



Evaluierung der Radonexposition in
untertägigen Arbeitsbereichen sowie
der rechtlichen Vorgaben gemäß
StrSchG 2020 und RnV

Abschlussbericht

Angelika Kunte, Joachim Gräser, Valeria Gruber

31.10.2025

Inhalt

Inhalt.....	2
Zusammenfassung	4
Motivation und Ziele des Projekts	6
1 Grundlagen	7
1.1 Rechtliche Grundlagen.....	7
1.2 Überblick zu den verschiedenen Arten untertägiger Arbeitsbereiche.....	9
2 Methodik	12
2.1 Recherche zu vorhandenen Daten und Veröffentlichungen	12
2.2 Kategorisierung untertägiger Arbeitsbereiche und Auswahl der Partnerbetriebe.....	14
2.3 Durchführung der Messungen.....	16
2.4 Methodik der Dosisabschätzung und -ermittlung	20
3 Ergebnisse.....	22
3.1 Radonkonzentrationen in untertägigen Arbeitsbereichen.....	22
Aktiver Bergbau mit untertägigem Abbau (BW)	23
Schaubergwerke (SBW).....	25
Schauhöhlen (SH)	27
Diverse andere untertägige Arbeitsbereiche (DIV).....	29
3.2 Einflussfaktoren auf die Radonkonzentration unter Tage	31
Außentemperatur	31
Künstliche Bewetterung	33
Wasserdurchflüsse und unterirdische Seen.....	38
Einflussnahme auf die natürlichen Wetterströme.....	39

3.3	Radonfolgeprodukte und Gleichgewichtsfaktor	41
3.4	Thoron und Thoron-Folgeprodukte.....	44
3.5	Radonexposition der Beschäftigten	45
3.5.1	Ergebnisse der Dosisabschätzung für Beschäftigte in ausgewählten Betrieben ...	45
	Bergwerke mit untertägigem Abbau	45
	Schaubergwerke	47
	Schauhöhlen.....	47
	Sonstige untertägige Arbeitsbereiche.....	48
3.5.2	Vergleich der Ergebnisse aus Dosisabschätzung und Personendosimetrie.....	50
4	Ausblick.....	53
	Abbildungsverzeichnis.....	54
	Tabellenverzeichnis.....	55
	Literaturverzeichnis.....	56
	Link Sammlung.....	59
	Anhang A Verwendete Abkürzungen.....	60
	Anhang B Informationsblatt zu den eingesetzten Messgeräten.....	61
	Anhang C Glossar [31].....	62

Zusammenfassung

Ziel des vorliegenden Projekts war den Kenntnisstand über die Radonsituation in verschiedenen untertägigen Arbeitsbereichen zu erweitern und die aktuell gültigen rechtlichen Vorgaben gemäß Strahlenschutzgesetz 2020 (StrSchG 2020) [1] und Radonschutzverordnung (RnV) [2] zu evaluieren. Dazu sollten auch Betriebe, welche aufgrund der Erfüllung bestimmter Ausnahmekriterien von der Radon-Messverpflichtung aktuell ausgenommen sind, untersucht werden. Bis dato gibt es insbesondere über den tatsächlichen Einfluss einer künstlichen Bewetterung in untertägigen Arbeitsbereichen auf die Radonkonzentration und die Konzentration der Radonfolgeprodukte wenig Daten und Erfahrungswerte.

Um die Fragestellungen des Umweltministeriums (während der Laufzeit des Projekts BMK, aktuell BMLUK) als Auftraggeber des Projekts beantworten zu können, wurden im Projektzeitraum (Mai 2023 – Dezember 2024) Messungen der Radon- und Thoronkonzentration, sowie deren Folgeprodukte an insgesamt 23 untertägigen Betriebsstandorten durchgeführt. Die Betriebe wurden in folgende vier Kategorien eingeteilt: Bergwerke mit untertägigem Abbau, Schaubergwerke, Schauhöhlen und diverse weitere untertägige Arbeitsbereiche. In allen vier Kategorien wurden in mehr als einem Betrieb deutlich erhöhte Radonkonzentrationen im vierstelligen Bereich festgestellt.

Die vorherrschenden Umgebungsbedingungen unter Tage führten zu diversen Herausforderungen hinsichtlich des Einsatzes der verschiedenen aktiven elektronischen Messgeräte. Eine sehr hohe relative Luftfeuchtigkeit, die Staubbelastung, durchgeführte Sprengarbeiten, störende Geräusche der Messvorrichtung, Publikumsverkehr entlang des Führungsverlaufs oder eine nur limitierte Stromversorgung führten hinsichtlich der Auswahl der geeignetsten Messorte zum Teil zu Einschränkungen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Betrieb einer künstlichen Bewetterungsanlage in der Regel eine Reduzierung der Radonkonzentration in den Aufenthaltsbereichen unter Tage zur Folge hat. Der Einfluss ist allerdings nicht immer ausreichend, um die mittlere Radonkonzentration in den untertägigen Arbeitsbereichen unter den Referenzwert von 300 Bq/m^3 zu senken. Aufgrund hoher Aufenthaltszeiten in der Grube kann es in aktiven Bergwerken mit untertägigem Abbau zu einer unangemessenen Radondosis kommen. Aus den angeführten

Gründen wird empfohlen, Betriebe, in welchen eine künstliche Bewetterung eingesetzt wird, in Zukunft nicht mehr per se von den sich aus den §§ 98 ff StrSchG 2020 ergebenden Verpflichtungen zum Radonschutz der Beschäftigten auszunehmen. Die Berechtigung des Ausnahmekriteriums gemäß § 98 Abs. 1 Z 2 und Z 3 StrSchG 2020, welches darauf basiert, dass es in Betrieben mit sehr geringen Aufenthaltszeiten (< 30 Std. pro Jahr) zu keiner unangemessenen Radondosis für die Beschäftigten kommt, konnte mit den Ergebnissen bestätigt werden. Für standardmäßige Radonmessungen hat sich der Einsatz von passiven Detektoren im vorgegebenen Messzeitraum von 15.4. – 15.10. bewährt.

Der Gleichgewichtsfaktor (GGF) für Radon und seine Folgeprodukte hat einen maßgeblichen Einfluss auf das sich durch die Radonexposition ergebende Gesundheitsrisiko. Die Bestimmung des Gleichgewichtsfaktors ist eine komplexe und herausfordernde Aufgabe, da es nicht nur zeitlich, sondern auch räumlich zu starken Varianzen der Gleichgewichtsfaktoren innerhalb eines untertägigen Betriebsstandortes kommen kann. Bei der Messung des GGF findet man selten einen gleichmäßigen Wert. Es kommt zu Schwankungen im Tagesverlauf, im Jahresverlauf, mit der künstlichen Bewetterung und mitunter zu erheblichen Unterschieden zwischen den einzelnen Messpositionen im gleichen Objekt. Da zudem die teuren Messgeräte nicht in größerer Zahl und für längere Zeiträume zur Verfügung gestellt werden können, ist es in der alltäglichen Praxis nicht opportun, repräsentative GGF für ganze Bergwerke oder Höhlen zu ermitteln. In der Praxis ist daher die Anwendung eines mittleren Gleichgewichtsfaktors von 0,4 für die Durchführung von Dosisabschätzungen ein vertretbarer Ansatz. Im Anlassfall können solche Messungen für einzelne Arbeitsplätze aber sinnvoll und hilfreich sein.

Bei in etwa der Hälfte aller Betriebsstandorte wurde an mindestens einer Messposition Thoron über der Nachweisgrenze gemessen.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die Radonexposition von Beschäftigten in untertägigen Arbeitsbereichen durchaus zu einer unangemessenen Dosis für einzelne Beschäftigte führen kann. Die Ermittlung der konkreten Radonexposition unter Tage ist allerdings von diversen Herausforderungen geprägt.

Motivation und Ziele des Projekts

Untertägige Arbeitsbereiche in Bergwerken, Schächten, Stollen, Tunneln und Höhlen sowie Schaubergwerken und -höhlen zählen zu den Arbeitsbereichen mit potenziell erhöhter Radonkonzentration und unterliegen bereits seit Inkrafttreten der Natürlichen Strahlenquellen-Verordnung (NatStrV) [4] im Jahr 2008 der gesetzlichen Verpflichtung zur Durchführung von Radonmessungen zum Schutz der Beschäftigten. Ausgenommen davon sind allerdings Betriebsstätten, in denen eine entsprechende Bewetterung nach dem Stand der Technik im Sinne der rechtlichen Vorgaben vorliegt. Bislang gibt es kaum Daten zu Radonkonzentrationen in diesen Bereichen. Zu den Schaubergwerken und -höhlen wurde von 2008 bis 2010 eine Pilotstudie in sechs Schaubergwerken und drei Schauhöhlen [5] durchgeführt. Die Vorgaben und Ausnahmekriterien im neuen StrSchG 2020 und in der RnV beziehen sich auf die Erkenntnisse aus dieser Pilotstudie. Das vorliegende Projekt soll eine erweiterte, belastbare Datengrundlage zur Radon-Situation in untertägigen Arbeitsbereichen in Österreich schaffen.

Darüber hinaus wurden folgende Ziele in dem Projekt verfolgt:

- Durchführung von Vergleichsmessungen von Radon und seiner Folgeprodukte in untertägigen Arbeitsbereichen zur Evaluierung des bislang bei der Dosisberechnung berücksichtigten Gleichgewichtsfaktors
- Erweiterung des aktuellen Kenntnisstandes hinsichtlich der Abschätzung der zu erwartenden Radonkonzentrationen und Radonexpositionen der Beschäftigten in den untertägigen Arbeitsbereichen
- Bewertung des Einflusses der Bewetterungsart (künstlich oder natürlich) auf die Radonkonzentration
- Evaluierung der aktuellen Vorgaben der RnV für Arbeitsbereiche gemäß § 98 Abs. 1 Z 2 und Z 3 StrSchG 2020 (insbesondere der Anlage 3 der RnV sowie der im § 6 der RnV aufgelisteten Ausnahmekriterien für diese Arbeitsbereiche)

Der Projektzeitraum erstreckte sich von Mai 2023 bis Dezember 2024. Es wurden insgesamt 23 Betriebsstätten in unterschiedlichem Ausmaß in die Datenerhebung für das Projekt mit einbezogen. Besichtigungen vor Ort fanden in insgesamt 13 Betriebsstätten im Zeitraum von September 2023 bis Juni 2024 statt.

1 Grundlagen

1.1 Rechtliche Grundlagen

Untertägige Arbeitsbereiche in Bergwerken, Schächten, Stollen, Tunneln und Höhlen sowie Schaubergwerken und -höhlen zählen zu den Arbeitsbereichen, in denen aufgrund besonderer Expositionsbedingungen erhöhte Radonkonzentrationen zu erwarten sind. In diesen Arbeitsbereichen muss gemäß § 100 StrSchG 2020 eine Erhebung der Radonexposition erfolgen. Von der Radonmessverpflichtung in den genannten Arbeitsbereichen gibt es Ausnahmeregelungen. Laut § 6 Abs. 1 Z 3 RnV sind untertägige Arbeitsbereiche gemäß § 98 Abs. 1 Z 2 StrSchG 2020 ausgenommen, wenn diese eine dem Stand der Technik entsprechende oder aufgrund rechtlicher Vorgaben erforderliche Bewetterung betreiben. Diese Bewetterung muss künstlich erfolgen. Im Fall einer natürlichen Bewetterung greift die Ausnahme, wenn sich kein:e Beschäftigte:r mehr als 30 Stunden pro Jahr in untertägigen Arbeitsbereichen aufhält. Schaubergwerke und -höhlen gemäß § 98 Abs. 1 Z 3 StrSchG 2020 sind laut § 6 Abs. 1 Z 4 RnV von der Radonmessverpflichtung ausgenommen, wenn sich kein:e Beschäftigte:r mehr als 30 Stunden pro Jahr in ihnen aufhält.

Festlegungen für die Ermittlung der Radonkonzentration in untertägigen Arbeitsbereichen zur Überprüfung der Einhaltung des Referenzwertes von 300 Bq/m³ gemäß Anlage 3, Abschnitt B RnV

- Messorte sind alle Arbeitsplätze, an denen aufgrund besonderer Bedingungen erhöhte Radonkonzentrationen zu erwarten sind.
- Die Messdauer beträgt mindestens zwei Monate.
- Die Messung muss zwischen dem 15. April und dem 15. Oktober erfolgen.
- Die Radonkonzentration am Arbeitsplatz entspricht der mittleren Radonkonzentration über die gesamte Messdauer am Messort. Bei kontinuierlich aufzeichnenden Messgeräten können dafür nur die Radonkonzentrationen während der Anwesenheit von Arbeitskräften gemittelt werden.

- Zur Überprüfung der Einhaltung des Referenzwertes gemäß § 3 Abs. 2 RnV ist die Radonkonzentration am Arbeitsplatz ohne Berücksichtigung der Messunsicherheit mit dem Referenzwert zu vergleichen.

Festlegungen für die Dosisabschätzung sowie die laufende Dosisermittlung gemäß Anlage 3, Abschnitt C RnV

- Die Werte für den Dosiskoeffizient sind der ICRP-Veröffentlichung 137 zu entnehmen [3]. In den meisten Fällen ist zur Berechnung der effektiven Dosis bei GGF 0,4 der Dosiskoeffizient (DK) von $6,7 \cdot 10^{-6} \text{ mSv (Bq h m}^{-3})^{-1}$ zu verwenden.
- Die Dosisabschätzung hat entweder für jede:n Beschäftigte:n oder konservativ für die/den Beschäftigte:n mit der höchsten Aufenthaltszeit anhand der mittleren Radonkonzentration und der Aufenthaltszeit am betreffenden Arbeitsplatz zu erfolgen.
- Ergibt die konservative Dosisabschätzung eine effektive Dosis von mehr als 6 mSv/a, hat die Dosisabschätzung auch für alle weiteren Beschäftigten zu erfolgen. Ist eine Beschäftigte:r an mehreren Arbeitsplätzen tätig, so ist dies zu berücksichtigen.
- Die laufende Dosisermittlung hat entweder durch eine laufende Messung der Radonkonzentration an den betreffenden Arbeitsplätzen unter Berücksichtigung der Aufenthaltszeiten oder durch eine laufende Ermittlung der Radonexposition der betroffenen Beschäftigten mit geeigneten Messgeräten zu erfolgen.

Zuständige Behörden für den Vollzug des StrSchG 2020 und der RnV in Arbeitsbereichen gemäß § 98 Abs. 1 Z 2 und Z 3 StrSchG 2020

Aktive Bergwerke, Schaubergwerke und andere Nachnutzungen stillgelegter Gruben (Heilstollen, etc.) unterliegen dem Mineralrohstoffgesetz (MinRoG) [6] und somit der Zuständigkeit der jeweiligen Montanbehörde. Die übergeordnete Montanbehörde ist die „Sektion VI – Bereich Bergbau“ des Bundesministeriums für Finanzen:

- Montanbehörde West (Abt. VI/7): Salzburg, Oberösterreich, Tirol und Vorarlberg
- Montanbehörde Süd (Abt. VI/8): Steiermark und Kärnten
- Montanbehörde Ost (Abt. VI/9): Wien, Niederösterreich und das Burgenland

Schauhöhlen fallen nicht in den Geltungsbereich des MinRoG. Betreffend Radon am Arbeitsplatz ist gemäß § 153 Abs. 5 Z 2 StrSchG 2020 die Landeshauptfrau/der Landeshauptmann die zuständige Behörde für den Vollzug des StrSchG 2020 und der RnV.

1.2 Überblick zu den verschiedenen Arten untertägiger Arbeitsbereiche

Untertägige Arbeitsbereiche gibt es in Österreich in verschiedensten Branchen mit sehr heterogenen Arbeitsumfeldern. Diese reichen vom aktiven untertägigen Bergbau über die Nachnutzung stillgelegter Gruben als Schaubergwerk, besondere Lagerstätten oder Heilstollen bis zu Speichermauern von großen Speicherseen und natürlich entstandenen Höhlensystemen, durch die Besuchergruppen geführt werden. Um auch dem nicht bergmännisch versierten Leserkreis die mitunter nicht selbsterklärenden Begriffe aus der Bergmannssprache verständlich zu machen, wurden diese im Anhang C in einem Glossar zusammengestellt und erläutert.

Hinsichtlich der Radonexposition der Beschäftigten hat man es in **aktiven Bergwerken** im Vergleich zu den anderen angeführten Kategorien mit sehr hohen Aufenthaltszeiten zu tun. In der Regel handelt es sich bei den Bergmännern und -frauen um Vollzeitbeschäftigte, welche den Großteil ihrer Arbeitszeit unter Tage verbringen. Eine weitere Besonderheit sind die herausragenden Dimensionen eines solchen Bergwerks.

Schaubergwerke sind in der Regel stillgelegte Gruben, in welchen die in der Vergangenheit abgebauten Bodenschätze entweder ausgeschöpft sind oder sich ein aktiver Abbau des gewonnenen Materials/Bodenschatzes nicht mehr wirtschaftlich realisieren lässt. Vereinzelt werden neben dem aktiven Bergbau bestimmte stillgelegte Abschnitte der vorhandenen Stollensysteme als Schaubergwerke zugänglich gemacht. Schaubergwerke zeichnen sich durch künstlich von Menschenhand geschaffene Stollen- und Schachtsysteme aus, welche im Gegensatz zu den Führungswegen in Schauhöhlen in der Regel geradlinig und systematisch sind.

In Österreich gibt es aktuell 32 **Schauhöhlen**, von denen die meisten ohne alpine Ausrüstung und ohne besondere körperliche Anforderungen begehbar sind. Eine Eigenheit der Schauhöhlen ist ihre durch Auswaschung auf natürlichem Weg entstandene Form, welche keinen geraden Linien folgt. Auch in weit von der Erdoberfläche entfernten Höhlenräumen steht die Luft unter Tage als Teil der Atmosphäre mit der Außenluft in Wechselwirkung. Der Motor des Luftaustausches basiert auf dem physikalischen Prinzip, dass sich die Dichte eines

Gases mit der Temperatur ändert. Kühlere Luft ist schwerer als wärmere Luft und sinkt der Schwerkraft folgend ab. Temperaturänderungen über Tage sind der Auslöser für Luftbewegungen in der Höhle, bis hin zu starkem Wind, auch wenn im Untergrund selbst zumeist annähernd konstante Temperaturen herrschen [8]. Das Prinzip der natürlichen Wetterströme gilt sinngemäß auch für die weiteren im Projekt untersuchten Kategorien von untertägigen Arbeitsbereichen. Die Anzahl der durchgeführten Führungen pro Schauhöhle und Jahr reichen (soweit bekannt) von zwei Führungen pro Monat während der Saison (insgesamt 12 Stunden Aufenthaltszeit pro Jahr) bis zu mehreren Führungen täglich während der Saison (Mai bis Oktober) und einer jährlichen Besucheranzahl von ca. 150.000 Personen. Hinzu kommen meist noch durchzuführende Wartungsarbeiten in den Monaten März, April und November.

Schaubergwerke und Schauhöhlen werden in Österreich zum Teil von Vereinen betrieben. Von den 29 Schaubergwerken in Österreich haben nur wenige Vollzeitbeschäftigte, die mehrmals täglich Besuchergruppen begleiten. Ein Großteil der Schaubergwerke sowie 13 der 32 Schauhöhlen in Österreich werden nur saisonal von Ehrenamtlichen betrieben. Ehrenamtlich ausgeführte Tätigkeiten in einem Verein gelten nicht als eine berufliche Betätigung, weshalb die Verpflichtungen zum Radonschutz am Arbeitsplatz für die ehrenamtlich Beschäftigten entfallen. Die für die Fremdbefahrungen notwendige Gewährleistung einer ausreichenden Bewetterung des Schaubergwerks (Frischluftzufuhr) ist über die Schaubergwerkeverordnung [7] geregelt. In der Regel handelt es sich bei Schaubergwerken um die entsprechende Lenkung der natürlichen Wetterströme.

