



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Neue Kurzzeitmessmethoden für die Ermittlung der Rn-222- Aktivitätskonzentration in Wohnräumen

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur

im Rahmen des Studiums
Physikalische Energie- und Messtechnik

eingereicht von

Marius Blum, B.Sc.
Matrikelnummer 1425615

ausgeführt an der
Technischen Universität Wien
Karlsplatz 13
A-1040 Wien

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Franz Josef Maringer

Wien, am 14. Mai 2024

Unterschrift des Verfassers

Unterschrift des Betreuers

Kurzfassung

Die Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen (Indoor Radon Concentration, IRC) ist stark vom Lüftungsgeschehen abhängig, aber auch vom geologischen Untergrund, der Bodenbeschaffenheit und dem Gebäudezustand [1]. Außerdem weisen zahlreiche internationale Studien darauf hin, dass sich die IRC aufgrund äußerer Umwelteinflüsse wie Außentemperatur oder Luftdruck verändern kann. So haben Gebäude in Bezug auf die IRC auch tageszeitliches, saisonales und jahreszeitliches Verhalten [2]. Die Erhebung der mittleren jährlichen IRC erfordert im Allgemeinen eine Langzeitmessung über mehrere Monate [3]. Aufgrund der möglichen gesundheitlichen Risiken durch Radon ist eine raschere Ermittlung der mittleren Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen erstrebenswert.

Diese Diplomarbeit ist Teil einer Radon-Studie, deren Ziel es ist, ein Verfahren zu entwickeln, den Jahresmittelwert der Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen anhand von Kurzzeitmessungen in Grenzen abschätzen zu können.

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist es, Auskunft darüber zu geben, unter welchen Voraussetzungen die Anwendung von Kurzzeitmessungen mit aktiven Radonmessgeräten zur Abschätzung der mittleren jährlichen IRC in Privathaushalten herangezogen werden kann. Es wurde untersucht, welche Parameter die IRC am stärksten beeinflussen, beziehungsweise welche Faktoren für zeitliche Veränderungen der IRC berücksichtigt werden müssen.

Im Zuge dieser Studie wurde die IRC in Wohn- und Schlafräumen 24 österreichischer Privathaushalte erforscht. Zur Eruiierung der zeitlichen Veränderungen der IRC wurden in allen Haushalten Kurzzeitmessungen mittels aktiver Radonmessgeräte sowohl in den Wintermonaten, als auch nach der Heizperiode durchgeführt. Mittels passiver Kernspurdetektoren erfolgten Langzeitmessungen, um die mittlere jährliche IRC in den untersuchten Räumen zu ermitteln. Neben der IRC wurden wesentliche Gebäudedaten (Baujahr, Haustyp, Baumaterial etc.) und Umweltdaten (Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und Temperatur) miterhoben. Die Bewohner:innen wurden zu ihren Lüftungsgewohnheiten in den untersuchten Räumen befragt. Zur Untersuchung des Einflusses der meteorologischen Parameter auf die zeitlichen Veränderungen der IRC wurden Daten nächstgelegener Wetterstationen der GeoSphere Austria gesammelt. Es wurde untersucht, ob statistisch signifikante Beziehungen zwischen der IRC und den Wetterdaten vorliegen.

Die vorliegende Arbeit kam zum Ergebnis, dass eine etwa dreiwöchige Kurzzeitmessung innerhalb der Heizsaison im Mittel um den Faktor 1,50 (+ 50 %) von der mittleren jährlichen IRC abweicht (Mittelwert 1,50 (SD = 0,40) und Median = 1,37). Die Kurzzeitmessungen außerhalb der Heizsaison weichen im Mittel um den Faktor 0,83 (-17 %) von der mittleren jährlichen IRC ab (Mittelwert 0,83 (SD = 0,40) und Median = 0,84). Dass bei den meisten Häusern die mittlere IRC in den Wintermonaten höher ist als in den Sommermonaten, stimmt mit den Beobachtungen andere Studien überein [4], [5], [6].

Die Auswertung der Daten zeigte, dass die IRC durch Lüften der Räume stark gesenkt werden kann. Außerdem wurde festgestellt, dass die mittlere jährliche IRC in den verschiedenen Wohnräumen innerhalb eines Haushalts große Unterschiede aufweisen kann. Baulich bedingte Gegebenheiten wie Stockwerk und Fundamenttyp des Raumes haben einen starken Einfluss auf die Höhe des Radonpotentials.

Obwohl die zeitliche Veränderung der IRC stark vom Lüftungsgeschehen beeinflusst wird, konnten mehrere signifikante (Anti-)Korrelationen zwischen der IRC und den meteorologischen Parametern festgestellt werden. Bei 52 % der Kurzzeitmessungen wurden signifikante Anti-Korrelationen ($\rho > 0,2$) zwischen der IRC und der Außentemperatur erfasst. Als Ursache hierfür ist das Auftreten des Kamineffekts zu nennen, bei dem durch Temperaturunterschiede zwischen innen und außen das radioaktive Gas verstärkt in die Innenräume eindringt. Außerdem wurden Korrelationen zwischen der IRC und dem Luftdruck, sowie der Windgeschwindigkeit beobachtet.

