



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS
LABOR SPIEZ



Fachhochschule Nordwestschweiz
Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik

Abschlussbericht über die Messungen des Gleichgewichtsfaktors zwischen Radon und seinen kurzlebigen Folgeprodukten in Objekten des VBS

Eine Zusammenstellung und Auswertung von Kurz- und Langzeitmessungen der potenziellen Alphaenergiekonzentration sowie Messungen der Aerosolkonzentration

Raphael Grapentin

28. Februar 2024

Zusammenfassung

In den Jahren von 2020 bis 2023 wurden in diversen ober- und unterirdischen Objekten des VBS Messungen durchgeführt, bei welchen die Radonkonzentration und der Gleichgewichtsfaktor simultan gemessen wurden. Neben 107 Kurzzeitmessungen in 43 Objekten wurden in drei Objekten insgesamt neun Langzeitmessungen durchgeführt. Zusätzlich wurden in einem Objekt drei Messungen der Radonkonzentration, des Gleichgewichtsfaktors und der Aerosolkonzentration durchgeführt. Über alle Kurzzeitmessungen lag der Mittelwert der Radonkonzentration bei 721 Bq/m^3 und des Gleichgewichtsfaktors bei 0.29, die Langzeitmessungen zeigten Radonkonzentrationen zwischen 0 bis maximal $14\,000 \text{ Bq/m}^3$ und Gleichgewichtsfaktoren zwischen 0.01 und 0.6. Dabei zeigt sich, dass die mechanische Belüftung eines Objektes einen starken Einfluss auf alle Messgrößen hat. Der Zusammenhang zwischen Aerosolkonzentration und Gleichgewichtsfaktor konnte nicht abschliessend geklärt werden. Aufgrund dieser Messwerte wird empfohlen, dass für eine präzise Dosisabschätzung eine Messung des Gleichgewichtsfaktors durchzuführen ist.

Vorwort

Die in diesem Bericht präsentierten Messungen wurden in den Jahren 2020 bis 2023 von verschiedenen Personen durchgeführt. Einzelne Ergebnisse wurden bereits in Berichten oder Dokumenten publiziert. Dieser Bericht fasst erstmals alle Messungen des Gleichgewichtsfaktors zusammen und wertet die Ergebnisse aus. Aufgrund der Beteiligung verschiedener Personen und der vergangenen Zeit zwischen Messung und diesem Bericht, ist die Dokumentation und Qualitätssicherung nicht bei allen Messungen sichergestellt. Alle hier gezeigten Grafiken und Auswertungen wurden jedoch ausschliesslich für diesen Bericht erstellt. In diesem Bericht werden Radonaktivitätskonzentrationen zur besseren Lesbarkeit als Radonkonzentrationen bezeichnet und in Bq/m^3 angegeben.

Dieser Bericht und gewisse Messungen in diesem Bericht sind Teil des Forschungsprojekts Radon VBS und wurden vom Bundesamt für Bevölkerungsschutz finanziert.

Ich bedanke mich bei allen beteiligten Personen und Stellen für die Durchführung der Messungen, das Zurverfügungstellen der Messdaten und die weitere Zusammenarbeit.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	4
1.1	Radon und seine Zerfallsprodukte	4
1.1.1	Eigenschaften von Radon	4
1.1.2	Entstehung von Radon	4
1.1.3	Zerfall von Radon	5
1.2	Gesundheitliche Gefährdung durch Radonexposition	6
1.3	Dieser Bericht	6
2	Methoden	7
2.1	Messgeräte und Messmethoden	7
2.2	Objekte und Anlagen	8
2.3	Messdauer und Integrationszeit	8
3	Ergebnisse	10
3.1	Kurzzeitmessungen	10
3.2	Langzeitmessungen	11
3.2.1	Langzeitmessung 1	12
3.2.2	Langzeitmessung 2	12
3.2.3	Langzeitmessung 3	14
3.3	Simultane Messungen der Aerosolkonzentration	14
3.3.1	Testmessung	14
3.3.2	Messung 1	14
3.3.3	Messung 2	14
4	Diskussion	18
4.1	Kurzzeitmessungen	18
4.1.1	Radonkonzentration	18
4.1.2	Gleichgewichtsfaktor	18
4.1.3	Untersuchte Objekte	19
4.2	Langzeitmessungen	19
4.2.1	Langzeitmessung 1	19
4.2.2	Langzeitmessung 2	21
4.2.3	Langzeitmessung 3	22
4.3	Simultane Messungen der Aerosolkonzentration	23
4.3.1	Testmessung	23
4.3.2	Messung 1	25
4.3.3	Messung 2	28

5	Schlussfolgerung	30
A	Messdaten Kurzzeitmessung	32
B	Simultane Messung der Aerosolkonzentration	36

Kapitel 1

Einführung

Radon ist ein radioaktives Edelgas und kann eine gesundheitliche Gefahr für Menschen und Tiere darstellen. Insbesondere in unterirdischen Bauwerken ist die Gefährdung durch Radon ein ernstzunehmendes Problem.

1.1 Radon und seine Zerfallsprodukte

Im Folgenden werden allgemein bekannte Zusammenhänge zu Radon und seinen Folgeprodukten ohne Quellenangaben präsentiert, gewisse Zahlenwerte sind markiert und nach [1].

1.1.1 Eigenschaften von Radon

Im Periodensystem der Elemente hat Radon die Ordnungszahl 86, gehört zu den Edelgasen und ist farblos. Mit einem Schmelzpunkt bei -71 °C und einem Siedepunkt bei -62 °C ist Radon bei Normalbedingungen gasförmig. Die am häufigsten auftretenden Isotope sind ^{219}Rn , ^{220}Rn und ^{222}Rn , wobei alle drei natürlich vorkommen. Eine Übersicht über die vier natürlichen Radonisotope ist in Tabelle 1.1 dargestellt.

1.1.2 Entstehung von Radon

Die drei oben genannten Radonisotope entstehen alle aus Radionukliden, die natürlicherweise in der Erdkruste vorkommen. In der

- Uran-Radium-Reihe entsteht ^{226}Ra durch mehrere Zerfälle aus ^{238}U , dieses geht durch einen α -Zerfall in ^{222}Rn über.

Isotop	Halbwertszeit	Zerfallsenergie [MeV]
^{219}Rn	4 s	6.9
^{220}Rn	56 s	6.4
^{222}Rn	4 d	5.6

Tabelle 1.1: Die vier natürlich vorkommenden Radonisotope mit ihren Halbwertszeiten und Zerfallsenergien. Alle vier Isotope zerfallen über einen α -Zerfall.

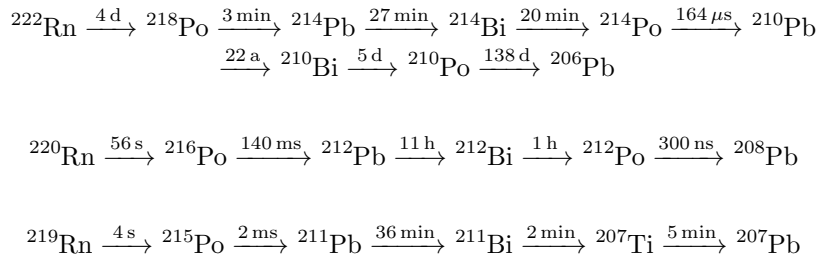


Abbildung 1.1: Übersicht über die Zerfallsreihen der natürlich auftretenden Radonisotope.

- Uran-Actinium-Reihe folgt nach dem ^{235}U ^{231}Th und später ^{227}Ac . Dieses wiederum zerfällt über ^{223}Ra in ^{219}Rn .
- Thorium-Reihe, ausgehend von ^{232}Th , folgt nach ^{224}Ra das ^{220}Rn .

Wird von Radon gesprochen, wird meistens nur ^{222}Rn gemeint, da es mit einem Anteil von 90 % das am häufigsten vorkommende Isotop ist, gefolgt von ^{220}Rn mit 9 % [1]. ^{220}Rn wird, wegen der Entstehung in der Thorium-Reihe, häufig Thoron genannt. Der Anteil von ^{219}Rn an das natürlich vorkommende Radon ist mit 1 % gering [1]. Weitere Radonisotope lassen sich synthetisch herstellen, sind aber in der Natur nicht vorhanden.

1.1.3 Zerfall von Radon

Alle bekannten Radonisotope sind instabil. Die drei natürlichen zerfallen über einen α -Zerfall zu Polonium und weiter bis zu stabilem Blei. Die ganzen Zerfallsreihen sind in Abbildung 1.1 dargestellt. Unter Normalbedingungen sind alle Folgeprodukte fest. Häufig werden die Zerfallsprodukte bis ^{210}Pb als kurzlebige Folgeprodukte bezeichnet.

Der Gleichgewichtsfaktor gibt das Verhältnis zwischen der Aktivitätskonzentration der Radonfolgeprodukte und der Aktivitätskonzentration des Radons an. In einer Gleichgewichtssituation ohne äussere Einflüsse bildet sich ein säkulares Gleichgewicht zwischen Radon und seinen kurzlebigen Folgeprodukten, die Aktivitätskonzentration jedes einzelnen Folgeprodukts ist gleich gross wie diejenige des Radons, der Gleichgewichtsfaktor ist 1. In einer realen Situation bindet sich ein Teil der Folgeprodukte an Oberflächen im Raum, sodass die Aktivitätskonzentration der sich in der Luft befindlichen Folgeprodukte kleiner ist, als diejenige des Radons. Das führt zu einem Gleichgewichtsfaktor kleiner als 1. Dementsprechend bedeuten Werte über 1, dass die Aktivitätskonzentration der Folgeprodukte grösser ist als diejenige des Radons. Eine solche Situation kann nur durch äussere Einflüsse entstehen, wie zum Beispiel, die künstliche Erzeugung oder Anreicherung von Radonfolgeprodukten. Im Zusammenhang von natürlich vorkommendem Radon in Gebäuden wird eine solche Situation als unphysikalisch betrachtet.

Weitergehend wird die potenzielle Alphaenergiekonzentration als diejenige Energie pro Volumen festgelegt, die durch den Zerfall aller kurzlebigen Folgeprodukte bis ^{210}Pb , durch ionisierende Strahlung umgesetzt wird.

Die neuste Publikation der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) zum Thema Radon empfiehlt die Verwendung von $F = 0.40$ für die meisten Situationen, weist aber auch auf mögliche Schwankungen hin [7].

1.2 Gesundheitliche Gefährdung durch Radonexposition

Radon kann sich in Innenräumen und der Atemluft anreichern und vom Menschen inhaliert werden. Jedoch geht die Gefahr nicht direkt vom Radon selbst aus, sondern viel mehr von den Folgeprodukten. Diese schweben frei oder binden sich an andere Schwebeteilchen in der Luft, werden eingeatmet und lagern sich im Atemtrakt und der Lunge ab. Dadurch ist das betroffene Gewebe der Strahlung ausgesetzt. Das statistische Risiko an Lungenkrebs zu erkranken, hängt somit von der Menge der eingeatmeten Folgeprodukte ab. In der Schweiz schätzt das Bundesamt für Gesundheit die durchschnittliche Dosis der Bevölkerung durch Radon in Wohnräumen auf 3.3 mSv pro Jahr. Damit ist der Beitrag von Radon zur gesamten Exposition von 6 mSv mehr als die Hälfte [2]. Radon ist nach dem Rauchen die häufigste Ursache für Lungenkrebs und führt in der Schweiz zu 200 bis 300 Todesfällen pro Jahr [3, 4].

Der Schutz vor Radon in der Schweiz ist in der Strahlenschutzverordnung vom 26. April 2017 geregelt [5]. Darin heisst es, dass eine Abschätzung der durch Radon verursachten effektiven Dosis an radonexponierten Arbeitsplätzen nötig ist, wenn der Schwellenwert von 1000 Bq/m³ überschritten wird. Diese Dosisabschätzung muss gemäss Verordnung des EDI (Eidgenössisches Departement des Inneren) über die Personen- und Umgebungsdosimetrie vom 26. April 2017 nach folgender Formel durchgeführt werden [6]. Die effektive Dosis E ist

$$E = c_B \times F \times \text{JIRK}. \quad (1.1)$$

Hierbei ist c_B der Dosiskonversionsfaktor, F der Gleichgewichtsfaktor und JIRK die über ein Jahr integrierte Radonkonzentration während der Aufenthaltszeit am radonexponierten Arbeitsplatz. Weiter kann der Gleichgewichtsfaktor, gemäss Dosimetrieverordnung, mittels geeigneter Messung bestimmt werden. Aus diesem Grund ist die Bestimmung des Gleichgewichtsfaktors, über eine Messung der potenziellen Alphaenergiekonzentration, grundlegend für die Dosisabschätzung von exponierten Personen. Als radonexponiert gelten insbesondere Arbeitsplätze in unterirdischen Objekten.

1.3 Dieser Bericht

Die Radonmessstelle des VBS ist im Labor Spiez angesiedelt und ist verantwortlich für die Überwachung und Messung der Radonkonzentrationen sowie Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte in Objekten des VBS. Im Rahmen dieser Aufgabe wurden aktive und passive Messungen der Radonkonzentration, des Gleichgewichtsfaktors und weiterer Grössen durchgeführt. In diesem Bericht wurden nur aktive Messung mit einer simultanen Messung des Gleichgewichtsfaktors berücksichtigt. Es wurden Messergebnisse zusammengefasst und ausgewertet. Die dabei verwendeten Daten sind bei Messungen in den Jahren 2020 bis 2023 entstanden. Einzelne Datensätze wurden bereits ausgewertet und in verschiedenen Berichten präsentiert, jedoch soll hier nun die Gesamtheit der Daten einheitlich aufbereitet und interpretiert werden.

Kapitel 2

Methoden

In diesem Kapitel werden zuerst die Messgeräte und Messmethoden beschrieben, die verwendet wurden, um Radon-, Folgeprodukt- und Partikelkonzentrationen zu messen. Anschliessend werden die untersuchten Objekte und Analgen des VBS präsentiert. Weiter wird auf die unterschiedlichen Messdauern der einzelnen Messungen eingegangen und die Datenaufbereitung beschrieben.

2.1 Messgeräte und Messmethoden

Allgemein können verschiedene Messgeräte und -methoden verwendet werden, um Radon beziehungsweise Radonkonzentrationen zu messen. Für die in diesem Bericht präsentierten Messungen wurden aktive Radonmessgeräte vom Typ AlphaGUARD von Bertin Instruments in Kombination mit Messgeräten für Folgeprodukte vom Typ AlphaPM vom selben Hersteller verwendet. Die beiden Geräte messen simultan diverse Parameter, neben der Radonkonzentration und der potenziellen Alphaenergiekonzentration wird ebenfalls die Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Luftdruck gemessen.

