

17. Sächsische Radontage

**Tagungsband zur Veranstaltung
am 25./ 26. April 2024 in Dresden**



STAATSMINISTERIUM
FÜR ENERGIE, KLIMASCHUTZ,
UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT



Freistaat
SACHSEN

Inhaltsverzeichnis

Grußwort der Rektorin Prof. Dr. rer. nat. Katrin Salchert	3
Grußwort der Staatssekretärin Gisela Reetz	5
Radonmessungen an Arbeitsplätzen im Radon-Vorsorgegebiet Landkreis Wunsiedel im Fichtelgebirge Christian Rabel, Markus Trautmannsheimer	7
Radon-Konzentrationen während und außerhalb der Arbeitszeit an Arbeitsplätzen und Schulen Tryggve Rönqvist, Vanda Jakabová	25
Auswertung des Radongehalts in der Bodenluft mit künstlicher Intelligenz Wolfgang Wehr	41
Evaluierung der Wirksamkeit von Radondrainagen als Vorsorgemaßnahme in Neubauten Gernot Wurm, Cornelia Leithner	65
Radonschutzmaßnahmen in Industriehallen - Grundlegende Betrachtungen und realisierte Beispiele Walter-Reinhold Uhlig, Gerhard Binker	75
Aktivitäten zur Erkundung der Radonsituation in Wohngebäuden im Freistaat Sachsen Mandy Alisch-Mark, Janett Pezenka, Stefan Friedemann, Jacqueline Pianski, Tobias Geib, Thomas Heinrich	97
Förderung von Maßnahmen zur Reduzierung der Radonkonzentration in Sachsen - die Förderrichtlinie Stadtgrün, Lärm, Radon/ 2023 Sabine Gruhne	115

Zielsicheres Radon-Sniffing als maßgebliche Grundlage für eine kostensparende Sanierungsplanung Pamela Jentner	121
Die Radon-Echtzeitmessung als Instrument zur Radon-diagnostik und zur Steuerung des Sanierungsprozesses Martin Waltl	131
Radonbelastung/Radonsanierung am Beispiel eines Betriebsgebäudes der kommunalen Wasserversorgung sowie eines Industriebetriebes im Hochschwarzwald Marc Ellinger	137
Möglichkeiten und Grenzen der Radonsanierung mittels dezentraler Lüftungssysteme im Bestand Hannes Grünewald, Diana Altendorf, Florian Berger, Jörg Dehnert, Thomas Hartmann, Michal Duzynski, Louis Weber, Ralf Trabitzsch, Torsten Schindler, Ralph Geisenhainer, Mandy Alisch-Mark, Holger Weiß	153

Grußwort der Rektorin Prof. Dr. rer. nat. Katrin Salchert



Sehr geehrte Damen und Herren,

im Namen der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (HTWD) begrüße ich Sie herzlich zu den 17. Sächsischen Radontagen. Ich freue mich sehr, dass diese Fachtagung, die in ihrer Form in Deutschland einzigartig ist, bereits seit so vielen Jahren an unserer Hochschule stattfindet. Wie groß die Relevanz des Themas Radon ist, davon zeugt auch der Blick auf das Programm: In diesem Jahr konnten Referentinnen und Referenten aus fünf verschiedenen Bundesländern sowie zwei Vortragende aus dem europäischen Ausland gewonnen werden.

Ein wichtiger Meilenstein ist die Veröffentlichung der Entwurfsfassung des zweiten Teils der Norm „Bauliche und Lüftungstechnische Maßnahmen zum Radonschutz“ (DIN/TS 18117-2). In Ergänzung zum ersten Teil bildet diese Norm die ersten normativen Regelungen zum baulichen Radonschutz überhaupt. Zusammen mit dem WTA-Merkblatt „Radon im Gebäudebestand“ wird diese Norm einen wichtigen Beitrag zur Radonprävention leisten. Besonders erfreulich ist, dass Sachsen als erstes Bundesland die Förderung von Radonschutzmaßnahmen in der neuen Förderrichtlinie Stadtgrün, Lärm, Radon/2023 verankert hat. Dies ist ein wichtiger Schritt für den Schutz vor Radon in Gebäuden.

An der HTWD wird das Thema Radon ebenfalls aktiv in die Lehre eingebunden. Unsere Studierenden erlangen hier nicht nur theoretisches Wissen, sondern können durch die enge Zusammenarbeit mit der Industrie und anderen Akteuren, relevante Fragestellungen aus der Praxis aufgreifen. Im Bereich Bauingenieurwesen ist die Hochschule in verschiedenen Forschungsprojekten zum Thema Radon involviert. Die Forschenden prüfen die Qualität von Abdichtungsmaßnahmen als Radonenschutz und untersuchen Möglichkeiten zur Reduzierung der Radonkonzentration in Gebäuden. Ihre Ergebnisse fließen direkt in die Praxis ein und tragen dazu bei, den Schutz vor Radon in Gebäuden zu verbessern.

Ich wünsche allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern eine spannende und informative Tagung. Mögen Sie auf Ihrer Rückreise Erinnerungen an viele interessante Diskussionen und neue Erkenntnisse zum Thema Radon im Gepäck haben.

Mit freundlichen Grüßen

Prof. Dr. rer. nat. Katrin Salchert

Rektorin der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden

Grußwort der
Staatssekretärin.
Gisela Reetz



Sehr geehrte Damen und Herren,

herzlich willkommen zu den 17. Sächsischen Radontagen. Ich freue mich sehr, Sie auch in diesem Jahr wieder begrüßen zu dürfen und mit Ihnen gemeinsam diese Veranstaltungsreihe fortzusetzen.

Fortsetzung heißt Entwicklung und heißt auch Veränderung. In diesem Jahr haben die Organisatoren einen neuen Ansatz gewählt, um die immer größer werdende Bandbreite an Fragestellungen, Lösungsansätzen und Erfahrungen rund um das Thema Schutz vor Radon noch besser in der Veranstaltung abbilden zu können. Damit möglichst viele Fachleute aus unterschiedlichen Bereichen Gelegenheit finden, über ihre Erfahrungen zu berichten, wurde ein Aufruf zur Einreichung von Fachbeiträgen im Vorfeld der Veranstaltung veröffentlicht, der auf sehr große Resonanz stieß. Vielen Dank für die eingereichten Vorschläge.

Das Spektrum an Themen bildet das Grundgerüst des diesjährigen vielfältigen Programms. Es umfasst Vorträge zu Radonmessungen und deren Auswertung, zu Planungen von Maßnahmen unter Berücksichtigung genauer Analysen der jeweiligen Situation und zu Beispielen von Maßnahmen zur Reduzierung der Radonkonzentration in Gebäuden. Besonders erfreulich ist die überregionale Beteiligung mit

Beiträgen aus mehreren deutschen Bundesländern und darüber hinaus aus Österreich und Schweden.

Der Freistaat Sachsen ist sich seiner Verantwortung bewusst, bei der Entwicklung des Schutzes vor Radon weiterhin eine aktive Rolle zu übernehmen. Die Angebote der Radonberatungsstelle in der Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL) und der fachlichen Beratung in der Sächsischen Energieagentur (SAENA) sind inzwischen etabliert. Darüber hinaus ist auch die aktive Unterstützung Betroffener ein Anliegen der Staatsregierung und der zuständigen Behörden. Neben den durch die BfUL angebotenen Programme zur Messung der Radonkonzentration hat das Sächsische Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft mit der „Förderrichtlinie Stadtgrün, Lärm, Radon“ nunmehr auch finanzielle Unterstützung bei der Durchführung von baulichen und lüftungstechnischen Maßnahmen zur Reduzierung der Radonkonzentration in Gebäuden mit Arbeitsplätzen auf den Weg gebracht.

Die Veranstaltung soll Ihnen die Gelegenheit bieten, sich über den aktuellen Stand zur Thematik Schutz vor Radon zu informieren, über Erfahrungen zu berichten und den fach- und institutionsübergreifenden Austausch zu ermöglichen.

Ich bedanke mich bei allen, die zum Gelingen der 17. Sächsischen Radontage beitragen, insbesondere bei dem Team der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden um Herrn Prof. Naumann und dem Kompetenzzentrum Radonsicheres Bauen und Sanieren KORA e. V.

Gisela Reetz

Sächsische Staatssekretärin für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft

Radonmessungen an Arbeitsplätzen im Radon-Vorsorgegebiet Landkreis Wunsiedel im Fichtelgebirge

Christian Rabel, Markus Trautmannsheimer

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz,
München

Zusammenfassung

Im Rahmen eines Projekts wurden die praktische Umsetzung der Radon-Erstmessungen und die Situation an den Arbeitsplätzen in Bayerns erstem Radon-Vorsorgegebiet näher untersucht. Dabei wurde in 33 % der untersuchten Gebäude eine Überschreitung des Radon-Referenzwerts festgestellt, bei Räumen mit mindestens einem Arbeitsplatz lag in 17 % der untersuchten Räume eine Referenzwertüberschreitung vor. Als günstig für eine niedrige Radonkonzentration an Arbeitsplätzen erwiesen sich in dieser Untersuchung Gebäude jüngeren Baujahrs, eine Vollunterkellerung und der Betrieb eines Lüftungssystems. Die Ergebnisse zeigen einerseits, dass zahlreiche und teils deutliche Überschreitungen des Radon-Referenzwerts gefunden wurden, andererseits aber, dass die Messwerte in der Mehrzahl der Gebäude unterhalb des Radon-Referenzwerts lagen. Bei Überschreitung des Referenzwerts müssen Maßnahmen zur Reduzierung der Radonkonzentration getroffen werden. Durch Einrichtung einer Radon-Beratungsstelle am Landratsamt Wunsiedel im Fichtelgebirge, die Beratung durch die Radon-Fachstelle Bayern am Bayerischen Landesamt für Umwelt sowie die Bereitstellung von leicht verständlichem Informationsmaterial soll zukünftig die Akzeptanz für den Radonschutz bei Arbeitgebern und Bevölkerung gestärkt werden.

Radon measurement at workplaces in the radon-prone area District of Wunsiedel in the Fichtelgebirge, Germany

Summary

Within the scope of a project, the practical implementation of the initial radon measurement activities and the radon situation at workplaces in the first official radon-prone area in Bavaria were examined. In 17 % of the surveyed rooms containing a place of work, the reference level was found to be exceeded. At least one place of work exceeded the reference level in 33 % of the buildings. In contrast, lower Radon concentrations were found at workplaces in newer buildings, in buildings with a full basement or those with an active ventilation system. While the results reveal that the reference level is exceeded in numerous cases, in some cases substantially, the majority of buildings only show measurement values below the reference level. If the reference level is exceeded, radon mitigation measures are compulsory. Acceptance of these mitigation measures by employers and the general public has been fostered through establishing a Radon information centre at the district administration office of Wunsiedel in the Fichtelgebirge, the wide-ranging consulting activities of the Bavarian Environment Agency and the provision of easily understandable information materials.

1 Einleitung

Im Zuge der Novelle des Strahlenschutzgesetzes (StrlSchG), vollständig in Kraft getreten zum 31.12.2018, musste zum Schutz gegenüber der gesundheitsschädigenden Wirkung von Radon die Überprüfung und ggf. Festlegung von Radon-Vorsorgegebieten bis Ende 2020 erfolgen. Nach § 153 Abs. 3 Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) hat die Festlegung der Radon-Vorsorgegebiete innerhalb der bestehenden Verwaltungsgrenzen zu erfolgen. Das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) als zuständige Behörde hat dazu die Verwaltungsgrenzen der bayerischen Landkreise und

kreisfreien Städte herangezogen, da bezogen auf die größeren Gebietseinheiten eine höhere Datendichte vorliegt, welche wiederum eine belastbarere Prognose ermöglicht.

Für jeden Landkreis oder jede kreisfreie Stadt in Bayern wurde für die Prognosekarten des Bundesamts für Strahlenschutz (BfS) der Jahre 2017 [1] und 2020 [2] die Fläche mit Radonpotentialen über 44 ermittelt. Wird dieser Wert überschritten, kann davon ausgegangen werden, dass mehr als 10 % der Gebäude den Referenzwert überschreiten. Überdeckt diese Fläche mehr als 75 % des Landkreises oder der kreisfreien Stadt, sind die Festlegungskriterien gemäß § 153 StrlSchV gegeben. Für den Landkreis Wunsiedel im Fichtelgebirge lagen auf Grundlage beider Prognosen diese Voraussetzungen vor. Zusätzlich wurden vom StMUV eigene Radon-Bodenluftmessungen durchgeführt und zur Bewertung herangezogen. Die Festlegung des Landkreises Wunsiedel im Fichtelgebirge als Radon-Vorsorgegebiet erfolgte mittels einer Allgemeinverfügung, die am 11.02.2021 in Kraft trat [3]. Der Landkreis Wunsiedel im Fichtelgebirge war zu diesem Zeitpunkt der einzige Landkreis in Bayern, der als Radon-Vorsorgegebiet festgelegt werden musste.

Dem StMUV war es bei der erstmaligen Festlegung eines Radon-Vorsorgegebiets besonders wichtig, eine sehr gute und praxisnahe Umsetzung aller erforderlichen Maßnahmen zum Schutz vor Radon sicherzustellen. Die dafür erforderliche Informationsarbeit gemäß Radonmaßnahmenplan des Bundes [4] wird von der Radon-Fachstelle Bayern am Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) geleistet. Für die erweiterten Anforderungen im bayerischen Radon-Vorsorgegebiet wurden zusätzliche Informationsunterlagen bereitgestellt und spezielle Informationsangebote in Form von Vorträgen durchgeführt. Außerdem wurde eine vom Landratsamt Wunsiedel im Fichtelgebirge eingerichtete Anlaufstelle für Arbeitgeber unterstützend in die Kommunikation eingebunden.

Um vertiefte Erkenntnisse zur praktischen Umsetzung der gesetzlich vorgeschriebenen Erstmessung im ersten bayerischen Radon-Vorsorgegebiet zu gewinnen, wurde vom StMUV das Projekt „Auswertung der

Radonmessungen an Arbeitsplätzen im Radon-Vorsorgegebiet Landkreis Wunsiedel im Fichtelgebirge“ gestartet, dessen Ergebnisse hier näher vorgestellt werden. Das Projekt wurde als Forschungsvorhaben mittels einer Förderung durch den Freistaat Bayern durchgeführt.

2 Methodik

Das Projekt, dessen Ergebnisse hier vorgestellt werden, wurde gemeinsam von StMUV und LfU konzipiert und administrativ vom LfU durchgeführt. In diesem Projekt wurden Arbeitgeber dafür gewonnen, dem LfU unter freiwilliger Mitwirkung ihre in der Erstmessung ermittelten Radonkonzentration an Arbeitsplätzen mit den dazugehörigen Gebäudedaten zur Verfügung zu stellen. Teilnahmeberechtigt war jeder Arbeitgeber, der gemäß § 127 StrlSchG zur Messung der Radon-Aktivitätskonzentration an Arbeitsplätzen verpflichtet ist, also jeder Arbeitgeber im Landkreis Wunsiedel im Fichtelgebirge. Die definierten Kriterien zur Datenerhebung umfassten die mittels Exposimeter gesetzteskonform gemessene Radonkonzentration in Bq/m^3 , den taggenauen Messbeginn und das Messende, das Baujahr des Gebäudes, die Etage der Messung sowie Angaben zu einer Unterkellerung des Raumes, einer Lüftungsanlage am Arbeitsplatz und optional den Status einer energetischen Sanierung.

Vollständig diesen Kriterien entsprechende Daten je Arbeitsplatz bildeten einen sog. Datensatz und wurden für die weitere Projektauswertung herangezogen. Ein Datensatz entspricht somit einem Raum mit mindestens einem Arbeitsplatz im Radon-Vorsorgegebiet. Den Arbeitgebern wurde für die Einholung, Zusammenstellung und Übermittlung der geforderten Daten eine Aufwandsentschädigung von 25 Euro je Datensatz angeboten.

Projektbeginn war im Juni 2021. Da die Festlegung des Landkreises Wunsiedel im Fichtelgebirge als Radon-Vorsorgegebiet zum 11.02.2021 erfolgte, endete der 18-Monatszeitraum für eine gesetzteskonform durchgeführte Radonmessung am 10.08.2022. Davon abweichend wurde in diesem Projekt ein Messende bis spätestens am 10.02.2023 akzeptiert. Hintergrund dafür war in einigen Fällen der

verspätete Beginn der Erstmessung im Jahr 2021 aufgrund zahlreicher Beeinträchtigungen durch die Corona-Pandemie. Akzeptiert wurden Radonmessungen innerhalb eines Messzeitraums von 12 Monaten einschließlich eines intern festgelegten, angemessenen Toleranzbereichs. Obwohl das StrlSchG Messungen an Arbeitsplätzen nur in Keller- und Erdgeschossen vorsieht, wurden in diesem Projekt darüber hinaus gehend auch erhaltene Datensätze zu Arbeitsplätzen in Obergeschossen ausgewertet.

Aufgrund der freiwilligen Teilnahme wurden die Datensätze ungesteuert von Arbeitgebern unterschiedlicher Organisationsarten erhalten, unabhängig von kommerzieller Ausrichtung, Mitarbeiterzahl, Unternehmensumsatz, Anzahl der Gebäude und geografischer Verteilung der Gebäude innerhalb des Radon-Vorsorgegebiets. Die Datensätze stellen demgemäß keine repräsentative Stichprobe dar, anhand derer auf die Eigenschaften der Gesamtheit aller Räume mit mindestens einem Arbeitsplatz im Radon-Vorsorgegebiet Landkreis Wunsiedel im Fichtelgebirge geschlossen werden kann.

3 Ergebnisse

Insgesamt wurden 3.042 Datensätze von 107 Arbeitgebern bereitgestellt. Nach inhaltlicher Prüfung gemäß der festgelegten Kriterien konnten letztlich 1.977 Datensätze von 98 Arbeitgebern für die Auswertung verwendet werden, der Median der Datensätze pro Arbeitgeber liegt bei 6. Die höchste gemessene Radonkonzentration lag bei 1.940 Bq/m^3 , die niedrigste bei 8 Bq/m^3 . Bei Messwerten in einem niedrigen Konzentrationsbereich ist eine erhöhte Schwankungsbreite der Messfehler der Exposimeter zu berücksichtigen.

Gründe für die Nicht-Verwendbarkeit der erhaltenen Datensätze waren: Überschreitung der Messdauer ($n = 911$), Messung ohne Ergebnis (Exposimeter verloren oder nicht verwertbar, $n = 80$), Messung in Innenraum ohne Arbeitsplatz ($n = 66$), Mehrfachmessung am Arbeitsplatz ($n = 5$) sowie Messung ohne Gebäudedaten ($n = 3$).

Die Verteilung der Arbeitgeber nach Unternehmensart ergab mit 81,6 % einen Schwerpunkt bei gewerblichen Unternehmen, wovon 65,3 % kleine und mittlere Unternehmen (weniger als 500 Mitarbeiter)

und 16,3 % Großunternehmen bzw. deren Niederlassungen im Landkreis waren. 12,3 % der mitwirkenden Arbeitgeber waren Kommunen und kommunale Unternehmen, 4,1 % waren gemeinnützige Organisationen und 2,0 % anerkannte Religionsgemeinschaften.

Die Verteilung der Räume mit mindestens einem Arbeitsplatz zeigte mit 60,7 % einen Schwerpunkt bei gewerblichen Unternehmen, wovon 26,6 % auf kleine und mittlere Unternehmen (weniger als 500 Mitarbeiter) und 34,1 % auf Großunternehmen bzw. deren Niederlassungen im Landkreis entfielen. 35,9 % der Räume entfielen auf Kommunen und kommunale Unternehmen, 3,0 % auf gemeinnützige Organisationen und 0,4 % auf anerkannte Religionsgemeinschaften.

In der Verteilung von Arbeitgebern unterschiedlicher Organisationsarten, die freiwillig in diesem Projekt mitgewirkt haben, fanden sich typische Vertreter eines durch ländliche Strukturen geprägten bayerischen Landkreises. Da jedoch die Datensätze statistisch nicht repräsentativ sind, ist keine generelle Aussage über das Verteilungsspektrum der Arbeitgeber bzw. der Arbeitsplätze im untersuchten Landkreis möglich.

Die auswertbaren Messdaten zu Räumen mit mindestens einem Arbeitsplatz verteilen sich auf Kellergeschoss ($n = 266$), Erdgeschoss ($n = 1.636$) und Obergeschosse ($n = 75$). Die Daten zu Räumen mit mindestens einem Arbeitsplatz in Obergeschossen wurden in die Auswertung mit einbezogen, eine tiefergehende Analyse hinsichtlich der Radonkonzentration in den unmittelbar darunterliegenden Räumen wurde aufgrund der geringen Fallzahlen jedoch nicht durchgeführt. Optional konnte von den Arbeitgebern auch der Status einer energetischen Sanierung angegeben werden. Aufgrund der geringen Anzahl entsprechender Datensätze wurde hierzu ebenfalls keine nähere Auswertung durchgeführt.

Von den insgesamt 1.977 ausgewerteten Räumen mit mindestens einem Arbeitsplatz war bei 17 % ($n = 329$) der Referenzwert für die Radonkonzentration in Innenräumen von 300 Bq/m^3 überschritten. Bei 2 % ($n = 37$) dieser Räume lag die Radonkonzentration über 1.000 Bq/m^3 , wobei diese Räume ausschließlich im Keller- oder Erd-

geschoss lagen. Bei 83 % (n = 1.648) der Räume mit mindestens einem Arbeitsplatz lag die Radonkonzentration unterhalb des Radon-Referenzwerts, bei 55 % (n = 1.091) der Räume lag die Radonkonzentration unterhalb von 100 Bq/m³.

Bei 81 der 244 ausgewerteten Gebäude wurde in mindestens einem Raum mit einem Arbeitsplatz der Radon-Referenzwert überschritten, der Anteil der Gebäude lag somit bei 33 %. Im Umkehrschluss zeigen diese Ergebnisse, dass in 67 % der untersuchten Gebäude die Radonkonzentration in allen Räumen mit einem Arbeitsplatz unterhalb des Referenzwerts lag.

In Räumen mit mindestens einem Arbeitsplatz im Kellergeschoss wurden Referenzwertüberschreitungen häufiger festgestellt als bei solchen im Erdgeschoss, zudem wiesen die Radonmesswerte in Kellergeschossen eine größere Streuung auf (Abb. 1). Der Median der Radonkonzentration und das 3. Quartil für Räume im Kellergeschoss zeigen, dass die Radonkonzentration an Arbeitsplätzen in einem Kellergeschoss überwiegend unterhalb des Referenzwerts lag. Dennoch wurden sowohl in Keller- als auch Erdgeschoss deutliche Überschreitungen des Referenzwerts festgestellt.

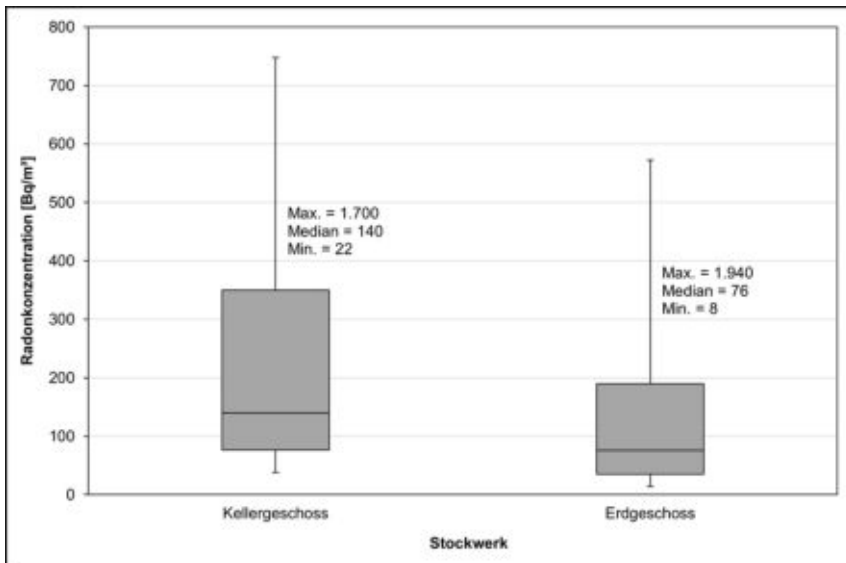


Abbildung 1: Box-Whiskers-Plot mit 5 %- und 95 %-Quantil der Radonkonzentration in Räumen mit mindestens einem Arbeitsplatz in Abhängigkeit des Stockwerks (Kellergeschoss: 266 Datensätze; Erdgeschoss: 1.636 Datensätze).

Die Auswirkung einer Vollunterkellerung auf die Radonkonzentration in Erdgeschossen wurde in 1.369 Räumen mit mindestens einem Arbeitsplatz analysiert. Von diesen 1.369 Räumen im Erdgeschoss waren 35 % (n = 476) vollunterkellert und 65 % (n = 893) nicht unterkellert. Die Mediane der Radonkonzentration lagen in beiden Gruppen in einem vergleichbar niedrigen Bereich, bei Nichtunterkellerung war die Streubreite der Radonkonzentration insbesondere oberhalb des 3. Quartils größer (Abb. 2). Eine Untersuchung bei Teilunterkellerung wurde nicht durchgeführt, weil die unterschiedlichen Bauausführungen in den erhaltenen Datensätzen keine ausreichende Vergleichbarkeit zulassen.

Es wurden 1.353 Datensätze mit Angaben zum Lüftungssystem in Keller- oder Erdgeschoss ausgewertet, davon bezogen sich 1.229 Datensätze ausschließlich auf Lüftungssysteme im Erdgeschoss.

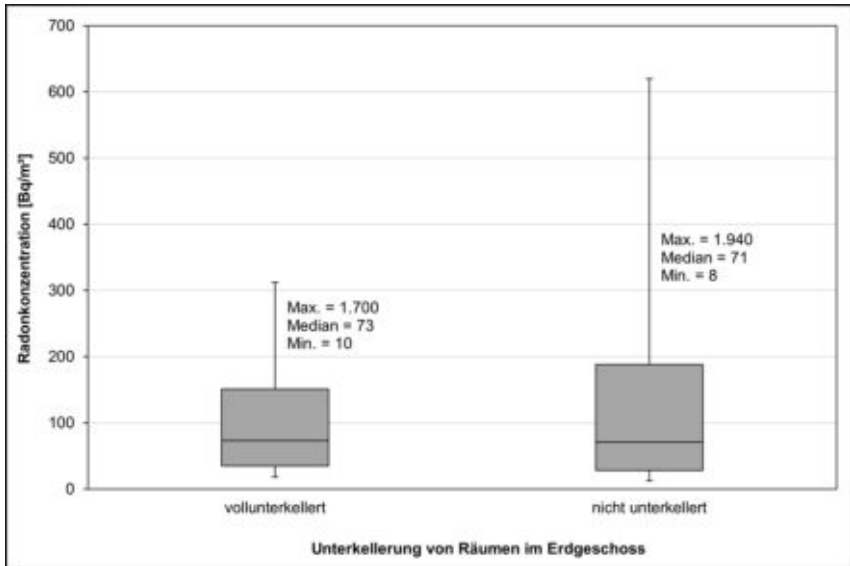


Abbildung 2: Box-Whiskers-Plot mit 5 %- und 95 %-Quantil der Radonkonzentration für Räume mit mindestens einem Arbeitsplatz im Erdgeschoss in Abhängigkeit von der Unterkellerung (vollunterkellert: 476 Datensätze; nicht unterkellert: 893 Datensätze).

Die Lüftungsanlagen waren bereits unabhängig von der Festlegung als Radon-Vorsorgegebiet installiert worden, häufig aufgrund der Ausgestaltung des Arbeitsplatzes oder aufgrund neuerer Gebäudebauart mit automatisierter Lüftung. Die Auskunft zur Lüftungsanlage war nur mit „Ja“ oder „Nein“ zu beantworten, nähere Angaben oder technische Details wurden nicht abgefragt.

Die Datensätze mit Angaben zum Erdgeschoss waren am umfangreichsten und erlauben die belastbarste Aussage. In Räumen mit einem Arbeitsplatz im Erdgeschoss lag bei Vorhandensein einer Lüftungsanlage in allen Räumen unterhalb des 95 %-Quantils die Radonkonzentration unterhalb des Referenzwertes, der Median der Radonkonzentration lag bei 33 Bq/m³. In der Vergleichsgruppe ohne Lüftungsanlage war die Streuung insgesamt größer und oberhalb des 3. Quartils wurde der Referenzwert überschritten, dennoch lag der Median der Radonkonzentration bei 92 Bq/m³ (Abb. 3).

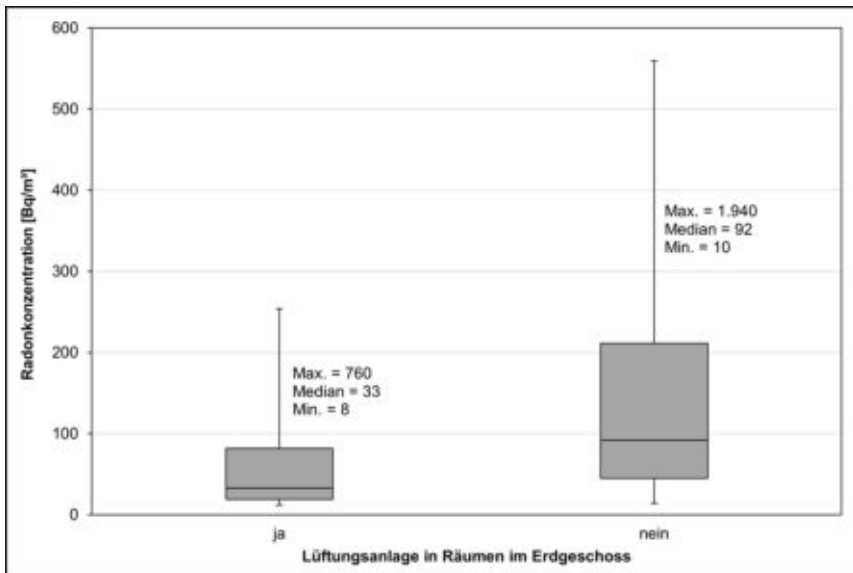


Abbildung 3: Box-Whiskers-Plot mit 5 %- und 95 %-Quantil der Radonkonzentration für Räume mit mindestens einem Arbeitsplatz in Abhängigkeit vom Vorhandensein einer Lüftungsanlage (ja: 306 Datensätze; nein: 923 Datensätze).

Zur Untersuchung der Auswirkung des Gebäudealters auf die Wahrscheinlichkeit einer Radon-Referenzwertüberschreitung am Arbeitsplatz wurden die auswertbaren 244 Gebäude in vier vergleichbar große Gruppen aufgeteilt und bestimmten Baujahresklassen zugeordnet. Die ältesten Gebäude lagen in der Baujahresklasse 1782–1964 ($n = 61$) und wiesen mit 54 % ($n = 33$) den größten Anteil an Arbeitsplätzen mit mindestens einer Referenzwertüberschreitung auf. Die Gebäude in den Gruppen der jüngeren Baujahresklassen lagen bezüglich der Referenzwertüberschreitung auf einem vergleichbaren Niveau von 24 % bis 28 % (Abb. 4).

Bei Unterteilung der Gebäude der Baujahresklasse 1782–1964 in wiederum vier vergleichbar große Subgruppen lag der entsprechende Anteil an Gebäuden mit Referenzwertüberschreitung in der ältesten Baujahres-Subklasse 1782–1899 mit 69 % ($n = 16$) am höchsten und in den Baujahres-Subklassen 1900–1939 mit 50 % ($n = 8$), 1940–1955 mit 53 % ($n = 8$) und 1956–1964 mit 43 % ($n = 6$) auf einem niedrigeren Niveau.

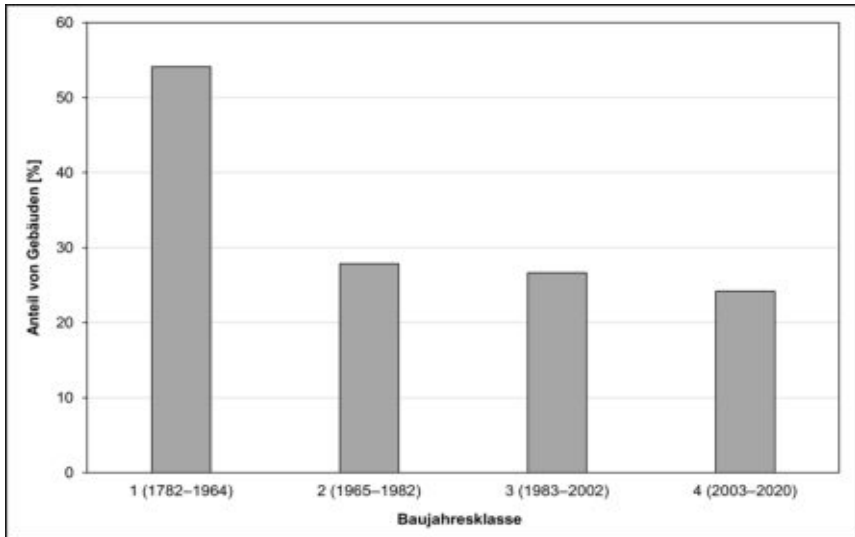


Abbildung 4: Anteil von Gebäuden mit einer Überschreitung des Radon-Referenzwerts in mindestens einem Raum mit mindestens einem Arbeitsplatz in Abhängigkeit von der Baujahresklasse. Die Anzahl der Gebäude mit mindestens einer Referenzwertüberschreitung gegenüber der gesamten Gebäudeanzahl je Baujahresklasse war wie folgt: Baujahresklasse 1 (33 von 61), Baujahresklasse 2 (17 von 61), Baujahresklasse 3 (16 von 60), Baujahresklasse 4 (15 von 62).

Zur näheren Untersuchung der Radonkonzentration in Räumen mit Arbeitsplätzen im Radon-Vorsorgegebiet Landkreis Wunsiedel wurden diese direkt verglichen mit entsprechenden Räumen im restlichen Bayern. Die Datengrundlage dafür lieferte das ebenfalls von StMUV und LfU in den Jahren 2013 bis 2019 in Bayern durchgeführte Projekt „Ermittlung und Klassifizierung von öffentlich zugänglichen Gebäuden in Hinblick auf die Radonexposition“ [5]. Es wurden Daten aus insgesamt 102 Gebäuden in Bayern, nicht aber dem späteren Radon-Vorsorgegebiet Wunsiedel, herangezogen. Auch in diesem früheren Projekt waren in den Gebäuden die Radonkonzentration an Arbeitsplätzen hinsichtlich Referenzwertüberschreitungen untersucht worden. Die Daten waren ebenfalls ungesteuert bereitgestellt worden und stellen keine repräsentative Stichprobe für ganz Bayern dar. Die Ergebnisse zu den Gebäuden aus diesen beiden Projekten wurden für einen direkten Vergleich zusammengeführt (Abb. 5).

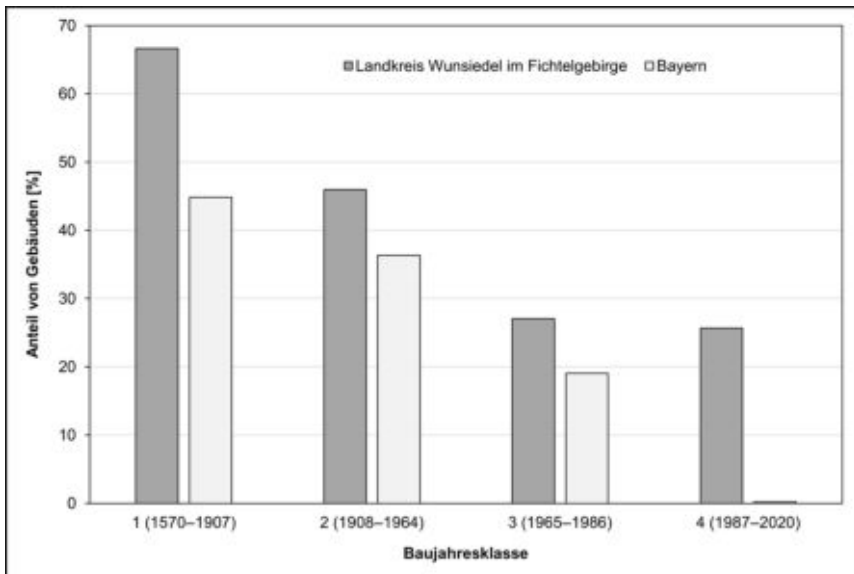


Abbildung 5: Anteil von Gebäuden mit einer Überschreitung des Radon-Referenzwerts in mindestens einem Raum mit mindestens einem Arbeitsplatz in Abhängigkeit von der Baujahresklasse. Gegenübergestellt sind die Ergebnisse aus dem Radon-Vorsorgegebiet Landkreis Wunsiedel im Fichtelgebirge und aus dem restlichen Bayern ohne diesen Landkreis. Die Anzahl der Gebäude mit mindestens einer Referenzwertüberschreitung gegenüber der gesamten Gebäudeanzahl je Baujahresklasse war wie folgt: Landkreis Wunsiedel im Fichtelgebirge (Baujahresklasse 1 (16 von 24), Baujahresklasse 2 (17 von 37), Baujahresklasse 3 (20 von 74), Baujahresklasse 4 (28 von 109); Bayern ohne Landkreis Wunsiedel im Fichtelgebirge (Baujahresklasse 1 (13 von 29), Baujahresklasse 2 (8 von 22), Baujahresklasse 3 (4 von 21), Baujahresklasse 4 (0 von 30)).

Der Anteil an Gebäuden mit mindestens einer Referenzwertüberschreitung lag in Gebäuden des Landkreises Wunsiedel im Fichtelgebirge in allen Baujahresklassen höher als in der Vergleichsgruppe. Ausgehend von der ältesten Baujahresklasse zeigte sich in beiden Projekten eine Abnahme der Referenzwertüberschreitungen mit jeder jüngeren Baujahresklasse. Während jedoch im Landkreis Wunsiedel im Fichtelgebirge der Anteil der Referenzwertüberschreitungen in den beiden Baujahresklassen 1965 – 1986 und 1987 – 2020 auf einem

vergleichbaren Niveau stehen blieb, sank er in Gebäuden des restlichen Bayerns mit jeder jüngeren Baujahresklasse und lag in den untersuchten Gebäuden der Baujahresklasse 1987 – 2014 bei null.

4 Diskussion

Mit diesem Projekt ist es gelungen, eine beträchtliche Anzahl von 1.977 Datensätzen zu Arbeitsplätzen im ersten bayerischen Radon-Vorsorgegebiet zu gewinnen. Dadurch grenzt sich dieses Projekt ab von Analysen, die auf Einzelfälle fokussiert sind und dabei einzelne Aspekte tiefgehend untersuchen. Von den insgesamt 3.042 erhaltenen Datensätzen konnten 65 % verwendet werden, 35 % schieden aufgrund nicht eingehaltener Kriterien für dieses Forschungsprojekt aus. Am stärksten ins Gewicht fiel dabei die Überschreitung der Messdauer durch einzelne Arbeitgeber. Die Kommunikation zum Projekt umfasste im Wesentlichen die Informationen zu den Projektvoraussetzungen durch das LfU, die aktiven Aufrufe zur freiwilligen Teilnahme an diesem Projekt durch das LfU und das Landratsamt Wunsiedel im Fichtelgebirge und im Bedarfsfall einen vertieften individuellen Austausch. Obwohl einzelne Arbeitgeber die Projektvoraussetzungen nicht vollständig erfüllten, werden die Qualität der Informationsunterlagen und die geleistete Kommunikationsarbeit insgesamt positiv bewertet.

Die gewonnenen Ergebnisse erlauben eine Einschätzung der realen Radonexposition an Arbeitsplätzen in Bayerns erstem Radon-Vorsorgegebiet. Die gemessenen Radonkonzentrationen von minimal 8 Bq/m^3 bis maximal 1.940 Bq/m^3 lagen innerhalb einer unauffälligen Bandbreite. Der Messwert mit der niedrigsten Radonkonzentration befindet sich nahe der Radon-Außenluftkonzentration von $9 - 12 \text{ Bq/m}^3$ in der Region Wunsiedel im Fichtelgebirge [6]. Die Messungen wurden wie im StrlSchG vorgegeben von den Arbeitgebern in Eigenverantwortung durchgeführt, demgemäß wurden sie weder eng überwacht noch zertifiziert durchgeführt. Es ist denkbar, dass Arbeitgeber mit besonders starken Referenzwertüberschreitungen sich nicht an diesem freiwilligen Projekt beteiligt haben. Eine mögliche Ausrichtung in den erhaltenen Datensätzen hin zu weniger gravierenden Referenzwertüberschreitungen kann daher nicht ausgeschlossen werden.

