40 kBq/m³ 20 %, sind 20 % der Messwerte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft kleiner als 40 kBq/m³, 80 % der Werte sind größer 40 kBq/m³.

Kenndaten sind vergleichbar mit denen der als "Auffällig" eingestuften geologischen Einheit Monzonitoide, Syenodiorit, bei der ebenfalls eine Referenzwertüberschreitungshäufigkeit von 13 % im Datensatz der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen voll-unterkellerten kleiner Gebäude ermittelt wurde (Tabelle 11 im Anhang).

Die weiteren geologischen Einheiten mit einem QR40 > 30 % werden in der Kategorie „Unauffällig“ zusammengefasst.

Korrelation zwischen dem QR40 und dem Median der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft

In der Abbildung 12 ist der Zusammenhang zwischen dem Median der Messwerte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft in den jeweilig zugeordneten geologischen Einheiten und dem Quantilsrang von 40 kBq/m³ dargestellt. Dabei wurden die als „Unauffällig“ klassifizierten geologischen Einheiten als grüne Punkte, die als „Auffällig“ eingestuften Einheiten als gelbe Punkte, sowie die als „Erhöht“ zusammengefassten geologischen Einheiten als rote Symbole in der Grafik dargestellt. Symbole, die in der Grafik nicht ausgefüllt erscheinen, kennzeichnen geologische Einheiten mit weniger als 10 Messwerten.

Die Abbildung 12 veranschaulicht, dass mit steigendem Median der Radon-222-Aktivitätskonzentrationen in der Bodenluft die Werte des QR40 absinken. Die als „Auffällig“ bzw. „Erhöht“ klassifizierten geologischen Einheiten mit einem QR40 bis ca. 30 % (gelbe und rote Symbole) weisen jeweils einen Median der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft größer als ca. 50 kBq/m³ auf. Dagegen liegen die Mediane der als „Unauffällig“ klassifizierten geologischen Einheiten mit QR40-Werten größer als 30 % im Bereich < 47 kBq/m³ und korrelieren damit mit der in der Veröffentlichung des Bundesamtes für Strahlenschutz abgeleiteten Schwelle des Radonpotentials von RP 44 (BOSSEW, 2018).

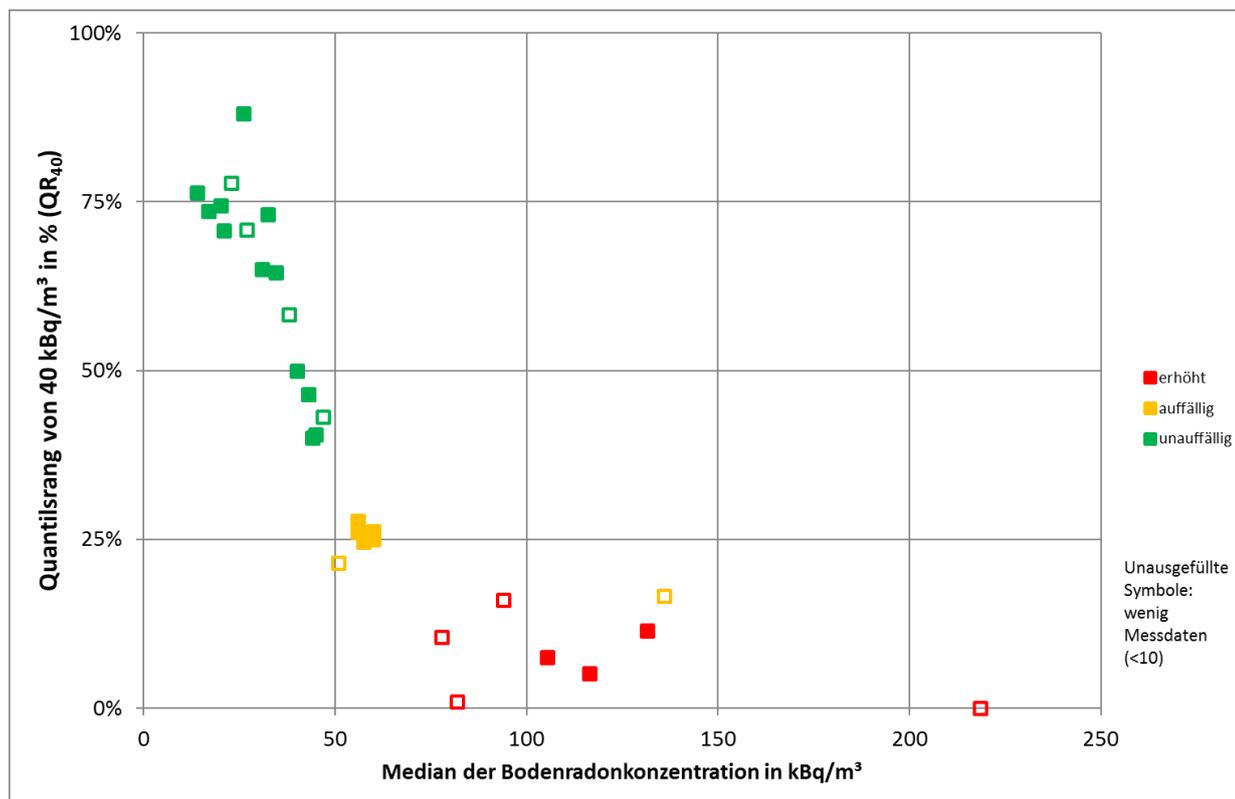


Abbildung 12: Zusammenhang zwischen QR40 und Median der Werte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft zugeordnet zu den geologischen Einheiten der Kategorien "Unauffällig", "Auffällig" und "Erhöht".

Belastbarkeit und Aussagekraft einzelner Bodenradonmesswerte

Wie im Kapitel 4.2.1 beschrieben werden bei den Kartierungsmessungen pro Messpunkt drei Bohrungen auf den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks mit 3 - 5 m Kantenlänge abgeteuft. Somit entspricht dies einer Messpunktdichte von 3 Bohrungen auf 9 – 25 m². Zur Einordnung der Belastbarkeit einzelner Bodenradonmesswerte wurde in einem Waldgebiet nahe Schneeberg eine Referenzfläche von ca. 500 m² mit ca. 20 Bohrungen über etwa 2 Jahre wiederholt beprobt. Die Referenzfläche ist gut charakterisiert und befindet sich in der geologischen Einheit „Phyllite“. Die Messungen wurden in verschiedenen Jahreszeiten (außer im Winter) durchgeführt, dabei wurden jedoch nicht alle Bohrungen zeitgleich untersucht.

Insgesamt wurden auf dieser Referenzfläche 472 Messwerte gewonnen mit einer Spannweite von 10 – 160 kBq/m³ (Minimum/Maximum). Der Median lag bei 48 kBq/m³, der Quantilsrang von 40 kBq/m³ (QR40) wurde mit 31 % bestimmt und der QR100 mit 98 % (Tabelle 5). Auch in Vergleichsmessungen mit ca. 10 externen Teilnehmern mit teilweise unterschiedlichen Probenahme- bzw. Messverfahren wurden bei der Auswertung vergleichbare statistische Kenndaten festgestellt.

Tabelle 5: Statistische Kenngrößen der Messungen der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft auf der Referenzfläche sowie in der gesamten geologischen Einheit "Phyllite".

	Minimum [kBq/m ³]	Median [kBq/m ³]	QR40 [%]	QR100 [%]	Maximum [kBq/m ³]
Daten BfUL (472 Messungen)	10	48	31	98	160
externe Messungen (20 Messungen)	31	88	6	76	159
Vorhandene Messdaten aus der geologischen Einheit "Phyllite" aus dem Messprogramm "Bodenradondaten zur Bodenradonkarte Sachsen" (146 Messungen)	10	60	25	77	403

Bei der statistischen Charakterisierung der Messdaten der Bodenradonaktivitätskonzentration in der geologischen Einheit „Phyllite“ über die gesamte Fläche des Freistaates Sachsen im Rahmen des Messprogrammes zur Erstellung der Bodenradonkarte ergab sich ein Median von 60 kBq/m³ und ein Quantilsrang von 40 kBq/m³ von 25 %. Die Daten zeigen, dass die statistische Charakterisierung einer Vielzahl von Messdaten innerhalb einer Fläche oder innerhalb einer geologischen Einheit zu einer stabilen Datenbasis führt, auch wenn die Spannweite der Einzelmessungen stark schwankt. In der Abbildung 13 ist die Häufigkeitsverteilung der ermittelten Radon-222-Aktivitätskonzentrationen auf der Bodenradonvergleichsfläche sowie in der gesamten geologischen Einheit "Phyllite" dargestellt.

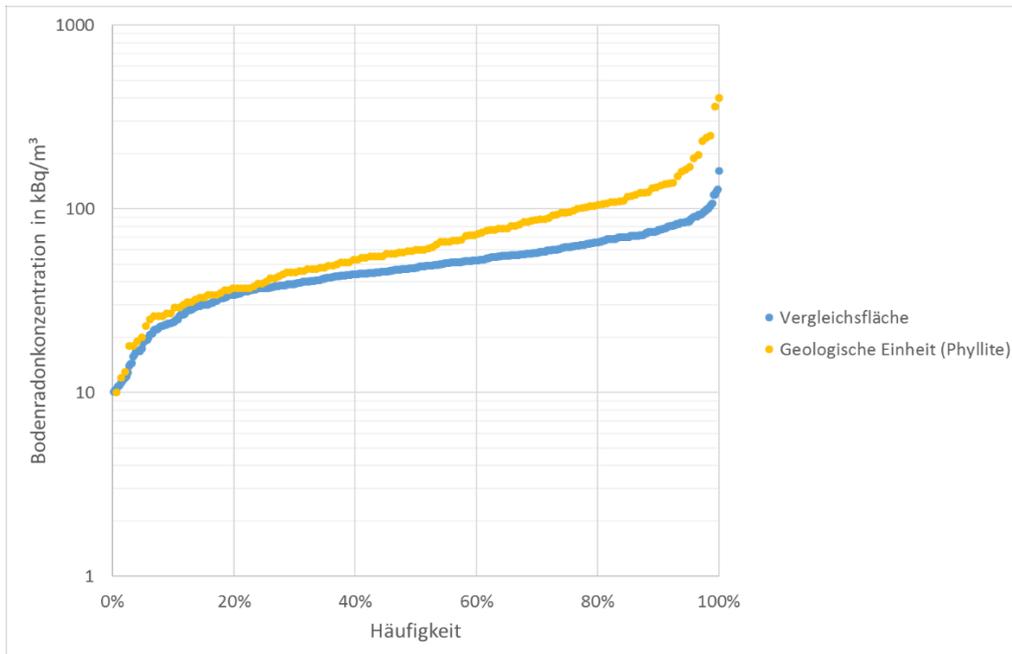


Abbildung 13: Häufigkeitsverteilung der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft auf der Bodenradonvergleichsfläche sowie in der gesamten geologischen Einheit "Phyllite".

Auch hier ergibt sich ein sehr ähnliches Bild, die Verläufe der Messwertverteilung weichen nur wenig voneinander ab. Erst ab einer Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft von größer als 40 kBq/m³ sind im Gesamtdatenbestand in der geologischen Einheit "Phyllite" häufiger höhere Messwerte zu verzeichnen. So wurden im Datensatz der Bodenradonvergleichsfläche 2 % aller Messwerte größer als 100 kBq/m³ erhalten, während im Datenbestand der gesamten geologischen Einheit "Phyllite" 23 % aller Messwerte einen Wert größer als 100 kBq/m³ aufwiesen.

Diese Ergebnisse zeigen, dass ein einzelner Messwert zu einem bestimmten Zeitpunkt lediglich für den Messpunkt bzw. die Fläche der Probenahme zum Zeitpunkt der Probenahme repräsentativ ist, jedoch die Verteilung aller Messwerte innerhalb einer geologischen Einheit zu verschiedenen Zeitpunkten der Probenahme dennoch repräsentative Ergebnisse der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft zeigt, und dass sich statistische Kenngrößen wie der Quantilsrang von 40 kBq/m³ und der Median der Bodenradonkonzentration grundsätzlich auf kleinen Flächen ebenso wie auf der gesamten geologischen Einheit widerspiegeln.

4.5 Auswertung der Messdaten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen

4.5.1 Selektion der verwendeten Daten zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete

Die Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen ist u. a. abhängig von den Gebäudeeigenschaften und der Lage des untersuchten Raumes im Gebäude. In der Regel werden in einem Gebäude in den untersten Etagen höhere Radon-222-Aktivitätskonzentrationen als in den oberen Etagen gemessen. Außerdem weisen erdberührte Gebäudeteile meist höhere Radonkonzentrationen auf, als Bereiche, die nicht erdberührt sind. Damit sind Messwerte aus dem Keller oder aus dem Erdgeschoss eines nicht-unterkellerten bzw. teil-unterkellerten Gebäudes nahezu immer größer als die Werte im Erdgeschoss eines voll-unterkellerten Gebäudes. In der Veröffentlichung des Bundesamtes für Strahlenschutz zur Prognose des geogenen Radonpotentials in Deutschland wird deshalb ein Aufenthaltsraum im Erdgeschoss eines voll-unterkellerten Massivhauses als Referenzsituation betrachtet (BOSSEW, 2018).

Wie bereits im Kapitel 4.3.2 beschrieben wurde aus den Messdaten zur Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft und den Daten zur Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Innenraumlufte von Gebäuden im Freistaat Sachsen im Rahmen eines Fremdleistungsprojektes eine Karte der Überschreitungswahrscheinlichkeiten von Referenzwerten für die Radonkonzentration in Gebäuden im 1 x 1 km-Raster erstellt (KEMSKI, 2011). Hierfür wurde der Datensatz Nr. 1 (vgl. Tabelle 2) u. a. dahingehend bereinigt, dass bei dem Vorliegen mehrerer Messwerte innerhalb einer Etage eines Gebäudes grundsätzlich nur der maximale Messwert eines Aufenthaltsraumes verwendet wird. Ist in einer Etage kein Messwert aus einem Aufenthaltsraum vorhanden, wurde der Maximalwert in einem Nicht-Aufenthaltsraum eingesetzt. In der Karte zur Prognose der Radonbetroffenheit von Gebäuden in Sachsen (Kartierung der Überschreitungswahrscheinlichkeit von Referenzwerten; KEMSKI, 2011) wurden demnach 3506 Datensätze aus Räumen in Kellern oder Erdgeschossen verwendet (vgl. Tabelle 2).

Für die Ermittlung der als Radonvorsorgegebiete auszuweisenden Gemeinden im Freistaat Sachsen wurden aus dem Datensatz Nr. 1 die Messwerte selektiert, die aus Räumen im Erdgeschoss voll-unterkellerten kleiner Häuser erhalten wurden (Tabelle 2). Diese als Datensatz Nr. 1a bezeichneten 586 Messwerte entsprechen also der Referenzsituation nach BOSSEW (2018), enthalten jedoch Nicht-Aufenthaltsräume aus den Etagen, in denen kein Messwert aus einem Aufenthaltsraum vorhanden war.