Die Messung der Radonkonzentration erfolgt im AlphaGUARD in einer Ionisationskammer. Die radonhaltige Luft tritt über eine diffusionsoffene Membran in die Messkammer ein. Über die Ionisation der Luft durch die Alphastrahlung kann ein elektrischer Strom, proportional zur Strahlungsenergie, gemessen werden. Die weiteren Parameter, wie zum Beispiel Lufttemperatur, -feuchtigkeit und -druck werden über separate Sensoren gemessen.

Die Messung der Radonfolgeprodukte geschieht im AlphaPM mittels einem Luftfilter und einem Halbleiterdetektor. Dabei wird die Raumluft durch den feinmaschigen Luftfilter gesogen. Damit werden alle Aerosole grösser als ein gewisse Porengrösse auf dem Filter abgeschieden, die genaue Porengrösse wird vom Hersteller nicht angegeben. Damit bleiben die gebundenen Folgeprodukte auf dem Filter zurück. Dort zerfallen sie weiter und deren Strahlung wird von einem Halbleiterdetektor gemessen. Anhand der Aktivität der Folgeprodukte auf dem Filter und der Luftmenge die durch den Filter gepumpt wird, bestimmt das Messgerät die potenzielle Alphaenergiekonzentration. Aus dieser werden anschliessend die Gleichgewichtskonzentration berechnet.

Beide Messgeräte sind miteinander kompatibel und können über ein Kabel verbunden werden. So werden die Messdaten synchron gespeichert und aus berechneter Gleichgewichtskonzentration und gemessener Radonkonzentration wird der Gleichgewichtsfaktor bestimmt. Dieser wird ebenfalls zu jedem Messpunkt gespeichert.

Insgesamt wurden drei Messgerät-Paare eingesetzt um die in diesem Bericht präsentieren Messungen durchzuführen.

Zusätzlich wurden Messungen der Aerosolkonzentrationen gemacht. Diese wurden mit zwei verschiedenen Messgeräten durchgeführt. Bei einer Testmessung über 17 Tage wurde ein LIGHTHOUSE SOLAIR 1100LD Partikelzähler verwendet, dieser misst Partikel mit einer Grösse zwischen $0.1\ \mu\text{m}$ und $5\ \mu\text{m}$. Bei der Messung der Aerosole über ein Jahr wurde ein GRIMM 11-D Aerosolspektrometer eingesetzt, dieses hat einen Messbereich von $0.253\ \mu\text{m}$ bis $35.15\ \mu\text{m}$.

2.2 Objekte und Anlagen

Die in diesem Bericht untersuchten Objekte und Anlagen umfassen eine grosse Bandbreite an unterschiedlichen Gebäuden. Es wurden kleine Einfamilienhäuser, grosse Unterkunfts- und Schulungsgebäude sowie Verwaltungs- und Bürogebäude untersucht. Zusätzlich wurden diverse unterirdische Bauwerken bemessen. Ebenfalls wurden Messungen in Wasserfassungen und -aufbereitungsanlage durchgeführt. Die Messorte innerhalb eines Objektes sind meistens so gewählt, dass die Räume mit den längsten Personenaufenthalten abgedeckt sind.

Die Messungen wurden in Objekten und Anlagen des VBS durchgeführt. Da im Folgenden alle durchgeführten Messungen präsentiert werden, gibt es keine direkte Systematik bei der Auswahl der Objekte. Grundsätzlich war das Ziel solcher Messungen stets den Gesundheitsschutz der Personen in den Objekten sicherzustellen. Im Rahmen des Informationsschutzes werden in diesem Bericht nur die relevanten Details zu den Objekten präsentiert.

2.3 Messdauer und Integrationszeit

Bei den hier präsentierten Messungen wird unterschieden zwischen Kurzzeitmessungen mit einer Messdauer von einigen Stunden und Langzeitmessungen mit einer Messdauer von mehreren Tagen bis zu einem Jahr. Zusätzlich gab es noch simultane Messungen der Radonkonzentration, des Gleichgewichtsfaktors und der Aerosolkonzentration unterschiedlicher Partikelgrössen.

- Bei den Kurzzeitmessungen betrug die Messdauer einige Stunden. Dabei wurden ein bis drei Messgerät-Paare im untersuchten Objekt platziert und eine Messung durchgeführt. Es wurden 107 Kurzzeitmessungen in 43 Objekten zwischen 2020 und 2022 durchgeführt.
- Es wurden drei Langzeitmessungen von mehreren Monaten in den Jahren 2022 und 2023 durchgeführt.
- Nach einer Testmessung wurde eine Langzeitmessung über ein Jahr mit einem Messgerät für Aerosolkonzentrationen erweitert. Da es bei dieser Messung zu vielen Problemen und Unterbrüchen kam, gab es am Ende zwei Datensätze mit Radonkonzentration, Gleichgewichtsfaktor und Aerosolkonzentration über mehrere Monate, die im Folgenden präsentiert werden.

Bei den verwendeten Messgeräten kann eine Integrationszeit von 1 min, 10 min oder 60 min gewählt werden, wobei 1 min nicht verwendet wurde. Bei Kurzzeitmessungen wurde eine Integrationszeit von 10 min gewählt um eine höhere zeitliche Auflösung zu erzielen. Langzeitmessungen wurden mit einer Integrationszeit von 60 min durchgeführt, um bei der beschränkten Speicherkapazität der Messgeräte keinen Datenverlust zu riskieren.

Bei den Messungen mit simultaner Messung der Aerosolkonzentration, wurde das Messgerät so eingestellt, dass es ebenfalls einen Messwert pro Stunde liefert. Bei der Testmessung wurde

während einer Minute Luft gemessen und anschliessend 59 Minuten pausiert. Bei den nachfolgenden Messungen wurde über die gesamte Stunde gemessen.

Kapitel 3

Ergebnisse

3.1 Kurzzeitmessungen

Für die Kurzzeitmessungen wurden 107 Messungen in 43 Gebäuden ausgewertet. Davon wurden 40 Messungen in 15 oberirdischen Gebäuden und 67 Messungen in 28 unterirdischen Gebäuden durchgeführt. Bild 3.1 zeigt eine Gesamtauswertung der Kurzzeitmessungen, dabei wurde der Mittelwert jeder Messung verwendet. In Tabelle 3.1 sind die Mittelwerte und Mediane aller Messungen der Radonkonzentration und des Gleichgewichtsfaktors gezeigt, ebenfalls ist nach oberirdischen und unterirdischen Objekten getrennt. Der Mittelwert und der Median der Radonkonzentration liegen für oberirdische Objekte deutlich unter dem entsprechenden Wert für unterirdische Objekte. Beim Gleichgewichtsfaktor sind der Mittelwert und der Median für oberirdische Objekte höher als die Werte für unterirdische Objekte. Die Langzeitmessungen sind in diesen Daten nicht berücksichtigt.

	Radonkonzentration [Bq/m ³]			Gleichgewichtsfaktor [1]		
	Alle	Oi*	Ui*	Alle	Oi*	Ui*
Mittelwert	721	240	1009	0.29	0.31	0.28
Median	167	113	251	0.26	0.28	0.25

* Oi: oberirdisch, Ui: unterirdisch

Tabelle 3.1: Übersicht über die Mittelwerte und Mediane der Kurzzeitmessungen. In der ersten und vierten Spalte sind die Werte aller Messungen angegeben, in den anderen Spalten werden Messungen in oberirdischen und unterirdischen Objekten unterschieden.

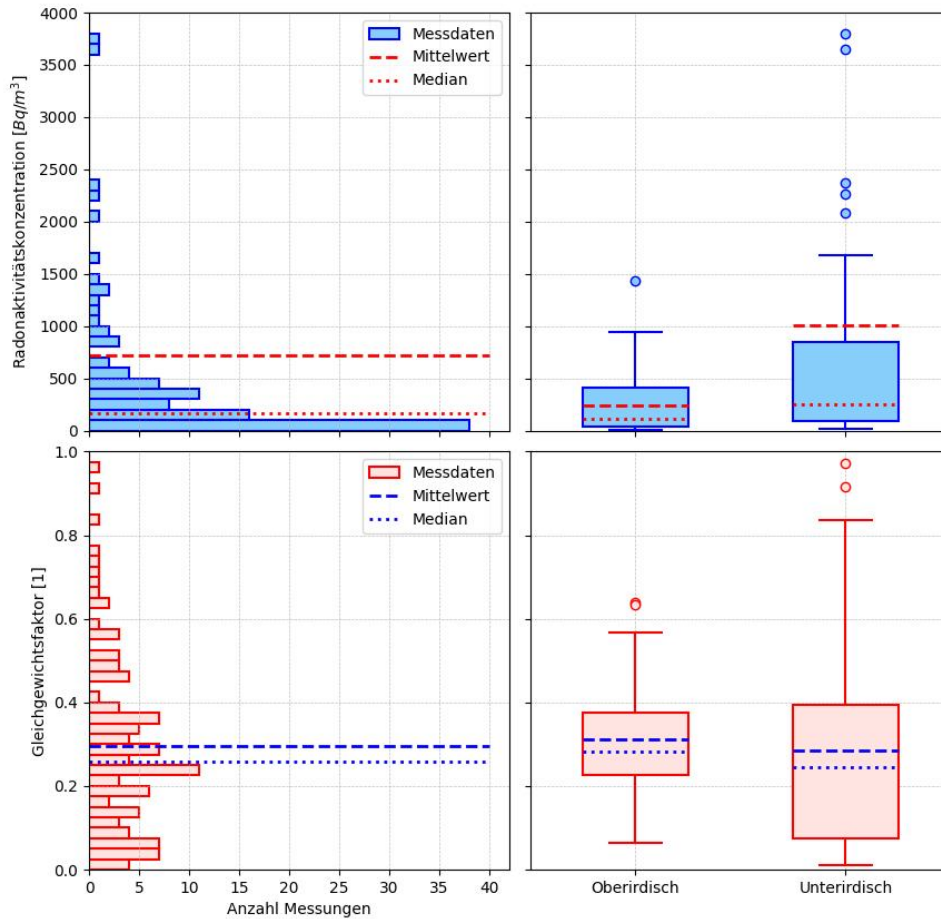


Abbildung 3.1: Darstellung der Mittelwerte der Kurzzeitmessungen sowie des Mittelwerts und des Medians über alle Messungen. Es wird je ein Histogramm und ein Boxplot für die Radonkonzentration und den Gleichgewichtsfaktor gezeigt. Zur besseren Lesbarkeit werden in den oberen Grafiken vier Messungen weggelassen, die Radonkonzentrationen über 4000 Bq/m^3 ergaben, diese lagen bei $12\,009 \text{ Bq/m}^3$, $11\,851 \text{ Bq/m}^3$, 4829 Bq/m^3 und 4220 Bq/m^3 . Die unteren Grafiken zum Gleichgewichtsfaktor beinhalten alle Messungen. Die nicht gezeigten Messwerte wurden für die Berechnungen der Mittelwerte und Mediane berücksichtigt.

3.2 Langzeitmessungen

In drei Objekten wurden Langzeitmessungen über mehrere Monate durchgeführt. Anschliessend werden die Ergebnisse dieser Messungen aufgezeigt, dabei werden sie als Langzeitmessung 1, 2 und 3 bezeichnet.

3.2.1 Langzeitmessung 1

Langzeitmessung 1 wurde in einem unterirdischen Objekt durchgeführt. Dabei wurde an zwei Standorten innerhalb des Objektes über circa 13 Monate die Radonkonzentration und der Gleichgewichtsfaktor gemessen. Dabei lag der Mittelwert der Radonkonzentration über beide Messungen bei 1383 Bq/m^3 und derjenige des Gleichgewichtsfaktors bei 0.47. In Abbildung 3.2 sind die detaillierten Messergebnisse der beiden Messorte aufgezeigt. Der Mittelwert der Radonkonzentrationen an Messort 2 ist etwas geringer als an Messort 1, jedoch ist der Mittelwert des Gleichgewichtsfaktors an Messort 2 deutlich höher als an Messort 1. Zudem ergab die Messung an Messort 2 sehr viele Messpunkte mit einem Gleichgewichtsfaktor über 1.

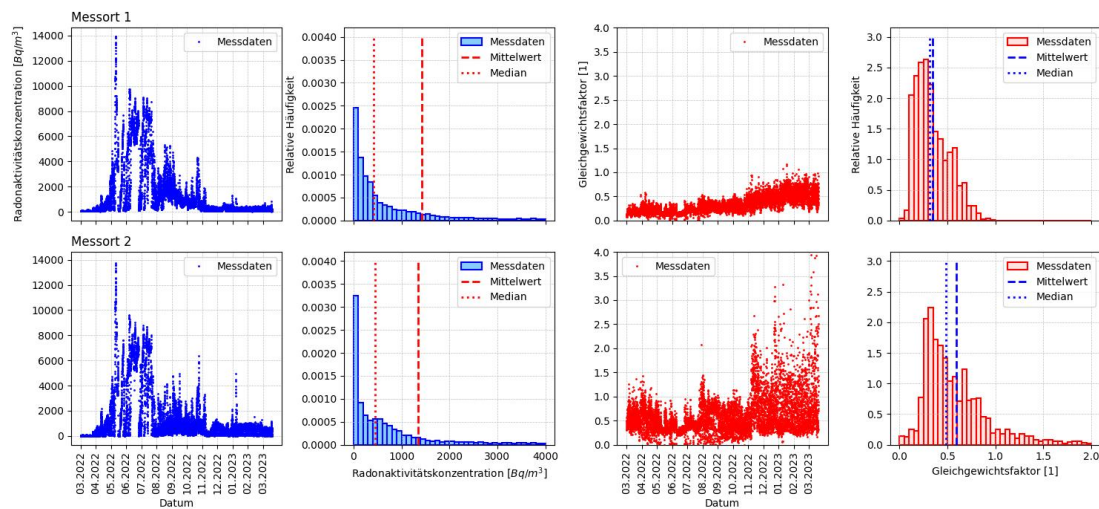


Abbildung 3.2: Darstellung der Messwerte der Langzeitmessung 1. Es wird für jeden Messort die zeitlichen Verläufe und ein Histogramm zu der gemessenen Radonkonzentration und dem Gleichgewichtsfaktor gezeigt. Zur besseren Lesbarkeit werden in den Histogrammen nur Messpunkte mit einer Radonkonzentration unter 4000 Bq/m^3 beziehungsweise einem Gleichgewichtsfaktor unter 2 gezeigt. An Messort 2 ergaben 1.2% der Messpunkte einen Gleichgewichtsfaktor über 2. Für die Bestimmung der Mittelwerte und Mediane wurden alle Messwerte berücksichtigt.