Im durchgeführten Projekt lag in 33 % der Gebäude mindestens ein Raum mit einem Arbeitsplatz über dem Referenzwert. Dieses Ergebnis übersteigt den Anteil von mindestens 10 % nach § 153 Abs. 2 StrlSchV, der aufgrund der wissenschaftlichen Prognose durch das BfS für ein Radon-Vorsorgegebiet erwartet wird. Das erhaltene Ergebnis darf jedoch keinesfalls auf die Gesamtheit der Gebäude mit Arbeitsplätzen im Radon-Vorsorgegebiet hochgerechnet werden. Dieses Ergebnis zeigt auch, dass in zwei Drittel der untersuchten Gebäude jeder Arbeitsplatz ausreichend gegenüber Radon geschützt war.

Die Ergebnisse in diesem Projekt bestätigen, dass sich eine Vollunterkellerung günstig auf die Radonkonzentration in den darüber liegenden Räumen im Erdgeschoss auswirkt. Auch im Landkreis Wunsiedel im Fichtelgebirge lag in der Regel die Radonkonzentration an Arbeitsplätzen im Kellergeschoss höher als an Arbeitsplätzen im Erdgeschoss. Bemerkenswert ist aber auch, dass etwa für die Hälfte der Räume mit Arbeitsplätzen sowohl im Keller- als auch im Erdgeschoss Radonkonzentrationen im Bereich von 100 Bq/m^3 ermittelt wurden. Das zeigt, dass in diesen Fällen bereits ein sehr guter Schutz vor Radon in diesem Vorsorgegebiet gegeben war.

Der Median der Radonkonzentration in Räumen im Erdgeschoss, die mit einem Lüftungssystem ausgestattet waren, lag mit 38 Bq/m^3 um ein Vielfaches unterhalb des Radon-Referenzwerts. Daraus kann geschlossen werden, dass Lüftungsanlagen in einem Radon-Vorsorgegebiet als wirksames Instrument eingesetzt werden können. Eine fachmännische Beratung und die Suche nach einer gut geeigneten Lösung für den individuellen Einzelfall dürften als allgemeine Empfehlung bestehen bleiben.

Eine Überschreitung des Radon-Referenzwerts wurde in einem überschaubaren Anteil von 17 % der Räume mit einem Arbeitsplatz festgestellt. Der dringlichste Handlungsbedarf aus Sicht des Gesundheitsschutzes liegt bei jenen 2 % ($n=37$) der Räume, in denen mehr als 1.000 Bq/m^3 Radon gemessen wurden. In diesen Fällen ergibt sich bei einer Vollbeschäftigung und der durchschnittlichen jährlichen Arbeitsdauer von 2.000 Stunden durch die Radonexposition eine effektive Dosis von mindestens 6 mSv. Bei Überschreitung dieser Jahresdosis sind

Maßnahmen des beruflichen Strahlenschutzes nach § 71 StrlSchV erforderlich. Im Umkehrschluss jedoch lagen 83 % (n = 1.648) der untersuchten Räume mit Arbeitsplätzen bereits unterhalb des Referenzwerts von 300 Bq/m^3 und 55 % (n = 1.091) sogar unterhalb von 100 Bq/m^3 . Zwar dürfte sich dieser bereits vorliegende Schutz vor Radon an Arbeitsplätzen in den meisten Fällen unbeabsichtigt ergeben haben, etwa durch die Installation einer Lüftungsanlage aus anderweitigen Gründen, er verdeutlicht aber die Wirksamkeit, mit der in einem Vorsorgegebiet Radon-Schutzmaßnahmen umgesetzt werden können.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass auch im untersuchten Radon-Vorsorgegebiet die Wahrscheinlichkeit für erhöhte Radonkonzentrationen erwartungsgemäß mit dem Gebäudealter anstieg. Der Vergleich von Gebäuden in und außerhalb des Radon-Vorsorgegebiets Landkreis Wunsiedel im Fichtelgebirge ergab in den untersuchten Gebäuden der Baujahresklasse ab 1987 einen auffallenden Unterschied: Während bayernweit die Radonkonzentrationen in dieser jüngsten Baujahresklasse unterhalb des Referenzwerts lagen, scheinen im Landkreis Wunsiedel im Fichtelgebirge die Referenzwertüberschreitungen in Gebäuden ab 1987 nicht unter ein gewisses Niveau zu sinken. Dieses Ergebnis ist ein Hinweis darauf, dass die gesetzliche Forderung eines zusätzlichen Radonschutzes in Neubauten nach § 154 StrlSchV in Radon-Vorsorgegebieten sinnvoll ist. Die vorgestellten Ergebnisse zu Referenzwertüberschreitungen in Gebäuden des restlichen Bayerns außerhalb eines Radon-Vorsorgegebiets unterstreichen zudem die Empfehlung, Radon in Innenräumen flächendeckend in und außerhalb von Vorsorgegebieten zu messen und im Fall einer Referenzwertüberschreitung entsprechende Schutzmaßnahmen umzusetzen.

Durch die Festlegung von Radon-Vorsorgegebieten auf Landkreisebene ist für das StMUV als zuständige Behörde das jeweilige Landratsamt die zentrale Kontaktstelle anstatt - wie es bei einer Festlegung auf Gemeindeebene der Fall wäre - zahlreiche voneinander losgelöste Gemeindeämter. Das erwies sich in der Projektumsetzung als sehr hilfreich. Zwischen der Radon-Fachstelle Bayern am LfU in Augsburg, die seit Jahren die bayernweite Informationsarbeit zum Thema Radon erfolgreich ausführt, und dem Landratsamt Wunsiedel im Fichtelgebirge

konnten Synergien genutzt und die Kommunikation der neuen Pflichten im Radonschutz effektiver gestaltet werden. Dabei wurde berücksichtigt, dass sich Bürger und Arbeitgeber aufgrund der peripheren Lage des Landkreises im Nord-Osten Bayerns oftmals bevorzugt an die Behörden vor Ort wenden. Erschwerend für die Informationsarbeit bei Festlegung des Radon-Vorsorgegebiets im Jahr 2021 war, dass aufgrund der Beschränkungen zur Bekämpfung der Corona-Pandemie übliche und bewährte Kommunikationswege kaum genutzt werden konnten und Arbeitgeber durch eine Reihe Pandemie-bedingter Herausforderungen anderweitig massiv belastet waren. Durch die Einbindung des Landratsamts Wunsiedel im Fichtelgebirge in die Informationsarbeit konnte in verstärktem Maß das Vertrauen von Arbeitgebern zur Mitwirkung gewonnen werden. Zusätzlich erwiesen sich die Kenntnisse des Landratsamts über Erfahrungen und Bedürfnisse der Arbeitgeber im Landkreis bezüglich der gesetzeskonformen Umsetzung der Maßnahmen im neu festgelegten Radon-Vorsorgegebiet als hilfreich.

Nach der einschneidenden Novelle des StrlSchG im Jahr 2018 steht Deutschland hinsichtlich der praktischen Umsetzung des Radonschutzes wohl erst am Beginn breiter und konsequent durchzuführender Schutzmaßnahmen gegenüber Radon. Zum aktuellen Zeitpunkt bleibt weiterhin viel Basisinformationsarbeit zu leisten, um grundlegende Akzeptanz für das Thema Radonschutz zu schaffen und die Motivation zur Umsetzung von Radon-Schutzmaßnahmen zu erhöhen.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Bossew, P., Hoffmann, B., 2017: „Die Prognose des geogenen Radonpotentials in Deutschland und die Ableitung eines Schwellenwertes zur Ausweisung von Radonvorsorgegebieten“, Bundesamt für Strahlenschutz, Fachbereich Strahlenschutz und Umwelt; Internet: <https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-2017122814454/3/BfS-SW-24-18%20Radonvorsorgegebiete-180618.pdf> (besucht am 19.03.2024).
- [2] Bundesamt für Strahlenschutz, 2020: „Aktuelle Prognose des geogenen Radonpotentials in Deutschland und zugehörige Daten zum Radonpotential in Bayern“; Schreiben des BfS vom 25.09.2020 an das StMUV. StMUV-Zeichen: 83-U8822-2020/26.
- [3] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, 2021: „Allgemeinverfügung“; Internet: https://www.stmuv.bayern.de/themen/strahlenschutz/radon_vorsorgegebiete/index.htm (besucht am 19.03.2024).
- [4] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2019: „Radonmaßnahmenplan zur nachhaltigen Verringerung der Exposition gegenüber Radon“; Internet: https://www.bmu.de/publikation?tx_bmuBpublications_publications%5Bpublication%5D=544&cHash=279fd8b6f6b52470ad386fd61f5db245 (besucht am 19.03.2024).
- [5] Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2019: „Ermittlung und Klassifizierung von öffentlich zugänglichen Gebäuden im Hinblick auf die Radonexposition“, Abschlussbericht; Internet: https://www.lfu.bayern.de/strahlung/untersuchung_nat_radioaktivitaet_radon/index.htm (besucht am 19.03.2024).
- [6] Bundesamt für Strahlenschutz 2019: „Radon-Handbuch Deutschland“; Internet: https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschueren/ion/radon-handbuch.pdf?__blob=publicationFile&v=11 (besucht am 19.03.2024).



Radon-Konzentrationen während und außerhalb der Arbeitszeit an Arbeitsplätzen und Schulen

Tryggve Rönqvist¹⁾

Vanda Jakobová¹⁾

¹⁾ Radonova Laboratories AB, Uppsala, Schweden

Zusammenfassung

In Gebäuden mit zeitgesteuerter Lüftung können die Unterschiede zwischen der Radonbelastung während der Arbeitszeit und außerhalb der Arbeitszeit groß sein. Aus Folgemessungen mit kontinuierlichen Radonmessgeräten lassen sich Faktoren zwischen Arbeitszeit und Gesamtmessdauer ermitteln, die zusammen mit einer vorangegangenen Langzeitmessung zur besseren Abschätzung der Radonbelastung während der Arbeitszeit genutzt werden können. Etwa drei hundert Folgemessungen an schwedischen Arbeitsplätzen und Schulen wurden untersucht. Die Daten zeigen, dass 78 % der Arbeitsplätze mit zeitgesteuerter Lüftung, deren Radonwerte über dem schwedischen Referenzwert von 200 Bq/m³ lagen, geschätzte Jahresmittelwert während der Arbeitszeit unter dem Referenzwert hatten. Beispielsweise hatte ein Kindergarten, dessen durchschnittliche Radonwerte bei mehr als 700 Bq/m³ lagen, während der Arbeitszeit nur Radonwerte von unter 40 Bq/m³.

Radon concentrations during and outside working hours at workplaces and schools

Summary

In buildings with time-controlled ventilation, the differences between radon exposure during working hours and outside working hours can be large. Follow-up measurements with continuous radon monitors can determine factors between working hours and the total measurement duration, which, together with a preceding long-term measurement, can be used to better estimate radon exposure during working

hours. Approximately three hundred follow-up measurements at Swedish workplaces and schools were examined. The data shows that 78 % of workplaces with time-controlled ventilation, whose radon levels exceeded the Swedish reference value of 200 Bq/m³, had estimated annual average values during working hours below the reference value. For example, a kindergarten, with average radon levels exceeding 700 Bq/m³, had radon levels during working hours of less than 50 Bq/m³.

1 Radonbelastungen und Lüftungsmuster an schwedischen Arbeitsplätzen

In Ländern mit kälterem Klima, wie in den nordischen Ländern und Kanada, ist die zeitgesteuerte mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung die häufigste Art der Lüftung. In Fällen, in denen eine natürliche Belüftung verwendet wird, handelt es sich in der Regel um Lüftungsventile, während Fensteröffnungen seltener vorkommen. Zeitgesteuerte mechanische Lüftung bietet in Verbindung mit gut isolierten Gebäuden die Möglichkeit, den Energieverbrauch zu senken und gleichzeitig einen effektiven Luftaustausch aufrechtzuerhalten.

Durch mechanische Be- und Entlüftung können Druckunterschiede gezielt eingestellt werden, um einen leichten Unterdruck im Gebäude aufrechtzuerhalten. In Verbindung mit einem effizienten Luftaustausch kann dies die Radonkonzentration, wenn die Lüftungsanlagen in Betrieb sind, erheblich verringern. Daher können langfristige Radonmessungen die Radonwerte während der Arbeitszeiten überbewerten.

Um genauere Schätzungen der Jahresmittelwerte während der Arbeitszeit zu erhalten, sind zeitaufgelöste Folgemessungen unerlässlich. In dieser Studie werden Daten von schwedischen Arbeitsplätzen präsentiert, die von Radonova analysiert wurden, wobei der Schwerpunkt auf den Folgemessungen liegt. Darüber hinaus werden Langzeitmessungen einbezogen, da sie als erster Schritt zur Bewertung der Radonwerte am Arbeitsplatz dienen. In Schweden sind Langzeitmessungen während der Heizperiode vom 1. Oktober bis 30. April mit einer Mindestmessdauer von zwei Monaten vorgeschrieben [1].

1.1 Frühere Langzeitmessungen an schwedischen Arbeitsplätzen

Radonova hat zuvor [2] Daten von über 10.000 Langzeitmessungen an schwedischen Arbeitsplatzgebäude vorgelegt. Zusätzlich wurde eine Teilmenge der Daten von mehr als 3.000 Arbeitsplätzen mit fünf oder mehr Messpunkten in jedem Gebäude analysiert [3]. Bemerkenswert ist, dass etwa 88 % dieser Gebäude mit einer zeitgesteuerten Lüftung mit mechanischer Be- und Entlüftung ausgestattet waren, während nur etwa 5 % sich ausschließlich auf natürliche Belüftung verließen. Die durchschnittliche Radonkonzentration an Arbeitsplätzen mit natürlicher Belüftung lag bei 227 Bq/m^3 , während an Arbeitsplätzen mit mechanischer Be- und Entlüftung eine Konzentration von 96 Bq/m^3 festgestellt wurde. Bei Arbeitsplätzen, die ausschließlich mit natürlicher Belüftung ausgestattet sind, ist nicht davon auszugehen, dass die Radonkonzentration während der Arbeitszeiten wesentlich niedriger ist, so dass sie in den Protokollen für Folgemessungen nicht berücksichtigt werden (Abb. 1).

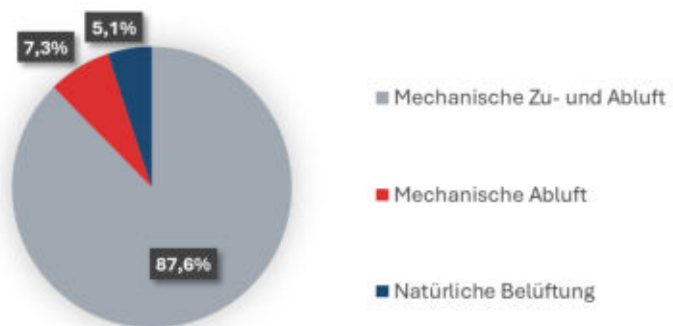


Abbildung 1: Verschiedene Lüftungsarten an Arbeitsplätzen aus der Radon-Datenbank von Radonova.

Um Unterschiede in den zeitlichen Variationen zwischen den Lüftungsarten zu veranschaulichen, werden in Abb. 2 die Ergebnisse von zeitaufgelösten 7-Tage-Messungen dargestellt. Das Beispiel (Abb. 2a) zeigt eine Messung in einem Kindergarten aus dem Jahr 2017 mit sehr

hohen Unterschieden in den Radonkonzentrationen während und außerhalb der Arbeitszeiten, durchschnittlich 810 Bq/m^3 während des gesamten 7-tägigen Messzeitraums, aber nur 35 Bq/m^3 während der Arbeitsstunden (in der Abbildung gelb markiert), was einen Faktor von 0,04 ergibt, mit dem der vorherige Wert aus der Langzeitmessung multipliziert werden kann, um eine Schätzung der Langzeitwerte während der Arbeitsstunden zu erhalten. In diesem Gebäude sind keine Radonschutzmaßnahmen erforderlich, aber es ist wichtig, dass die Lüftung in Betrieb ist, wenn das Gebäude genutzt wird. Das Beispiel in Abb. 2b zeigt die Ergebnisse einer Messung in einer Kirche, bei der es sich um ein altes Gebäude mit ausschließlich natürlicher Belüftung handelt, das möglicherweise schwer zu sanieren ist. Allerdings beträgt die wöchentliche Arbeitszeit in der Kirche weniger als 20 Stunden, so dass die personenbezogene Radonexposition immer noch unter dem Grenzwert liegen kann.

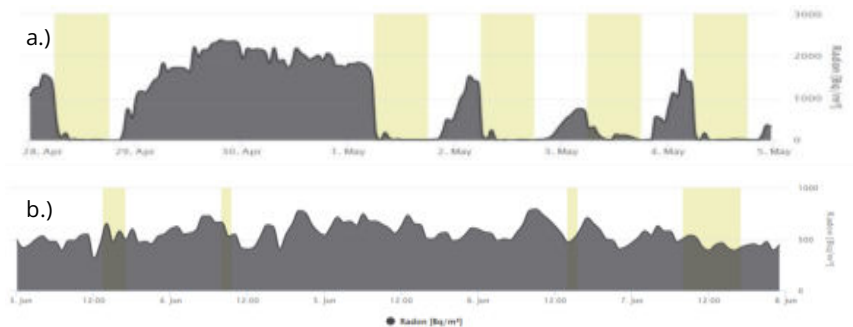


Abbildung 2: Beispiele für Radonkonzentration aus zeitaufgelösten Arbeitsplatzmessungen. a) Vorschule mit zeitgesteuerter mechanischer Zu- und Abluft. b) Kirche mit rein natürlicher Lüftung. Gelbe Tafeln: Arbeitszeiten.

Von den 10.000 untersuchten Arbeitsplatzgebäuden wiesen 24 % mindestens einen Messpunkt auf, der den schwedischen Referenzwert von 200 Bq/m^3 überschritt [4]. Darüber hinaus wiesen 34 % der Arbeitsplatzgebäude mit fünf oder mehr Messpunkten mindestens einen Messpunkt über dem Referenzwert auf. Es ist ersichtlich, dass die

Wahrscheinlichkeit, einen Messpunkt oberhalb des Referenzwerts zu finden, mit der Anzahl der Messpunkte im Gebäude steigt.

Die räumlichen Schwankungen der Radonwerte an einem Arbeitsplatz können erheblich sein, wie die Tabelle 1 zeigt, die Daten von einem großen schwedischen Betrieb enthält. In diesem Fall wurden die Messungen in praktisch allen Räumen durchgeführt, in denen gearbeitet wird, unabhängig von der Stockwerksebene. Während auf allen Stockwerken erhöhte Werte über dem Referenzwert festgestellt wurden, wies ein erheblicher Teil der Messstellen in jedem Stockwerk relativ niedrigen Werte auf.

Tabelle 1: Beispiel für die räumliche Verteilung der Radonniveaus an einem großen schwedischen Arbeitsplatz. EG = Erdgeschoss; OG = Obergeschoss.

Stockwerk	Messpunkte	Durchschnitt (Bq/m ³)	Höchster Wert (Bq/m ³)	> 200 Bq/m ³	< 50 Bq/m ³
Souterrain	8	140	490	25 %	38 %
Keller	31	130	1350	10 %	77 %
EG	61	120	510	18 %	40 %
1. OG	99	80	590	6 %	55 %
2. OG	84	90	2350	5 %	55 %
3. OG	67	80	970	3 %	45 %
4. OG	40	70	330	5 %	52 %
5. OG	20	70	250	5 %	50 %
6. OG	16	90	170	0 %	19 %
7. OG	5	130	210	17 %	0 %

Es ist wichtig zu beachten, dass Schweden seit über 20 Jahren keine Risikogebiete für Radon ausgewiesen hat und es wird empfohlen, Radonmessungen unabhängig von der geografischen Lage durchzuführen. Die Radondaten von Radonova wurden auf Postleitzahlebene mit der nationalen Karte abgeglichen, die den Urangehalt im Oberboden angibt. Wie in Tabelle 2 dargestellt, gibt es zwar einen Zusammenhang mit den Uranwerten, aber signifikante Radonprobleme können in jeder Region festgestellt werden. Es ist erwähnenswert, dass Gebäude, die mit Radon emittierendem Baumaterial gebaut wurden, dem sogenannten „Blauen Beton“, der zwischen 1929 und 1975 verwendet wurde, von dieser Analyse ausgeschlossen wurden.

Tabelle 2: Uraniumkonzentrationen und Radonniveaus an schwedischen Arbeitsplätzen ohne "Blaubeton"-Baumaterial.

U-Konz. (ppm)	Anzahl der gemessenen Gebäude	Durchschnitt. +/- SD (Bq/m ³)	Durchschn. Medianwert (Bq/m ³)	Höchster Wert (Bq/m ³)	Mindesten einem Wert über 200 Bq/m ³
< 1.0	48	48 ± 86	42	1125	12,5 %
1.0-2.0	144	89 ± 210	73	4850	28,5 %
2.0-3.0	303	106 ± 171	87	5103	38,9 %
3.0-4.0	245	106 ± 174	80	6429	36,3 %
4.0-5.0	13	166 ± 252	84	6198	38,5 %
> 5.0	5	642 ± 1222	154	> 40000	60,0 %

2 Messung der durchschnittlichen Langzeit-Radonkonzentration während der Arbeitszeiten

Sowohl Langzeit- als auch Kurzzeitmessungen sind erforderlich, um die jährliche ²²²Rn-Exposition (in diesem Text als Radon bezeichnet) während der Arbeitszeit genau bewerten zu können. In Schweden ist der Referenzwert auf 200 Bq/m³ festgelegt [1,4]. Wenn die geschätzten jährlichen Radonbelastungen während der Arbeitszeit nach eventuellen Abhilfemaßnahmen den Referenzwert überschreiten, muss dies der Arbeitgeber der schwedischen Strahlenschutzbehörde melden [1].

Bei Langzeitradonmessungen werden in der Regel Kernspur-detektoren über einen Zeitraum von mindestens zwei Monaten eingesetzt, wie in der ISO-Norm 11665-8 [5] beschrieben. Während solche Messungen ein erstes Verständnis der Radonwerte am Arbeitsplatz liefern, geben sie aufgrund der hohen räumlichen (Tab. 1) und zeitlichen Variabilität (Abb. 2) der Radonwerte innerhalb von Gebäuden möglicherweise nicht vollständig die Expositionswerte der Arbeitnehmer wieder.

Wenn die erste Langzeit-Radonmessung in einem Gebäude mit zeitgesteuerter Lüftung den Referenzwert überschreitet, können weitere Untersuchungen mit kontinuierlichen Radonmessgeräten [1] in einer sogenannten Folgemessung durchgeführt werden. Die kurzfristige Folgemessung kann über einen Zeitraum von 7 Tagen durchgeführt

werden, von denen 5 Tage Arbeitstage sind, oder über längere Zeiträume, solange es sich um volle Wochen handelt. Turtiainen und Kollegen [6] haben gezeigt, dass die Radonkonzentration während der Arbeitszeit zeitlich viel stärker schwankt als das Verhältnis zwischen den Radonbelastungen während der Arbeitszeit und dem gesamten Messzeitraum.

2.1 Methode zur Schätzung des langfristigen Jahresmittelwertes der Radonkonzentration während der Arbeitszeit durch Folgemessungen

Die Folgemessungen liefern zwei separate Radonwerte: den durchschnittlichen Radonwert während der Arbeitszeit $Radon_{so}$, und den durchschnittlichen Radonwert über den gesamten 7-tägigen Messzeitraum $Radon_s$. Der geschätzte Langzeitmittelwert während der Arbeitszeit in einem Gebäude mit zeitgesteuerter Lüftung wird $Radon_E$ wird dann auf der Grundlage der unten folgenden Gleichung 1 berechnet, wobei er durch die Multiplikation eines früheren Langzeitwertes $Radon_L$, mit dem Verhältnis (in diesem Text als „Faktor“ bezeichnet) $Radon_{so}$ und $Radon_s$ errechnet wird. Zuvor wurde die durchschnittliche Konzentration während der Arbeitsstunden mit dem Referenzwert [1] verglichen.

$$Radon_E = Radon_L \times \left(Radon_{so} / Radon_s \right) \quad (1)$$

Wie Abb.3 anhand eines Beispiels und einer Berechnung zeigt, betrug der durchschnittliche Langzeitwert, der an einem Arbeitsplatz gemessen wurde, 550 Bq/m^3 , die Radonbelastung während der Arbeitszeit ist jedoch eher niedrig. Während der einwöchigen Folgemessung lag die Gesamt-Radonkonzentration bei 450 Bq/m^3 , aber der Durchschnittswert während der Arbeitszeit lag bei nur 100 Bq/m^3 . Daraus ergibt sich ein Faktor von 0,22 und das geschätzte Langzeitergebnis während der Arbeitszeit würde bei 130 Bq/m^3 liegen, und damit deutlich unter dem Referenzwert in Schweden (200 Bq/m^3).



Abbildung 3: Ein Beispiel für die 7-Tage-Folgemessung.

Abgesehen von den nordischen Ländern wird diese Folgemessungsmethode auch in Kanada [7] für Messungen in öffentlichen Gebäuden mit zeitgesteuerten Lüftungsanlagen verwendet. Die Bedingungen sollten zwischen den Langzeit- und den nachfolgenden Kurzzeitmessungen konsistent sein. Während die schwedische Behörde für Strahlenschutz keinen bestimmten Zeitrahmen zwischen diesen Messungen vorschreibt [1], schlägt die finnische Behörde für Strahlenschutz und nukleare Sicherheit ein maximales Intervall von einem Jahr vor. In Norwegen [8] ist festgelegt, dass der Durchschnitt während der wöchentlichen Messung nicht weniger als die Hälfte des langfristigen Durchschnitts betragen darf, damit die Bedingungen zwischen der Folgemessung und der Langzeitmessung als konsistent angesehen werden können.

2.2 Datenerfassung

Die in dieser Studie analysierten Folgemessungen werden mit dem elektronischen Radon-Messgerät SPIRIT von Radonova durchgeführt. Die Geräte wurden verschickt und nach den Messungen an Radonova zurückgesendet, und Radonova hat die Messberichte erstellt. Das SPIRIT-Instrument ist mit einem Halbleiterdetektor ausgestattet, um die Radonbelastungen in 10-Minuten-Intervallen zu überwachen. Die geladenen Radon-Folgeprodukte werden durch ein elektrisches Feld in Richtung zum Detektor getrieben und der Zerfall wird registriert. Der SPIRIT kann den Alpha-Zerfall zwischen ^{218}Po und ^{214}Po unterscheiden. Wenn eine schnelle Änderung der Radonkonzentration festgestellt wird, wird nur das Signal von ^{218}Po verwendet, was zu ei-

ner schnelleren Reaktion des Instruments führt. Eine langsame Reaktion des Instrumentes, das bei einer Folgemessung verwendet wird, könnte zu einem überschätzten Wert der Radonbelastung während der Arbeitszeit führen.

Insgesamt wurden in dieser Studie 299 Folgemessungen an Arbeitsplätzen analysiert, die mit zeitgesteuerten mechanischen Be- und Entlüftungssystemen ausgestattet waren, davon waren 198 Schulen und Kindergärten, 61 Büros und 40 sonstige Arbeitsplätze. Unsere Daten wurden dann in zwei Hauptgruppen unterteilt: Fälle, die innerhalb der traditionellen Heizperiode vom 1. Oktober bis 30. April auftraten (153 von 299 Fällen), und Fälle außerhalb dieses Zeitraums (146 von 299 Fällen).

2.3 Ergebnis und Bewertung der Repräsentativität der Folgemessung

Radonova verwendet die in Tabelle 3 aufgeführten Kriterien, um die Repräsentativität einer Folgemessung zu beurteilen. Bei dieser Beurteilung wird das Verhältnis des Durchschnittswertes über den gesamten Zeitraum der Folgemessung $Radon_s$ zu dem Wert aus der Langzeitmessung $Radon_L$ untersucht. Wenn der Durchschnittswert der Folgemessung deutlich niedriger ist als der der Langzeitmessung, dann ist der resultierende „Faktor“ typischerweise größer, wie in Tabelle 3. Dies kann dazu führen, dass der Jahresmittelwert während der Arbeitszeit überschätzt wird.

Tabelle 3: Kriterien zur Beurteilung der Repräsentativität einer Folgemessung.

$Radon_s / Radon_L$	Aktion
$\leq 0,2$	Es wird kein korrigierter Wert berechnet
$> 0,21 \ \& \ \leq 0,5$	Korrigierter Wert wird berechnet, aber mit Berichtskommentaren
$> 0,51 \ \& \ \leq 2,5$	Als in Ordnung betrachtet
$> 2,51 \ \& \ \leq 5,0$	Korrigierter Wert wird berechnet, aber mit Berichtskommentaren
$\geq 5,01$	Es wird kein korrigierter Wert berechnet

Die weit verbreitete Empfehlung lautet, die Folgemessungen in der Heizperiode zwischen Oktober und April durchzuführen, wenn der Temperaturunterschied zwischen Außen- und Innenluft groß genug ist, um einen Unterdruck in den Innenräumen zu erzeugen und der Zustrom von Boden-Radon-Luft zunimmt, wenn mechanische Lüftungssysteme ausgeschaltet sind. Dies ist jedoch nicht immer möglich, und die Kunden müssen die Messung möglicherweise außerhalb der traditionellen Heizperiode zwischen Mai und September durchführen. Unser Vergleich des Durchschnittsfaktors über fünf Kriterien hinweg zeigt, dass die Jahreszeiten keinen signifikanten Einfluss auf die Verteilung des Belüftungsfaktors haben (Tab. 4), was auch eine frühere Studie in Finnland bestätigt [6].

Tabelle 4: Faktoren zwischen Radonwerten während der Arbeitszeit und der gesamten Messperiode innerhalb und außerhalb der Heizperiode.

$\frac{Radon_{so}}{Radon_s} \rightarrow$	Durchschnittsfaktor Heizsaison		Durchschnittsfaktor Außerhalb der Heizsaison		Gesamtzeitraum 2022-11-28 bis 2024-02-20	
	Durchschn.	SD	Durchschn.	SD	Durchschn.	SD
$\leq 0,2$	0,77	0,26	0,63	0,24	0,69	0,25
$>0,21 \ \& \ \leq 0,5$	0,60	0,36	0,48	0,37	0,53	0,37
$>0,51 \ \& \ \leq 2,5$	0,34	0,23	0,38	0,30	0,36	0,27
$>2,51 \ \& \ \leq 5$	-	-	0,51	0,15	0,51	0,19
$\geq 5,01$	-	-	-	-	-	-
$>0,21 \ \& \ \leq 5$	0,39	0,28	0,41	0,33	0,40	0,31

Basierend auf der fraktionellen Verteilung der Faktoren sind jedoch Messungen während der Heizperiode vorzuziehen (Abb. 4a). Ungefähr drei Viertel unserer Fälle lieferten zufriedenstellende Ergebnisse ohne nennenswerte Kommentare oder Fehler. In 18 % der Fälle lieferte Radonova eine Schätzung der langfristigen durchschnittlichen Radonaktivität während der Arbeitszeit, allerdings mit einem Warnhinweis auf mögliche Diskrepanzen bei den Messbedingungen, und

forderte die Nutzer auf, die Ergebnisse mit Vorsicht zu genießen. In 10 % der Fälle wurde die Abweichung zwischen Langzeit- und Kurzzeitmessungen als zu groß erachtet, um die Schätzung der langfristigen durchschnittlichen Radonaktivität während der Arbeitszeit genau zu berechnen. Außerhalb der Heizperiode hingegen beobachteten wir größere Schwankungen bei unseren $Radon_s / Radon_L$ -Faktoren. Der Anteil der Fälle, in denen wir den geschätzten Wert sicher berechnet haben, sank auf etwa 60 %, und bei etwa einem Viertel der Fälle wurde eine Warnung bezüglich der Messbedingungen ausgelöst. Außerdem stieg in diesem Zeitraum der Prozentsatz der Fälle, die unsere Kriterien nicht erfüllten von 10 % auf 17 %, so dass die Schätzung der langfristigen durchschnittlichen Radonaktivität während der Arbeitszeiten nicht berechnet werden konnte.

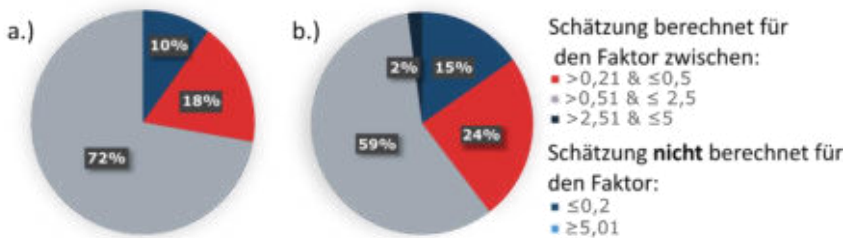


Abbildung 4: Die fraktionale Verteilung der $Radon_s / Radon_L$ -Faktoren in a.) der traditionellen Heizperiode zwischen Oktober – April; b.) außerhalb der traditionellen Heizperiode zwischen Mai und September.

Bei einer auf die Gruppe „Als in Ordnung betrachtet“ beschränkten Messung betrug der Faktor zwischen der Radonbelastung während der Arbeitszeit und dem gesamten Messzeitraum 0,36. Wenn auch noch zusätzlich Messungen mit Berichtskommentaren berücksichtigt wurden, erhöhte sich dieser Faktor auf 0,40. Es ist jedoch wichtig hervorzuheben, dass die Unterschiede zwischen verschiedenen Arbeitsplätzen groß sein können, was sich auch in der Standardabweichung (SD) für diese Faktoren zeigt (Tab.4)

2.4 Auswertung der Folgemessung auf die langfristige durchschnittliche Radonaktivität während der Arbeitszeiten

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass von den 299 Fällen, in denen die erste Langzeit-Radonmessung den Referenzwert von 200 Bq/m^3 überschritt, wir in 258 Fällen den langfristigen Jahresmittelwert abschätzen konnten und damit die Anforderungen erfüllten (Tab. 3). Das Verhältnis zwischen der durchschnittlichen Kurzzeit-Radonmessung $Radon_s$ und der durchschnittlichen Langzeitmessung $Radon_L$ liegt in einem Bereich von 0,2 bis 5,0. In den übrigen Fällen ($n = 41$) war das Verhältnis von $Radon_s$ zu $Radon_L$ zu groß, was auf erhebliche Schwankungen zwischen den Bedingungen, während dieser beiden Messungen hinweist. Wie in Abbildung 5 dargestellt, lagen die Radonwerte nach der Folgemessung in 78 % der Fälle unter dem Referenzwert.

Jährlicher Durchschnittswert während der Arbeitszeit (nach Folgemessung)

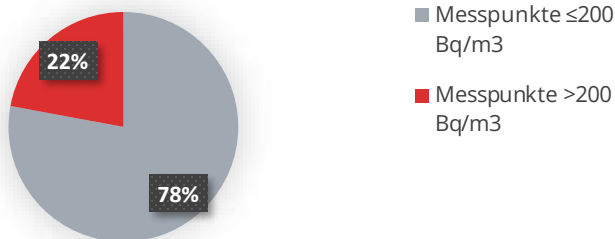


Abbildung 5: Verteilung der Fälle, in denen der Faktor zwischen $Radon_S$ und $Radon_L$ zwischen 0,2 bis 5,0 liegt und bei denen die geschätzte jährliche Exposition während der Arbeitszeit entweder unter oder über 200 Bq/m^3 liegt.

Betrachtet man den Einfluss der Jahreszeiten auf die geschätzte langfristige Radonexposition genauer (Abb. 6.), so zeigt sich, dass 80 % der Fälle während der Heizperiode (Oktober bis April; $n = 137$; Abb. 6a) unter dem Referenzwert lagen, gegenüber 74 % im Zeitraum von Mai bis September (Abb. 6b; $n = 121$).

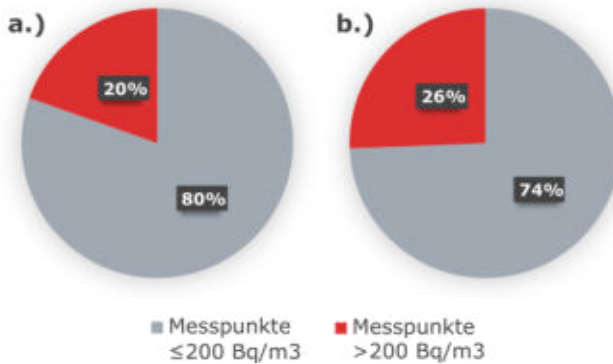


Abbildung 6: Verteilung der Fälle, die geschätzte jährliche Exposition während der Arbeitszeit entweder unter oder über 200 Bq/m³ während a.) der Heizperiode und b.) außerhalb der Heizperiode ist.

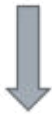
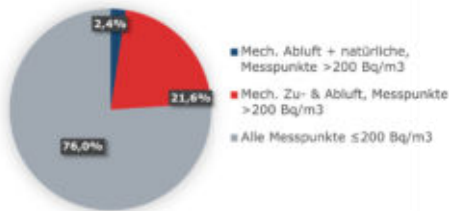
3 Schlussfolgerungen und Diskussionen

Die aus den Messdaten der Radonova-Datenbank abgeleiteten Schätzungen des Gesamtanteils der schwedischen Arbeitsplätze mit mindestens einem Arbeitsplatz, an dem der Referenzwert von 200 Bq/m³ überschritten wird, zeigen, dass 24 % der Arbeitsplatzgebäude diesen Grenzwert überschreiten. Diese Zahl lässt sich weiter aufschlüsseln in 2,4 % mit natürlicher Belüftung oder ausschließlich mechanischer Entlüftung und 21,6 % mit mechanischer Be- und Entlüftung (Abb. 7).

Bei Arbeitsplätzen, die mit einer mechanischer Zu- und Abluftanlage ausgestattet sind, ist davon auszugehen, dass die Radonbelastung während der Arbeitszeit deutlich niedriger ist. In solchen Gebäuden könnten zeitaufgelöste Folgemessungen genauere Schätzungen der Radonbelastung während der Arbeitszeit liefern. Nach den Daten dieser Studie würden 78 % dieser Arbeitsplätze Werte unterhalb des Referenzwertes aufweisen, wenn Langzeitmessungen mit einer 7-tägigen Folgemessung kombiniert würden. Damit verbleiben 4,8 % der Arbeitsplätze über dem Referenzwert, was zu einer Gesamtschätzung von 7 % der schwedischen Arbeitsplatzgebäude führt, wie in Abbildung 7 dargestellt, in denen mindestens ein Arbeitsplatz den Referenzwert überschreitet.

Es ist wichtig zu beachten, dass die Messungen an Arbeitsplätzen im Vergleich zu anderen Gebäudetypen überproportional auf Schulen und Kindergärten verteilt sind. Außerdem war der Datensatz nicht groß genug, um signifikante Vergleiche zwischen verschiedenen Arten von Arbeitsplätzen zu ermöglichen.

Langzeitmessungen am Arbeitsplatz



Jährlicher Durchschnittswert während der Arbeitszeit (nach Folgemessung)



Abbildung 7: Geschätzter Anteil der schwedischen Arbeitsplätze, an denen der Referenzwert von 200 Bq/m³ während der Arbeitszeit überschritten wird.

Bei Gebäude, die beheizt werden müssen, könnte die Einführung einer zeitgesteuerten mechanischen Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung zu einer Senkung der Energiekosten führen, verbunden mit einer guten Luftaustauschrate in den Räumen. Wie die Daten aus der Radonova-Datenbank zeigen, die durch zeitaufgelöste 7-Tage-Folgemessungen in Schulen und an Arbeitsplätzen gewonnen wurden, können die Unterschiede in der Radonbelastung zwischen den Zeiten, in denen das Lüftungssystem aktiv ist, und Zeiten, in denen es nicht aktiv ist, erheblich sein. Im Durchschnitt beträgt die Radonbelastung während der Arbeitszeit etwa ein Drittel der Werte, die während des gesamten Messzeitraums gemessen wurden.