Vorliegende Auswertungen von Messdaten aus den Messprogrammen „Radonmessungen in 44 Häusern - Vollständige Datenerfassung“ sowie „Radonmessungen in Gebäuden über unterirdischen Hohlräumen“ (Datensatz Nr. 2 und Nr. 3, vgl. Tabelle 2) zeigen, dass sich die Messdaten aus Aufenthaltsräumen im Erdgeschoss (EG) eines voll-unterkellerten Gebäudes statistisch nur geringfügig von den Daten aus Nicht-Aufenthaltsräumen im Erdgeschoss eines voll-unterkellerten Gebäudes unterscheiden (Tabelle 6). Aus diesem Grund wurde der vorliegende Datensatz 1a, der zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete im Freistaat Sachsen eingesetzt wurde, nicht weiter um die Nicht-Aufenthaltsräume reduziert.

Tabelle 6: Vergleich der Mittelwerte der Radon-222-Aktivitätskonzentration und Überschreitungshäufigkeiten des Referenzwertes in Abhängigkeit der selektierten Räume in unterschiedlichen Messprogrammen.

	Mittelwert [Bq/m³]		Referenzwertüberschreitungshäufigkeit [%]	
	Alle Räume im EG	Nur Aufenthaltsräume im EG	Alle Räume im EG	Nur Aufenthaltsräume im EG
Radonmessung in 44 Häusern - Vollständige Datenerfassung (Datensatz Nr. 2)	228	266	21	25
Radonmessungen in Gebäuden über unterirdischen Hohlräumen (Datensatz Nr. 3)	293	296	24	21

Die Vergleichbarkeit der Daten in Aufenthaltsräumen und Nicht-Aufenthaltsräumen in kleinen Wohngebäuden lässt sich wahrscheinlich damit erklären, dass in kleinen voll-unterkellerten Gebäuden eher selten Nicht-Aufenthaltsräume vorhanden sind, und z. B. kleinere Abstell- oder Hauswirtschaftsräume in der Regel trotzdem häufiger geöffnet werden und nicht dicht verschlossen sind.

Für die Ermittlung der als Radonvorsorgegebiete auszuweisenden Gemeinden wurde demnach aus den dargelegten Gründen der gesamte Datenbestand 1a (586 Datensätze) ohne weitere Bereinigung eingesetzt. Die weiteren Datensätze aus der Tabelle 2 dienen ausschließlich der Verifizierung der angewandten Vorgehensweise.

4.5.2 Auswertung des Datenbestandes Radon in Innenräumen zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete

Die 586 Messdaten der Radon-222-Aktivitätskonzentration von Innenräumen im Erdgeschoss voll-unterkellerten kleiner Gebäude (1a) aus dem Datensatz Nr. 1 (Prognose zur Radonbetroffenheit von Gebäuden in Sachsen – Kartierung der Überschreitungswahrscheinlichkeit von Referenzwerten; vgl. Tabelle 2 Kapitel 4.3.2) wurden den jeweiligen geologischen Einheiten zugeordnet. In der Abbildung 14 sind die vorhandenen Werte der Radonkonzentration in Innenräumen und ihre relativen Häufigkeiten dargestellt, zusammengefasst in den geologischen Einheiten "Unauffällig", "Auffällig" und "Erhöht". Dabei wird ersichtlich, dass sich die Häufigkeit der Überschreitung des Referenzwertes (rote gestrichelte Linie) innerhalb der Klassen der geologischen Einheiten deutlich unterscheidet. In den geologischen Einheiten, die als "Unauffällig" eingeordnet wurden (grüne Symbole), werden bei ca. 3 % der Werte Überschreitungen des Referenzwertes von 300 Bq/m³ ermittelt, was der geschätzten bundesdeutschen Überschreitungshäufigkeit aller Haushalte entspricht (BOSSEW, 2018). Die geologischen Einheiten, die als "Auffällig" zusammengefasst wurden (gelbe Symbole), zeigen eine Referenzwertüberschreitungshäufigkeit von ca. 10 %, dagegen finden sich in den als "Erhöht" klassifizierten geologischen Einheiten (rote Symbole) Überschreitungshäufigkeiten des Referenzwertes von ca. 25 %, d. h. etwa ¼ der vorliegenden Werte überschreiten den Referenzwert der Radon-222-Aktivitätskonzentration von 300 Bq/m³.

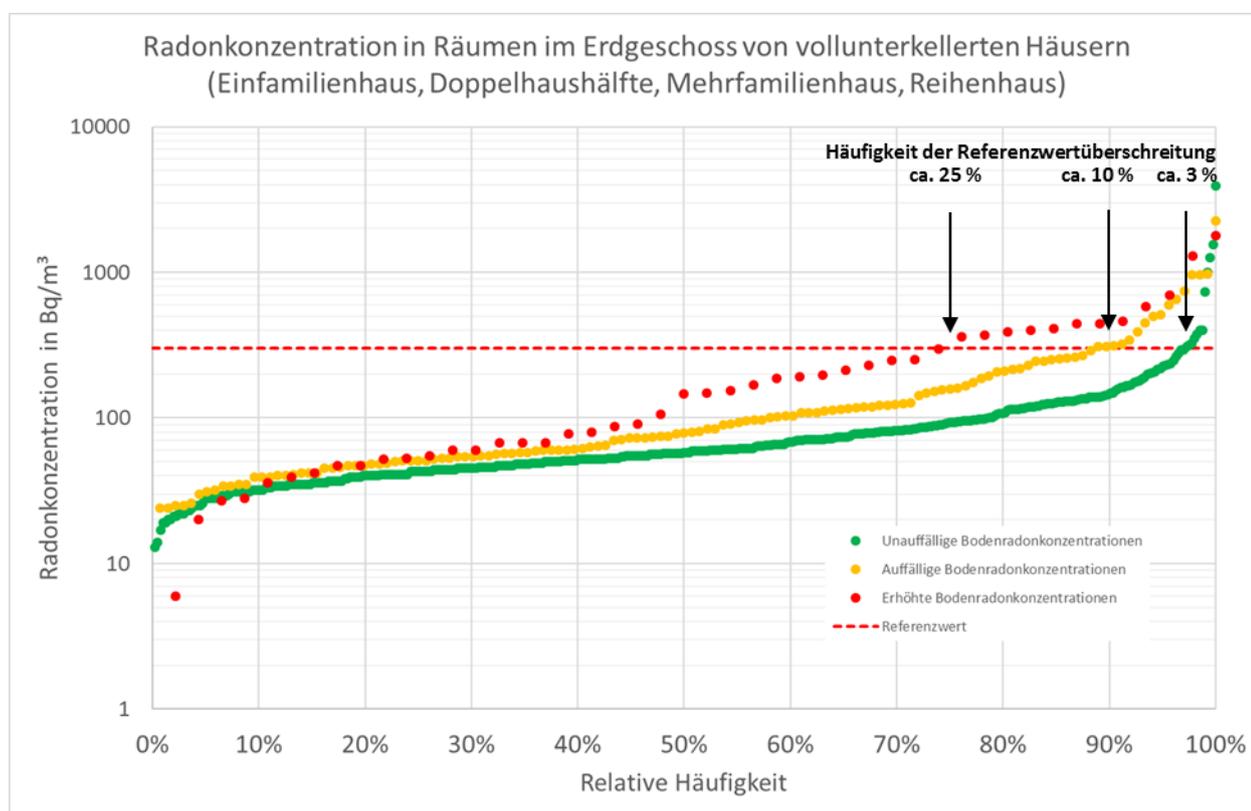


Abbildung 14: Relative Häufigkeiten der Werte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Räumen im Erdgeschoss voll-unterkellerten kleiner Häuser (Referenzsituation) zusammengefasst in den Kategorien der geologischen Einheiten.

Somit zeigt die Darstellung in der Abbildung 14 klar den Zusammenhang der Kategorisierung der geologischen Einheiten auf Grundlage der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft in „Unauffällig“, „Auffällig“ und „Erhöht“ anhand der statistischen Kenngrößen (vgl. Kapitel 4.4.2) und den vorliegenden Messdaten der Radon-222-Aktivitätskonzentrationen in Innenräumen im Erdgeschoss voll-unterkellerten kleiner Gebäude und bestätigt die Konsistenz der Methode für die Ausweisung der Gebiete nach § 121 StrlSchG für den Freistaat Sachsen.

Nach der Zuordnung der Messdaten der Radon-222-Aktivitätskonzentration aus Innenräumen im Erdgeschoss voll-unterkellerten Wohngebäude zu den geologischen Einheiten wurden in dem Datensatz die statistischen

Kenngrößen wie Median und Quantilsrang von 300 Bq/m³ (QR300) ermittelt. Zugeordnet zu den Kategorien der geologischen Einheiten, die anhand ihrer statistischen Kenndaten in die Klassen „Erhöht“, „Auffällig“ sowie „Unauffällig“ zusammengefasst wurden, erfolgte nun die Bestimmung der durchschnittlichen Referenzwertüberschreitungshäufigkeiten (Gleichung 2) aus dem vorliegenden Datensatz.

$$\text{Häufigkeit}_{RWÜ} = 1 - QR300 \quad (2)$$

Häufigkeit_{RWÜ} = Referenzwertüberschreitungshäufigkeit

QR300 = Quantilsrang von 300 Bq/m³

Die statistischen Kenndaten der Messdaten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen im Erdgeschoss voll-unterkellerten kleiner Gebäude sind im Anhang in Tabelle 11 zusammengefasst.

In der Abbildung 15 ist die Abhängigkeit der Mediane der Werte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Räumen im Erdgeschoss kleiner Häuser (Referenzsituation) zur Referenzwertüberschreitungshäufigkeit in Zuordnung zu der entsprechenden geologischen Einheit und zusammengefasst in den Kategorien "Unauffällig", "Auffällig" und "Erhöht" dargestellt. Liegen in einer geologischen Einheit jeweils weniger als 20 Messdaten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen aus dem verwendeten Datensatz vor, wurden in der Abbildung 15 Symbole ohne Füllung verwendet. Wird jeweils nur der Median der geologischen Einheit betrachtet, die mehr als 20 Messwerte aufweist (ausgefüllte Symbole), so zeigt sich, dass in den als "Unauffällig" klassifizierten geologischen Einheiten die Mediane der Radon-222-Aktivitätskonzentration ca. 50 - 80 Bq/m³ betragen.

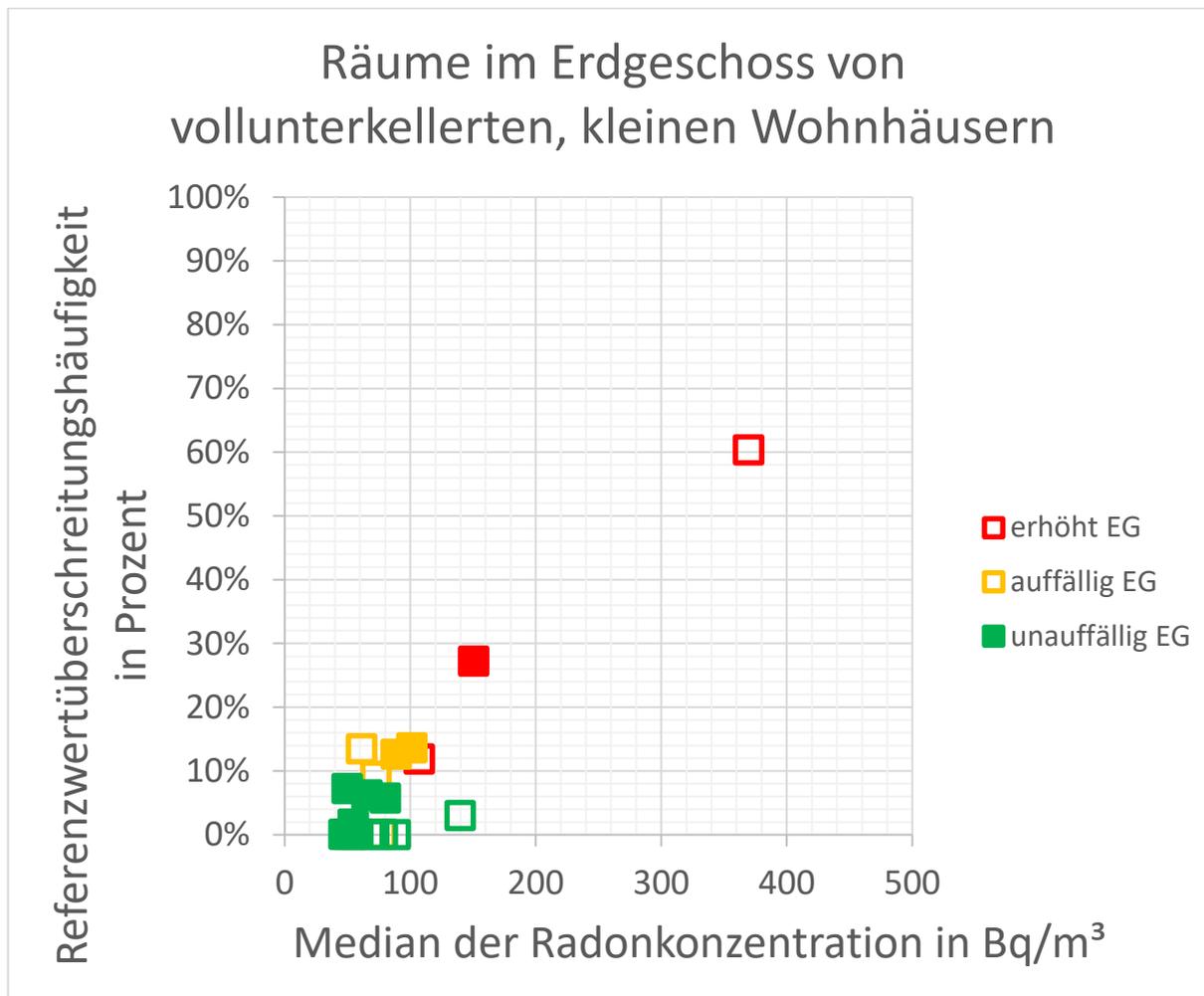


Abbildung 15: Zusammenhang von Median der Radon-222-Aktivitätskonzentration und Referenzwertüberschreitungshäufigkeit unterteilt nach Kategorie der geologischen Einheit für Innenräume im Erdgeschoss voll-unterkellerten Wohnhäuser.

In den als „Auffällig“ eingestuften geologischen Einheiten nehmen die Mediane Werte von ca. 90 – 110 Bq/m³ an, und in den als "Erhöht" zusammengefassten geologischen Einheiten liegt der Median jeweils bei ca. 150 Bq/m³. Es ist also deutlich ein Ansteigen der Mediane der Radonkonzentration in den Innenräumen in Abhängigkeit der zugeordneten geologischen Einheit zu erkennen. Gleichzeitig steigt auch die Häufigkeit der Überschreitung des Referenzwertes von 300 Bq/m³ an. Während die Referenzwertüberschreitungshäufigkeit in Räumen, die den geologischen Einheiten in der Kategorie "Unauffällig" zugeordnet sind, weniger als 10 % beträgt, steigt die Häufigkeit in den der Kategorie "Auffällig" zugeordneten Räumen auf > 10 %. In den Räumen, die den geologischen Einheiten der Kategorie "Erhöht" zugeordnet sind, findet sich dagegen eine Überschreitungshäufigkeit des Referenzwertes von > 25 %.