Ähnlich wie bereits in einer 2017 veröffentlichten Erhebung des Deutschen Bundesamtes für Strahlenschutz [9] gibt es auch in Österreich neben aktiven Bergwerken, Schaubergwerken und Schauhöhlen weitere untertägige Arbeitsbereiche. Aufgrund ihrer Vielfalt wurden diese in weiterer Folge im Rahmen des vorliegenden Projekts in eine Kategorie zusammengefasst (DIV). Es handelt sich hierbei um ein sehr heterogenes Spektrum von Arbeitsstätten mit unterschiedlichsten Voraussetzungen.

Durch **Tunnelbaustellen** entstehen temporäre untertägige Arbeitsplätze mit hohen Aufenthaltszeiten. Typischerweise werden diese mit recht potenten künstlichen Bewetterungssystemen ausgestattet. Solange diese aufgrund der jeweiligen Arbeiten intensiv im Einsatz sind, ist auch von einer guten Wirksamkeit gegen Radon auszugehen. Das kann für andere Phasen oder auch für Seitenarme des Tunnelsystems anders aussehen. Die grundsätzliche Schwierigkeit liegt in der ständigen Veränderung des zu untersuchenden

Objekts selbst und in der einhergehenden mangelhaften Vergleichbarkeit der Verhältnisse im Zeitverlauf. Auch darüber hinaus ist die Übertragbarkeit der Situation von Arbeitsplätzen während der Bauphase auf später eingerichtete Arbeitsplätze in den errichteten Hohlräumen praktisch nicht gegeben.

Im Rahmen des Projekts wurde eine **Speicherseemauer** und ein **Kraftwerksstollen** zur Becken- und Düker-Restentleerung eines großen Stromerzeugers untersucht. Aufgrund bereits vorhandener Radonmessungen war bereits bekannt, dass an beiden Betriebsstandorten stark erhöhte Radonkonzentrationen vorhanden waren. Bei dem zu entleerenden Düker handelt es sich um eine Wasserdruckleitung zur Unterquerung des Siedlungsgebiets zwischen den verschiedenen Speicherbecken des Kraftwerks auf dem Weg ins Tal. Der untersuchte Stollen stellt aufgrund seiner Eigenheit eine Besonderheit dar, da hier nicht das Radon aus dem umgebenden Felsgestein die Hauptradonquelle darstellt, sondern die Radonexhalation aus dem offen abgeleiteten Wasser die Hauptradonquelle darstellt. Eine Beschreibung des untersuchten Stollens befindet sich im Kap.3.2 als Beispiel für untertägliches Wasser als maßgeblicher Einflussfaktor auf die Radonsituation.

Heilstollen fallen unter die „Nachnutzungen“ von stillgelegten, untertägigen Grubenbauen bzw. Stollensystemen ehemaliger Bergwerke. Derzeit gibt es in Österreich neben dem weltweit bekannten Gasteiner Radon-Heilstollen vier weitere ehemalige Grubengebäude, welche als Heilstollen genutzt werden. Das vorherrschende Mikroklima, das nur minimalen Schwankungen im Jahresverlauf unterliegt, stellt das herausragende Merkmal dar und ist erwünscht. Der therapeutische Effekt beruht gemäß der Betreiber:innen vorrangig auf dem vorhandenen speziellen Mikroklima im Stollen. Die Beeinflussung der vorherrschenden Bewetterung, um eine höhere Luftwechselrate herbeizuführen und dadurch die erhöhten Radonkonzentrationen unter Tage zu reduzieren, ist aus diesem Grund in der Regel keine Option. Dadurch sind die Möglichkeiten hinsichtlich einer Reduzierung der Radonkonzentration per se stark begrenzt. Bei erhöhten Expositionen ist zum Schutz der Beschäftigten nur eine Reduzierung der Aufenthaltszeiten oder eine Optimierung des eigentlichen Arbeitsbereiches möglich (durch Abschirmung oder Verlegung des Arbeitsplatzes in einen Bereich mit niedrigeren Radonkonzentrationen im Stollen). Dies trifft auch auf diverse Lagerstätten (Käse, Wein, Whiskey, etc. und Pilzzuchtanlagen) zu. Eine Besonderheit von Heilstollen ist, dass aktive Messungen mit elektronischen Geräten mit Pumpfunktion aufgrund der potenziellen „Geräuschbelästigung“ der Kurgäste im Heilstollen unerwünscht waren.

2 Methodik

2.1 Recherche zu vorhandenen Daten und Veröffentlichungen

Die recherchierte Fachliteratur, welche als Basis für die Planung und den Aufbau des vorliegenden Projektes diente, ist grob in zwei Kategorien zu teilen. Zum einen wurden die einschlägige Fachliteratur und relevanten Gesetzestexte und Verordnungen in Österreich aus dem Bereich Bergbau herangezogen. Als Beispiel sei an dieser Stelle das jährlich erscheinende Montanhandbuch Österreich [10] genannt. Zum anderen wurden Veröffentlichungen über Projekte in untertägigen Arbeitsbereichen zu den Themen „Radon“, „Radon und seine Folgeprodukte“, „Thoron“ sowie „Personendosimetrie für Beschäftigte“ gesammelt und gesichtet. Der Großteil der in Österreich vorhandenen einschlägigen Erfahrung hinsichtlich „Radon und seine Folgeprodukte“ in untertägigen Arbeitsbereichen stammt aus der von der AGES 2013 abgeschlossenen Pilotstudie mit dem Titel „Erhebung und Beurteilung der Radonexposition von Beschäftigten in Österreichischen Schaubergwerken und -höhlen“[5]. Zudem ist die AGES als ermächtigte Überwachungsstelle tätig und hat bereits einige private Radon-Messaufträge in untertägigen Arbeitsbereichen abgewickelt. Die dort gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen konnten ebenso in das Projekt einfließen. Außerdem wurden zur Einarbeitung in das Thema sowie zur Recherche zu potenziellen Projektpartnern, neben dem Montanhandbuch Österreich auch die Internetseiten von diversen Instituten genutzt, zum Teil ergänzt durch persönliche Gespräche oder Emailkontakt mit den nachstehenden Institutionen:

- Hauptstelle für Grubenrettungs- und Gasschutzwesen [11]
- GeoSphere Austria [12]
- Verband Österreichischer Höhlenforschung [13]
- Naturhistorisches Museum Wien [14]

Radon, Thoron und deren Folgeprodukte in untertägigen Arbeitsbereichen wurden auch im Rahmen des EURATOM Horizon 2020 Projektes „RadoNorm - Towards effective radiation

protection based on improved scientific evidence and social considerations – focus on Radon and NORM“ (radonorm.eu) untersucht. Das Forschungsvorhaben lief von 2020 bis 2025 mit 57 Partnerinstitutionen aus 22 Ländern, auch die AGES ist Partner. Relevant ist hier die Übersicht und Ausarbeitung zu Vorgehensweisen und Messprotokollen für Radon an Arbeitsplätzen [15, 16], sowie die durchgeführten Vergleichsmessungen zu Radon und Folgeprodukten, einerseits im Labor in Tschechien und andererseits im Feld, in einer bereits sehr gut untersuchten historischen Silbermine in Polen [17]. An beiden Vergleichsmessungen hat die AGES jeweils mit Radon- und Folgeprodukte-Messgeräten teilgenommen. Die Ergebnisse der Vergleichsmessungen, Radon, Thoron und Folgeprodukte-Messmethoden und Erfahrungen aus Studien in den Ländern sind in einem Bericht zusammengefasst [18]. Die innerhalb von RadoNorm durchgeführten Tätigkeiten, der Erfahrungsaustausch mit den Teilnehmer:innen der anderen Länder und die Erkenntnisse daraus im Bereich der untertägigen Arbeitsplätze wurden im Projekt berücksichtigt.

Die Hauptstelle für das Grubenrettungs- und Gasschutzwesen GmbH erwies sich als geeignete Quelle, um einen guten Überblick über die vielen untertägigen Arbeitsbereiche in Österreich zu bekommen. Auf deren Homepage [11] sind sämtliche Betreiber:innen von untertägigen Arbeitsbereichen in aktiven untertägigen Bergwerken, ehemaligen Grubenbauen / Bergwerken mit Nachnutzungen wie beispielsweise Schaubergwerken oder Heilstollen sowie auch Tagbaubetriebe mit untertägigen Einrichtungen aufgelistet. Es besteht eine Pflichtmitgliedschaft für die Rettung im Falle von Grubenunglücken.

2.2 Kategorisierung untertägiger Arbeitsbereiche und Auswahl der Partnerbetriebe

Für das vorliegende Projekt wurden zur Vergleichbarkeit folgende vier Kategorien untertägiger Arbeitsbereiche definiert:

- **BW:** Arbeitsbereiche gemäß § 98 Abs. 1 Z 2 StrSchG 2020 : Bergbau mit untertägigem Abbau
- **SBW:** Arbeitsbereiche gemäß § 98 Abs. 1 Z 3 StrSchG 2020: Schaubergwerke
- **SH:** Arbeitsbereiche gemäß § 98 Abs. 1 Z 3 StrSchG 2020: Schauhöhlen
- **DIV:** Arbeitsbereiche gemäß § 98 Abs. 1 Z 2 StrSchG 2020: Diverse andere untertägige Arbeitsbereiche

Angeführt sind in nachstehender [Tabelle 1](#) die recherchierte Gesamtzahl an derartigen Betrieben in Österreich sowie die Anzahl der im Rahmen des vorliegenden Projekts untersuchten Betriebe. Es handelt sich demnach insgesamt um eine überschaubare Gesamtzahl an von der Radon-Messverpflichtung gemäß § 98 Abs. 1 Z 2 und Z 3 StrSchG 2020 betroffenen Betriebe.

[Tabelle 1 Übersicht über die Gesamtanzahl an Betrieben in Österreich mit untertägigen Arbeitsbereichen sowie Anzahl der im Rahmen des Projekts untersuchten Betriebe \[11\]](#)

Art des Betriebs	Gesamtanzahl der Betriebe in Ö	Untersuchte Betriebe
Bergwerke mit untertägigem Abbau	22	5
Schaubergwerke	29	8
Schauhöhlen	32	5
Heilstollen	5	1
Tagbaubetriebe mit untertägigen Einrichtungen	25	-
Sonstige Nutzungen von Grubenbauen*	13	-
Kraftwerksanlagen	unbekannt	2
Sonstige untertägige Arbeitsbereiche**	unbekannt	2

*Beispielsweise Pilzzuchtanlagen (s. g. „Stollenpilze“) oder Lagerstätten für die Reifung von Käse oder Whiskey. In der Regel geht es dabei um die Nutzung des homogenen Mikroklimas

im Stollen selbst, welches (fast) keinen tages- oder jahreszeitlichen Schwankungen ausgesetzt ist.

******Unter sonstige untertägige Arbeitsbereiche fallen alle Arbeitsbereiche, die den angeführten Kategorien nicht zuzuordnen sind, wie beispielsweise Tunnelbaustellen oder unterirdische Weinkeller.

Für die Auswahl der Betriebe wurden folgende organisatorische bzw. fachlich interessante Kriterien einbezogen:

- Künstliche Bewetterung
- Bereits bekannte erhöhte Radonkonzentrationen, da bei höheren Radonwerten geringere Messunsicherheiten zu erwarten sind und dadurch der Einfluss verschiedener Faktoren auf die Radonkonzentration besser evaluierbar wird
- Permanente Stromversorgung mit 220V Spannung unter Tage zum Einsatz bestimmter Messgeräte
- Bereitschaft der Betriebe, sich an dem Projekt zu beteiligen
- Schaubergwerke mit hoher Frequenz an Fremdbefahrungen
- Standorte in verschiedenen geografischen Regionen bzw. geologischen Zonen Österreichs gemäß der geologischen Übersichtskarte der Republik Österreich [19]
- Untertägige Wasservorkommen, um deren Einfluss auf die Radonkonzentration zu untersuchen

Nachdem die Erfüllung der oben genannten Kriterien per se einer repräsentativen Auswahl an Projektpartner entgegenspricht, wird an dieser Stelle klar festgehalten, dass es sich nicht um eine repräsentative Auswahl für alle untertägigen Arbeitsbereiche aus ganz Österreich handelt. Das Ziel, in jeder der oben genannten Kategorien zumindest fünf teilnehmende Betriebe zu gewinnen, wurde erreicht. Insgesamt konnten vier Betriebe bzw. Betriebsstandorte, in denen eine künstliche Bewetterung zum Einsatz kommt, in das Projekt aufgenommen werden.

Aufgrund des begrenzten Projektzeitraums konnten insbesondere in der Kategorie DIV nicht alle für das Projekt in Betracht kommenden Betriebe als Projektpartner aufgenommen werden.

2.3 Durchführung der Messungen

Die eingesetzten Messgeräte pro Betriebsstandort sowie eine grobe Übersicht über die jeweiligen Messzeiträume und das Datum der Ortseinsicht sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Das für die Projektpartnerbetriebe zusammengestellte Übersichtsinformationsblatt zu den eingesetzten Messgeräten befindet sich in Anhang B. An allen 23 Betriebsstandorten wurde die mittlere Radon-Aktivitätskonzentration entweder mit einer passiven Zweimonatsmessung im Messzeitraum (15.4. – 15.10.) laut RnV im Rahmen des Projekts erhoben, oder es lag bereits ein aktueller Prüfbericht über die Erstmessung gemäß § 100 StrSchG 2020 vor. Ab April 2024 kamen für die noch offenen Zweimonatsmessungen bei insgesamt 14 der 23 ausgewählten Betriebsstandorte passive Raduet-Detektoren nach dem Kernspurverfahren (KSV) zum Einsatz, welche neben der Radonkonzentration auch die Thoronkonzentration messen. An insgesamt 19 Betriebsstandorten wurden zusätzlich zu den passiven Messungen auch aktive Messungen mit elektronischen Messgeräten durchgeführt. Der typische Einsatz im Projekt erfolgte für die zeitaufgelösten Radonmessungen mittels Alpha E für zwei bis drei Monate. An einigen Betriebsstandorten wurden an einzelnen Messpunkten die zeitaufgelösten Radonmessungen auch für längere Zeiträume durchgeführt, um jahreszeitliche Verläufe zu untersuchen. Für die Messungen mittels AlphaGuard (AG) mit Alpha PM und EQF von Radon, Thoron und deren Folgeprodukten war der gewählte Messzeitraum pro Betriebsstandort ca. zwei Wochen. Diese Zeitspanne wurde so gewählt, um einerseits durch eine nicht zu lange Messdauer die nur in begrenzter Anzahl verfügbaren speziellen Messgeräte an fast jedem Standort einzusetzen. Andererseits sollte die Messdauer lange genug sein, um den täglichen und wöchentlichen Verlauf der Messwerte zu erfassen. Insgesamt wurden 13 der oben genannten Betriebsstandorte im Projektzeitraum besichtigt bzw. zum Installieren der größeren elektronischen Messgeräte (EQF, AG, Alpha PM) besucht. An diesen Standorten wurden zusätzlich die Radonfolgeprodukte gemessen. Eine besondere Herausforderung stellte die Auswahl der repräsentativen Messpunkte in Gruben mit aktivem Bergbau mit Dimensionen im Kilometerbereich dar.

Die Messreihen wurden als Grundlage zur Evaluierung der verschiedenen Einflussfaktoren auf die Radonkonzentration unter Tage verwendet und sind ausgewählt in den jeweiligen Kapiteln abgebildet.

Tabelle 2 Übersicht der in den Betriebsstandorten durchgeführten Messungen

Betrieb	Ortseinsicht	Messgerät	2023						2024								
			Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
BW_01	06.09.2023	EQF 3220															
		AG+AlphaPM															
		AlphaGuard															
		AlphaE															
		AlphaE Langzeit															
		KSV Detektoren															
BW_02	16.11.2023	EQF 3220															
		AG+AlphaPM															
		AlphaE															
		KSV Detektoren 1															
		KSV Detektoren 2															
BW_03	08.04.2024	AlphaGuard															
		AlphaE															
		KSV Detektoren															
		Personendosimetrie															
BW_04	28.05.2024	AG+AlphaPM															
		AlphaE															
		KSV Detektoren															
		Personendosimetrie															
BW_05	02.07.2024	AlphaGuard															
		AlphaE															
		KSV Detektoren															
		Personendosimetrie															
SBW_01	07.09.2023	EQF 3220															
		AG+AlphaPM															
		AlphaGuard															
		AlphaE															
		AlphaE Langzeit															
		KSV Detektoren															
SBW_02	27.09.2023	EQF 3220															
		AlphaE															
		KSV Detektoren 1															
		KSV Detektoren 2															
SBW_03	08.08.2023 27.05.2025	EQF 3220															
		AlphaGuard															
		AlphaE															
		KSV Detektoren 1															
		KSV Detektoren 2															
		Personendosimetrie															
SBW_04	27.09.2023	AG+AlphaPM															
		AlphaGuard															
		AlphaE															
		KSV Detektoren 1	Außerhalb des Projektzeitraums: 19.04.22 - 22.06.22														
		KSV Detektoren 2															
		Personendosimetrie															

Betrieb	Ortseinsicht	Messgerät	2023						2024								
			Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
SBW_05	08.04.2024	EQF 3220															
		AlphaE															
		KSV Detektoren 1	Außerhalb des Projektzeitraums: 18.07.22 - 19.09.22														
		KSV Detektoren 2															
SBW_06		KSV Detektoren 1	Außerhalb des Projektzeitraums: Einmonatsmessung im Sommer 2014														
		KSV Detektoren 2	Außerhalb des Projektzeitraums: 18.09.19 - 18.10.19														
		KSV Detektoren 3															
SBW_07		KSV Detektoren 1	Außerhalb des Projektzeitraums: Einmonatsmessung im Sommer 2014														
		KSV Detektoren 2	Außerhalb des Projektzeitraums: 18.09.19 - 18.10.19														
		KSV Detektoren 3															
SBW_08		KSV Detektoren 1	Außerhalb des Projektzeitraums: Einmonatsmessung im Sommer 2014														
		KSV Detektoren 2	Außerhalb des Projektzeitraums: 18.09.19 - 18.10.19														
		KSV Detektoren 3															
SH_01		AlphaE															
		KSV Detektoren															
SH_02		KSV Detektoren															
SH_03		AlphaE															
		KSV Detektoren															
SH_04		AlphaE															
		KSV Detektoren															
SH_05		AlphaE															
		KSV Detektoren															
DIV_01	15.01.2024	EQF 3220															
		AG+AlphaPM															
		AlphaE															
		KSV Detektoren 1															
		KSV Detektoren 2															
DIV_02	07.05.2024	EQF 3220															
		AlphaE															
		KSV Detektoren 1															
		KSV Detektoren 2															
		Personendosimetrie															
DIV_03	06.05.2024	EQF 3220															
		AG+AlphaPM															
		KSV Detektoren 1															
		Personendosimetrie															
DIV_04		AlphaE	Außerhalb des Projektzeitraums: 18.10.22 - 19.12.22														
		KSV Detektoren	Außerhalb des Projektzeitraums: 18.10.22 - 19.12.22														
DIV_05		AlphaE															
		KSV Detektoren 1	Außerhalb des Projektzeitraums: 06.12.21 - 08.06.22														
		KSV Detektoren 2															

Daten zu standortspezifischen Temperaturverläufen der Außentemperatur

Um den Einfluss der natürlichen Wetterströme auf die Radonkonzentrationen an verschiedenen Messorten in der Grube evaluieren zu können, musste die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außentemperatur als Haupteinflussfaktor auf den Grad der natürlichen Bewetterung miteinbezogen werden. Da die Innentemperatur unter Tage zum einen weitgehend konstant ist und zum anderen durch die aktiven Radonmessgeräte mitaufgezeichnet wurde, benötigte man noch Daten zum Verlauf der Außentemperatur.