3.2.2 Langzeitmessung 2

Langzeitmessung 2 wurde ebenfalls in einem unterirdischen Objekt durchgeführt, es wurde an sechs verschiedenen Standorten im Objekt gemessen. Die Messdauer betrug acht Monate. An Messort 6 wurde nur die Radonkonzentration gemessen, an Messort 3 wurde über die gesamte Messdauer auch der Gleichgewichtsfaktor gemessen. An den Messorten 1, 2, 4 und 5 wurden zwei AlphaPM Messgeräte zur Messung des Gleichgewichtsfaktors abwechselnd eingesetzt. In Abbildung 3.3 sind die zeitlichen Verläufe der Messwerte sowie Histogramme zu diesen gezeigt. Alle Messorte ausser Messort 2 zeigen eine Radonkonzentration im Bereich von 250 Bq/m^3 , am Messort 2 liegt der Mittelwert bei 718 Bq/m^3 . Der Gleichgewichtsfaktor an den Messorten 1 bis 4 lag um 0.10, am Messort 5 war der Gleichgewichtsfaktor teilweise deutlich höher und erreichte Werte bis 0.56. Der Mittelwert aller Messorte ist 356 Bq/m^3 für die Radonkonzentration und 0.04 für den Gleichgewichtsfaktor.

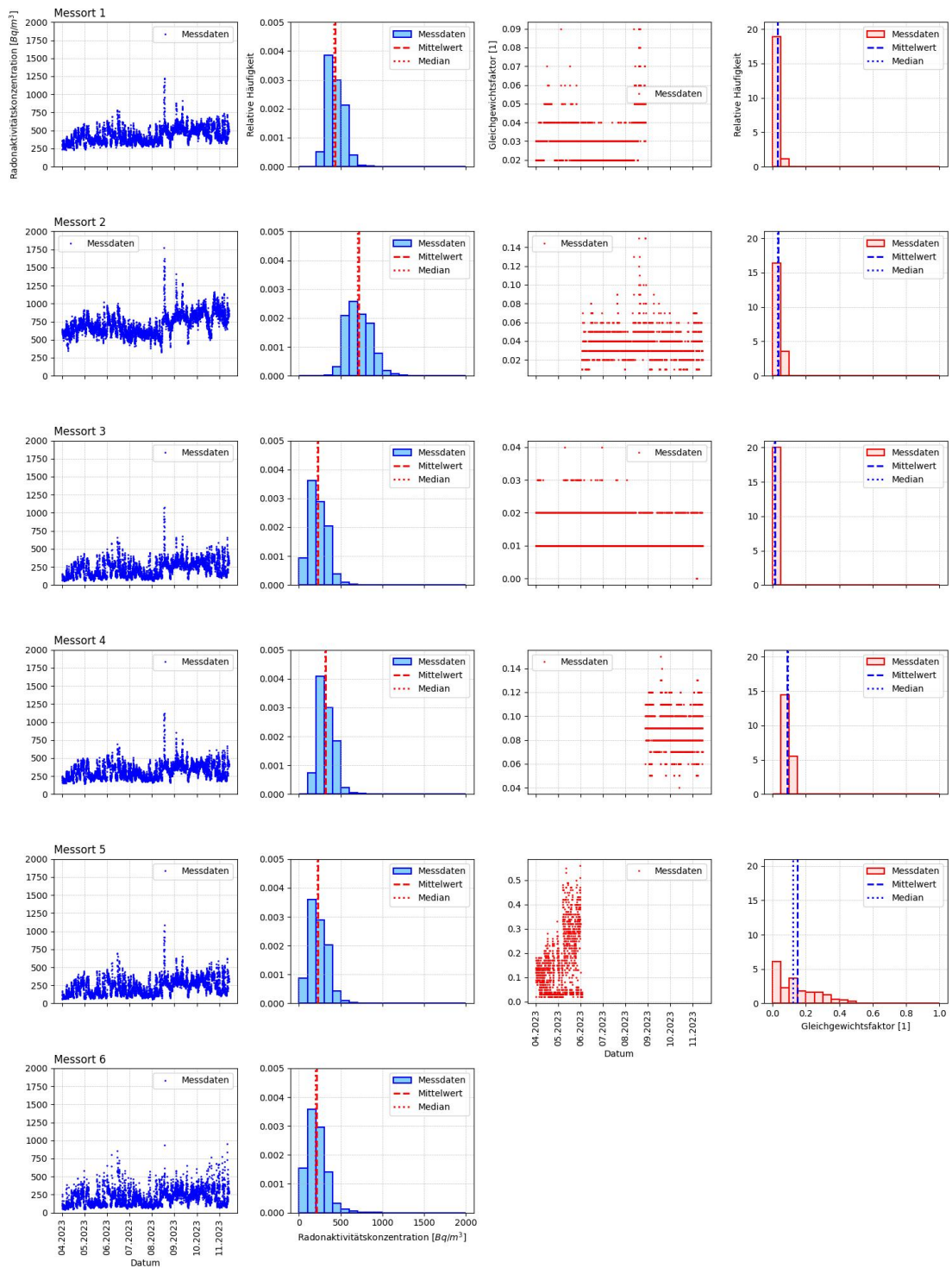


Abbildung 3.3: Darstellung der Messwerte der Langzeitmessung 2. Es wird für jeden Messort die zeitlichen Verläufe und ein Histogramm zu der gemessenen Radonkonzentration und dem Gleichgewichtsfaktor gezeigt.

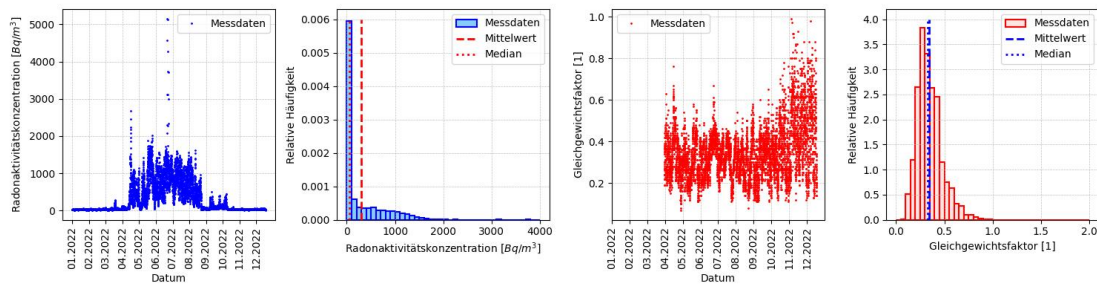


Abbildung 3.4: Darstellung der Messwerte der Langzeitmessung 3. Es wird der zeitliche Verlauf und ein Histogramm zu der gemessenen Radonkonzentration und dem Gleichgewichtsfaktor gezeigt.

3.2.3 Langzeitmessung 3

Langzeitmessung 3 wurde in einem unterirdischen Objekt durchgeführt. Während einem Jahr wurde die Radonkonzentration und während neun Monaten der Gleichgewichtsfaktor gemessen. Die zeitlichen Verläufe sowie Histogramme der Messdaten sind in Abbildung 3.4 gezeigt. Der Mittelwert der Radonkonzentration lag bei 298 ± 420 Bq/m³ und des Gleichgewichtsfaktors bei 0.35 ± 0.13 , wobei die Fehler einer Standardabweichung entsprechen.

3.3 Simultane Messungen der Aerosolkonzentration

3.3.1 Testmessung

Die Messungen der Radonkonzentration, des Gleichgewichtsfaktors sowie der Aerosolkonzentration über 17 Tage mit je einem AlphaGUARD, AlphaPM und LIGHTHOUSE SOLAIR 1100LD ergaben Mittelwerte von 77 Bq/m³ für die Radonkonzentration und 0.13 für den Gleichgewichtsfaktor. Die zeitlichen Verläufe der Messungen sind in Abbildung 3.5 gezeigt.

3.3.2 Messung 1

Messung 1 wurde während zwei Monaten durchgeführt. Die detaillierten Ergebnisse sind in Abbildung 3.6 gezeigt. Dabei lag der Mittelwert der Radonkonzentration bei 980 ± 804 Bq/m³ und derjenige des Gleichgewichtsfaktors lag bei 0.52 ± 0.23 . Die Aerosolkonzentration lag in der Summe über alle Größenkanäle und als Mittelwert über die gesamte Messdauer bei 34 ± 21 mL⁻¹. Die angegebenen Fehler entsprechen jeweils einer Standardabweichung über alle Messpunkte ohne Berücksichtigung der Messfehler der einzelnen Messpunkte.

3.3.3 Messung 2

Messung 2 wurde während drei Monaten durchgeführt. Die detaillierten Ergebnisse sind in Abbildung 3.7 gezeigt. Hierbei lag der Mittelwert der Radonkonzentration bei 330 ± 394 Bq/m³ und derjenige des Gleichgewichtsfaktors lag bei 0.74 ± 0.47 . Die Aerosolkonzentration lag in der Summe über alle Größenkanäle und als Mittelwert über die gesamte Messdauer bei 67 ± 62 mL⁻¹. Die angegebenen Fehler entsprechen jeweils einer Standardabweichung über alle Messpunkte ohne Berücksichtigung der Messfehler der einzelnen Messpunkte.

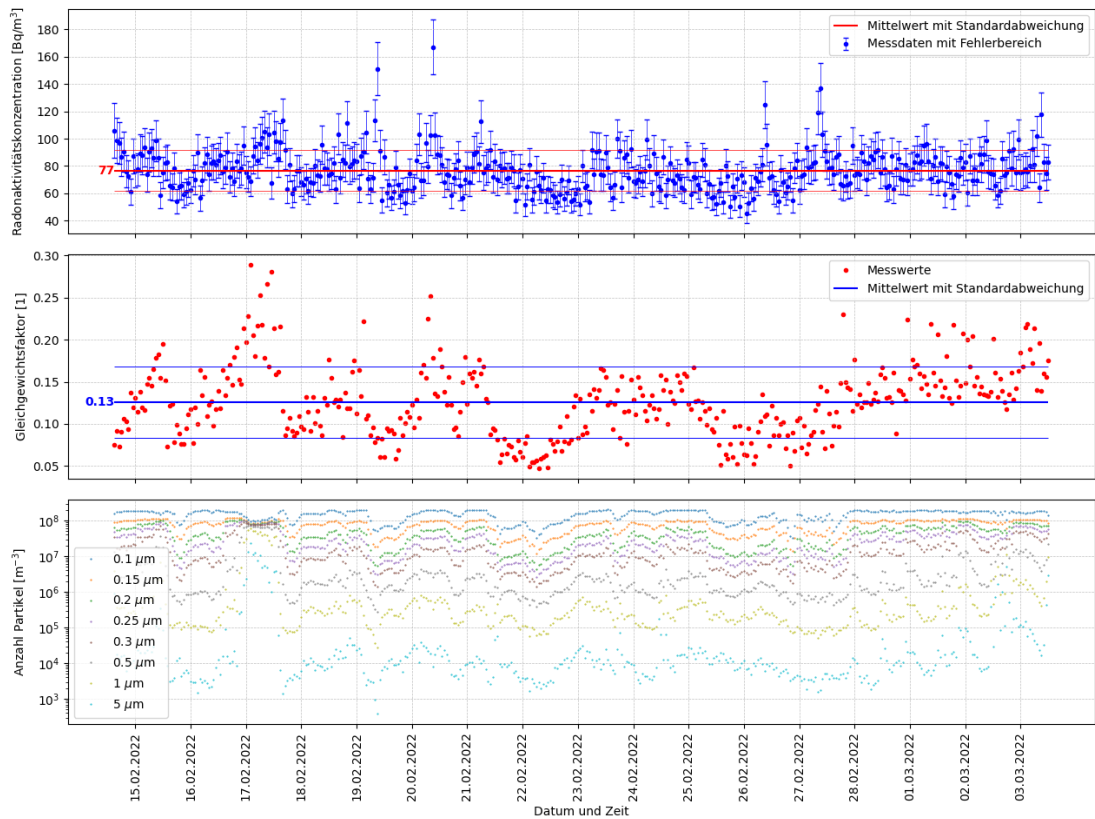


Abbildung 3.5: Ergebnisse der Testmessung der Radonkonzentration, des Gleichgewichtsfaktors und der Aerosolkonzentration. Für die Radonkonzentration und den Gleichgewichtsfaktor ist der Mittelwert mit einer Standardabweichung $\pm\sigma$ ebenfalls eingezeichnet. Die Messfehler in der Radonkonzentration werden vom Messgerät ausgegeben, für den Gleichgewichtsfaktor und die Aerosolkonzentration werden keine Fehler angegeben.

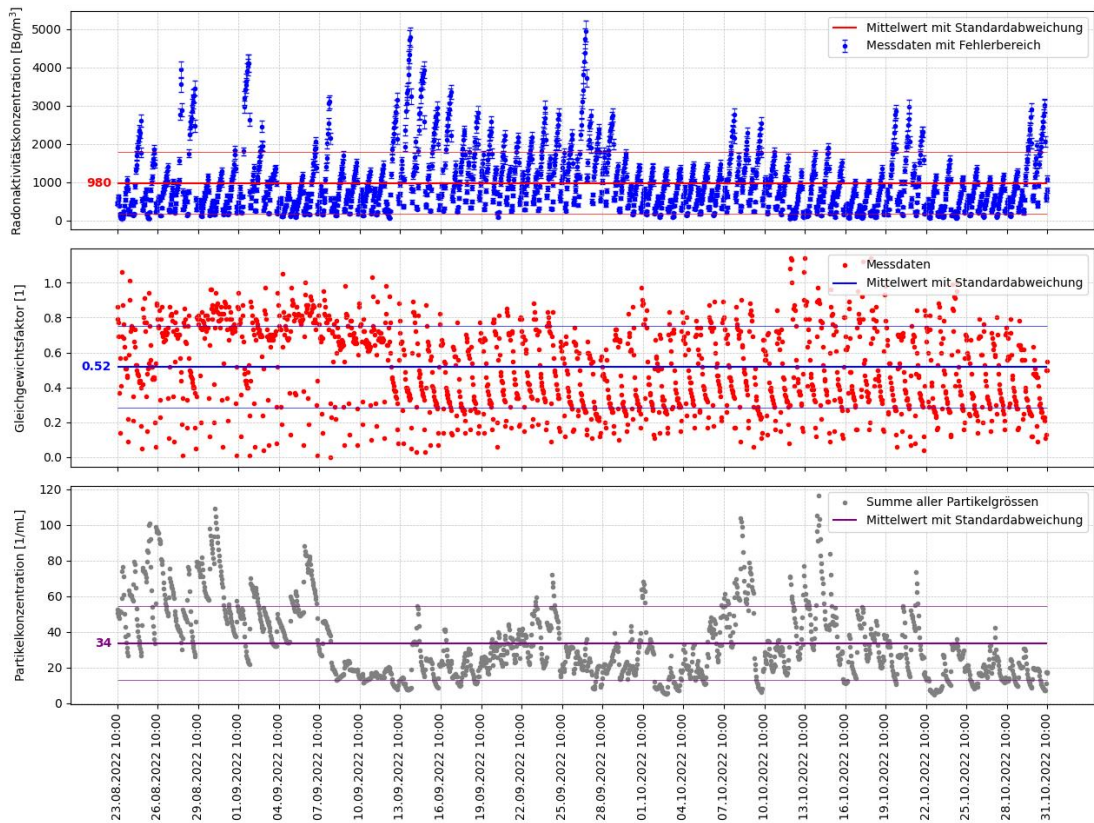


Abbildung 3.6: Ergebnisse der Messung 1 der Radonkonzentration, des Gleichgewichtsfaktors und der Aerosolkonzentration. Für alle drei Messgrößen ist der Mittelwert mit einer Standardabweichung $\pm\sigma$ ebenfalls eingezeichnet. Die Messfehler in der Radonkonzentration werden vom Messgerät ausgegeben, für den Gleichgewichtsfaktor und die Aerosolkonzentration werden keine Fehler angegeben.