Die Auswertungen zeigen, dass in Gebieten mit als "Erhöht" klassifizierten geologischen Einheiten die Referenzwertüberschreitungshäufigkeiten und die Mediane am größten sind, dagegen in Gebieten mit als "Auffällig" bzw. "Unauffällig" kategorisierten Bodenradonkonzentrationen entsprechend geringer. In der Abbildung 15 ist somit deutlich der Zusammenhang der anhand der Daten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft kategorisierten geologischen Einheiten und der Häufigkeit der Überschreitung des Referenzwertes nach § 124 und § 126 des STRLSCHG bestätigt und damit ebenfalls die Konsistenz und Plausibilität der Methodik der Ausweisung der Radonvorsorgegebiete nach § 121 STRLSCHG im Freistaat Sachsen.

4.5.3 Verifizierung der Methodik der Ausweisung der Radonvorsorgegebiete anhand weiterer Datensätze

Es liegen aus weiteren Messprogrammen des Freistaates Sachsen Messdaten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen von Gebäuden vor, die die bisherigen Ergebnisse der Auswertungen weiter stützen und zur Plausibilisierung der Methode der Ausweisung der Radonvorsorgegebiete im Freistaat Sachsen im Rahmen einer Unsicherheitsabschätzung hinzugezogen werden. Zu diesem Zweck wurden die Datensätze Nr. 1b, sowie Nr. 2 bis Nr. 6 aus der Tabelle 2 eingesetzt.

Einschätzung der Unsicherheit der Methodik der Ausweisung der Radonvorsorgegebiete

Um die im Freistaat Sachsen eingesetzte Methodik zur Ermittlung der als Radonvorsorgegebiete auszuweisenden Gemeinden zu verifizieren und die resultierenden Unsicherheiten abzuschätzen, wurde ein Vergleich der Auswertungen unterschiedlich selektierter Datensätze mit dem zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete eingesetzten Datensatz Nr. 1a vorgenommen.

Zunächst wurde der Datensatz 1a (586 Messwerte) um die Nicht-Aufenthaltsräume bereinigt, was zu einer Reduzierung des Datenbestandes auf 492 Messwerte führte. Aus den Messprogrammen „Radonmessungen in Häusern - Vollständige Datenerfassung“ (Datensatz Nr. 2 aus Tabelle 2) sowie „Radonmessungen in Gebäuden über unterirdischen Hohlräumen“ (Datensatz Nr. 3, Tabelle 2) wurden weitere Messdaten aus Innenräumen im Erdgeschoss voll-unterkellertes Gebäude selektiert und mit dem Datensatz 1a zusammengefasst, was zu einem Datenpool von 690 Messwerten führte. Dies ermöglicht die Auswertung der Daten anhand einer größeren Datenbasis, was in der Regel zu repräsentativeren und statistisch belastbareren Aussagen führt. Der Datenpool aus den Datensätzen Nr. 1a, 2a und 3a wurde in einem weiteren Schritt ebenfalls auf die Aufenthaltsräume reduziert, was zu einer Senkung der Anzahl der Messwerte von 690 auf 596 führte (Tabelle 7).

Tabelle 7: Vorliegende Datensätze zur Verifizierung der Methodik zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete und ermittelte Referenzwertüberschreitungshäufigkeiten (RWÜ) in den als "Unauffällig", "Auffällig" und "Erhöht" klassifizierten geologischen Einheiten.

	Anzahl Daten	RWÜ in der Kategorie "Unauffällig" [%]	RWÜ in der Kategorie "Auffällig" [%]	RWÜ in der Kategorie "Erhöht" [%]
Datensatz Nr. 1a	586	2,5	10	25
Datensatz Nr. 1a - zusätzlich nur Aufenthaltsräume selektiert	492	2,4	10	27
Datensatz Nr. 1a, 2a und 3a	690	2,9	11	21
Datensatz Nr. 1a, 2a und 3a - zusätzlich nur Aufenthaltsräume selektiert	596	2,9	11	22

Datensatz Nr. 1: Prognose zur Radonbetroffenheit von Gebäuden in Sachsen – Kartierung der Überschreitungswahrscheinlichkeit von Referenzwerten

Datensatz Nr. 2: Radonmessungen in 44 Häusern (vollständige Datensätze)

Datensatz Nr. 3: Radonmessungen in Gebäuden über unterirdischen Hohlräumen

Wie in der Tabelle 7 dargestellt, führt der Zusatz der weiteren Messdaten zu den bisher betrachteten Datensätzen bzw. die Eliminierung von Nicht-Aufenthaltsräumen aus dem Datensatz jedoch nur zu geringfügigen Veränderungen der Häufigkeit der Referenzwertüberschreitungen in den Kategorien der geologischen Einheiten. Eine Schätzung der möglichen Unsicherheit zeigt, dass die Häufigkeit der Referenzwertüberschreitung in den als "Erhöht" zusammengefassten geologischen Einheiten $25\% \pm 4\%$ beträgt, in den als „Auffällig“ kategorisierten Einheiten $10 \pm 1\%$; und in den als „Unauffällig“ klassifizierten Einheiten $3\% \pm 0,5\%$. Die größte Variabilität weist dabei mit 4% die Klasse „Erhöht“ auf, was sich grundsätzlich mit dem relativ kleinen Anteil an Gebäuden von 10% an der Gesamtanzahl an untersuchten Häusern erklären lässt.

Verifizierung der Ausweisung der Radonvorsorgegebiete anhand von Daten aus Kellerräumen

Im BfS-Bericht zur Prognose des geogenen Radonpotentials in Deutschland und der Ableitung eines Schwellenwertes zur Ausweisung von Radonvorsorgegebieten (BOSSEW, 2018) erfolgte eine Erweiterung der dort verwendeten Messdaten durch eine rechnerische Normierung von Datensätzen, die von der Referenzsituation abweichen, wie z. B. durch Skalierung von Messdaten aus höheren Etagen.

Tabelle 8: Skalierung von Datensätzen aus verschiedenen Literaturquellen sowie von Messdaten aus dem Datenbestand von Messprogrammen des Freistaates Sachsen. Die arithmetischen Mittelwerte der Radonmessungen in den unterschiedlichen Etagen wurden ins Verhältnis gesetzt.

Datenquelle	Skalierung von Daten aus Kellerräumen auf Räume im Erdgeschoss - Quotient der arithmetischen Mittelwerte	Skalierung von Daten aus Räumen im 1. Obergeschoss auf Räume im Erdgeschoss - Quotient der arithmetischen Mittelwerte	Skalierung von Daten aus Räumen im 2. Obergeschoss auf Räume im Erdgeschoss - Quotient der arithmetischen Mittelwerte
Deutschland, östliche Bundesländer ¹	1,6	0,49	0,43
EU Spain (Madrid) ²		0,67	0,48
Datensatz Nr. 1 ³	1,8	0,62	0,53

1 nach: KEMSKI (2004a)

2: nach: CINELLI (2019)

3: Gesamter Datensatz Nr. 1 - "Prognose zur Radonbetroffenheit von Gebäuden in Sachsen – Kartierung der Überschreitungswahrscheinlichkeit von Referenzwerten"

Im Freistaat Sachsen liegt ebenfalls ein umfangreicher Datensatz von Messungen der Radon-222-Aktivitätskonzentration aus verschiedenen Etagen vor, der zur Verifizierung der Methodik der Ausweisung der Radonvorsorgegebiete näher untersucht wurde. Dabei wurde das Verhältnis ermittelt aus dem Mittelwert der Messungen der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen in verschiedenen Etagen zu den Werten der Messungen im Erdgeschoss. Auch in verschiedenen Literaturquellen sind die Daten der Radonmessungen getrennt nach der Etage der Messungen ermittelt, sowie das Verhältnis der statistischen Kennwerte abgebildet. In der Tabelle 8 sind die Quotienten der Messungen unterschiedlicher Etagen bezogen auf die Erdgeschossdaten aus weiteren Literaturquellen sowie Messdaten aus dem Datensatz Nr. 1 aus dem Messprogramm zur Prognose zur Radonbetroffenheit von Gebäuden in Sachsen zusammengefasst.

Die Tabelle 8 zeigt, dass eine Normierung von verschiedenen Datensätzen aus unterschiedlichen Quellen, die nicht der Referenzsituation entsprechen, in etwa vergleichbare Skalierungsfaktoren ergibt. Eine Umrechnung von z. B. Messdaten aus Kellerräumen (z. B. Datensatz Nr. 1b - Daten aus Kellerräumen) in Schätzungen für Radonkonzentrationen bezogen auf die Referenzsituation könnte damit grundsätzlich möglich sein, ist aber möglicherweise fehlerbehaftet. Für die Ausweisung der Radonvorsorgegebiete im Freistaat Sachsen wurde die Skalierung von Daten nicht vorgenommen, sie soll hier jedoch der Verifizierung der Methodik dienen.

Bei der separaten Auswertung des Datensatzes Nr. 1b - Daten aus Kellerräumen zeigte sich eine dem Datensatz der Referenzsituation (Datensatz Nr. 1a) vergleichbare Korrelation der durchschnittlichen Referenzwertüberschreitungshäufigkeit mit dem Median der Radon-222-Aktivitätskonzentration zugeordnet zu den geologischen Einheiten (Abbildung 16, vgl. auch mit Abbildung 15). Der Median der Radon-222-Aktivitätskonzentration in den Kellerräumen ist in den geologischen Einheiten, die als "Unauffällig" zusammengefasst sind (grüne Symbole) am geringsten, sowie in den als "Erhöht" klassifizierten geologischen Einheiten (rote Symbole) am höchsten. Mit zunehmendem Median der Radon-222-Aktivitätskonzentration steigt auch die Häufigkeit der Überschreitung des Referenzwertes von 300 Bq/m³ in den Kellerräumen. Die absoluten Werte der Mediane sowie der Referenzwertüberschreitungshäufigkeiten sind wie erwartet im Keller deutlich erhöht im Vergleich zu den Daten aus den Räumen im Erdgeschoss (Referenzsituation, vgl. Abbildung 15).

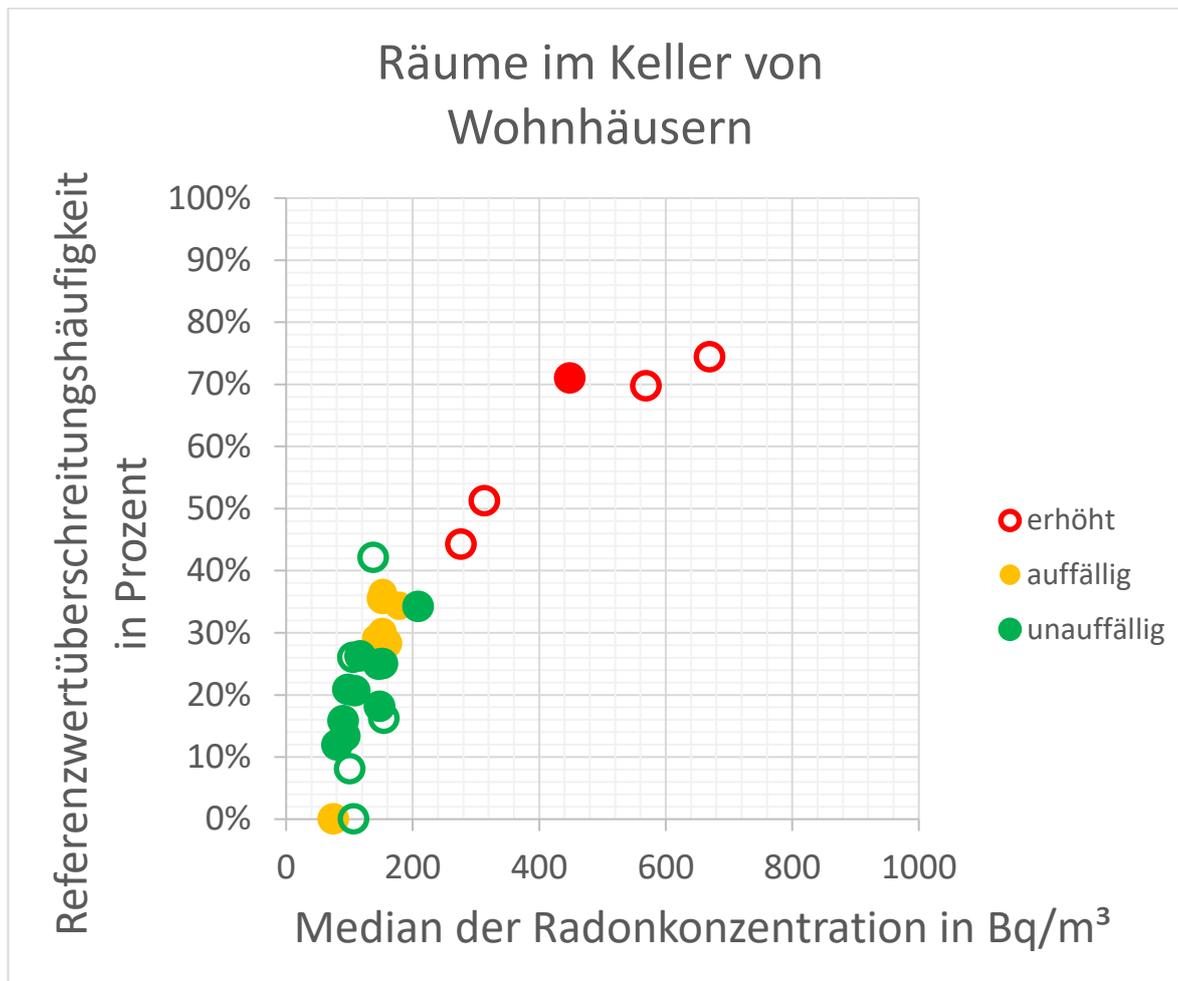


Abbildung 16: Zusammenhang von Median der Radon-222-Aktivitätskonzentration und Referenzwert-überschreitungshäufigkeit unterteilt nach Kategorie der geologischen Einheit für Innenräume im Keller von Wohnhäusern (Datensatz Nr. 1b - gefilterte Daten aus Kellerräumen).

Berechnet man die Überschreitungshäufigkeiten im Keller für eine Radonkonzentration von 700 oder 800 Bq/m³, so ergeben sich in etwa vergleichbare Überschreitungshäufigkeiten wie die Überschreitungshäufigkeit des Referenzwertes von 300 Bq/m³ aus dem Datensatz Nr. 1a der Räume im Erdgeschoss, was einer ca. 2,5fach höheren Radon-222-Aktivitätskonzentration in den Kellerräumen im Vergleich zu den Räumen im Erdgeschoss aus Datensatz Nr. 1a entspricht. Dieses Verhältnis entspricht näherungsweise den in Tabelle 8 dargestellten Quotienten von 1,6 bzw. 1,8. Somit stützt die Auswertung der Daten aus den Kellerräumen die Methodik zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete im Freistaat Sachsen aus dem der Referenzsituation entsprechenden Datensatz der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen im Erdgeschoss voll-unterkellerten kleiner Wohngebäude.