Die benötigten Datensätze zum Verlauf der Außenlufttemperatur stammen aus dem INCA-System der GeoSphere Austria und konnten für die Standorte der untersuchten Betriebe auf der Internetseite

<https://dataset.api.hub.geosphere.at/app/frontend/raster/historical/inca-v1-1h-1km>

kostenlos abgerufen werden. Es handelt sich dabei um modellierte Daten. Die in diesem Datensatz enthaltenen Analysen haben eine räumliche Auflösung von 1 km x 1 km und eine zeitliche Auflösung von 1 Stunde. Die Orographie des Modells ist via Bulk-Download abrufbar. Verwendet wurde jeweils der Rasterblock, in welchem sich das Mundloch des Hauptstollens befindet.

2.4 Methodik der Dosisabschätzung und -ermittlung

Eine **Dosisabschätzung** für die Beschäftigten ist in Österreich verpflichtend vorgeschrieben, wenn die Radonkonzentration trotz umgesetzter Optimierungsmaßnahmen in einem oder mehreren Arbeitsbereichen weiterhin über dem Referenzwert von 300 Bq/m^3 liegt. Der Zweck einer Dosisabschätzung ist es, abzuschätzen, ob es bei der jeweils vorherrschenden mittleren Radonkonzentration und den jeweiligen Aufenthaltszeiten zu einer unangemessenen Dosis für die Beschäftigten kommen kann. Folgende Faktoren werden bei der Abschätzung der effektiven Dosis berücksichtigt:

- Mittlere Radonkonzentration in der Luft am jeweiligen Arbeitsplatz [Bq/m^3]
- Aufenthaltszeit pro Jahr an dem jeweiligen Arbeitsplatz [h]
- Dosiskoeffizient gemäß RnV und ICRP 137

Als Jahresarbeitszeit werden für eine Vollzeitkraft 1.680 Stunden angenommen. Zur Durchführung der Dosisabschätzung von Beschäftigten in Schauhöhlen und Schaubergwerken erfolgt ein Aufsummieren der jeweiligen Radonexpositionen entlang des Führungsweges multipliziert mit der durchschnittlichen Anzahl an Führungen pro Jahr. Berücksichtigt werden ebenso die Aufenthaltszeiten unter Tage für die regelmäßig anfallenden Reparatur- und Wartungsarbeiten. Abgefragt wurden die geschätzten jährlichen Aufenthaltszeiten unter Tage zusammen mit anderen für das Projekt relevanten Daten (Saisonzeiten, Betriebszeiten der künstlichen Bewetterungsanlage, usw.).

Zur **Dosisermittlung** (Personendosimetrie) kamen personenbezogene Messverfahren zum Einsatz. Die Personendosimetrie liefert im Vergleich zur Dosisabschätzung wesentlich exaktere Ergebnisse, ist aber in ihrer Durchführung dafür deutlich aufwendiger. Die entsprechenden Messungen wurden im Rahmen des Projektes mit dem Kernspurverfahren durchgeführt. Durchgeführt wurde die Personendosimetrie im Rahmen des Projektes in sechs ausgewählten Betrieben über einen Messzeitraum von zwei bis drei Monaten für je zwei Beschäftigte pro Betrieb. Zum Einsatz kamen je ein Personenexposimeter und ein Referenzexposimeter pro Beschäftigte:m:r. Das Personenexposimeter wird von der Person außen an der Kleidung getragen, wenn diese sich im untertägigen Arbeitsbereich aufhält. Die restliche Zeit wird es an einen Ort mit möglichst niedriger Radonkonzentration (z. B. im Handschuhfach eines Autos) beim so genannte Referenzexposimeter gelagert. Aus der

Differenz der Radonexposition der beiden Exposimeter während des Messzeitraums kann die Radonexposition sowie die entsprechende Dosis des Beschäftigten während der Aufenthaltszeiten unter Tage ermittelt werden. Die vorbereiteten Messprotokolle wurden entsprechend ausgefüllt und die jeweiligen Aufenthaltszeiten unter Tage notiert.

Das angewandte Berechnungsverfahren für die Dosisabschätzung basiert auf den Vorgaben aus nachfolgend angeführten Dokumenten:

- Radonschutzverordnung
- ICRP 137
- ÖNORM S 5223 [20]
- Prüfvorschrift PV_9123 der AGES GmbH [21]
- Radiation Protection 193 Annex 2 [22]

Für die Abschätzung der Dosis für Beschäftigte in Bergwerken mit aktivem untertägigem Abbau, Schaubergwerken und sonstigen untertägigen Arbeitsbereichen wurde analog den Vorgaben der ICRP 137 der „Standard“-Dosiskoeffizient (DK) von $6,7 \cdot 10^{-6} \text{ mSv (Bq h m}^{-3})^{-1}$ zur Berechnung der abgeschätzten Dosis verwendet. Für die Abschätzung der Dosis für Beschäftigte in Schauhöhlen wurde analog den Vorgaben der ICRP 137 der „erhöhte“ DK ($1,34 \times 10^{-5} \text{ mSv (Bq h m}^{-3})^{-1}$) zur Berechnung der abgeschätzten Dosis verwendet. Zusätzlich wurde anlassbezogen aufgrund der berechneten GGF für aktive Bergwerke ebenfalls eine hypothetische Dosisabschätzung mit dem „erhöhten“ DK durchgeführt.

3 Ergebnisse

3.1 Radonkonzentrationen in untertägigen Arbeitsbereichen

Insgesamt nahmen 19 Betriebe mit 23 Betriebsstandorten als Projektpartner an dem vorliegenden Projekt teil. Im nachfolgenden Diagramm in Abbildung 1 sind die maximalen Messwerte der einzelnen Standorte, ebenso wie die mittlere Radonkonzentration aller Messorte des jeweiligen Betriebsstandortes sowie der niedrigste Messwert pro Standort abgebildet. Die dargestellten Werte unterliegen alle einer Messunsicherheit. Bei den passiven KSV-Detektoren liegt diese zwischen 15 bis 20 % des Messwertes. Um die Darstellungen anschaulicher zu gestalten, wird die Messunsicherheit weder in den Diagrammen noch in den Tabellen oder der Berechnung von Mittelwerten berücksichtigt. Es zeigt sich, dass mit Ausnahme des Betriebsstandortes DIV_03, einem Kraftwerksstollen, bei dem die zusätzliche Radonexhalation aus dem vorhandenen Wasser einen entscheidenden Beitrag zur Radonkonzentration in der Atemluft liefert, alle Messwerte unterhalb 5.000 Bq/m³ liegen.

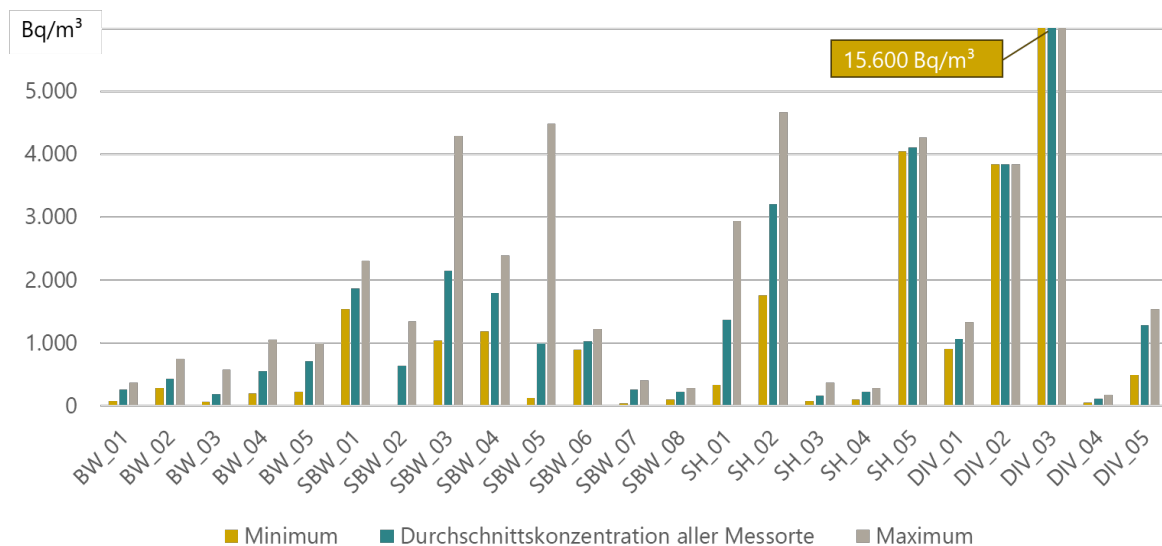


Abbildung 1 Minimale, mittlere und maximale gemessene Radonkonzentrationen an allen teilnehmenden Betriebsstandorten mittels passiver Zweimonatsmessung

Aktiver Bergbau mit untertägigem Abbau (BW)

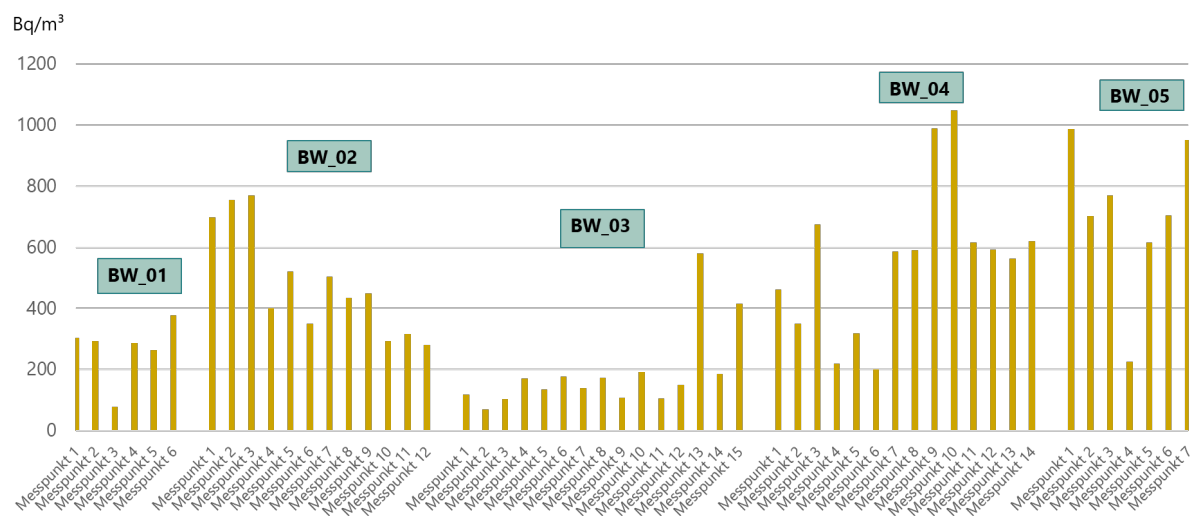


Abbildung 2 Gemessene Radonkonzentrationen an allen Messpunkten der teilnehmenden Bergwerke mittels passiver Zweimonatsmessung

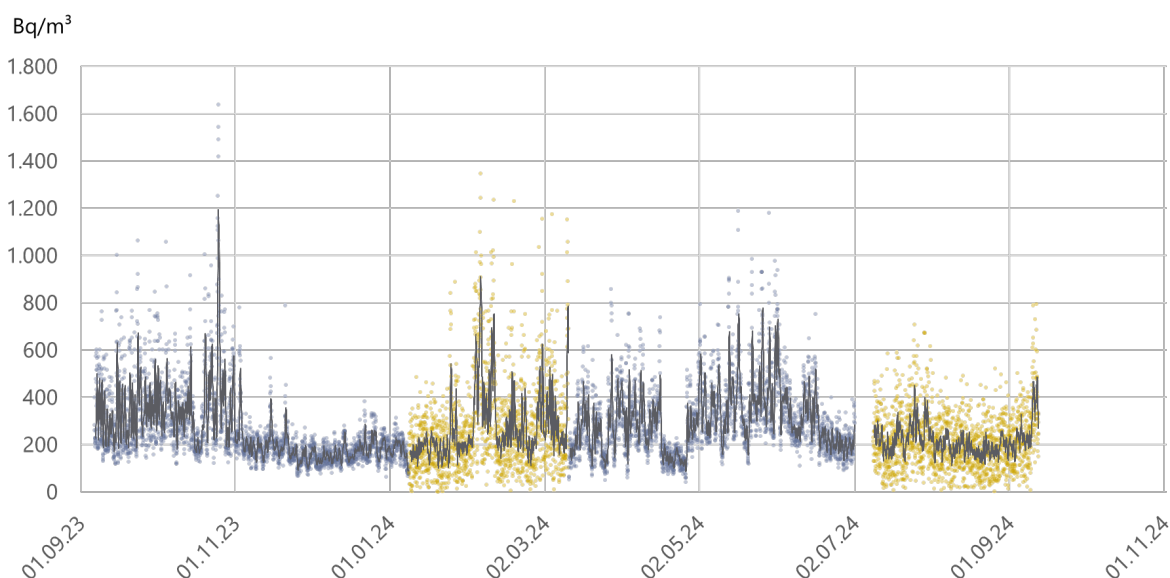


Abbildung 3 Jahresverlauf der Radonkonzentration in einer untertägigen Werkstatt unmittelbar neben dem Abbaubereich im BW_01

Die Zusammenfassung der gemessenen Radonkonzentrationen in untertägigen Gruben mit aktivem Abbau zeigt, dass die Bandbreite der Ergebnisse zwar schwankt, aber bei weitem nicht so stark wie bei den Schaubergwerken und Schauhöhlen. Der höchste ermittelte

Messwert liegt im Bergwerk BW_04 mit einer Radonkonzentration von 1.049 Bq/m³ (Abbildung 2).

Im Bergwerk BW_01 konnte, wie in Abbildung 3 ersichtlich, im Rahmen der durchgeführten seriellen Messungen mittels Alpha E-Messgeräte über einen Messzeitraum von zwölf Monaten eine Abweichung von dem im Allgemeinen zu erwartenden Jahresgang festgestellt werden. Die in [5] beschriebene Pilotstudie beschreibt den für Gruben typischen Jahresverlauf der Radonkonzentration folgendermaßen:

„Im Winter fällt die Radonkonzentration mit einziehendem Wetter in Bereichen mit guter natürlicher Bewetterung auf sehr niedrige Werte. Warme Tage bewirken eine Wetterstromumkehr, durch die es zu Konzentrationsspitzen kommen kann. In gering bewetterten Bereichen herrscht in der Regel eine mittlere Radonkonzentration vor.

Im Frühling und im Herbst, wenn die Außentemperatur meist im Bereich der Innentemperatur liegt, zeigt der Tagesgang der Radonkonzentration bei guter Bewetterung starke Schwankungen. Für kurze Perioden können bei entsprechender Wetterlage Situationen wie im Winter oder im Sommer entstehen.

Im Sommer kommt es oft zu anhaltend warmen Außentemperaturen und Phasen, in denen auch über Nacht die Außentemperatur konstant über der Innentemperatur in der Grube liegt. Diese bewirken im Bereich des Hauptstollens einen ausziehenden Wetterstrom. Es kommt daher in diesen Bereich (beispielsweise entlang des Führungsverlaufes von Schaubergwerken) in der Regel gemäß Gruber et al [5] zu konstant hohen Radonkonzentrationen mit mäßigem Tagesgang. In Systemen mit starker natürlicher Bewetterung treten Konzentrationsspitzen auf, wenn der Wetterstrom bei Temperaturgleichheit innen und außen versiegt.“

Die unterschiedliche Einfärbung der Punkte in Abbildung 3 stellt die vier Messperioden mit unterschiedlichen Alpha E-Messgeräten dar, an deren Übergang die Geräte getauscht wurden. Anfang Juli kam es aus organisatorischen Gründen zu einer kurzen Lücke in der Messreihe. In diesem Beispiel zeigten sich starke Schwankungen der Radonkonzentration auch im Winter (Ende Jänner – Ende März) mit einer größeren Bandbreite als jener im darauffolgenden Frühjahr. Ab Mitte Juni lassen die Schwankungen dann deutlich nach und die Radonkonzentration pendelt sich auf einem konstant niedrigen Niveau ein. Der Mittelwert der Zweimonatsmessung mittels KSV-Detektoren lag an diesem Messpunkt bei 303 Bq/m³.

Schaubergwerke (SBW)

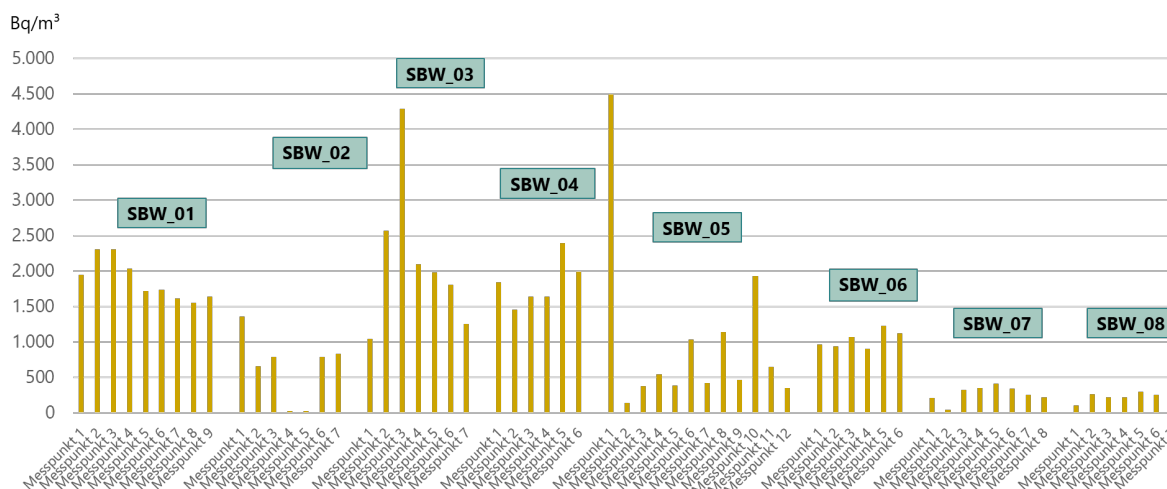


Abbildung 4 Gemessene Radonkonzentrationen an allen Messpunkten der teilnehmenden Schaubergwerke mittels passiver Zweimonatsmessung

Aus der oben abgebildeten Zusammenfassung aller Messpunkte (Abbildung 4) geht hervor, dass es in zwei der acht untersuchten Schaubergwerke (SBW_03 und SBW_05) zu sehr hohen Radonkonzentration an einzelnen Messorten kommt. Insbesondere im SBW_05 zeigt sich eine sehr große Bandbreite (132 – 4.490 Bq/m³) von gemessenen Radonkonzentrationen, wobei in diesem Fall überraschenderweise die höchste Radonkonzentration nur wenige Meter nach dem Mundloch gemessen wurde. Daraus kann der Rückschluss gezogen werden, dass die aktuell eingesetzte Messmethodik - immer mehrere Messpunkte entlang des Führungsverlaufs zu messen - sinnvoll ist. Außerdem zeigt sich dadurch, dass es bei der Beurteilung der Radonsituation in Schaubergwerken zu Abweichungen von den zu erwartenden Verhältnissen, nämlich, dass die höchsten Radonkonzentrationen tief im Inneren der Grube auftreten, kommen kann.