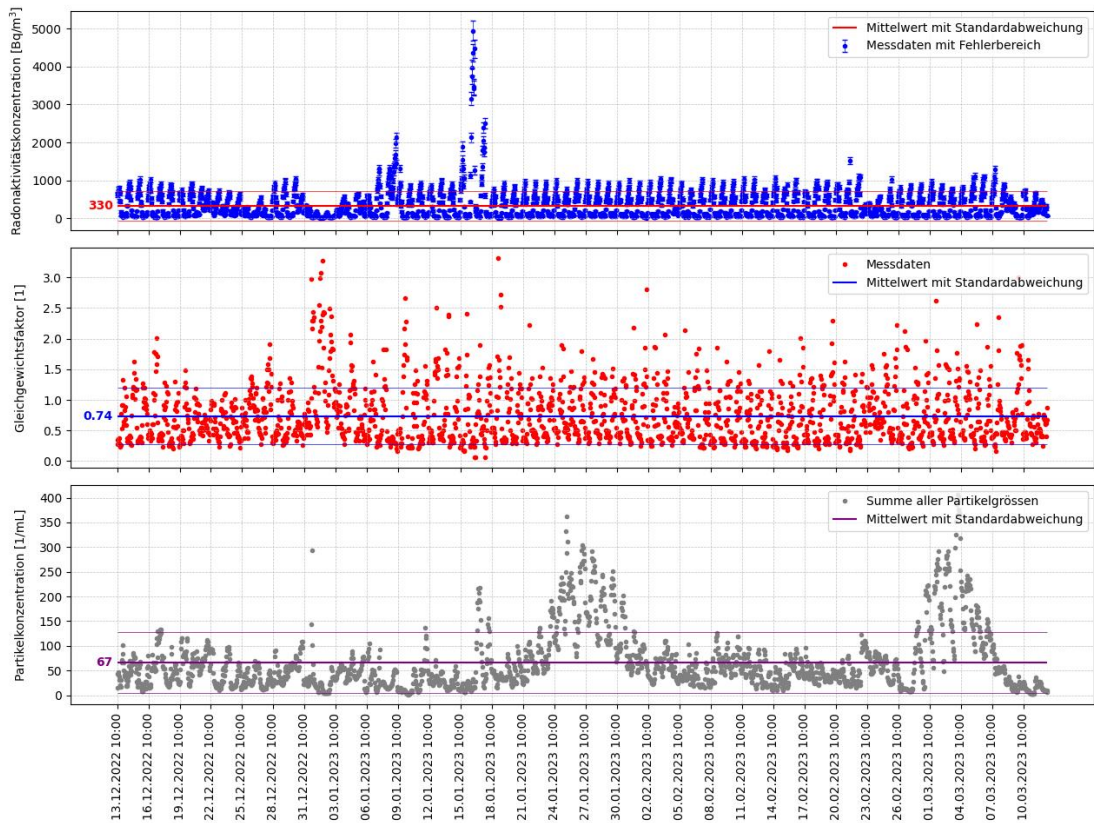


Abbildung 3.7: Ergebnisse der Messung 2 der Radonkonzentration, des Gleichgewichtsfaktors und der Aerosolkonzentration. Für alle drei Messgrößen ist der Mittelwert mit einer Standardabweichung $\pm\sigma$ ebenfalls eingezeichnet. Die Messfehler in der Radonkonzentration werden vom Messgerät ausgegeben, für den Gleichgewichtsfaktor und die Aerosolkonzentration werden keine Fehler angegeben.

Kapitel 4

Diskussion

In diesem Kapitel werden die vorher präsentierten Ergebnisse diskutiert. Weitere Auswertungen und Anlaysen der Messdaten werden aufgezeigt. Ausserdem werden die Messergebnisse in einen Kontext gesetzt.

4.1 Kurzzeitmessungen

4.1.1 Radonkonzentration

In Anhang A sind die Messdaten der einzelnen Kurzzeitmessungen gezeigt. Der Mittelwert der Radonkonzentration über alle Messungen in oberirdischen Gebäuden lag bei 240 Bq/m^3 , was unter dem gesetzlichen Referenzwert von 300 Bq/m^3 liegt. Es lagen 68 % der Messungen in oberirdischen Gebäuden unter dem Referenzwert, der Median lag bei 113 Bq/m^3 . Jedoch ist in Abbildung 3.1 in der Grafik rechts oben zu sehen, dass die höchste gemessene Radonkonzentration in einem oberirdischen Objekt bei 1500 Bq/m^3 lag.

Bei den unterirdischen Objekten lag der Mittelwert bei 1009 Bq/m^3 was leicht über dem gesetzlichen Schwellenwert von 1000 Bq/m^3 liegt, der für unterirdische Arbeitsplätze gilt. Dabei ist die Verteilung der Messungen sehr gross, der tiefste gemessene Wert lag bei 16 Bq/m^3 und der höchste bei $12\,009 \text{ Bq/m}^3$. Insgesamt lagen 78 % der Messungen in unterirdischen Gebäuden unter dem Schwellenwert. Der Median der Radonkonzentration lag bei 251 Bq/m^3 .

Es ist wichtig zu bemerken, dass es sich bei den in Abbildung 3.1 gezeigten Daten jeweils um den Mittelwert über die Messdauer einer Messung handelt. Diese betrug bei den Kurzzeitmessungen einige Stunden, was bedeutet, dass innerhalb einer Messung Schwankungen der Radonkonzentration auftreten. Um die Schwankungen zu quantifizieren wurde für jede Messung das Verhältnis zwischen einer Standardabweichung und dem Mittelwert der Messung berechnet, diese Werte sind in der Tabelle im Anhang A aufgelistet. Dieser Wert liegt im Mittel über alle Messungen bei 32 %.

4.1.2 Gleichgewichtsfaktor

Bei den Messergebnissen des Gleichgewichtsfaktors ist nur ein geringer unterschied zwischen den Mittelwerten der oberirdischen und unterirdischen Objekte zu erkennen. Durchschnittlich war das Verhältnis zwischen der Standardabweichung und dem Mittelwert einer Messung 32 %, was auf eine grosse Streuung der Messwerte hindeutet. Dabei lag der Mittelwert bei den oberirdischen Objekten bei 0.31 was deutlich unter dem von der ICRP Publikation 137 empfohlenen Wert

von 0.40 für Arbeitsplätze liegt [7]. Der höchste Wert lag bei 0.64 und der tiefste Wert bei 0.07, insgesamt lagen 32 von 40 Messungen unter 0.40. Bei den unterirdischen Objekten lag der Mittelwert bei 0.28 was ebenfalls deutlich unter 0.40 liegt, der tiefste Wert war 0.01 und der höchste 0.97. Es lagen 50 von 67 Messungen unter 0.40. Im Histogramm über alle Messungen links unten in Abbildung 3.1 ist zu erkennen, dass die Verteilung der Messwerte gleichmässig zwischen 0 und 0.40 ist, über 0.40 nimmt die Anzahl der Messungen deutlich ab.

4.1.3 Untersuchte Objekte

Das VBS bewirtschaftet Tausende von Objekten und Gebäuden unterschiedlicher Grösse. Die hier präsentierten 107 Messungen in 43 Gebäuden entsprechen keiner repräsentativen Stichprobe aller Objekte im VBS und eine systematische Untersuchung verschiedenen Objekttypen liegt hiermit nicht vor.

Des weiteren wurden in den meisten untersuchten Gebäuden keine flächendeckenden Messungen durchgeführt, sondern meistens ein bis drei Messpunkte untersucht. Dabei wurde versucht Arbeitsplätze mit hoher Aufenthaltszeit zu identifizieren. Dementsprechend weisen auch Messungen im gleichen Gebäude grosse Unterschiede auf. Die Kurzzeitmessungen 1 bis 9 wurden in Gebäude 1 durchgeführt und sind in Tabelle A.1 aufgelistet. Darin ist zu sehen, dass die Radonkonzentrationen an den meisten Messpunkten sehr ähnlich um 450 Bq/m^3 lag, ausgenommen davon ist Messung 1, die einen Messwert von 941 Bq/m^3 aufwies. Der Gleichgewichtsfaktor war bei allen Messungen vergleichbar im Bereich von 0.2 bis 0.3. Dieses Beispiel verdeutlicht die Unterschiede, die zwischen einzelnen Messungen im selben Gebäude auftreten können und das einzelne Messwerte nicht auf ein gesamtes Gebäude übertragen werden können.

4.2 Langzeitmessungen

4.2.1 Langzeitmessung 1

Radonkonzentration

Der Mittelwert der Radonkonzentration lag bei 1427 Bq/m^3 am Messort 1 respektive 1340 Bq/m^3 an Messort 2 und damit 43 % beziehungsweise 34 % über dem gesetzlichen Schwellenwert für unterirdische Arbeitsplätze. Die Standardabweichungen der Messungen lagen bei 2187 Bq/m^3 bei Messort 1 respektive bei 2120 Bq/m^3 an Messort 2. Diese Werte sind deutlich grösser als die Mittelwerte und zeigen die grossen Schwankungen der Radonkonzentration über die Messdauer an beiden Messorten. In Abbildung 3.2 ist zu sehen, dass die Schwankungen sehr kurzfristig und sehr gross sind. Die Maximalwerte lagen an beiden Messorten bei ungefähr $14\,000 \text{ Bq/m}^3$ liegen, dazwischen finden sich mehrere Spitzenwerte zwischen $8\,000 \text{ Bq/m}^3$ und $10\,000 \text{ Bq/m}^3$.

In den grafischen Darstellungen der Messdaten sind die verschiedenen Lüftungseinstellungen im Winter und im Sommer gut zu erkennen. Der Zeitraum von 03.2022 bis 04.2022 weist an beiden Messorten sehr tiefe Radonkonzentrationen auf. Dies deutet darauf hin, dass in diesem Zeitraum die Lüftung im Wintermodus mit Frischluft lief. Zwischen 04.2022 und 05.2022 steigen die Radonkonzentrationen gleichmässig an, bis kurz nach 05.2022 an beiden Messorten der Maximalwert erreicht wird. Von 05.2022 bis 11.2022 schwanken die Messwerte stark und schnell. Das zeigt, dass ab 04.2022 die Lüftung im Sommermodus im Umluftbetrieb lief. Ausserdem sind in diesem Zeitraum technische Probleme aufgetreten und Umbauten an der Lüftungsanlage durchgeführt worden. Ab 11.2022 sind die Radonkonzentrationen an beiden Messorten tiefer als im vorherigen Zeitraum. Zwischen 11.2022 und 03.2023 liegen die Spitzenwerte am Messort 1 bei ungefähr 1000 Bq/m^3 , am Messort 2 werden deutlich höhere Maxima gemessen. Anhand der

Messwerte von Messort 1 ist davon auszugehen, dass ab 11.2022 die Lüftung wieder im Wintermodus mit Frischluft betrieben wurde, die Umbauarbeiten führten jedoch dazu, dass die Messwerte am Messort 2 deutlich höher waren als im Jahr vorher bis 04.2022.

Den Histogrammen für beide Messorte ist zu entnehmen, dass die meisten Messwerte unter 1000 Bq/m^3 lagen, was sich auch in den Medianen von 416 Bq/m^3 am Messort 1 und 456 Bq/m^3 am Messort 2 zeigt.

Gleichgewichtsfaktor

Die Messwerte des Gleichgewichtsfaktors liegen am Messort 1 zwischen 0 und 1.25, am Messort 2 werden Messwerte bis 8.95 erzielt. An beiden Messorten kann der Unterschied zwischen Sommermodus und Wintermodus der Lüftung in den Messwerten des Gleichgewichtsfaktors nicht so klar gesehen werden, wie bei der Radonkonzentration. Am Messort 1 zeigen sich zwischen 03.2022 und 11.2022 Werte zwischen 0 und 0.50, ab 11.2022 ist ein leichter Anstieg zu sehen, wobei auch die Verteilung der Messwerte zunimmt. Es werden einige wenige Messwerte über 1 dokumentiert. Über die gesamte Messdauer liegt der Mittelwert des Gleichgewichtsfaktors am Messort 1 bei 0.34, was leicht unter der Empfehlung von 0.40 liegt. Am Messort 2 ist dieser Anstieg ab 11.2022 ebenfalls zu sehen, ab dann treten viele hohe Spitzenwerte und nur noch sehr wenige Messwerte unter 0.25 auf. Der Mittelwert über die gesamte Messdauer lag am Messort 2 bei 0.59, deutlich über 0.40.

Gleichgewichtsfaktor-Messwerte über 1

In verschiedenen Messungen wurden Messwerte für den Gleichgewichtsfaktor über 1 gemessen. Wie in Abschnitt 1.1.3 beschrieben, sind solche Messwerte in diesem Zusammenhang unphysikalisch.

Um dieses Verhalten zu untersuchen, ist in Abbildung 4.1 ein Auszug aus dem zeitlichen Verlauf der Langzeitmessung 1 am Messort 2 zu sehen. Verschiedene Messparameter, die das Messgerät ausgibt, sind dargestellt. Das extern angeschlossene AlphaPM detektiert die Zerfälle der Radonfolgeprodukte auf einem Filter und übermittelt einen Wert in Einheiten von Zählungen pro Minute an das AlphaGUARD. In Abbildung 4.1 sind die übermittelten Zählungen pro Minute in der untersten Grafik dargestellt.

Das AlphaGUARD berechnet anschliessend die potenzielle Alphaenergiekonzentration, zweite Grafik von oben, und die Gleichgewichtskonzentration, dritte Grafik. Zusammen mit der Radonkonzentration wird daraus der Gleichgewichtsfaktor berechnet, vierte Grafik.

Betrachtet man den zeitlichen Verlauf, in Abbildung 4.1 dargestellt, werden über 13 Stunden Messwerte des Gleichgewichtsfaktors über 1 angegeben. Der Maximalwert lag in diesem Zeitraum bei 8.95. Bei einem konstanten Messwert von 9 cpm der Folgeprodukte am AlphaPM zwischen 14.03.2023 19:00 und 15.03.2023 04:00, führt die Reduktion der gemessenen Radonkonzentration von $13 \pm 4 \text{ Bq/m}^3$ auf $6 \pm 3 \text{ Bq/m}^3$ am 15.03.2023 um 01:00 Uhr dazu, dass der Gleichgewichtsfaktor einen Wert von 8 erreicht. In der nächsten Stunde wird eine noch tiefere Radonkonzentration von $5 \pm 3 \text{ Bq/m}^3$ gemessen, bei weiterhin konstanter Gleichgewichtskonzentration, wodurch schliesslich der Maximalwert für den Gleichgewichtsfaktor von 8.95 resultiert.