Verifizierung der Ausweisung der Radonvorsorgegebiete anhand von Daten aus Schulen und anderen Erziehungs- und Bildungseinrichtungen, sowie von Arbeitsplätzen und öffentlichen Gebäuden

Weitere Daten der Radon-222-Aktivitätskonzentrationen in Innenräumen liegen aus verschiedenen Messprogrammen zur Erfassung der Radonsituation in öffentlichen Gebäuden in kommunaler Trägerschaft (Datensatz Nr. 4), in Schulen und anderen Erziehungs- und Bildungseinrichtungen (Datensatz Nr. 5), sowie von Arbeitsplätzen in Dienstgebäuden in den nachgeordneten Behörden des sächsischen Staatsministeriums für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft (Datensatz Nr. 6) vor (vgl. Tabelle 2 im Kapitel 4.3.2). Die untersuchten Räume in diesen Messprogrammen weichen in der Regel von der im BFS-Bericht zur Prognose des geogenen Radonpotentials in Deutschland und der Ableitung eines Schwellenwertes zur Ausweisung von Radonvorsorgegebieten vorgeschlagenen Referenzsituation eines Aufenthaltsraumes im Erdgeschoss eines voll-unterkellerten kleinen Hauses ab (Bossew, 2018), weshalb diese Daten nicht direkt zum Datenbestand zur Ausweisung der

Radonvorsorgegebiete hinzugefügt werden. Außerdem unterliegen Schulen, Arbeitsplätze und öffentliche Gebäude einer von einem bewohnten Einfamilienhaus abweichenden Nutzung mit teilweise längeren Schließzeiten über Nacht, über die Wochenenden bzw. in Urlaubs- und Ferienzeiten. Trotzdem können diese Daten zur Plausibilisierung der Vorgehensweise zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete im Freistaat Sachsen beitragen.

Abhängigkeit der Referenzwertüberschreitungshäufigkeit von der Größe des Gebäudes

In kleinen Wohngebäuden, wie z. B. Einfamilienhäusern kann davon ausgegangen werden, dass sich die Radon-222-Aktivitätskonzentration in den Aufenthaltsräumen einer Etage kaum unterscheidet. Deshalb wird in der DIN-ISO NORM 11665-8 zur Erstbewertung der Radonsituation in einem Gebäude die Etage eines Wohnhauses auch zu einem sogenannten Konformitätsbereich zusammengefasst. Die Radonkonzentration in den Etagen innerhalb eines kleinen Gebäudes lässt sich auf die Referenzsituation nach BOSSEW (2018) zurückführen (vgl. Tabelle 8). Große Gebäude können jedoch deutliche Unterschiede der Radon-222-Aktivitätskonzentrationen in verschiedenen Räumen innerhalb einer Etage aufweisen, es existieren innerhalb einer Etage oft mehrere Konformitätsbereiche. Dies können Gebäudeteile mit unterschiedlicher Art der Unterkellerung oder der Nutzung sein, oder z. B. durch Brandschutzabschnitte oder Bauabschnitte getrennte Bereiche. Für die Ausbreitung von Radon in einem großen Gebäude sind die Konformitätsbereiche somit zunächst unabhängig voneinander zu betrachten.

Bei der Auswertung des gesamten Datensatzes aus dem Messprogramm "Radonmessungen in Schulen und anderen Erziehungs- und Bildungseinrichtungen" (Datensatz Nr. 5, Tabelle 2) zeigt sich jedoch eine Korrelation der mittleren Überschreitungshäufigkeit des Referenzwertes von 300 Bq/m^3 in mindestens einem Raum im untersuchten Gebäude mit der Anzahl der verteilten Exposimeter und somit bei etwa feststehenden Verteilungsschlüssel eine Abhängigkeit der Überschreitungshäufigkeit von der Größe des Gebäudes (Abbildung 17).

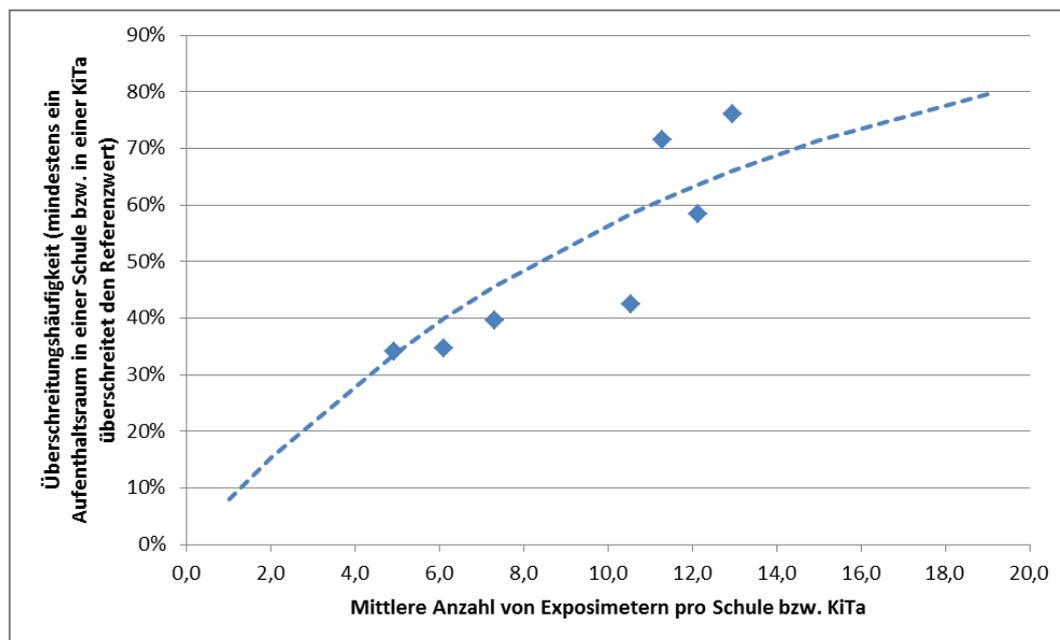


Abbildung 17: Abhängigkeit der Überschreitungshäufigkeit des Referenzwertes in mindestens einem Raum in einer Schule oder einer anderen Erziehungs- und Bildungseinrichtung von der mittleren Anzahl der ausgelegten Exposimeter

Daraus folgt, dass wenn eine Etage aus zwei oder mehr Konformitätsbereichen besteht, damit die Wahrscheinlichkeit im Vergleich zu einem einzelnen Konformitätsbereich in einer Etage erhöht ist, in einem der Konformitätsbereiche den Referenzwert zu überschreiten. Für die weitere Auswertung wurden deshalb alle Daten von Innenräumen in Erdgeschossen innerhalb eines großen Gebäudes verwendet, während bei Wohngebäuden jeweils ein Exposimeter pro Etage bzw. pro Konformitätsbereich ausgewertet wurde.

Außerdem weisen große Gebäude, insbesondere Schulen oder Kindertagesstätten, oft eine lange Baugeschichte auf, nach ihrer Errichtung folgten häufig weitere Anbauten oder Erweiterungen. Zudem finden sich in den vorhandenen Datensätzen der großen Gebäude auch seltener voll-unterkellerte Gebäude, häufiger vertreten sind dagegen teil- oder nicht-unterkellerte Bauten. Aus diesen Gründen wurde für große Gebäude das Kriterium der Unterkellerung nicht ausgewertet, d. h. die Daten wurden unabhängig von der Art der Unterkellerung des Gebäudes betrachtet und eine Normierung der Daten auf die Referenzsituation wurde nicht durchgeführt.

Aufgrund dieser Voraussetzungen und Festlegungen war zu erwarten, dass die ermittelten Überschreitungshäufigkeiten des Referenzwertes in dem vorliegenden Datensatz der Schulen und anderen Erziehungs- und Bildungseinrichtungen, den Arbeitsplätzen sowie den öffentlichen Gebäuden (Datensätze Nr. 4 - 6) größer sind als in den Datensätzen in den Innenräumen, die der Referenzsituation entsprechen, da Daten von nicht- und teil-unterkellerten Gebäuden und Gebäudeteilen im Datensatz enthalten sind. Außerdem wurden höhere Mediane der Radon-222-Aktivitätskonzentration aufgrund der besonderen Nutzungsbedingungen im Vergleich zu kleinen Wohngebäuden erwartet.

In der Abbildung 18 ist der Zusammenhang von Median und Referenzwertüberschreitungshäufigkeit entsprechend der Klassifikation der geologischen Einheit in den weiteren Datensätzen in Räumen im Erdgeschoss von Schulen und anderen Erziehungs- und Bildungseinrichtungen, Arbeitsplätzen sowie öffentlichen Gebäuden dargestellt.

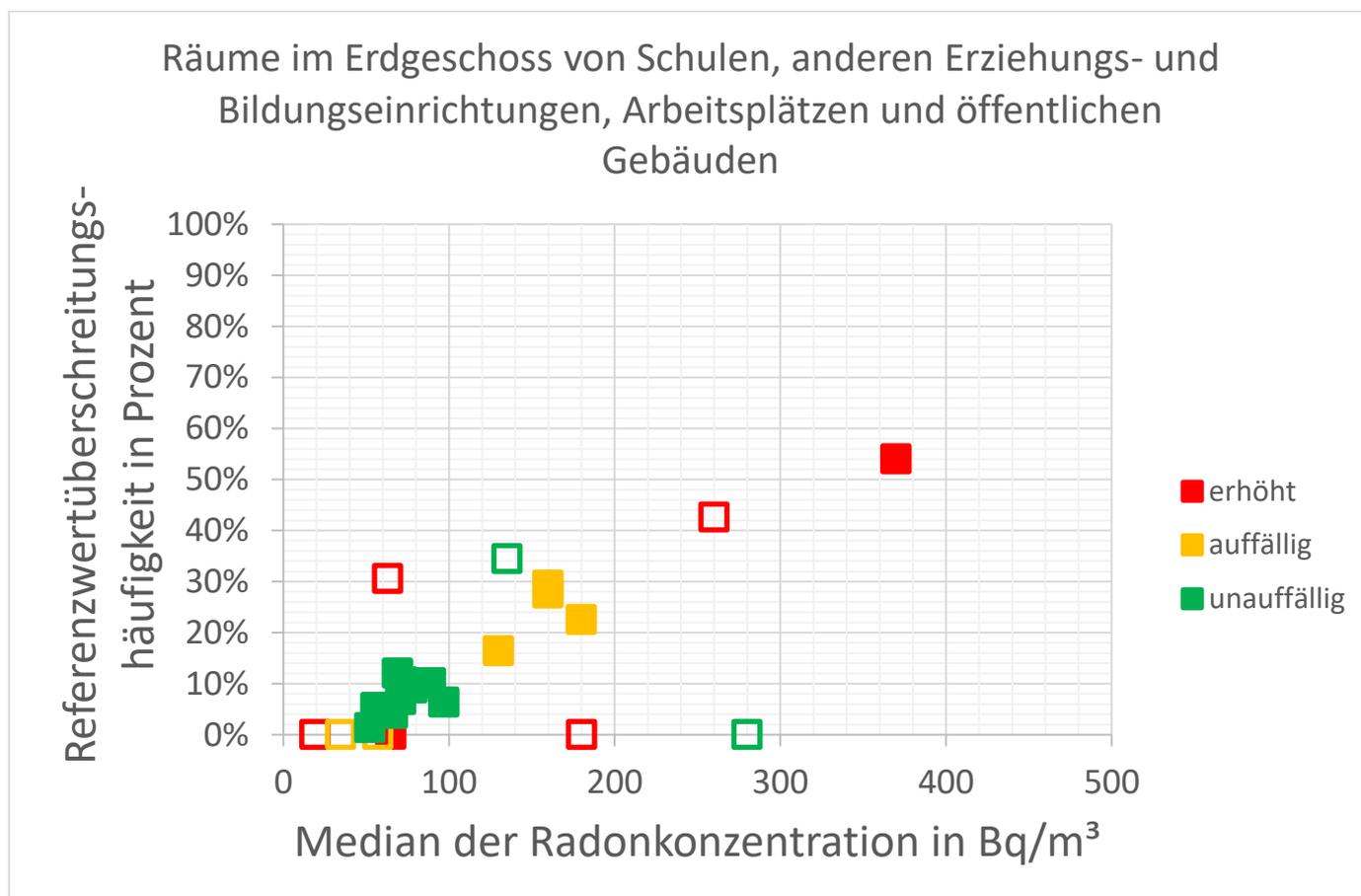


Abbildung 18: Zusammenhang von Median der Radon-222-Aktivitätskonzentration und Referenzwertüberschreitungshäufigkeit unterteilt nach Kategorie der geologischen Einheit für Innenräume im Erdgeschoss großer Gebäude

Im Allgemeinen ergibt sich in der Auswertung der Datensätze großer Gebäude, wie Schulen und anderen Erziehungs- und Bildungseinrichtungen, Arbeitsplätzen und öffentlichen Gebäuden ein vergleichbares Bild wie bei der Auswertung der Datensätze, die der Referenzsituation entsprechen (vgl. Abbildung 15). Auch bei den großen Gebäuden zeigt sich tendenziell eine Zunahme der Mediane der Radon-222-Aktivitätskonzentration in den Innenräumen sowie der Referenzwertüberschreitungshäufigkeit in den als "Auffällig" und "Erhöht" klassifizierten

geologischen Einheiten, allerdings in einem stärkeren Maße als bei dem Datensatz der Räume im Erdgeschoss kleiner voll-unterkellertes Wohngebäude. Dies war auch aufgrund der Selektion in diesem Datensatz sowie der besonderen Nutzungsbedingungen zu erwarten. Auch wenn die absoluten Ergebnisse der betrachteten Datensätze nicht in die Ausweisung der Radonvorsorgegebiete im Freistaat Sachsen einfließen, bestätigen sie dennoch prinzipiell das Vorgehen und die Methodik.

5 Ermittlung der Radonvorsorgegebiete

Nach der Auswertung des Datenbestandes der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft und in Innenräumen und der Zuordnung der Daten zu den 32 geologischen Einheiten im Freistaat Sachsen nach der GK 200 vereinfacht wurden die Flächenanteile der geologischen Einheiten in den sächsischen Gemeinden ermittelt. Die Daten zu den Gemeinden im Freistaat Sachsen stammen aus der Veröffentlichung GEMEINDEN UND GEMEINDETEILE IM FREISTAAT SACHSEN - GEBIETSTAND: 1. JANUAR 2020 – VZ GEMEINDE – J/20 des Statistischen Landesamtes des Freistaates Sachsen. Diese Daten sind über die Gemeindekennziffer mit den Geoinformationsdaten des Staatsbetriebes Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN) in Form der sachsenweiten Polygone der Verwaltungseinheiten verknüpfbar. Sie sind Teil der INSPIRE DATEN des Freistaates Sachsen.

Die Gemeinden bilden die Verwaltungseinheit sechster Ordnung und damit die feinste Gliederung. Stadt- oder Gemeindeteile werden nicht abgebildet und auch nicht zur Auswertung im Rahmen der Ausweisung der Radonvorsorgegebiete im Freistaat Sachsen herangezogen. Den Gemeinden sind die Attribute der Klassifikation der Gemeinde (Landeshauptstadt, kreisfreie Stadt, Große Kreisstadt, Stadt, Gemeinde) und, wenn zutreffend, die Zugehörigkeit zu einer Verwaltungseinheit (Verwaltungsgemeinschaften, Verwaltungsverbände, Einheitsgemeinden) zugeordnet.