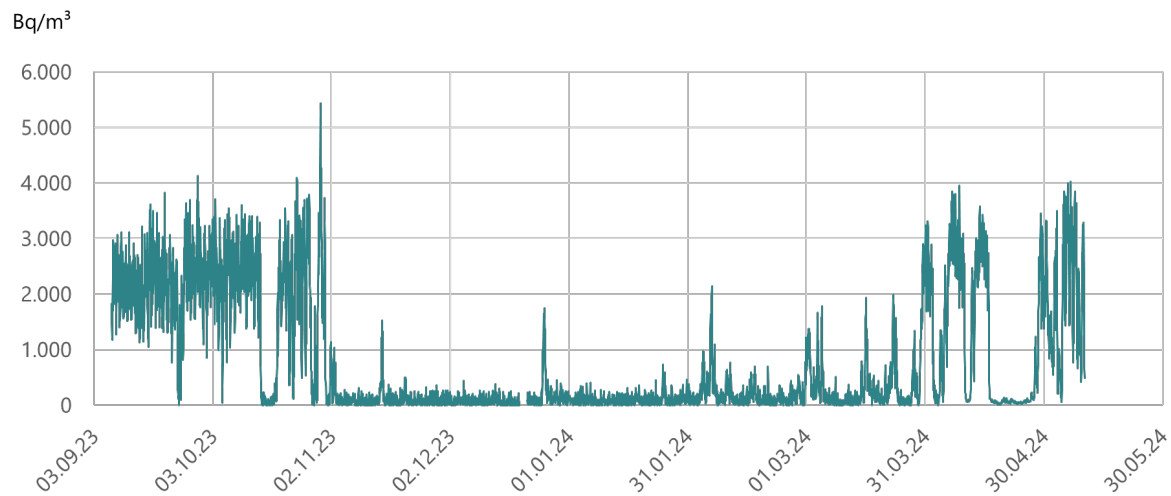


Abbildung 5 Achtmonatiger Verlauf der Radonkonzentration unmittelbar am Führungsverlauf im SBW_01

In Abbildung 5 wird der Verlauf der Radonkonzentration im SBW_01 am Messpunkt 1 während eines Messzeitraums von acht Monaten dargestellt. Die Radonkonzentration ist im Winter konstant niedrig, während es im Herbst und im Frühjahr zu starken Schwankungen und deutlich höheren Radonkonzentrationen kommt. Dies entspricht den Ergebnissen von Gruber et al [5].

Schauhöhlen (SH)

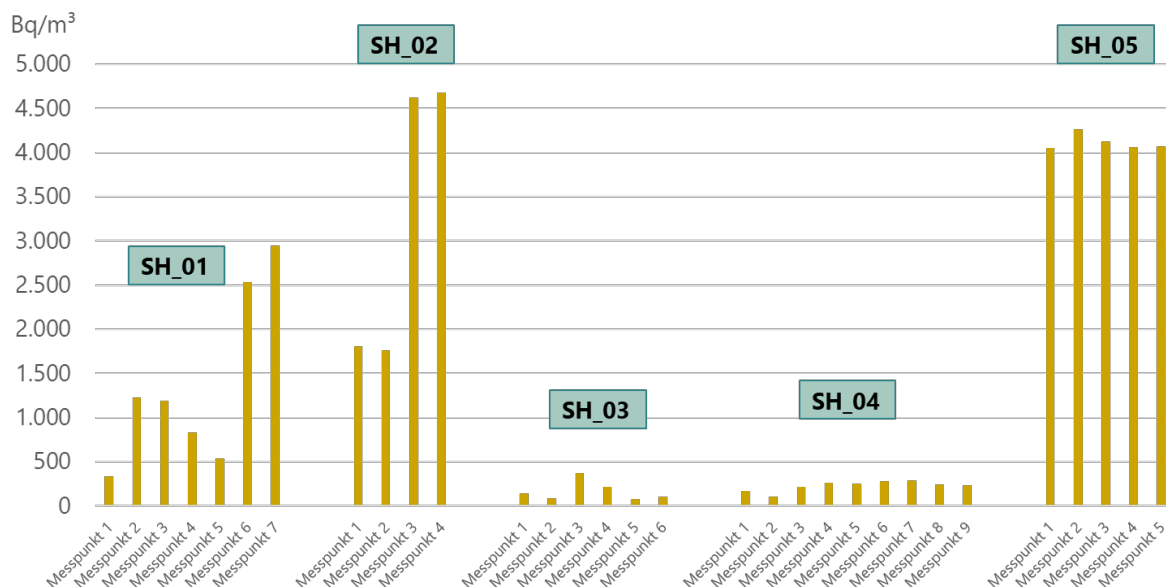


Abbildung 6 Gemessene Radonkonzentrationen an allen Messpunkten der teilnehmenden Schauhöhlen mittels passiver Zweimonatsmessung

Abbildung 6 zeigt eine Zusammenstellung der Ergebnisse der passiven Radonmessungen in den fünf untersuchten Schauhöhlen. Die in [5] aufgestellte These, dass Schauhöhlen in der Regel niedrige Radonkonzentrationen aufweisen, konnten nicht bestätigt werden. In den beiden Schauhöhlen SH_02 und SH_05 ergab die Messung Radonkonzentrationen im mittleren vierstelligen Bereich. Anhand der Ergebnisse in Abbildung 6 ist außerdem ersichtlich, dass entlang des Führungsverlaufs innerhalb einer Schauhöhle sowohl sehr unterschiedliche Radonkonzentrationen möglich sind (SH_01 und SH_02), es aber auch weitgehend zu homogenen Radonkonzentrationen kommen kann (SH_03-SH_05).

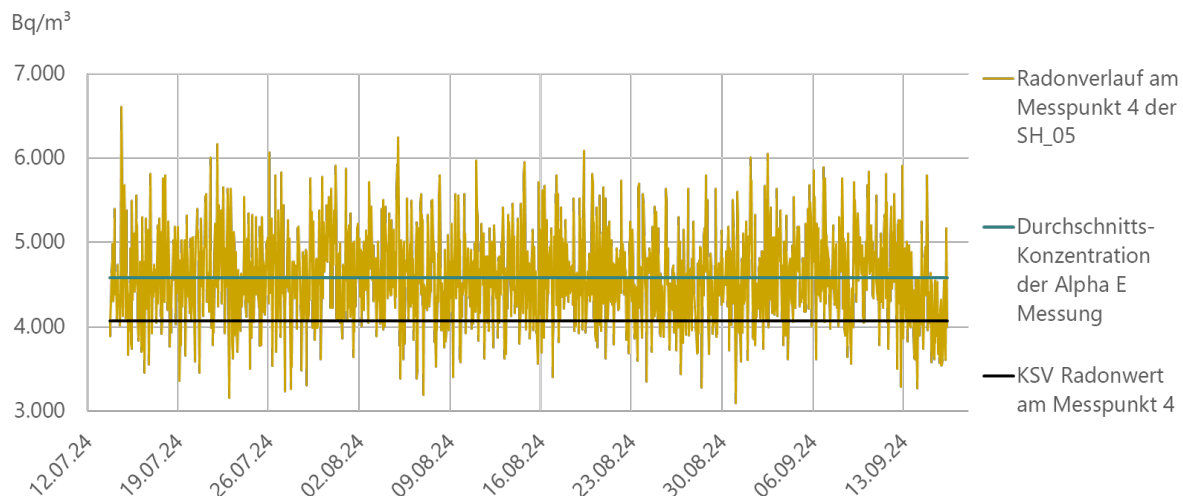


Abbildung 7 Zweimonatiger Verlauf der Radonkonzentration am Messpunkt 4 der SH_05 im Vergleich zum Ergebnis der passiven Radonmessung am selben Messort und während desselben Messzeitraums

Außerdem konnten in den vier Schauhöhlen, bei denen neben den passiven Radondetektoren auch aktive, elektronische Radonmessgeräte zum Einsatz kamen, deren Ergebnisse verglichen wurden. Dadurch konnte die Eignung der verschiedenen Messgeräte für den doch sehr speziellen Einsatzbereich in Schauhöhlen evaluiert werden. Abbildung 7 zeigt den Verlauf der Radonkonzentration in der SH_05, welcher eine für die Sommermonate beachtliche Schwankungsbreite der Radonkonzentration zwischen ca. 3.000 Bq/m³ und 6.600 Bq/m³ aufweist. Das Ergebnis der passiven KSV-Messung, welche parallel am selben Messort stattgefunden hat, unterschreitet den Mittelwert der zeitaufgelöst erfassten Messwerte. Die Größe der Abweichung liegt allerdings im Bereich der Messunsicherheit beider zum Einsatz gebrachten Messgeräte.

Diverse andere untertägige Arbeitsbereiche (DIV)

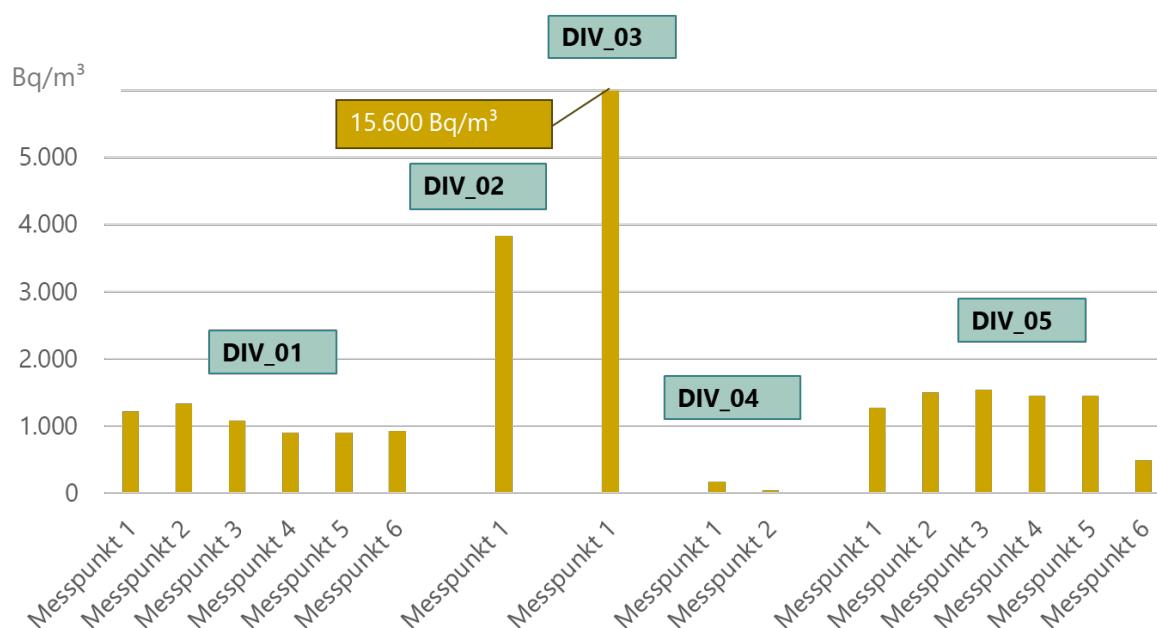


Abbildung 8 Gemessene Radonkonzentrationen an allen Messpunkten der teilnehmenden Betriebsstandorte der Kategorie DIV mittels passiver Zweimonatsmessung

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt eine Zusammenstellung der Ergebnisse der passiven Radonmessungen in den fünf untersuchten Arbeitsbereichen der Kategorie DIV. DIV_01 ist eine Weinlagerstätte unter Tage mit Führungsbetrieb, DIV_02 eine Speicherseemauer, DIV_03 ein Kraftwerksstollen, DIV_04 eine Tunnelbaustelle und DIV_05 ein Heilstollen. Bei den Betrieben DIV_02 – DIV_04 handelt es sich im Gegensatz zu den Gruben um räumlich überschaubare Arbeitsbereiche, welche mit nur jeweils einem bzw. zwei Detektoren gemessen wurden.

Dass es auch aufgrund der umgebenden Geologie (vorrangig Sandstein) unerwartet zu erhöhten Radonkonzentrationen unter Tage kommen kann, zeigen die Messungen im Betrieb DIV_01, durch welchen ein reger Führungsbetrieb stattfindet. Die durchgeführten vier Monatsmessungen an zwei unterschiedlichen Messorten, deren Ergebnisse in Abbildung 9 dargestellt sind, bestätigen dies. Auch die Auswertung der Raduet-KSV-Detektoren ergab an allen sechs Messorten eine mittlere Radonkonzentration, welche während des Messzeitraums über dem Referenzwert für Arbeitsplätze von 300 Bq/m³ lag, mit Werten zwischen 902 und 1.338 Bq/m³.

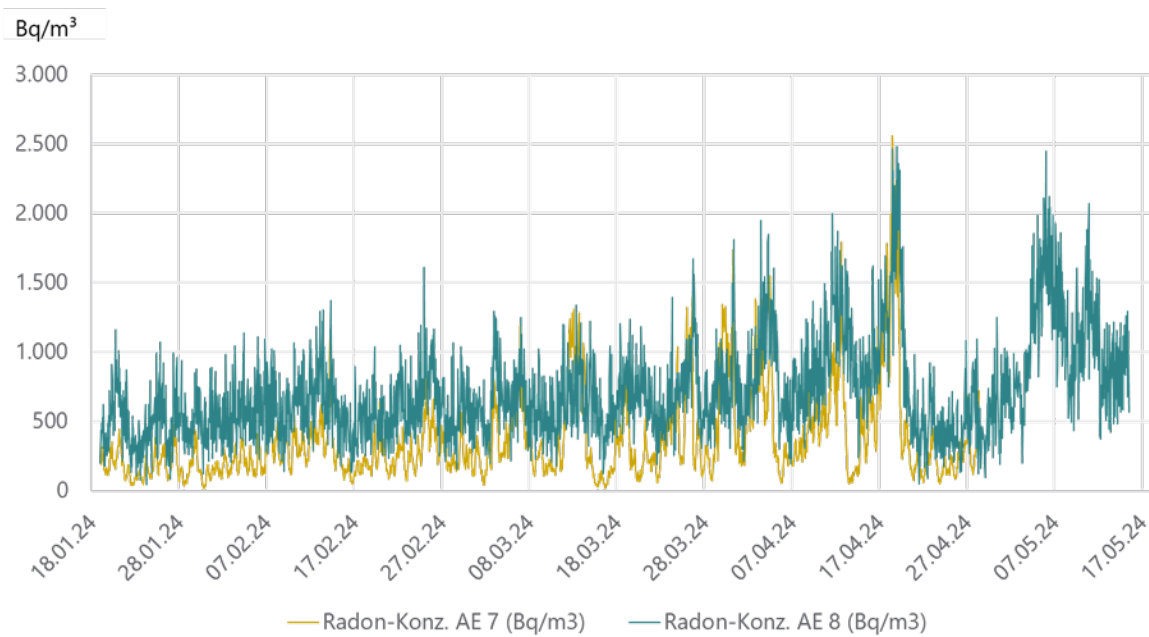


Abbildung 9 Viermonatiger Verlauf der Radonkonzentration im Betrieb DIV_01 an zwei Messorten

3.2 Einflussfaktoren auf die Radonkonzentration unter Tage

Außentemperatur

Bereits die Pilotstudie [5] zeigte, dass die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außentemperatur Wetterströme bedingt, die einen entscheidenden Einfluss auf die Radonsituation unter Tage haben. Generell ist die Radonkonzentration in der Grube bei ausziehendem Wetter höher als beim normalerweise Frischluft zuführendem „einziehenden Wetter“. Die natürliche Bewetterung einer Grube kann durch die Errichtung von senkrechten Wetterschächten an günstigen Stellen entscheidend verbessert werden. Es kann im Winter Ausnahmen davon geben, wenn Radon z.B. durch die vorhandenen Wetterströme aus der Tiefe nachgesogen wird und so lokal in einzelnen Stollen höhere Radonkonzentrationen entstehen. Bei ähnlichen Temperaturen außen und innen kommt es zu stagnierendem Wetter. Auf Grund der fehlenden Temperaturdifferenz entstehen nur geringe natürliche Wetterströme und die Radonkonzentration in der Grube kann dadurch ebenfalls ansteigen. Insbesondere, aber nicht ausschließlich, trifft dies in Fällen zu, in denen keine zusätzliche künstliche Bewetterung vorhanden ist. Wie in den nachfolgenden Beispielen dargestellt, folgt vor allem im Hochsommer die Radonkonzentration dem Temperaturverlauf (siehe Abbildung 10). Hohe Außentemperaturen, wie sie im Sommer vor allem in den Nachmittagsstunden vorkommen können, verursachen Peaks der Radonkonzentration unter Tage. Ebenso konnte festgestellt werden, dass es zu starken Schwankungen der Radonkonzentration an einzelnen Messorten kommen kann. Wie in Abbildung 11 dargestellt, kann es aber im selben Schaubergwerk an unterschiedlichen Messorten zeitgleich zu genau dem gegenteiligen Effekt kommen, dass bei Anstieg der Außentemperatur die vorherrschende Radonkonzentration absinkt und während der Außentemperaturspitzen Tiefstwerte erreicht. Dies lässt sich dadurch erklären, dass durch den erhöhten Wetterstrom in einem anderen Teil der Grube die Frischluftzufuhr durch das dort vorherrschende einziehende Wetter verstärkt stattfindet. Dadurch wird die vorhandene radonhaltige Luft mit der Frischluft vermischt, was eine Absenkung der Radonkonzentration in diesem Bereich zur Folge hat.

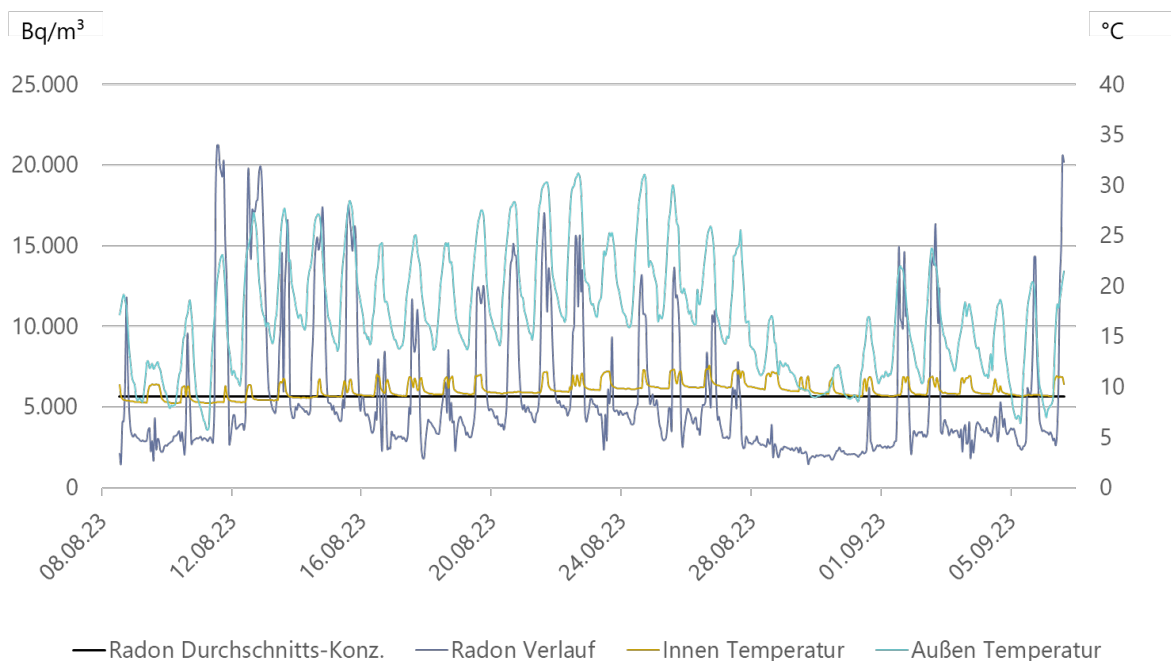


Abbildung 10 Vergleich des Radonkonzentrationsverlaufs und vorherrschenden Außentemperatur im oberen Stollen, ca. 200 m vor dem oberen Mundloch, im SBW_03 im Hochsommer 2023

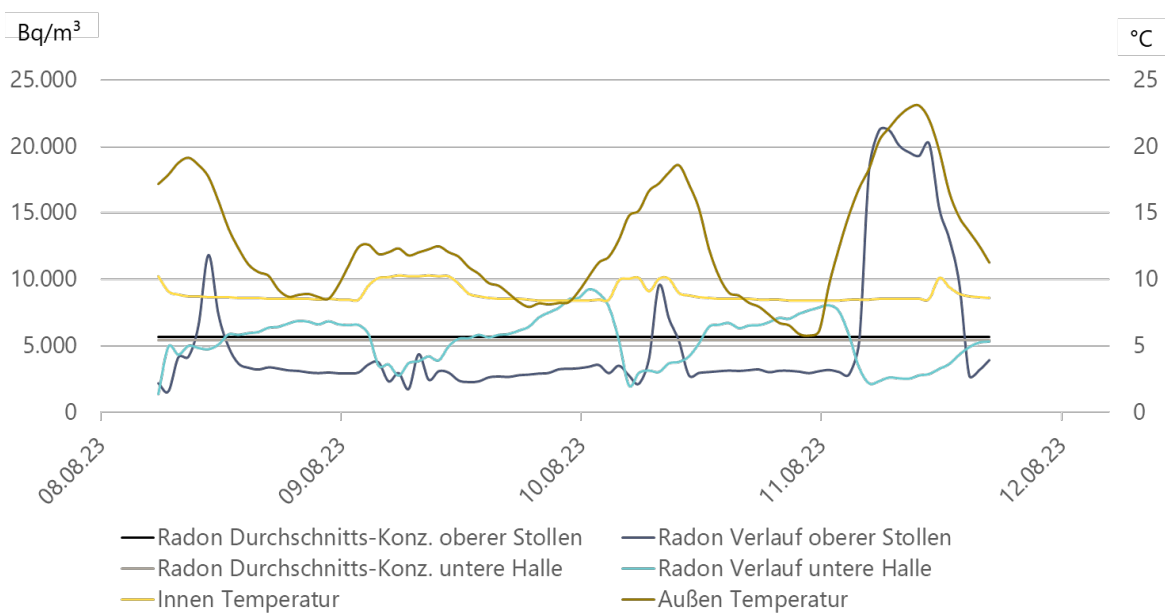


Abbildung 11 Vergleich des Radonkonzentrationsverlaufs "oben" und "unten" im SBW_03

Künstliche Bewetterung

Einleitend zu diesem Kapitel ist anzumerken, dass der Oberbegriff künstliche Bewetterung eine große Bandbreite von künstlichen, lüftungstechnischen Anlagen mit unterschiedlichsten Leistungen und den sich daraus ergebenden Luftwechselraten umfasst.