Folgemessungen mit kontinuierlichen Radonmessgeräten können ebenfalls wichtige Informationen über den richtigen Zeitpunkt für die Inbetriebnahme der Lüftungsanlage liefern. Das in Abbildung 8 dargestellte Beispiel zeigt einen Fall, bei dem die Lüftung im Verhältnis zu den Arbeitszeiten im Gebäude zu spät eingeschaltet wird, was zu einem Faktor zwischen Radon während der Arbeitszeit und dem gesamten Zeitraum von 0,64 führt. Um die Radonbelastung zu minimieren, sollte die Lüftung einige Zeit vor Beginn des Arbeitstages angeschaltet werden. Außerdem sollte berücksichtigt werden, ob sich Personen außerhalb der normalen Arbeitszeiten im Gebäude aufhalten.

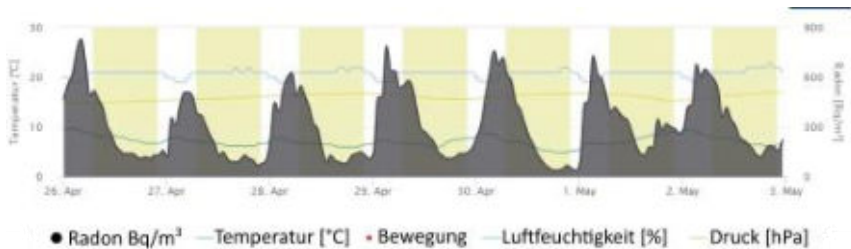


Abbildung 8: Arbeitsplatz, an dem die Lüftung zu spät eingeschaltet wird. Gelbe Felder: Arbeitszeiten.

4 Literaturverzeichnis

- [1] Strålsäkerhetsmyndigheten, Mätning av radon på arbetsplatser, 2021.
- [2] Rönnqvist, T., Radon measurements in Swedish workplaces, <https://aarst.org/speakers-slides-2020/2020> AARST Symposium Virtual, 2020
- [3] Rönnqvist, T., 2021:28 Analysis of Radon Levels in Swedish Dwellings and Workplaces, Strålsäkerhetsmyndigheten, 2021
- [4] Klimat- och näringslivsdepartementet, Strålskyddsförordning (2018:506), 2018.
- [5] ISO 11665-8:2019, Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 8: Methodologies for initial and additional investigations in buildings, 2019.
- [6] Turtiainen T., Kojo K., Laine J-K, Holmgren O., Kurttio P., Improving the assessment of occupational exposure to radon in above-ground workplaces, Radiation Protection Dosimetry (2021), Vol. 196, No 1-2, pp 44-52.
- [7] Health Canada, Guide for radon measurements in public buildings, 2021
- [8] Statens strålevern, Måleprosedyre for radon i skoler og barnehager, 2015

Auswertung des Radongehalts in der Bodenluft mit künstlicher Intelligenz

Wolfgang Wehr¹⁾

¹⁾ Professur für Geotechnik, Fachhochschule Erfurt

Zusammenfassung

Radonmessungen der Bodenluft in einer 40m tiefen Bohrung wurden mit meteorologischen Daten kombiniert und mit künstlicher Intelligenz ausgewertet. Zum Einsatz kamen neuronale Netze aus dem Bereich des maschinellen Lernens.

Nach dem Training der neuronalen Netze konnte sowohl im Training wie auch in der Prognose (Test) ein hohes Bestimmtheitsmaß erreicht werden. Mit Hilfe einer Korrelationsmatrix wurden die wichtigsten Einflussparameter auf den Radongehalt identifiziert.

Als Gründe für die große Streuung der Radonwerte wurden bei Laborversuchen ohne meteorologische Einflüsse hauptsächlich die Umgebungsbedingungen des Zerfalls wie Wasser/Luft und die Korngröße bzw. der Zersetzungsgrad des Gesteins identifiziert. Bei der Nachrechnung und Vorhersage von Radonwerten müssen diese Größen berücksichtigt werden. Ansonsten sind die großen Abweichungen nicht erklärbar.

1 Künstliche Intelligenz in der Geotechnik

In den letzten Jahren hat die Welt einen bemerkenswerten Fortschritt im Bereich des maschinellen Lernens erlebt, der das Potenzial hat, viele Aspekte unseres Lebens zu revolutionieren. Ein zentraler Bestandteil dieser Revolution sind neuronale Netze. Diese künstlichen Intelligenzmodelle, die von der Funktionsweise des menschlichen Gehirns inspiriert sind, haben sich als äußerst leistungsfähige Werkzeuge erwiesen, um komplexe Muster in Daten zu erkennen und Vorhersagen zu treffen.

Für Bauingenieure und Geotechniker eröffnet die Integration von neuronalen Netzen und maschinellem Lernen völlig neue Möglichkeiten. Diese Technologien ermöglichen eine genauere Vorhersage von Bodenverhalten, Bauwerkszuständen und Umweltbedingungen, was wiederum zu sichereren und effizienteren Bauwerken führt.

Maschinelles Lernen beschäftigt sich mit der Entwicklung von Algorithmen und Techniken, die es Computern ermöglichen, aus Erfahrung zu lernen, ohne explizite Programmierung. Neuronale Netze sind eine Schlüsselkomponente des maschinellen Lernens, da sie es ermöglichen, hochdimensionale Daten zu verarbeiten und abstrakte Konzepte zu erlernen.

Diese Veröffentlichung wird einen Einblick in neuronale Netze und maschinelles Lernen bieten, speziell ausgerichtet auf Bauingenieure und Geotechniker. Die Grundlagen dieser Technologien werden erläutert, ihre Anwendungen im Bauwesen und in der Geotechnik erkundet und die zugrundeliegenden Prinzipien untersucht. Von der Vorhersage von Bodenverhalten und Stabilitätsanalysen bis hin zur Überwachung von Bauwerken und der Optimierung von Bauprozessen - die Einsatzmöglichkeiten von neuronalen Netzen und maschinellem Lernen sind für Bauingenieure und Geotechniker äußerst vielversprechend und werden, die Art und Weise, wie wir Bauwerke planen, bauen und überwachen, grundlegend verändern.

1.1 Algorithmen beim überwachten maschinellen Lernen

Beim überwachten maschinellen Lernen werden dem Algorithmus Eingabe- und Ausgabedatenpaare präsentiert. Das Ziel besteht darin, eine Funktion zu erlernen, die die Eingabe auf die Ausgabe abbildet. Typische Algorithmen sind gemäß steigender Leistungsfähigkeit geordnet und umfassen lineare Regression, Entscheidungsbäume, Random Forest, Nächste Nachbarn, Support Vector Machines (SVM), und künstliche neuronale Netze.

Lineare Regression wird verwendet, um die Beziehung zwischen einer abhängigen Variablen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen zu modellieren. Das Ziel besteht darin, eine lineare Funktion zu finden, die die Beziehung zwischen den Variablen am besten be-

schreibt, um Vorhersagen für neue Daten zu treffen. Lineare Regression wird häufig verwendet, wenn die abhängige Variable kontinuierlich ist und eine lineare Beziehung zu den unabhängigen Variablen aufweist.

Entscheidungsbäume sind eine Baumstruktur aus Entscheidungsknoten und Blattknoten, die verwendet wird, um Entscheidungsregeln abzubilden. Das Ziel besteht darin, die Daten anhand von Merkmalen in einem Baum zu partitionieren, um Vorhersagen zu treffen. Entscheidungsbäume sind einfach zu interpretieren und eignen sich gut für Klassifikations- und Regressionsprobleme.

Random Forest ist ein Ensemble-Lernalgorithmus, der aus einer Vielzahl von Entscheidungsbäumen besteht. Das Ziel besteht darin, die Vorhersagegenauigkeit zu verbessern, indem die Vorhersagen mehrerer Entscheidungsbäume kombiniert werden. Random Forest ist robust gegenüber Overfitting und eignet sich gut für komplexe Klassifikations- und Regressionsprobleme.

Nächste Nachbarn (k-NN) ist ein einfacher Lernalgorithmus, der verwendet wird, um Vorhersagen zu treffen, indem er ähnliche Beispiele aus den Trainingsdaten sucht. Das Ziel besteht darin, die Klasse oder den Wert einer neuen Instanz basierend auf den k nächsten Nachbarn zu bestimmen. k-NN ist besonders nützlich, wenn die Daten nichtlinear sind und keine klare Trennung zwischen den Klassen vorhanden ist.

Support Vector Maschine (SVM) ist ein überwachter Lernalgorithmus, der für Klassifikations- und Regressionsaufgaben verwendet wird. Das Ziel besteht darin, eine Trennung zwischen den Klassen zu finden, die den größtmöglichen Abstand zu den nächsten Trainingsdatenpunkten aufweist. SVM eignet sich gut für datenintensive Anwendungen und kann auch in nichtlinearen Klassifikationsproblemen durch Kernel-Tricks eingesetzt werden.

Neuronale Netze sind eine Klasse von Modellen, die aus mehreren Schichten von Neuronen bestehen. Das Ziel besteht darin, komplexe nichtlineare Beziehungen in den Daten zu modellieren und Vorhersagen zu treffen. Neuronale Netze sind äußerst leistungsfähig und eig-

nen sich für eine Vielzahl von Anwendungen, einschließlich Bildererkennung, natürlicher Sprachverarbeitung und Zeitreihenprognosen.

1.2 Neuronale Netze in der Geotechnik

Neuronale Netze finden in der Geotechnik eine Vielzahl von Anwendungen, die dazu beitragen können, verschiedene Aspekte des geotechnischen Engineerings zu verbessern. Hier sind einige Beispiele:

Bodenklassifizierung und Bodenmechanik: Neuronale Netze können verwendet werden, um Bodenproben zu analysieren und automatisch Bodentypen zu klassifizieren. Möglich sind die Vorhersagen von Bodenkennwerten anhand von Korneigenschaften und die automatische Bildauswertung von Einzelkörnern um die Siebanalyse zu ersetzen.

Stabilitätsanalyse von Hängen und Böschungen: Durch die Verarbeitung von Daten wie geologischen Informationen, Bodenkennwerten und topographischen Daten können neuronale Netze eingesetzt werden, um das Potenzial für Hangrutschungen oder Böschungsinstabilitäten vorherzusagen.

Gründungsoptimierung für Bauwerke: Neuronale Netze können bei der Optimierung von Gründungssystemen für Bauwerke unterstützen. Durch die Analyse von Bodeneigenschaften, Lastbedingungen und Strukturmerkmalen können diese Netze helfen, die am besten geeignete Gründungsmethode und -konfiguration vorherzusagen.

Vorhersage von Bodenverformungen: Neuronale Netze können verwendet werden, um Bodenverformungen infolge von Belastungen wie dem Bau von Gebäuden oder Infrastrukturprojekten vorherzusagen.

Bewertung von Umweltauswirkungen: Neuronale Netze können dazu beitragen, die Auswirkungen von Umweltveränderungen wie Bodenerosion oder Hochwasser auf geotechnische Strukturen vorherzusagen.

Diese Anwendungen zeigen das Potenzial von neuronalen Netzen, die Effizienz, Genauigkeit und Sicherheit geotechnischer Projekte zu verbessern, indem sie komplexe Muster in Daten erkennen und fundierte Entscheidungen unterstützen.

1.3 Funktionsweise neuronaler Netze

Die Funktionsweise künstlicher neuronaler Netze basiert auf dem Konzept von künstlichen Neuronen, die miteinander verbunden sind und in Schichten organisiert sind. Hier ist eine grundlegende Erklärung: Künstliche Neuronen sind die grundlegenden Bausteine eines neuronalen Netzes. Jedes künstliche Neuron nimmt mehrere Eingaben (Features) auf, multipliziert sie mit entsprechenden Gewichten, addiert sie und wendet dann eine Aktivierungsfunktion an, um die Ausgabe zu generieren. Die Gewichte bestimmen die Bedeutung jeder Eingabe für die Ausgabe des Neurons, und die Aktivierungsfunktion bestimmt, ob und in welchem Umfang das Neuron aktiviert wird.

Künstliche neuronale Netze bestehen aus mehreren Schichten von Neuronen. Die erste Schicht wird als Eingangsschicht bezeichnet und nimmt die Eingabedaten auf. Die letzte Schicht wird als Ausgangsschicht bezeichnet und gibt die Vorhersagen des Modells aus. Zwischen der Eingangs- und Ausgangsschicht können eine oder mehrere versteckte Schichten vorhanden sein, die dazu dienen, abstraktere Merkmale der Daten zu erfassen.

Jedes Neuron in einer Schicht ist mit allen Neuronen in der nächsten Schicht verbunden. Jede Verbindung zwischen Neuronen hat ein Gewicht, das die Stärke der Verbindung darstellt. Diese Verbindungen ermöglichen es dem Netzwerk, Informationen durch die Schichten zu übertragen und komplexe Muster zu lernen.

Die Vorwärtspropagation ist der Prozess, bei dem die Eingabedaten durch das Netzwerk fließen, um Vorhersagen zu generieren. Die Ausgabe jedes Neurons wird berechnet, indem die Eingaben mit den entsprechenden Gewichten multipliziert, summiert und dann durch die Aktivierungsfunktion verarbeitet werden. Dieser Prozess wird Schicht für Schicht durchgeführt, bis die Ausgabe erreicht ist.

Nachdem die Vorhersagen generiert wurden, wird der Fehler zwischen den Vorhersagen und den tatsächlichen Werten berechnet. Die Rückwärtspropagation ist der Prozess, bei dem der Fehler durch das Netzwerk zurückgeführt wird, um die Gewichte der Verbindungen anzupassen und den Fehler zu minimieren. Dieser Prozess wird mit Optimierungsalgorithmen durchgeführt, um die Gewichte schrittweise

zu aktualisieren und das Modell zu verbessern.

Durch wiederholte Vorwärts- und Rückwärtspropagation lernt das neuronale Netzwerk, Muster in den Daten zu erkennen und Vorhersagen zu treffen, die dem gewünschten Ergebnis so nahe wie möglich kommen. Die Effektivität des Lernprozesses hängt von der Architektur des Netzes, der Wahl der Aktivierungsfunktionen, den Optimierungsalgorithmen und anderen Hyperparametern ab.

2 Bodenluftmessungen von Radon

Bodenluftmessungen von Radon spielen eine wesentliche Rolle als Grundlage für Messungen in Gebäuden:

Vorhersage von Gebäude-Radonkonzentrationen: Bodenluftmessungen bieten eine Vorstellung von den Radonkonzentrationen im Baugrund. Da Radon aus dem Boden in Gebäude eindringen kann, dienen Bodenluftmessungen als Grundlage, um die potenzielle Radonbelastung in Innenräumen abzuschätzen. Diese Messungen ermöglichen eine proaktive Planung von Radonmessungen in Gebäuden.

Identifizierung von Risikogebieten: Durch Bodenluftmessungen können Gebiete identifiziert werden, in denen hohe Radonkonzentrationen auftreten können. Dies ermöglicht es Bauingenieuren und Radonfachleuten, gezielte Messungen in Gebäuden durchzuführen, um potenzielle Risikobereiche zu bestätigen und geeignete Sanierungsmaßnahmen zu empfehlen.

Optimierung der Innenraummessungen: Bodenluftmessungen dienen als Leitfaden für die Platzierung von Radonmessgeräten in Gebäuden. Durch die Platzierung der Messgeräte in Bereichen mit der höchsten erwarteten Radonexposition können präzisere und repräsentativere Messergebnisse erzielt werden. Dies trägt dazu bei, eine genaue Bewertung der Radonbelastung in Innenräumen vorzunehmen und geeignete Maßnahmen zur Radonreduzierung zu identifizieren.

Entwicklung von Präventionsstrategien: Auf der Grundlage von Bodenluftmessungen können präventive Maßnahmen entwickelt werden, um die Radonexposition in Gebäuden zu reduzieren. Dies kann die Auswahl geeigneter Bau- und Abdichtungsmaterialien sowie die Implementierung von Belüftungssystemen umfassen, um das Eindringen von Radon in Innenräume zu minimieren.

Einhaltung von Vorschriften und Normen: Bodenluftmessungen sind oft eine Voraussetzung für die Einhaltung von Bauvorschriften und Radonexpositionsnormen. Durch die Durchführung von Bodenluftmessungen können Bauingenieure sicherstellen, dass die Radonkonzentrationen in Gebäuden die gesetzlich festgelegten Grenzwerte nicht überschreiten und die Gesundheit der Bewohner schützen.

Insgesamt dienen Bodenluftmessungen von Radon als wichtige Grundlage für die Planung, Durchführung und Bewertung von Radonmessungen in Gebäuden. Sie unterstützen Bauingenieure und Radonfachleute dabei, geeignete Maßnahmen zur Reduzierung der Radonexposition zu identifizieren und sicherzustellen, dass die Gesundheit und Sicherheit der Bewohner gewährleistet ist.

Anhand eines Beispiels sollen nun Bodenluftmessungen mit neuronalen Netzen ausgewertet werden.

3 Versuchsaufbau und Datenaufbereitung

Kurzzeitmessungen von Radon unter einem Monat werden immer wieder durchgeführt um dann Rückschlüsse auf die Radonbelastung über ein ganzes Jahr zu ziehen. Vor diesem Vorgehen kann nur eindringlich gewarnt werden. Das nachfolgende Beispiel zeigt, wie wichtig Langzeitmessungen sind.

Aus der Literatur wurde ein Beispiel mit gut dokumentierten Radonmessungen über 16 Monate ausgewählt [2]. Die Messwerte wurden in Kleinneudorf in der Nähe von Plön in Schleswig- Holstein erhoben. Zur Geologie wurde eine separate Veröffentlichung verfasst [1]. Es wurde ein 40m tiefes Bohrloch in den vorhandenen quartären Sanden und dem Geschiebemergel abgeteuft, wobei die oberen 30 verrohrt und die unteren 10m mit einem Filter versehen waren. Der Wasserspiegel befand sich in 8m Tiefe, Abb.1.

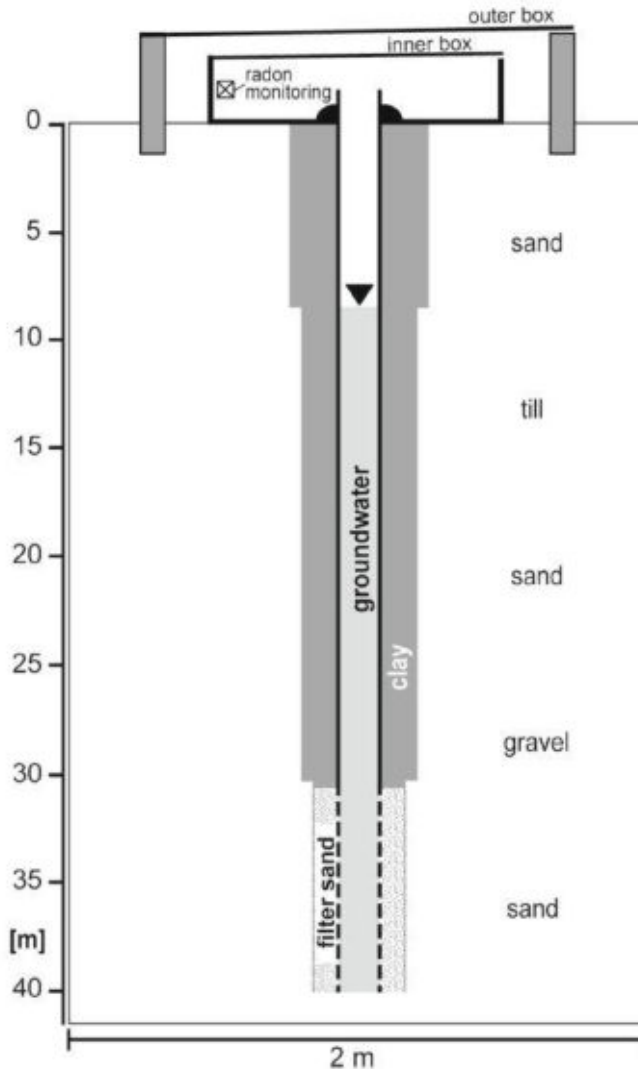


Abbildung 1: Versuchsaufbau mit Fluxbox bestehend aus 2 Kammern [2]

An der Oberfläche wurde Radon in einer Fluxbox gemessen, die aus zwei Kammern bestand. Die Verrohrung des Brunnens besteht aus massivem Kunststoff, so dass die innere Kammer nur mit Radon gefüllt ist, das ausschließlich aus dem Grundwasser abgegeben wird. Die Radonmessung fand in der inneren Kammer statt. Weiter außen

befand sich zur Abdeckung eine äußere Kammer. Beide Kammern sind bis auf eine kleine Öffnung geschlossen, sodass eine langsame Konvektion nach außen stattfinden kann. Somit spiegeln die Messungen die Rn-Exhalation wider und nicht die Boden-Rn-Konzentration.

Das Messgerät ist ein Canary Pro Monitor von Corentium, heute Airthings. Als Messwerte wurden stündlich von April 2018 bis September 2019 die Radonkonzentration, die Lufttemperatur und der Luftdruck aufgezeichnet, siehe Abb.2. Die Messwerte weisen aufgrund technischer Probleme beim Radon zwei größere Lücken auf.

Da Originalmesswerte nicht zur Verfügung standen, erfolgte die Digitalisierung der Graphiken tagesgenau mit dem webplotdigitizer [4]. Mit diesen Daten erfolgte die Auswertung aller Tage für die Radonwerte vorhanden waren.

Falls die Originalmesswerte in Zukunft zur Verfügung stehen sollten, werden die Berechnungen nochmal wiederholt. Leider sind viele Autoren nicht bereit ihre Daten zu wissenschaftlichen Zwecken zur Verfügung zu stellen.

Um zusätzliche historische tagesgenaue meteorologische Daten zu erhalten, wurden auf wetterkontor.de [5] von der Messstation Dörnitz bei Plön die folgenden Tagesmesswerte abgerufen: minimale Temperatur (minT), mittlere Temperatur (aveT), maximale Temperatur (maxT), Regenmenge (Regen), Sonnenstunden (Sonne), Windgeschwindigkeit (Wind), Schneemenge (Schnee).

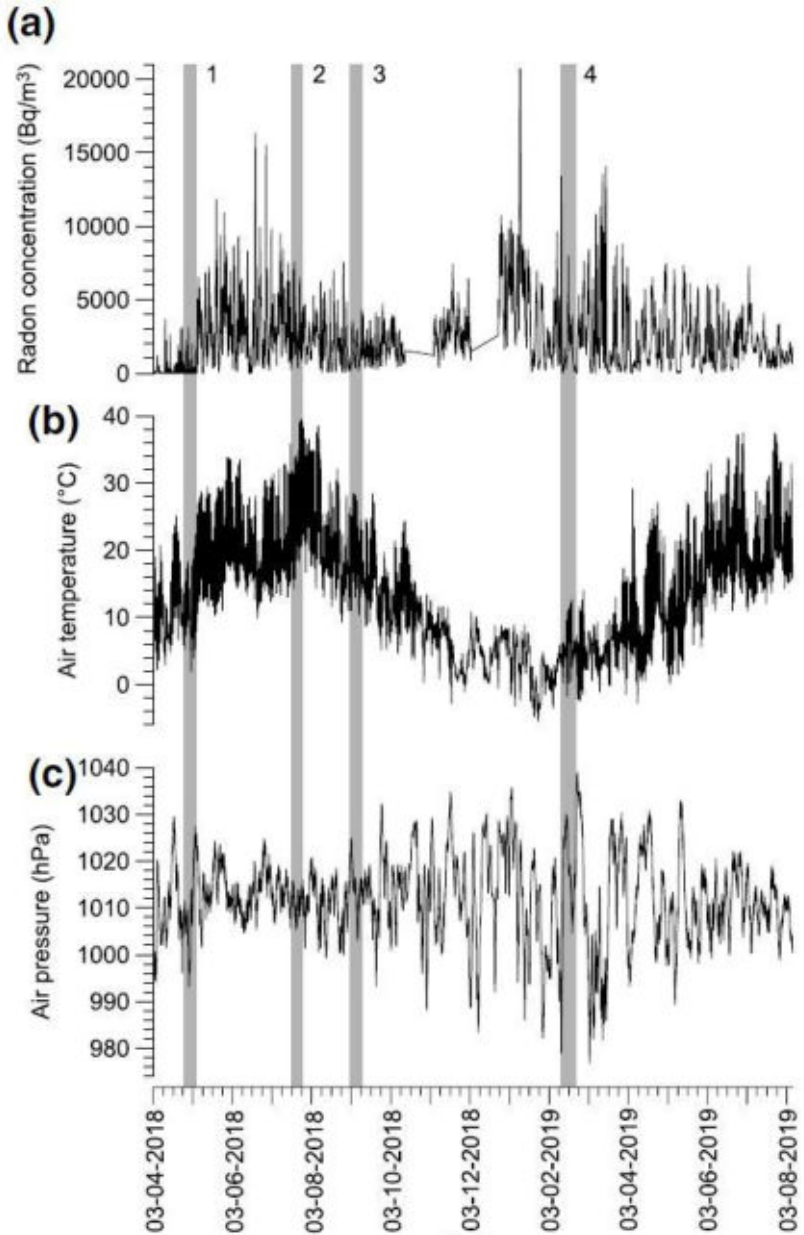


Abbildung 2: (a) Messwerte Radon, (b) Lufttemperatur und (c) Luftdruck [2]

4 Berechnungen mit neuronalen Netzen

Die Berechnungen wurden mit dem Programmpaket Anaconda und dem Programm Spyder zur Eingabe des Programmiercodes in der Sprache Python durchgeführt. Der Import der Messdaten erfolgte mit Pandas.

Beispielhaft werden hier die Hyperparameter beschrieben:

```
# Define hyperparameters
n_in = 14 # Input neurons
n_hid1 = 28 # Neurons hidden layer 1
n_hid2 = 56 # Neurons hidden layer 2
n_hid3 = 14 # Neurons hidden layer 3
n_out = 1 #neurons
bat_size = 1 # Batch size
n_epochs = 200
```

Es handelt sich also um 14 Eingabewerte (Input neurons), 3 versteckte Neuronenschichten (Neurons hidden layer) mit unterschiedlich vielen Neuronen und 1 Ausgabewert (Radon). Es wird jede Zeile der Messwerte berücksichtigt (Batch size) und alles jeweils 200 Mal (n_epochs) durchgerechnet. Sehr wichtig ist, dass die Hyperparameter nach einer bestimmten Strategie optimiert werden [6]

4.1 Tagesgenaue Berechnungen

Die Berechnungen erfolgten zuerst tagesgenau. Es ergab sich nur ein geringes Bestimmtheitsmass R^2 trotz Einbeziehung aller genannten meteorologischen Daten.

Grund dafür ist eine sehr starke Streuung der Radonmesswerte, die durch die Streuung meteorologischen Messwerte nicht zu erklären sind. Eine Streuung verursacht durch den radioaktiven Zerfall selbst kann gemäß des Zerfallsgesetzes ausgeschlossen werden, da eine größere Streuung theoretisch nur durch sehr wenige Atome hervorgerufen werden kann, die in der Natur bei Radon nicht vorkommen.

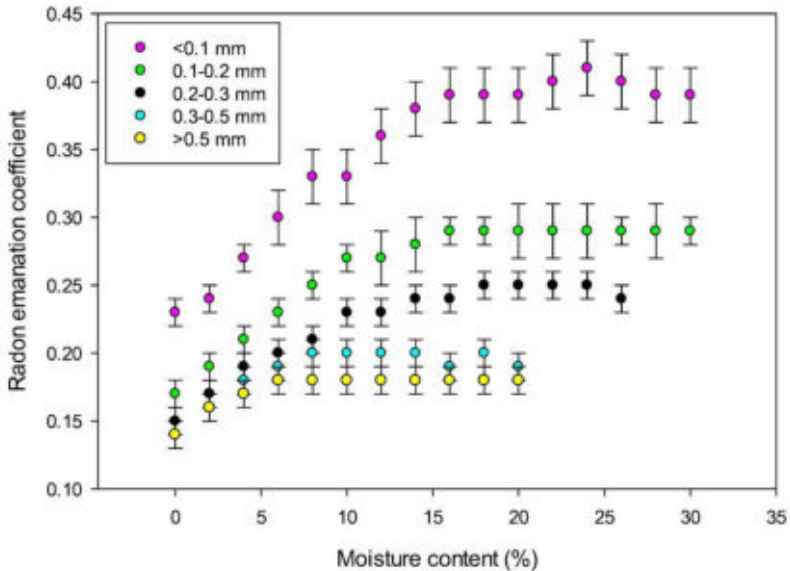


Abbildung 3: Abhängigkeit des Radonemanationskoeffizienten vom Wassergehalt und Korngröße [3].

Die Streuung muss daher durch die Umgebungsbedingungen des Zerfalls (Porenfüllung Luft oder Wasser, Korngröße) oder vom Weg des Radons durch den Boden entstehen. Die Annahme von Darcy'scher Gasdurchlässigkeit mit laminarer Strömung und konstantem Durchlässigkeitsbeiwert ist fraglich. Radon steigt in Rissen bzw. Zonen höherer Durchlässigkeit auf, die von der Inhomogenität des Bodens und des Gesteins abhängen.

In Abbildung 3 sieht man aus Laborversuchen, welchen großen Einfluss der Wassergehalt und die Korngröße der Porenfüllung hat. Allein diese beiden Parameter würden ausreichen um die Streuung der Radonwerte zu erklären. Hinzu kommt noch der variable Porenanteil in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte. Ähnliche systematische Laboruntersuchungen an Göttemarer Granit aus Schweden zeigen die gleichen Tendenzen [1].

Wie stark die Bodenkennwerte in Kleinneudorf streuen, wurde anhand von Bodenproben ausgewertet [1]. Der Wassergehalt variiert von 10 bis 50%, die mittlere Korngröße von 0,22 bis 0,4mm, die

Feuchtdichte von $0,9$ bis $2,0\text{g/cm}^3$ und die Trockendichte von $0,5$ bis $1,6\text{ g/cm}^3$.

5 Ergebnisse der Berechnungen

Um die Streuung zu verkleinern, wurde als erste Strategie mit Mittelwerten über verschiedene Zeiträume gearbeitet.

5.1 Tagesmittelwerte

Tagesgenaue Berechnungen für die ersten 12 Monate Messzeit ergaben nur ein Bestimmtheitsmaß von $0,39$ beim Training und maximal $0,38$ beim Testen (Prognose). Das war nicht zufriedenstellend. Die Trainingszeit betrug 10 Monate und die Testzeit 2 Monate. Als Gütemaße wurden ermittelt:

R^2_{train} : 0.395 , $\text{RMSE}_{\text{train}}$: 1790 , $\text{MAE}_{\text{train}}$: 1309

R^2_{test} : 0.381 , $\text{RMSE}_{\text{test}}$: 1784 , MAE_{test} : 1325

5.2 Wöchentliche Mittelwerte

Unter Einbeziehung wöchentlicher Mittelwerte wurde ein Bestimmtheitsmaß von $0,95$ im Training

R^2_{train} : 0.950 , $\text{RMSE}_{\text{train}}$: 356 , $\text{MAE}_{\text{train}}$: 276

und ein Bestimmtheitsmaß von $0,92$ im Test erreicht.

R^2_{test} : 0.924 , $\text{RMSE}_{\text{test}}$: 391 , MAE_{test} : 360

Die Ergebnisse bezüglich des Bestimmtheitsmaßes haben sich also durch die wöchentliche Mittelwertbildung sehr verbessert.

Abbildung 4 zeigt eine typische Änderung des mittleren Fehlers, der sich am Anfang stark und dann immer weniger reduziert. In den Abbildungen 5 und 6 wurden die gemessenen und berechneten Radonwerte gegenübergestellt.

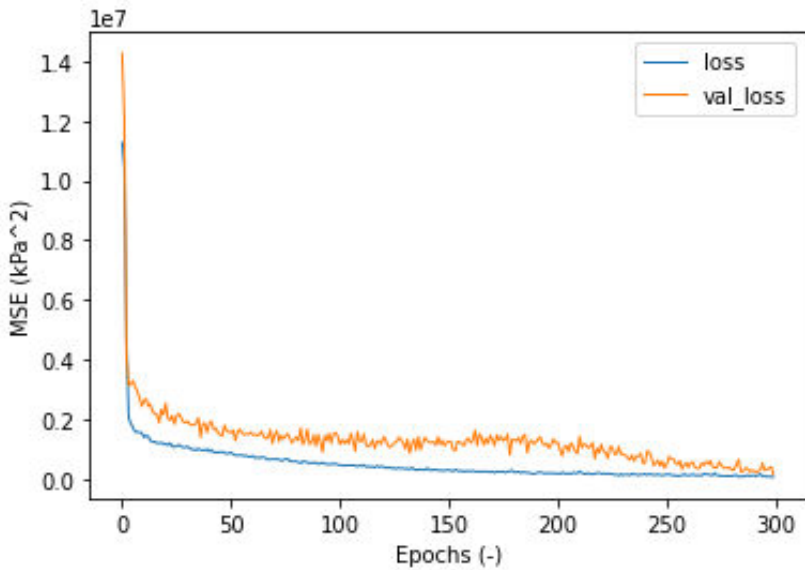


Abbildung 4: Änderung des Mittleren Quadratfehlers MSE über die Anzahl der Epochen.

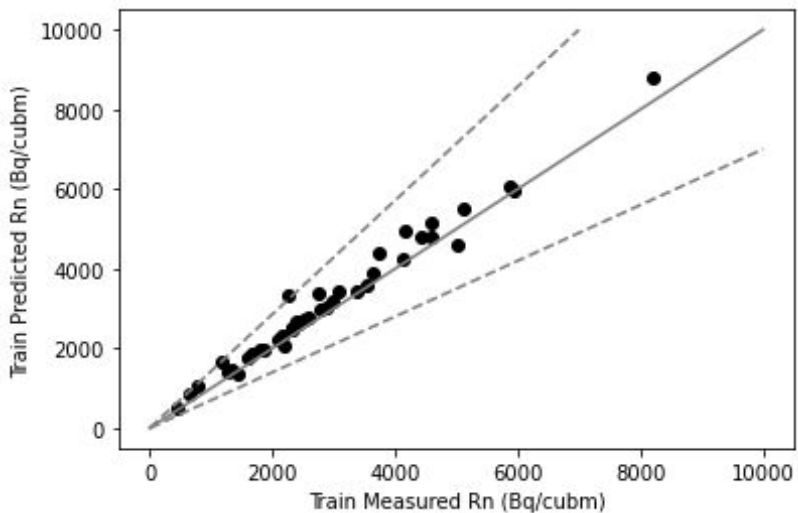


Abbildung 5: Gegenüberstellung der gemessenen und der berechneten Radonwerte im Training

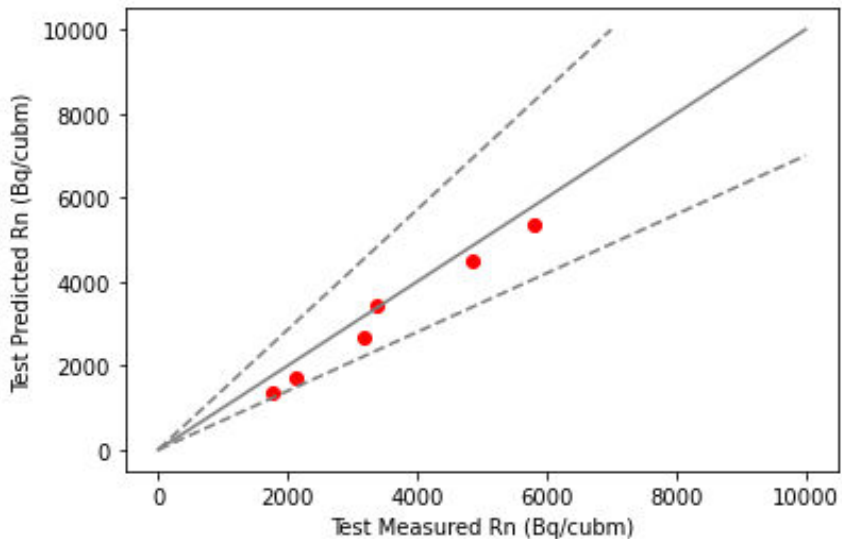


Abbildung 6: Gegenüberstellung der gemessenen und der berechneten Radonwerte im Test

Von besonderem Interesse ist, welche Einflussfaktoren die Ergebnisse beeinflussen. Dazu wurde eine Korrelationsmatrix (heatmap) eingesetzt, wobei die Korrelation der Eingabe und Ausgabewerte untereinander untersucht wurden. Wert von minimal 0 keine Korrelation bis 1/-1 ergibt 100% Korrelation

Wichtige Einflussgrößen auf die Radonkonzentration sind

- 0,5: Wind
- 0,2: delta T_L (Temperaturdifferenz Luft/Boden), Regen (Regenmenge), Sonne (Sonnenscheindauer)
- 0,15: maxT (maximale Wochentemperatur), Datum (wann im Jahr die Messung durchgeführt wurde)

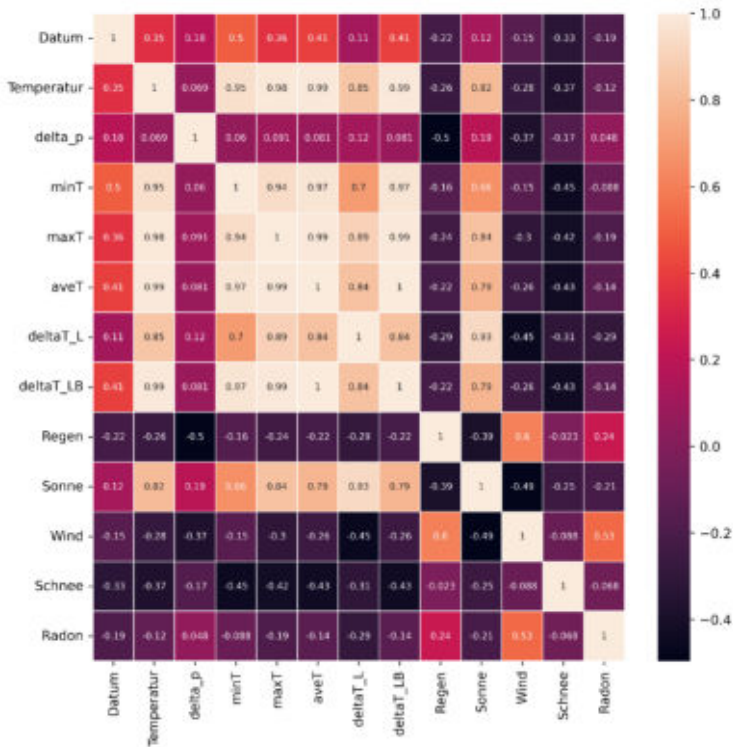


Abbildung 7: Korrelationsmatrix der Eingabewerte und des Ausgabewerts Radon für wöchentlicher Mittelwerte

5.3 Monatliche Mittelwerte

Unter Einbeziehung monatlicher Mittelwerte wurde ein Bestimmtheitsmaß von 0,93 im Training

R^2_{train} : 0.927, $RMSE_{\text{train}}$: 318, MAE_{train} : 188

und 0,93 im Test erreicht.

R^2_{test} : 0.931, $RMSE_{\text{test}}$: 229, MAE_{test} : 221

Es wurden ähnliche Bestimmtheitsmaße bei wöchentlicher und monatlicher Mittelwertbildung erreicht.

5.4 Standardabweichung monatlicher Mittelwerte

Nachdem der Mittelwert der Radonkonzentration gut vorhergesagt werden konnte, wurde versucht auch die Standardabweichung der Radonkonzentration zu prognostizieren.

Im Frühjahr 79%, Sommer 57%, Herbst 44% und Winter 62% wurden die genannten Werte gemessen. Die mittlere Standardabweichung betrug 60%!

Die Radonmittelwerte wurden in die Eingabeparameter zusätzlich mit aufgenommen.