In den vorhergehenden Kapiteln wurde der Zusammenhang zwischen der Wahrscheinlichkeit der Überschreitung des Referenzwertes von 300 Bq/m^3 und den Radon-222-Aktivitätskonzentrationen in der Bodenluft dargestellt. Der Quantilsrang von 40 kBq/m^3 wurde dabei als geeigneter Parameter identifiziert, der die geologische Einheit charakterisiert und ebenfalls eine Prognose der Referenzwertüberschreitungshäufigkeit der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen ermöglicht. Der Zusammenhang der Referenzwertüberschreitungshäufigkeit gemittelt über mehrere geologische Einheiten und dem Quantilsrang von 40 kBq/m^3 wird in Abbildung 19 dargestellt.

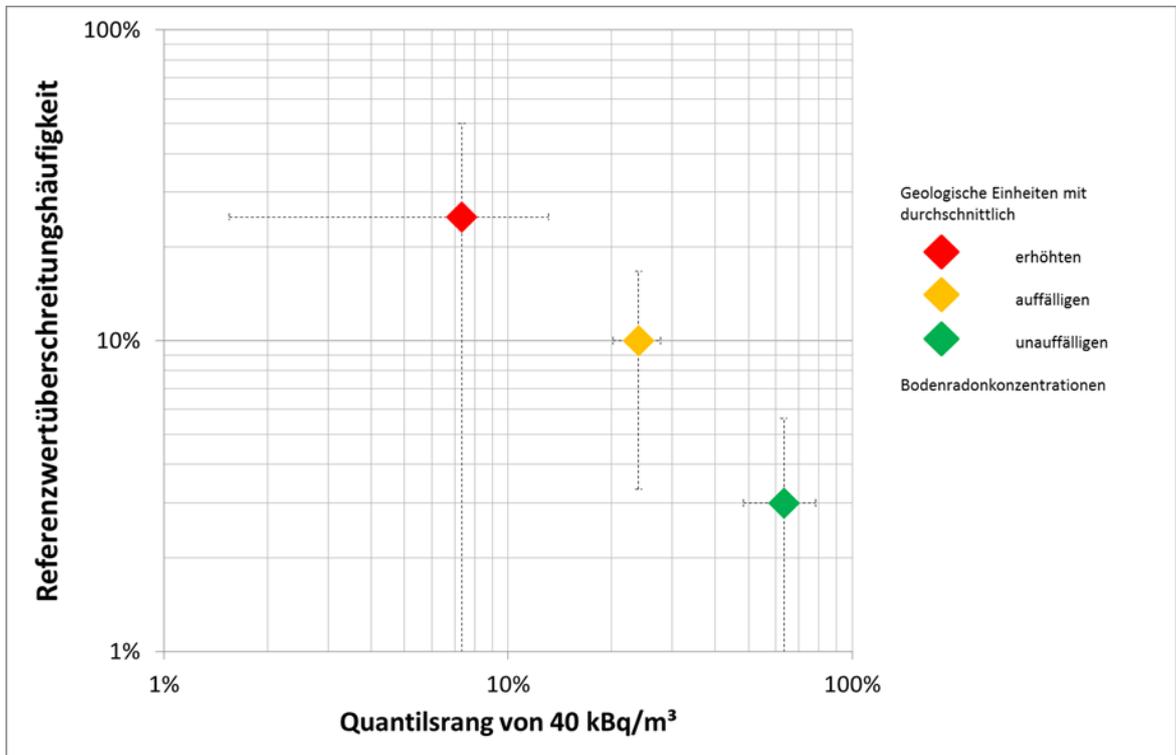


Abbildung 19: Zusammenhang des Quantilsrang von 40 kBq/m³ und der Referenzwertüberschreitungshäufigkeit, gemittelt über mehrere geologische Einheiten.

In den als "Unauffällig" kategorisierten geologischen Einheiten wurde ein durchschnittlicher Quantilsrang von 40 kBq/m³ von ca. 60 % mit einer Überschreitungshäufigkeit des Referenzwertes von ca. 3 % ermittelt, während in den als "Auffällig" eingestuften geologischen Einheiten der QR40 durchschnittlich ca. 25 % und die Referenzwertüberschreitungshäufigkeit ca. 10 % betragen. Die als "Erhöht" klassifizierten geologischen Einheiten weisen im Mittel einen Quantilsrang von 40 kBq/m³ von unter 10 % auf sowie eine Häufigkeit der Überschreitung des Referenzwertes von etwa 25 % (Abbildung 19). Somit wird der QR40 der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft zur Bewertung der Flächenanteile von geologischen Einheiten in Gemeinden zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete im Freistaat Sachsen eingesetzt.

Die Flächenanteile der zu den Kategorien "Unauffällig", "Auffällig" und "Erhöht" zusammengefassten geologischen Einheiten innerhalb der einzelnen sächsischen Gemeinden wurden addiert. Nach dem § 153 Absatz 2 der STRLSCHV sind Radonvorsorgegebiete auszuweisen, wenn auf 75 % der Fläche einer Verwaltungseinheit aufgrund der Prognosen in mindestens 10 % der Gebäude der Referenzwert überschritten wird. Aus den Auswertungen der Datensätze wurde deutlich, dass in den geologischen Einheiten, die in den Kategorien "Auffällig" und "Erhöht" zusammengefasst wurden, in mehr als 10 % bzw. 25 % der Gebäude eine Referenzwertüberschreitung festzustellen ist. Liegt der Flächenanteil der Klassen "Auffällig" oder "Erhöht" innerhalb einer Gemeinde bei mehr als 75 %, ist diese Gemeinde als Radonvorsorgegebiet auszuweisen. In der Abbildung 20 ist die Entscheidung zur Ausweisung einer Gemeinde als Radonvorsorgegebiet schematisch verdeutlicht. In der Abbildung sind als "Auffällig" klassifizierte Flächen orange gekennzeichnet, die als "Unauffällig" kategorisierten hingegen grün.



Abbildung 20: Schematische Darstellung der Entscheidung zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete. Beträgt der Anteil der als "Auffällig" kategorisierten Flächen (orange Elemente) mehr als 75 %, erfolgt die Ausweisung als Radonvorsorgegebiet.

Wie in Kapitel 4.5 dargelegt wurde, ergibt sich in den geologischen Einheiten, die als "Erhöht" klassifiziert wurden, im Mittel eine Wahrscheinlichkeit der Überschreitung des Referenzwertes von 300 Bq/m³ von ca. 25 %. Diese Flächen spielen also eine besondere Rolle bei der Prognose zur Überschreitungswahrscheinlichkeit des Referenzwertes, da hier eine besonders große Anzahl von Gebäuden mit hohen Radonkonzentrationen erwartet wird, wie in Abbildung 21 schematisch dargestellt ist. In dieser Abbildung sind die als "Unauffällig" klassifizierten Flächen ebenfalls grün dargestellt, die als "Auffällig" kategorisierten in orange, sowie die als "Erhöht" eingestuft Gebiete mit roten Elementen.

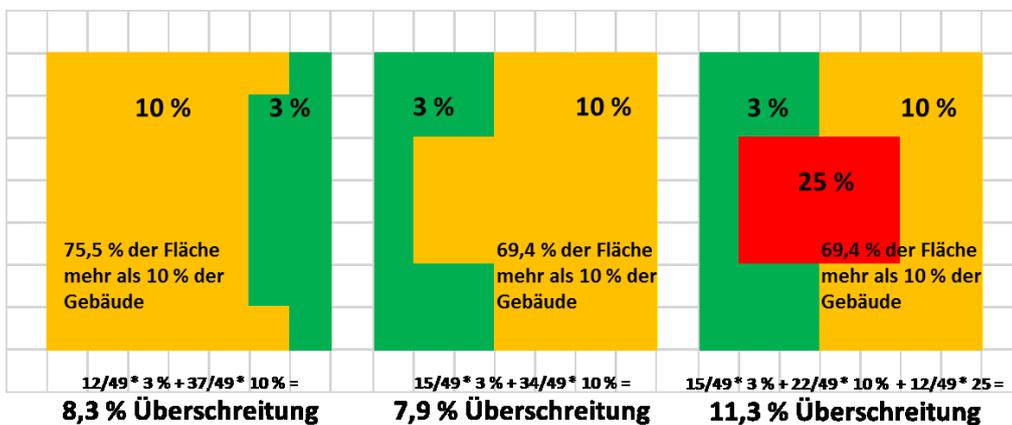


Abbildung 21: Schematische Darstellung des Einflusses der als "Erhöht" klassifizierten Flächen (rote Elemente) auf die Überschreitungswahrscheinlichkeit ermittelt über die gesamte Gemeindefläche.

In der Abbildung 21 wird im linken Bild in mehr als 75 % der Fläche in mehr als 10 % der Gebäude die Überschreitung des Referenzwertes prognostiziert, dieses Gebiet ist als Radonvorsorgegebiet auszuweisen. Sowohl im mittleren als auch im rechten Bild der Abbildung ist der gesamte Flächenanteil der als "Auffällig" und "Erhöht" gekennzeichneten geologischen Einheit jedoch kleiner als 75 %, aber aufgrund des deutlichen Anteils an als "Erhöht" charakterisierten geologischen Einheiten ist hier von einer deutlich erhöhten Überschreitungshäufigkeit des Referenzwertes in Gebäuden für die gesamte Gemeindefläche in der rechten Abbildung auszugehen. Ein Hinweis auf das Vorliegen solcher Bedingungen kann abgeleitet werden, wenn die Überschreitungswahrscheinlichkeit ermittelt über die gesamte Gemeindefläche größer 8,25 % beträgt. Dieser Wert leitet sich aus

der Annahme von einem Flächenanteil von 75 % mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10 % und einem Flächenanteil von 25 % mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 3 % (bundesdeutsches Mittel für als "unauffällig" klassifizierte Flächen) ab ($100\%; 75\% * 10\% + 25\% * 3\% = 8,25\%$).

In Sachsen gibt es entsprechende Gebiete mit geologischen Einheiten, in denen wegen ihrer Klassifizierung als "Erhöht" besonders häufig mit Überschreitungen des Referenzwertes zu rechnen ist, jedoch die Vorhersage nicht für 75 % der Fläche getroffen werden kann. In diesen Gebieten gilt die Annahme, dass Messungen und Maßnahmen erforderlich sind, da trotz der Unterschreitung der Gebietsfläche von 75 % bei einer beträchtlichen Zahl von Aufenthaltsräumen und Arbeitsplätzen in Innenräumen mit einer Überschreitung der Referenzwerte nach § 124 STRLSCHG oder § 126 STRLSCHG zu rechnen ist. Dies betrifft die Gemeinden Kreischa, Stadt Bad Gottleuba-Berggießhübel, Stadt Flöha, Stadt Freital und Stadt Tharandt. Bei vier von fünf der Gemeinden ist dabei praktisch ausschließlich, in der fünften Gemeinde anteilig (Bad Gottleuba-Berggießhübel), die geologische Einheit „Saure Vulkanite mit hohem Tuffanteil“, in der erhöhte Urankonzentrationen und infolge dessen auch erhöhte Radonkonzentrationen auftreten, für die Einordnung verantwortlich. Diese geologische Einheit umfasst nur ca. 200 km² und tritt häufig und meist in schmalen Streifen im Übergangsbereich vom Erzgebirge zu angrenzenden Regionen auf.

Die Auswirkung der vorstehend beschriebenen Vorgehensweise wird in Abbildung 22 schematisch veranschaulicht, die als "Erhöht" klassifizierte Flächen werden dabei als rote Flächen dargestellt.



Abbildung 22: Schematische Darstellung der Entscheidung zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete, wenn als "Erhöht" klassifizierte Flächen in einer Gemeinde vorkommen.

5.1 Karte der als Radonvorsorgegebiete ausgewiesenen Gemeinden

Die Bewertung der Flächenanteile der Gemeinden im Freistaat Sachsen führte zur Feststellung der Gemeinden, die ab 31.12.2020 als Radonvorsorgegebiete nach § 121 STRLSCHG ausgewiesen werden. In Abbildung 23 ist die Ausweisung der Gebiete in einer Karte dargestellt. Im Anhang in Tabelle 12 ist eine Liste der sächsischen Gemeinden geordnet nach Landkreisen zu finden, die als Radonvorsorgegebiete ausgewiesen wurden.

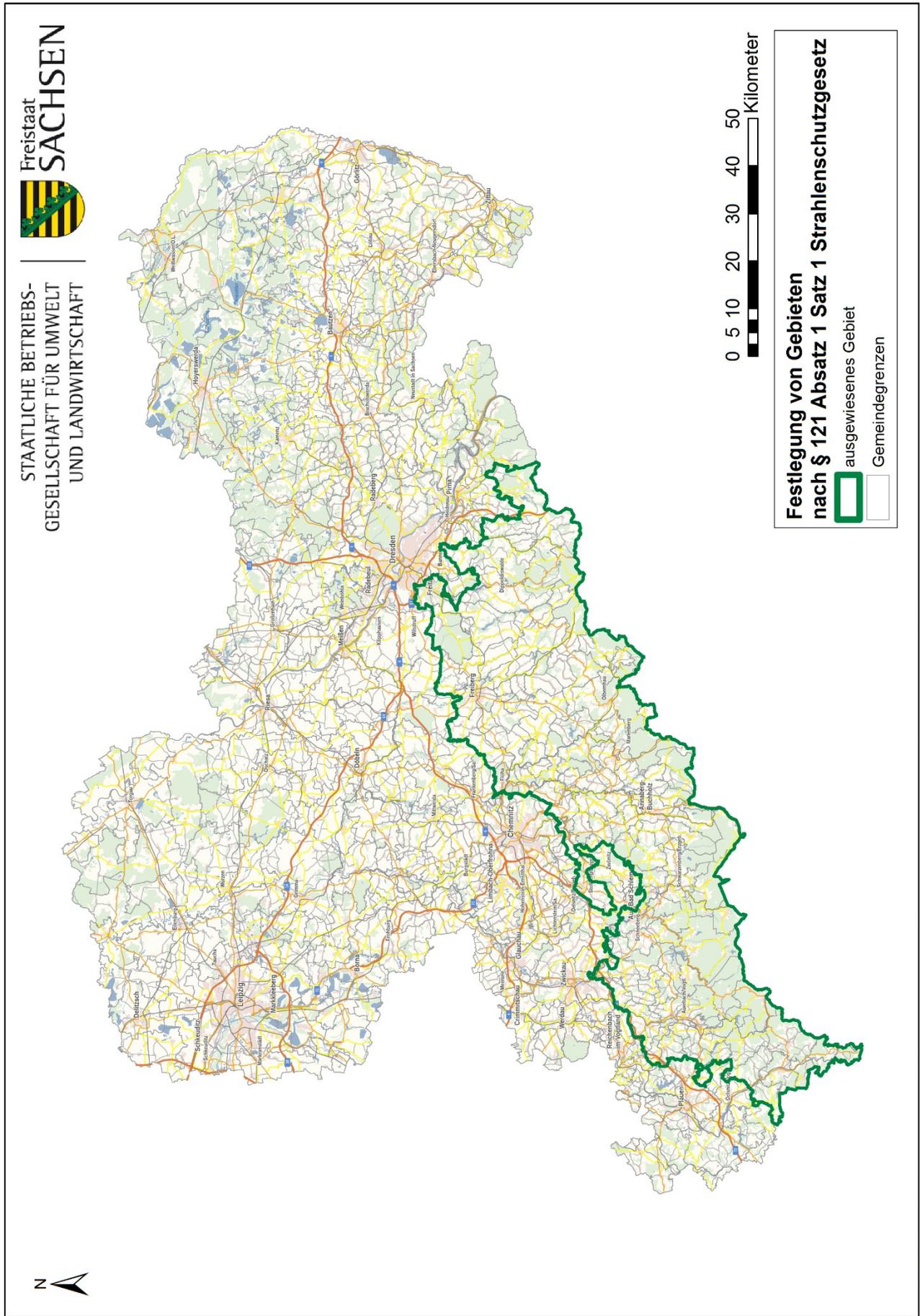


Abbildung 23: Karte der nach § 121 STRAHLENSCHUTZGESETZ ausgewiesenen Gebiete im Freistaat Sachsen.