Bei den vier Betriebsstandorten mit künstlicher Bewetterungsanlage, welche im Rahmen des vorliegenden Projektes untersucht wurden, zeigte sich eine breite Varianz unterschiedlichster Anlagen zur künstlichen Bewetterung (Abbildung 12). Diese reichen von einem einfachen Ventilator, welcher die gesamte Grube mit Frischluft versorgte, bis zu einem verzweigten System aus flexiblen Lüftungsschläuchen, kombiniert mit mehreren äußerst leistungsstarken Lüftungsanlagen, vor deren Ausblasöffnungen man sturmartige Windstärken wahrnehmen kann. Über den gesamten Querschnitt von Schächten hochgezogene Wettertüren, welche sich aufgrund des vorherrschenden Unterdrucks nur schwer öffnen lassen, dienen zusätzlich der gezielten Beeinflussung der Wetterströme. Umso größer das Fördervolumen des zu gewinnenden Rohstoffes, desto leistungstärker ist in der Regel die Anlage zur künstlichen



Abbildung 12 Darstellung der Gebläse, Lüftungsschächte und -schläuche verschiedener künstlicher Bewetterungsanlagen

Bewetterung. Nichtsdestotrotz kommt es vor, dass die natürlichen Wetterströme vor allem bei Temperaturspitzen im Sommer überwiegen. Die starken natürlichen Wetterströme unter Tage werden dann bei hohen Temperaturdifferenzen zwischen Innen- und Außentemperatur durch den Betrieb der künstlichen Bewetterungsanlage nur marginal beeinflusst. Es hat sich außerdem herausgestellt, dass die verwendete Formulierung im § 6 RnV einen gewissen Interpretationsspielraum zulässt:

„Von den Bestimmungen gemäß § 100 StrSchG 2020 zur Erhebung der Radonexposition ausgenommen sind Arbeitsplätze gemäß § 98 Abs. 1 Z 2 StrSchG 2020, wenn eine dem Stand der Technik entsprechende oder aufgrund rechtlicher Vorgaben erforderliche Bewetterung betrieben wird und es sich dabei um eine künstliche Bewetterung handelt.“

Es ist für die Betreiber:innen nicht eindeutig, dass die künstliche Bewetterung immer dann, wenn sich Beschäftigte unter Tage aufhalten, tatsächlich in Betrieb sein muss. Bei den durchgeführten Erhebungen stieß man auf einen Betrieb, wo die künstliche Zufuhr von zu warmer, feuchter Luft im Sommer zu einem erheblichen Kondenswasserproblem führte. Dadurch sahen sich die Betreiber:innen gezwungen, den Ventilator an heißen Tagen abzuschalten. In einem anderen Betrieb, der sich gegen eine Teilnahme an dem Projekt entschied, wurde uns mitgeteilt, dass die künstliche Bewetterung nur dann läuft, wenn der natürliche Wetterstrom im Frühjahr und Herbst bei Außentemperaturen ähnlich der Innentemperatur stagniert.

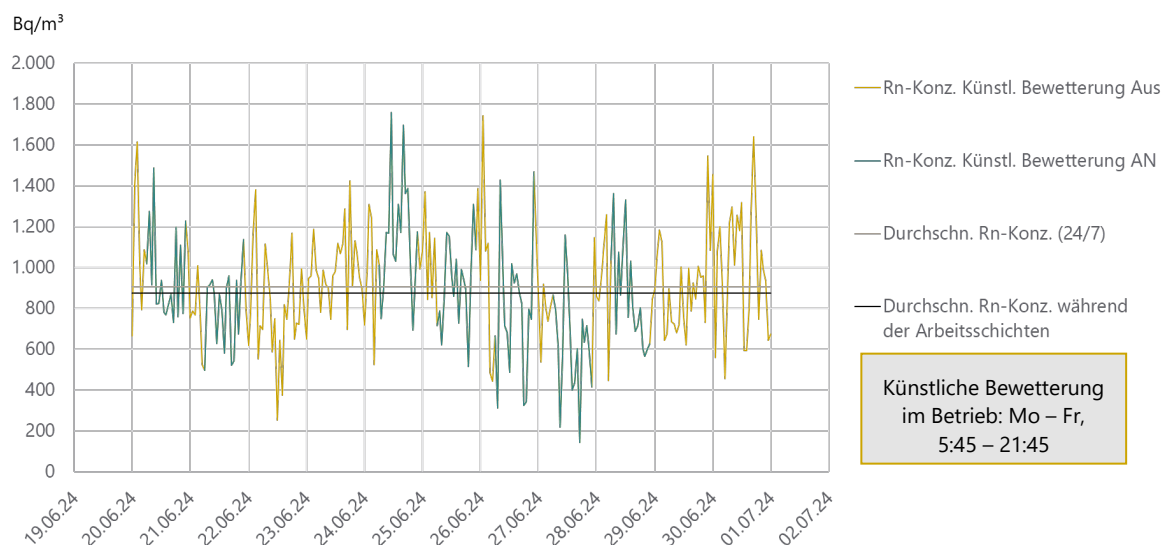


Abbildung 13 Verlauf der Radonkonzentration im BW_04

In Abbildung 13 ist der Radonkonzentrationsverlauf im BW_04 dargestellt. Kurz nach der jeweiligen Inbetriebnahme der künstlichen Bewetterung steigt die Radonkonzentration tendenziell an, bevor sie um die Mittagszeit herum wieder abfällt. Dass die Radonkonzentration während des Betriebs der künstlichen Bewetterungsanlage leicht unterhalb der mittleren Radonkonzentration während des gesamten Messzeitraums liegt, wird durch den Vergleich der jeweiligen Durchschnittskonzentrationen abgebildet.

In den Bergwerken BW_03 und BW_05 (Abbildung 14 und Abbildung 15) konnte ein deutlicher positiver Einfluss der künstlichen Bewetterung auf den Radonkonzentrationsverlauf beobachtet werden. Beim BW_03 handelt es sich um einen Mehrschichtbetrieb. Die künstliche Bewetterungsanlage ist an Werktagen von 4:00 morgens bis Mitternacht durchgehend in Betrieb. Während der beiden Wochenenden im Messzeitraum ist ein deutlicher Anstieg der Radonkonzentration feststellbar. Es kann davon ausgegangen werden, dass die mittlere Radonkonzentration ohne jegliche künstliche Bewetterung im Wesentlichen jener während dieser Wochenenden entsprechen würde. Die Radonkonzentration würde dann zumindest an dem untersuchten Messort über dem Referenzwert von 300 Bq/m³ liegen. Somit erfüllt in diesem Fall die künstliche Bewetterung ihre Funktion, welche ein Bestehen der entsprechenden Ausnahmeregelung gemäß § 6 RnV rechtfertigen würde.

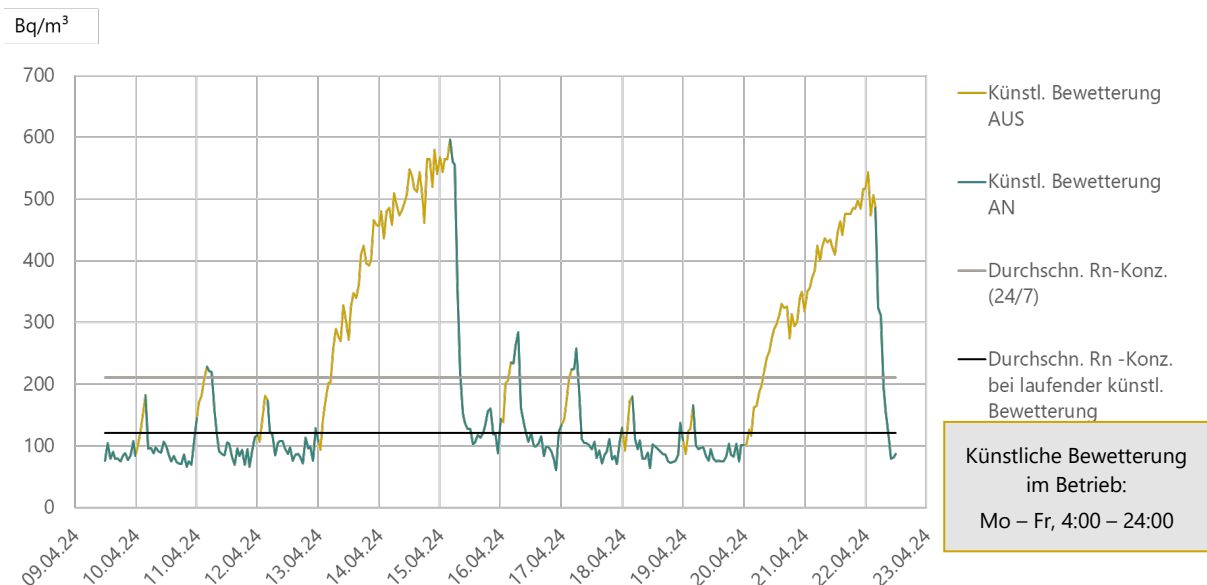


Abbildung 14 Verlauf der Radonkonzentration im BW_03

Im Falle von BW_05 (Abbildung 15) wurde ebenfalls ein positiver Einfluss der künstlichen Bewetterung nachgewiesen. Es handelt sich um einen untertägigen Abbau mit nur einer Arbeitsschicht. Die künstliche Bewetterung wird für die Tätigkeiten unter Tage von Montag bis Donnerstag jeweils um 6:00 morgens kurz vor dem Einfahren in Betrieb genommen und läuft bis der letzte Bergmann die Grube verlassen hat um ca. 15:00. Von Freitag bis Sonntag wird nicht eingefahren. Der positive Effekt der künstlichen Bewetterungsanlage auf die vorherrschende Radonkonzentration zeigt sich hier sehr deutlich.

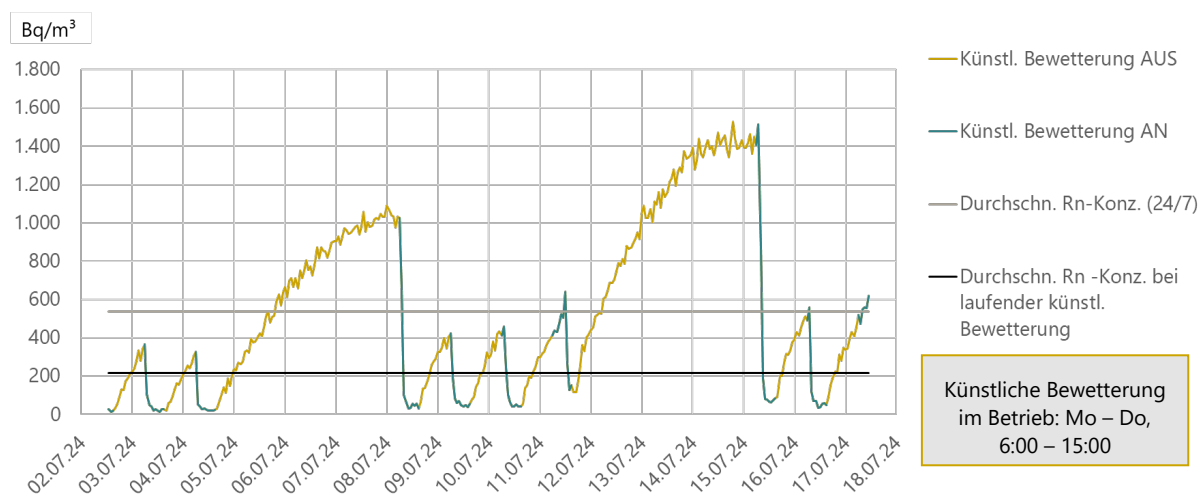


Abbildung 15 Verlauf der Radonkonzentration im BW_05

Die Laufzeiten der künstlichen Bewetterung / künstlichen Belüftung entsprechen in der Regel den Aufenthaltszeiten der Beschäftigten unter Tage.

Dass es aber von der vermeintlichen Optimierung der Radonsituation durch den Betrieb der künstlichen Belüftung auch Ausnahmen gibt, zeigt der unten dargestellte Verlauf der Radonkonzentration in einer vergleichsweise kleinen Grube mit nur wenigen Stollen und Schächten, welche allesamt fußläufig sind. Die gemessene Radonkonzentration unter Tage ist zwar generell gering, aber der Effekt der künstlichen Bewetterung ist hier entweder sogar gegenteilig oder im Vergleich zu dem Einfluss der vorhandenen natürlichen Wetterströme, welche die Radonkonzentration in den Morgenstunden ansteigen lassen, zu gering (siehe Abbildung 16).

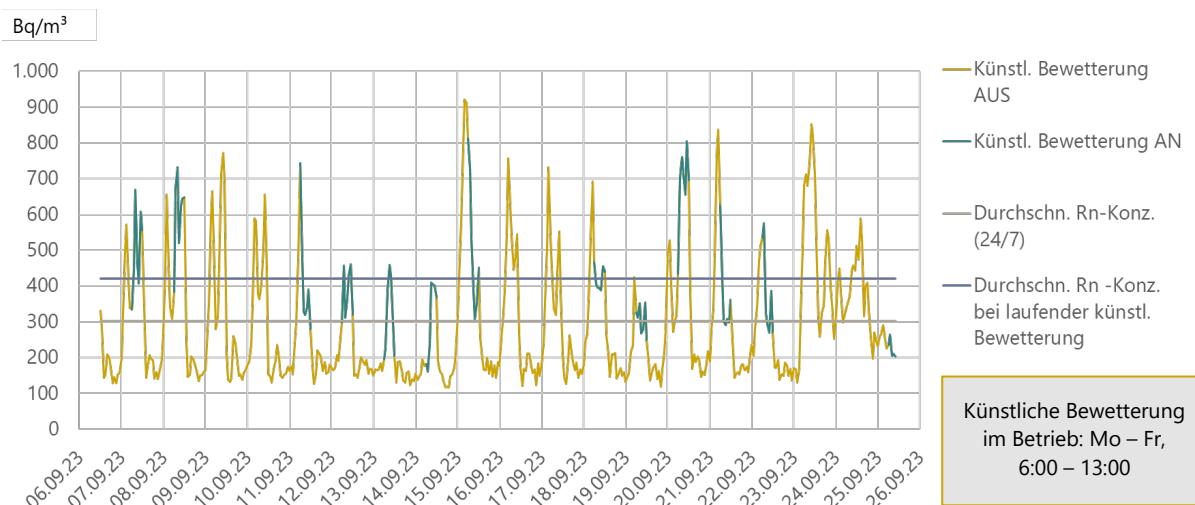


Abbildung 16 Verlauf der Radonkonzentration im BW_01

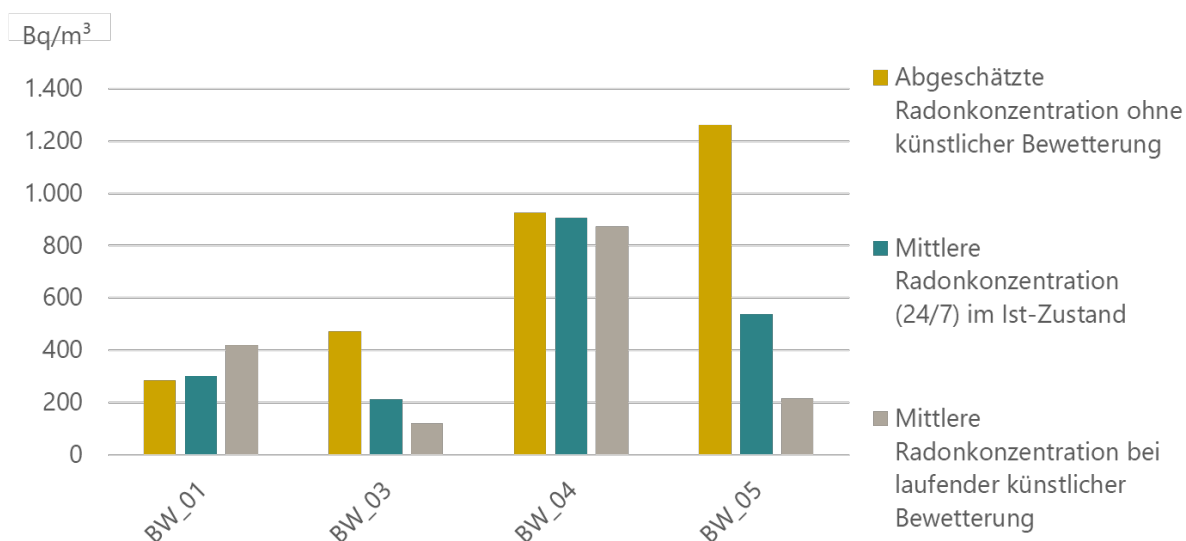


Abbildung 17 Mittlere Radonkonzentrationen mit und ohne künstliche Bewetterung in Betrieben der Kategorie BW

In Abbildung 17 ist der Einfluss der künstlichen Bewetterungsanlage auf die Radonkonzentration zusammengefasst. Es kann basierend auf dem Vergleich der Messzeiträume mit und ohne künstliche Bewetterung in Betrieb festgehalten werden, dass der Betrieb einer künstlichen Bewetterungsanlage sich in drei der vier untersuchten Betriebsstandorte (BW_02 – BW_04) positiv auf die Senkung der Radonkonzentration auswirkt. Angenommen wurde zur Abschätzung der Radonkonzentration ohne künstliche Bewetterung der mittlere Wert, welcher sich während der abgeschalteten, künstlichen

Bewetterung im Laufe der Wochenenden einstellt. Allerdings musste festgestellt werden, dass die Reduktion der Radonkonzentration unter Tage zumindest während des Messzeitraums zur Evaluierung (zwei bis drei Wochen) in einem dieser drei Betriebe zwar nachweisbar war, allerdings nicht in dem angenommenen, angestrebten Ausmaß. Die mittlere Radonkonzentration lag trotzdem deutlich über dem Referenzwert für Arbeitsplätze von 300 Bq/m³ im BW_04.