Weiter stellt man fest, dass während der gesamten Messdauer alle Gleichgewichtsfaktoren über 2 bei Radonkonzentrationen unter 45 Bq/m^3 gemessen wurden. Alle Gleichgewichtsfaktoren über 1 wurden bei Radonkonzentrationen unter 300 Bq/m^3 gemessen.

Damit steht fest, dass die Messungenauigkeiten der beiden Messgeräte bei einer geringen Radonkonzentration und einer geringen Konzentration der Folgeprodukte, in der Berechnung des Gleichgewichtsfaktors dazu führen, dass unphysikalische Werte auftreten können.

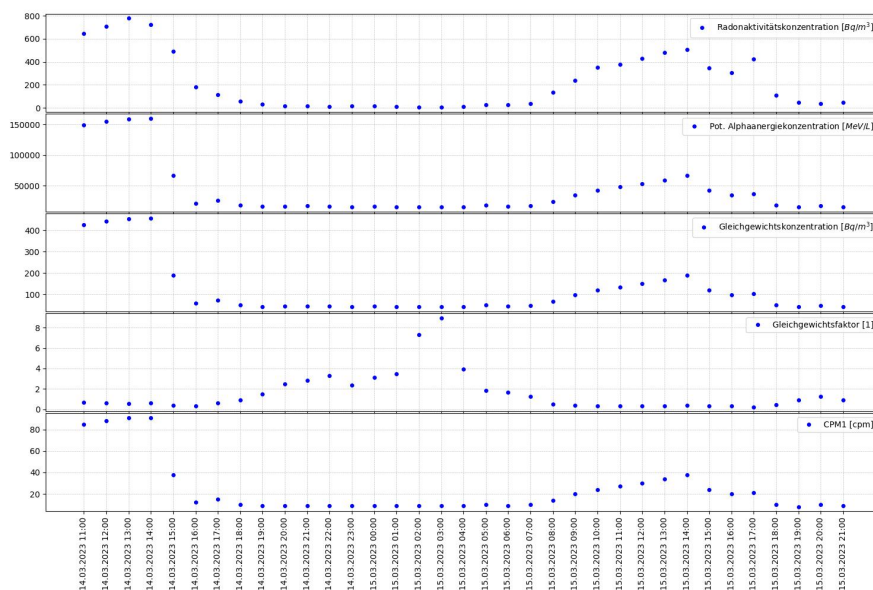


Abbildung 4.1: Auszug aus dem zeitlichen Verlauf der Langzeitmessung 1. Gezeigt sind verschiedene Messgrößen, die das Messgerät ausgibt. Zur besseren Lesbarkeit sind die Beschriftungen und Einheiten der y-Achsen in den Legendeneinträgen der einzelnen Datenreihen. Die x-Achse gibt Datum und Uhrzeit an.

4.2.2 Langzeitmessung 2

Die Langzeitmessung 2 wurde ebenfalls in einem unterirdischen Geäbude durchgeführt. Dabei wurden an sechs Standorten über 8 Monate die Radonkonzentrationen gemessen. Während dieser Zeit wurden drei Messgeräte für Radonfolgeprodukte zwischen fünf Messorten rotierend eingesetzt. Die Messergebnisse sind in Abbildung 3.3 zu sehen.

Radonkonzentration

An den Messorten 1, 3, 4, 5 und 6 lagen die Radonkonzentrationen unter 1000 Bq/m^3 . An einem Zeitpunkt zwischen dem 08.2023 und dem 09.2023 wurden an den Messorten 1, 3, 4 und 5 einige Messwerte über 1000 Bq/m^3 aufgezeichnet. Am Messort 2 lagen die Radonkonzentrationen verglichen mit den anderen Messorten etwas höher. Es wurden mehrere Spitzenwerte über 1000 Bq/m^3 gemessen. Der Mittelwert der Radonkonzentrationen am Messort 2 lag bei $718 \pm 149 \text{ Bq/m}^3$, wobei eine Standardabweichung als Fehler gegeben ist. Die Mittelwerte der anderen Messorte lagen um 250 Bq/m^3 . Alle Messorte zeigen Schwankungen in den Radonkonzentrationen von einigen hundert Becquerel pro Kubikmeter. Damit lagen die Mittelwerte über die Messdauer an allen Messorten unter dem Schwellenwert von 1000 Bq/m^3 , welcher in der Schweiz an radonexponierten Arbeitsplätzen gilt.

Gleichgewichtsfaktor

Wie bereits vorher beschrieben, wurden drei Messgeräte für Folgeprodukte rotierend eingesetzt, da nur drei Messgeräte zur Verfügung standen. Nur am Messort 3 sind Messwerte des Gleichgewichtsfaktors für die gesamte Messdauer vorhanden.

An den Messorten 1, 2, 3 und 4 lagen die Gleichgewichtsfaktoren sehr tief bei circa 0.05, an den Messorten 2 und 4 wurden Spitzenwerte von 0.15 erreicht. Bei den Messorten 1 bis 4 erkennt man, dass die Auflösung des Messgerätes beschränkt ist und die Messwerte am unteren Rand des Messbereichs liegen. Es ist jedoch zu beachten, dass der Messwert 0 nur sehr selten auftritt. Damit ist klar, dass die Gleichgewichtsfaktoren an den Messorten 1 bis 4 weit unter der Empfehlung von 0.40 liegen.

Am Messort 5 lagen die Messwerte des Gleichgewichtsfaktors deutlich höher als an den anderen Messorten. Der Mittelwert über die Messdauer lag bei 0.15 ± 0.12 , wobei eine Standardabweichung gegeben ist. Anhand der grossen Standardabweichung im Vergleich zum Mittelwert und der Darstellung der Messwerte, ist eine grosse Schwankung über die Messdauer zu erkennen. Auch an diesem Messort lag der Mittelwert unter der Empfehlung von 0.40, jedoch gibt es einige Messwerte, die darüber liegen. Spitzenwerte bis 0.56 wurden erreicht.

Überraschend daran ist, dass die Räume in denen sich die Messorte 3 und 5 befinden nah bei einander liegen und nur durch eine Tür getrennt sind, weshalb die grossen Unterschiede in den Messwerten des Gleichgewichtsfaktors unerwartet waren. Ein baulicher Unterschied zwischen den Räumen kann ausgeschlossen werden, keiner der beiden Räume hat eine Wand nach Aussen oder gegen das Gestein und das Lüftungssystem ist ebenfalls das Gleiche.

Ein technischer Unterschied zwischen den Messgeräten kann auch ausgeschlossen werden, beide Radonmessgeräte vom Typ AlphaGUARD DF2000 haben eine gültige Eichung. Eine mögliche Ursache könnten die bereits akkumulierten Folgeprodukte in der Messkammer der Radonmessgeräte sein. Führt ein Hintergrundsignal zu einem systematischen Messfehler, so könnten die ermittelten Gleichgewichtsfaktoren ebenfalls einen systematischen Fehler enthalten. Die gesamte Exposition des Messgerätes an Messort 3 war zu Beginn der Langzeitmessung 381 kBq h/m^3 , beim Messgerät an Messort 5 waren es 8909 kBq h/m^3 . Diese Werte unterscheiden sich zwar um eine Grössenordnung, sollten jedoch keinen Einfluss auf das Signal des extern angeschlossenen Messgerätes für die Folgeprodukte haben, da der Hersteller der Messgeräte davon ausgeht, dass eine Exposition von 1 MBq h/m^3 zu einem Hintergrundsignal von 0.5 Bq/m^3 bis 0.9 Bq/m^3 führt. Dementsprechend sollte eine Exposition von knapp 9 MBq h/m^3 zu einem Hintergrundsignal von weniger als 10 Bq/m^3 führen [8]. Bei einer Radonkonzentration von durchschnittlich 250 Bq/m^3 entspricht 10 Bq/m^3 einem Anteil von 4%. Da der Gleichgewichtsfaktor linear von der Radonkonzentration abhängt, könnte durch das Hintergrundsignal höchstens eine Abweichung von 4% zustande kommen. An den beiden Messorten wurde jedoch ein Unterschied von einem Faktor 10 gemessen.

Die Messgeräte für die Radonfolgeprodukte sind ebenfalls vom selben Typ AlphaPM, diese Geräte können nicht geeicht werden. Jedoch wurde vor Beginn dieser Langzeitmessung der Papierfilter getauscht, sodass eine vorherige Kontamination ausgeschlossen werden kann. Ausserdem kann ein systematischer Messfehler ausgeschlossen werden, denn das Messgerät wurde vom Messort 5 an den Messort 2 verschoben, dort wurden sehr tiefe Messwerte gemessen. Weitere Untersuchungen sind im Gange um diese Unterschiede zu erklären.

4.2.3 Langzeitmessung 3

Radonkonzentration

Der Mittelwert der Radonkonzentration lag bei 298 Bq/m^3 und der Median bei 59 Bq/m^3 . Damit liegt der Mittelwert weit unter dem Schwellenwert für radonexponierte Arbeitsplätze. Die Standardabweichung betrug, ohne Berücksichtigung der vom Messgerät gegebenen Messfehler für jeden Datenpunkt, 420 Bq/m^3 . Die grosse Standardabweichung verglichen mit dem Mittel-

wert zeigt, dass grosse Schwankungen der Messwerte über die Messdauer vorhanden waren. In der zeitlichen Darstellung der Messwerte ist zu sehen, dass bis 04.2022 die Radonkonzentrationen sehr tief waren, mit einem Spitzenwert von ungefähr 300 Bq/m^3 . Zwischen 04.2022 und 09.2022 sind deutlich höhere Messwerte zusehen, sogar über 5000 Bq/m^3 wurden gemessen. Ab 09.2022 waren die Messwerte, mit Ausnahme von drei kurzzeitigen Erhöhungen bis 500 Bq/m^3 , sehr tief. Dieses Verhalten ist wieder auf die Lüftung des Objektes zurückzuführen. In den kalten Wintermonaten wurde die Lüftung mit Frischluft betrieben, was zu den tiefen Messwerten zwischen 01.2022 bis 03.2022 und ab 10.2022 bis 12.2022 führt. In den Sommermonaten wurde die Lüftung hauptsächlich im Umluftbetrieb genutzt, was zu hohen Radonkonzentrationen führt. In den Übergangsmonaten, März und September, wurde die Lüftung teilweise im Frischluft- oder Umluftbetrieb verwendet, was zu einzelnen Spitzen geführt hat. Ob Frischluft oder Umluft verwendet wird, ist abhängig von Innen- und Aussentemperatur sowie den Luftfechtigkeiten in und ausserhalb des Objektes.

Gleichgewichtsfaktor

Aufgrund eines technischen Problems wurden die Messwerte des Gleichgewichtsfaktors erst ab 04.2022 aufgezeichnet. Der Mittelwert lag in der Messperiode von 04.2022 bis 12.2022 bei 0.35, was nah an der Empfehlung von 0.40 liegt. Die Standardabweichung betrug aufgrund der Schwankungen 0.13. Von 04.2022 bis 10.2022 lagen die Messwerte meist zwischen 0.1 und 0.5, ab 10.2022 wurden vermehrt hohe Messwerte bis 1 aufgezeichnet. Das liegt an den tiefen Radonkonzentrationen, die ab 10.2022 gemessen wurden. Bei ungefähr gleichbleibender potenzieller Alphaenergiekonzentration und tiefen Radonkonzentrationen hat eine kleine Schwankung der beiden Messwerte grössere Einflüsse auf den Gleichgewichtsfaktor. Ausserdem ist bei tieferen Messwerten der relative Messfehler der Messgeräte grösser.

4.3 Simultane Messungen der Aerosolkonzentration

4.3.1 Testmessung

Radonkonzentration

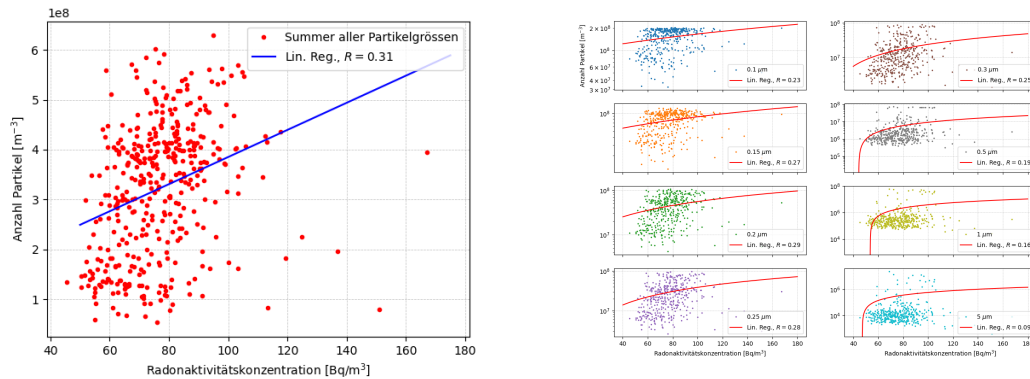
Die Testmessung verlief über 17 Tage, wobei der Mittelwert der Radonkonzentration bei $77 \pm 15 \text{ Bq/m}^3$ lag, beim Gleichgewichtsfaktor lag der Mittelwert bei 0.13 ± 0.04 , es ist jeweils eine Standardabweichung $\pm\sigma$ gegeben. Damit liegt die Radonkonzentration deutlich unter dem Schwellenwert, der für radonexponierte Arbeitsplätze gilt, sogar deutlich unter dem Referenzwert, der für Aufenthaltsräume gilt. Diese tiefen Werte sind, wie schon bei der Langzeitmessung 1 auf die Lüftung im Wintermodus zurückzuführen. Dabei wird Aussenluft mit tiefen Radonkonzentrationen verwendet.

Gleichgewichtsfaktor

Der Gleichgewichtsfaktor liegt ebenfalls weit unter dem Wert von 0.40. In Abbildung 3.5 sind die zeitlichen Verläufe und die Mittelwerte für Radonkonzentration und Gleichgewichtsfaktor gezeigt.

Aerosolkonzentration

In der dritten Grafik sind die zeitlichen Verläufe der Partikelkonzentrationen nach Grössenkatgorie gezeigt. Dabei liegt die Konzentration der Kategorie $5 \mu\text{m}$ die meiste Zeit zwischen $1 \times 10^2 \text{ m}^{-3}$



(a) Gegenüberstellung der Messwerte der Radonkonzentration mit der Summe der Konzentrationen aller Partikelgrößen, ebenfalls ist eine lineare Regression durch die Messdaten gezeigt. Diese erzielte einen Korrelationskoeffizienten von 0.31.

(b) Darstellung der Messwerte der Radonkonzentration gegenüber der Aerosolkonzentration für jede Partikelgröße. Zusätzlich ist für jede Größe eine lineare Regression durch die Datenpunkte gezeigt. Alle vertikalen Achsen sind in logarithmischer Darstellung.