R^2_{train} : 0.906, $RMSE_{\text{train}}$: 238, MAE_{train} : 146,

R^2_{test} : 0.925, $RMSE_{\text{test}}$: 267, MAE_{test} : 240

Auch diese Vorhersage gelang mit über 90% Bestimmtheitsmaß.

6 Interpretation

6.1 Verteilung der Radonwerte über das Jahr

Die höchsten Radonwerte im Winter werden verursacht:

1. durch die Luftdruckdifferenz Hochdruck- / Tiefdruckgebiet. Standardabweichung im Winter 11hPa, im Sommer nur 4hPa und außerdem
2. durch den Temperaturunterschied zwischen der Atmosphärenluft und der Bodenluft. Standardabweichung von -6 Grad im Winter und +9 Grad im Sommer führt zum verstärkten Aufsteigen der radonhaltigen Bodenluft im Winter.

Geringfügig geringere Radonwerte im Sommer werden verursacht durch die Temperaturdifferenz Tag / Nacht mit einer Standardabweichung im Sommer von 12 Grad und im Winter von nur 5 Grad.

Die geringsten Radonwerte treten im Frühjahr und Herbst auf, da sich weder Luftdruck noch Temperatur stark ändern.

Einen großen Einfluss hat der Wind, der das Radon zusätzlich aus dem Boden zu saugen scheint, wie auch schon bei [2] festgestellt. Die Hauptwindrichtung ist Westen. Es ist anzunehmen, dass die Kammern mit der Öffnung Richtung Osten ausgerichtet waren.

Im schneereichen und fast sonnenlosen Monat Januar treten die höchsten Radonwerte auf. Das liegt an der Abdeckung des Bodens durch Schnee und Eis, so dass Radon nur schwer entweichen kann.

6.2 Warum ist die Streuung der Radonstrahlung so groß?

Um die meteorologischen Einflüsse auszuschalten, wurden Laborversuche mit Thüringer Gesteinen in einem geschlossenen Glasgefäß gemacht. In dem Gefäß befand sich sowohl das Gestein, wie auch das Meßgerät Airthings Corentium Home.

Die Messwerte zeigen für Radon die gleiche Abhängigkeit wie bei der Photonenstrahlung. Bei dem stark strahlendem Steinacher Schiefer ist die Standardabweichung der Radonstrahlung bezogen auf den Mittelwert nur 29%, während sie bei schwach strahlendem Gräfenthaler Schiefer auf 57% ansteigt. Unter Wasser steigen sowohl die Mittelwerte wie auch die Standardabweichungen nochmals an. Diese Effekte sind aus der Strahlentherapie und der Nuklearmedizin, sowohl bei Photonen- als auch bei Teilchenstrahlung bekannt.

Die Schlussfolgerung ist, dass die Streuung der Radonstrahlung hauptsächlich auf die Umgebungsbedingungen des Zerfalls wie Wasser/Luft und die Korngröße bzw. den Zersetzungsgrad des Gesteins zurückzuführen ist.

6.3 Einfügen der Streuung in die Eingabe

Gibt es noch eine zweite Strategie außer der Mittelwertbildung?

Ja, nach einer optimierten Berechnung mit den oben genannten monatlichen Mittelwerten wurde die monatliche Streuung ausgewertet und als zusätzlicher Eingabewert in eine neue Berechnung eingefügt.

Es ergab sich ein Bestimmtheitsmaß von 0,9999. Jedoch besteht bei diesem Vorgehen für ungeübte Benutzer das Risiko, dass die erste Berechnung nicht korrekt optimiert wurde und so das Ergebnis verfälscht wird.

Auch bei den Tagesmittelwerten hatte die zweite Strategie Erfolg. Durch Einfügung der Streuung hat sich das Bestimmtheitsmaß von 0,39/0,38 nun auf über 0,97 verbessert:

R^2_{train} : 0.997, $RMSE_{\text{train}}$: 121, MAE_{train} : 96

R^2_{test} : 0.976, $RMSE_{\text{test}}$: 347, MAE_{test} : 222

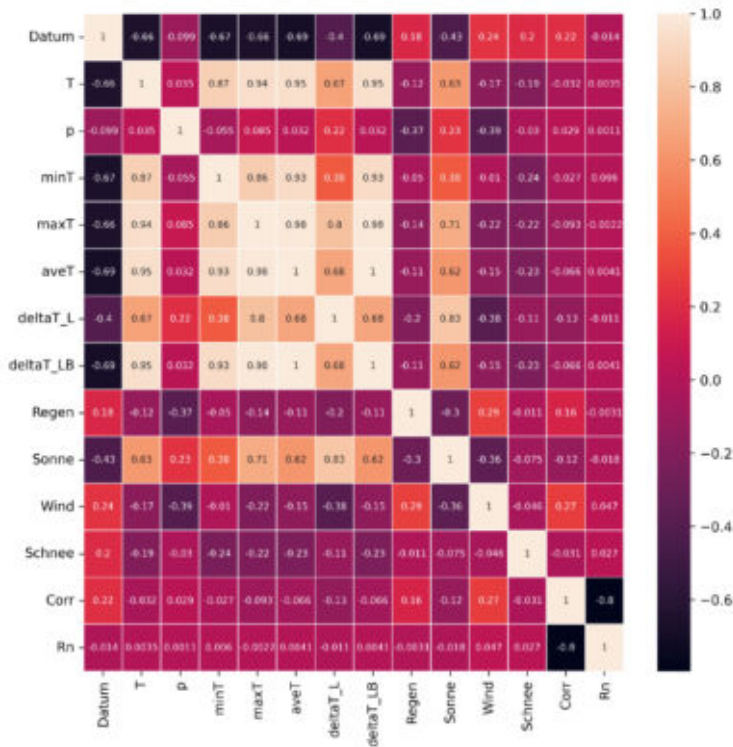


Abbildung 8: Korrelationsmatrix der Eingabewerte und des Ausgabewerts Radon mit dem Streuungsfaktor Corr

Aus der Korrelationsmatrix wird deutlich, dass außer dem Streuungswert Corr mit einem Koeffizienten von -0,8 alle anderen Parameter nebensächlich sind. Auch hier zeigt sich wieder: je größer der Radonwert, desto kleiner die Streuung. Oder umgekehrt: je kleiner der Radonwert, desto größer die Streuung.

7 Schlussfolgerungen

Wichtig für die Auswertung der neuronalen Netze war die Einbeziehung von abgeleiteten monatlichen Mittelwerten der Messgrößen Temperaturdifferenz Tag/Nacht, Temperaturdifferenz Luft/Boden und Druckdifferenz Hochdruck-/Tiefdruckgebiet.

Nach dem Training der neuronalen Netze konnte sowohl im Training wie auch in der Prognose (Test) ein Bestimmtheitsmaß von über 0,9 erreicht werden.

Die höchsten Radonwerte im Winter sind durch die Luftdruckdifferenz Hochdruck- / Tiefdruckgebiet und durch den Temperaturunterschied zwischen der Atmosphärenluft und der Bodenluft entstanden. Dies führte zum verstärkten Aufsteigen der radonhaltigen Bodenluft. Im schneereichen und fast sonnenlosen Monat Januar treten die höchsten Radonwerte auf. Das liegt an der Abdeckung des Bodens durch Schnee und Eis, so dass Radon nur schwer entweichen kann. Geringfügig geringere Radonwerte im Sommer wurden durch die Temperaturdifferenz der Luft Tag / Nacht verursacht. Die geringste Radonwerte entstanden im Frühjahr und Herbst, da sich weder Luftdruck noch Temperatur stark änderten. Einen großen Einfluss hat der Wind, der das Radon zusätzlich aus dem Boden zu saugen scheint. Dies liegt wahrscheinlich an der Versuchsanordnung bezüglich der Windrichtung.

Nachdem der Mittelwert der Radonkonzentration gut vorhergesagt werden konnte, wurde versucht auch die Standardabweichung der Radonkonzentration von gemessenen 60% zu prognostizieren. Auch dies gelang mit Hilfe der künstlichen Intelligenz mit einem Bestimmtheitsmaß von über 0,9 im Training und der Prognose.

Als Gründe für die große Standardabweichung wurden bei Laborversuchen ohne meteorologische Einflüsse hauptsächlich die Umgebungsbedingungen des Zerfalls wie Wasser/Luft und die Korngröße bzw. den Zersetzungsgrad des Gesteins identifiziert. Bei der Nachrechnung und Vorhersage von Radonwerten müssen diese Größen berücksichtigt werden. Ansonsten sind die großen Standardabweichungen nicht erklärbar.

Eine Möglichkeit die Streuung der Radonwerte zu berücksichtigen ist, im ersten Berechnungsschritt die Streuung als täglichen Korrekturfaktor zu berechnen und dann im zweiten Schritt als Eingabewert zu berücksichtigen. Auf diese Weise erhält man Bestimmtheitsmaße von ca. 1,0.

Es bleibt der weiteren Forschung vorbehalten, die Einflüsse der Streuung der Radonwerte in systematischen Laborversuchen zu quantifizieren, die gerade an der FH Erfurt stattfinden. Alternativ kann versucht werden die Streuung mit Hilfe von neuronalen Netzen zur prognostizieren. Auch hierzu gibt es erste Forschungsansätze.

8 Literaturverzeichnis

- [1] J. Albert, M. Schärf, F. Enzmann, M. Waltl, F. Sirocko, Local radon flux maxima in the quaternary sediments of Schleswig-Holstein (Germany), International Journal of Earth Sciences, 2021, <https://doi.org/10.1007/s00531-021-02026-8>
- [2] M. Mudelsee, J. Albert, F. Sirocko, Weather control in radon flux time series from Schleswig-Holstein, Germany, GEM – International Journal on Geomathematics, 2020; Internet <https://doi.org/10.1007/s13137-020-00156-w>
- [3] H. Thu, N. Thang, L. Hao, The effects of some soil characteristics on radon emanation and diffusion, Journal of Environmental Radioactivity 216 -106189, 2020
- [4] WebPlotDigitizer - Copyright 2010-2024 Ankit Rohatgi (automeris.io)
- [5] <https://www.wetterkontor.de/de/wetter/deutschland/rueckblick.asp?id=3086&datum0=05.04.2018&datum1=02.05.2018&jr=2023&mo=12&datum=06.06.2018&t=4&part=2>
- [6] E. Soranzo, Künstliche Intelligenz in der Geotechnik, Vorlesungsunterlagen, Universität für Bodenkunde, Wien, WS 2022

9 Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Dr. Enrico Soranzo von der Universität für Bodenkultur in Wien, der mir seine Vorlesungsunterlagen zum Thema Geotechnik und KI zur Verfügung gestellt hat. Das war die Grundlage für mich im Wintersemester 2023/2024 erstmals in Deutschland dieses Wissen an Masterstudenten des Bauingenieurwesens weiterzugeben.

Weiterhin sei meiner ehemaligen Doktorandin Dr.-Ing. Marylin Hell gedankt, die mich überhaupt erst auf die Idee gebracht hat mich mit dem Thema künstlicher Intelligenz zu beschäftigen.

Und am Ende danke ich meiner Schwester, Claudia Pries, die mich über die Uniklinik Schleswig-Holstein mit dem notwendigen Grundlagenwissen über Röntgenstrahlung und Nuklearmedizin versorgt hat.



Evaluierung der Wirksamkeit von Radondrainagen als Vorsorgemaßnahme in Neubauten

Gernot Wurm¹

Cornelia Leithner²

¹)Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES), Österreichische Fachstelle für Radon

²)Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung Umweltschutz

Zusammenfassung

Gerade im Neubau stellen Radondrainagen eine sehr gute Vorsorgemaßnahme dar. Die Kosten einer solchen Installation sind in der Regel gering. Leider kommt es immer wieder zu unscheinbaren Ausführungsfehlern durch Baufirmen, die zu einer verminderten Wirkung, bis hin zu einem Totalausfall der Vorsorgemaßnahme führen. Oft bleiben diese Fehler unentdeckt. Deshalb ist es wichtig, dass die Radondrainage nach dem Stand der Technik ausgeführt (z.B. ÖNORM S 5280-2), sowie eine Radonmessung nach Bezug durchgeführt wird. Nachträgliche Korrekturen von Ausführungsfehlern sind meist möglich, wenn es Probleme mit der Abluftableitung gibt. Gibt es gravierende Mängel bei der Radondrainage selbst, dann ist eine Sanierung meist nicht oder nur sehr aufwendig möglich. Im vorliegenden Bericht werden Fallbeispiele zur unsachgemäßen Ausführung von Radondrainagen besprochen.

1 Einleitung

Die Österreichische Fachstelle für Radon untersucht in Kooperation mit dem Bundesland Oberösterreich (Land OÖ) aktuell im Rahmen des Forschungsvorhabens RadoNorm¹ (Arbeitspaket 5.3.1 *Variability and sustainability of radon mitigation systems in homes*) die Wirksamkeit von Radondrainagen als Vorsorgemaßnahme in Neubauten.

Seit 1997 fördert das Land OÖ den Einbau einer Radondrainage als Vorsorgemaßnahme bei Neubauten. Diese Maßnahme dient primär zur Erzeugung eines Unterdruckes unterhalb des Gebäudes, womit der konvektive Radoneintritt aus dem Boden unterbunden wird. Die Förderung liegt aktuell bei 500 Euro [1]. Gefördert werden private Haushalte (ganzjährig bewohnt) in Radonvorsorge- oder Radon-schutzgebieten (Gebietsausweisung siehe Abbildung 1).

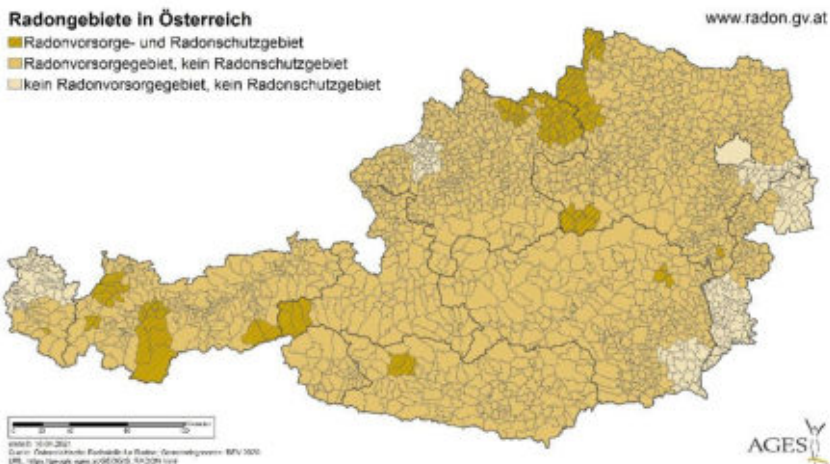


Abbildung 1: Übersicht der Radongebiete in Österreich [2]

Die technische Ausführung der Radondrainage hat gemäß ÖNORM S 5280-2 [3] zu erfolgen – folgende Ausführungsdetails sind hier zu beachten:

- Drainagerohre, mit einem Durchmesser von mindestens 80 mm Rohrdurchmesser
- Stern- oder schlangenförmig Verlegung der Drainagerohre
- Rohrabstände von bis zu 8 m bei Einbau in Kies/Schotter, geringerer Rohrabstand von 1 m bis 3 m bei Einbau direkt ins Erdreich
- Mindestabstand der Drainagerohre von 1 m bis 2 m zu den Außenmauern

Die Abluftableitung der Radondrainage erfolgt gemäß ÖNÖRM grundsätzlich passiv über Dach (siehe Abbildung 2). Durch die Ausnutzung

des dadurch entstehenden Kamineffekts steigt Bodenluft in dem Vollwandrohr auf und erzeugt einen Unterdruck im Bereich der Radondrainage. Um das zu erreichen, ist ein Vollwandrohr mit einem Durchmesser von mindestens 125 mm (bevorzugt 150 mm) zu verwenden. Die Abluftableitung darf nicht auskühlen und muss deshalb im Gebäudeinneren über Dach geführt werden. In unbeheizten Bereichen (z.B. Dachboden) ist eine Rohrisolierung (Wärmedämmung des Rohres) vorzusehen.

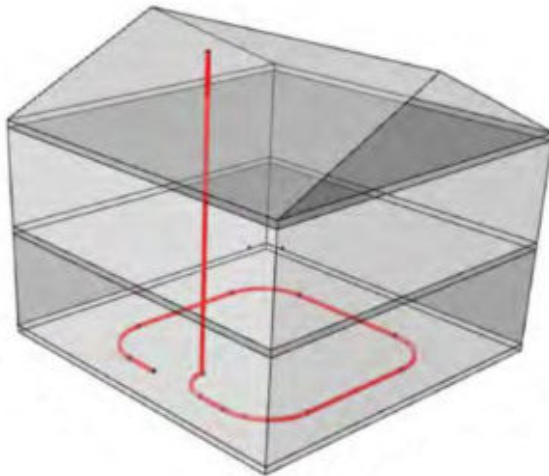


Abbildung 2: Radondrainage mit passiver Abluftableitung über Dach [4]

2 Kontaktaufnahme und Erhebung der Radonkonzentration

Ende Juni 2022 wurden durch das Land OÖ 246 Haushalte per E-Mail angeschrieben, die im Zeitraum 2015 bis 2022 eine Förderung für den Einbau einer Radondrainage als Radonvorsorge erhalten hatten. In dem Anschreiben wurde um Mitarbeit an der Überprüfung der Wirksamkeit der Radondrainage ersucht.

Die Anmeldung zur Messung erfolgte über eine Online-Bestellseite, wo neben der Bestellung von zwei Radon-Kernspurdetektoren auch die Erfassung von einigen Gebäudeparametern ermöglicht wurde.

Von den 246 kontaktierten Haushalten wurde von 116 (47%) eine Bestellung der Radondetektoren durchgeführt. Die Messung erfolgte gemäß den Vorgaben der österreichischen Radonschutzverordnung - RnV [5], die Mindestmessdauer betrug sechs Monate.

Mit Stand 03/2024 gibt es von 99 der 116 teilnehmenden Haushalten eine Auswertung der Detektoren mit Ergebnis (85%). Davon entsprechen 13 Messungen (13%) nicht den gesetzlichen Vorgaben. In 78 von 99 Gebäuden konnte ein Gebäudemittelwert von den beiden meistgenutzten Räumen berechnet werden (79%).

In 10 Gebäuden (13%) wurde der Referenzwert von 300 Bq/m^3 im Mittel (arithmetischer Mittelwert der beiden gemessenen Aufenthaltsräume) überschritten. In 16 Gebäuden (16%) lag zumindest einer der beiden gemessenen Aufenthaltsräume über dem Referenzwert.

Im Gegensatz dazu gab es in 68 Gebäuden (87%) im Mittel keine Überschreitung des Referenzwertes, in 40 Gebäuden lag der Wert unter 100 Bq/m^3 (51 %).

3 Evaluierung der Wirksamkeit der Radondrainage

Im November 2023 (Start der Heizperiode) fanden bei sechs Gebäuden mit einer Referenzwertüberschreitung (46%) Besichtigungen seitens der Fachstelle und dem Land OÖ vor Ort statt.

Etwas überraschend konnte in allen Fällen die Ursache der Überschreitung schnell festgestellt werden. In allen besichtigten Fällen wurde die Installation der Radondrainage durch die Baufirma nicht gemäß ÖNORM S 5280-2 ausgeführt!

Neben sofort ersichtlichen Ausführungsfehlern half auch die gute Fotodokumentation der jeweiligen Bauabschnitte durch die Gebäudebesitzer. Eine Übersicht der Ausführungsfehler finden Sie in der Tabelle 1.

Tabelle 1: Übersicht der Ausführungsfehler je Gebäude

Gebäude	Mittelwert [Bq/m ³]	Höchstwert [Bq/m ³]	Ausführungsfehler - Typ					
			I	II	III	IV	V	VI
A	344	455		x			x	
B	473	498		x	x			x
C	434	442		x			x	
D	1100	1240			x			
E	624	700			x			
F	x	608			x	x	x	

Legende:

I ... zu geringer Durchmesser der Radondrainage

II ... zu geringer Durchmesser der Abluftableitung

III ... Fehler bei der Verlegung der Abluftableitung (Position)

IV ... Fehler bei der Verlegung der Radondrainage (Abstände/Position)

V ... nicht konvektionsdichte (erdberührte) Durchführungen

VI ... sonstiges, wie z.B. eine zu geringe Höhe der Abluftableitung

Die meisten Ausführungsfehler gibt es in Verbindung mit der Abluftableitung über Dach.

In den Gebäuden A, B und C wird anstelle des geforderten 125 mm Durchmessers, ein Vollwandrohr mit 100 mm verwendet. Der zu kleine Durchmesser führt zu einem geringeren Kamineffekt (Zug) und somit zu einer Verringerung/Verlust der Wirksamkeit der Radondrainage (Unterdruckerzeugung unter dem Gebäude).



Abbildung 3: Innliegende Abluftableitung 100 mm, nur im Bereich der Dachdurchführung 125 mm

Im Gebäude B gibt es zusätzlich noch das Problem, dass das Abluftrohr im Dachgeschoß (Kaltdach) ungedämmt geführt wird. Das führt zu einer Auskühlung des Rohres. Hinzukommend wird im Gebäude B (aufgrund einer Hanglage) nur eine geringe relative Gebäudehöhe im Bereich der Dachdurchführung der Abluftableitung erreicht.

Im Gebäude D erfolgt nicht wie vorgesehen die Abluftableitung passiv über Dach, sondern das Rohr wird in einen Sickerschacht neben dem Gebäude geführt. Somit entsteht hier kein Kamineffekt (Zug) und es wird kein Unterdruck erzeugt.

Im Gebäude E ist zwar eine Abluftableitung mit einem Durchmesser von 125 mm verbaut. Diese wurde aber nicht wie gefordert durch die beheizten Innenräume verlegt, sondern außerhalb des Gebäudes innerhalb einer Vorsatzschale hochgeführt. Aufgrund der Auskühlung des Rohres entsteht auch hier kein ausreichender Kamineffekt (Zug) für die Unterdruckerzeugung.

Im letzten Gebäude F wurde sowohl die Radondrainage also auch die Abluftableitung falsch installiert. Die Radondrainage wird unterhalb des Gebäudes herausgeführt (nicht als Vollwandrohr) und schließt an das Fallrohr der Regenrinne außen an.



Abbildung 4: Radondrainage herausgeführt und an Fallrohr der Regenrinne angeschlossen

In den Gebäuden A, C und F erfolgt noch ein ungehinderter Radoneintritt über nicht konvektionsdichte Durchführungen im Bereich der Technikräume (Beispiel siehe Abbildung 5) bzw. E-Schaltschränke.



Abbildung 5: Nicht konvektionsdichte Durchführungen im Technikraum

4 Lösungen und Nachmessungen

Je nach Ausführungsfehler wurde versucht, eine schnelle und kostengünstige Sofortlösung zu finden.

Bei den Gebäuden A und C (zu geringer Durchmesser der Abluftableitung) wurden Windrotationshauben montiert. Diese sollten gerade in

der Übergangszeit bei anfallendem Wind einen höheren Zug (Unterdruck) in der Abluftableitung und somit auch in der Radondrainage erzeugen.



Abbildung 6: Nachträgliche Installation einer Wind-Rotationshaube

Bei den Gebäuden B, D und E wurde versucht, mittels mechanischer Belüftung (Ventilator) die Radondrainage in einen funktionstüchtigen Zustand zu bringen.

Einfache Abdichtungsmaßnahmen der nicht konvektionsdichten Durchführungen wurden für die Gebäude A, C, D und F vorgenommen bzw. sind gerade in Umsetzung.

Erste orientierende Messungen zeigen eine gute Wirksamkeit bei Nachrüstung mittels Ventilators für das Gebäude B. Bei den Gebäuden D, E bzw. F sind noch weitere Untersuchung notwendig bzw. fehlen hier noch die Langzeitmessungen (Start vermutlich Sommer 2024).

Bei den beiden Gebäuden A und C mit Rotationshaube wurde schon eine zweite Langzeitmessung durchgeführt. Das Gebäude C liegt nun im Mittel unter dem Referenzwert von 300 Bq/m^3 .

Im Gebäude A konnte die Konzentration jedoch nur um ca. 10% gesenkt werden und liegt noch über dem Referenzwert. Interessant ist hier, dass der Messpunkt im Erdgeschoss unter dem Referenzwert liegt und der zweite Messpunkt im Obergeschoss den Referenzwert

deutlich überschreitet. Auch hier ist eine weitere Untersuchung notwendig.

Ein umfassender Bericht zu diesem Projekt wird im Rahmen des Projektabschlusses des RadoNorm¹ Projektes bereitgestellt.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Radon – Vorsorge und Sanierung, Internet: <https://www.land-oberoesterreich.gv.at/22588.htm>, (besucht am 19.03.2024)
- [2] Radonkarte Österreich, Internet: https://geogis.ages.at/GEO-GIS_RADON.html, (besucht am 19.03.2024)
- [3] ÖNORM S 5280-2, Teil 2 - Bautechnische Vorsorgemaßnahmen bei Gebäuden, Ausgabedatum: 2021-07-15
- [4] Broschüre, *Vorsorgemaßnahmen bei Neubauten und Generalsanierungen*, Herausgeber: Abteilung Umweltschutz, 2. Auflage, November 2021
- [5] Radonschutzverordnung – RnV 2020, Internet: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20011323> (besucht am 19.03.2024)

1) This project has received funding from the Euratom research and training programme 2019-2020 under grant agreement No 900009.



Radonschutzmaßnahmen in Industriehallen - Grundlegende Betrachtungen und realisierte Beispiele

Walter-Reinhold Uhlig¹⁾

Gerhard Binker²⁾

¹⁾ KORA e.V., Dresden

²⁾ Binker Materialschutz GmbH

Zusammenfassung

Industriehallen weisen hinsichtlich der Anforderungen an den baulichen Radonschutz einige Besonderheiten auf: Häufig wird die erdbe-rührte Gebäudehülle nicht konvektionsdicht ausgeführt, da technologisch erforderliche Durchbrüche in der Bodenplatte sowie Anschlüsse an Stützendurchführungen nur mit erheblichem baulichem Aufwand abgedichtet werden könnten. Dadurch kann Bodenluft konvektiv ins Gebäude einströmen, was zu einer hohen Quellstärke führt. Dem steht infolge des große Raumvolumen sowie der zumeist hohen Luftwechselraten eine hohe absenkende Wirkung entgegen.

Im Beitrag werden die Besonderheiten von Industriehallen beschrieben und wird ein Ansatz zur Prognose der Radonkonzentration in Hallen vorgestellt. Anhand von Beispielen wird die Herangehensweise beim Radonschutz in Hallen verdeutlicht.

1 Bauliche Lösungen und Nutzungsvarianten von Hallen

Als Hallen werden eingeschossige Gebäude bezeichnet, deren weitgespannte Dachkonstruktionen einen Innenraum mit nur wenigen tragenden Konstruktionen ermöglichen, wodurch eine hohe Flexibilität der Nutzung erreicht wird (Abb.1). Hallen kommen in Industriebetrieben, aber auch im Handel, für Ausstellungen und ähnliche Funktionen zum Einsatz (Abb. 1 bis 3).



Abbildung 1: Blick in eine Messehalle (Quelle: Uhlig)



Abbildung 2: Produktions- und Lagerhalle in der Industrie (Quelle: Uhlig)



Abbildung 3: Hallenartiges Gebäude für den Handel (Quelle: Uhlig)

Die konstruktive Lösung ist zumeist simpel: Hallenbinder tragen die Dachlasten auf eingespannte oder gelenkig gelagerte Stützen ab. Alternativ bilden Rahmenkonstruktionen das Tragwerk (Abb. 4). Ergänzt wird die tragende Konstruktion durch horizontale Aussteifungen. Hallen können ein- oder mehrschiffig ausgebildet werden (Abb. 5).

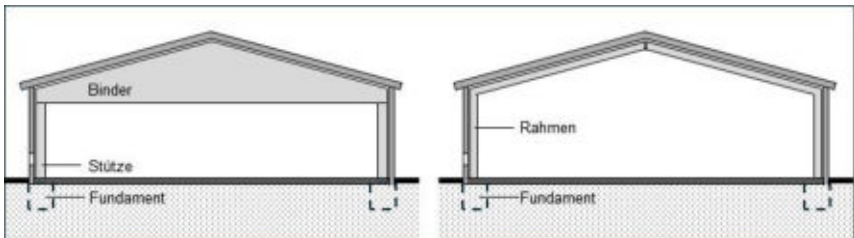


Abbildung 4: Konstruktionsprinzipien für Hallen (links: Stützen-Binderkonstruktion; rechts Rahmenkonstruktion) (Quelle: Uhlig)

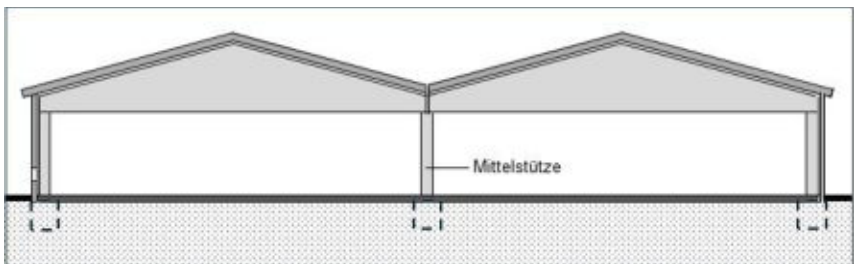


Abbildung 5: Prinzipdarstellung mehrschiffige Halle (Quelle: Uhlig)

2 Radonschutzmaßnahmen im Hallenbau

2.1 Besonderheiten des Radonschutzes in Hallen

Normalerweise kann davon ausgegangen werden, dass in Neubauten sowie jungen Bestandsgebäuden eine funktionierende und sichere Abdichtung der erdberührten Gebäudehülle ausgeführt wird bzw. vorhanden ist und somit die Konvektion von Bodenluft ins Gebäude unterbunden wird. Allerdings ist das für Hallen nicht immer der Fall. Vor allem in Industriehallen wird dann häufig keine Abdichtung nach DIN 18 533 [1] eingebaut, wenn Lastfall W-1E vorliegt, d.h., kein drückendes Wasser ansteht, und wenn viele Durchdringungen der Bodenplatte (u.a. Stützendurchstoßpunkte sowie Mediendurchführungen) eine wirtschaftliche Abdichtungslösung nicht zulassen. Somit muss hier mit einer erheblichen Quellstärke aus Konvektion gerechnet werden, vergleichsweise mit nicht abgedichteten Altbauten. Dieser potentiell großen Quelle stehen das große Raumvolumen von Hallen sowie die häufig hohe Luftwechselrate gegenüber. Es ist schwierig, diese beiden gegenläufigen Einflüsse im Vorfeld einer Baumaßnahme sicher abzuschätzen. Im folgenden Abschnitt soll deshalb anhand von Beispielrechnungen der Einfluss der Faktoren Quellstärke aus Konvektion, Luftwechselrate und Raumvolumen beleuchtet.

2.2 Rechnerische Abschätzung der Radonbelastung in Hallen - Grundlegende Betrachtungen und Berechnungsgang

Für die rechnerische Abschätzung wird ein stationärer Zustand zugrunde gelegt, d.h. zeitliche Schwankungen finden keine Berücksichtigung. Trotz dieser Vereinfachung ist mit dem vorgestellten Verfahren eine gute Abschätzung der zu erwartenden Radonsituation möglich und es können Rückschlüsse abgeleitet werden, in welchem Maße sich Modifikationen der äußeren und inneren Einflüsse auf die Radonkonzentration in der Halle auswirken. Problematisch ist es, für die Ausgangswerte, wie Quellstärke infolge Konvektion sowie die Luftwechselrate, aber auch die Temperaturdifferenz von innen und außen, realistische Annahmen in die Berechnung einzuführen. Der in diesem Artikel verkürzt dargestellte Berechnungsgang wird ausführlich in [2] erläutert.

Die Berechnung der Radonquellstärke aus Konvektion erfolgt nach Hagen-Poiseuille unter Berücksichtigung der Druckdifferenz zwischen Innen und Außen, der Größe und Dimension der Durchdringungen (Undichtheiten der erdberührten Gebäudehülle) sowie der Radonkonzentration in der Bodenluft. Als erster Schritt wird der Volumenstrom vom Erdreich ins Gebäude für runde Querschnitte (z.B. Löcher) sowie für längliche Durchdringungen (z.B. Risse) nach (1) und (2) bestimmt:

$$\dot{V}_{KL} = \Delta p \cdot \frac{\pi}{128} \cdot \frac{r^4}{\eta \cdot d} \quad (1) \text{ und}$$

$$\dot{V}_{KR} = \Delta p \cdot \frac{b^3 \cdot l}{\eta \cdot d} \quad (2)$$

mit:

\dot{V}_{KR} bzw. \dot{V}_{KL}	Volumenstrom in m ³ /h
Δp	Druckdifferenz in Pa
r	Radius der Bauteildurchdringung in m
b und l	Breite und Länge des Risses in m
d	Länge der Durchdringung (entspricht Bauteildicke) in m
η	dynamische Viskosität der Luft (bei Normalbedingungen (17,2 * 10 ⁻⁶ Pa s)

Sind mehrere Durchdringungen zu berücksichtigen, wird die Summe aller Volumenströme \dot{V}_{KRges} bzw. \dot{V}_{KLges} gebildet.

Die Druckdifferenz Δp errechnet sich nach Formel (3) aus dem thermischen Auftrieb mit:

$$\Delta p = \Delta T \cdot h \cdot 0,04 \frac{\text{Pa}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad (3)$$

Dabei ist h die Höhe bis zur druckneutralen Zone, welche üblicherweise mit $h_{Ges}/2$ angenommen wird. Druckdifferenzen aus Windantriebskräften bleiben üblicherweise unberücksichtigt.

Die Berechnung der Quellstärke aus Konvektion Q_K (in Bq/h) erfolgt über Formel (4) mit:

$$Q_K = C_B \cdot (\dot{V}_{KR,ges} + \dot{V}_{KL,ges}) \quad (4)$$

mit:

C_B Radonkonzentration in der Bodenluft in Bq/m³

Die Quellstärke aus Diffusion Q_D (in Bq/h) berechnet sich nach Formel (5) mit:

$$Q_D = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot C_B \cdot \lambda_{Rn} \cdot \frac{V}{F} \cdot A_e \quad (5)$$

mit:

K_1, K_2, K_3 Reduktionsfaktoren der einzelnen Diffusionsbarrieren (Bauteilschichten) in %

$\lambda_{Rn} = 0,00756 \cdot h^{-1}$ (Zerfallskonstante in 1/h)

V/F Verhältnis von Raumvolumen zur Raumfläche in m³/m²

A_e erdberührte Gebäudefläche in m²

In unserer Beispielrechnung wird von lediglich einer diffusionswirksamen Schicht (Bodenplatte) ausgegangen. Somit reduziert sich Formel (5) auf (6):

$$Q_D = K_1 \cdot C_B \cdot \lambda \cdot \frac{V}{F} \cdot A_e \quad (6)$$

Der Reduktionsfaktor K_1 wird nach den Formeln (7) und (8) bestimmt:

$$K_i = 1/e^{\left(\frac{d}{R}\right)} \quad \text{und} \quad (7)$$

$$R = \sqrt{D/\lambda_{Rn}} \quad (8)$$

mit:

d Material-(Schicht-)dicke in m

R Diffusionslänge in m

D Materialspezifischer Diffusionskoeffizient in m²/s

Der labortechnisch zu bestimmende materialspezifische Diffusionskoeffizient D liegt für viele Materialien und Baukonstruktionen vor (s. z.B. [3] und [4]).

Weitere Quellen, wie die Exhalation von Radon aus Baustoffen sowie aus Wasser spielen für Hallen in der Regel keine Rolle und werden deshalb in die Überslagsberechnung nicht eingeführt. Der besondere Einfluss von Wasser in Wasserwerken wird in einem weiteren Beitrag auf dieser Tagung thematisiert [5].

Die Radonkonzentration in der Raumluft kann unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Quellstärken, der Luftwechselrate sowie der Raumgeometrie nach der allgemeinen Formel (9) bestimmt werden.

$$C_i = \frac{Q_K + Q_D + Q_M + Q_W + Q_S}{V \cdot (n + \lambda_{Rn})} + C_A \quad (9)$$

Für die Betrachtung von Hallen spielen die Quelltherme Q_M (Baumaterialien), Q_W (Wasser) und Q_S (Sonstige Quellen) keine Rolle, wodurch sich Formel (9) zu Formel (10) vereinfacht:

$$C_i = \frac{Q_K + Q_D}{V \cdot (n + \lambda_{Rn})} + C_A \quad (10)$$

mit:

Q_K	Quellstärke aus Konvektion nach Gl (4) in Bq/h
Q_D	Quellstärke aus Diffusion nach Gl. (6) in Bq/h
V	Raumvolumen in m^3
n	Raumluftwechsel in 1/h
λ_{Rn}	Radonzerfallskonstante in 1/h
C_A	Radonkonzentration in der Außenluft

Beispielrechnung

Anhand einer Halle mit den in Abbildung 6 wiedergegebenen Abmessungen soll eine Prognoserechnung zeigen, mit welchen Radonbelastungen zu rechnen ist. Dabei werden Variationen der Luftwechselrate, der Radonquellstärke sowie der Hallenabmessungen in die Betrachtung einbezogen.

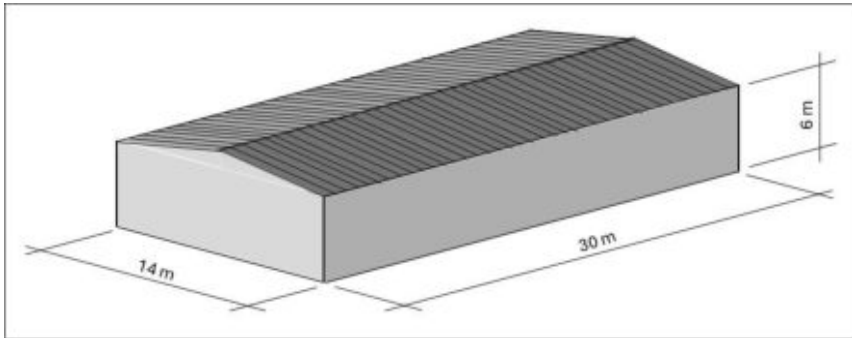


Abbildung 6: Abmessungen der Beispielhalle (Quelle: Uhlig)

Die Grundfläche der Halle beträgt 420 m^2 , das innere Raumvolumen ergibt sich zu 2.520 m^3 .

Weitere Annahmen für die Beispielrechnung:

- Radonkonzentration in der Bodenluft: 100 kBq/m^3
- Raumtemperatur in der Halle: $16 \text{ }^\circ\text{C}$
- Außentemperatur: $-5 \text{ }^\circ\text{C}$
- Dicke der Bodenplatte (Faserzement) $0,20 \text{ m}$

Für die Ermittlung der Quellstärke wird davon ausgegangen, dass keine Abdichtungsschicht auf oder unter der Bodenplatte eingebaut wird (s. z.B. Aufbau nach Abb. 12) und damit sowohl im Bereich der Stützendurchstoßpunkte als auch der Mediendurchführungen konvektive Einströmpfade vorhanden sind. Für die Berechnung sind folgende Annahmen getroffen worden:

- Um die Hallenstützen herum besteht ein Spalt von durchschnittlich 5mm Breite. Bei insgesamt 16 Stützen und einer Längenabwicklung von 0,7 m je Stütze ergibt sich eine Gesamtlänge des Spaltes von 8,4 m.
- Für Mediendurchführung durch die Bodenplatte entstehen viele Undichtheiten, deren abgewinkelte Länge 10 m betragen soll, ebenfalls bei einer durchschnittlich Spaltbreite von 5 mm.
- Die Gesamtfläche der Undichtheiten in der Bodenplatte beträgt im Beispiel 268 cm^2

Der nach Formel (3) berechnete Unterdruck im unteren Hallenbereich beträgt **2,52 Pa**.