Im BW_01 kam es sogar zu einer Erhöhung der Radonkonzentration während der Aufenthaltszeiten (entsprechend dem Betrieb der künstlichen Bewetterungsanlage). Bei der mittleren Radonkonzentration während der Aufenthaltszeiten kam es im vorliegenden Fall zu einer Überschreitung des oben genannten Referenzwertes.

Außerdem zeigte sich, dass die künstlich herbeigeführte Reduktion der Radonkonzentration in den verschiedenen Arbeitsbereichen mehrere Stunden – je nach Luftvolumen und Länge der Stollen zwischen drei und fünf Stunden – in Anspruch nahm, bevor die gemessenen Radonwerte auf dem niedrigsten Niveau stagnierten. Daraus ist abzuleiten, dass zur optimalen Reduktion der Radonexposition der Beschäftigten die künstliche Bewetterungsanlage mit einer gewissen betriebsspezifischen Vorlaufzeit in Betrieb genommen werden sollte.

Wasserdurchflüsse und unterirdische Seen

Im Rahmen des vorliegenden Projekts, konnte ein **unterirdischer Kraftwerksstollen (DIV_03)**, welcher die Turbine sowie den Ablass aus dem zugehörigen Speicherbecken und Düker beherbergt, untersucht werden. Die dort stattfindende Becken- und Düker-Restentleerung wurde vom Betreiber selbst als untertägiger Arbeitsbereich des zuständigen Beckenwärters klassifiziert und bereits 2023 einer regulären Radonmessung durch eine ermächtigte Überwachungsstelle unterzogen. Die mittlere Radonkonzentration lag bei 15.400 Bq/m³. Ein Spezifikum stellt hier die vorgefundene Situation dar, dass der hohe Radonwert maßgeblich von dem offen über zwei Schächte abfließenden Wasser bedingt wird. Das Wasser selbst wurde beprobt, die Radonkonzentration im Wasser beträgt 22 Bq/l. Dies bestätigt die bereits in Wasserversorgungsanlagen gewonnen Erfahrungswerte, dass auch eine geringe Radonkonzentration im Wasser zu einer deutlich erhöhten Radonkonzentration in der Umgebungsluft führen kann. Es entsteht dabei eine ähnliche Situation wie in einem

Quellsammelschacht, der Wasserstrom läuft durchgehend und das Wasser „plätschert“ in den Schächten nach unten und hat dabei dauerhaften Kontakt mit der Umgebungsluft, was wiederum zu einer hohen Radonexhalation aus dem Wasser in die Luft führt. Im Zuge der durchgeführten aktiven Kurzzeitmessungen vor Ort wurden Spitzen bis zu 43.000 Bq/m^3 unmittelbar im geöffneten Schacht gemessen. Die zur Abdeckung des Schachtes benutzte Pressspanplatte stellt für das im Schacht exhalierte Radongas keine ausreichende Barriere dar. Somit hat man es hier mit einer Situation zu tun, bei der die deutlich erhöhten Radonwerte nicht nur aus dem umgebenden Gestein des Stollens stammen, sondern auch aus dem Wasser. Die hohen Radonkonzentrationen können zu einer hohen Radonexposition des Stauanlagenwärters führen (siehe Kapitel 3.5.2). Hinsichtlich möglicher Optimierungsmaßnahmen ist der Stollen somit ähnlich einem Quellsammelschacht einer Wasserversorgungsanlage zu betrachten. Maßnahmen wie eine temporäre mechanische Frischluftzufuhr mittels Gebläse vor dem Betreten des Stollens und/oder eine gasdichte Abdeckung beziehungsweise bauliche Abtrennung der beiden Wasserschächte zur Optimierung der Radonsituation wurden dem Betreiber empfohlen.

Eines der untersuchten Schaubergwerke (**SBW_02**) hat in der untersten Etage, bedingt durch eine Flutung, einen weitläufigen **unterirdischen See**. Es ist naheliegend, dass das Wasser des Sees das Luftvolumen des Hohlraumes gegen jeden Luftaustausch nach unten abdichtet. Der Radonkonzentrationsverlauf an der Anlegestelle ist über der ausgleichenden riesigen Wasserfläche somit sehr konstant bei ca. 700 Bq/m^3 . Diese Konzentration entspricht dem Messwert an drei weiteren Messorten im SBW_02. Das Ergebnis der Messung von Radon im Seewasser ergab im Mittel der beiden gezogenen Proben $4,8 \text{ Bq/l}$. Ein maßgeblicher Einfluss der Radonexhalation aus dem Wasser selbst ist somit nicht nachweisbar.

Einflussnahme auf die natürlichen Wetterströme

Im untersuchten Heilstollen (DIV_05) wurde die messtechnische Begleitung einer möglichen Optimierungsmaßnahme durchgeführt, ergänzend zu den Ergebnissen aus passiven Langzeit-Radonmessungen. Nachfolgend in Abbildung 18 dargestellt ist das Ergebnis der messtechnischen Begleitung zur Evaluierung einer möglichen Optimierungsmaßnahme mittels Einsatzes eines Alpha E-Messgerätes. Mittels zusätzlichen Öffnens von vorhandenen Lüftungsklappen sollte durch Beeinflussung des natürlichen Wetterstroms eine Reduzierung der mittleren Radonkonzentration in verschiedenen Arbeitsbereichen im Heilstollen erreicht

werden. Tabelle 3 beschreibt die verschiedenen getesteten Szenarien bzw. Messorte. Wie aus dem Diagramm in Abbildung 18 abzulesen ist, konnte mit dem Öffnen der Lüftungsklappen zur Erhöhung der Luftwechselrate unter Einflussnahme auf den natürlichen Wetterstrom allerdings keine signifikante Absenkung der Radonkonzentration erreicht werden.

Tabelle 3 Beschreibung der Szenarien 1-6 des Optimierungsversuches im Heilstollen DIV_05

	Messpunkt	Lüftungsklappen
Szenario 1	Zeche hinterer Bereich	geschlossen
Szenario 2	Zeche hinterer Bereich	
Szenario 3	Beim Schacht	
Szenario 4	Zeche hinterer Bereich	geöffnet
Szenario 5	Zeche hinterer Bereich	
Szenario 6	Beim Schacht	

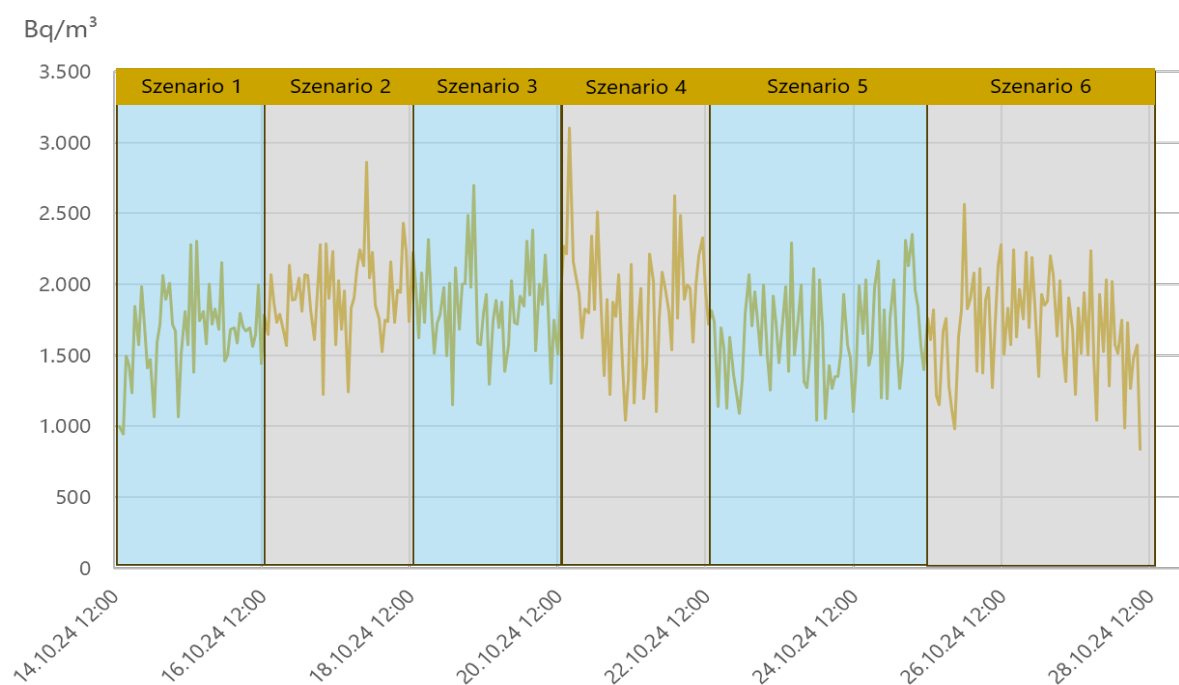


Abbildung 18 Messtechnische Begleitung eines Optimierungsversuches im Heilstollen DIV_05

3.3 Radonfolgeprodukte und Gleichgewichtsfaktor

Die Radonfolgeprodukte wurden durch Messungen mit jeweils zwei verschiedenen Systemen (EQF und AlphaGuard mit AlphaPM) für einen Zeitraum von circa zwei Wochen ermittelt. Von den insgesamt 27 Versuchen brachten 19 Messungen brauchbare Ergebnisse, auch wenn die Auswertung zum Teil auf wenige Tage beschränkt werden musste.

Der Gleichgewichtsfaktor (GGF) für Radon und seine Folgeprodukte wurde aus den oben beschriebenen Messungen ermittelt. Der Mittelwert dieser auswertbaren Messungen des GGF betrug 0,44. Die Ergebnisse der Gleichgewichtsfaktoren an den einzelnen Messstandorten sind in Abbildung 19 dargestellt, als Verhältnis der Radonfolgeprodukte (EEC Rn) zur Radonkonzentration (c Rn).

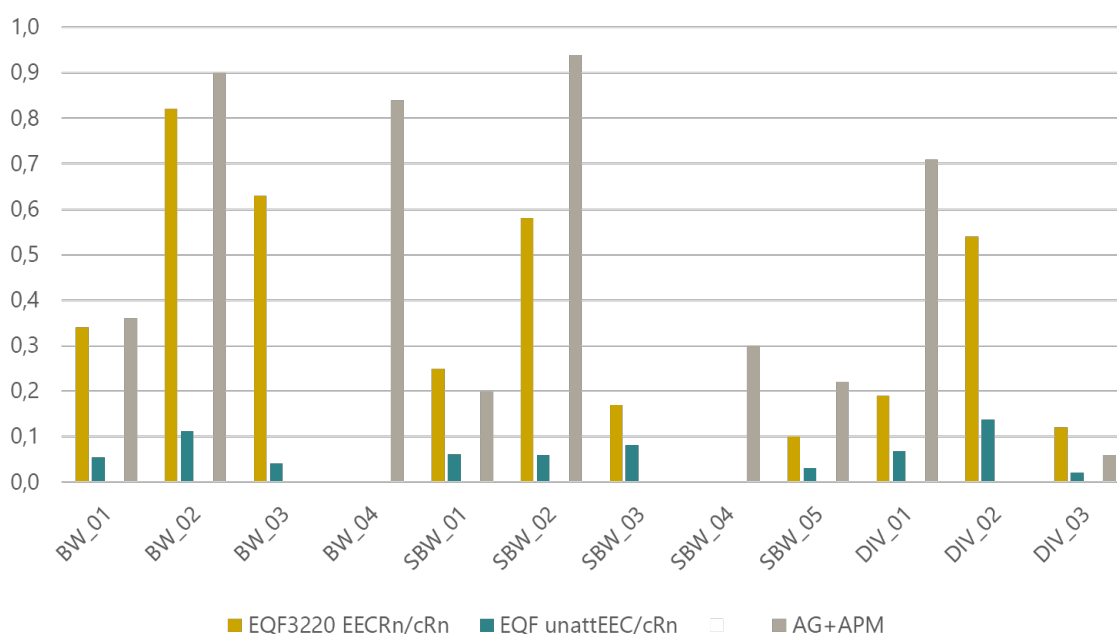


Abbildung 19 Ermittelte Gleichgewichtsfaktoren für Radon in den untersuchten Betrieben. (Verhältnis Radonfolgeprodukte (EEC Rn) zur Radonkonzentration (c Rn))

Für die einzelnen Kategorien ergibt sich für einen mittleren Gleichgewichtsfaktor:

- Aktive Bergwerke 0,67
- Schaubergwerke 0,32
- Diverse untertägige Arbeitsplätze 0,36

Da die nicht auswertbaren Messungen des GGF eher im Bereich von Umgebungsbedingungen mit höheren GGFs stattfanden und diese Messungen nicht in den Mittelwert eingehen, könnten diese Werte tatsächlich etwas höher geschätzt werden.

Höhere Werte des GGF fanden sich unter anderem in enorm weitläufigen, aktiven Bergwerken mit vielen Etagen. In aktiven Bergwerken wäre es zweckmäßig wegen der regelmäßigen Veränderungen des Arbeitsplatzes, der Schwierigkeiten bei Messungen von Radon und Thoron und des eventuell höheren GGF, die Dosis direkt aus den Folgeprodukten von Radon und Thoron zu messen.

Der berechnete Mittelwert des GGF aus allen auswertbaren Messungen von 0,44 bestätigt zunächst den standardmäßig verwendeten GGF von 0,4. Man sieht aus den Ergebnissen aber auch, dass der GGF stark abweichen kann (von 0,06 bis 0,94) und diese Abweichungen traten auch häufig auf. 21% aller Messwerte fielen in den Bereich um 0,4, 37% lagen im Bereich um 0,7 und 42% im Bereich um 0,2. Gleichzeitig sind aber auch die räumlichen Unterschiede innerhalb eines Betriebsstandorts und die Unterschiede im Zeitablauf sehr groß, dass auch die Bestimmung eines typischen anzuwendenden einheitlichen GGF für einen Projektstandort kaum möglich ist. Der mittlere GGF am Messpunkt 4 im untertägigen Arbeitsbereich DIV_01 liegt bei ca. 0,2, während der mittlere GGF am Messpunkt 1 deutlich höher bei 0,7 liegt. Außerdem kann der Gleichgewichtsfaktor starken tageszeitlichen Schwankungen unterliegen. Ein Messergebnis kann praktisch immer nur für einen Arbeitsplatz und für eine Jahreszeit repräsentativ sein. Daher ist eine genaue Erhebung des Gleichgewichtsfaktors sehr aufwendig und kann nicht für Erstabschätzungen in allen verpflichteten Betrieben standardmäßig durchgeführt werden. In der Praxis ist daher für eine Erstabschätzung der Dosis die Anwendung eines mittleren Gleichgewichtsfaktors von 0,4 eine sinnvolle Näherung.

Die Annahme, dass es in untertägigen Arbeitsbereichen zu einer breiten Varianz des GGF an unterschiedlichen Messorten kommen kann, wird durch entsprechende Ergebnisse von Grygier et al [23] und Skubacz et al [24] unterstützt. Dass es zu jahreszeitlicher Variabilität kommen kann, zeigten Berechnungen des GGF in einer Schauhöhle in Okinawa, Japan [25] sowie Studien in der Höhle von Postojna [26]. Ntwaeaborwa et al. ermittelten den GGF in einer Goldmine in Carltonville (Südafrika) auf drei Ebenen und kamen auf Werte zwischen 0,4 und 0,8 [27]. Chen analysierte Hunderte von Studien zum GGF in Nicht-Uranminen und stellte dabei fest, dass der GGF in Kohleminen zwischen 0,02 und 0,9 liegen kann. Bei Metallminen lag der GGF zwischen 0,1 und 0,9, und bei Nicht-Metallminen lagen die gemessenen Faktoren zwischen 0,05 und 0,7 [28]. Die in Minen in Brasilien festgestellten GGF lagen zwischen 0,2 und 0,7 [29].

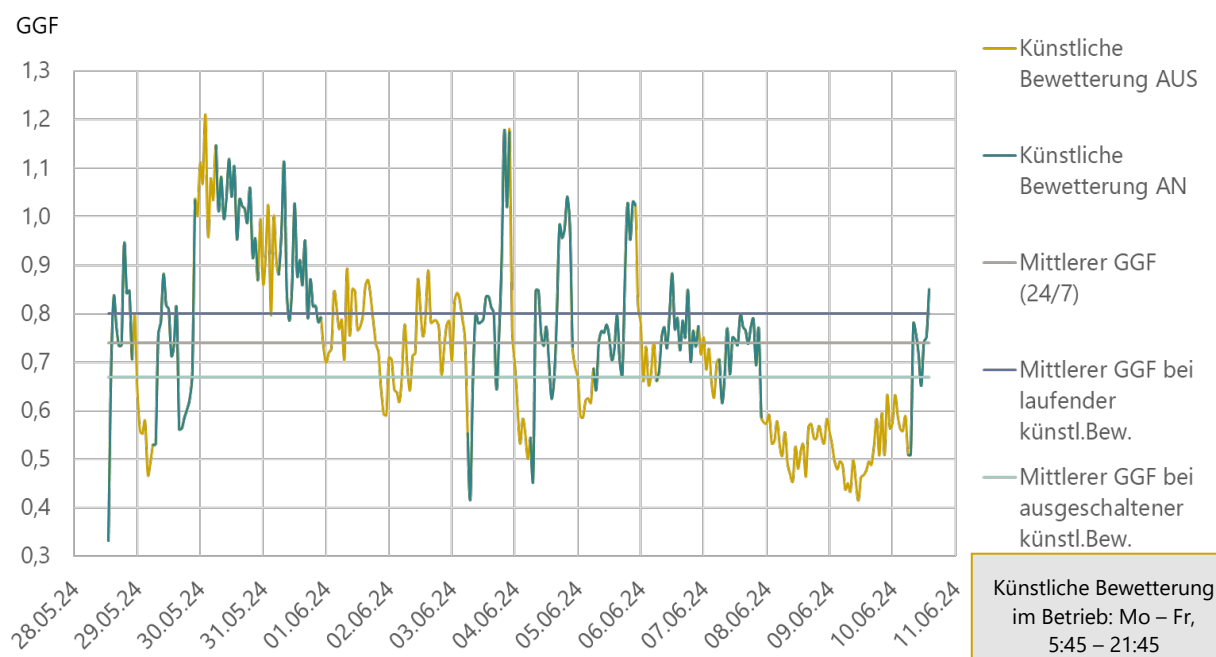


Abbildung 20 Darstellung des Einflusses der künstlichen Bewetterung im BW_04 auf Radon und seine Folgeprodukte bzw. dem sich daraus ergebenden Verlauf des GGF

Der Einfluss einer künstlichen Bewetterung erstreckt sich auch auf die Radonfolgeprodukte. In Abbildung 20 wird der Einfluss der künstlichen Bewetterung auf den GGF am Messpunkt bei der Brecher-Kaverne im Bergwerk BW_04 dargestellt. Während des vierzehntägigen Messzeitraums im Frühling 2024 zeigte sich folgendes Schema. Die Inbetriebnahme der künstlichen Bewetterung zum ersten Schichtbeginn bewirkt in der Regel einen Anstieg der Radonfolgeproduktkonzentration im Verhältnis zur Radonkonzentration und somit eine Erhöhung des GGF. Während der beiden Wochenenden, an denen die künstliche Bewetterungsanlage jeweils ausgeschalten blieb, ist zu erkennen, dass der GGF im Vergleich zum restlichen Verlauf auf weitgehend konstantem, niedrigem Niveau bleibt. Neben den jeweiligen Verläufen des GGF sind in der Abbildung auch die mittleren GGF jeweils bei eingeschalteter Bewetterung ($\text{GGF}=0,8$), bei ausgeschalteter Bewetterung ($\text{GGF}=0,67$) sowie über den Gesamtmeszeitraum (24/7) ($\text{GGF}=0,74$) dargestellt. Daraus ist zu erkennen, dass der Betrieb der künstlichen Bewetterungsanlage am Betriebsstandort BW_04 zu einem deutlichen Anstieg des GGF während des Messzeitraums geführt hat. Dass der dargestellte GGF zum Teil den physikalisch möglichen Maximalwert von 1,0 überschreitet, ist auf die Messunsicherheit des Messgerätes zurückzuführen.