5.2 Vergleich der Methodik der Ausweisung der Radonvorsorgegebiete mit der Methodik des Bundesamtes für Strahlenschutz nach BOSSEW (2018) und PETERMANN (2019)

In der Veröffentlichung des BfS zur Prognose des geogenen Radonpotentials in Deutschland und der Ableitung eines Schwellenwertes zur Ausweisung von Radonvorsorgegebieten (BOSSEW, 2018) wurde eine Karte in einer 10 x 10 km Rasterauflösung erzeugt. Dabei ist grundsätzlich eine gute Übereinstimmung der Schätzungen des BfS mit der im Freistaat Sachsen ermittelten Gebiete, die als Radonvorsorgegebiete ausgewiesen werden, festzustellen (Abbildung 24).

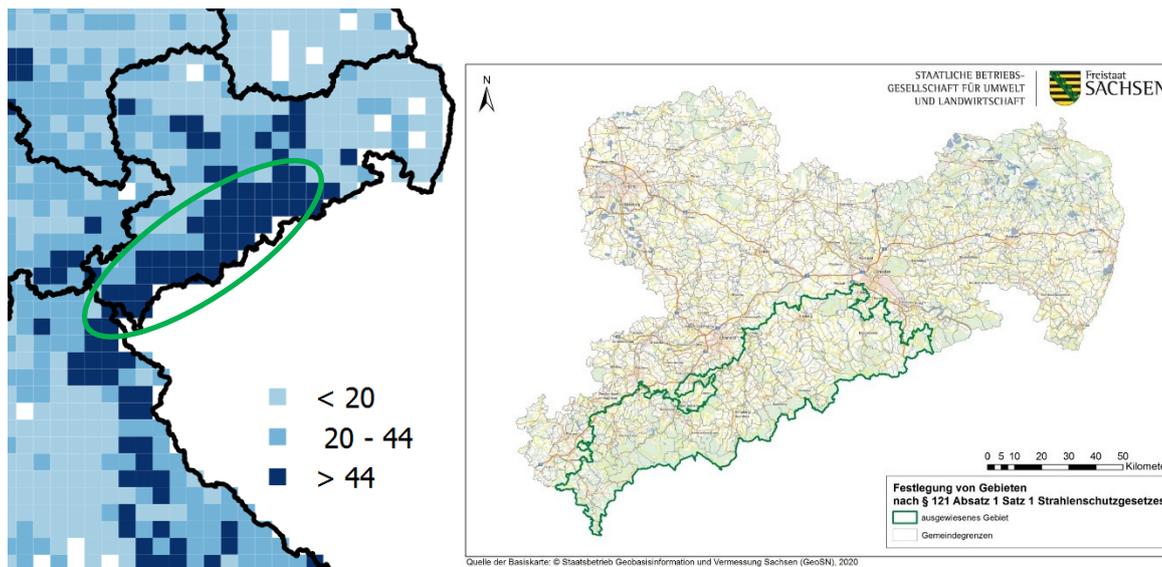


Abbildung 24: Vergleich des Modells der Prognose des geogenen Radonpotentials in Deutschland nach BOSSEW (2018) und der Ausweisung von Radonvorsorgegebieten im Freistaat Sachsen.

Es ist außerdem ein deutlicher Zusammenhang zur Karte der Erwartungswerte der Bodenradonkonzentration im Freistaat Sachsen nach KEMSKI (2010) festzustellen, jedoch bietet die Karte nach BOSSEW (2018) insbesondere in den geologisch vielgestaltigen Mittelgebirgsregionen des Freistaates Sachsen und im Übergangsbereich eine zu geringe Auflösung, was naturgemäß zu Abweichungen führt.

Weitere Modellrechnungen des BfS (PETERMANN, 2019) auf Grundlage eines Machine Learning-Verfahrens ergeben Darstellungen, die eine starke Übereinstimmung mit der sächsischen Karte der Radonvorsorgegebiete aufweisen (Abbildung 25).

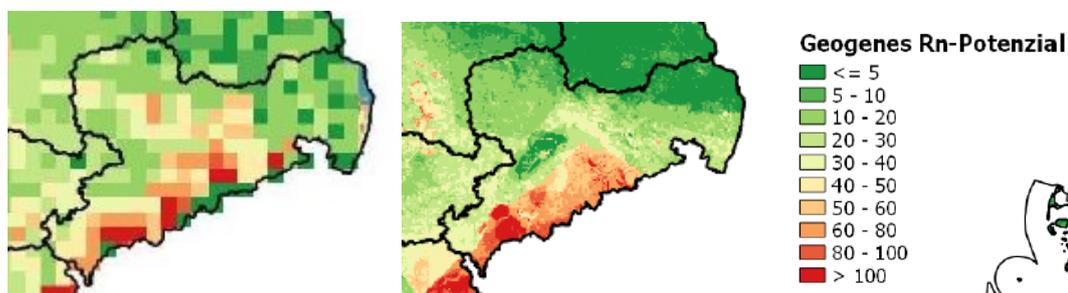


Abbildung 25: Kartenausschnitt des geogenen Radonpotentials nach PETERMANN (2019): Links: geostatistische Karte mit 10 x 10 km Auflösung; Rechts: Kartenmodell nach einem Machine Learning-Verfahren mit einer 1 x 1 km Auflösung.

Insbesondere die neueren Modellrechnungen des BfS (Abbildung 25), die sich derzeit jedoch noch in der Entwicklung befinden, ergeben eine gute Übereinstimmung der auszuweisenden Gebiete mit der Karte der Radon-

vorsorgegebiete des Freistaates Sachsen, und können möglicherweise zur Einschätzung der Unsicherheiten der verschiedenen Ansätze zur Prognose der Gebiete mit erhöhten Wahrscheinlichkeiten der Überschreitung des Referenzwertes dienen.

5.3 Robustheit der angewendeten Methodik zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete

Für die Abschätzung der Robustheit der für die Ausweisung der Gebiete nach § 121 STRLSCHG im Freistaat Sachsen angewendeten Methode wurden verschiedene Parameter im vorliegenden Modell variiert. Eine ausführliche Diskussion der Variationen findet sich in den vorherigen Kapiteln, im Folgenden sind die wichtigsten Aussagen zusammenfassend dargestellt:

- Eine Veränderung der selektierten Daten der vorhandenen Datensätze der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen zur Ermittlung der Referenzwertüberschreitungshäufigkeit in den als "Erhöht" kategorisierten geologischen Einheiten führt zu einer Variation zwischen 23 % und 27 % (vgl. Kapitel 4.5.3). Dies führt jedoch in keiner der sächsischen Gemeinden zu einer veränderten Einstufung bezüglich der Ausweisung als Radonvorsorgegebiet.
- Die Auswirkung einer veränderten Klassifizierung einzelner geologischer Einheiten anhand geringerer Gaspermeabilitäten im Boden kann am Beispiel „Dolomite, Schiefertone (Zechstein)“ veranschaulicht werden: die Gaspermeabilitäten sind hier eher als "mittel" und nicht als "hoch" einzuschätzen. Damit wäre nach Gleichung 1 ein geringeres Radonpotential verbunden im Vergleich zum Zahlenwert der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft. Auch die ermittelten Referenzwertüberschreitungen sind eher als niedrig einzuschätzen. Damit wäre auch eine Einstufung dieser geologischen Einheit als "Unauffällig" denkbar. Eine solche Umklassifizierung würde jedoch ebenfalls in keiner der sächsischen Gemeinden zu einer anderen Einschätzung im Hinblick auf die Gebietsausweisung führen, da die entsprechenden Flächenanteile in den Gemeinden sehr niedrig sind.
- Eine Klassifizierung der geologischen Einheit „Biotitgranodiorit, Meissner Massiv“ als „Erhöht“ anstelle der erfolgten Einstufung als "Auffällig" (vgl. Kapitel 4.4.2) würde zu einer Auswirkung in Gemeinden mit größeren Flächenanteilen dieser geologischen Einheit, z. B. im Raum Meißen führen. Neben den geringen Referenzwertüberschreitungshäufigkeiten spricht aber auch der Vergleich mit der geologisch sehr ähnlichen Einheit „Monzonitoide, Syenodiorite“ dafür, die Kategorisierung wie beschrieben als „Auffällig“ vorzunehmen.

5.4 Diskussion einzelner Gemeinden

Beim Vergleich der Karte der Erwartungswerte der Radonkonzentration in der Bodenluft (Kemski, 2010) und der Karte der Radonvorsorgegebiete des Freistaates Sachsen sind Gebiete zu erkennen, die zwar in der Karte nach Kemski (2010) mit roten Rasterquadraten herausragen, jedoch keine Einstufung als Radonvorsorgegebiet erfahren. Dies betrifft im Einzelnen die Gemeinden Arzberg (Landkreis Nordsachsen), Grimma (Landkreis Leipzig) und Großschönau (Landkreis Görlitz).

In den Gemeinden Arzberg und Grimma befinden sich sehr wenige Messpunkte und es wurde jeweils ein einzelner Messpunkt mit einer Bodenradonkonzentration von knapp über 100 kBq/m³ festgestellt. Wie im Kapitel 4.4.1 ausführlich beschrieben und im speziellen für die Gemeinde Arzberg nachgewiesen, führt eine geringe Messwertdichte zu Artefakten aufgrund des angewendeten Berechnungsmodells der abstandsgewichteten Interpolation der Messwerte. Die Verwendung der statistischen Kenngrößen der Messwerte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft, wie in der Auswertung zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete im Freistaat Sachsen erfolgt, führt im Vergleich dazu zu einer genaueren und statistisch bestätigten Bewertung der geologischen Einheiten.

In der Gemeinde Großschönau wird der rote Farbeindruck in der Karte der Erwartungswerte der Radonkonzentration in der Bodenluft durch zwei Messpunkte mit knapp über 100 kBq/m³ der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft in der geologischen Einheit "Granodiorit" hervorgerufen. Diese hohen Werte gehören zu den Maximalwerten des gesamten Datenbestandes der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft in dieser geologischen Einheit. Der Flächenanteil dieser als „Unauffällig“ eingestuften Einheit beträgt in der Gemeinde Großschönau ca. 39 %. Als "Auffällig" klassifiziert erscheinen in der Gemeinde noch ca. 5 % Flächenanteil der geologischen Einheit "Orthogneise". Selbst bei einer lokal veränderten Einstufung der geologischen Einheit "Granodiorite" in diesem Gebiet wären damit die Kriterien für eine Ausweisung als Radonvorsorgegebiet der Gemeinde Großschönau trotz der prominent wirkenden roten Fläche in der Karte der Erwartungswerte der Radonkonzentration in der Bodenluft nicht erreicht.

In einigen Gemeinden, die an ein Radonvorsorgegebiet nach der Karte des Freistaates Sachsen angrenzen und in der Karte der Erwartungswerte der Radonkonzentration in der Bodenluft mit orangen Rasterquadraten bezeichnet sind (Radonkonzentration von 41 - 100 kBq/m³ in der Bodenluft), werden die Kriterien zur Ausweisung als Radonvorsorgegebiet nicht erreicht. Dies betrifft die Gemeinden Zwönitz (Erzgebirgskreis); Roßwein, Strieglitz, Waldheim, Kriebstein, Reinsberg (Landkreis Mittelsachsen); Wilsdruff (Landkreis Sächsische Schweiz – Osterzgebirge); sowie Klipphausen, Niederau und Moritzburg (Landkreis Meißen).

In diesen Gemeinden befinden sich jeweils entweder große Flächenanteile der geologischen Einheiten „Grauwacken, Tonschiefer“ bzw. „Löss, Lösslehm“ oder große Flächenanteile der geologischen Einheiten „Biotitgranodiorit, Meissner Massiv“ (Gemeinde Niederau) bzw. „Monzonitoide, Syenodiorite“ (Gemeinde Moritzburg). Die Einheiten „Grauwacken, Tonschiefer“ bzw. „Löss, Lösslehm“ weisen in den Messdaten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft einen QR40 von 41 % bzw. 47 % und einen Median von 45 bzw. 43 kBq/m³ (vgl. Tabelle 10 im Anhang) auf. Diese Medianwerte führen in der Karte der Erwartungswerte der Radonaktivität in der Bodenluft mehrheitlich zu orangen oder roten Rasterelementen. Daher entsteht in der gesamten Fläche dieser Gebiete eher ein orangener statt grüner Farbeindruck, obwohl die statistische Auswertung der Kenndaten dazu führt, dass diese geologischen Einheiten als "Unauffällig" klassifiziert sind.

Die geologischen Einheiten „Biotitgranodiorit, Meissner Massiv“ bzw. „Monzonitoide, Syenodiorite“ gehören zu den als "Auffällig" klassifizierten Einheiten, die aber jeweils einen großen Anteil von Messpunkten mit mehr als 100 kBq/m³ aufweisen. Wie in Kapitel 4.4.2 beschrieben, erfolgt diese Einstufung, da der jeweilige QR40 der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft dieser geologischen Einheiten noch im Grenzbereich zur Klassifizierung der als „Auffällig“ zusammengefassten geologischen Einheiten liegt, sowie die Auswertung der vorliegenden Daten der Radon-222-Aktivitätskonzentrationen in Innenräumen mit vergleichsweise geringen Medianen und Referenzwertüberschreitungshäufigkeiten diese Einstufung als "Auffällig" rechtfertigt.