Die Radonquellstärke infolge Konvektion wird in unserem Beispiel nach Formel (2) berechnet, da von rissförmigen Durchdringungen ausgegangen wird. Alle Berechnungsergebnisse für die Quellstärke werden auf 10-er Werte gerundet. Es ergibt sich unter Annahme der hier aufgeführten Gegebenheiten die Quellstärke infolge Konvektion mit:

$$Q_k = 96.500 \text{ Bq/h}$$

Für das gleiche Beispiel ist auch die Quellstärke infolge Diffusion nach Gleichung (6) mit folgendem Ergebnis berechnet worden:

$$Q_d = 950 \text{ Bq/h}$$

Der Vergleich der beiden Werte zeigt deutlich die geringe Bedeutung von Diffusion gegenüber Konvektion.

Die Gesamtquellstärke beträgt somit

$$Q_{\text{Ges.}} = 97.450 \text{ Bq/h}$$

Interessant ist in diesem Zusammenhang eine Vergleichsbetrachtung für den Fall des Einbaus einer funktionierenden Abdichtung nach DIN oder vergleichbarem Standard. Hier kann davon ausgegangen werden, dass – bei qualitätsgerechter Ausbildung der Abdichtung einschließlich aller Anschlüsse an Durchdringungen – der konvektive Luftvolumenstrom unterbunden wird und sich zudem die Diffusion durch die zusätzliche Abdichtungsschicht noch einmal deutlich reduziert. Die Quellstärke liegt für diese Konstellation bei ansonsten gleichen Annahmen und berechnet nach Formel (5) nur noch bei **30 Bq/h**, d.h. in einer vollkommen anderen Dimension! Hier zeigt sich in aller Deutlichkeit der große absenkende Einfluss von Abdichtungen auf die Radonbelastung in Gebäuden.

Die Berechnung der Radonkonzentration in der Halle erfolgt für die Gesamtquellstärke nach Gleichung (10) und ist in Abbildung 7 in Abhängigkeit von der Luftwechselrate wiedergegeben. Es zeigt sich, dass selbst bei der hier angenommenen hohen Quellstärke nur bei sehr

geringen Luftwechselraten von 0,1 oder kleiner die Radonkonzentration in der Halle über dem Referenzwert von 300 Bq/m^3 liegt, bei der hier aufgenommenen geringsten Luftwechselrate von 0,05 auf einen Wert von knapp 700 Bq/m^3 steigt.

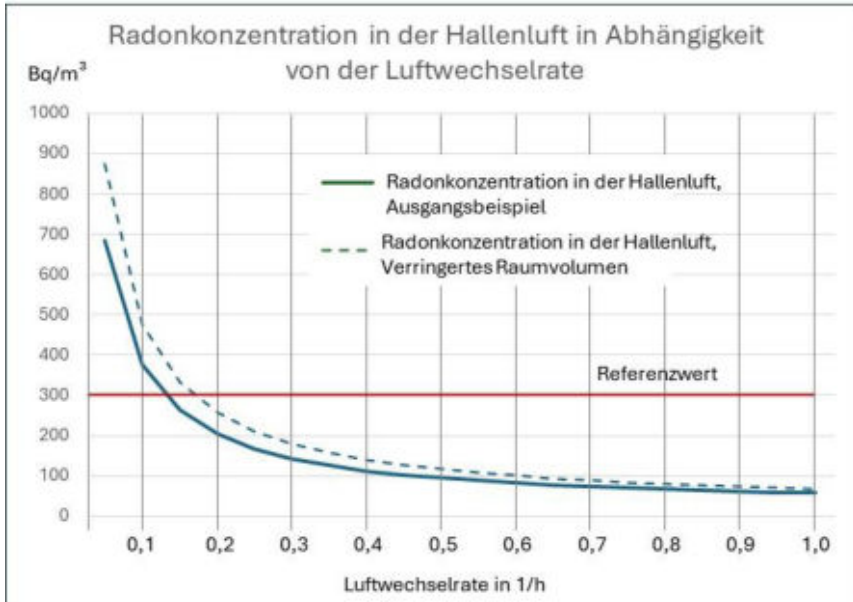


Abbildung 7: Ergebnis der Berechnung der Radonkonzentration in der Beispielhalle bei unterschiedlichen Luftwechselraten (Quelle: Uhlig)

Um den Einfluss der Raumabmessungen zu verdeutlichen, ist in Abb. 7 eine Vergleichskurve für eine Halle mit einem um 50% verringertem Volumen sowie ebenfalls verringerter Quellstärke ergänzt worden. Diese liegt erwartungsgemäß über den Werten für die Halle im Ausgangsbeispiel.

2.3 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Die Beispielrechnung zeigt, dass die Radonkonzentration in Hallen zu meist auch dann unproblematisch ist, wenn die Bodenplatte nicht abgedichtet ist. Allerdings ist eine erhöhte Belastung vor allem dann nicht auszuschließen, wenn die Luftwechselrate gering ist, es sich um eine vergleichsweise kleine Halle handelt und das Radonpotential im Erdreich hoch ist.

Für neu zu errichtende Hallen wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

A) Voruntersuchungen mit

- Abschätzung bzw. Bestimmung des Radonpotentials aus dem Erdreich
- Prognostizierung der Luftwechselrate aus der geplanten Hallennutzung
- Abschätzung der Undichtheiten in der Bodenplatte
- Durchführung einer Prognoseberechnung entsprechend dem hier vorgestellten Beispiel

B) Planung und Ausführung

Aus den Ergebnissen der Voruntersuchungen kann das Risiko einer erhöhten Radonbelastung in der Halle abgeschätzt werden. Dabei sind Unsicherheiten in den getroffenen Annahmen sowie mögliche Nutzungsveränderungen, welche im Laufe der Zeit vorgenommen werden können, in die Betrachtung einzubeziehen. Es ergeben sich für die bau- und lüftungstechnische Lösung folgende Möglichkeiten:

- Abdichtung aller Undichtheiten in der Bodenplatte: Das kann partiell erfolgen, d.h. nur im Bereich offensichtlich vorhandener Durchstoßpunkte. In unserem Beispiel wären das die Stützen sowie alle Mediendurchführungen.
- Prophylaktischer Einbau einer Radondränage in der Kies-/Sauberkeitsschicht unterhalb der Bodenplatte. Diese wird so eingebaut, dass zu einem späteren Zeitpunkt eine Absauganlage nachgerüstet werden kann. In der Bauphase wird das Dränagerohr lediglich verlegt und so abgeschlossen, dass die spätere Nachrüstung möglich wird.
- Besondere lufttechnische Maßnahmen für Arbeitsplatzbereiche in der Halle (Abb. 8). Solche Lösungen kommen dann zur Anwendung, wenn z.B. aus den technologischen Prozessen in der Halle selbst eine hohe Radonabgabe erfolgt. Typisches Beispiel hierfür sind Wasserwerke, die als besonders zu schützende technologische Anlagen gelten. Über die besonderen Anforderungen in Wasserwerken wird zu einem späteren Zeitpunkt auf dieser Tagung berichtet.

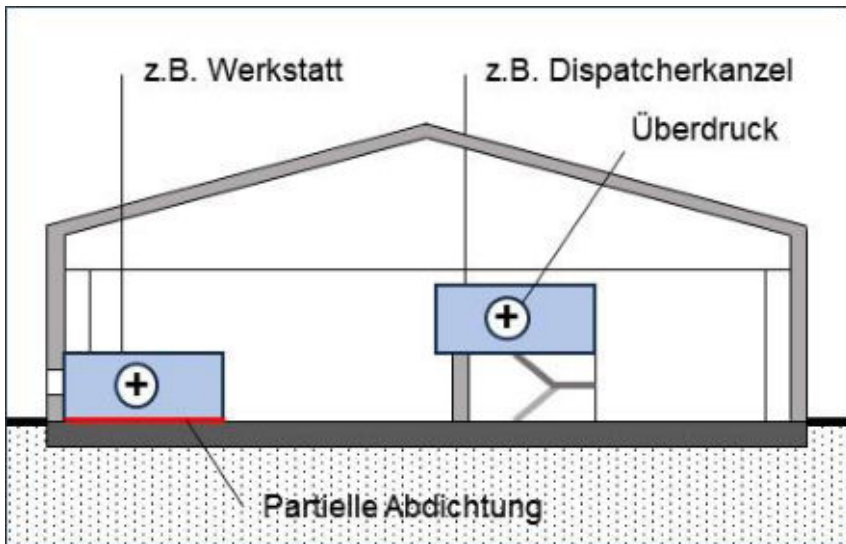


Abbildung 8: Beispiel für die Separierung von besonders zu schützenden Räumen und Raumbereichen in Hallen mit einer hohen Allgemeinbelastung von Radon (Quelle: Uhlig)

3 Vorstellung von realisierten Beispielen

Im Jahr 2022 errichtete die Deutsche Post / DHL drei Verteilzentren in Naila, Helmbrechts und Tirschenreuth (s. Abbildung 9). In Tabelle 1 sind die für die Bauplätze aus dem Geoportal des Bundesamtes für Strahlenschutz zu erwartenden Radonbelastungen im Baugrund zusammengefasst. Die Werte lassen auf ein erhöhtes Radonrisiko schließen, vor allem in Tirschenreuth ist mit größeren Belastungen zu rechnen. Auf Grund dieser Ausgangswerte wurden die Autoren dieses Beitrages vom Auftraggeber beauftragt, ein spezielles Radonschutzkonzept zu erarbeiten. Leider wurde diese Zusammenarbeit nicht auf die bauliche Umsetzung ausgedehnt, sodass bei der Umsetzung in einzelnen Details nicht die Optimallösung realisiert wurde (s. Abbildung 12).

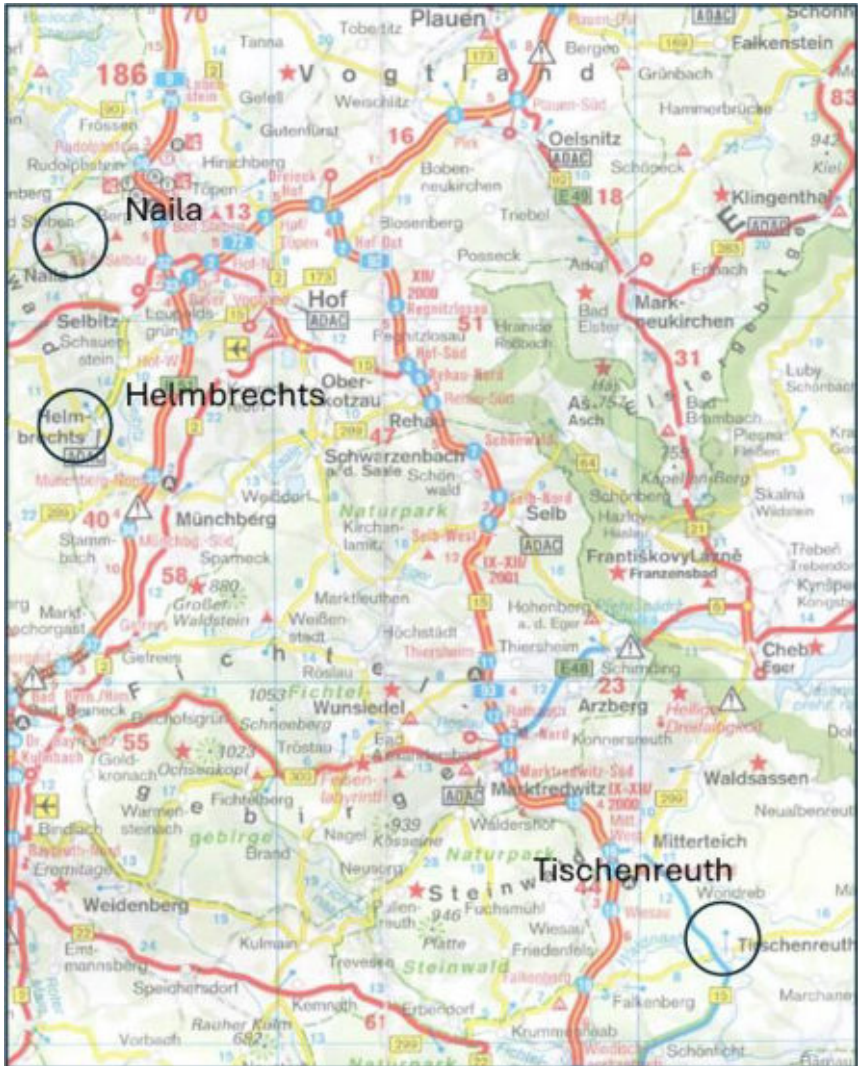


Abbildung 9: Lage der Untersuchungsobjekte (Quelle Landkarte: Deutschlandkarte ADAC, Bearbeitung Uhlig)

Tabelle 1: Prognosewerte des GEOPORTALS für die Bodenradonbelastungen an den drei Standorten

Bauvorhaben	Radonpotential	Bodenradonkonzentration
		kBq/m ³
Helmbrechts	29,1	119
Naila	38,1	73
Tirschenreuth	95,2	243

Die Grundstruktur der drei Verteilzentren ist nahezu deckungsgleich, sie unterscheiden sich lediglich in den Abmessungen. Eine Stahlleichtbauhalle bildet die Grundstruktur (Abbildungen 10 und 11), in die stirnseitig die erforderlichen Nebenräume (Sanitär, Büro usw.) integriert sind (s. Grundriss Abbildung 13).



Abbildung 10: Gesamtansicht Verteilzentrum Tirschenreuth (Quelle Binker)



Abbildung 11: Innenansicht Verteilzentrum Tirschenreuth (Quelle Binker)

Der Bodenaufbau ist für alle drei Objekte deckungsgleich konzipiert worden. Unterhalb von Bodenplatte und Dämmung ist eine 39 cm dicke kapillARBrechende Schicht vorgesehen, darunter eine zusätzliche 20 cm dicke SchotterSchicht für die Verlegung der Radondranage. (Abbildung 12) Diese zusatZliche SchotterSchicht erschließt sich nicht so recht, hier wäre die Integration der Dränagerohre in der kapillARBrechenden Schicht möglich gewesen, wodurch sich die Gesamtdicke des Bodenaufbaus um 20 cm reduzieren lässt, und ein Arbeitsgang eingespart werden kann.

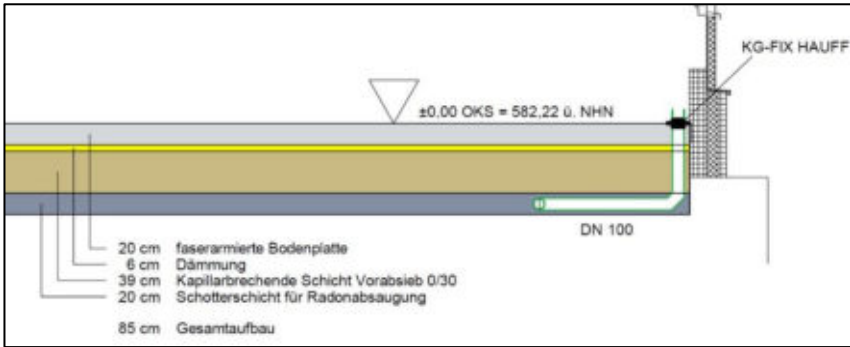


Abbildung 12: Regelbodenaufbau in den drei Hallen (Quelle List Bau, München)

Für die Verlegung der Dränagerohre wurde eine mäanderförmige Anordnung mit zwei bzw. vier Absaugpunkten konzipiert (Abbildung 13).



Abbildung 13: Grundriss Tirschenreuth mit Eintrag der Dränagerohre sowie der vorbereiteten Absaugpunkte (Quelle List Bau, München)

Die Abstände der Dränagerohre wurde relativ groß gewählt (zwischen 7,2 und 8,8 m). Auf Grund der Verlegung in einer hochpermeablen Schüttschicht sind diese Abstände absolut vertretbar. Bild 14 zeigt die Einbausituation der Schichten. Es ist zu sehen, dass unterhalb der Schotterdecke ein Filtervlies bzw. Geotextil verlegt wurde (in Abbildung 12 nicht dargestellt!).



Abbildung 14: Einbau der Dränageschicht (Quelle: List Bau München)

Die Dränagerohre werden an festgelegten Stellen (s. Absaugpunkte in Abb. 13) nach oben geführt und mit einfachen Deckeln luftdicht verschlossen (Abb. 14 bis 16). Eine Absauganlage wird erst dann ergänzt, wenn die Kontrollmessungen nach Abschluss der Baumaßnahme eine erhöhte Radonkonzentration in der Raumluft ergeben. Da sich diese Situation in keinem der drei Objekte einstellte (s. Tabelle 2), wird hier keine Absaugung nachgerüstet. Wichtig war trotzdem, die Anschlusspunkte so anzuordnen, dass eine spätere Erweiterung mit den Komponenten der Absaugung problemlos möglich wird.



Abbildung 15 und 16: Steigrohr der Dränage neben dem Stützenfuß



Abbildung 17: Abschlussdeckel des Steigrohres; Die Holzbohlen dienen dem Schutz der Steigrohre während der Bauphase.

In allen drei Hallen wurden nach Abschluss der Bauarbeiten und Aufnahme der Tätigkeit Kontrollmessungen mittels Kernspur-Detektoren durchgeführt. Dabei wurden je Objekt 5 bzw. 6 Messpunkte eingerichtet und an diesen sowohl eine 3-Monatsmessung als auch eine Jahresmessung durchgeführt. Die 3-Monatsmessung diente in erster Linie dazu, zeitnah Ergebnisse zu erhalten. Die zusammengefassten Messergebnisse können Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Auswertung der Radonmessungen in den drei Objekten

Bauvorhaben	Messzeitraum		Anzahl MP	Messergebnis		Höchste Belastung
	von	bis		von	bis	
				Bq/m ³		
Helmbrechts	31.01.23	01.02.24	5	73	150	Büro
	31.01.23	27.4.23		97	130	
Naila	31.01.23	01.02.24	6	110	130	Briefzustellung und Aufenthaltsraum
	31.01.23	27.4.23		120	180	
Tirschenreuth	31.01.23	01.02.24	5	120	180	Büro
	31.01.23	27.4.23		130	230	

Aus den Ergebnissen können die folgenden Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

1. In allen Objekten liegen die höchsten Belastungen unter dem Referenzwert von 300 Bq/m^3 . Eine Absaugung von Bodenluft aus der Radondranage ist deshalb nicht erforderlich.
2. Ein Vergleich von Dreimonats- mit den Jahresmessungen zeigt keine gravierenden Abweichungen. Daraus kann geschlossen werden, dass die kürzere Messdauer bereits gute und sichere Ergebnisse zulässt.
3. Die höchsten Belastungen wurden erwartungsgemäß in kleineren Räumen (Büro, Aufenthaltsraum) gemessen. Die höchsten Werte in der Halle lagen zumeist geringfügig unter den in Tabelle 2 zusammengestellten Höchstwerten.

Der prophylaktische Einbau von Radondranagen unterhalb der Bodenplatte wird in der Fachöffentlichkeit kontrovers diskutiert. Auch wenn in den hier vorgestellten Beispielen die Radonkonzentration in den Objekten durchgehend unterhalb des Referenzwertes liegt, ist es die Meinung der Autoren, dass der Einbau einer Flachendranage oder - bei kleineren Gebäudeabmessungen - lediglich einer Dränageschicht vor allem immer dann in Betracht gezogen werden sollte, wenn keine konvektionsdichte Gebäudehülle vorhanden bzw. geplant ist, da dann die Gefahr einer Überschreitung der Radonkonzentration im Gebäude nicht ausgeschlossen werden kann. Die Mehraufwendungen für den Einbau der Dränageschicht sowie der Verlegung eines Dranagerohrsystems in der Bauphase sind sehr gering und gegenüber möglicherweise weitergehenden Bau- und Lüftungsmaßnahmen bei fehlender Dranagevorbereitung marginal.

4 Literaturverzeichnis

- [1] DIN 18533-1; 2017-07: Abdichtung von erdberührten Bauteilen – Teil 1: Anforderungen, Planungs- und Ausführungsgrundsätze
- [2] Uhlig, Schönmuth, Kemski: Radongeschütztes Bauen; Grundlagen und Lösungen im Neubau sowie in der Sanierung; Springer Vieweg 2014 (geplant)
- [3] Hoffmann: Experimentelle und theoretische Untersuchung über die Emanation und Migration von Radon in Baustoffen und Bauwerksabdichtungen, Dissertation Saarbrücken 2004
- [4] Hauswald: Radonbelastung in Neubauten, Diplomarbeit HTW Dresden, 2004
- [5] Ellinger: Radonbelastung und Radonsanierung in beispielhaften Betriebsgebäuden der kommunalen Wasserversorgung; Tagungsband 17. Sächsische Radontage, Dresden 2024
- [6] Geoportal des BfS (www.imis.bfs.de)

Aktivitäten zur Erkundung der Radonsituation in Wohngebäuden im Freistaat Sachsen

Mandy Alisch-Mark¹⁾, Janett Pezenka¹⁾, Stefan Friedemann¹⁾, Jacqueline Pianski¹⁾, Tobias Geib¹⁾, Thomas Heinrich¹⁾

¹⁾ Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft, Radebeul

Zusammenfassung

Im Freistaat Sachsen werden verschiedene Messprogramme für Bürger zur Messung der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Aufenthaltsräumen von Wohngebäuden angeboten. Am Beispiel des Messprogrammes „Radon in Gebäuden über unterirdischen Hohlräumen“ werden die Ergebnisse der Messungen der Radon-222-Aktivitätskonzentration in privaten Wohngebäuden dargestellt. Dabei werden ebenfalls Erkenntnisse zur Gewinnung von Teilnehmern und zu einzelnen charakteristischen Gebäudedaten beschrieben. Außerdem werden Erfahrungen zum Fortgang nach der Durchführung von Messungen in privaten Wohngebäuden gezeigt, die anhand von Rückfragen zur Umsetzung von Radonschutzmaßnahmen an die Teilnehmer der Messprogramme gewonnen werden konnten. Mit der Durchführung neuer Messprogramme, die im 3. Quartal 2023 gestartet wurden, wird eine weitere Verbreitung von Informationen zu den Themen Radon und Radonschutzmaßnahmen im Freistaat Sachsen angestrebt. Gleichzeitig sollen die dabei gewonnenen Ergebnisse der Verdichtung der Datenlage zur Radonsituation in Sachsen insbesondere im Hinblick auf die Überprüfung der Ausweisung der Radonvorsorgegebiete dienen.

Activities to explore the radon situation in dwelling houses in the Free State of Saxony

Summary

In the Free State of Saxony, various measurement programs for citizens are offered to measure the radon-222 activity concentration in staying rooms of dwelling houses. Using the example of the measurement program "Radon in buildings above underground cavities" the results of measurements of the radon-222 activity concentration in private residential buildings are presented. Findings regarding the recruitment of participants and individual characteristic building data are also described. In addition, experiences are shown on the progress after measurements have been carried out in private residential buildings, which were gained from questions about the implementation of radon protection measures to the participants in the measurement programs. The implementation of new measurement programs, which were started in the 3rd quarter of 2023, aims to further disseminate information on the subjects of radon and radon protection measures in the Free State of Saxony. At the same time, the results obtained will serve to consolidate the data on the radon situation in Saxony, particularly with a view to reviewing the designation of radon prevention areas.

1 Einleitung

Mit der Umsetzung der europäischen Richtlinie 2013/59/Euratom in das Strahlenschutzgesetz wurde unter anderem erstmals auch der Schutz der Bevölkerung vor Radon in Aufenthaltsräumen geregelt. Im Radonmaßnahmeplan zur nachhaltigen Verringerung der Exposition gegenüber Radon [1] sind die Maßnahmen nach dem Strahlenschutzgesetz näher erläutert und die Ziele zu den Strategien zur Verringerung der Radonexposition enthalten. Demnach soll die Bevölkerung über die Risiken von Radon informiert werden und dazu angeregt werden, Messungen zur Ermittlung der Radon-222-Aktivitätskonzent-

ration in Aufenthaltsräumen durchzuführen und gegebenenfalls Radonschutzmaßnahmen zu ergreifen. Gleichzeitig sind durch die zuständigen Behörden der Länder die erforderlichen Daten für die Festlegung von Gebieten nach § 121 des Strahlenschutzgesetzes (Radonvorsorgegebiete) zu erheben.

In Sachsen werden neben weiteren Aktivitäten zur Umsetzung dieser Regelungen verschiedene Messprogramme zur Ermittlung der Radon-222-Aktivitätskonzentration durchgeführt. Einige dieser Messprogramme richten sich an Eigentümer privater Wohngebäude. Das Ziel dieser Messprogramme ist es, die Datengrundlage zur Ausweitung der Radonvorsorgegebiete weiter zu erhöhen sowie die Bevölkerung zum Thema Radonschutz zu informieren. Dabei wurde das Angebot kostenfreier Messkampagnen als ein geeignetes Mittel identifiziert, sowohl Informationen zu Radon zu verbreiten als auch Messungen in Wohngebäuden und die Ergreifung von Schutzmaßnahmen im Falle erhöhter Radonkonzentrationen anzuregen.

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse und Erkenntnisse bei der Durchführung eines Messprogrammes in privaten Wohngebäuden im Rahmen des Messprogrammes „Radon in Gebäuden über unterirdischen Hohlräumen“ dargestellt. Außerdem werden weitere Messkampagnen vorgestellt, die sich mit jeweils spezifischen Fragestellungen an Eigentümer von Wohngebäuden richten. Die Messprogramme sind jeweils noch für Interessierte zur Teilnahme offen. Daher sind die dargestellten Ergebnisse eine Momentaufnahme der laufenden Messprogramme und die Datenlage ist nicht als abschließend zu bewerten. Zudem stellen die erhaltenen Ergebnisse eine Datensammlung im Rahmen des Messprogrammes mit der spezifischen Fragestellung dar und sind nicht als repräsentativ für Sachsen oder für die ausgewiesenen Radonvorsorgegebiete zu betrachten.

2 Messprogramm „Radon in Gebieten über unterirdischen Hohlräumen“ für Wohngebäude

2.1 Teilnahmevoraussetzungen

Das Messprogramm „Radon in Gebieten über unterirdischen Hohlräumen“ wurde 2017 konzipiert und richtet sich an Eigentümer privater Wohngebäude in Gemeinden, die einen deutlichen Anteil an unterirdischen Hohlräumen im Sinne der Sächsischen Hohlraumverordnung (SächsHohlrvO) bzw. dem Geltungsbereich des Bundesberggesetzes (BBergG) bezogen auf ihre Gesamtfläche aufweisen.

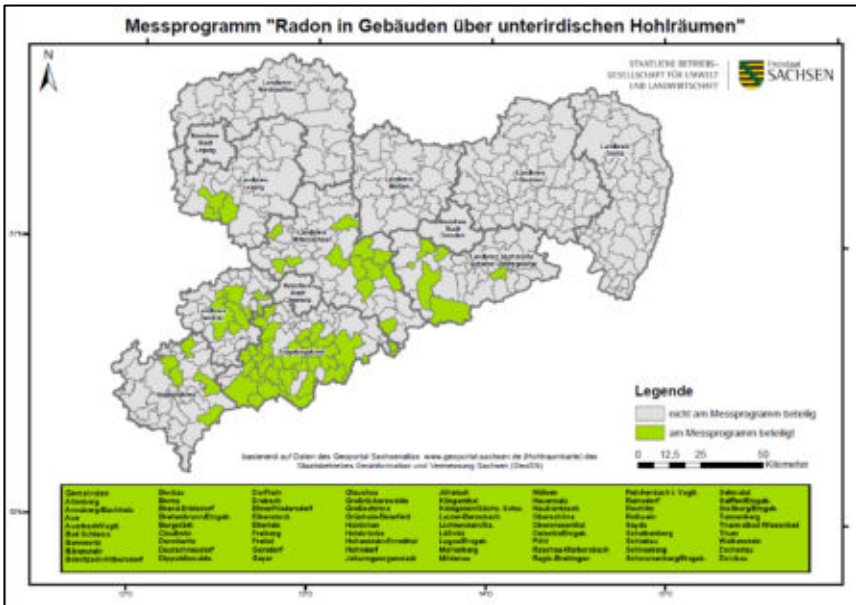


Abbildung 1: Karte der betreffenden Gemeinden des Messprogrammes "Radon über unterirdischen Hohlräumen".

Dafür wurden 71 Gemeinden in den Landkreisen Erzgebirge, Mittelsachsen, Vogtland, Zwickau, Sächsische Schweiz-Osterzgebirge und Leipzig mit einem Anteil von mehr als 25 % der Gemeindefläche mit Hohlräumen identifiziert (Abb. 1). Der räumliche Schwerpunkt des Programms ist der Südwesten von Sachsen.

Eine Teilnahme am Messprogramm ist darüber hinaus auch möglich für Eigentümer von Gebäuden, welche sich über einem Hohlraum befinden oder über eine mögliche Anbindung zu einem Hohlraum verfügen, auch wenn die Gemeinde, in der sich diese Häuser befinden, nicht in der Liste des Messprogrammes aufgeführt ist. Das Messprogramm ist auf den Einsatz von 1.000 Exposimeter pro Jahr limitiert.

2.2 Durchführung

Zur Gewinnung von Teilnehmern an dem freiwilligen Messprogramm für private Gebäudeeigentümer wurden Informationsschreiben an die Verwaltungen der betreffenden Gemeinden versandt mit der Bitte um geeignete Veröffentlichung. Informationen zum Messprogramm sind außerdem auf den Internetseiten des Freistaates Sachsen verfügbar. Eine Bewerbung des Messprogrammes erfolgt auch regelmäßig auf den Veranstaltungen der Radonberatungsstelle, wie zum Beispiel bei Messeauftritten auf den jährlichen Baumessen, sowie bei verschiedenen Informationsveranstaltungen wie der Mobilien Radonberatung.

Die Gewinnung von Messprogramm-Teilnehmern ist stark abhängig davon, wie wirksam die Informationen in der Zielgruppe verbreitet werden können. Nach der Information der Gemeinden mit der Bitte um Veröffentlichung konnte eine erste größere Nachfrage zur Teilnahme an dem kostenfreien Messprogramm verzeichnet werden (vgl. Abb. 2). Dabei wurden Teilnehmer vorwiegend aus den Gemeinden gewonnen, in denen die Information tatsächlich veröffentlicht wurde. Auch die Präsenz der Radonberatungsstelle auf den Baumessen, die in der Regel jährlich im ersten Quartal des Jahres stattfinden, führte jeweils zu einer erhöhten Nachfrage nach Teilnahme im Messprogramm.

Mit der Veröffentlichung zur Durchführung neuer Messprogramme für Eigentümer privater Wohngebäude im 4. Quartal 2023 stieg das Interesse zur Teilnahme sprunghaft an. Dies ist auf eine erhöhte mediale Aufmerksamkeit im Anschluss an die Veröffentlichung der Presseinformation zurückzuführen. Verschiedene Print-Medien, Online-Nachrichtendienste sowie Radiosender veröffentlichten in den Folgetagen die Informationen und führten zu einer erhöhten Nachfrage zur Teilnahme an den Messprogrammen.

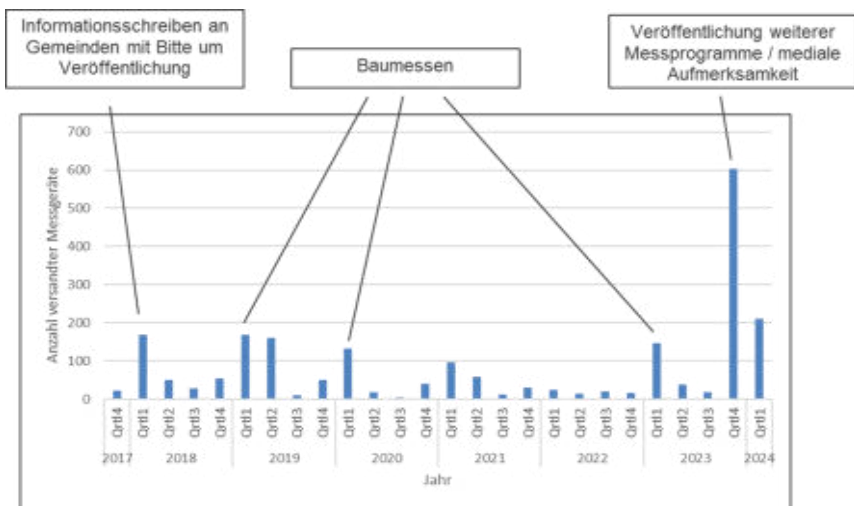


Abbildung 2: Zeitliche Verteilung des Versandes der Messgeräte an Teilnehmer des Messprogrammes.

Die Teilnahme am Messprogramm erfordert eine Einverständniserklärung der Interessenten sowie einen ausgefüllten Fragebogen zum Gebäude. Anschließend werden den Teilnehmern die Exposimeter mit einer Anleitung zur Auslegung im Gebäude per Post zugesandt. Nach einer Auslegezeit von 12 Monaten erfolgt die Rücksendung der Messgeräte durch die Teilnehmer an die Radonberatungsstelle. Nach der Auswertung wird den Teilnehmern ein Bericht mit den Messwerten, einer Bewertung der Ergebnisse sowie einer Empfehlung zum weiteren Vorgehen zugesandt.

Bereits in der Einverständniserklärung werden die Teilnehmer über die Möglichkeit zur Rückfrage seitens der Radonberatungsstelle zu eventuell ergriffenen Radonschutzmaßnahmen informiert. Mittels eines Fragebogens werden in der Regel ca. 1,5 Jahre nach dem Berichtversand die Teilnehmer erneut kontaktiert, bei denen eine Überschreitung des Referenzwertes in einem oder mehreren Aufenthaltsräumen gemessen wurde. Gleichzeitig mit den Fragen erhalten die Teilnehmer die Möglichkeit zur kostenfreien Nachmessung der Radon-222-Aktivitätskonzentration in den Aufenthaltsräumen über 12 Monate als Erfolgskontrolle, sofern Schutzmaßnahmen ergriffen wurden.

2.3 Teilnehmer

Seit Beginn des Messprogrammes im Jahr 2017 wurden bisher 497 Wohngebäude privater Eigentümer aus 9 Landkreisen in das Messprogramm aufgenommen und ca. 2200 Kernspur-Exposimeter an die Teilnehmer versandt. Pro Gebäude werden im Durchschnitt 4-5 Messgeräte für die Aufenthaltsräume verschickt. In Tabelle 1 ist die regionale Verteilung der Messungen in den Landkreisen Sachsens zusammengefasst.

Tabelle 1: Übersicht über regionale Verteilung der Messungen in Gebäuden im Messprogramm in Bezug zum Gebäudestand (Quelle: www.statistik.sachsen.de).

Landkreis	Anzahl Wohngebäude in den Gemeinden des Messprogramms	Anzahl Gebäude im Messprogramm	Anzahl Gebäude mit abgeschlossener Erstmessung	Quotient Gebäude im Messprogramm / Wohngebäude
Sächsische Schweiz-Osterzgebirge	17.585	195	136	1,1 %
Erzgebirgskreis	54.089	141	63	0,3 %
Vogtlandkreis	8.910	63	23	0,7 %
Mittelsachsen	24.236	42	12	0,2 %
Zwickau	32.061	37	15	0,1 %
Dresden, Landeshauptstadt		15	12	
Leipzig		2	1	
Bautzen		1		
Meißen		1		
Gesamt	136.881	497	262	0,4%

Da das Messprogramm für eine Teilnahme weiterhin offen ist, sind die Ergebnisse als Momentaufnahme zu bewerten. Zum Stand 01.03.2024 sind die Ergebnisse aus den Messungen in 262 Gebäuden

abgeschlossen. Vergleicht man die Anzahl der Gebäude, die ins Messprogramm aufgenommen wurden mit dem aktuellen Gebäudebestand in den Landkreisen, so wird ersichtlich, dass mit dem Messprogramm einige Promille der Wohngebäude der zum Messprogramm gehörenden Gemeinden erfasst wurden.

Die regionale Verteilung der Gebäude, die in das Messprogramm aufgenommen wurden, zeigt einen Schwerpunkt im südlichen Teil Sachsens sowie einen weiteren Schwerpunkt bei Dresden (Abb. 3).

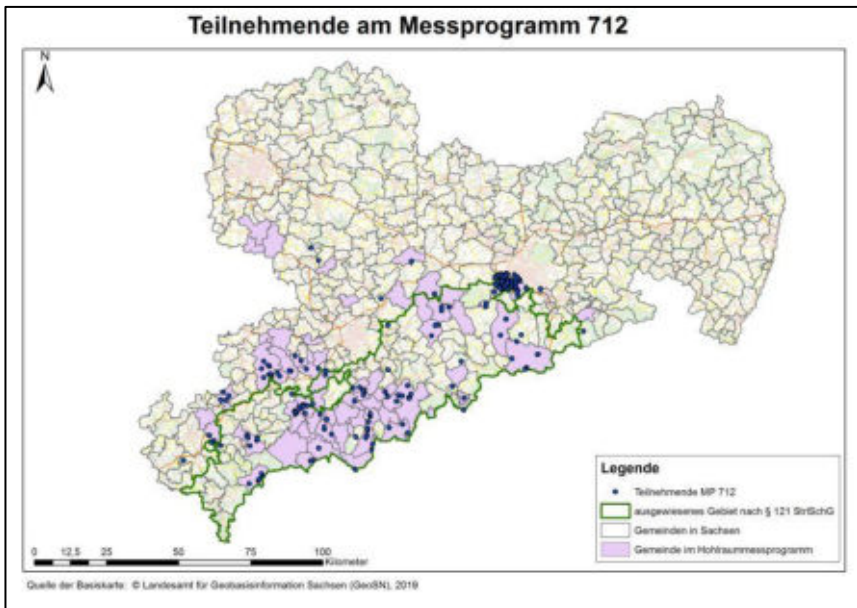


Abbildung 3: Regionale Verteilung der Gebäude im Messprogramm "Radon über unterirdischen Hohlräumen".

Insbesondere im Landkreis Erzgebirge sowie im Landkreis Sächsische Schweiz-Osterzgebirge wurde jeweils ein besonders großes Interesse zur Teilnahme am Messprogramm verzeichnet. Vereinzelt finden im Rahmen des Messprogrammes auch Messungen außerhalb der gelisteten Gemeinden statt. In diesen Fällen ist bei den betreffenden Gebäuden jeweils in unmittelbarer Nähe ein Hohlraum bekannt oder

wird vermutet. In einigen der Gemeinden, die im Messprogramm aufgeführt sind, konnten bisher keine Teilnehmer gewonnen werden.

In den Gemeinden, in denen eine Veröffentlichung des Messprogrammes z. B. in Gemeindeblättern erfolgte, konnten besonders häufig Teilnehmer gewonnen werden. In der Stadt Freital im Landkreis Sächsische Schweiz-Osterzgebirge führten insbesondere Informationsveranstaltungen, die von der Stadtverwaltung unterstützt und beworben wurden, zu einer verstärkten Nachfrage am Radon-Messprogramm.

Von den bisher ausgewerteten Einzelmessungen des Messprogrammes entfallen 39 % auf private Wohngebäude in der Stadt Freital (450 ausgewertete Exosimetermessungen). Die auffällige Häufung lässt sich vermutlich mit der Veröffentlichung des Messprogrammes durch die Stadtverwaltung erklären, sowie auch durch erfolgreiche Informationsveranstaltungen. In der Stadt Freital wurde in den Jahren 2019, 2020 sowie 2023 von der Radonberatungsstelle eine Mobile Radonberatung im Rathaus angeboten, die aufgrund der Ankündigung durch die Stadtverwaltungen sehr gut besucht wurden. Vermutlich trug auch die nachbarschaftliche Weiterverbreitung der Informationen zu den kostenfreien Messungen zu einer erhöhten Nachfrage bei, dies wurde häufig bei Rückfragen durch die Radonberatungsstelle von den Interessenten angegeben. Generell ist das Thema „Radon“ in der Stadt Freital sehr präsent und wird z. B. auch in Stadtratssitzungen besprochen oder ist indirekt über einen Hinweis des BfS zu „Verdachtsflächen“ auch im Flächennutzungsplan verankert.

Auffällig ist, dass in der Stadt Freital oft mehrere Teilnehmer in einem Straßenzug zu finden sind (Abb. 4). Neben eventuellen baurechtlichen Hinweisen oder örtlich bekannten bergbaulichen Einflüssen ist dies wahrscheinlich auch auf nachbarschaftliche Kommunikation zurückzuführen.