3.4 Thoron und Thoron-Folgeprodukte

In elf Betriebsstandorten aller vier Kategorien wurde an mindestens einer Messposition eine Thoronkonzentration oberhalb der Nachweisgrenze festgestellt (Abbildung 21). Dabei kam es häufig vor, dass nur eine Messposition betroffen war. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Aufenthaltszeiten kann demnach nicht ausgeschlossen werden, dass Beschäftigte in untertägigen Arbeitsbereichen aller vier Kategorien neben der Radondosis auch von einer Dosis durch Thoron betroffen sein können. Auf Basis einer moderat konservativen Dosisabschätzung ergab sich in einem Viertel aller Fälle eine mögliche zusätzliche von Thoron stammende Dosis von > 1 mSv/a. Der maximale Dosisbeitrag für eine:n Beschäftigte:n in einem der untersuchten Betriebe lag bei 2,6 mSv/a. In einer der untersuchten Schauhöhlen (SH_01) übersteigt die Thorondosis die abgeschätzte Radondosis für die Beschäftigten.

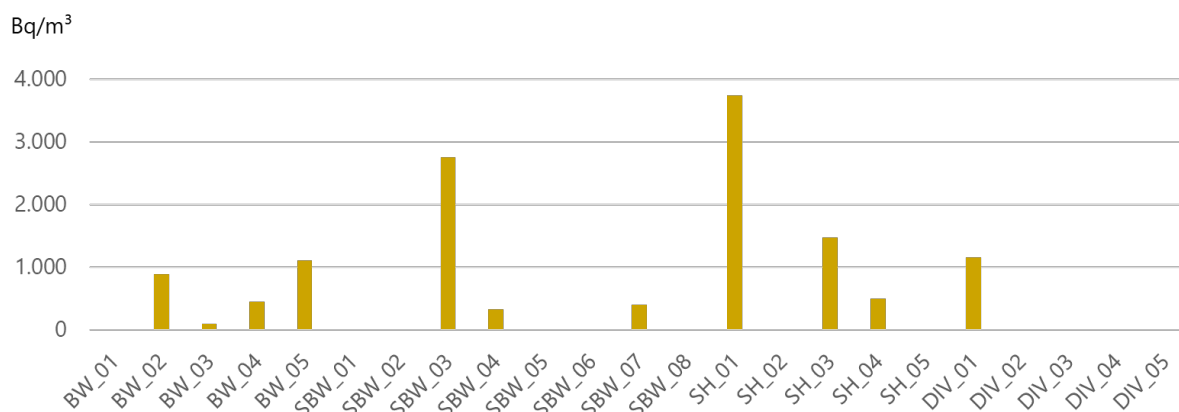


Abbildung 21 Maximale gemessene Thoronkonzentration pro Standort

Die Messgeräte EQF ermitteln grundsätzlich auch die Ergebnisparameter für angelagerte und nicht angelagerte Thoronfolgeprodukte. Da diese Messreihen an allen Messorten überwiegend aus Einzelwerten unterhalb der Nachweisgrenze bestanden, konnte kein sinnvoller Mittelwert berechnet werden. Aufgrund der Einschränkungen bei der Auswahl geeigneter Messorte für das EQF (Stromversorgung) konnte dieses an keinem der Messorte aufgestellt werden, an dem die passiven Messungen deutlich erhöhte Thoronkonzentrationen ergeben hatten. Aus den vorangegangenen Ausführungen ergibt sich allerdings, dass Thoron in untertägigen Arbeitsbereichen praktisch nie so gemessen werden kann, dass daraus eine repräsentative Konzentration resultiert, welche direkt in einer Dosisabschätzung verwendbar wäre.

3.5 Radonexposition der Beschäftigten

3.5.1 Ergebnisse der Dosisabschätzung für Beschäftigte in ausgewählten Betrieben

Durchgeführt wurde eine Dosisabschätzung für die Beschäftigten mit den jeweils maximalen Aufenthaltszeiten unter Tage basierend auf den Angaben der Betreiber:innen in insgesamt 19 Betriebsstandorten (5 BW, 6 SBW, 4 SH, 4 DIV).

Bergwerke mit untertägigem Abbau

Vor Projektbeginn existierten innerhalb der AGES nur Erfahrungswerte für die Dosisabschätzung von Beschäftigten in Schaubergwerken, nicht jedoch für andere untertägige Arbeitsbereiche. Es stellte sich in der Praxis heraus, dass eine Dosisabschätzung für Beschäftigte der Kategorie BW basierend auf ortsgebundenen passiven Zweimonatsmessungen nur bedingt sinnvoll ist. Durch zum Teil wöchentlich stattfindende Sprengungen, Erschließungen neuer Sohlen und der Verschüttung ehemaliger Abbaubereiche kommt es vor allem in den großen Betrieben zu fortlaufenden Veränderungen der Ausgangssituation. Im Felsen können so neue Klüfte und Radoneintrittspforten in die Sohlen entstehen. Weiters besteht ein fortlaufender Wechsel wo gerade abgebaut wird, neue Sohlen werden erschlossen, andere mit Abraum verschüttet. Dadurch sind die Ergebnisse der Dosisabschätzung, sobald diese vorliegen, gegebenenfalls bereits nicht mehr aktuell. Nichtsdestotrotz wurde basierend auf den Messergebnissen der passiven Zweimonatsmessungen und den von den Betreiber:innen angegebenen Aufenthaltszeiten versucht, Dosisabschätzungen für die Beschäftigten durchzuführen. Da es unmöglich ist, exakt die zukünftigen Arbeitsbereiche für die Beschäftigten zu lokalisieren, wurden dafür zwei Ansätze verfolgt. Zum einen wurde die Dosis basierend auf dem arithmetischen Mittel aller Messwerte der mit KSV-Detektoren gemessenen Radonkonzentrationen in der jeweiligen Grube berechnet. Zum anderen wurde ein konservativerer Ansatz gewählt, bei dem die Berechnung der Dosis auf dem Maximalwert der

Ergebnisse aller ausgewerteten KSV-Detektoren des jeweiligen Betriebs basierte (siehe Tabelle 4 sowie Tabelle 5). Der Dosisabschätzung zugrunde gelegt wurde der „Standard“-DK von $6,7 \times 10^{-6}$ für Arbeitsbereiche in Bergwerken gemäß [3].

Tabelle 4 Ergebnisse der Dosisabschätzungen mit „Standard“-DK für fünf Betriebe der Kategorie BW

Pseudonym	Jährliche Aufenthaltszeit unter Tage	Mittlere Rn-Konz. [Bq/m ³]	Dosis bezogen auf mittlere Rn-Konz. [mSv/a]	Maximale Rn-Konz. [Bq/m ³]	Dosis bezogen auf maximale Rn-Konz. [mSv/a]
BW_01	1.508 Std.	267	2,7	377	3,8
BW_02	990 Std.	432	2,9	755	5,0
BW_03	1.800 Std.	188	2,3	581	7,0
BW_04	1.179 Std.	559	4,4	1.049	8,3
BW_05	1.350 Std.	708	6,4	987	8,9

Der durchschnittliche GGF der vier Betriebe mit aktivem untertägigem Abbau (BW_01-04), für die ein GGF ermittelt werden konnte, liegt bei 0,67. In den Betrieben BW_02 bis BW_04 lag der ermittelte GGF zwischen 0,6 und 0,8 (siehe Abbildung 19). Obwohl es sich hierbei lediglich um „Momentaufnahmen“ basierend auf zweiwöchigen Kurzzeitmessungen handelt, bestätigen die Ergebnisse nicht die Annahme der ICRP-137 eines GGF von 0,2 für Bergwerke. In Tabelle 5 ist daher auch die abgeschätzte Dosis basierend auf dem „erhöhten“ DK von $1,34 \times 10^{-5}$ gemäß ICRP-137 dargestellt unter der Annahme eines GGF von 0,4.

Tabelle 5 Ergebnisse der Dosisabschätzungen mit „erhöhtem“ DK für fünf Betriebe der Kategorie BW

Pseudonym	Jährliche Aufenthaltszeit unter Tage	Mittlere Rn-Konz. [Bq/m ³]	Dosis bezogen auf mittlere Rn-Konz. [mSv/a]	Maximale Rn-Konz. [Bq/m ³]	Dosis bezogen auf maximale Rn-Konz. [mSv/a]
BW_01	1.508 Std.	267	5,4	377	7,6
BW_02	990 Std.	432	5,8	755	10
BW_03	1.800 Std.	188	4,6	581	14
BW_04	1.179 Std.	559	8,8	1.049	16,6
BW_05	1.350 Std.	708	12,8	987	17,8

Schaubergwerke

Für insgesamt sechs der teilnehmenden Schaubergwerke wurden entweder im Rahmen des Projekts Dosisabschätzungen durchgeführt oder es wurden die Ergebnisse einer bereits in der Vergangenheit durchgeführten Dosisabschätzung zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse dieser Dosisabschätzungen sind in Tabelle 6 dargestellt und wurden basierend auf dem „Standard“-DK [3] berechnet.

Tabelle 6 Ergebnisse der Dosisabschätzungen mit „Standard“-DK für sechs Betriebe der Kategorie SBW

Pseudonym	Jährliche Aufenthaltszeit unter Tage	Dosis [mSv/a]
SBW_01	179 Std.	2,3
SBW_04	35 Std.	0,4
SBW_05	210 Std.	1,5
SBW_06	576 Std.	1,8
SBW_07	915 Std.	2,8
SBW_08	688 Std.	0,4

Schauhöhlen

In Tabelle 7 werden die Ergebnisse der Dosisabschätzungen für die Führer:innen in insgesamt vier der untersuchten Schauhöhlen dargestellt. Die abgeschätzte jährliche Aufenthaltszeit bezieht sich für Schauhöhlen in der Regel ausschließlich auf die durchgeführten Führungen. Zusätzliche Aufenthalte in der Höhle beschränken sich, im Gegenteil zu den Schaubergwerken, aufgrund der natürlichen Hohlräume auf sehr sporadisch stattfindende Sanierungsarbeiten. Eine Abschätzung des durchschnittlich anfallenden, im Vergleich zu Schaubergwerken in der Regel geringeren Wartungsaufwandes, ist leider sehr schwer möglich. Deshalb finden die Wartungsarbeiten in der Dosisabschätzung für Beschäftigte von Schauhöhlen in der Regel keine Berücksichtigung. Zu Grunde gelegt wurde der Dosisabschätzung der gemäß ICRP 137 für Schauhöhlen empfohlene „erhöhte“ DK von $1,34 \times 10^{-5}$.

Tabelle 7 Ergebnisse der Dosisabschätzungen für die Beschäftigten in vier Schauhöhlen (SH)

Pseudonym	Max. Anzahl der Führungen / Person	Jährliche Aufenthaltszeit unter Tage	Mittlere Rn-Konz. [Bq/m ³]*	Dosis [mSv/a]
SH_01	25	63 Std.	1.372	1,2
SH_02	100	100 Std.	3.216	4,4
SH_03	200	200 Std.	167	0,4
SH_05	12	12 Std.	4.116	0,6

*Mittlere Rn-Konz. = Mittelwert aller Messorte aus den RnV-konformen Zweimonatsmessungen entlang des Führungsverlaufs in der jeweiligen Schauhöhle.

Die abgeschätzte Jahresdosis basiert für die Schauhöhlen SH_01 und SH_03 auf den konkreten Angaben zu den Aufenthaltszeiten an den einzelnen Messorten entlang des Führungsverlaufs (Berechnung analog zu jener in den Schaubergwerken).

Da für die Betriebe SH_02 und SH_05 keine Angaben zu den Aufenthaltszeiten entlang des Führungsverlaufes vorlagen, basiert die abgeschätzte Jahresdosis hier auf dem Mittelwert aller Messorte der jeweiligen Schauhöhle.

Sonstige untertägige Arbeitsbereiche

Für untertägige Arbeitsbereiche der Kategorie DIV wurde neben der Dosisabschätzung mit dem „Standard“-DK für die Annahme eines GGF von 0,4 (Dosis A) zusätzlich eine Dosisabschätzung basierend auf dem ermittelten GGF durchgeführt (Dosis B) (Tabelle 8). Diese Werte sind allerdings nur als Anhaltspunkte zu verstehen, da es sich bei dem ermittelten GGF nur um eine „punktuelle Momentaufnahme“ über einen Messzeitraum von lediglich zwei bis drei Wochen handelt. Sie sind nicht als Jahresdurchschnittswert auf die gesamte Grube anwendbar. Ebenso kann es vorkommen, dass an einem Betriebsstandort unterschiedliche GGF an unterschiedlichen Messpunkten ermittelt wurden, wie beispielsweise im DIV_01.

Tabelle 8 Ergebnisse der Dosisabschätzungen in vier Betrieben der Kategorie DIV unter Berücksichtigung unterschiedlicher Gleichgewichtsfaktoren (GGF)

Pseudonym	Jährliche Aufenthaltszeit unter Tage	Mittlere Rn-Konz. [Bq/m ³]	Dosis A "Standard"-DK [mSv/a]	Ermittelter GGF	Dosis B [mSv/a]
DIV_01 - A	80 Std.	1.064	0,6	0,2	0,3
DIV_01 - B	80 Std.	1.064	0,6	0,7	1,1
DIV_02	270 Std.	3.840	6,9	0,55	9,5
DIV_03	180 Std.	15.600	18,8	0,15	7,1
DIV_05	450 Std.	1.433	4,3	-	-

Am Standort DIV_01 wurden an den beiden Messorten, an denen die Radonfolgeprodukte gemessen wurden, sehr unterschiedliche Ergebnisse erzielt – einmal 0,2 und einmal 0,7. Infolgedessen könnte man vom einem „mittleren“ GGF von 0,4 ausgehen. Zur Veranschaulichung des sich ergebenden Unterschieds im Fall der beiden Extreme wurde an dieser Stelle die Dosis für beide Varianten des GGF berechnet und in Tabelle 8 angeführt. Die Dosisabschätzungen zeigen, dass es bei Annahme eines Gleichgewichtsfaktors von 0,4 und bei Verwendung der angegebenen Aufenthaltszeiten für eine:n Beschäftigte:n in den Betriebsstandorten DIV_02 und DIV_03 zu einer Dosis > 6mSv/a kommen kann.

Wie bereits bei den ermittelten Radonkonzentrationen stellt auch bei den Dosiswerten die Belastung des Beckenwartes des untersuchten Kraftwerksstollen (DIV_03) den Spitzenreiter dar. Hier ist allerdings nicht das umgebende Felsgestein die Hauptradonquelle, sondern die Exhalation aus dem vorhandenen Wasser. Es ist anzumerken, dass basierend auf der Messung der Radonfolgeprodukte in diesem Stollen ein GGF von 0,15 ermittelt wurde. Die Berücksichtigung des ermittelten GGF führt bei einer Aufenthaltszeit von 4 Std./Woche immer noch zu einer Dosis > 6mSv/a.

3.5.2 Vergleich der Ergebnisse aus Dosisabschätzung und Personendosimetrie

Inwieweit die meist standardmäßig angewandte Methodik zur Dosisabschätzung für Beschäftigte in untertägigen Arbeitsbereichen, Schaubergwerken und Schauhöhlen akkurate, wenn auch konservative, Ergebnisse liefert, sollte im Rahmen des vorliegenden Projektes evaluiert werden. Die Ergebnisse der Dosisermittlung (Personendosimetrie) sowie eine Gegenüberstellung der Ergebnisse mit jenen aus der zugehörigen Dosisabschätzung für die einzelnen Betriebe ist in Tabelle 9 dargestellt.

In Sachsen wurden bereits vor 15 Jahren ähnliche Vergleiche zwischen den Ergebnissen der Dosisabschätzung und der Personendosimetrie durchgeführt [30]. Dort wurden zum Teil signifikante Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus den personenbezogen ermittelten Messwerten und der Abschätzung der Jahresexposition basierend auf ortsgebundenen Radonmessungen festgestellt.

Tabelle 9 Ergebnisse aus der Personendosimetrie und der zugehörigen Dosisabschätzung

Betrieb	Person	Dosis A* [mSv]	Dosis B** [mSv]	Differenz (A; B) [mSv]	Hochgerechnete Jahresdosis***	Ergebnis Dosisabschätzung****
BW_03	Person A	1,1	0,3	0,8	3,2 mSv/a	2,3 mSv/a
BW_04	Person B	1,7	0,6	1,1	7,5 mSv/a	4,4 mSv/a
BW_04	Person C	1,7	0,6	1,1	9,0 mSv/a	4,4 mSv/a
BW_05	Person D	1,0	0,6	0,4	2,0 mSv/a	6,4 mSv/a
BW_05	Person E	0,8	0,7	0,1	0,5 mSv/a	6,4 mSv/a
SBW_04	Person H	0,8	0,8	0,0	0,0 mSv/a	0,4 mSv/a
SBW_04	Person I	0,9	0,7	0,2	0,8 mSv/a	0,4 mSv/a
DIV_02	Person J	2,4	1,9	0,5	2,2 mSv/a	6,9 mSv/a
DIV_02	Person K	2,4	2,1	0,3	1,4 mSv/a	6,9 mSv/a
DIV_03	Person L	5,0	0,7	4,3	20,6 mSv/a	18,8 mSv/a

*Dosis A: Errechnete Dosis während des Messzeitraums basierend auf der Exposition des getragenen Personenexposimeters.

****Dosis B:** Errechnete, abzuziehende Referenz-Dosis während des Messzeitraums basierend auf der Exposition des Referenzexposimeters.

******* Da der vorgegebene Messzeitraum von zwei Monaten zum Teil nicht eingehalten wurde (in der Regel wurden die Personenexposimeter etwas länger getragen, bis zu drei Monate) aber die Messzeiträume durch die Protokolle tagesgenau bekannt sind, erfolgte die Hochrechnung der Jahresdosis taggenau (Dosis im Messzeitraum x 365 / Anzahl der Tage des Messzeitraums).

********Der angeführte Wert der Dosisabschätzung basiert bei den Schaubergwerken auf einer messpunktbezogenen Abschätzung der Gesamtdosis entlang des Führungsverlaufes multipliziert mit der maximalen Anzahl der Führungen pro Jahr einer einzelnen Person. In den restlichen Betrieben (BW und DIV) basiert die Dosisabschätzung auf dem Mittelwert aller Messwerte der Radonkonzentration aus den passiven Zweimonatsmessungen des Betriebs an untertägigen Messorten (entsprechend der mittleren Radonkonzentration) mittels KSV-Detektoren.

Die Teilnehmer:innen, bei denen die Differenz zwischen Personen- und Referenzexposimeter nicht plausibel erscheint sind in der Tabelle 9 in türkis dargestellt. Vermutet wird, dass dies offenbar durch einen nicht geeigneten Lagerort der Referenzexposimeter zustande kam. Die auf Basis der Differenz der beiden Exposimeter berechnete Personendosis kann aus diesem Grund nur als bedingt aussagekräftig eingestuft werden. Es wird daher eine Optimierung der Methodik in Richtung bessere Nutzerfreundlichkeit beispielsweise mit aktiven Messgeräten zur Personendosimetrie empfohlen.

Im Begehungsprotokoll für die Personendosimetrie wurde bereits deutlich, dass sich die Aufenthaltszeiten mit einem verstärkten Risikobewusstsein der Beschäftigten in den betroffenen Arbeitsbereichen in Einzelfällen gegenüber den ursprünglich abgeschätzten Aufenthaltszeiten gemäß den Angaben der Betreiber:innen in den jeweiligen Fragebögen um bis zu 50 % reduzieren lassen.

Die Ergebnisse des Vergleichs der Personendosimetrie mit den Werten aus der zugehörigen Dosisabschätzung zeigen, dass es sowohl nach unten als auch nach oben zu Abweichungen kommen kann. Bei der Hälfte (insgesamt fünf) der Teilnehmer:innen wurde die ermittelte Dosis bei der Dosisabschätzung unterschätzt.