Des Weiteren werden einige der sächsischen Gemeinden als Vorsorgegebiete nach § 121 StrlSchG ausgewiesen, die in der sächsischen Karte der Erwartungswerte der Radonkonzentration in der Bodenluft mit vielen grünen Rasterelementen gekennzeichnet waren, d. h. in denen Radon-222-Aktivitätskonzentrationen in der Bodenluft von weniger als 40 kBq/m³ erwartet wurden. Dies betrifft die sächsischen Gemeinden Mühlental (Vogtlandkreis); Lauter-Bernsbach (Erzgebirgskreis); sowie Rechenberg-Bienenmühle, Weißenborn, Lichtenberg und Dorfchemnitz (Landkreis Mittelsachsen). In diesen Gemeinden überwiegen die geologischen Einheiten „Phyllite“, „Grauwacken, Paragneise“ und „Orthogneise“, jedoch weisen diese Gebiete jeweils Messdaten mit niedrigeren Radon-222-Aktivitätskonzentrationen in der Bodenluft im Vergleich zur Gesamtheit der Werte in den geologischen Einheiten auf. Das führte im Berechnungsmodell der abstandsgewichteten Interpolation der Messwerte statistisch betrachtet zu einer Unterschätzung der Radonvorkommens der Gebiete im Vergleich zur Gesamtheit der Messergebnisse. Gemeinden wie Annaberg-Buchholz oder Marienberg (Erzgebirgskreis), die die gleichen geologischen Einheiten aufweisen, verzeichneten dagegen tendenziell höhere Radonkonzentrationen. Da pro Gemeinde in Sachsen meist 2 - 4 Messpunkte vorliegen, ist eine Abschätzung, wie repräsentativ die wenigen Messpunkte in einer Gemeinde sind, insgesamt mit hohen Unsicherheiten verbunden. Der im Freistaat Sachsen zur Ausweisung der Radonvorsorgegebiete gewählte Ansatz geht davon aus, dass solche lokalen Maxima oder Minima der Radon-222-

Aktivitätskonzentrationen in der Bodenluft nicht überbewertet werden sollten, sondern eher die statistische Verteilung der Messwerte für die gesamte geologische Einheit repräsentativ ist. Diese Methodik wurde anhand der Auswertungen zusätzlicher Messpunkte in der Gemeinde Arzberg, sowie anhand der vorliegenden Daten der Bodenradonvergleichsfläche bestätigt (vgl. Kapitel 4.4.1 bzw. 4.4.2).

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Freistaat Sachsen wurde die Ausweisung der Radonvorsorgegebiete auf der Grundlage einer wissenschaftlich basierten Methode unter Zugrundelegung von Messdaten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft sowie in Innenräumen vorgenommen. Die Methode kann in folgenden Schritten beschrieben werden:

- Basis: Geologische Karte GK 200 des Freistaates Sachsen und Zusammenfassung der 90 geologischen Einheiten zu 30 geologischen Einheiten zur Karte "GK 200 vereinfacht" (KEMSKI, 2010);
- Korrektur der "GK 200 vereinfacht" und Reklassifizierung der 30 geologischen Einheiten zu 32 Einheiten: Aufspaltung der geologischen Einheit "Saure Vulkanite" in "Saure Vulkanite mit hohem Tuffanteil" und "Saure Vulkanite mit niedrigem Tuffanteil"; sowie Aufspaltung der geologischen Einheit "Tagebaue / Aufschüttungen" in "Tagebau, verfüllt" und "Künstliche Aufschüttungen";
- Zuordnung von 981 Messdaten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft zu den 32 geologischen Einheiten und Erhebung der Häufigkeitsverteilung und der statistischen Kenngrößen Median, 10 %- und 90 %-Quantil, sowie Quantilsränge von 40 kBq/m³ bzw. 100 kBq/m³ über alle Messwerte einer geologischen Einheit;
- Zuordnung von 586 Messwerten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in den Innenräumen aus dem Erdgeschoss voll-unterkellerten kleiner Wohngebäude (Referenzsituation) zu den 32 geologischen Einheiten und Ermittlung der Referenzwertüberschreitungshäufigkeit in Innenräumen in den geologischen Einheiten; Nachweis, dass in den Kategorien "Auffällig" und "Erhöht" mehr als 10 % der Gebäude den Referenzwert von 300 Bq/m³ überschreiten;
- Zusammenfassung der geologischen Einheiten zu den Kategorien "Unauffällig", "Auffällig" und "Erhöht" anhand der statistischen Kenngrößen der Werte der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft sowie der Referenzwertüberschreitungshäufigkeit in Innenräumen innerhalb der geologischen Einheiten;
- Verifizierung der Ergebnisse der Zuordnung der geologischen Einheiten zu den Kategorien "Unauffällig", "Auffällig" und "Erhöht" anhand weiterer Daten und Bestätigung, dass in den in "Auffällig" und "Erhöht" zusammengefassten geologischen Einheiten in mehr als 10 % der Gebäude der Referenzwert überschritten wird;
- Ermittlung des Flächenanteils der geologischen Kategorien in den sächsischen Gemeinden;
- Ausweisung der sächsischen Gemeinden als Radonvorsorgegebiete, wenn in mehr als 75 % der Fläche einer Gemeinde die geologischen Einheiten der Kategorie "Auffällig" oder "Erhöht" vorliegen;
- Ausweisung von Gemeinden als Radonvorsorgegebiet mit einem Flächenanteil von geologischen Einheiten, die als "Erhöht" kategorisiert sind, wenn angenommen werden kann, dass Messungen und Maßnahmen erforderlich sind, da trotz der Unterschreitung der Gebietsfläche von 75 % bei einer beträchtlichen Zahl von Aufenthaltsräumen und Arbeitsplätzen in Innenräumen mit einer Überschreitung der Referenzwerte nach § 124 StrlSchG oder § 126 StrlSchG zu rechnen ist. Dies betrifft die Gemeinden Kreischa, Stadt Bad Gottleuba-Berggießhübel, Stadt Flöha, Stadt Freital und Stadt Tharandt.

Im Freistaat Sachsen wurde mit einer Methode die Ausweisung der Radonvorsorgegebiete vorgenommen, die die Daten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft statistisch charakterisiert und den entsprechenden

geologischen Einheiten zuordnet. Die Klassifizierung der geologischen Einheiten erfolgte anhand der Zuordnung der Daten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen zu den geologischen Einheiten und der Bestimmung der Referenzwertüberschreitungshäufigkeiten. Mit weiteren Daten aus verschiedenen Messprogrammen konnte gezeigt werden, dass dieser Ansatz zur Ausweisung der Gebiete nach § 121 StrlSchG plausibel ist und konsistente Ergebnisse zeigt.

Auch im Vergleich mit der vom Bundesamt für Strahlenschutz veröffentlichten Karte zur Prognose des geogenen Radonpotentials in Deutschland (BOSSEW, 2018) sowie der darin vorgestellten Methode zur Ableitung eines Schwellenwertes zur Ausweisung von Radonvorsorgegebieten ergeben sich im Wesentlichen gute Übereinstimmungen. Abweichungen in einzelnen Gebieten konnten aufgrund der im Freistaat Sachsen vorliegenden Datenbasis und der daraus folgenden erhöhten Auflösung im Vergleich zum Großmaßstab der Karte des BfS begründet werden. Neuere Auswertungen durch das BfS mit einem Machine Learning-Verfahren (PETERMANN, 2019), welches sich jedoch noch in der Entwicklung befindet, zeigen ebenfalls eine große Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Auswertung des Freistaates Sachsen.

Die Bundesländer sind nach § 121 Absatz 1 STRLSCHG dazu verpflichtet, innerhalb von 10 Jahren nach Ausweisung der Radonvorsorgegebiete die Festlegung der Gebiete zu überprüfen. Daher werden in den folgenden Jahren im Freistaat Sachsen weitere Messprogramme zur Erhebung von Daten zur Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft sowie in Innenräumen durchgeführt, um die bestehende Datengrundlage zu erhöhen und zu verbessern. Darüberhinaus werden die neu erhobenen Daten dann auch zeigen, ob die Strategie zur nachhaltigen Verringerung der Radonexposition der Bevölkerung zu messbaren Ergebnissen führt.

Literaturverzeichnis

- BEGRÜNDUNGSTEXT ZUR STRLSCHV (2018): Entwurf einer Artikelverordnung zur weiteren Modernisierung des Strahlenschutzrechts. Bundesrat Drucksache 423/18 vom 05.09.2018.
- BFS (2020); Link: Radon in der Bodenluft in Deutschland
<https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/karten/boden.html>; abgerufen am 14.10.2020
- BOSSEW, P., HOFFMANN, B. (2018): Die Prognose des geogenen Radonpotentials in Deutschland und die Ableitung eines Schwellenwertes zur Ausweisung von Radonvorsorgegebieten. Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter; BfS-SW-24/18; urn: nbn:de:0221-2017122814454
- CINELLI, G., DE CORT, M., TOLLEFSEN, T. (Eds.) (2019): European Atlas of Natural Radiation, Publication Office of the European Union, Luxembourg.
- GEMEINDEN UND GEMEINDETEILE IM FREISTAAT SACHSEN - GEBIETSTAND: 1. JANUAR 2020 – VZ GEMTEIL –J/20. Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen. Link:
https://www.statistik.sachsen.de/download/verzeichnisse/verzeichnis_statistik-sachsen_gemeinden-gemeindeteile.pdf, 08.10.2020.
- DIN ISO NORM 11665-8 (VDE 0493-1-6658) (2020): Ermittlung der Radioaktivität in der Umwelt - Luft: Radon-222 - Teil 8: Methodik zur Erstbewertung sowie für zusätzliche Untersuchungen in Gebäuden.
- INSPIRE DATEN. Geoportal Sachsen. Link: https://geoportal.sachsen.de/cps/feed-viewer.html?dataset=true&-url=https://geodownload.sachsen.de/inspire/au_atom/Dataset_sn_au_shape.xml, abgerufen am 08.10.2020
- KEMSKI, J., KLINGEL, R., STEGEMANN, R. (2002): Das geogene Radonpotenzial - Anleitung zur Messung der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft im Rahmen einer regionalen Radonkartierung. Auszug aus KEMSKI, J., KLINGEL, R., SIEHL, A., STEGEMANN, R., VALDIVIA-MANCHEGO, M (2002): Transferfunktion für die Radonkonzentration in der Bodenluft und der Wohnraumluft (Abschlussbericht zu den Forschungsvorhaben St. Sch. 4186 und St. Sch. 4187: Ermittlung einer Transferfunktion für die Radonkonzentration in der Bodenluft und der Wohnraumluft incl. Radonmessungen in Häusern zur Validierung des geologisch induzierten Radonpotenzials. Teil A: Bodenuntersuchungen zum geogenen Radonpotenzial. Teil B: Validierung der geologischen Prognose durch Messungen der Radonkonzentration in Gebäuden). Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-2002-598, 206 S.
- KEMSKI, J., KLINGEL, R., STEGEMANN, R. (2004a): Validierung der regionalen Verteilung der Radonkonzentration in Häusern mittels Radonmessungen unter Berücksichtigung der Bauweise. Bericht zum Forschungsvorhaben St. Sch. 4271. Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- KEMSKI & PARTNER, Beratende Geologen (2004b): Die Radonkarte Deutschlands. Kurzinformation zu Radon in der Boden- und Raumluft. https://www.kemski-bonn.de/downloads/Erl_Radonkarte2004.pdf; abgerufen am 05.11.2020
- KEMSKI & PARTNER, Beratende Geologen (2010): Abschlussbericht zum Fremdleistungsvorhaben: Neuberechnung der Karte der Radonkonzentration in der Bodenluft für das Territorium des Freistaates Sachsen.
- KEMSKI & PARTNER, Beratende Geologen (2011): Abschlussbericht zum Fremdleistungsvorhaben: Prognose zur Radonbetroffenheit von Gebäuden in Sachsen - Kartierung der Überschreitungswahrscheinlichkeiten von Referenzwerten.
- PETERMANN, E, BOSSEW, P. (2019): High-resolution mapping of the geogenic radon potential using machine learning. Vortrag in Radon in the Environment, 27 –31 May 2019, Krakow
- RICHTLINIE 2013/59/EURATOM DES RATES VOM 5. DEZEMBER 2013 ZUR FESTLEGUNG GRUNDLEGENDER SICHERHEITSNORMEN FÜR DEN SCHUTZ VOR DEN GEFAHREN EINER EXPOSITION GEGENÜBER IONISIERENDER STRAHLUNG UND ZUR AUFHEBUNG DER RICHTLINIEN 89/618/EURATOM, 90/641/EURATOM, 96/29/EURATOM, 97/43/EURATOM UND 2003/122/EURATOM. Amtsblatt der Europäischen Union vom 17. Januar 2014; L 13/1ff
- SÄCHSISCHES GESETZ ZUR AUSFÜHRUNG ATOM- UND STRAHLENSCHUTZRECHTLICHER VORSCHRIFTEN. (Sächsisches Atom- und Strahlenschutzausführungsgesetz – SächsASAG). Sächsisches Gesetz- und Verordnungsblatt 2019 Nr. 15 S. 647; Erlassdatum: 2. August 2019; Fassung gültig ab: 30. September 2019

STRAHLENSCHUTZGESETZ (STRLSCHG) (2017): Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung. BGBl I S. 1966; zuletzt geändert durch Artikel 248 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl I S. 1328).

VERORDNUNG ZUM SCHUTZ VOR DER SCHÄDLICHEN WIRKUNG IONISIERENDER STRAHLUNG (STRAHLENSCHUTZVERORDNUNG – STRLSCHV). 29. November 2018; BGBl I S. 2034, 2036; geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 27. März 2020 (BGBl I S. 748).