Abbildung 4.2: Vergleich der Messwerte der Radonkonzentration gegenüber den Messwerten der Aerosolkonzentrationen, links für die Summe aller Größenkategorien und rechts für jede Kategorie einzeln.

und $1 \times 10^3 \text{ m}^{-3}$, die Konzentration der Kategorie $0.1 \mu\text{m}$ liegt meist bei ungefähr $6 \times 10^7 \text{ m}^{-3}$. Die Konzentrationen der anderen Kategorien liegt zwischen den Messwerten dieser beiden Kategorien. Betrachtet man den zeitlichen Verlauf aller Kategorien, erkennt man, dass ab dem 17.02.2022 die Konzentrationen aller Partikelgrößen für einige Stunden sehr ähnlich waren. Die sechs kleinsten Kategorien von $0.1 \mu\text{m}$ bis $0.5 \mu\text{m}$ erreichten Werte um $3 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ während die Kategorie $1 \mu\text{m}$ leicht darunter bei $1 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ und die grösste Kategorie von $5 \mu\text{m}$ zwischen $1 \times 10^5 \text{ m}^{-3}$ und $1 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ lagen. Dieser Zeitraum stellt für die meisten Kategorien eine Abweichung von mehreren Größenordnungen zum Mittelwert über die Messdauer dar und dauerte einige Stunden an. Ebenso stiegen die Messwerte des Gleichgewichtsfaktors im selben Zeitraum an. Obwohl die Messwerte über die Messdauer schwanken, tritt ein solches Muster nur einmal auf während der Messdauer.

Da die Radonkonzentration in diesem Zeitraum nur sehr wenig steigt, ist nicht von einem Ausfall der Lüftung auszugehen. Arbeiten oder Probleme mit den Luftfiltern im Lüftungssystem könnten die Ursache für dieses Verhalten sein. Eine abschliessende Erklärung bleibt offen.

Zusammenhänge zwischen den Messgrößen

Der Zusammenhang zwischen der Radonkonzentration und dem Gleichgewichtsfaktor ist allgemein bekannt und wurde in Abschnitt 1.1.3 bereits erläutert. Bei dieser Messung sind vor allem die Zusammenhänge zwischen den anderen Messgrößen von Interesse.

Als erstes soll die Radonkonzentration im Vergleich mit der Partikelkonzentration untersucht werden. In Abbildung 4.2a sind alle Messdaten der Radonkonzentration gegenüber der Summe aller Partikelgrößen aufgezeigt, dabei wurde eine lineare Regression durchgeführt. Diese ergibt einen Pearson-Korrelationskoeffizienten von 0.31, was eine schwache Korrelation zeigt.

Abbildung 4.2b zeigt die Zusammenhänge der Radonkonzentration mit den einzelnen Größenkanälen

der Messung, ebenfalls ist für jede Grösse eine lineare Regression gezeigt. Der Korrelationskoeffizient ist für die Grössenkategorie $0.2 \mu\text{m}$ mit 0.29 am grössten, die Kategorie $5 \mu\text{m}$ erreicht mit 0.09 den kleinsten Wert, alle anderen Kategorien liegen dazwischen.

Die linearen Regressionen zwischen der Radonkonzentration und den einzelnen Grössenkategorien und deren Summe zeigt, dass nur ein geringer linearer Zusammenhang zwischen diesen beiden Messgrössen besteht. Der Ursprung des Radons ist natürliches Radium beziehungsweise Uran im Gestein und in den Baumaterialien des Objektes. Aerosole und Partikel hingegen entstehen durch mechanische, physikalisch oder chemische Einflüsse auf Feststoffe, aus Verbrennungen oder anderen Quellen und sind damit unabhängig von Radon. Der geringe Zusammenhang lässt sich jedoch über die Belüftung im Objekt erklären. Eine hohe Luftwechselrate führt zu tieferen Radonkonzentrationen und zu tieferen Aerosolkonzentrationen, da Radon und Aerosole in der Abluft abgeführt werden. Umgekehrt werden bei einer tiefen Luftwechselrate Radon und Aerosole nicht abgeführt und die Konzentrationen steigen.

Als nächstes soll der Gleichgewichtsfaktor mit der Partikelkonzentration verglichen werden. In Abbildung 4.3a sind die Messwerte des Gleichgewichtsfaktors gegenüber der Summe der Messwerte aller Partikelkonzentrationen und eine lineare Regression dargestellt. Diese ergab einen Korrelationskoeffizienten von 0.78, was einen starken linearen Zusammenhang nahelegt.

In Abbildung 4.3b sind die Messwerte des Gleichgewichtsfaktors gegenüber den Partikelkonzentrationen der einzelnen Kanäle dargestellt. Für jeden Datensatz wurde eine lineare Regression durchgeführt und in der Grafik dargestellt. Dabei wird bei der Grössenkategorie $0.2 \mu\text{m}$ mit 0.74 der grösste Korrelationskoeffizient festgestellt. Die Grössenkategorie $0.5 \mu\text{m}$ erzielte mit 0.37 den tiefsten Korrelationskoeffizienten. Bei den Grössenkanälen $0.15 \mu\text{m}$ und $0.25 \mu\text{m}$ sind die Koeffizienten mit 0.70 respektive 0.73 ebenfalls hoch.

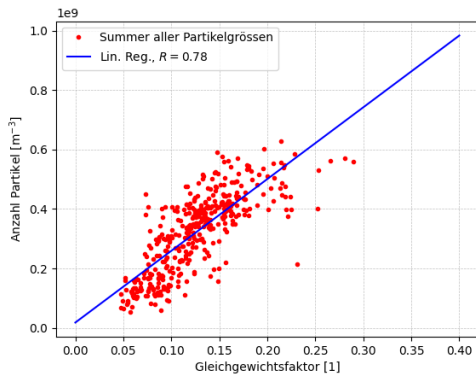
Diese Korrelation lässt sich damit erklären, dass sich die Radonfolgeprodukte an Aerosole binden, der Anteil der gebundenen Folgeprodukte liegt typischerweise bei 95 % [7]. Das bei diesen Messungen eingesetzte Messgerät kann ausschliesslich gebundene Folgeprodukte messen, die sich auf dem Papierfilter ablagern.

Weiter ist die vorhandene Oberflächenkonzentration der Aerosole dafür verantwortlich, wie viel Folgeprodukte gebunden werden können [9]. Die Oberflächenkonzentration der Aerosole ist die gesamte Oberfläche der Aerosole, die in einem Volumen zur Verfügung stehen, ausgedrückt in Einheiten von Fläche pro Volumen. Daraus folgt, dass eine Erhöhung der Partikelkonzentration dazu führt, dass mehr Oberfläche zur Verfügung steht, an die sich die Radonfolgeprodukte binden können. Damit ist der Anteil der gebundenen Folgeprodukte und der Messwert des Gleichgewichtsfaktors grösser, als in einer Situation in der weniger Oberfläche zur Verfügung steht.

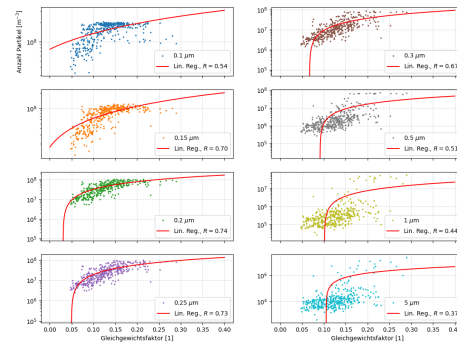
4.3.2 Messung 1

Radonkonzentration

Die Radonkonzentration bei Messung 1 lag im Mittel bei $980 \pm 804 \text{Bq/m}^3$ und damit knapp unter dem Schwellenwert. Die Standardabweichung ist ähnlich gross wie der Mittelwert, was auf starke Schwankungen im zeitlichen Verlauf der Messung hindeutet. Diese Schwankungen können ebenfalls in der Darstellung der Messwerte in Abbildung 3.6 gesehen werden. Dort ist ein klares wiederkehrendes Muster zusehen, täglich um 06 Uhr erreicht die Radonkonzentration ein Minimum, von dort steigt die Radonkonzentration bis 12 Uhr. Um 14 Uhr wird wieder ein Minimum erreicht, von wo an die Messwerte wieder steigen, bis sie am nächsten Tag um 06 Uhr wieder stark abfallen. Dieses Muster ist auf die Einstellung der Lüftung zurück zu führen, die in diesem Zeitraum jeweils Morgens und Mittags einige Stunden mit Frischluft betrieben wurde. Zwischen



(a) Darstellung der Messwerte des Gleichgewichtsfaktors gegenüber der Summe der Messwerte der Aerosolkonzentration aller Grössenkategorien. Weiter ist eine lineare Regression durch die Datenpunkte gezeigt.



(b) Gegenüberstellung der Messwerte des Gleichgewichtsfaktors und der Aerosolkonzentration für jede Partikelgrösse einzeln. Ebenfalls ist für jede Grösse eine lineare Regression gezeigt. Alle vertikalen Achsen sind in logarithmischer Darstellung.

Abbildung 4.3: Vergleich der Messwerte des Gleichgewichtsfaktors gegen die Messwerte der Aerosolkonzentrationen, links für die Summe aller Grössenkategorien, rechts für jede Kategorie einzeln.

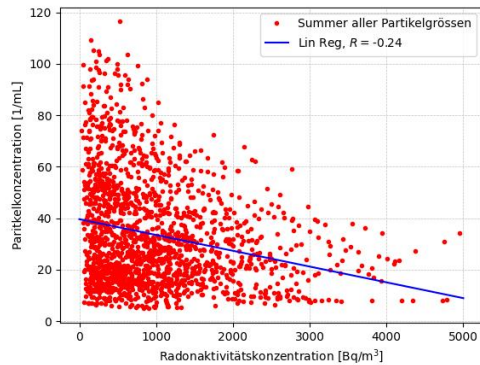
diesen Phasen wurde die Lüftung in den Umluftmodus gestellt und die Radonkonzentration stiegen stetig an. Die Spitzenwerte erreichen zwischen den Stunden mit Frischluft bis zu 5000 Bq/m^3 . Dieses Muster in den Radonkonzentrationen war in der Testmessung nicht zu erkennen, da dann die Lüftung anders eingestellt war, als während dieser Messung.

Gleichgewichtsfaktor

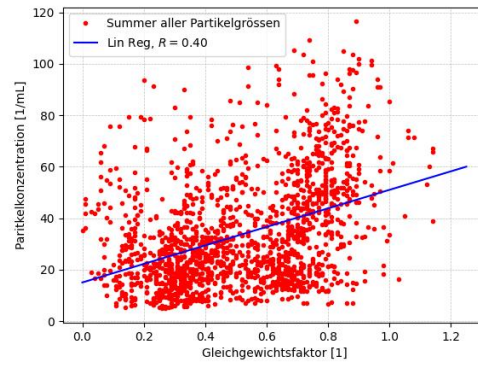
Der Mittelwert über die gesamte Messdauer lag bei 0.52, mit einer Standardabweichung von 0.23. Damit liegt der Mittelwert deutlich über der Empfehlung von 0.40 und die Standardabweichung zeigt die grossen Schwankungen in den Messdaten. In den ersten 20 Tagen der Messung ist zu sehen, dass die Messwerte häufig im Bereich von 0.8 lagen mit wenigen Schwankungen über die gesamte Bandbreite. Ab dem 13.09.2022 lag keine Häufung der Messdaten vor, die Schwankungen waren sehr regelmässig über die gesamte Bandbreite. Diese Schwankungen sind, wie auch bei der Radonkonzentration, auf die Einstellungen und den Betrieb der Lüftung zurückzuführen. Eine höhere Frischluftzufuhr führt zu einer Reduktion der Folgeprodukte in der Luft, wodurch der Gleichgewichtsfaktor geringer ist.

Aerosolkonzentration

Die Summe aller Partikelgrössen lag im Mittel bei 34 Partikel pro Milliliter. Im zeitlichen Verlauf der Messdaten ist ebenfalls ein wiederkehrendes Muster zu erkennen, jedoch ist es weniger regelmässig als bei den anderen Messgrössen. Auch hier ist dieses Muster teilweise auf die Einstellung der Lüftung zurückzuführen, jedoch kann auch die Nutzung und Aktivitäten im Objekt einen Einfluss haben.



(a) Gegenüberstellung der Messdaten der Radonkonzentration und der Partikelkonzentration, dabei wurde die Summe über alle Grössenkanäle verwendet. Zusätzlich ist eine lineare Regression durch die Messpunkte gezeichnet, mit $R = -0.24$.



(b) Gegenüberstellung der Messdaten des Gleichgewichtsfaktors und der Partikelkonzentration, wobei die Summe über alle Grössenkanäle verwendet wurde. Es ist eine lineare Regression durch die Datenpunkte eingezeichnet mit Korrelationskoeffizient $R = 0.4$.

Abbildung 4.4: Darstellung der Messwerte des Gleichgewichtsfaktors gegen die Messwerte der Aerosolkonzentrationen, links für die Summe aller Grössenkatoren, rechts für jede Kategorie einzeln.

Zusammenhang zwischen den Messgrössen

In Abbildung 4.4a sind die Messdaten der Radonkonzentration gegenüber der Summe der Konzentrationen aller Partikelgrössen dargestellt, ebenfalls ist eine lineare Regression durch die Messdaten gezeigt. Die lineare Regression ergibt einen Korrelationskoeffizienten von $R = -0.24$, was widersprüchlich zur Testmessung ist. Jedoch bestätigen diese Werte, dass die Korrelation zufällig ist und nicht signifikant von der Lüftung beeinflusst wird. Andere nicht-lineare Zusammenhänge zwischen den Messgrössen wurden nicht untersucht.

In Abbildung 4.4b sind die Messdaten des Gleichgewichtsfaktors gegenüber der Summe der Konzentrationen aller Partikelgrössen dargestellt. Auch hier ist eine lineare Regression eingezeichnet. Diese ergibt einen Korrelationskoeffizienten von 0.40, was deutlich unter dem Wert der Testmessung von 0.78 liegt. In Abbildung B.1 sind die Messdaten der einzelnen Grössenkanäle dargestellt. Die beiden Kanäle der kleinsten Partikelgrössen von $0.253 \mu\text{m}$ bis $0.352 \mu\text{m}$ weisen einen Korrelationskoeffizienten von je 0.41 auf. Auch hier sind die Koeffizienten kleiner als bei der Testmessung, diese erzielte bei den vergleichbaren Grössenkanälen Korrelationen von 0.73 beziehungsweise 0.67. Dies könnte daran liegen, dass das hier verwendete Messgerät andere Partikelgrössen misst und eine grössere Bandbreite abdeckt. Ausserdem wurden zwischen der Testmessung und dieser Messung die Einstellungen der Lüftung verändert, was in den zeitlichen Verläufen der Messwerte der Radonkonzentration gut zu sehen ist. Auch hier wurden andere nicht-lineare Zusammenhänge nicht untersucht.