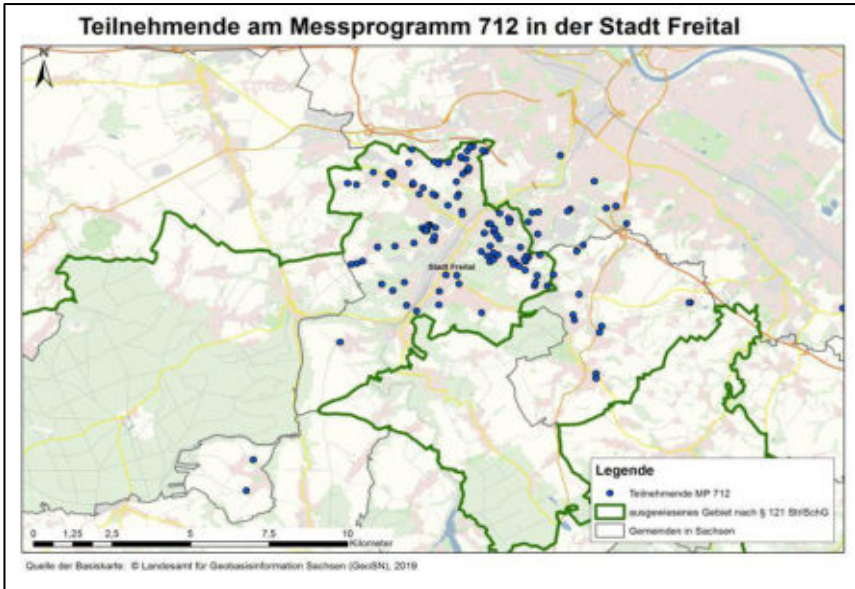


Abbildung 41: Räumliche Verteilung der Teilnehmer an dem Messprogramm „Radon in Gebäuden über unterirdischen Hohlräumen“ in der Stadt Freital.

2.4 Charakteristische Gebäudedaten

Die Teilnehmer am Messprogramm füllen bei der Anmeldung einen umfangreichen Fragebogen zu dem zu untersuchenden Gebäude aus. Nachstehend werden einige Charakteristika statistisch beschrieben.

Bei den zu untersuchenden Gebäuden handelt es sich zu knapp 60 % um freistehende Einfamilienhäuser und zu knapp 30% um Doppelhaushälften oder Reihenhäuser. Die restlichen Häuser sind Mehrfamilienhäuser. Die Häuser sind zu ca. 90 % massiv gebaut. Je ca. 5 % sind Fachwerkhäuser und Fertighäuser (Leichtbau).

Von den Gebäuden ist auch das Baujahr (zum Teil geschätzt) und die Art der Unterkellerung (voll-, teil- oder nichtunterkellert) bekannt. Nachkriegsbauten mit einem Baujahr nach 1948 machen etwa die Hälfte der zu untersuchenden Gebäude aus. Der Anteil der Teilunterkellerung ist bei „historischen“ Gebäuden vor 1900 deutlich höher als bei Nachkriegsbauten. Nichtunterkellerte Gebäude sind allen Altersklassen prozentual wenig zu finden (Abb. 5).

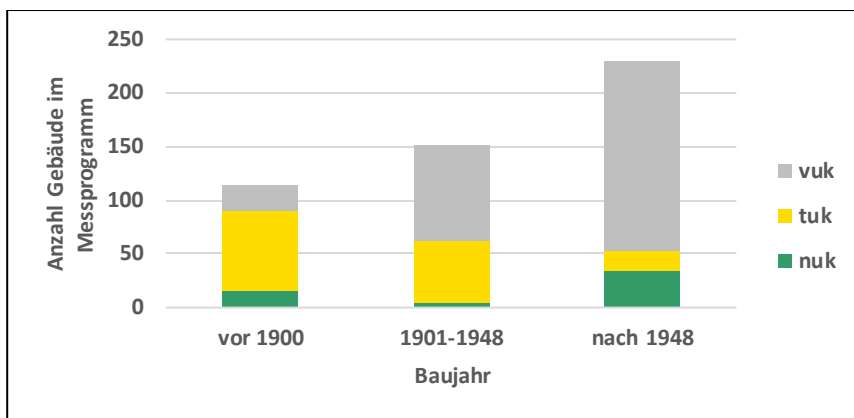


Abbildung 5: Anzahl der Gebäude im Messprogramm kategorisiert nach Baujahr und Art der Unterkellerung (vuk = voll unterkellert, tuk = teilweise unterkellert, nuk = nicht unterkellert).

2.5 Ergebnisse der Messungen der Radon-222-Aktivitätskonzentration

Seit dem Start des Messprogrammes konnten bisher Ergebnisse aus insgesamt über 1100 Messungen der Radon-222-Aktivitätskonzentration von Aufenthaltsräumen in 262 Gebäuden erfasst werden. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte dabei in Anlehnung an die DIN ISO 11665-8, bei der einem Gebäude der Mittelwert oder der Maximalwert in Abhängigkeit der Streuung der einzelnen Daten untereinander zugeordnet wird [2]. Aus dem Rücklauf der Exposimeter konnte geschlossen werden, dass lediglich 0,5 % der untersuchten Räume praktisch ungenutzte Räume und ca. 6,5 % der untersuchten Räume wenig genutzte Räume im Sinne der technischen Spezifikation DIN/TS 18117-1 [3] darstellten. Die Daten zu praktisch ungenutzten Räumen wurden nicht in die Auswertung einbezogen.

Die Ergebnisse zeigen, dass in 52 % der untersuchten Gebäude der Referenzwert der Radon-222-Aktivitätskonzentration von 300 Bq/m^3 in allen Aufenthaltsräumen eingehalten wird (Abb. 6).

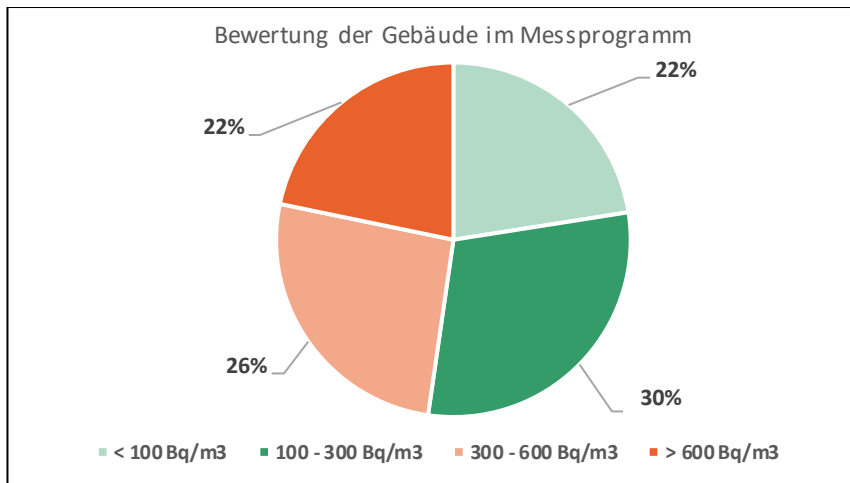


Abbildung 6: Ergebnisse der Radonmessungen in Gebäuden mit Aufenthaltsräumen; Auswertung nach DIN ISO 11665-8 (Bewertung des Gebäudes).

In 48 % der Gebäude wurde in mindestens einem Raum eine Überschreitung des Referenzwertes festgestellt, bei 22 % der Gebäude wurden Werte oberhalb von 600 Bq/m³ gefunden.

In der Abb. 7 ist die regionale Verteilung der Teilnehmer des Messprogrammes und die in einer Gemeinde gefundene Häufigkeit von Gebäuden dargestellt, deren Gebäudewertung nach DIN ISO 11665-8 [2] eine Referenzwertüberschreitung zeigt. Die Größe der Symbole ist hierbei ein Maß für die Anzahl der Teilnehmer in einer Gemeinde. Es wurden dabei folgende Klassen gebildet: 1-2 Teilnehmer pro Gemeinde, 3-5 Teilnehmer pro Gemeinde, 6-15 Teilnehmer pro Gemeinde und mehr als 15 Teilnehmer.

Die gefundenen Häufigkeiten sind nicht repräsentativ für die Gemeinde, sondern bilden dabei nur die Ergebnisse des Messprogramms ab.

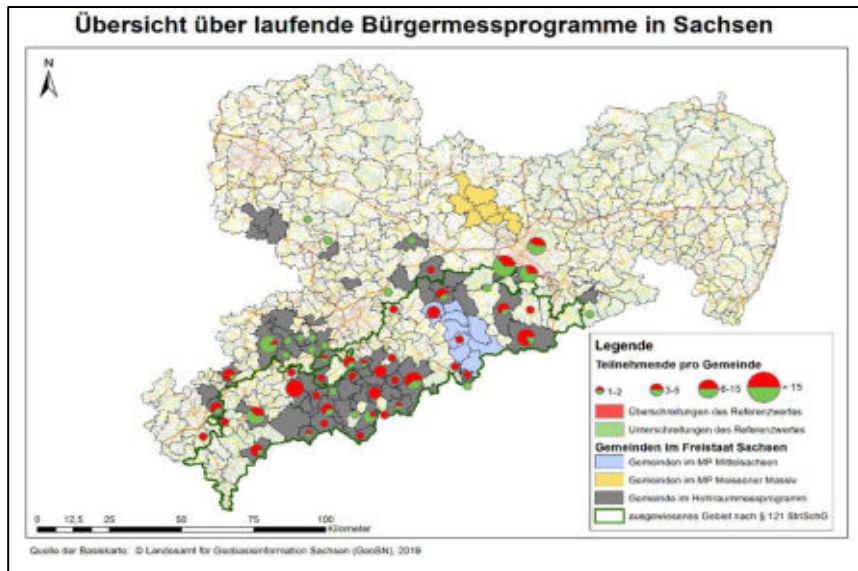


Abbildung 7: Regionale Verteilung der Teilnehmer des Messprogrammes und Häufigkeit von Gebäuden mit Referenzwertüberschreitung nach der Gebäudebewertung nach DIN ISO 11665-8.

2.6 Ergebnisse aus den Rückfragen nach Abschluss der Gebäude-bewertungen

Nach Abschluss der Messungen erhalten die Teilnehmer einen Bericht mit den ermittelten Ergebnissen sowie Empfehlungen zu Radon-schutzmaßnahmen. Im Januar 2022 wurden alle Teilnehmer mit Gebäuden mit Überschreitungen des Referenzwertes in bewertungsrelevanten Räumen, die ihren Bericht schon mindestens ein Jahr erhalten hatten, erneut kontaktiert. Insgesamt wurden 56 Teilnehmer des Messprogrammes mit Hilfe eines Fragebogens befragt, ob Maßnahmen ergriffen wurden. Insgesamt haben sich 39 dieser 56 Teilnehmer zurückgemeldet (ca. 70 %). In Tab. 2 sind die angegebenen Maßnahmen schematisch zusammengefasst.

Die Auswertung ergab, dass von den Teilnehmern, die sich zurückgemeldet haben, überwiegend Maßnahmen ergriffen wurden (95 %). Dabei wurde in fast der Hälfte der Fälle ausschließlich auf verstärktes Lüften gesetzt.

Tabelle 2: Zusammenfassung der ergriffenen Radon Schutzmaßnahmen nach Rückfragen an Teilnehmer mit Gebäuden, in denen Aufenthaltsräume mit Referenzwertüberschreitung gefunden wurden.

Maßnahme	Anzahl Teilnehmer
Keine Maßnahme	2
Maßnahmen in Planung / Umsetzung	4
Ausschließlich verstärktes Lüften	17
Radonbrunnen / Radondrainage	2
Technische Zu- und Abluftregelung	3
Abdichtung (nicht radonspezifisch)	1
Kombination verschiedener Maßnahmen	10

16 der 33 Teilnehmer, die bereits Maßnahmen ergriffen hatten, nahmen das Angebot einer Kontrollmessung gerne an. Hierbei ergab sich in 10 Fällen, dass die Maßnahmen keine wesentliche Veränderung der Radonkonzentration ergaben. In einem Fall konnte über zeitaufgelöste verkürzte Messungen die Eignung der ergriffenen Maßnahme gezeigt werden. In einem weiteren Fall konnte die Radonkonzentration deutlich abgesenkt werden, aber der Referenzwert war immer noch überschritten. Lediglich in 3 Fällen wurde die Radonkonzentration unter den Referenzwert gesenkt. In einem Fall war wegen geänderter Nutzungsbedingungen kein Vergleich mit der Erstmessung möglich.

An dieser Stelle soll nicht der Erfolg bestimmter Maßnahmen bewertet werden. Das Ziel dieses Beitrages ist es darauf hinzuweisen, dass die Teilnahme an einem Messprogramm bei festgestellten Referenzwertüberschreitungen sehr häufig auch zur Ergreifung von Radon Schutzmaßnahmen führt. Aus den bisherigen Ergebnissen deutet sich an, dass das alleinige verstärkte Lüften häufig nicht erfolgreich ist.

3 Ausblick – Weitere Radon-Messprogramme des Freistaates Sachsen für Bürger

Seit dem 3. Quartal des Jahres 2023 bietet der Freistaat Sachsen weitere für den Bürger kostenfreie Messprogramme an. Mit Hilfe dieser Messprogramme sollen zum einen Daten zur Bewertung der Radonsituation im Freistaat Sachsen auch im Hinblick auf die ausgewiesenen Radonvorsorgegebiete gewonnen werden und zum anderen Bürger dazu angeregt werden, sich mit dem Thema „Radon“ zu beschäftigen.

Neben dem Messprogramm „Radon in Gebäuden über unterirdischen Hohlräumen“ werden zwei weitere Messprogramme in jeweils mehreren Gemeinden im Landkreis Meißen bzw. Mittelsachsen angeboten (Abb. 8). Neben den Messungen in Gebäuden sind hier auch Messungen der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft geplant. Die zu gewinnenden Daten sollen helfen, die bestehende Statistik zu bestimmten geologischen Einheiten zu verbessern.

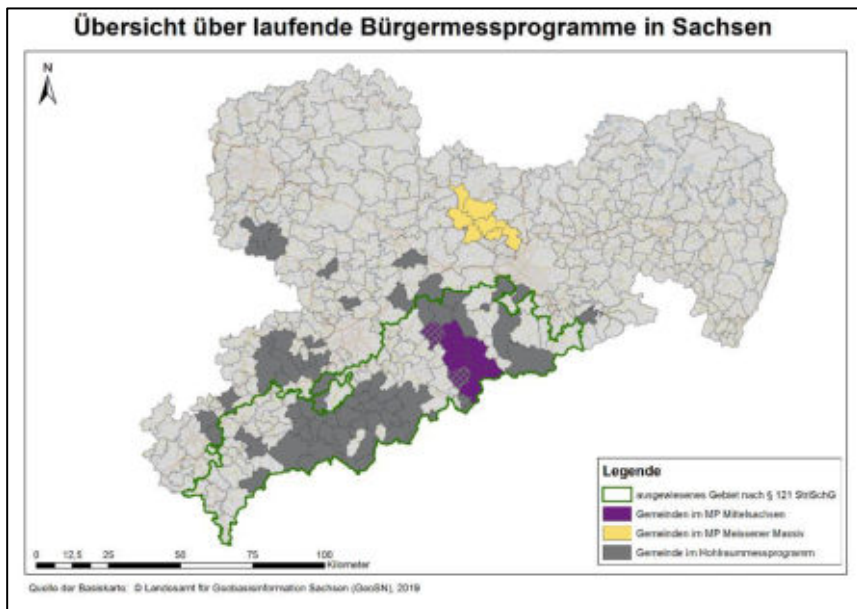


Abbildung 8: Übersicht zu den Messprogrammen zur Radon-222-Aktivitätskonzentration in Gebäuden für Bürger im Freistaat Sachsen.

Ein viertes Radonmessprogramm wird für das gesamte Bundesland Sachsen angeboten und wendet sich ausschließlich an Eigentümer von freistehenden, vollunterkellerten Einfamilienhäusern, da diese Häuser einer Referenzsituation des Bundesamtes für Strahlenschutz für die Bewertung einer Überschreitungshäufigkeit nahekommen [4].

Die Veröffentlichung der weiteren Messprogramme führte zu einer erfreulich hohen Nachfrage zur Teilnahme, innerhalb der ersten 7 Tage wurden mehr als 400 Anrufe und E-Mails von Interessenten in der Radonberatungsstelle verzeichnet.

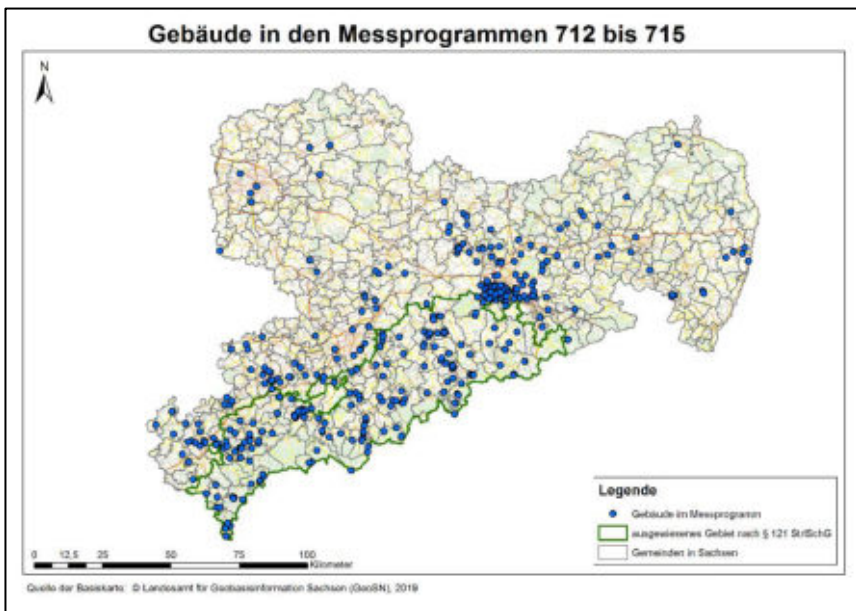


Abbildung 9: Regionale Verteilung der Teilnehmer an den Radonmessprogrammen des Freistaates Sachsen für Bürger (Stand 03/2024).

Bisher haben sich für das Programm „Meissner Massiv“ 16 Teilnehmer gemeldet und für das Messprogramm „Mittelsachsen“ 35 Teilnehmer. Für das Messprogramm „Vollunterkellerte Wohngebäude“ konnten bereits 190 Teilnehmer gewonnen werden. Auch im Messprogramm „Radon in Gebäuden über unterirdischen Hohlräumen“ wurden seit der Veröffentlichung der neuen Messprogramme weitere 178 Teilnehmer verzeichnet (Stand 03/2024).

Die nachstehende Karte zeigt die regionale Verteilung der bisher in den Messprogrammen registrierten Teilnehmer, denen bereits die Exposimeter zugesandt wurden (Abb. 9).

Es ist erkennbar, dass durch die neuen Messprogramme für Bürger auch der nord- und ostsächsische Raum stärker erschlossen wird.

Für die Gebiete der Messprogramme „Meissner Massiv“ und „Mittelsachsen“, in denen bislang wenige Teilnehmer gewonnen werden konnten, sollen in den nächsten Monaten verstärkt Informationsveranstaltungen durch die Radonberatungsstelle über die kommunalen Verwaltungen angeboten werden.

4 Literaturverzeichnis

- [1] Radonmaßnahmenplan zur nachhaltigen Verringerung der Exposition gegenüber Radon. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Berlin, 2019
- [2] DIN ISO 11665-8:2019: Ermittlung der Radioaktivität in der Umwelt – Luft: Radon-222 – Teil 8: Methodik zur Erstbewertung sowie für zusätzliche Untersuchungen in Gebäuden. VDE VERLAG GmbH, Berlin, 2020
- [3] DIN/TS 18117-1:2021-09: Bauliche und Lüftungstechnische Maßnahmen zum Radonschutz – Teil 1: Begriffe, Grundlagen und Beschreibung von Maßnahmen. Beuth Verlag, 2021.
- [4] Bossew, P., Hoffmann, B.: Die Prognose des geogenen Radonpotentials in Deutschland und die Ableitung eines Schwellenwertes zur Ausweisung von Radonvorsorgegebieten. BfS-SW-24/18, Salzgitter, 2018

Förderung von Maßnahmen zur Reduzierung der Radonkonzentration in Sachsen – die Förderrichtlinie Stadtgrün, Lärm, Radon/ 2023

Sabine Gruhne¹⁾

¹⁾Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft

Zusammenfassung

Am 28. August 2023 ist die Förderrichtlinie Stadtgrün, Lärm, Radon/ 2023 in Kraft getreten. Mit dieser Förderrichtlinie gewährt das Sächsische Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft (SMEKUL) Fördermittel zur biodiversitätsfördernden Begrünung von Städten und Gemeinden, zur Lärminderung sowie zur Radonreduzierung im Freistaat Sachsen. Im Vortrag sollen die Schwerpunkte und Zielsetzung im **Förderbereich Radon** dargestellt und über die Herausforderungen hinsichtlich der Umsetzung berichtet werden.

1 Radonvorkommen in Sachsen

Begründet durch den geologischen Aufbau ist in Sachsen auf einem vergleichsweise großen Flächenanteil ein erhöhtes Radonpotential im Untergrund anzutreffen. Insbesondere in den Mittelgebirgsregionen fand auch intensiver Uranerzbergbau statt. Bei der Ausweisung der Gebiete (Radonvorsorgegebiete) nach § 121 Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) [1] auf der Grundlage einer wissenschaftlich basierten Methode unter Zugrundelegung von umfangreichen Messdaten der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft sowie in Innenräumen wurden 107 Gemeinden ermittelt, in denen die festgelegten Kriterien der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) zutrafen [2]. In diesen Gemeinden wird erwartet, dass auf mindestens 75 % des jeweiligen Gemeindegebietes der Referenzwert von 300 Bq/m³ in mindestens zehn Prozent der Gebäude überschritten wird. Damit ist fast ein Viertel der Fläche Sachsens Radonvorsorgegebiet.

Außerhalb der ausgewiesenen Radonvorsorgegebiete gibt es weitere Gebiete, in denen mit einer hohen Wahrscheinlichkeit eine Referenzwertüberschreitung in Gebäuden angenommen werden muss. Da anzunehmen war, dass jeweils weniger als 75 % der Gemeindefläche betroffen sein werden, wurden diese Gebiete nicht als Radonvorsorgegebiete ausgewiesen.

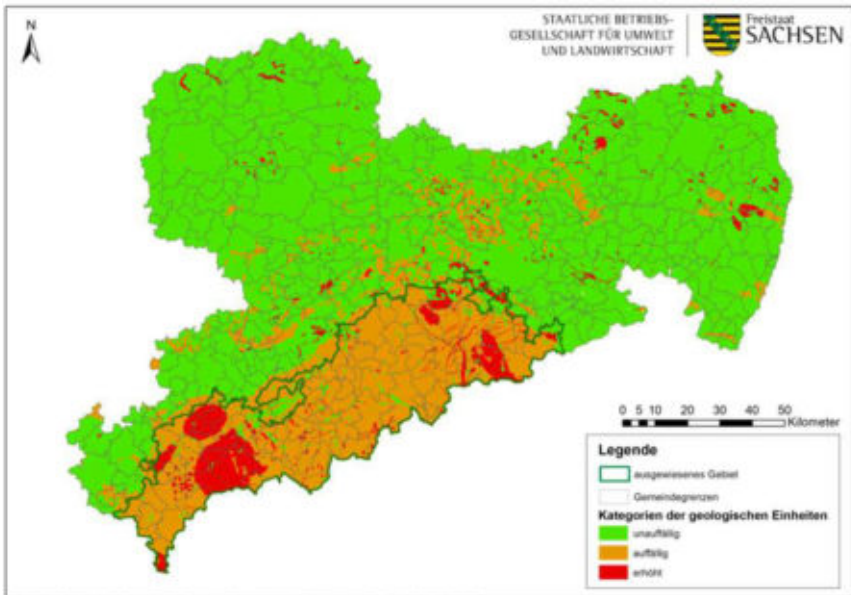


Abbildung 1: Kategorien der geologischen Einheiten nach der Wahrscheinlichkeit der Referenzwertüberschreitung [3]

Die in der Abbildung 1 dargestellten geologischen Einheiten sind nach der erwarteten Häufigkeit der Referenzwertüberschreitung in Aufenthaltsräumen im Erdgeschoss von darauf errichteten Gebäuden kategorisiert. Die Kategorie „auffällig“ bedeutet eine Überschreitungshäufigkeit von 10 %, die Kategorie „erhöht“ eine Überschreitungshäufigkeit von 25 %.

2 Information und Beratung Betroffener

Bedingt durch den hohen Flächenanteil in Sachsen ergibt sich auch eine große Anzahl derer, die von erhöhter Radonaktivitätskonzentration betroffen sind. Der daraus abzuleitende hohe Bedarf an Information und Beratung von Bürgern, Bauherren, Kommunen, Arbeitsplatzverantwortlichen usw. wurde in Sachsen frühzeitig erkannt. So wurde die Radonberatungsstelle bereits 1993 eingerichtet und war zunächst beim Landesamt für Umwelt und Geologie und ist seit 2000 bei der Staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft angesiedelt. Die Beratungsstelle hat die Aufgabe zu den Themen Radon, Radonmessungen und Radonschutzmaßnahmen zu informieren und zu beraten und auch die Radon-Messprogramme des Freistaates Sachsen durchzuführen und auszuwerten. Darüber hinaus finanziert das SMEKUL seit dem Jahr 2022 eine Projektstelle bei der Sächsischen Energieagentur (SAENA), die speziell zu baufachlichen und gebäudetechnischen Möglichkeiten des Radonschutzes sowie den vorhandenen Synergien mit Energieeffizienzmaßnahmen in und an Gebäuden berät.

3 Förderrichtlinie Stadtgrün, Lärm, Radon/2023

An einer erheblichen Anzahl von Arbeitsplätzen wurde bereits eine Referenzwertüberschreitung festgestellt und an weiteren Arbeitsplätzen in Sachsen ist dies zu erwarten. Um betroffene Unternehmen und Kommunen vor dem Hintergrund der gesamtwirtschaftlichen Situation bei der Durchführung dauerhaft wirksamer, baulicher Maßnahmen zum Schutz vor Radon nicht nur beratend zu unterstützen, wurde nach Möglichkeiten einer Förderung gesucht. Über das Programm des Freistaates Sachsen für den Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung / Just Transition Fond (EFRE/JTF) konnte mit Mitteln der Europäischen Union für die Förderperiode 2021–2027 die Förderrichtlinie Stadtgrün, Lärm, Radon/2023 auf den Weg gebracht werden. Sie umfasst neben den Förderangeboten zur Verbesserung und Sicherung der Biologischen Vielfalt in Städten und Gemeinden und zum Schutz vor Lärm ein Förderangebot zur Senkung der Radonbelastung.

Nach umfangreichen Abstimmungen zu den fachlichen, förderrechtlichen und organisatorischen Details ist die Förderrichtlinie am 28. August 2023 in Kraft getreten.

Zielsetzung im Förderbereich Radon ist die Unterstützung von Kommunen, kommunalen Unternehmen, gemeinnützigen Organisationen, anerkannten Religionsgemeinschaften sowie kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) bei Maßnahmen zur Reduzierung der Gesundheitsbelastung durch Radon im beruflichen Umfeld. Mit der Förderung soll auch einer weiteren Schwächung der Wirtschaftskraft und der Abwanderung von Fachkräften insbesondere in den ländlich geprägten Grenzregionen entgegengewirkt werden.

Gefördert werden Vorhaben im Freistaat Sachsen - auch außerhalb der Radonvorsorgegebiete - zur Reduzierung der Radonkonzentration in Bestandsgebäuden mit Arbeitsplätzen. Es werden sachgerecht geplante und durchgeführte, dauerhaft wirksame Vorhaben gefördert, die bauliche Maßnahmen zur Verhinderung des Radonzutritts, Lüftungstechnische Maßnahmen zur Reduzierung der Radonkonzentration und/ oder bauliche Maßnahmen zur Absaugung von Radon unterhalb von Gebäuden umfassen.

Für die Gewährung der Förderung müssen unter anderem folgende Zuwendungsvoraussetzungen erfüllt sein:

- Das Gebäude, für das ein Vorhaben beantragt wird, muss vor dem 31.12.2018 errichtet worden sein.
- In dem Gebäude muss eine über das Jahr gemittelte Radonaktivitätskonzentration von mindestens 200 Bq/m³ nachgewiesen werden, wobei die Messungen den Anforderungen von § 155 Absatz 1 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) genügen und mit Messgeräten einer durch das Bundesamt für Strahlenschutz anerkannten Stelle nach deren Vorgaben durchgeführt worden sein müssen.
- Das Vorhaben muss fachlich qualifiziert geplant und durchgeführt werden.
- Nach Beendigung des Vorhabens ist eine erneute Messung der Radonaktivitätskonzentration für die Dauer eines Jahres durchzuführen und das Ergebnis zur Verfügung zu stellen.

Diese und weitere Zuwendungsvoraussetzungen sind mit der Beantragung vom Antragsteller mit entsprechenden Nachweisen zu belegen oder durch Erklärungen zu bestätigen.

Die Förderanträge sind online über das Förderportal der Sächsischen Aufbaubank (SAB) als Antrags- und Bewilligungsstelle einzureichen. Die SAENA fungiert als Fachstelle und nimmt die Bewertung und fachliche Stellungnahme zu den beantragten Vorhaben vor, einschließlich der Prüfung auf Wirtschaftlichkeit und Sparsamkeit. Die Zuwendung für Vorhaben zur Radonreduzierung wird als Festbetragsfinanzierung gewährt. Für KMU können die anrechnungsfähigen Ausgaben in Höhe von 65 %, für andere Antragsberechtigte in Höhe von 75 % - jedoch maximal 60.000 Euro gewährt werden.

Die ersten Anträge sind bei der SAB eingegangen und werden durch die SAB und die SAENA bearbeitet. Zum aktuellen Stand der Umsetzung des Förderbereichs Radon und ersten Erfahrungen wird im Vortrag berichtet und ausgeführt.

4 Literaturverzeichnis

- [1] Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz - StrlSchG) vom 27.Juni 2017, das zuletzt am 03. Januar 2022 geändert worden ist.
- [2] Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 29. November 2018, die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 8. Oktober geändert worden ist.
- [3] Heinrich, T. (2023), „Radon in Sachsen“, Vortrag bei Fortbildung „Radonschutz in Bestandsgebäuden“ in Reinhardtsgrμμα
- [4] Förderrichtlinie – FRL Stadtgrün, Lärm, Radon/2023 vom 28. August 2023 (SächsABl. S. 1288)

Zielsicheres Radon-Sniffing als maßgebliche Grundlage für eine kostensparende Sanierungsplanung

Pamela Jentner

OrangePep GmbH & Co.KG, Freising, Vorstand Verband Baubiologie e.V., Vorstand Stiftung Baubiologie, Architektur. Umweltmedizin (STIFTUNG BAU)

Zusammenfassung

Die Geschichte des Radons von seiner Entdeckung bis zur Gegenwart zeigt stetige Entwicklungen in Messtechnik, Untersuchungen und Sanierungsmethoden. Frühe Messungen und Sanierungen waren geprägt von Versuch und Irrtum, mit ungewissen Erfolgsaussichten und kostenintensiven Vorgehensweisen. Brachten ergriffene Maßnahmen nicht die gewünschte Reduktion der Radonkonzentrationen in den Innenräumen, folgten weitere Maßnahmen, in der Hoffnung auf Verbesserung. Die Pioniere dieser Zeit verdienen Anerkennung für ihre Arbeit. Der zeitaufwendige und kostspielige Prozess von „experimenteller Lösungsfindung“ sollte jedoch endgültig der Vergangenheit angehören. Gerade in den letzten Jahren wurden im In- und Ausland grundlegend verbesserte Messmethoden und effektivere Sanierungstechniken entwickelt. Umfassende, detaillierte Radon-Sniffing-Messungen ermöglichen eine präzise Untersuchung der Radoneintrittspfade und -ausbreitung in Gebäuden. Auf dieser Grundlage kann eine kostengünstige und prozesssichere Sanierungsplanung entwickelt und im Sinne der hilfeschenden Kunden umgesetzt werden.

Targeted Radon-Sniffing as a Crucial Basis for Cost-Saving Remediation Planning

Summary

The history of radon from its discovery to the present day demonstrates continuous advancements in measurement technology, investigations, and remediation methods. Early measurements and remediations were characterized by trial and error, with uncertain prospects of success and costly approaches. If the initial interventions failed to achieve the desired reduction in indoor radon concentrations, further measures followed, hoping for improvement. The pioneers of this era deserve recognition for their efforts. However, the time-consuming and expensive process of "experimental problem-solving" should definitively belong to the past. Particularly in recent years, significantly improved measurement methods and more effective remediation techniques have been developed both domestically and abroad. Comprehensive, detailed radon-sniffing measurements enable precise examination of radon entry pathways and dispersion within buildings. Based on this foundation, cost-effective and process-assured remediation planning can be developed and implemented in the best interests of the concerned clients.

1 Radon: Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft

Die Geschichte des Radons ist geprägt von stetigen Entwicklungen seit seiner Entdeckung bis zum heutigen Tag. In diesem Beitrag werden die Meilensteine und Herausforderungen auf dem Gebiet der Radonmessungen und -sanierungen beleuchtet. Von den ersten zaghaften Schritten der Erkundung bis hin zu den modernen Methoden und Techniken, die heute angewendet werden, hat sich viel getan.

Frühere Radonmessungen und Sanierungen waren geprägt von Versuch und Irrtum, mit ungewissen Erfolgsaussichten und kostenintensiven Vorgehensweisen. Brachten ergriffene Maßnahmen nicht die gewünschte Reduktion der Radonkonzentrationen in den Innenräumen, folgten weitere Maßnahmen, in der Hoffnung auf Verbesserung. So reihten sich oftmals mehrere Maßnahmen aneinander und verursachten entsprechend hohe Kosten. Dennoch wurden nicht immer ausreichende Verbesserungen erzielt.

Die Pioniere auf diesem Gebiet haben durch ihre harte Arbeit und ihren Einsatz dazu beigetragen, das Verständnis für Radon zu vertiefen und effektive Lösungsansätze zu entwickeln. Dieser Pionierarbeit gehört Dank und Anerkennung.

2 Radon heute

Trotz der Fortschritte in der Forschung und Technologie ist die Radonproblematik in Gebäuden noch immer nicht ausreichend bekannt. Bauherren, Fachplaner, Ausführende und viele behördliche Stellen sind sich oft nicht der potenziellen Gefahren bewusst, die von Radon ausgehen. Vorurteile und Ängste prägen oft den Umgang mit dem Thema. Es mangelt an Kenntnissen über gesetzliche Vorschriften und die Verantwortlichkeiten im Umgang mit Radon. Diese Unsicherheiten führen häufig zu einer zögerlichen Herangehensweise und verhindern eine angemessene Bewältigung des Problems.

Gerade in den letzten Jahren wurden im In- und Ausland grundlegend verbesserte Messmethoden und effektivere Sanierungstechniken entwickelt. Beispielhaft werden hier einige Literaturhinweise genannt: [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11].

3 Systematische Gebäude-Analyse und Messtechnik

Heute stehen fortschrittliche Technologien wie Radon-Sniffing-Messungen mit elektronischen Radon-Messgeräten zur Verfügung, die eine präzise Analyse der Radoneintrittspfade ermöglichen. Diese Techniken haben zu einer kosteneffizienten, zuverlässigen und prozesssicheren Planung von Sanierungsmaßnahmen geführt. Siehe Abb. 1 und Abb.2.



Abbildung 1: links: Radon/Thoron-Messgerät (SARAD), rechts: Radon-Sniffing Messungen im Verteilerkasten der Fußbodenheizung (Bildquelle: Pamela Jentner)

Die systematische Erfassung von Radoneintrittspfaden und Leckagen in Gebäuden ist entscheidend für eine erfolgreiche und zugleich möglichst kostengünstige Radon-Sanierung. Dabei kommt das Verfahren des Radon-Sniffings zum Einsatz, das auf einer gezielten Ortung von potenziellen Eintrittspfaden basiert. Typische Schwachstellen wie Fugen, Ritzen, Schächte und Durchdringungen werden sorgfältig untersucht, um mögliche Radoneintrittspfade zu identifizieren. Darüber hinaus werden visuelle Inspektionen durchgeführt, um sichtbare Indikatoren für Radonleckagen zu erfassen.

Die Messdaten werden anschließend sorgfältig ausgewertet, um präzise und aussagekräftige Berichte zu erstellen. Auf Grundlage dieser Berichte werden geeignete Sanierungsmethoden empfohlen, um die Radonkonzentrationen effektiv zu reduzieren. Dabei werden sowohl

technische als auch bauliche Maßnahmen in Betracht gezogen, um eine optimale Lösung für das jeweilige Gebäude zu finden.

Die detaillierten Messergebnisse und Gebäudeinformationen dienen als Grundlage für eine kostensparende und prozesssichere Sanierungsplanung. Durch eine präzise Erfassung der Radonbelastung und eine gezielte Identifikation der Eintrittspfade können die Sanierungsmaßnahmen gezielt und effizient durchgeführt werden. Dies trägt nicht nur dazu bei, die Gesundheit der Bewohner zu schützen, sondern auch die Kosten für die Sanierung zu minimieren.

Fallbeispiele von Gebäuden unterschiedlicher Bauweisen und Altersklassen werden verwendet, um unterschiedliche Vorgehensweisen und Empfehlungen nachvollziehbar zu machen. Anhand dieser Beispiele können die verschiedenen Schritte des Radon-Sniffings und die daraus resultierenden Sanierungsempfehlungen veranschaulicht werden, um ein besseres Verständnis für die messtechnischen Vorgehensweisen bei der Radonerkundung zu vermitteln.

4 Kostensparendes Sanierungskonzept

Ein wirklich kostensparendes Sanierungskonzept basiert darauf, dass möglichst wenige aber wirksame Maßnahmen wie z.B. Kernbohrungen zur Absaugung der radonhaltigen Bodenluft erforderlich sind. Diese gezielte Planung und Umsetzung kann nur dann prozesssicher gelingen, wenn das Gebäude detailliert durch viele Sniffing-Messpunkte untersucht wird und Eintrittspfade und Ausbreitungswege (Wegsamkeiten) bekannt sind. Bauweisen und Besonderheiten, baulicher Zustand, Standort und geologische Gegebenheiten sind ebenfalls zu berücksichtigen.

5 Sanierungsmaßnahmen

Die Sanierung von radonbelasteten Gebäuden war früher oft eine komplexe und kostspielige Angelegenheit. Es wurden verschiedene Maßnahmen ergriffen, darunter der Austausch von Baustoffen, das Abdichten von Undichtigkeiten und das Setzen von Radonbrunnen.

Im In- und Ausland wurden jedoch effektivere Sanierungsmethoden entwickelt, die gezielt auf die Reduzierung von Radonkonzentrationen abzielen. Bodenluftabsaugungssysteme und Sub Slab Depressurization (SSD) sind beispielhafte Methoden, die sich als wirksam erwiesen haben, um Radonkonzentrationen in Gebäuden zu senken, vor Allem wenn großflächige, eher diffuse Eintrittspfade an erdberührenden Gebäudeteilen vorherrschen. Wirtschaftliche Aspekte sollten bei der Auswahl geeigneter Sanierungsmethoden ebenfalls berücksichtigt werden.