A 1 Anhang

A 1.1 Liste der geologischen Einheiten in den Karten GK 200 vereinfacht und reklassifiziert, sowie GK 200 original

Tabelle 9: Zuordnung der geologischen Einheiten der GK 200 original zu der vereinfachten und reklassifizierten GK 200

GK 200 vereinfacht		GK 200 Original	
ID	Geologische Einheit	ID	Geologische Einheit
0	Tagebau, verfüllt	2	Tagebau, verfüllt
1	Künstliche Aufschüttungen	1	Künstliche Aufschüttungen
2	Auenterrassen	3	Auenterrassen
3	Moore	4	Nieder- und Hochmoore
4	Löss, Lösslehm	6	Löss, Lösslehm
5	Pleistozäne Flussterrassen	5	Dünen, Flugsand (Dresdener Heide)
		8	Niederterrassen
		13	Tiefere Mittelterrassen
		18	höhere Mittelterrassen
		19	Hochterrassen
6	Schmelzwasser	5	Dünen, Flugsand (andere Landesteile)
		9	Schmelzwasser-Ablagerungen
		10	Endmoränen
		14	Schmelzwasser-Ablagerungen
		15	Endmoränen
7	Grundmoränen	11	Grundmoränen
		12	Eisstausee-Ablagerungen
		16	Grundmoränen
		17	Eisstausee-Ablagerungen
8	Basaltoide, Phonolithe	29	Basaltoide Gesteine
		30	Phonolith
		31	Tuff
9	Sande, Kiese, Tone	33	höheres Mittelmiozän bis Pliozän
		36	höheres Untermiozän und tieferes Mittelmiozän
		37	Tieferes Untermiozän
		41	Oberoligozän (bis tiefstes Untermiozän): Thierbacher Fluss
		42	Oberoligozän
		44	Mittloligozän bzw. Unteroligozän
		46	Mittel- und Obereozän

10	Sandstein, Tonstein	54	Santon
		55	Coniac, t.T. Oberturon
		56	Oberturon bis Coniac
		57	Turon
		58	Cenoman
11	Jura	59	Jura
12	Sand- und Schluffsteine (Buntsandstein)	62	Buntsandstein
13	Dolomite, Schiefertone (Zechstein)	63	Zechstein
14	Konglomerate, Sandsteine (Rotliegend)	64	Rotlegendes, ungegliedert
		65	Oberes Rotliegend (Mülsen Formation)
		66	Unteres Rotliegend
15	Granit, Jüngerer Intrusivkomplex	74	Jüngere Granite
16	Saure Vulkanite mit niedrigem Tuffanteil	67	Saure Effusiva, Quarzporphyr
		68	Saure Effusiva, Ignimbrite
		77	Saure Effusiva, Quarzporphyr
		79	Intermediäre Effusiva
		93	Porphyroide
		283	Quarzporphyr, Keratophyr
17	Rhyolithoide in Gängen	71	Saure und intermediäre Ganggesteine (Granitporphyr, Quarzporphyr, Gangporphyr)it
18	Basische Ganggesteine	82	Basische Ganggesteine (Lamprophyre)
19	Granit, Älterer Intrusivkomplex	73	Ältere Granite
20	Monozonitoide, Syenodiorit	75	Monozonitoide (Meißener Syenodiorit)
21	Grauwacke, Tonschiefer	76	Siles (Oberkarbon)
		80	Hohes Dinant: Hainichener Schichten u. Äquivalente
		82	Dinant (Unterkarbon): Kulm
		83	Devon
		86	Silur
		88	Höheres Ordovizium, Silur und Devon, ungegliedert
		89	Gräfenthaler Gruppe
22	Basische Vulkanite	84	Tuffe
		85	Basische Effusiva
		87	basische Tuffe und Effusiva
		91	Basische Effusiva
		270	Melaphyr
23	Phyllite	90	Phycoden-Folge
		92	Frauenbach-Folge und Äquivalente
		94	Höheres Kambrium bis tiefstes Ordovizium
24	Glimmerschiefer	95	Kambrium, ungegliedert
		96	mittleres Kambrium
		97	tiefes Kambrium
25	Granodiorite	109	Zweiglimmergranodiorit (Anatexit)

		110	Ostlausitzer (Seidenberger) Granodiorit
26	Orthogneise	99	Muskowit.Plattengneis und ähnliche Gesteine
		100	Granulit im Verband mit Muskowit-Plattengneis
		101	Orthogneis (Rotgneis)
		102	blastomylonitischer Augengneis (aG)
		103	Rumburger Granit u.ä. (Reuth, Turmalingranit)
27	Biotitgranodiorite, Meissner Massiv	98	Granodiorit
28	Metamorphe basische bis ultrabasische Magmatite	104	Gabbro
		105	Amphibolit
		106	Serpentinit
		107	Eklogit
29	Grauwacke, Paragneise	108	Vendium
		11	Oberes Riphäikum, ungegliedert, z.T. mit metagranodioritischen Anteilen
		112	Preßnitzer Gruppe und Äquivalente
		113	Osterzgebirgische Gruppe und Äquivalente
30	Granulite	114	Mittleres Riphäikum: Waldheimer Gruppe
31	nicht verwendet		
32	Saure Vulkanite mit hohem Tuffanteil	69	Saure Effisiva, Tuffe
		70	Intermediäre Effusiva
		78	Saure Effusiva, Ignimbrite, Tuffe
		276	Saure Effusive, Tuffe
	entfällt	61	Muschelkalk
		115	Quarzgang/Störung

A 1.2 Statistische Kenngrößen aus Radonmessungen in der Bodenluft

Tabelle 10: Statistische Kenngrößen der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft der geologischen Einheiten aus dem Datensatz Bodenradondaten zur Erstellung der Bodenradonkarte Sachsen.

Kategorie der geologischen Einheiten	geologische Einheit	Mittelwert arithm. [kBq/m ³]	Median [kBq/m ³]	Mittelwert geom. [kBq/m ³]	10 %-Quantil [kBq/m ³]	90 %-Quantil [kBq/m ³]	QR40 [%]	QR100 [%]
"Erhöht"	Basische Ganggesteine (Lamprophyre)	218,5	218,5	184,2	124,5	312,5	0,0	0,0
	Moore	82,6	82,0	76,9	49,8	114,2	0,9	68,0
	Granit, Älterer Intrusivkomplex	177,8	116,5	126,8	48,5	277,2	5,1	40,0
	Granit, Jüngerer Intrusivkomplex	191,0	105,5	122,7	48,2	384,7	7,5	44,7
	Rhyolithoide in Gängen	111,5	78	84,5	39,5	217	10,4	58,8
	Saure Vulkanite mit hohem Tuffanteil	167,3	131,5	108,4	38,4	340,4	11,5	35,3
	Künstliche Aufschüttungen	100,1	94	80,4	31,5	191,9	15,9	56,1
"Auffällig"	Biotitgranodiorit, Meissner Massiv	288,4	136	141,8	38,4	676,8	16,6	40,4
	Dolomite, Schiefertone (Zechstein)	51,25	51,0	48,9	35,2	67,5	21,4	100,0
	Orthogneise	68,0	57,5	58,8	32	114,9	24,6	83,0
	Phyllite	76,6	60,0	61,8	29	132,8	25,0	77,0
	Monzonitoide, Syenodiorit	98,5	56,0	55,7	10	215	26,0	81,0
	Glimmerschiefer	71,5	60,0	59,0	25,8	131,1	26,2	77,2
	Grauwacken, Paragneise	70,5	56,0	56,3	29	131	27,7	82,2

"Unauffällig"	Granodiorite	49,1	44,0	40,9	20	99,8	40,0	90,0
	Grauwacken, Tonschiefer	50,2	45,0	43,8	22,2	90	40,5	95,4
	Metamorphe basische bis ultrabasische Magmatite	49,6	47,0	35,5	15,2	85,6	43,1	94,4
	Löss, Lösslehm	52,0	43,0	36,7	10	105,8	46,5	89,2
	Grundmoränen	46,6	40,0	37,2	12,2	83	50,0	100,0
	Basaltoide, Phonolithe	29,6	38,0	23,2	9,6	44,6	58,3	100,0
	Konglomerate, Sandsteine (Rotliegend)	39,4	34,5	33,2	19,1	59,7	64,5	100,0
	Auenterrassen	38,5	31,0	28,2	6	79	65,0	95,4
	Pleistozäne Flussterrassen	38,9	21,0	20,7	5	77	70,8	92,2
	Sand- und Schluffsteine (Buntsandstein)	35,5	27,0	28,4	14,8	63	70,8	100,0
	Sandsteine, Tonsteine	35,9	32,5	31,0	17	63	73,1	100,0
	Basische Vulkanite	30,4	17,0	20,2	7	69	73,6	97,0
	Schmelzwasser- bildungen	29,0	20,0	19,5	5,7	60,2	74,5	97,2
	Granulite	21,2	14,0	14,5	5	45,4	76,4	100,0
	Sande, Kiese, Tone	24,7	23,0	19,1	6,2	41	77,7	100,0
	Saure Vulkanite mit niedrigem Tuffanteil	27,5	26,0	21,7	9,5	43,1	88,1	100,0
	Jura	-	-	-	-	-	-	-
Tagebau, verfüllt	-	-	-	-	-	-	-	

A 1.3 Statistische Kenngrößen aus Radonmessungen in Innenräumen

Tabelle 11: Die statistischen Kenndaten der Messdaten der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen im Erdgeschoss voll-unterkellertes kleiner Gebäude (Datensatz 1a).

Kategorie der geologischen Einheit	Geologische Einheit	Anzahl der Messungen	Median [kBq/m ³]	Referenzwert-überschreitungshäufigkeit [%]
"Erhöht"	Basische Ganggesteine (Lamprophyre)	-	-	-
	Moore	-	-	-
	Granit, Älterer Intrusivkomplex	34	151	27%
	Granit, Jüngerer Intrusivkomplex	3	370	60%
	Rhyolithoide in Gängen	4	51	0%
	Saure Vulkanite, tuffig hoch	4	108	12%
	Künstliche Aufschüttungen	1	52	0%
"Auffällig"	Biotitgranodiorit, Meissner Massiv	18	62	13%
	Dolomite, Schiefertone (Zechstein)	12	54	0%
	Orthogneise	4	77	0%
	Phyllite	54	102	14%
	Monzonitoide, Syenodiorit	22	89	13%
	Glimmerschiefer	13	58	0%
	Grauwacken, Paragneise	13	73	9%
"Unauffällig"	Granodiorite	40	81	6%
	Grauwacken, Tonschiefer	34	59	0%
	Metamorphe basische bis ultrabasische Magmatite	2	52	0%
	Löss, Lösslehm	65	55	2%
	Grundmoränen	19	55	0%
	Basaltoide, Phonolithe	14	78	0%
	Konglomerate, Sandsteine (Rotliegend)	62	48	0%
	Auenterrassen	17	55	0%
	Pleistozäne Flussterrassen	49	66	6%
	Sand- und Schluffsteine (Buntsandstein)			
	Sandsteine, Tonsteine	3	140	3%
	Basische Vulkanite	10	88	0%
	Schmelzwasserbildungen	51	50	7%
	Granulite	20	59	0%
	Sande, Kiese. Tone	9	57	0
	Saure Vulkanite	9	71	0
	Jura	-	-	-
Tagebau, verfüllt	-	-	-	

A 1.4 Liste der auszuweisenden Gemeinden

Tabelle 12: Tabellarische Liste der nach § 121 STRLSCHG in Sachsen auszuweisenden Gemeinden

Landkreis	Gemeindekennziffer	Gemeinde
Erzgebirgskreis	14521010	Amtsberg
	14521020	Annaberg-Buchholz, Stadt
	14521035	Aue-Bad Schlema, Stadt
	14521040	Auerbach
	14521060	Bärenstein
	14521080	Bockau
	14521090	Börnichen/Erzgeb.
	14521110	Breitenbrunn/Erzgeb.
	14521120	Burkhardtsdorf
	14521130	Crottendorf
	14521140	Deutschneudorf
	14521150	Drebach
	14521160	Ehrenfriedersdorf, Stadt
	14521170	Eibenstock, Stadt
	14521180	Elterlein, Stadt
	14521200	Gelenau/Erzgeb.
	14521210	Geyer, Stadt
	14521220	Gornau/Erzgeb.
	14521240	Großolbersdorf
	14521250	Großrückerswalde
	14521260	Grünhain-Beierfeld, Stadt
	14521270	Grünhainichen
	14521280	Heidersdorf
	14521320	Johanngeorgenstadt, Stadt
	14521330	Jöhstadt, Stadt
	14521340	Königswalde
	14521355	Lauter-Bernsbach, Stadt
	14521390	Marienberg, Stadt
	14521400	Mildenaue
	14521440	Oberwiesenthal, Kurort, Stadt
	14521460	Olbernhau, Stadt
	14521495	Pockau-Lengefeld, Stadt
	14521500	Raschau-Markersbach
	14521510	Scheibenberg, Stadt
	14521520	Schlettau, Stadt
14521530	Schneeberg, Stadt	
14521540	Schönheide	
14521550	Schwarzenberg/Erzgeb., Stadt	
14521560	Sehmatal	
14521570	Seiffen/Erzgeb., Kurort	

	14521590	Stollberg/Erzgeb., Stadt
	14521600	Stützensgrün
	14521610	Tannenberg
	14521620	Thalheim/Erzgeb., Stadt
	14521630	Thermalbad Wiesenbad
	14521640	Thum, Stadt
	14521670	Wolkenstein, Stadt
	14521690	Zschopau, Stadt
	14521700	Zschorlau
Mittelsachsen	14522020	Augustusburg, Stadt
	14522035	Bobritsch-Hilbersdorf
	14522050	Brand-Erbisdorf, Stadt
	14522090	Dorfchemnitz
	14522110	Eppendorf
	14522140	Flöha, Stadt
	14522170	Frauenstein, Stadt
	14522180	Freiberg, Stadt, Universitätsstadt
	14522200	Großhartmannsdorf
	14522240	Halsbrücke
	14522320	Leubsdorf
	14522340	Lichtenberg/Erzgeb.
	14522390	Mulda/Sa.
	14522400	Neuhausen/Erzgeb.
	14522430	Oberschöna
	14522440	Oederan, Stadt
	14522470	Rechenberg-Bienenmühle
	14522520	Sayda, Stadt
	14522590	Weißenborn/Erzgeb.
Sächsische Schweiz- Osterzgebirge	14628010	Altenberg, Stadt
	14628020	Bad Gottleuba-Berggießhübel, Stadt
	14628060	Dippoldiswalde, Stadt
	14628090	Dorfhain
	14628110	Freital, Stadt
	14628130	Glashütte, Stadt
	14628150	Hartmannsdorf-Reichenau
	14628170	Hermsdorf/Erzgeb.
	14628205	Klingenberg
	14628220	Kreischa
	14628230	Liebstadt, Stadt
	14628400	Tharandt, Stadt
	Vogtlandkreis	14523010
14523020		Auerbach/Vogtl., Stadt
14523030		Bad Brambach
14523040		Bad Elster, Stadt

	14523050	Bergen
	14523080	Eichigt
	14523090	Ellefeld
	14523120	Falkenstein/Vogtl., Stadt
	14523130	Grünbach
	14523160	Klingenthal, Stadt
	14523170	Lengsfeld, Stadt
	14523200	Markneukirchen, Stadt
	14523230	Mühlental
	14523245	Muldenhammer
	14523290	Neustadt/Vogtl.
	14523360	Rodewisch, Stadt
	14523370	Schöneck/Vogtl., Stadt
	14523380	Steinberg
	14523410	Theuma
	14523430	Treuen, Stadt
	14523460	Werda
Zwickau	14524040	Crinitzberg
	14524100	Hartmannsdorf b. Kirchberg
	14524110	Hirschfeld
	14524130	Kirchberg, Stadt
	14524150	Langenweißbach
	14524320	Wilkau-Haßlau, Stadt

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3 01326 Dresden
Telefon: + 49 351 2612-0
Telefax: + 49 351 2612-1099
E- Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.lfulg.sachsen.de

Autoren:

Dr. Thomas Heinrich, Mandy Alisch-Mark, Tobias Geib,
Stefan Friedemann, Janett Pezenka
Geschäftsbereich 2: Immissions- und Strahlenschutz
Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL)
Altwahnsdorf 12 01445 Radebeul
Telefon: + 49 351 85474-200
Telefax: + 49 351 85474-119
E-Mail: Thomas.Heinrich@smul.sachsen.de

Redaktion:

Andrea Sperrhacker, Jeanette Honolka
Abteilung 5
Referat 54 - Strahlenschutz - Altlasten, Radon Notfallschutz
Pillnitzer Platz 3 01326 Dresden-Pillnitz
Telefon: + 49 351 2612-5414
Telefax: + 49 351 2612-5399
E-Mail:
Andrea.Sperrhacker@smul.sachsen.de; Jeanette.Honolka@smul.sachsen.de

Fotos:

LfULG; BfUL

Redaktionsschluss:

19.11.2020

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.

*Täglich für
ein gutes Leben.*

www.lfulg.sachsen.de