4.3.3 Messung 2

Radonkonzentration

Bei Messung 2 lag die Radonkonzentration über die Messdauer im Mittel bei $330 \pm 394 \text{ Bq/m}^3$, wobei eine Standardabweichung $\pm\sigma$ gegeben ist. Damit liegt der Mittelwert weit unter dem Schwellenwert von 1000 Bq/m^3 . Wie schon bei Messung 1 ist auch bei dieser Messung eine grosse Schwankung in den Messdaten zu sehen, was sich ebenfalls mit der Einstellung der Lüftung erklären lässt.

Im Gegensatz zur Messung 1 war die Lüftung in diesem Zeitraum jedoch anders eingestellt. Während dem Betrieb der Lüftung mit Frischluft, wurden Radonkonzentrationen um 60 Bq/m^3 gemessen. Bei einem Umschalten in den Umluftbetrieb, steigen die Radonkonzentrationen innerhalb weniger Stunden auf ungefähr 1000 Bq/m^3 an. Umgekehrt sinken die Radonkonzentration nach dem Umschalten auf Frischluft wieder in wenigen Stunden stark ab. Diese Einstellungen waren täglich gleich, wodurch ein regelmässiges Muster im Verlauf der Radonkonzentration gemessen wurde. Zwischen dem 15.01.2023 und dem 18.01.2023 wurden Ausreisse gemessen und Spitzenwerte bis 5000 Bq/m^3 erreicht.

Gleichgewichtsfaktor

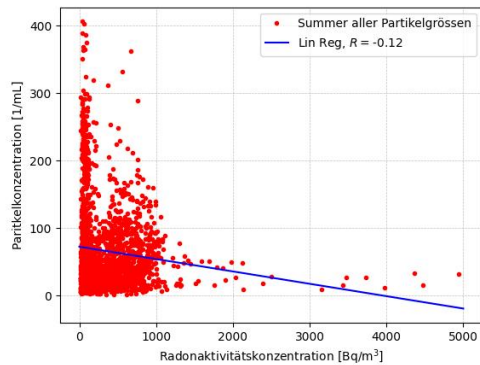
Der Mittelwert des Gleichgewichtsfaktors lag bei 0.74 ± 0.47 , was deutlich über 0.40 liegt. Die Standardabweichung von 0.47 deutet auf sehr grosse Schwankungen hin. In der Abbildung der zeitlichen Verläufe der Messwerte 3.7 ist zu sehen, dass sehr häufig Messwerte über 1 aufgezeichnet wurden. Die mögliche Ursache solcher Messwerte wurde in Abschnitt 4.2.1 bereits diskutiert. Ausserdem sind die periodischen Schwankungen der Messwerte, wie bereits bei Messung 1 und der Radonkonzentration der Messung 2, zu sehen. Diese Schwankungen sind auch hier auf die Einstellung der Lüftung zurückzuführen.

Aerosolkonzentration

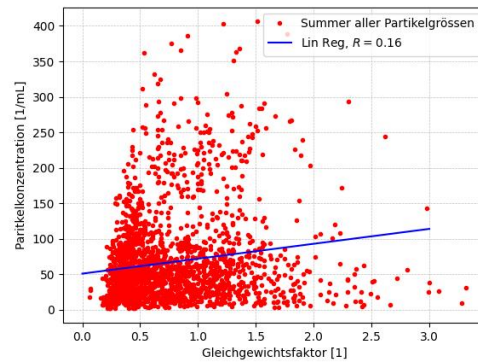
Die Aerosolkonzentration als Summe über alle Partikelgrössen lag bei $67 \pm 62 \text{ mL}^{-1}$, mit vielen Schwankungen zwischen 0 und 100 mL^{-1} . Zwischen dem 21.01.2023 und dem 02.02.2023 stieg die Aerosolkonzentration über mehrere Tage stark an, es werden Spitzenwerte bis 360 mL^{-1} erreicht. Während diesem Zeitraum ist keine signifikante Änderung der Messwerte der Radonkonzentration oder des Gleichgewichtsfaktors zu erkennen. Ein ähnlicher Anstieg der Aerosolkonzentration ist ebenfalls zwischen dem 26.02.2023 und dem 07.03.2023 zu erkennen, wobei die anderen Messgrössen keine signifikanten Abweichungen aufweisen. Diese beiden Anstiege könnten durch zusätzliche Aerosolquellen, wie zum Beispiel Bauarbeiten, im Objekt entstanden sein, die nicht direkt einen Einfluss auf die Lüftung hatten.

Zusammenhang zwischen den Messgrössen

In Abbildung 4.5a werden die Messwerte der Radonkonzentration gegenüber denjenigen der Aerosolkonzentration dargestellt. Ebenfalls ist eine lineare Regression durch die Messpunkte gezeigt. Wie bereits bei Messung 1 liegt auch hier ein negativer Korrelationskoeffizient von -0.12 vor, was die Hälfte des Koeffizienten bei Messung 1 ist. Vorallem die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Anstiege der Aerosolkonzentrationen bei gleichbleibenden Radonkonzentrationen führte dazu, dass die Korrelation der Datenpunkte deutlich geringer ist. Wie schon bei Messung 1 zeigen die Werte, dass die Korrelation zwischen Radonkonzentration und Aerosolkonzentration rein zufällig ist.



(a) Gegenüberstellung der Messdaten der Radonkonzentration und der Partikelkonzentration, dabei wurde die Summe über alle Grössenkanäle verwendet. Zusätzlich ist eine lineare Regression durch die Messpunkte gezeichnet, mit $R = -0.12$.



(b) Gegenüberstellung der Messdaten des Gleichgewichtsfaktors und der Partikelkonzentration, wobei die Summe über alle Grössenkanäle verwendet wurde. Es ist eine lineare Regression durch die Datenpunkte eingezeichnet mit Korrelationskoeffizient $R = 0.16$.

Abbildung 4.5: Darstellung der Messwerte des Gleichgewichtsfaktors gegen die Messwerte der Aerosolkonzentrationen, links für die Summe aller Grössenkanäle, rechts für jede Kategorie einzeln.

In Abbildung 4.5b sind die Messwerte des Gleichgewichtsfaktors gegenüber der Aerosolkonzentration aufgezeigt. Die lineare Regression durch diese Datenpunkte ergab einen Korrelationskoeffizienten von 0.16 was deutlich weniger ist als bei Messung 1 und der Testmessung. Hierbei sind ebenfalls die beiden Anstiege der Aerosolkonzentration bei gleichbleibendem Gleichgewichtsfaktor massgebend für diesen Unterschied. In Abbildung B.2 sind die Messwerte aller Grössenkanäle der Aerosole gegenüber den Messwerten des Gleichgewichtsfaktors dargestellt. Die linearen Regressionen durch die Datenpunkte ergibt für alle Kanäle Korrelationskoeffizienten unter 0.16. Somit steht fest, dass für diese Messung keine Korrelation zwischen den Messgrössen vorlag.

Kapitel 5

Schlussfolgerung

In diesem Bericht wurden diverse Messungen der Radonkonzentrationen, des Gleichgewichtsfaktors und der Aerosolkonzentration ausgewertet und analysiert.

- Bei 107 **Kurzzeitmessungen** über ein breites Spektrum an verschiedenen Objekten wurde eine mittlere Radonkonzentration von 721 Bq/m^3 und ein mittlerer Gleichgewichtsfaktor von 0.29 gemessen. Bei der Radonkonzentration war der Mittelwert der Messwerte in den oberirdischen Objekten deutlich tiefer als bei den unterirdischen Objekten. Beim Gleichgewichtsfaktor gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen unterirdischen und oberirdischen Objekten.
- Neun **Langzeitmessungen** in drei verschiedenen Objekten zeigten den Einfluss und die Wichtigkeit der Lüftungseinstellungen auf die Radonkonzentration und den Gleichgewichtsfaktor. Ausserdem wurde gezeigt, dass auch unterirdische Objekte sehr tiefe Radonkonzentrationen und Gleichgewichtsfaktoren aufweisen können. Die Mittelwerte lagen zwischen 0.10 und 0.56.
- Zusätzlich wurden eine Testmessung und zwei weitere Messungen des Gleichgewichtsfaktors mit **simultaner Messung der Aerosolkonzentration** durchgeführt. Diese bestätigten den Einfluss der Lüftung auf die Messgrössen. Diese Messungen zeigten widersprüchliche Ergebnisse bezüglich der Korrelation der Aerosolkonzentration und dem Gleichgewichtsfaktor.

Abschliessend steht fest, dass jedes Gebäude unterschiedlich ist und die Bauart des Gebäudes sowie die Belüftung der Innenräume massgebend für die Radonsituation sind. Es bleibt in der Verantwortung des Betreibers eines Gebäudes die Kosten und Nutzen verschiedene Einstellungen der Lüftung abzuwägen und einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Weiter kann eine Abschätzung der effektiven Dosis von exponierten Personen nur durch eine Messung des Gleichgewichtsfaktors sorgfältig gemacht werden.

In Zukunft könnte eine systematische Untersuchung mehrerer Objekte gleichen Typs mit gleicher oder ähnlicher Bauweise weitere Erkenntnisse liefern. Ausserdem können einzelne Objekte flächendeckend untersucht werden, um die Dynamik in diesem Objekt besser zu verstehen.

Literatur

- [1] Hermann Sicius. *Edelgase : eine Reise durch das Periodensystem*. Essentials. Wiesbaden: Springer Spektrum, 2015. ISBN: 9783658098148.
- [2] Sybille Estier und Philipp Steinmann. *Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz*. Bern: Bundesamt für Gesundheit (BAG), 2021.
- [3] World Health Organization. *WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective*. 1. Aufl. Albany: World Health Organization, 2009. ISBN: 9789241547673.
- [4] Bundesamt für Gesundheit BAG. *Radon verursacht Lungenkrebs*. <https://www.bag.admin.ch/bag/de/home/gesund-leben/umwelt-und-gesundheit/strahlung-radioaktivitaet-schall/radon/radon-verursacht-lungenkrebs.html>. Zugriff: Januar 2024. 2019.
- [5] *Strahlenschutzverordnung vom 26. April 2017 (StSV; SR 814.501)*.
- [6] *Verordnung des EDI über die Personen- und Umgebungsdosimetrie vom 26. April 2017 (Dosimetrieverordnung; SR 814.501.43)*.
- [7] ICRP. "Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137". In: *Ann. ICRP 46 (3/4)* (2017).
- [8] Bertin Instruments. *Contamination of AlphaGUARD's ionization chamber by Pb-210*. 2020.
- [9] C. Vargas Trassierra et al. "Effect of indoor-generated airborne particles on radon progeny dynamics". In: *Journal of Hazardous Materials* 314 (2016), S. 155–163. ISSN: 0304-3894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.04.051>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389416303922>.

Anhang A

Messdaten Kurzzeitmessung

Index			Radonkonzentration			Gleichgewichtsfaktor			p*	rH*	T*
M*	G*	Oi/Ui*	\bar{x} [Bq/m ³]	σ [Bq/m ³]	σ/\bar{x} [1]	\bar{x} [1]	σ [1]	σ/\bar{x} [1]			
1	1	1	941	105	0.11	0.228	0.044	0.19	946	74	11
2	1	1	475	90	0.19	0.308	0.069	0.22	937	63	17
3	1	1	476	83	0.17	0.284	0.067	0.24	937	59	16
4	1	1	400	44	0.11	0.243	0.049	0.20	940	64	16
5	1	1	393	60	0.15	0.229	0.049	0.22	940	61	15
6	1	1	459	71	0.16	0.218	0.063	0.29	941	66	16
7	1	1	460	69	0.15	0.225	0.067	0.30	941	63	14
8	1	1	500	108	0.22	0.270	0.095	0.35	938	65	14
9	1	1	485	98	0.20	0.276	0.093	0.34	938	66	16
10	2	1	11	9	0.80	0.390	0.323	0.83	956	34	21
11	2	1	36	15	0.43	0.187	0.250	1.34	956	34	21
12	3	1	129	34	0.27	0.496	0.185	0.37	957	50	16
13	3	1	97	34	0.35	0.494	0.080	0.16	957	43	17
14	4	1	17	10	0.60	0.363	0.229	0.63	956	34	21
15	4	1	7	8	1.16	0.305	0.499	1.64	955	31	22
16	5	1	5	8	1.74	0.133	0.147	1.10	941	43	24
17	5	1	16	10	0.67	0.283	0.258	0.91	942	40	23
18	6	1	38	15	0.39	0.334	0.146	0.44	943	40	22
19	6	1	44	16	0.37	0.133	0.058	0.44	942	40	21
20	6	1	18	10	0.56	0.227	0.214	0.94	941	41	22
21	7	1	144	40	0.28	0.392	0.152	0.39	939	53	14
22	7	1	122	39	0.32	0.640	0.403	0.63	939	51	15
23	7	1	98	33	0.34	0.550	0.218	0.40	938	49	17
24	7	1	48	19	0.39	0.461	0.168	0.36	936	54	12
25	8	1	556	93	0.17	0.356	0.103	0.29	960	51	18

*M: Messung, G: Gebäude, Oi: oberirdisch, Ui: unterirdisch, p: Luftdruck, rH: relative Luftfeuchtigkeit, T: Temperatur

Index		Oi/Ui*	Radonkonzentration			Gleichgewichtsfaktor			p*	rH*	T*
M*	G*		\bar{x}	σ	σ/\bar{x}	\bar{x}	σ	σ/\bar{x}			
			[Bq/m ³]	[Bq/m ³]	[1]	[1]	[1]	[mbar]	[%]	[°C]	
26	8	1	319	62	0.19	0.371	0.082	0.22	960	50	19
27	8	1	294	97	0.33	0.182	0.067	0.37	959	44	21
28	8	1	209	43	0.20	0.148	0.053	0.36	960	42	19
29	9	1	572	148	0.26	0.238	0.067	0.28	966	75	20
30	9	1	99	60	0.61	0.268	0.106	0.40	965	80	22
31	9	1	17	9	0.57	0.633	0.480	0.76	965	71	21
32	10	1	74	25	0.33	0.246	0.099	0.40	843	64	21
33	10	1	1429	617	0.43	0.065	0.013	0.20	843	78	19
34	11	1	43	18	0.42	0.472	0.319	0.68	980	51	21
35	12	1	54	20	0.37	0.340	0.210	0.62	979	66	17
36	12	1	153	55	0.36	0.080	0.039	0.48	979	73	18
37	13	1	7	5	0.71	0.568	0.650	1.14	914	75	22
38	13	1	54	15	0.28	0.180	0.117	0.65	914	59	19
39	14	1	103	79	0.77	0.360	0.126	0.35	991	74	22
40	15	1	213	31	0.15	0.290	0.090	0.31	945	74	20
41	16	0	1136	5	0.00	0.349	0.140	0.40	956	67	15
42	17	0	335	59	0.18	0.742	0.231	0.31	909	60	18
43	17	0	559	87	0.16	0.151	0.070	0.47	910	56	13
44	17	0	859	116	0.13	0.366	0.100	0.27	910	89	12
45	17	0	696	110	0.16	0.226	0.061	0.27	910	64	11
46	18	0	41	13	0.32	0.220	0.119	0.54	920	41	20
47	18	0	58	16	0.28	0.340	0.214	0.63	919	59	15
48	19	0	16	10	0.62	0.837	0.416	0.50	940	53	14
49	19	0	84	25	0.30	0.682	0.324	0.47	941	70	10
50	19	0	40	16	0.39	0.259	0.211	0.81	945	70	10
51	19	0	62	21	0.35	0.916	0.281	0.31	945	75	10
52	20	0	110	43	0.39	0.291	0.149	0.51	942	72	13
53	20	0	1042	327	0.31	0.971	0.289	0.30	936	96	12
54	20	0	134	65	0.49	0.249	0.133	0.54	944	76	15
55	20	0	982	256	0.26	0.200	0.053	0.26	934	77	15
56	20	0	654	844	1.29	0.523	0.284	0.54	933	79	14
57	21	0	317	65	0.20	0.718	0.275	0.38	939	66	15
58	21	0	351	71	0.20	0.655	0.123	0.19	939	84	12
59	22	0	1679	129	0.08	0.246	0.048	0.19	951	73	12
60	22	0	2375	173	0.07	0.166	0.034	0.21	948	97	12