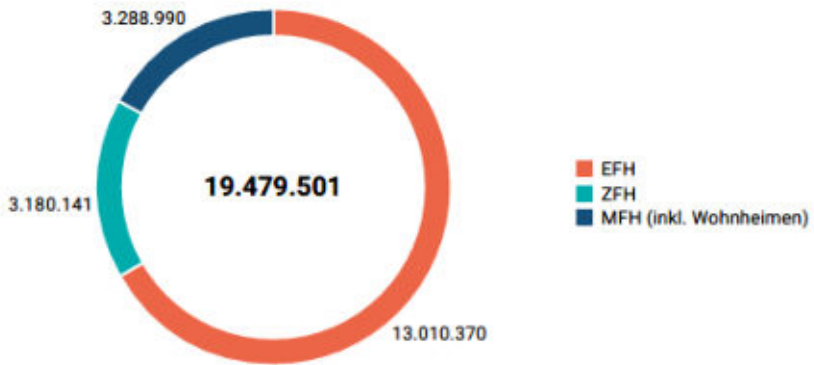
6 Kontrollmessungen

Kurzzeitmessungen mit elektronischen Radonmessgeräten dienen der schnellen Überprüfung der Wirksamkeit von Sanierungsmaßnahmen. Langzeitmessungen mit Exposimetern werden zur Überprüfung des tatsächlichen Jahresmittelwerts durchgeführt. Diese Kontrollmessungen sind entscheidend, um sicherzustellen, dass die durchgeführten Sanierungsmaßnahmen effektiv sind und die Radonexposition auf ein akzeptables Niveau reduzieren.

7 Radon: Eine Herausforderung

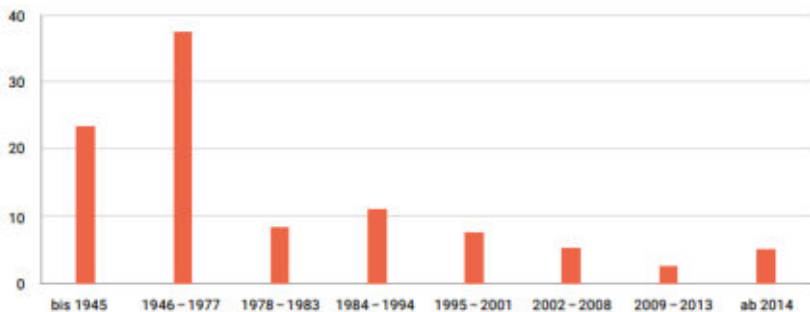
Die Entwicklung auf dem Gebiet der Radonmessungen und -sanierungen hat in den letzten Jahren bedeutende Fortschritte gemacht. Dennoch besteht weiterhin Bedarf an Forschung und Aufklärung, um das Bewusstsein für die Radonproblematik zu stärken und effektive Maßnahmen zur Radonminderung zu fördern.

Die aktuelle Entwicklung auf dem Baubereich zeigt einen signifikanten Rückgang in der Anzahl der Neubauten, sowohl im Wohn- als auch im Nichtwohnsektor, wie von DESTATIS und der DENA berichtet wird [12] [13]. Infolgedessen nehmen Sanierungsmaßnahmen in Bestandsgebäuden unterschiedlicher Bauweisen und Altersklassen zu, siehe Abb. [14].



Quelle: Destatis 2023a

Abbildung 3: Wohngebäudebestand in Deutschland 2022



Quelle: Destatis 2023b, Destatis 2023c, IWU 2018, co2online 2023, eigene Berechnung

Abbildung 4: Wohngebäudebestand in Prozent (%) nach Baualtersklassen

Diese Verschiebung unterstreicht die Notwendigkeit, dass die Thematik des Radons verstärkt in das öffentliche Bewusstsein rückt und bei sämtlichen Sanierungsprojekten von Bestandsgebäuden jeglicher Art berücksichtigt wird. Es ist davon auszugehen, dass alte Gebäude aufgrund von Bauweisen und baulichem Zustand in erdberührenden Bereichen keine Radongasdichtheit aufweisen. Unabhängig von der bisher zu spärlichen Ausweisung von Radon-Vorsorgegebieten. Dies wird auch durch unsere vielzähligen eigenen Messungen bestätigt.

Es bedarf einer umfassenden Öffentlichkeitsarbeit, um die Bevölkerung über die Risiken von Radon zu informieren und die Bedeutung einer radonfreien Umgebung hervorzuheben. Gleichzeitig sind Schulungen und Fortbildungen für Fachplaner und Ausführende von entscheidender Bedeutung, um sicherzustellen, dass Radon bei Sanierungsprojekten angemessen berücksichtigt wird.

Eine hohe Qualität bei der Umsetzung von Radonsanierungen ist unerlässlich, um das Wohl der Bewohner bzw. Mitarbeiter zu gewährleisten. Sanierungen sollten kunden- und lösungsorientiert sowie zugleich kostenbewusst erfolgen, um eine nachhaltige Radonreduktion zu erreichen. Nur durch eine ganzheitliche Herangehensweise und einen hohen Qualitätsstandard können wir sicherstellen, dass radonbedingte Gesundheitsrisiken minimiert und ein gesundes und sicheres Wohn- und Arbeitsumfeld geschaffen wird.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Radon-Handbuch Deutschland, 2015, Aktualisierung 2019
- [2] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Radon in Gebäuden - Leitfaden für die Praxis, 2020
- [3] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK): Radon in Gebäuden - Handlungsempfehlung für Planung, Ausführung und Sanierung, 2019
- [4] Bundesamt für Gesundheit (BAG): Radon - Leitfaden für Bauherren und Fachleute, 2020
- [5] National Collaborating Centre for Environmental Health: Environmental Health Review: Radon in Indoor Air, 2019
- [6] Malkawi, A. I., & Tawalbeh, M. M.: Experimental Study on Sub-Slab Depressurization System for Radon Mitigation, 2014
- [7] Environmental Protection Agency (EPA): Technical Guidance on Radon Mitigation for Large Buildings, 2017

- [8] Ahlstrand, J., Arvelius, J., & Sällsten: Radon Mitigation by Soil Suction and Building Pressurization: Experiences from Swedish Full-Scale Experimental Studies, 2019
- [9] Swedish National Board of Housing, Building and Planning: Radon in Existing Buildings: Guidance for Planning and Implementation, 2015
- [10] Skrkal, J., & Rovenská, K.: Radon in the Environment and Radon Measurement, 2018
- [11] Czech Technical University in Prague. (2017). Guidelines for Radon Mitigation in Buildings
- [12] Statistisches Bundesamt Destatis: Pressemitteilung Nr. 074, 29.04.2024
- [13] Statistisches Bundesamt Destatis: Pressemitteilung Nr. N010, 07.03.2024
- [14] DENA Gebäudereport, 2024 sowie Statistisches Bundesamt Destatis 2023b



Die Radon-Echtzeitmessung als Instrument zur Radon-diagnostik und zur Steuerung des Sanierungsprozesses

Martin Waltl¹⁾

¹⁾RadonTec GmbH

1 Einleitung

Radon stellt in Innenräumen ein ernsthaftes Gesundheitsrisiko dar, insbesondere in Bezug auf das Lungenkrebsrisiko für Arbeitnehmer und Nutzer. Aus diesem Grund hat der Gesetzgeber einen Referenzwert von 300 Bq/m^3 im Jahresmittel festgelegt, der sowohl für Aufenthaltsräume (nach § 124 StrlSchG) als auch für Arbeitsplätze (nach § 126 StrlSchG) gilt.

Die Erstmessung erfolgt aus Kostengründen in der Regel mit passiven Exposimetern. Diese werden nach 365 Tagen im Labor ausgewertet, um die mittlere Radonkonzentration zu bestimmen. Liegt dieser unter 300 Bq/m^3 , sind keine weiteren Maßnahmen erforderlich. Bei einer Überschreitung müssen jedoch Maßnahmen ergriffen werden, um die Radonkonzentration dauerhaft zu senken. Das Gesetz definiert jedoch nicht genau, welche Maßnahmen erforderlich sind.

Die häufigste Sofortmaßnahme bei leichten und mittleren Überschreitungen ist eine aktive und regelmäßige Stoßlüftung, die oft in einer Arbeitsanweisung festgelegt wird. Nach Festlegung und Umsetzung der Maßnahmen erfolgt eine erneute Kontrollmessung über 365 Tage mit passiven Exposimetern.

Bei einigen Kunden wurden dann erneut Überschreitungen von 300 Bq/m^3 festgestellt. Auffällig war, dass die Kontrollmessung im Vergleich zur Erstmessung kaum eine Verbesserung zeigte.

2 Untersuchung:

Unsere Untersuchung hat gezeigt, dass die meisten Unternehmen sowohl die Erstmessung als auch die Festlegung der Maßnahmen und

die Kontrollmessung meist in Eigenregie durchführen, ohne einen Radonspezialisten hinzuzuziehen.

Erst wenn die Kontrollmessung erneut eine Überschreitung des Referenzwertes ergibt, wenden sich die betroffenen Betriebe an Radonfachpersonen, um entsprechende Unterstützung zu erhalten.

In der Folge wurde eine Analyse der durchgeführten Maßnahmen vorgenommen, wobei folgende Punkte berücksichtigt wurden:

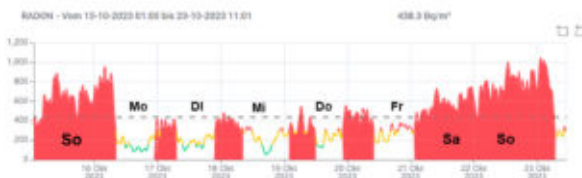
1. Die in der Arbeitsanweisung festgelegte Anzahl und Dauer der Stoßlüftungen reicht nicht aus, um die Radonkonzentration zu senken.
2. Das Lüftungskonzept an sich ist ausreichend, um die Radonkonzentration zu senken, wird aber vom Personal nicht korrekt ausgeführt.
3. Das definierte Lüftungskonzept, das während der Arbeitszeit und damit auch während der Anwesenheit der Beschäftigten durchgeführt werden muss, hat trotz korrekter Durchführung keinen signifikanten Einfluss auf die Reduktion der mittleren Radonkonzentration.

3 Analyse

Die passive Messung zeigt zwar, dass am Arbeitsplatz erhöhte Radonwerte auftreten, es bleibt aber unklar, wie stark die Schwankungen sind und wann es zu hohen Spitzwerten kommt. Diese wichtigen Informationen können passive Exposimeter nicht darstellen.

Wird die Radonkonzentration dagegen mit zeitaufgelösten Radonmessgeräten bestimmt, erhält man wesentlich detailliertere Informationen.

Radonmessung in Echtzeit mit LivAir



Dies ist ein Beispiel einer zeitaufgelösten Radonmessung in einem Büro im Oktober 2023, bei der parallel eine Messung mit einem passiven Exposimeter durchgeführt wurde. (438 Bq/m³ im Mittel).

Wie die Grafik zeigt, unterliegt die Radonkonzentration starken Schwankungen. Bei genauerer Betrachtung wird klar, dass an Werktagen von Montag bis Freitag von 8 bis 17 Uhr die Radonkonzentration deutlich unter dem Referenzwert von 300 Bq/m³ liegt. Nachts und vor allem am Wochenende, wenn sich keine Personen im Gebäude aufhalten und somit nicht gelüftet wird, steigen die Radonkonzentrationen massiv an und überschreiten teilweise sogar 1.000 Bq/m³.

In den untersuchten Fällen reichte also das normale & natürliche Lüftungsverhalten der Beschäftigten in der Regel aus, um die Radonkonzentration während der Anwesenheit so weit abzusenken, dass keine bedenklichen Radonkonzentrationen mehr auftraten.

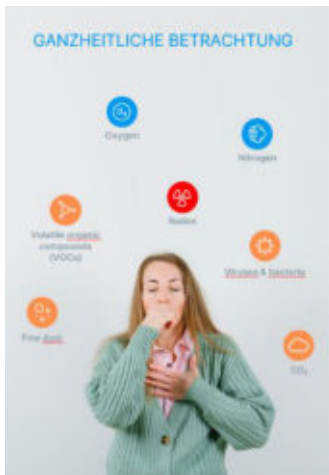
Da Radon nicht gerochen, geschmeckt oder gefühlt werden kann, hat das Personal nur durch eine aktive Messung die Möglichkeit, die aktuelle Radonkonzentration zu erkennen und gegebenenfalls das Lüftungsverhalten weiter anzupassen.

Eine weitere Erhöhung der Luftwechselrate führt zwar zu einer weiteren Senkung der Radonkonzentration, was für die Mitarbeiter positiv ist, hat aber nur noch einen geringen Einfluss auf die langfristige mittlere Radonkonzentration.

Dies liegt daran, dass vor allem nachts, an Wochenenden oder im Urlaub eine starke Radonanreicherung stattfindet, die hauptsächlich für die hohe mittlere Radonkonzentration verantwortlich ist.

Durch Home-Office, Urlaub, Krankheit und Dienstreisen sind wir nicht mehr ständig am Arbeitsplatz.

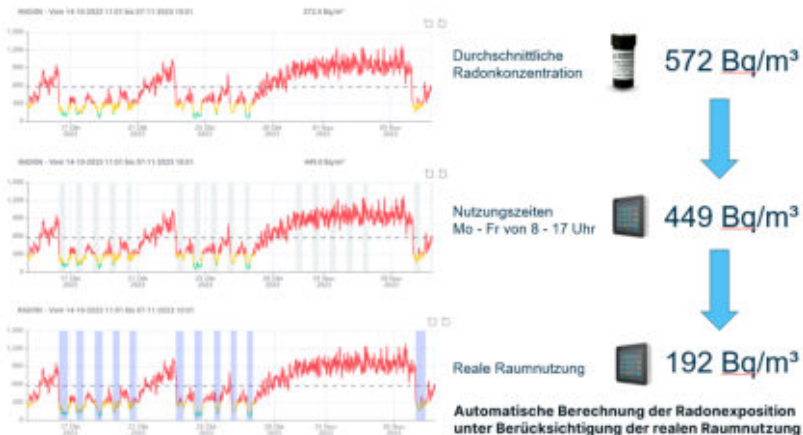
Wenn wir bei der Echtzeitmessung nicht nur Radon messen, sondern auch andere Raumluftparameter wie Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, TVOC und Staub berücksichtigen, können aus diesen zusätzlichen Raumluftparametern weitere wichtige Rückschlüsse gezogen werden, wie z.B. das Lüftungsverhalten oder auch die reale Raumnutzung.



Das folgende Beispiel zeigt einen Büroraum über 3 Wochen, in dem neben Radon auch weitere Raumluftparameter ermittelt wurden.

Deutlich zu erkennen sind die Arbeitstage, die beiden Wochenenden und auch die Woche, in der das Büro geschlossen war (Mitarbeiter im Urlaub).

Nutzungszeiten & reale Raumnutzung



- Die 3-wöchige Messung mit dem passiven Exposimeter zeigt eine durchschnittliche Radonkonzentration von 572 Bq/m³

- Wenn anstatt der kompletten Zeit, die normale Arbeitszeit herangezogen wird, also von Montag bis Freitag jeweils 8 Stunden, reduziert sich die Radonkonzentration in diesem Zeitraum bereits auf 449 Bq/m³. Jedoch wurde hier auch die Urlaubswoche mit einbezogen.
- Die dritte Grafik zeigt eine Echtzeitmessung mit Erkennung der realen Raumnutzung. Hier werden nur die Radonkonzentrationen berücksichtigt, während die Räume tatsächlich von Mitarbeitern benutzt wurden. Hier sieht man mit 192 Bq/m³ eine deutlich geringere Belastung als durch das passive Exposimeter (572 Bq/m³) angenommen.

4 Ergebnis

Arbeitsplätze, die nach der passiven Erstmessung eine Überschreitung des Referenzwertes aufweisen, sollten nach unseren Erfahrungen dringend mit einer zeitaufgelösten Radonmessung (über einen längeren Zeitraum) gemessen werden. Im Idealfall sollten bereits bei der Erstmessung digitale Geräte „mitlaufen“.

Mit den Erkenntnissen aus der zeitaufgelösten Messung können die richtigen Maßnahmen definiert und somit unnötige Sanierungskosten vermieden werden.



Werden neben der Radonkonzentration auch andere Raumluftparameter (CO₂, Temperatur, Feuchte, TVOC, etc.) parallel mitgemessen, können aus diesen Daten weitere wertvolle Rückschlüsse, wie z.B. die reale Raumnutzung gewonnen werden.

Mit diesen zusätzlichen Daten konnten in den meisten Objekten nachgewiesen werden, dass während der Anwesenheit der Mitarbeiter es zu keiner Überschreitung des Referenzwertes gekommen ist.

5 Fazit

Dank der digitalen Echtzeit-Sensorik können die Radonkonzentrationen exakt ermittelt werden, passende Maßnahmen definiert und deren Wirksamkeit kontrolliert und somit auch langfristig sichergestellt werden. Wird neben den Radonkonzentrationen auch die reale Raumnutzung berücksichtigt, kann dies einen signifikanten Einfluss auf die gesamte Bewertung der Radonsituation haben.



Radonbelastung/Radonsanierung am Beispiel eines Betriebsgebäudes der kommunalen Wasserversorgung sowie eines Industriebetriebes im Hochschwarzwald

Marc Ellinger¹⁾

¹⁾ Radon-Informationszentrum, Bernau

Zusammenfassung

Seit Ausweisung der Radonvorsorgegebiete in Baden-Württemberg mit der Allgemeinverfügung vom 15.06.2021 sind Arbeitgeber in den ausgewiesenen Gebieten zur Messung der Radonexposition an Arbeitsplätzen in Innenräumen verpflichtet. Mittlerweile fragt das Regierungspräsidium Freiburg die Ergebnisse der Messungen bei den Unternehmen ab. In der Folge sind die Anfragen nach Beratung und Bewertung der Ergebnisse, so sie denn bereits vorliegen, deutlich gestiegen.

Obwohl in der Strahlenschutzverordnung [1] schon seit 2001 gesetzliche Regelungen zum Schutz vor Radon unter anderem in Anlagen der Wassergewinnung, Aufbereitung und -verteilung verankert sind (sh. [1] §§ 93-95), kommen erst jetzt, vermutlich infolge der Abfrage bei den kommunalen Arbeitgebern, entsprechende Nachfragen.

1 Allgemeines

Das in den oberen Bereichen der Erdkruste aus den Gesteinsformationen in Kluftbereichen des Kompaktgesteins, in Bruchzonen, Erosionshorizonten sowie Kiesen und Sanden emanierende Radon macht sich auf die Reise zum Licht.

Der Weg nach oben kreuzt dabei auch wasserführende Schichten, die als Entnahmeschicht der kommunalen Wasserversorgung dienen. Das aufsteigende Radon wird dabei vom Wasser auf und in der Grundwasserströmung mitgenommen.

Das mit Radon angereicherte Rohwasser gelangt über die eigentlichen Wassergewinnungsanlagen, den Quellerschließungen, oder Tiefbrunnen in die Anlagen der Wasserversorgungsbetriebe. Dort kommt es im Zuge der Aufbereitungsprozesse, aufgrund derer Radon freigesetzt wird, zu einer Abminderung der Radonbelastung im Trinkwasser in der Größenordnung von ca. 33 %. Laut EU-Radonempfehlung vom Dezember 2001 [2] werden 100 bis maximal 1000 Bq/l empfohlen, wobei oberhalb von 100 Bq/l ein Referenzwert festzulegen ist. Bei einer Radonbelastung größer 1.000 Bq/l werden seitens der EU-Kommission aus Strahlenschutzgründen Gegenmaßnahmen als gerechtfertigt angesehen.

Der Radoneintrag in die Anlagen der Trinkwassergewinnung erfolgt über die im Zuge der Aufbereitungsprozesse erfolgende Freisetzung von Radon aus dem Rohwasser. Je nach Radonbelastung des Rohwassers kommt es dabei zu einer hohen Radonexposition in den betroffenen Anlagenbestandteilen.

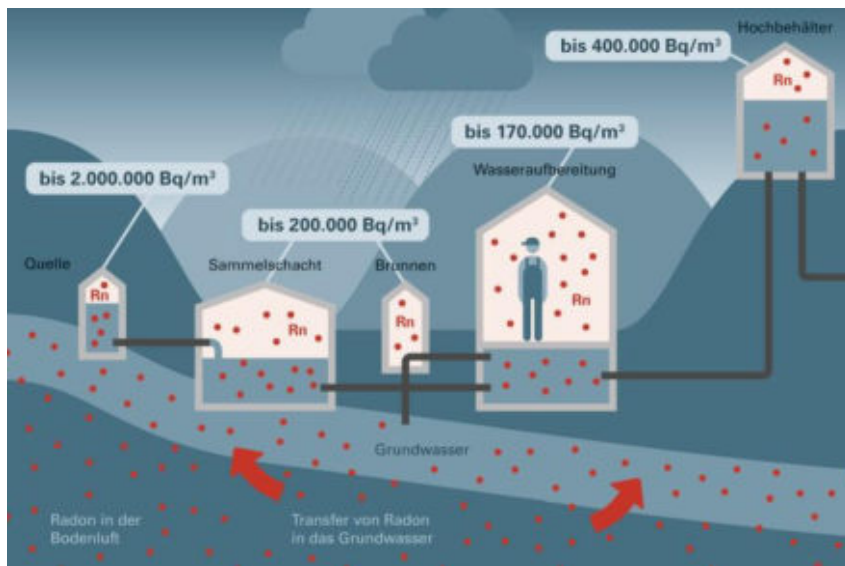


Abbildung 1: Radonbelastung in Anlagen der Trinkwasserversorgung Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt

Das Bundesamt für Strahlenschutz (Bfs) hat im Dezember 2009 eine Studie zur Strahlenexposition im Trinkwasser der Bundesrepublik Deutschland [3] durch natürliche Radionuklide veröffentlicht. Die Messung der Radonbelastung erfolgte dabei für das Rohwasser in den Wasserwerken und für das Trinkwasser an den Entnahmestellen bei den Endverbrauchern.

Bundesland	Bq/l		
	Radon-222		
	Min	Max	Med
Baden-Württemberg	<1,3	410	15
Bayern	<1,5	1500	16
Berlin	1,8	7,1	5,0
Brandenburg	1,9	7,4	4,2
Bremen	3,1	5,4	4,2
Hamburg	4,8	7,7	5,2
Hessen	4,5	330	26
Mecklenburg-Vorpommern	2,3	24	5,1
Niedersachsen	<1,4	55	8,2
Nordrhein-Westfalen	1,4	62	6,8
Rheinland-Pfalz	<2,0	410	31
Saarland	13	44	19
Sachsen	1,5	790	63
Sachsen-Anhalt	<1,5	52	9,6
Schleswig-Holstein	1,5	10	5,1
Thüringen	<1,5	160	26
Deutschland	<1,3	1500	14

Herkunft des Wassers	Probenzahl	Bq/l	
		Radon-222	
		Med	Max
Herkunft des Wassers			
Grundwasser	355	15	570
Oberflächenwasser	57	4,1	62
Stollenwasser	20	21	380
Keine Angaben	133	22	1500
Art des Gesteins			
Basalt	12	25	180
Gneis	5	6,5	190
Granit	15	20	540
Kalkstein	28	14	83
Sand	167	7,4	82
Schiefer	17	6,2	120
Sandstein	117	24	330
Sonstiges Gestein	204	22	1500
Alle Wasser	565	14	1500

Abbildung 2: Radonbelastung im Rohwasser nach Bundesland (Tab.links), sowie nach Gesteinsart im Bereich der Grundwasserleiter (Tab.rechts), Quelle: [3]

1.1 Radonbelastung im Betriebsgebäude einer kommunalen Wasserversorgung

Aufgrund der Auswertung der dort im Betriebsgebäude aufgestellten Exosimeter – Aufstellzeit Januar 2022 bis Januar 2023 - wurde ich mit nutzungsbegleitenden Messungen und der Lokalisierung der gebäudeinternen Quellen beauftragt. Die Auswertungsmessungen hatten eine gegenüber dem Referenzwert von 300 Bq/m³ deutlich erhöhte

Radonexposition in der Halle und den anliegenden Arbeits- und Aufenthaltsräumen ergeben.(Angabe der Auswertestelle: „Überexponiert > 563 Bq/m³“). Die Auswertung der zweiten, auf 2 Monate befristeten Messkampagne ergab Werte über 660 Bq/m³.

Der Radongehalt des Rohwassers liegt im Mittel bei 10 Bq/l.

Beim Ortstermin und der ersten Orientierung zur Gebäudestruktur und den Anlagenbestandteilen ergaben sich einige auffällige Sachverhalte.

1. Die Aufenthalts- und Betriebsräume waren bezogen auf die Hauptwindrichtung (Süd/Südwest) auf der Leeseite des Gebäudes angeordnet. Bei der üblichen Fensterlüftung durch Öffnen/Kippen der Fenster wird die Luft aufgrund des Unterdrucks der auf der Leeseite bei Windeinwirkung entsteht - durch die nicht dicht schließenden oder geöffneten Fenster aus den Räumen abgesaugt und strömt über die Türspalte bzw. die geöffneten Türen aus dem Hallenbereich nach. Der Druckausgleich des Luftvolumens der Halle erfolgt über Nachströmen über geöffnete Hallentore respektive Außentüren sowie über Fehlstellen in der Gebäudehülle.



Abbildung 3: Blick aus der Halle Richtung Büro, Aufenthalts- und Betriebsräume im 1. OG – Die Räume stehen im direkten Raumluftverbund mit der Halle.

In der Halle wurde zum Termin trotz bestehender Querlüftung über das geöffnete Hallentor, die Zugangstür, sowie Fenster in den Aufenthaltsräumen eine Radonaktivitätskonzentration von 570 Bq/m^3 gemessen.

2. Die beiden Sandfilter, die Beruhigungsschleife und die beiden Wasserkammern - letztere über einen passiven im Pendelbetrieb betriebenen Filter - entlüften ins Halleninnere. Am offenen Auslass der am Entlüftungsventil angeschlossenen Kondensatleitung der Sandfilter wurden mittels Sniffermessung der Radoneintritt in das Luftvolumen der Halle mit bis 20.000 Bq/m^3 gemessen.



Abbildung 4: Messung an der Abluft-/Kondensatwasserleitung der Sandfilterentlüftung Messwerte bis 20.000 Bq/m³

3. In die beiden Wasserkammern besteht Einblickmöglichkeit über jeweils ein nicht dicht schließendes Aluminiumfenster. Daher ist zum Ortstermin von einem, wenn auch möglicherweise geringfügigen Übertritt der radonbelasteten Wasserkammerluft um 4.000 Bq/m³ - in die Halle auszugehen. Bei zu Kontrollzwecken geöffneten Fenstern ist ein wesentlich erhöhter Radoneintrag als gesichert anzunehmen.
4. Die beiden Wasserkammern werden über einen gemeinsamen im passiven Pendelbetrieb arbeitenden Luftfilter in die Halle be- und entlüftet. Der Filter stellt den Druckausgleich in den Kammern sicher; ist die Einspeisung größer als die Entnahme strömt Luft aus der Wasserkammer in die Halle, bei größeren Entnahmen strömt Luft aus der Halle in die Wasserkammern. Die stichprobenartige Messung vor dem Filter ergab Messwerte von 2.250 Bq/m³, wobei sich nicht feststellen ließ, in welchem Betriebszustand der Filter in diesem Moment war.



Abbildung 5: Aluminiumfenster einer Wasserkammer, Sniffing durch den fensterspalt

5. Neben den unterschrittenen Türen der Aufenthalts- und Arbeitsräume zeigten sich bei näherer Inaugenscheinnahme offene Deckendurchbrüche vom direkt unter dem Büro liegenden elektrischen Betriebsraum (Traforaum) ins darüberliegende Büro. Über diese deckendurchbrüche tritt Hallenluft ins Büro ein, das konnte mit einem Provokationstest mit maschinell erzeugtem Unterdruck im Büro nachgewiesen werden.



Abbildung 6: Be- und Entlüftung der Wasserkammern über einen gemeinsamen Filter (Ellipse) aus bzw. in die Halle, mit Froschklappe (Pfeil) zur Notentlüftung

1.2 Sanierungskonzeption

Mit dem Betriebsverantwortlichen wurde der Vorschlag eines mehrstufigen Sanierungskonzepts diskutiert.

- Step 1*: Alle Armaturen/Betriebseinrichtungen, die Radon in das Luftvolumen der Halle eintragen, werden unter Berücksichtigung der für die Trinkwassererzeugung geltenden Hygienevorgaben über die im Lee der Hauptwindrichtung liegenden Ostwand ins Freie entlüftet. Danach wird zur Wirksamkeitskontrolle die dann noch vorhandene Radonbelastung - ggf. kurzzeitig über zwei bis drei Monate gemessen.

*Anmerkung: Aufgrund von Lieferverzögerungen der erforderlichen Komponenten konnte dieser Schritt noch nicht abgeschlossen werden

- Step 2: Alle Werkstätten, Arbeits- und Aufenthaltsräume erhalten rauchdicht schließende Türen mit Obentürschließer. Alternativ kann eine, den Luftverbund zur Halle unterbrechende Abtren-

nung des oberen Erschließungsflures erfolgen. Gleichzeitig werden die bestehenden Deckendurchbrüche zwischen dem elektrischen Betriebsraum und dem Büro dicht verschlossen.

- Step 3: Die Wasserkammerfenster werden im Hinblick auf Dichtigkeit ertüchtigt, ggf. mit einem auf der Hallenseite vorgesetzten und konvektionsdicht eingebauten Fenster. Der so entstehende Fensterkasten wird nach außen entlüftet.
- Step 4: Das in Halle befindliche offene Wasserlabor und der darunterliegende Pumpensumpf werden eingehaust und ebenfalls aktiv nach außen entlüftet.

Gleichzeitig ist ein Konzept zum Schutz der Mitarbeiter sowie der Beschäftigten anderer Unternehmer bei umfangreichen Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten vor überhöhten Belastungen auszuarbeiten.

2 Radonbelastung in einem Industriebetrieb

Der im Hochschwarzwald ansässige Betrieb liegt in einem der seit 2021 ausgewiesenen Radonvorsorgegebiete. Sowohl in den Werkhallen als auch in den Büroräumen dieses Betriebes wurden bei der Erstmessung mehrfach überhöhte Belastungen – auch hier teilweise mit der Angabe „Überexponiert“ auf der Auswertung angegeben.

Nach telefonischer Rücksprache mit dem Strahlenschutzbeauftragten und dem Betriebsleiter wurde ich mit der Lokalisierung der Radoneintrittsstellen, der Erarbeitung der Grundlagen für ein Sanierungskonzept in Abstimmung mit den Klima- und Lüftungstechnikern des Unternehmens sowie der messtechnischen Begleitung der Sanierungsmaßnahmen beauftragt.

2.1 Die Suche nach den Radonquellen

Das Unternehmen weist eine Besonderheit auf, die in dieser Form nur selten zum Tragen kommt. Unter den Bodenplatten der Werkhallen wurde im Zuge der Erdarbeiten ein Unterflur (unterhalb der Bodenplatten der Werkhallen) liegendes Infrastrukturnetz ausgeführt. Dieses Infrastrukturnetz, das eine flexible Anbindung und Versorgung der einzelnen Arbeitsplätze mit Energie, Druckluft und Datenleitungen ermöglicht, besteht aus vorgefertigten Stahlbetonbodentanks,

die miteinander durch längs- und in den Stützenachsen querverlegte KG-Rohrleitungen verbunden sind.



Abbildung 7: Unterflur angeordnetes Infrastrukturnetz aus Bodentanks mit verbindenden Rohrleitungen

Im Zuge des ersten Ortstermins wurde durch Sniffing Messungen in den zugänglichen Bereichen des Infrastrukturnetzes – den Bodentanks stark erhöhte Radonwerte von über 16.800 Bq/m^3 festgestellt. Dabei konnte die eigentliche Haupteintrittsstelle aufgrund des Luftverbundes zwischen den Tanks nicht lokalisiert werden.

Um dahingehend gesichertere Erkenntnisse zu erlangen, wurden die Konstruktionspläne eingesehen.

Grundsätzlich weist dieses Unterflur installierte Infrastrukturnetz zwei Arten von Bodentanks auf.

1. Bodentanks als Stahlbetonfertigteile

Diese Fertigteile haben unterschiedlichen Größen und verfügen über eine unterschiedliche Anzahl von Rohrleitungseinführungen (siehe Abb. 8). Die Oberkante der Wandungen dieser Fertigteile schließt unmittelbar an die Unterseite der Bodenplatte an, sodass die Bodenplatte quasi auf diesen Fertigteilen liegt.

2. Bodentanks aus verzinktem Stahlblech an den Haupttragstützen



Abbildung 8: Bodentank als Stahlbetonfertigteile mit Ringraumdichtungen zur Rohreinführung



Abbildung 9: Bodentank aus Stahlblech im Bereich der Haupttragstützen

An den stählernen Haupttragstützen sind dreiseitig geschlossenen Stahlblechtanks mit Stahlblechboden (siehe Abb. 9) - angeordnet, die mit den Stützen durch Schweißnähte verbunden sind. Die Fugen zwischen Tankwandung und den durch die Wandungen eingeführten Rohrleitungen sind lediglich mit Dichtstoff fugen verschlossen.

Die Durchsicht der sehr umfangreichen und aussagekräftigen Fotodokumentation der Bauphase brachte die nachfolgend aufgeführten Erkenntnisse

Nachdem das Infrastrukturnetz erstellt war, wurde die Schottertragschicht unter der Bodenplatte eingebaut und planiert. Die Stahlbetonbodentanks erhielten oberseitig eine auf Höhe Oberkante Bodenplatte nivellierte, verzinkte Stahlzarge aufgesetzt. Danach wurde die Bodenplatte bewehrt und in mehreren Abschnitten betoniert.

Zwischen der Oberkante der Wänden der Stahlbetonfertigteile und der Unterkante Bodenplatte besteht weder ein kraftschlüssiger noch ein als dicht im Sinne der DIN 18533 zu bezeichnender Verbund. Die prinzipielle Konstruktion ergibt sich aus Abbildung 10.

Durch ein testweise durchgeführtes, umlaufendes Abkleben des Fugenspaltes zwischen der Stahlzarge und dem Stahlbetonfertigteile mit Luftdichtheitsklebeband (sh. Abb. 11) konnte in einem isoliert angeordneten Bodentank, der dafür vom Luftverbund zum Infrastrukturnetze abgekoppelt wurde, eine signifikante Reduzierung der Radonbelastung erreicht werden.

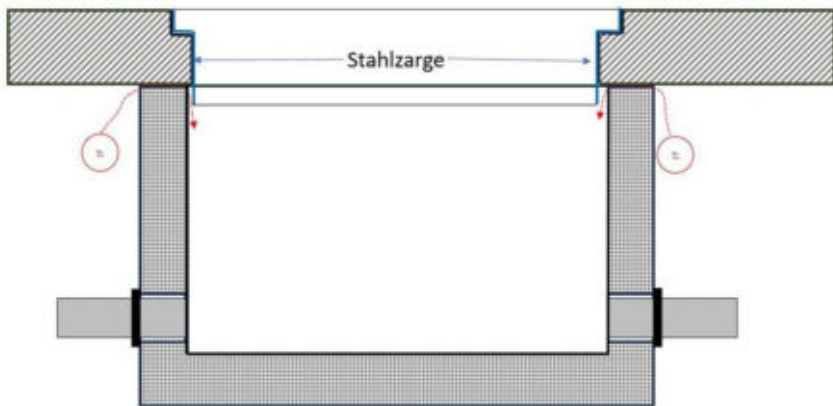


Abbildung 10: Prinzipskizze Bodentank mit der aufliegenden Bodenplatte und den rot skizzierten Radoneintrittswegen



Abbildung 11: Testweise abgeklebte Trennfuge zwischen Stahlzarge und dem Bodentank. Eingefügt ist das Messergebnis nach Einführen des Messschlauchs durch Penetration der Abklebung

Die Messung im abgeklebten Spalt ergab sehr hohen Zerfallszahlen. Im vorliegenden Fall waren es unmittelbar nach dem Einführen des Messschlauchs 123 kBq/m^3 mit einem Abfall auf 80.000 Bq/m^3 .

Als weitere potenzielle Radoneintrittsstellen wurden die Fugen zwischen den Bodenplatten und den sie begrenzenden und durchdringen Bauteilen, wie Hallenwände und Stützen der Dachkonstruktion erkannt. Die Bodenplatte war nach der Erstellung des Dachtragwerks und der Hallenwände betoniert worden und stößt mit Trennfugenausbildung und oberseitiger plastischer Verfugung an diese Bauteile an.

Die Bodenplatte weist, bedingt durch die sich durch die durchbindenden Bauteile ergebenden Zwängungen bereichsweise erhebliche Rissbildungen auf. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass über diese Risse ebenfalls ein nicht unerheblicher Radoneintrag in die Werkhallen erfolgt.



Abbildung 12: Messung der Radonbelastung im aufgeschnittenen Fugenspalt an einer Stahlstütze des Hallentragwerks. Es wurden 23.000 Bq/m³ gemessen. In der Ellipse ein Riss in der Bodenplatte

Im Bürotrakt des Gebäudekomplexes konnten an den erdberührten Bauteilen keine nennenswerten Eintritte festgestellt werden. Die Einsichtnahme in die Konstruktionspläne ergab ebenfalls keine Hinweise auf mögliche Eintrittsstellen. Es ist davon auszugehen, dass die dort festgestellte überhöhte Radonbelastung auf Einträge aus der angrenzenden Werkhalle über die in Leichtbauweise erstellten Trennwand- und Deckenkonstruktion zurückzuführen ist.

2.2 Sanierungskonzepte

Aktuell testet man werkseitig eine Anpassung des Lüftungsregimes, das im Vergleich zum Status quo ante verlängerte Laufzeiten der Lüftung vorsieht. Die Lüftung vor Arbeitsbeginn setzt früher ein und wird später als bisher heruntergeregelt. Diese Maßnahme hat bereits dazu geführt, dass die Radonbelastung in der Kernarbeitszeit unter den Referenzwert sinkt. Wird die Lüftungsanlage heruntergeregelt - dies geschieht aktuell an den Abenden bis in die frühen Morgenstunden und an den Wochenenden - steigt die Radonbelastung sprunghaft an. Diese Anstiege führen auch zu einem erheblichen Eintrag der Folgeprodukte, die über einen Zeitraum von ca. 23 Jahren weiter zerfallen

und sich gesundheitsschädigend auswirken können. Diesen Anstiegen versucht man durch Abkleben der Trennfugen zwischen Stahlzargen und Bodentanks in der gezeigten Art und Weise, entgegenzuwirken. Damit, so die Erwartung soll der Radoneintrag über die Fugen zwischen Bodentanks und Bodenplatte möglichst unterbunden werden

Meine Hinweise auf mögliche weitere Radoneintritte über Bodenschlussfugen und Risse in den Bodenplatten wurden zur Kenntnis genommen.

Sollten die oben genannten Ansätze nicht den gewünschten Erfolg in der erhofften Kontinuität zeitigen – wird als weitere Möglichkeit zur Sanierung die Errichtung einer, oder auch mehrerer Anlagen zur Radonabsaugung durch die Bodenplatte in Erwägung gezogen.

3 Fazit

Nach derzeitiger Rechts- und Verordnungslage besteht die Pflicht zur Messung der Radonbelastung an Arbeitsplätzen und in Aufenthaltsräumen, sowie im Falle einer ermittelten überhöhten Exposition die verbindliche Umsetzung von Schutzmaßnahmen nur für Unternehmen, deren Betriebsstätten in den derzeit aktuell ausgewiesenen Radonvorsorgegebieten liegen. Das Schutzerfordernis gilt allerdings auch für Unternehmen außerhalb der Radonvorsorgegebiete, sofern dort Messungen erfolgten, die im Ergebnis eine Belastung ergeben, die im Jahresmittel über dem Referenzwert von 300 Bq/m^3 liegen. Die arbeitsplatzrelevante Gesundheitsgefährdung für Menschen geht aber nicht von einer Gebietsausweisung als Radonvorsorgegebiet oder von der Messung aus, sondern von der tatsächlich bestehenden Radonbelastung am Arbeitsplatz.

Abdichtungstechnische, bauliche und/oder Lüftungstechnische Maßnahmen, die geeignet sind den Radoneintrag bei bestehenden Gebäuden zu reduzieren oder möglicherweise ganz zu unterbinden sind bekannt. Sie werden u.a. im WTA Merkblatt Radon im Gebäudebestand [7] (im Erscheinen) beschrieben. Während taugliche Lösungsansätze in manchen Fällen vergleichsweise trivial und kostengünstig umsetzbar sind, erfordern andere Fälle einen vergleichsweise hohen

baulich-technischen Aufwand und entsprechend hohe Investitionskosten.