Es muss allerdings auch bedacht werden, dass die „Hochrechnung auf die Jahresdosis“ nicht der vorgeschriebenen Durchführung einer tatsächlich gesetzlich veranlassten Personendosimetrie entspricht. Hier wird das dauerhafte Tragen eines Personenexposimeters (mit einer Meldung alle drei Monate an das Dosisregister) vorgeschrieben. Daher ist der direkte Vergleich der Werte nur als Orientierung zu sehen. Es ist davon auszugehen, dass die Exposition der Beschäftigten vor allem in den aktiven Bergwerken in den Wintermonaten geringer ausfallen wird als während der Messzeiträume.

Der bereits im letzten Kapitel beschriebene Ansatz, die Dosisabschätzung für Beschäftigte von Betrieben der Kategorie BW mit dem höchsten Messwert der Radonkonzentration durchzuführen, ist sehr konservativ, aber trotzdem sinnvoll. Eine Alternative ist es, einen repräsentativen Teil der Beschäftigten mit aktiv messenden Personenexposimetern auszustatten, wenn Radonkonzentrationen über dem Referenzwert festgestellt werden. Eine Möglichkeit wäre es sich der Tatsache zu bedienen, dass in mehr als 90 % der untersuchten Betriebe eine Helmpflicht als Bestandteil der vorgeschriebenen Schutzausrüstung besteht. In der Regel verfügen alle Beschäftigte über eine eigene Schutzausrüstung. So wäre es eine Möglichkeit, die elektronischen Personenexposimeter direkt an den Helmen der Beschäftigten zu befestigen und beim Einfahren in die Grube zu aktivieren. Eine digitale Aufzeichnung der Exposition der Helmexposimeter ist technisch heutzutage möglich und wäre sinnvoll. Ergänzt werden sollte die Vorgehensweise durch eine Warnfunktion bei sehr hoher Radonkonzentration sowie bei Überschreitung einer bestimmten Gesamtexposition (beispielsweise durch ein akustisches Signal direkt am Helm).

4 Ausblick

Basierend auf den Erkenntnissen aus dem vorliegenden Projekt werden an dieser Stelle mögliche Maßnahmen aufgelistet, um die Radonexposition von Beschäftigten in untertägigen Arbeitsbereichen zu reduzieren. Eine mittelfristige Umsetzung folgender Maßnahmen wird empfohlen:

- Die Integration der Radon Thematik in die bergmännische Ausbildung von Betriebsleiter:innen von Bergwerken und Schaubergwerken inklusive Ausarbeitung von Schulungsmaterialien sollte angestrebt werden.
- Das Thema Radon sollte in die regelmäßig stattfindenden Sicherheitsunterweisungen der Beschäftigten im Sinne der Bewusstseinsbildung integriert werden.
- Vereine, welche als Betreiber von Schaubergwerken und Schauhöhlen agieren, sollten proaktiv informiert werden: Auch wenn es keine gesetzliche Verpflichtung für sie gibt, sollte der Gesundheitsschutz der ehrenamtlichen Mitarbeiter:innen nicht vernachlässigt werden und Radonmessungen veranlasst werden bzw. falls notwendig Radonschutzmaßnahmen durchgeführt werden.
- Ebenso sollten auch Betreiber:innen von Betrieben, welche aufgrund der eingesetzten künstlichen Bewetterungsanlage keiner gesetzlich vorgeschriebenen Radonmessverpflichtung unterliegen, freiwillig Radonmessungen in ihren untertägigen Arbeitsbereichen veranlassen.
- Dosisabschätzungen für Beschäftigte im aktiven Untertagebergbau sind aufgrund der ständigen, zum Teil massiven Änderung der Grube basierend auf ortsgebundenen Langzeitmessungen nur sehr bedingt sinnvoll möglich. Ein sehr konservativer, aber anwendbarer Ansatz ist, den maximalen Messwert als Berechnungsgrundlage für die gesamte Grube zu verwenden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Minimale, mittlere und maximale gemessene Radonkonzentrationen an allen teilnehmenden Betriebsstandorten mittels passiver Zweimonatsmessung	22
Abbildung 2 Gemessene Radonkonzentrationen an allen Messpunkten der teilnehmenden Bergwerke mittels passiver Zweimonatsmessung	23
Abbildung 3 Jahresverlauf der Radonkonzentration in einer untertägigen Werkstatt unmittelbar neben dem Abbaubereich im BW_01	23
Abbildung 4 Gemessene Radonkonzentrationen an allen Messpunkten der teilnehmenden Schaubergwerke mittels passiver Zweimonatsmessung	25
Abbildung 5 Achtmonatiger Verlauf der Radonkonzentration unmittelbar am Führungsverlauf im SBW_01	26
Abbildung 6 Gemessene Radonkonzentrationen an allen Messpunkten der teilnehmenden Schauhöhlen mittels passiver Zweimonatsmessung	27
Abbildung 7 Zweimonatiger Verlauf der Radonkonzentration am Messpunkt 4 der SH_05 im Vergleich zum Ergebnis der passiven Radonmessung am selben Messort und während desselben Messzeitraums	28
Abbildung 8 Gemessene Radonkonzentrationen an allen Messpunkten der teilnehmenden Betriebsstandorte der Kategorie DIV mittels passiver Zweimonatsmessung	29
Abbildung 9 Viermonatiger Verlauf der Radonkonzentration im Betrieb DIV_01 an zwei Messorten	30
Abbildung 10 Vergleich des Radonkonzentrationsverlaufs und vorherrschenden Außentemperatur im oberen Stollen, ca. 200 m vor dem oberen Mundloch, im SBW_03 im Hochsommer 2023	32
Abbildung 11 Vergleich des Radonkonzentrationsverlaufs "oben" und "unten" im SBW_03	32
Abbildung 12 Darstellung der Gebläse, Lüftungsschächte und -schläuche verschiedener künstlicher Bewetterungsanlagen	33
Abbildung 13 Verlauf der Radonkonzentration im BW_04	34
Abbildung 14 Verlauf der Radonkonzentration im BW_03	35
Abbildung 15 Verlauf der Radonkonzentration im BW_05	36
Abbildung 16 Verlauf der Radonkonzentration im BW_01	37
Abbildung 17 Mittlere Radonkonzentrationen mit und ohne künstliche Bewetterung in Betrieben der Kategorie BW	37
Abbildung 18 Messtechnische Begleitung eines Optimierungsversuches im Heilstollen DIV_05	40
Abbildung 19 Ermittelte Gleichgewichtsfaktoren für Radon in den untersuchten Betrieben. (Verhältnis Radonfolgeprodukte (EEC Rn) zur Radonkonzentration (c Rn))	41
Abbildung 20 Darstellung des Einflusses der künstlichen Bewetterung im BW_04 auf Radon und seine Folgeprodukte bzw. dem sich daraus ergebenden Verlauf des GGF	43
Abbildung 21 Maximale gemessene Thoronkonzentration pro Standort	44

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1 Übersicht über die Gesamtanzahl an Betrieben in Österreich mit untertägigen Arbeitsbereichen sowie Anzahl der im Rahmen des Projekts untersuchten Betriebe [11]</i>	14
<i>Tabelle 2 Übersicht der in den Betriebsstandorten durchgeführten Messungen</i>	17
<i>Tabelle 3 Beschreibung der Szenarien 1-6 des Optimierungsversuches im Heilstollen DIV_05</i>	40
<i>Tabelle 4 Ergebnisse der Dosisabschätzungen mit „Standard“-DK für fünf Betriebe der Kategorie BW</i>	46
<i>Tabelle 5 Ergebnisse der Dosisabschätzungen mit „erhöhtem“ DK für fünf Betriebe der Kategorie BW</i>	46
<i>Tabelle 6 Ergebnisse der Dosisabschätzungen mit „Standard“-DK für sechs Betriebe der Kategorie SBW</i>	47
<i>Tabelle 7 Ergebnisse der Dosisabschätzungen für die Beschäftigten in vier Schauhöhlen (SH)</i>	48
<i>Tabelle 8 Ergebnisse der Dosisabschätzungen in vier Betrieben der Kategorie DIV unter Berücksichtigung unterschiedlicher Gleichgewichtsfaktoren (GGF)</i>	49
<i>Tabelle 9 Ergebnisse aus der Personendosimetrie und der zugehörigen Dosisabschätzung</i>	50

Literaturverzeichnis

- [1] Strahlenschutzgesetz 2020, BGBl. I Nr. 50/2020, Österreich
- [2] Radonschutzverordnung, BGBl. II Nr. 470/2020, Österreich
- [3] ICRP, 2017: ICRP Publication 137-Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3
- [4] Natürlichen Strahlenquellenverordnung, BGBl. II Nr. 2/2008 aufgehoben durch BGBl. II Nr. 339/2020, Österreich
- [5] Gruber et al, 2013: Endbericht zur Pilotstudie Erhebung und Beurteilung der Radonexposition von Beschäftigten in Österreichischen Schaubergwerken und -höhlen
- [6] Mineralrohstoffgesetz, BGBl. I Nr. 38/1999, Österreich
- [7] Schaubergwerkeverordnung, BGBl. II Nr. 209/2000, Österreich
- [8] Pavuza et al, 2016: Höhlenatmosphäre, Naturhistorisches Museum Wien
- [9] Kemski J., et al., 2017: Ermittlung und Quantifizierung der durch die Umsetzung der EURATOM-Direktive von Pflichten betroffenen Arbeitsplätze, Bundesamt für Strahlenschutz, Berlin
- [10] Österreichisches Montan-Handbuch 2022, 96. Jahrgang, Herausgeber: Bundesministerium für Finanzen, Wien
- [15] Vignaud, C., et al., 2022: Identification of the different workplaces typologies according to criteria that have an impact on the radon concentration behaviour in workplaces and synthesis of European surveys of radon in workplaces, Milestone 19 of project RadoNorm
- [16] Vignaud C. et al, 2023: Workplace-type specific methods to assess the exposure of workers to radon. Focus on underground workplaces and itinerant workers. Final version as of 31.08.2023 of deliverable D2.7 of project RadoNorm, D2.7_Workplace-type-specific-methods-to-assess-the-exposure-of-workers-to-radon.pdf
- [17] Grygier, A. et al, 2022: Radon Exposure in the Underground Tourist Route–Historic Silver Mine in Tarnowski Góry, Poland. Int. J. Environ. Res. Public Health

- [18] Rovenská N. et al, 2024: Measurement protocol of radon progeny attached and unattached fraction. Focus on graded approach to measurement on underground and specific types of workplaces. Final version as of 26.8.2024 of deliverable D5.9 of project RadoNorm. D5.9_Measurement-protocol-of-radon-progeny-attached-and-unattached-fraction_submitted26082024_watermarked.pdf
- [19] Geologische Übersichtskarte der Republik Österreich, Geologische Bundesanstalt, Wien 1999
- [20] Austrian Standards Institute, 2024: ÖNORM S 5223 Abschätzung der effektiven Dosis bei Tätigkeiten mit natürlich vorkommenden radioaktiven Materialien
- [21] Interne Prüfvorschrift 9123, 2023, AGES GmbH, Linz
- [22] European Commission: Directorate-General for Energy, 2020: Radiation protection series publications Nr. 193 Radon in workplaces - Implementing the requirements in Council Directive 2013/59/Euratom, Publications Office, Ottawa, Kanada
- [23] Grygier et al, 2024: Radon Equilibrium Factor and the Assessment of the Annual Effective Dose at Underground Workplaces, Central Mining Institute, Katowice, Poland Atmosphere 2024, 15, 1131
- [24] Skubacz, K.; Wołoszczuk, K.; Grygier, A.; Samolej, K. Influence of Dose Conversions, Equilibrium Factors, and Unattached Fractions on Radon Risk Assessment in Operating and Show Underground Mines. Int. J. Environ. Res. Public Health 2023, 20, 5482
- [25] Yamada, R.; Tamakuma, Y.; Suzuki, T.; Nakasone, S.; Shiroma, Y.; Furukawa, M.; Hashimoto, H.; Hosoda, M.; Akata, N.; Tokonami, S. A Preliminary Study of Radon Equilibrium Factor at a Tourist Cave in Okinawa, Japan. Atmosphere 2021, 12, 1648
- [26] Csige, I.; Radolic, V.; Hunyadi, I.; Planinic, J.; Kobal, I. Methodology of Radon Monitoring and Dose Estimates in Postojna Cave, Slovenia. Health Phys. 2001, 80, 142–147
- [27] Ntwaeaborwa, O.M.; Kgwadi, N.D.; Taole, S.H.; Strydom, R. Measurement of the Equilibrium Factor Between Radon and Its Progeny in The Underground Mining Environment. Health Phys. 2004, 86, 374–377
- [28] Chen, J. A Review of Radon Exposure in Non-uranium Mines—Estimation of Potential Radon Exposure in Canadian Mines. Health Phys. 2023, 124, 244–256

- [29]. da Silva, A.L.M.A.; De Eston, S.M.; Iramina, W.S.; Francisca, D.D. Radon in Brazilian underground mines. J. Radiol. Prot. 2018, 38, 607
- [30] Pfeiffer F., 2010: Vergleichende Analyse von Orts- und Personendosimetrie, SMUL, Dresden

Link Sammlung

- | | |
|--|--|
| [11] https://www.hauptstelle.at | Hauptstelle für das Grubenrettungs- und Gasschutzwesen GmbH |
| [12] https://www.geosphere.at/ | GeoSphere Austria (Jänner 2023: Zusammenschluss von ZAMG und Geologischer Bundesanstalt) |
| [13] https://hoehle.org/schauhoehlen | Verband österreichischer Höhlenforscher |
| [14] https://www.nhm-wien.ac.at/ | Naturhistorisches Museum Wien |
| [31] https://de.wikipedia.org/wiki/Bergmannssprache | Wikipedia Lexikon |

Anhang A Verwendete Abkürzungen

▪ Bq/m ³	Becquerel pro Kubikmeter Luft
▪ c Rn	Radonkonzentration
▪ DK	Dosiskoeffizient
▪ EEC Rn	Verhältnis der Radonfolgeprodukte () zur Radonkonzentration
▪ GGF	Gleichgewichtsfaktor zwischen Radon und seinen Folgeprodukten
▪ ICRP	Internationale Strahlenschutzkommission
▪ KSV-Detektor	Kernspurverfahren Detektor
▪ mSv	Millisievert
▪ mSv/a	Millisievert pro Jahr
▪ MinRoG	Mineralrohstoff Gesetz
▪ NatStrV	Natürliche Strahlenquellen-Verordnung (2008)
▪ RnV	Radonschutzverordnung
▪ Rn-Konz.	Radonkonzentration
▪ StrSchG 2020	Strahlenschutzgesetz 2020
▪ unattEEC	Konzentration der nicht angelagerten Radonfolgeprodukte
▪ VÖH	Verband Österreichischer Höhlenforscher
▪ z.B.	zum Beispiel

Anhang B Informationsblatt zu den eingesetzten Messgeräten

Fachstelle für Radon

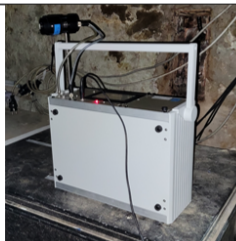
radon.gv.at

Passive Radon- und Thoronmessung: Messgeräte

Art der Messung	Kernspurverfahren Radon Orts- & Personendosimetrie	Radon- und Thorondetektor, ortsgebundene Messung	Kernspurverfahren Radon Orts- & Personendosimetrie
Bezeichnung der verwendeten Geräte	Radosys Detektor	Raduet Detektor	Radonova Detektor
Messzeitraum	2 Monate Ortsgebunden nur 15.4. – 15.10.	2 Monate Nur 15.4. – 15.10. oder ganzjährig	2 Monate Ortsgebunden nur 15.4. – 15.10.
			

Fachstelle für Radon

Aktive Messungen: Messgeräte

Art der Messung	Zeitaufgelöste Messung Radon	Zeitaufgelöste Messung Radon und seine Folgeprodukte	Zeitaufgelöste M. Radon, Thoron und Folgeprodukte	Zeitaufgelöste Radonmessung
Bezeichnung der verwendeten Geräte	Alphaguard (inkl. Luftpumpe)	Alphaguard & Alpha PM	EQF	Alpha E
Messzeitraum	2 – 3 Wochen	2 – 3 Wochen	2 – 3 Wochen	2 – 3 Wochen oder bis zu ca. 3 Monate
				

Anhang C Glossar [31]

Begriff	Erklärung
Abbau	Vorgang des Lösens von Mineralien aus einer Lagerstätte, aber auch der Ort, an dem dies geschieht
Ausziehendes Wetter	Der Wetterstrom (entsprechend der Ausrichtung des Luftstromes) richtet sich im Bereich des Stollens zum Mundloch hin von innen nach außen
Brecher-Kaverne	Künstlich unter Tage erschaffener Hohlraum, in dem Maschinen, in dem Fall so genannte Brecher, zur Zerkleinerung von stückigem Material zu kleineren Korngrößen im groben bis mittleren Größenbereich, aufgestellt werden.
Bewetterung	Versorgung der Grube mit Frischluft von über Tage und gleichzeitiges Entfernen von verbrauchten (und potenziell giftigen) Wettern aus der Grube. Die Bewetterung kann entweder auf natürliche Weise durch Differenzen der Innen- und Außentemperaturen zustande kommen („Natürliche Bewetterung“) oder mittels mechanischer Belüftung der Grube erfolgen („Künstliche Bewetterung“)
Düker	Unterirdisch verlaufende Rohrleitung, die als Hindernis unter einem Fluss, einer Straße, einem Tunnel oder Bahngleisen hindurchführt, um beispielsweise Wasser, Abwasser, Öl, Gas oder Kabel zu leiten
Einfahren	Durch eine Tagesöffnung in die Grube gelangen
Einziehendes Wetter	Durch das Mundloch strömt Frischluft in den Stollen
Fremdbefahrung	Begehung eines Stollens durch betriebsexterne Personen, beispielsweise die Besichtigung eines Schaubergwerks durch Besucher:innen
Grube	Oberbegriff für alle Hohlräume im Bergwerk, wie Strecken, Schächte, Strebe etc.
Mundloch	Öffnung des Stollens an der Tagesoberfläche
Orographie	Beschreibende Darstellung des Reliefs der Erdoberfläche
Radon	Die Bezeichnung „Radon“ bezieht sich in allen gemachten Angaben im vorliegenden Bericht ausschließlich auf das Radionuklid Radon-222
Radonfolgeprodukte	Die Bezeichnung „Radonfolgeprodukte“ bezieht sich in allen gemachten Angaben im vorliegenden Bericht auf die Tochternuklide (Folgeprodukte)

	von Radon: Blei (Pb-214), Wismut (Bi-214) und Polonium (Po-218 und Po-214)
Stollen	Annähernd horizontale Strecke mit einem Mundloch an der Tagesoberfläche
Schacht	Senkrechter Grubenbau zum Fördern (Förderschacht) oder Bewettern (Wetterschacht) der Grube
Sohle	Gesamtheit aller in einer Ebene gelegenen Teile eines Bergwerkes
Thoron	Die Bezeichnung „Thoron“ bezieht sich in allen gemachten Angaben im vorliegenden Bericht ausschließlich auf das Radionuklid Radon-220, welches meist als Thoron bezeichnet wird
Untertägiger Abbau	Abbau unter der Erdoberfläche, sei es in Stollen, Strecken, Schächten oder Tunnel
Wetterschacht	Wettertechnisches Bauwerk, das im Bergbau unter Tage zur Regulierung des Wetterzuges verwendet wird



GESUNDHEIT FÜR MENSCH, TIER & PFLANZE

www.ages.at

Eigentümer, Verleger und Herausgeber: AGES – Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH, Spargelfeldstraße 191 | 1220 Wien | FN 223056z © AGES, November 2025