*M: Messung, G: Gebäude, Oi: oberirdisch, Ui: unterirdisch, p: Luftdruck, rH: relative Luftfeuchtigkeit, T: Temperatur

Index		Oi/ui*	Radonkonzentration			Gleichgewichtsfaktor			p*	rH*	T*
M*	G*		\bar{x}	σ	σ/\bar{x}	\bar{x}	σ	σ/\bar{x}			
			[Bq/m ³]	[Bq/m ³]	[1]	[1]	[1]	[mbar]	[%]	[°C]	
61	22	0	3648	348	0.10	0.318	0.069	0.22	951	79	10
62	22	0	1384	414	0.30	0.458	0.095	0.21	949	62	10
63	23	0	1370	101	0.07	0.134	0.038	0.29	948	75	9
64	23	0	2260	136	0.06	0.356	0.061	0.17	948	88	8
65	24	0	12009	704	0.06	0.248	0.019	0.08	921	94	10
66	24	0	4829	306	0.06	0.290	0.023	0.08	921	89	10
67	24	0	2084	200	0.10	0.196	0.048	0.24	921	55	11
68	24	0	238	149	0.63	0.470	0.393	0.84	921	97	7
69	25	0	233	50	0.21	0.550	0.146	0.27	966	61	15
70	26	0	35	14	0.39	0.317	0.224	0.71	760	34	8
71	26	0	356	66	0.19	0.080	0.024	0.30	761	32	11
72	27	0	78	51	0.66	0.030	0.020	0.66	690	50	20
73	27	0	52	13	0.24	0.501	0.206	0.41	691	59	18
74	27	0	70	32	0.46	0.020	0.020	0.99	688	45	20
75	27	0	25	13	0.51	0.026	0.031	1.20	688	42	20
76	27	0	267	42	0.16	0.346	0.104	0.30	689	76	11
77	27	0	101	59	0.58	0.115	0.113	0.98	689	84	5
78	28	0	99	36	0.36	0.030	0.027	0.91	819	64	17
79	28	0	94	45	0.48	0.023	0.019	0.85	819	56	16
80	29	0	368	49	0.13	0.030	0.017	0.56	879	47	24
81	29	0	423	71	0.17	0.050	0.023	0.46	879	56	19
82	30	0	11851	865	0.07	0.066	0.017	0.26	902	91	7
83	31	0	16	9	0.60	0.050	0.058	1.17	852	48	15
84	31	0	114	32	0.28	0.597	0.383	0.64	840	63	17
85	31	0	139	36	0.26	0.767	0.253	0.33	870	73	14
86	31	0	388	68	0.18	0.410	0.067	0.16	867	89	12
87	31	0	318	68	0.22	0.524	0.162	0.31	865	88	6
88	31	0	368	61	0.17	0.293	0.080	0.27	859	66	16
89	31	0	167	43	0.25	0.186	0.132	0.71	871	67	16
90	32	0	32	12	0.37	0.118	0.085	0.72	907	39	14
91	33	0	822	22	0.03	0.036	0.010	0.28	891	68	21
92	33	0	251	10	0.04	0.018	0.010	0.54	891	66	21
93	34	0	51	24	0.47	0.250	0.250	1.00	905	51	20
94	34	0	112	29	0.26	0.100	0.070	0.70	905	89	12
95	35	0	28	15	0.54	0.080	0.064	0.80	957	63	23

*M: Messung, G: Gebäude, Oi: oberirdisch, Ui: unterirdisch, p: Luftdruck, rH: relative Luftfeuchtigkeit, T: Temperatur

Index		Oi/Ui*	Radonkonzentration			Gleichgewichtsfaktor			p*	rH*	T*
M*	G*		\bar{x}	σ	σ/\bar{x}	\bar{x}	σ	σ/\bar{x}			
			[Bq/m ³]	[Bq/m ³]	[1]	[1]	[1]	[1]	[mbar]	[%]	[°C]
96	35	0	25	9	0.36	0.030	0.029	0.96	957	56	19
97	36	0	156	11	0.07	0.011	0.010	0.90	968	48	23
98	36	0	154	11	0.07	0.031	0.026	0.85	968	56	19
99	37	0	236	39	0.17	0.488	0.145	0.30	868	84	12
100	38	0	4220	245	0.06	0.363	0.063	0.17	870	85	13
101	38	0	3794	360	0.09	0.134	0.027	0.20	870	78	14
102	39	0	127	26	0.20	0.185	0.068	0.37	935	64	17
103	39	0	146	29	0.20	0.056	0.032	0.57	935	62	18
104	40	0	375	58	0.15	0.057	0.025	0.43	941	64	21
105	41	0	41	16	0.39	0.376	0.188	0.50	961	74	19
106	42	0	1259	143	0.11	0.088	0.025	0.29	962	54	17
107	43	0	839	87	0.10	0.067	0.019	0.28	967	59	17

*M: Messung, G: Gebäude, Oi: oberirdisch, Ui: unterirdisch, p: Luftdruck, rH: relative Luftfeuchtigkeit, T: Temperatur

Tabelle A.1: Diese Tabelle enthält die Messdaten aller Kurzzeitmessungen, die in diesem Bericht ausgewertet wurden. Dabei wurden die Messungen und die Gebäude indexiert, damit die Vertraulichkeit der Objekte sichergestellt ist. Der Wert 1 in der Spalte „Oi/Ui“ gibt an, dass das Objekt oberirdisch ist, eine 0 gibt an, dass das Objekt unterirdisch ist. \bar{x} steht für den Mittelwert einer Messung, σ steht für die Standardabweichung dieser Messung, die Spalte σ/\bar{x} zeigt somit das Verhältnis zwischen Standardabweichung und Mittelwert an. Diese Spalten sind jeweils für Radonkonzentration und Gleichgewichtsfaktor aufgeführt. Zusätzlich sind die Mittelwerte des Luftdrucks, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur für jede Messung gegeben.

Anhang B

Simultane Messung der Aerosolkonzentration

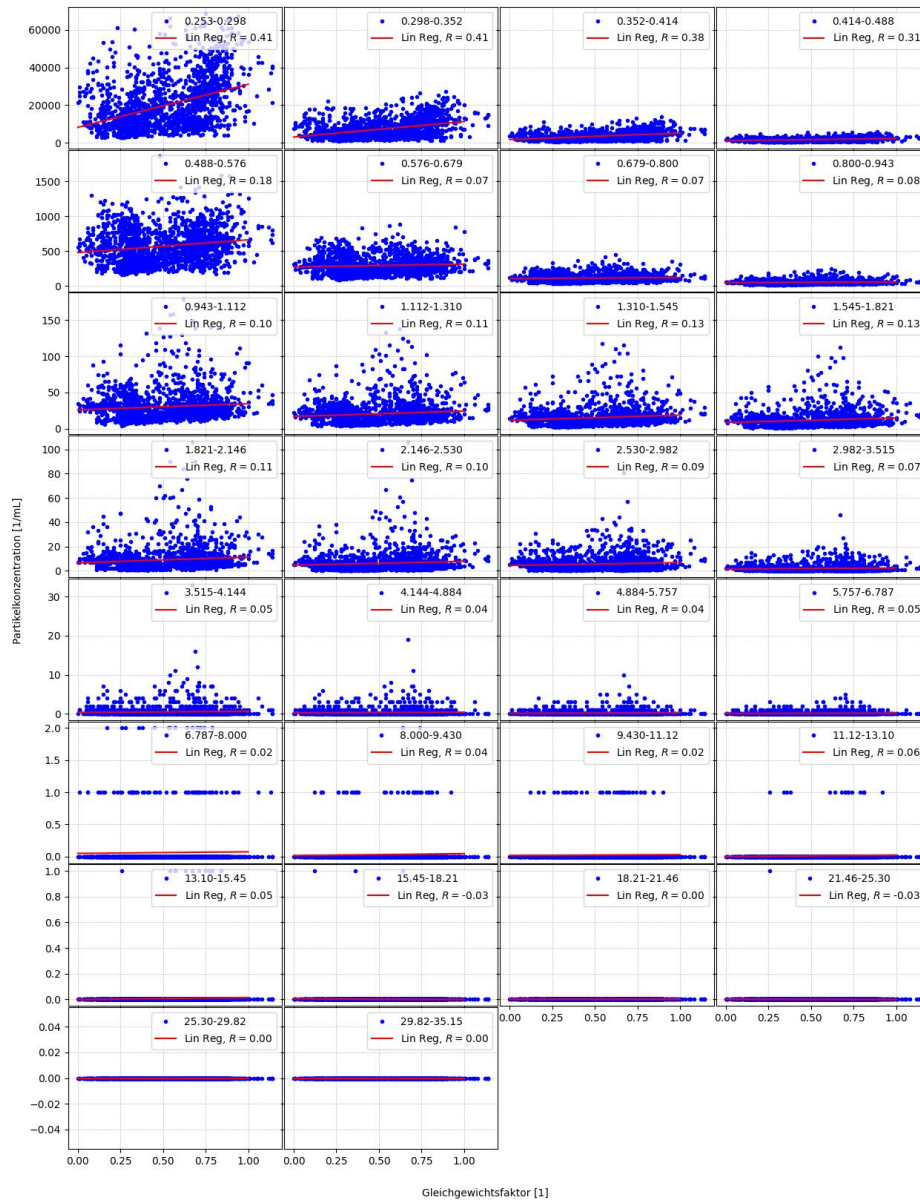


Abbildung B.1: Darstellung der Messwerte für Gleichgewichtsfaktor und Partikelkonzentration einzeln für jeden Grössenkanal bei Messung 1 der simultanen Messung der Aerosolkonzentration und des Gleichgewichtsfaktors. Zusätzlich ist in jeder Grafik eine lineare Regression gezeigt.

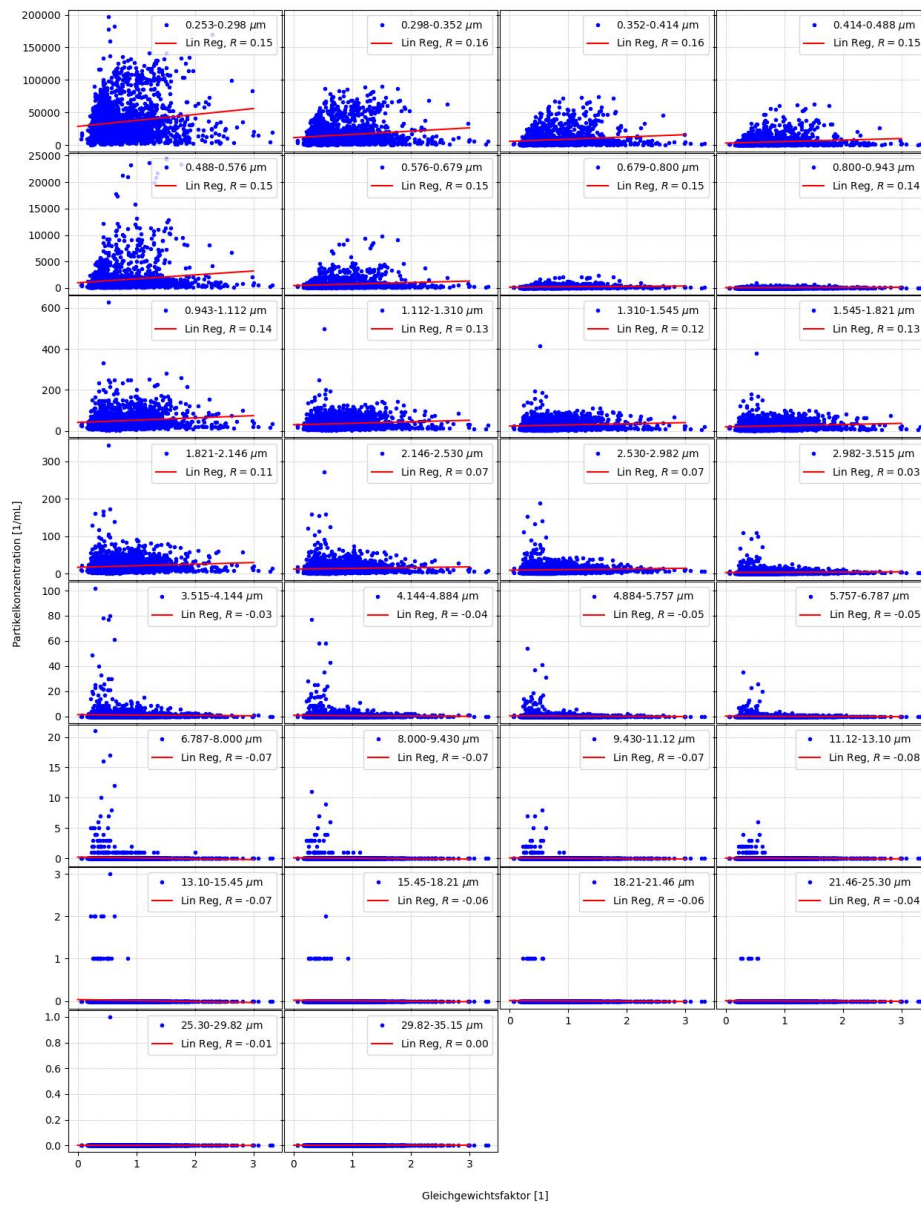


Abbildung B.2: Darstellung der Messwerte für Gleichgewichtsfaktor und Partikelkonzentration einzeln für jeden Grössenkanal bei Messung 2 der simultanen Messung der Aerosolkonzentration und des Gleichgewichtsfaktors. Zusätzlich ist in jeder Grafik eine lineare Regression gezeigt.