4 Literaturverzeichnis

- [1] Verordnung zum Schutz vor der schädigenden Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) Ausfertigungsdatum 20. Juli 2001
- [2] Empfehlung der Kommission vom 20. Dezember 2001 über den Schutz der Öffentlichkeit vor der Exposition gegenüber Radon im Trinkwasser (Bekannt gegeben unter Aktenzeichen K(2001) 4580) , veröffentlicht im *Amtsblatt Nr. L 344 vom 28/12/2001 S. 85 – 88*
- [3] Bundesamt für Strahlenschutz, BfS-SW06/09 Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide im Trinkwasser in der Bundesrepublik Deutschland, 12/2009 <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-20100319945>
- [4] DGUV Information 203-094 radon Eine Handlungshilfe zur Expositionsmessung, zur Interpretation von Messergebnissen und zu Strahlenschutzmaßnahmen
- [5] DVGW W253-2(M) Dezember 2022 Technischer Hinweis Merkblatt Radioaktivität in der Wasserwirtschaft – Strahlenschutz für Beschäftigte bezüglich Radon
- [6] Allgemeinverfügung des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg zur Festlegung von Gebieten nach §121 Strahlenschutzgesetz in Baden-Württemberg (Radonvorsorgegebiete)
- [7] WTA-Merkblatt 6-22 Radon im Gebäudebestand – im Erscheinen Herausgeber: Wissenschaftlich Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.

Möglichkeiten und Grenzen der Radonsanierung mittels dezentraler Lüftungssysteme im Bestand

Hannes Grünewald¹⁾, Diana Altendorf²⁾, Florian Berger²⁾, Jörg Dehnert³⁾, Thomas Hartmann⁴⁾, Michal Duzynski⁵⁾, Louis Weber⁶⁾, Ralf Trabitzzsch²⁾, Torsten Schindler¹⁾, Ralph Geisenhainer¹⁾, Mandy Alisch-Mark⁷⁾, Holger Weiß²⁾

¹⁾ inVENTer GmbH, Löberschütz

²⁾ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ, Leipzig

³⁾ Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Dresden

⁴⁾ ITG Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden - Forschung und Anwendung GmbH, Dresden

⁵⁾ SARAD GmbH, Dresden

⁶⁾ Bergsicherung Schneeberg GmbH & Co. KG, Schneeberg

⁷⁾ Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL), Chemnitz

Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden Ergebnisse aus dem Feldversuch des Projektes RadonVENT vorgestellt und auf Basis der aktuellen Normen bewertet. Das Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer automatisierten Lüftung zum Radonschutz, welche den Strahlenschutz und energetische Aspekte berücksichtigt. Dazu wurde ein dezentrales, alternierendes Lüftungssystem mit Radonsensoren erweitert und in umfangreichen Untersuchungen die etablierten und neuartigen Betriebsmodi getestet. Die Messergebnisse bestätigen, dass dieses spezifische Lüftungssystem eine deutliche Reduzierung der Radon-222-Aktivitätskonzentration im Innenraum bis unterhalb des Referenzwertes erreichen kann. Der Effekt der Maßnahme ist jedoch abhängig von lokalen und temporären Randbedingungen und weicht deshalb zum Teil von den normativen Bewertungen ab.

Possibilities and Constraints for Radon Remediation using Decentralized Ventilation Systems

Summary

This paper presents the first results of the field test performed within the Project RadonVENT and evaluate them based on current German standards. The goal of the project is the development of an intelligent ventilation system for radon remediation, respecting radiation protection and energetic aspects. To meet that target a decentralized, alternating ventilation system was further equipped with radon sensors. Using this system with established and newly developed operational modes, a significant reduction of the indoor radon-222-activity concentration can be achieved. Though, the actual effect of the ventilation system depends on local and temporary boundary conditions and therefore results in different evaluations than assumed by the standard.

1 Einleitung

Im Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) [1] vom 27. Juni 2017 ist die Pflicht zur Messung der Radon-222-Aktivitätskonzentration für Arbeitsplätze im Erd- und Kellergeschoss von Gebäuden in Radonvorsorgegebieten verankert. Darüber hinaus ist die Messung in Räumen in höheren Etagen und für private Haushalte innerhalb und außerhalb der Vorsorgegebiete freiwillig. Allerdings kann nur durch eine Messung die individuelle Radonbelastung in den genutzten Aufenthaltsräumen zuverlässig bestimmt werden [2]. Das wiederum resultierende Lungenkrebsrisiko durch das Einatmen von Radon-222 und dessen Tochterprodukten ist abhängig von der Höhe und Dauer der Exposition [3]. Im StrlSchG [1] wird deshalb ein Referenzwert von $C_{Rn} = 300 \text{ Bq/m}^3$ für die über ein Jahr gemittelte Radon-222-Aktivitätskonzentration für Aufenthaltsräume und Arbeitsplätze in Innenräumen definiert.

Wird eine Radonsanierung angestrebt, stehen verschiedene bauliche und Lüftungstechnische Maßnahmen zur Verfügung [4]. Die spezifischen Randbedingungen von Bestandsgebäuden erfordern dabei

häufig eine individuelle Auswahl und Planung [2]. Eine einfache und schnelle Lösung bietet die Modernisierung bestehender oder das Nachrüsten von neuen mechanischen Raumlüftungssystemen. Diese zentralen oder dezentralen Systeme stellen einen nutzerunabhängigen Luftwechsel sicher. Der Einsatz von dezentralen Lüftungssystemen bietet darüber hinaus zwei weitere Vorteile. Zum einen können die Systeme sowohl für individuelle Räume als auch eine komplette Nutzungseinheit ausgelegt und eingesetzt werden. Zum anderen erfordert die nachträgliche Installation im Bestand lediglich einen geringen baulichen Aufwand.

Im Projekt RadonVENT wird der Einsatz eines dezentralen, alternierenden Lüftungssystems untersucht. In einem umfangreichen Feldversuch mit wechselnden Einstellungen und Randbedingungen wird analysiert, wie die Wirkung der Lüftung auf die Radon-222-Aktivitätskonzentration optimiert werden kann. Dazu werden die Messwerte der integrierten Radonsensoren sowie die Wärmerückgewinnung des Systems genutzt, um Aspekte des Strahlenschutzes und der Energieeffizienz zu berücksichtigen [5, 6].

2 Feldversuch

In diesem Kapitel wird die für den Feldversuch genutzte Wohnung sowie das Mess- und Lüftungssystem beschrieben. Auf dieser Basis und unter Anwendung der dargestellten Versuchsmethodik wurden die im Weiteren diskutierten Ergebnisse gewonnen [6].

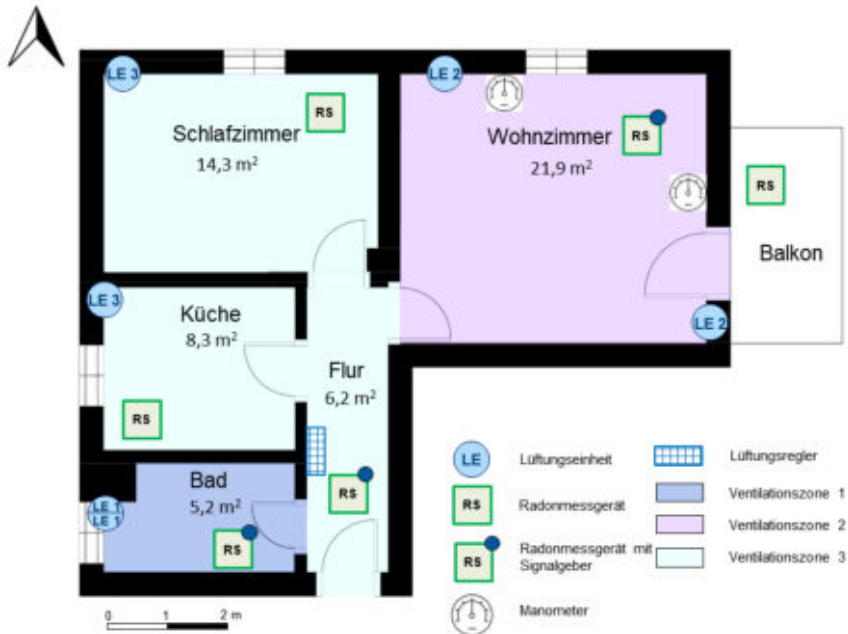


Abbildung 1: Grundriss der Versuchswohnung mit Positionen der Geräte und markierten Lüftungszone [6]

2.1 Versuchswohnung

Der Feldversuch findet in einer unbewohnten, unmöblierten jedoch beheizten Wohnung im Erdgeschoss eines zweistöckigen Mehrfamilienhauses statt. Der Wohnblock befindet sich am Fuß einer sanierten Halde in der Stadt Aue-Bad Schlema und somit in einem ausgewiesenen Radonvorsorgegebiet [7]. Der Grundriss der Wohnung ist in Abbildung 1 dargestellt und zeigt die Anordnung der vorhandenen Räume Bad, Küche, Schlafzimmer, Flur und Wohnzimmer. Unter letzterem befindet sich der Keller des Hauses, während der Fußboden der übrigen Räume erdberührt ist. Das Wohnzimmer verfügt außerdem über einen Balkon. Weitere Parameter der Versuchswohnung sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Parameter der Versuchswohnung

Raum	Grundfläche [m ²]	Raumvolumen [m ³]	Luftwechsel bei dp = 50 Pa [1/h]
Versuchswohnung komplett	55,9	130,7	3,3
Bad	5,2	12,2	9,5
Küche	8,3	19,4	3,5
Schlafzimmer	14,3	33,5	0,9
Flur	6,2	14,4	-
Wohnzimmer	21,9	51,2	2,1

2.2 Messsystem

Die Analyse der Versuche erfolgt auf Basis verschiedener Messwerte. Dazu wird in jedem Raum der Versuchswohnung sowie auf dem Balkon und im Kellerabteil unterhalb des Wohnzimmers die Radon-222-Aktivitätskonzentration und die Innenraumtemperatur mit Hilfe der Messgeräte Radon Scout Plus der SARAD GmbH erfasst und mit einem Intervall von einer Stunde aufgezeichnet. Weiterhin wird an den beiden Außenwänden des Wohnzimmers der Differenzdruck zwischen Innen- und Außenluft durch jeweils ein Universal-Klimamessgerät testo400 der Testo SE & Co. KGaA ermittelt und gespeichert. Auf dem Dach des Mehrfamilienhauses wurde die Wetterstation Vantage Pro2 der Firma Davis Instruments installiert. Damit wird unter anderem die Außenlufttemperatur, die Windgeschwindigkeit und -richtung sowie der barometrische Luftdruck gemessen. Die Platzierung aller Messmittel, mit Ausnahme der Wetterstation, ist ebenfalls in Abbildung 1 markiert.

2.3 Lüftungssystem

Das Lüftungssystem wurde mit Geräten der inVENTer GmbH aufgebaut. Im Bad, der Lüftungszone I, wurde das Einzelraumlüftungsgerät iV - Twin+ eingesetzt. Dieses kombiniert zwei Geräte in einer Wand einbauhülse und ist somit eine eigenständige Einheit. In der Lüftungszone II, dem Wohnzimmer, wurden zwei iV14 - Zero zu einer Einheit kombiniert. Eine baugleiche Einheit wurde im Raumverbund von

Schlafzimmer, Flur und Küche verwendet. Die Überströmung zwischen den drei Räumen dieser Lüftungszone III wurde durch Öffnungen in den Zimmertüren sichergestellt. Jede der Lüftungszone konnte durch die umlaufend abgedichteten Zimmertüren abgeschlossen und somit als lüftungstechnisch voneinander getrennt betrachtet werden. Die einzelnen Lüftungszone sind in Abbildung 1 farblich hervorgehoben und die Position der Lüftungsgeräte markiert. Die Einteilung der Wohnung in die Zonen erfolgte auf Basis der üblichen Einsatzmöglichkeiten der dezentralen, alternierenden Geräte. Die Aufteilung berücksichtigt keine Ablufträume nach DIN 1946-6 [8] mit den entsprechenden Anforderungen, zum Beispiel an den Abluftvolumenstrom oder die Luftführung im Raumverbund. Die Steuerung der Einheiten erfolgte über einen Versuchsregler. An diesen wurde jeweils ein Radon Scout Plus aus jeder Lüftungszone angeschlossen, um eine individuelle Reaktion für jede Zone initiieren zu können. Der Versuchsregler wurde derart programmiert, dass die Förderrate in Form einer Leistungsstufe sowie die Betriebsmodi Wärmerückgewinnung (siehe Abbildung 2 A), Durchlüftung (siehe Abbildung 2 B) und Aus eingestellt werden konnten.

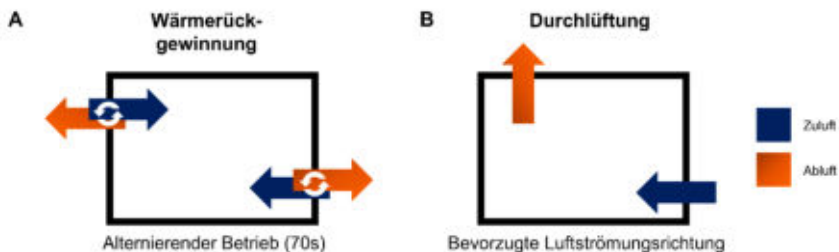


Abbildung 2: Schematische Darstellung der etablierten Betriebsmodi Wärmerückgewinnung und Durchlüftung von dezentralen, alternierenden Lüftungseinheiten [6]

Die etablierten Betriebsweisen von Wärmerückgewinnung und Durchlüftung zeichnen sich bei den alternierenden Lüftungseinheiten im regulären Betrieb durch einen abgeglichenen Zu- und Abluftvolumenstrom aus. Dadurch wird kein Differenzdruck durch die Wohn-

raumlüftung induziert. Im Feldversuch wurde die Regelung dahingehend erweitert, dass die Förderrate des Gerätes im Zuluftbetrieb gegenüber dem Gerät im Abluftbetrieb erhöht werden konnte. In Abhängigkeit der Differenz der Förderraten konnte somit ein variabler Überdruck in den einzelnen Lüftungszonen eingestellt werden. Daraus resultierten die zusätzlichen Betriebsmodi Wärmerückgewinnung mit Überdruck und Durchlüftung mit Überdruck.

2.4 Versuchsmethodik

Im Feldversuch sollte die Wirkung verschiedener Reaktionen der Geräte in einer Lüftungszone auf das Überschreiten einer Radon-222-Aktivitätskonzentration erfasst werden. Für jeden Lüftungsversuch wurden dazu die Einstellungen von zwei Zuständen festgelegt. Im Normalzustand wurden die Betriebsparameter für eine gemessene Radon-222-Aktivitätskonzentration unterhalb des gewählten Schwellenwertes definiert. Im Alarmzustand wurden die Einstellungen der Lüftung vorgegeben, welche bei Überschreitung des gewählten Schwellenwertes aktiviert werden sollten. Diese Einstellungen umfassten jeweils den Betriebsmodus und die Förderrate. Eine Beeinflussung der Einzelversuche untereinander wurde vermieden, indem nach den einwöchigen Lüftungsversuchen die Geräte für eine Woche ausgeschaltet und die Innenblenden verschlossen wurden.

3 Ergebnisse aus dem Feldversuch

Die im Folgenden präsentierten und diskutierten Ergebnisse basieren auf Messdaten, welche im Zeitraum vom 19.05.2021 bis 11.05.2022 aufgezeichnet wurden [6]. Der raumspezifische Verlauf der Radon-222-Aktivitätskonzentration über diesen Zeitraum ist in Abbildung 3 dargestellt. Dabei sind die Intervalle mit aktiver Lüftung grau hinterlegt und nummeriert. Ergänzend dazu wurde der deutsche Referenzwert markiert.

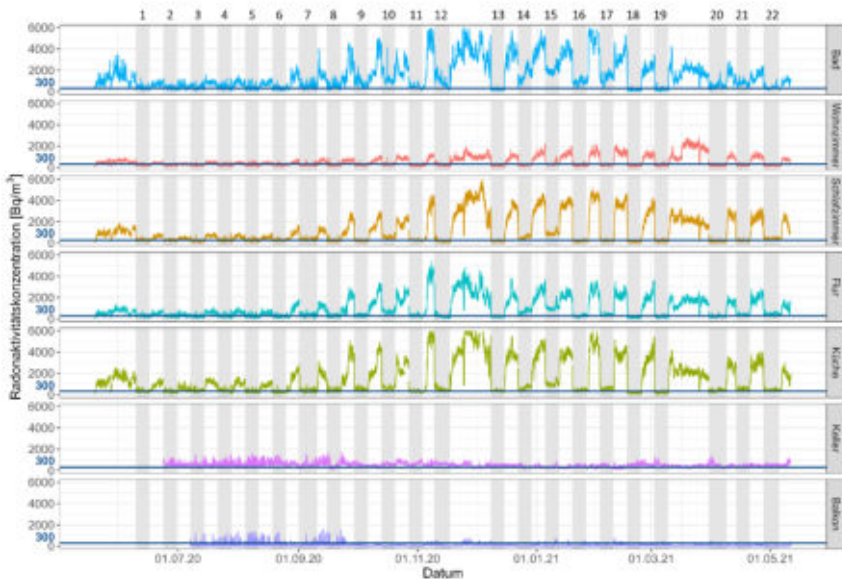


Abbildung 3: Raumspezifischer Verlauf der Radon-222-Aktivitätskonzentration im Zeitraum vom 19.05.2021 bis 11.05.2022 mit markierten und nummerierten Intervallen der Lüftungsversuche [6]

Anhand der Verläufe der raumspezifischen Radon-222-Aktivitätskonzentrationen wird bereits deutlich, dass im Wohnzimmer bei nahezu allen Versuchen der Referenzwert erreicht oder unterschritten werden konnte. Dahingegen wurde eine stabile Reduzierung der Radon-222-Aktivitätskonzentration im Bad nur mit drei Lüftungseinstellungen erreicht. Die Grafik zeigt weiterhin, dass die Aktivierung des Lüftungssystems immer eine Reduzierung der Innenraumkonzentration des Radon-222 zur Folge hat. Diese Beobachtung wird durch die statistische Auswertung in Tabelle 2 bestätigt. In dieser wurden die Radon-222-Aktivitätskonzentrationen in den Räumen jeweils über die Zeiträume des unbeeinflussten Zustandes und mit aktiver Lüftung arithmetisch gemittelt und gegenübergestellt.

Tabelle 2: Gerundeter arithmetischer Mittelwert der raumspezifischen Radon-222-Aktivitätskonzentration, gebildet über jeweils alle Zeiträume mit unbeeinflusstem Zustand und aktiver Lüftung [6]

Raum	Radon-222-Aktivitätskonzentration [Bq/m ³]	
	<i>unbeeinflusst</i>	<i>aktive Lüftung</i>
Versuchswohnung komplett	1.800	420
Bad	2.150	710
Küche	2.480	460
Schlafzimmer	1.970	330
Flur	1.540	380
Wohnzimmer	860	220
Keller	500	540
Balkon	120	120

Die Messwerte belegen zudem ein deutlich raumspezifisches Verhalten, sowohl in Bezug auf die Höhe und den Verlauf der Radon-222-Aktivitätskonzentration sowie in der Wirkung des Lüftungssystems. Die detaillierte Betrachtung zeigt Unterschiede in der Reduzierung infolge der verschiedenen Vorgaben der Förderrate, des eingestellten Überdruckes, dem Schwellenwert der Radon-222-Aktivitätskonzentration und des Betriebsmodus. Die Ergebnisse aus dem Feldversuch bestätigen weiterhin einen jahres- und tageszeitlichen Verlauf der Innenraumkonzentration des Radon-222. Darauf aufbauend ist ein unterschiedlicher Effekt der etablierten Lüftungseinstellung zwischen Sommer und Winter nachweisbar, wie in der beispielhaften Gegenüberstellung in Abbildung 4 herausgearbeitet wird. Hervorzuheben ist die ebenfalls dargestellte stabile Reduzierung der Radon-222-Aktivitätskonzentration, die in den Intervallen mit einem Überdruckmodus erzielt werden konnte. Der dafür notwendige positive Differenzdruck ist mit $dp \leq 5$ Pa sehr niedrig.



Abbildung 4: Vergleich des arithmetisch gemittelten Wertes der Radon-222-Aktivitätskonzentration für ausgewählte Versuche [6], welche zur Orientierung mit dem Betriebsmodus und der Leistungsstufe des Reglers sowie der Nummer des Lüftungsversuches (LV) beschriftet wurden

4 Normative Betrachtung der Lüftung zum Radonschutz

Die Reihe DIN/TS 18117 [4, 9] erläutert bauliche und lüftungstechnische Maßnahmen für den Radonschutz und gibt Handlungsempfehlungen für deren Anwendung. Für die Ermittlung sowie Auslegung lüftungstechnischer Kennwerte und Anlagen wird in diesen zusätzlich auf die DIN 1946-6 [8] verwiesen. In den folgenden Betrachtungen werden die Verfahren dieser Dokumente angewendet. Dadurch wird eine normative Bewertung der Einsatzfähigkeit der Lüftungstechnik als Radonschutzmaßnahme für die Versuchswohnung ermittelt und die daraus resultierenden Erwartungen mit den Ergebnissen aus dem Feldversuch verglichen.

4.1 Auslegung des Lüftungssystems nach DIN 1946-6 [8]

Die DIN 1946-6 [8] legt unter anderem die Anforderungen an die Planung und den Betrieb von Lüftungssystemen in Wohnräumen fest. Deshalb umfasst sie ebenfalls eine Berechnung des Infiltrationsluftwechsels, welche für die vorhandene Versuchswohnung als Grundlage für die weiteren Betrachtungen angewendet wird. Es werden ein windstarker Standort und zwei windausgesetzte Fassaden für die gesamte Wohnung und das Wohnzimmer sowie eine windausgesetzte Fassade für das Bad zugrunde gelegt. Die Ergebnisse dieser Berechnung werden in Tabelle 3 zusammengefasst. Weiterhin werden der Auslegungsluftwechsel der gesamten Wohnung und der betrachteten Lüftungszonen für die Lüftung zum Feuchteschutz n_{FL} , die Nennlüftung n_{NL} und die Intensivlüftung n_{IL} ermittelt und ebenfalls in Tabelle 3 aufgelistet. Bei der Ermittlung der Auslegungsluftwechsel wurden lediglich die Grundflächen herangezogen und die Anforderung an Ablufträume außer Acht gelassen. Die Luftwechsel im Bad entsprechen dem rechnerischen Wert basierend auf der in Tabelle 1 angegebenen Fläche. Dieses Vorgehen soll den Vergleich mit den Luftwechseln der Versuche ermöglichen und entspricht nicht der Forderung in der DIN 1946-6 [8], wonach Flächen kleiner 20 m^2 mit $ANE = 20 \text{ m}^2$ angenommen werden müssen. Für den Luftwechsel zum Feuchteschutz wurde von einer hohen Belegung und gemäß dem Zustand der genutzten Wohnung von einem geringen Wärmeschutz ausgegangen.

Tabelle 3: Ergebnisse der Auslegungsberechnung nach DIN 1946-6 [8] und der theoretisch errechnete Luftwechsel zur Reduzierung der mittleren Radon-222-Aktivitätskonzentration auf den Referenzwert nach Formel A.11 DIN/TS 18117-1 [4]

Raum	e_z [-]	$n_{infiltration}$ [1/h]	n_{FL} [1/h]	n_{NL} [1/h]	n_{IL} [1/h]	$n_{Rn} = 300 \text{ Bq/m}^3$ [1/h]
Versuchswohnung komplett	0,080	0,264	0,211	0,528	0,687	2,529
Bad	0,012	0,114	0,555	1,387	1,804	1,364
Wohnzimmer	0,080	0,168	0,275	0,688	0,894	0,715

4.2 Auswahl von Lüftungstechnischen Maßnahmen nach DIN/TS 18117-1 [4]

Unter Berücksichtigung der Luftdichtheit und Höhe der initialen Radon-222-Aktivitätskonzentration werden in Tabelle 8 der DIN/TS 18117-1 [4] mögliche Lüftungslösungen aufgezeigt. Wird die arithmetisch gemittelte Radon-222-Aktivitätskonzentration aller unbeeinflussten Zeiträume in Tabelle 2 sowie die gemessene Luftdichtheit aus Tabelle 1 herangezogen, gelangt man zur Einschätzung, dass Lüftungstechnische Maßnahmen für die Versuchswohnung nicht zielführend sind. Aufgrund der großen Unterschiede zwischen den einzelnen Lüftungszonen der Versuchswohnung, soll die Prüfung weiterhin gesondert für das Bad und das Wohnzimmer erfolgen. Ersteres wird durch die hohe Belastung mit Radon-222 und die vorhandenen Undichtigkeiten gleichsam wie die Wohnung eingeschätzt. Dagegen wird für das Wohnzimmer eine erfolgreiche Reduktion durch die Erhöhung des Luftwechsels und eventuell zusätzlichen Überdruck in Aussicht gestellt. Trotz der negativen Bewertung für die Wohnung und das Bad werden auf Basis der Formel A.11 der DIN/TS 18117-1 [4] die theoretisch notwendigen Luftwechsel $n_{Rn} = 300 \text{ Bq/m}^3$ bestimmt, welche zum Erreichen des Referenzwertes gefördert werden müssten. Die Berechnungsergebnisse werden in Tabelle 3 den Auslegungsluftwechseln nach DIN 1946-6 [8] gegenübergestellt. Durch die Verwendung der Formel können die gemittelten Messwerte aus dem Feldversuch, wie zum Beispiel die tatsächliche Radon-222-Außenluftkonzentration, in die Berechnung einfließen. Um die benötigten Quellstärken des Radoneintritts zu ermitteln, werden die Werte aller unbeeinflussten Zustände nach Tabelle 2 sowie der Luftwechsel in Folge von Infiltration nach Tabelle 3 verwendet.

4.3 Bewertung ausgewählter Versuchsergebnisse im Vergleich mit der normativen Einschätzung

Gemäß der zuvor ausgeführten normativen Bewertung wäre ein Raumlüftungssystem für die Versuchswohnung keine hinreichende Maßnahme zum Radonschutz. Soll dennoch die Lüftung als Gegenmaßnahme eingesetzt werden, muss mit einem gegenüber der regu-

lären Lüftungsauslegung deutlich erhöhtem Luftwechsel für die Wohnung geplant werden. Diese theoretische Betrachtung bestätigt somit die aus der DIN/TS 18117-1 Tabelle 8 [4] entnommene Bewertung.

Eine weitere Überprüfung der Einordnung wird auf Basis der Messergebnisse aus Abbildung 4 möglich. Die dort ausgewiesene Reglereinstellung 75 % erzeugt dabei näherungsweise den Luftwechsel für die Nennlüftung während die Einstellung 100 % die Auslegungsluftwechsel der Intensivlüftung übersteigt. Somit können im Versuchsaufbau sowohl die normativen Anforderungen an die Wohnraumlüftung als auch die Lüftung zum Radonschutz eingestellt werden. Die gemessenen Konzentrationen im Wohnzimmer verdeutlichen, dass beide Leistungsstufen, unabhängig vom Betriebsmodus, eine Reduzierung der Radon - 222 - Aktivitätskonzentration unter oder in die Nähe des Referenzwertes bewirken. Dagegen wird im Badezimmer, in Abhängigkeit der Jahreszeit und des Betriebsmodus, der Referenzwert unterschiedlich stark verfehlt. Die Ergebnisse der Lüftungsversuche mit den Überdruckmodi zeigen wiederum, dass in allen Bereichen der Versuchswohnung eine akzeptable Reduzierung der Radon-222-Aktivitätskonzentration durch das dezentrale Lüftungssystem möglich ist. Auf Basis dieser ausgewählten Ergebnisse kann geschlussfolgert werden, dass die Bewertung und Abschätzung nach DIN/TS 18117-1 [4] auf Basis von Langzeitmittelwerten zum Teil gute Ergebnisse liefert. In dem konkreten Fall wurde für das Wohnzimmer mit einem mittleren Gebäudedichtheitswert und einer mittleren Innenraumkonzentration des Radon-222 eine übereinstimmende Bewertung erzielt. Jedoch wird für Bereiche oder Nutzungseinheiten mit hohen Werten der Undichtigkeit und der Radon-222-Aktivitätskonzentration die Wirkung der abgeglichenen Lüftung überschätzt und die Wirkung einer Lüftung im Überdruckbetrieb unterschätzt.

5 Diskussion

Die vorgestellten Ergebnisse, Vergleiche und Bewertungen sollen dazu dienen, die Einsatzmöglichkeiten und -grenzen von dezentralen Lüftungssystemen als Radonschutzmaßnahme zu evaluieren. Im zugrundeliegenden Feldversuch mussten dafür Annahmen getroffen

und Randbedingungen gesetzt werden. Dies betrifft zuerst die Auswahl und Anordnung der Lüftungsgeräte sowie die Aufteilung der Wohnung in Lüftungszonen. Grundlage für die betreffenden Entscheidungen sind die langjährige Erfahrung der inVENTer GmbH als Entwickler und Hersteller dezentraler, alternierender Lüftungssysteme und als Mitglied in Normungsgremien. Die Aufteilung der Wohnung in unabhängige Lüftungsbereiche ermöglicht die Betrachtung verschiedener Geräteausführungen und Einbausituationen. Dabei wird die Vergleichbarkeit aufgrund üblicher Kennzahlen, wie zum Beispiel dem Luftwechsel und der Luftdichtheit, trotz der abweichenden Randbedingungen innerhalb der Wohnung gewährleistet. Die Abwesenheit von Personen und das fehlende Mobiliar in der Versuchswohnung erlauben eine direkte Messung der Wirkung des Lüftungssystems auf die Radon-222-Aktivitätskonzentration. Der saisonale Verlauf der Innenraumkonzentration des Radon-222 von bewohnten Gebäuden wird dagegen durch die Regulierung der Innenraumtemperatur berücksichtigt. Erwartungsgemäß treten in den Wintermonaten in der Versuchswohnung höhere Radon-222-Aktivitätskonzentrationen auf als in den Sommermonaten. Um den Effekt einer Lüftungseinstellung bei diesen verschiedenen Quellstärken des Radoneintrittes zu testen, wurden die Versuche jeweils für eine Woche im Winter und eine Woche im Sommer durchgeführt. Daraus wird die Erkenntnis abgeleitet, dass die Verwendung einer Lüftungseinstellung pro Nutzungseinheit nicht effizient sein kann. Stattdessen muss das Lüftungssystem in die Lage versetzt werden, auf die temporären Randbedingungen mit einem möglichst breiten Spektrum an Einstellungen reagieren zu können. Diese Funktionalität wird umso wichtiger, wenn Bewohner mit weitergehenden Anforderungen berücksichtigt werden sollen. Die aktuell untersuchten Einstellungen des Lüftungssystems berücksichtigen keine Vorgaben an den Schallpegel im Innenraum, das Zugluftrisiko oder die Wärmerückgewinnung. Bezüglich der letzten beiden Punkte wird für die in diesem Versuch erfolgreichen Einstellungen das Risiko des Unbehagens niedrig eingeschätzt. Der aktuelle Stand der Technik von dezentralen Lüftungssystemen erreicht bei diesen Luftwechseln ausreichende Wärmerückgewinnungsgrade. Das Zugluftri-

siko wird durch die Luftführung der Innenblenden bei den auftretenden Luftgeschwindigkeiten minimiert. Beim Einsatz in bewohnten Nutzungseinheiten wird die Schallabstrahlung der Geräte dagegen essenziell, da sie von den Nutzern direkt wahrgenommen und unterschiedlich bewertet wird. Der Schalleistungspegel steigt bei den Lüftungssystemen proportional zur Förderrate, weshalb wiederum eine differenziertere Regelung mit einer frühzeitigen Reaktion des Systems notwendig wird. Ebenso muss berücksichtigt werden, dass bei geöffneten Innentüren, die während der Nutzung der Innenräume durch Personen auftreten können, die Lüftungszonen miteinander verbunden werden. Die Bewegung der Personen innerhalb der Wohnung sowie die Nutzung der Fenster und des Balkons werden die Lüftungseffekte jedoch verstärken. Nachteilig wird dagegen die Reduzierung der Lüftungsstufe in Folge von manuellen Eingriffen sein, zum Beispiel während der Einschlaf- oder Nachtphase. Die zuvor genannten Aspekte müssen für die neuartigen Betriebsmodi mit Überdruck in weiterführenden Untersuchungen separat bewertet werden. Zusätzlich resultiert die Fragestellung, ob durch den geringen Überdruck und offene Fugen in der Bausubstanz oder eine erhöhte Diffusion ein möglicher Feuchteintrag in die Struktur zu Schäden führen könnte.

In der DIN/TS 18117-1 [4] wird explizit darum gebeten, dass Erfahrungen aus der Anwendung der Ausführungen und Handlungsempfehlungen an den Normenausschuss zurückgemeldet werden. Auf Basis der vorliegenden Messergebnisse und weiterhin laufenden Untersuchungen können Hinweise zu den Ausführungen der lüftungstechnischen Lösungen der Norm gegeben werden. Besonders bei größeren Unterschieden zwischen den Randbedingungen innerhalb der Nutzungseinheit, wie zum Beispiel der Luftdichtheit oder Quellstärke des Radon-222, sollte entgegen der aktuellen Vorgehensweise in der Bewertung nach DIN/TS 18117-1 [4] über eine separierte Planung einzelner Lüftungsbereiche nachgedacht werden. Für die Anwendung der Handlungsempfehlungen für eine Lüftung im Überdruckbetrieb oder bei kritischen Ausgangsbedingungen ist die Betrachtung anhand von Langzeitmittelwerten der Radon-222-Aktivitätskonzentration zum Teil

ungenau. In diesem Zusammenhang könnte über eine generelle Auslegung des Lüftungssystems anhand der maximal gemessenen Innenraumkonzentrationen nachgedacht werden. Die Betrachtung dieses ungünstigsten Falls würde die ausreichende Dimensionierung des Lüftungssystems fördern, während im Betrieb durch eine spezifische Regelung effektive Teillastbetriebe genutzt werden. Darauf aufbauend könnte der benötigte Luftwechsel unter strahlenschutztechnischen und energetisch effizienten Aspekten sichergestellt werden, da die gesundheitlich wirksame Exposition für Personen ebenfalls von deren Aufenthaltszeit abhängt.

6 Fazit

Auf Basis der Versuchsergebnisse wird deutlich, dass die Raumlüftung bei niedrigen, mittleren und sogar hohen Innenraumkonzentrationen des Radon-222 eine mögliche Sanierungslösung bietet. Dabei muss der alleinige Einsatz, wie im Versuchsaufbau, oder eine Kombination mit baulichen Maßnahmen anhand der individuellen Randbedingungen bewertet werden. Zu diesen zählen zum Beispiel die Eigenschaften des Bauwerks und die Bedürfnisse sowie der Komfort der Bewohner. Im Versuchsaufbau wurden ebenfalls raumspezifische Radon-222-Aktivitätskonzentrationen und Wirkungen der Lüftungsgeräte gemessen. Diese Beobachtungen zeigen, dass etablierte Lüftungssysteme ergänzt mit Radonsensoren und einer spezifischen Regelung essenziell sind, um eine effektive Radonschutzmaßnahme zu erhalten.

Eine Einschätzung der Anwendbarkeit von Lüftungstechnischen Maßnahmen zum Radonschutz nach den aktuellen Normen scheint nicht unter allen Randbedingungen möglich. Der ausgeführte Vergleich legt nahe, dass weitere Randbedingungen für diese Bewertung berücksichtigt werden müssen oder eine breitere Datenbasis für die Einteilung der Tabelle 8 der DIN/TS 18117-1 [4] notwendig ist. Die vorliegenden Ergebnisse sowie der weiterhin andauernde Feldversuch in der Wohnung können dazu einen Beitrag leisten.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Bundesregierung Deutschland; Gesetz zur Neuordnung des Rechts zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung vom 27. Juni 2017, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2017 Teil I Nr. 42 vom 3. Juli 2017; Bundesanzeiger Verlag, Köln; 2017;
- [2] Bundesamt für Strahlenschutz, Hrsg.; Radon-Handbuch Deutschland; Salzgitter; 2019; [Online]; Verfügbar: <https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschueren/ion/radon-handbuch.html>
- [3] S. Darby et al.; Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies; BMJ; Bd. 330, Nr. 7485; S. 223; Jan. 2005; doi: 10.1136/bmj.38308.477650.63
- [4] DIN/TS 18117-1:2021-09, Bauliche und Lüftungstechnische Maßnahmen zum Radonschutz_- Teil_1: Begriffe, Grundlagen und Beschreibung von Maßnahmen; Beuth Verlag GmbH; Sep. 2021; doi: 10.31030/3274781
- [5] J. Dehnert et al.; Radon protection in apartments using a ventilation system wireless-controlled by radon activity concentration; J. Radiol. Prot.; Bd. 41, Nr. 3; S. 109–118; Aug. 2021; doi: 10.1088/1361-6498/abfc97
- [6] D. Altendorf et al.; Decentralised ventilation efficiency for indoor radon reduction considering different environmental parameters; Isotopes Environ. Health Stud.; Bd. 58, Nr. 2; S. 195–213; März 2022; doi: 10.1080/10256016.2022.2047960
- [7] Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie; Allgemeinverfügung zur Festlegung von Gebieten zum Schutz vor Radon-222 in Innenräumen nach § 121 Absatz 1 Satz 1 des Strahlenschutzgesetzes vom 19. November 2020, Sächsisches Amtsblatt Nr. 49/2020 vom 3. Dezember 2020; 31 Dez. 2020;

- [8] DIN 1946-6:2019-12, Raumluftechnik_- Teil_6: Lüftung von Wohnungen_- Allgemeine Anforderungen, Anforderungen an die Auslegung, Ausführung, Inbetriebnahme und Übergabe sowie Instandhaltung; Beuth Verlag GmbH; doi: 10.31030/3113944
- [9] DIN/TS 18117-2:2024-03 - Entwurf, Bauliche und Lüftungstechnische Maßnahmen zum Radonschutz_- Teil_2: Klassifizierung, Auswahl und Handlungsempfehlungen; Beuth Verlag GmbH; doi: 10.31030/3522087

Autorenverzeichnis

Mandy Alisch-Mark

Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft
(BfUL)

Diana Altendorf

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ

Florian Berger

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ

Dr. rer. nat. Gerhard Binker

Binker Materialschutz GmbH

Jörg Dehnert

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)

Michał Duzynski

SARAD GmbH

Marc Ellinger

Radon-Informationszentrum

Stefan Friedemann

Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft
(BfUL)

Tobias Geib

Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft
(BfUL)

Prof. Dr.-Ing. Thomas Hartmann

ITG Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden -
Forschung und Anwendung GmbH

Dr. rer. nat. Thomas Heinrich

Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft
(BfUL)

Pamela Jentner

OrangePep GmbH & Co.KG

Cornelia Leithner

Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Direktion Umwelt
und Wasserwirtschaft, Abteilung Umweltschutz

Janett Pezenka

Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft
(BfUL)

Jacqueline Pianski

Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft
(BfUL)

Dr. rer. nat. Christian Rabel

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz

Dr. rer. nat. Tryggve Rönngvist

Radonova Laboratories AB

Torsten Schindler

inVENTer GmbH

Ralf Trabitzsch

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ

Markus Trautmannsheimer

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz

Prof. Dr.-Ing. Walter-Reinhold Uhlig

KORA e.V.

Martin Waltl

RadonTec GmbH

Louis Weber

Bergsicherung Schneeberg GmbH & Co. KG

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wehr

Professur für Geotechnik, Fachhochschule Erfurt

Holger Weiß

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ

Gernot Wurm

Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES),
Österreichische Fachstelle für Radon

Herausgeber

Dipl.-Ing. Jakob Klever

Dr.-Ing. Sebastian Golz

Prof. Dr.-Ing. Thomas Naumann

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen

Lehrgebiet Baukonstruktion und Bauwerkserhaltung

Friedrich-List-Platz 1

01069 Dresden

Redaktionsschluss: 5. April 2024

Für die Inhalte sind die jeweiligen Verfasser verantwortlich. Ohne ausdrückliche Genehmigung der Verfasser ist es nicht gestattet, dieses Werk oder Teile daraus auf fotomechanischem Wege (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen sowie die Speicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen vorzunehmen. Angaben ohne Gewähr