Aufgrund der möglichen Einflussfaktoren (Geologie, Lüftungsverhalten, Bauweise, meteorologische Parameter) und der komplexen Zusammenhänge, kann die mittlere jährliche IRC mittels Kurzzeitmessungen nicht genau bestimmt werden. Jedoch kann auf Basis von physikalischen Überlegungen und unter Einbeziehung der Erkenntnisse dieser Arbeit ein robustes radioökologisch-statistisches Modell erstellt werden, mit welchem die mittlere jährliche IRC anhand von Kurzzeitmessungen in Grenzen abgeschätzt werden kann.

Abstract

New short-term measurement methods for determining the Rn-222 activity concentration in living spaces

The Indoor Radon Concentration (IRC) depends heavily on the ventilation process but also on the geological surface, the soil conditions and the construction of the buildings [1]. In addition to this, numerous international studies indicate that the IRC can change due to external environmental influences such as outside temperature or air pressure. Buildings also have diurnal and seasonal behaviour in relation to the IRC [2]. The evaluation of the mean annual IRC generally requires long-term measurements over several months [3]. Due to the possible health risks from radon, a faster estimate of the average indoor radon concentration is desirable.

This diploma thesis is part of a radon study, the aim of which is to develop a method to estimate the annual average indoor radon concentration within limits based on short-term measurements.

The aim of this thesis is to provide information about the conditions under which short-term measurements with active radon measuring devices can be used to evaluate the mean annual IRC in private households. Parameters which influence the IRC the most and which factors have to be taken into account for seasonal changes in the IRC have been investigated.

As part of the study the IRC was examined in living rooms and bedrooms in 24 private Austrian households. To determine changes in IRC over time, short-term measurements were carried out in all households using active radon measuring devices both during the winter months and after the heating season. Long-term measurements were carried out using passive nuclear track detectors to determine the average annual IRC in the rooms. In addition to the IRC, important building data (year of construction, house type, building materials, etc.) and environmental data (humidity, air pressure and temperature) were also collected. The residents were asked about their ventilation habits in the rooms examined. To investigate the influence of meteorological parameters on the temporal changes of the IRC, data from neighboring weather stations were gathered. One of the objectives was if a statistical relationship between the IRC and the weather data exists.

In conclusion, short-term measurements of approximately three weeks within the winter season deviate from the mean annual IRC by a factor of 1.50 (+ 50 %) on average (mean 1.50 (SD = 0.40) and median = 1.37). The short-term measurements outside the heating season deviate from the mean annual IRC by a factor of 0.83 (- 17 %) on average (mean 0.83 (SD = 0.40) and median = 0.84). The fact that the mean IRC for most houses is higher in the winter months than in the summer months is consistent with the observations of other studies [4], [5], [6].

It was found that the IRC can be significantly reduced by ventilating the rooms was made. It was also observed that the mean annual IRC can vary widely across different living spaces within a household. Structural conditions such as the floor level and type of foundation of the room have a strong influence on the level of radon potential.

Although the temporal variation of the IRC is strongly influenced by ventilation events, several significant (anti-)correlations between the IRC and the meteorological parameters could be observed. Significant anti-correlations ($\rho > 0.2$) between IRC and outside temperature were found in 52 % of short-term measurements. The reason for this is the occurrence of the chimney effect, in which radioactive gas penetrates into the interior spaces due to temperature differences between the inside and outside. In addition, correlations between the IRC and air pressure as well as wind speed were observed.

Due to possible influencing factors (geology, ventilation behavior, construction and meteorological conditions) and the complex relationships, the mean annual IRC cannot be precisely determined using short-term measurements. However, based on physical considerations and taking into account, the findings of this work, a robust radioecological-statistical model can be created with which the mean annual IRC can be estimated within limits based on short-term measurements.

Glossar

Folgend sind die in dieser Diplomarbeit verwendeten physikalischen Größen und Einheiten definiert.

Name	Formelzeichen	Einheit	Einheitenzeichen
------	---------------	---------	------------------

Länge	l	Meter	m
-------	---	-------	---

Definition: „Der Meter ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von 1/299 792 458 Sekunden durchläuft.“ [7]

Temperatur	T	Celsius	°C
------------	---	---------	----

Definition: Die Temperatur ist eine intensive thermodynamische Zustandsgröße zur qualitativen Erfassung des Wärmeinhaltes eines Systems. Sie ist eine skalare Basisgröße mit der SI-Einheit Kelvin. [8] „Kelvin (Definition bis 2019): Das Kelvin, die Einheit der thermodynamischen Temperatur, ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers [9]“ Nach der Neudefinition der Temperatureinheit werden Temperaturen mit direktem Bezug zur Energie definiert [9].

$$t \text{ in } (^\circ\text{C}) = T \text{ (in K)} - 273,15$$

Zeit	t	Sekunde	s
------	---	---------	---

Definition: "Die Sekunde ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids Cs-133 entsprechenden Strahlung." [10]

Geschwindigkeit	v	<i>Meter/Sekunde</i>	<i>m/s</i>
-----------------	---	----------------------	------------

Definition: Die Geschwindigkeit entspricht der zurückgelegten Wegstrecke pro Zeitintervall. Sie ist eine vektorielle Größe mit der SI-Einheit m/s. Die Geschwindigkeit $v(t)$ der Bewegung eines Massenpunktes berechnet sich als erste Ableitung des Ortsvektors $r(t)$ nach der Zeit t . [11]

$$v(t) = \frac{dr(t)}{dt}$$

Name	Formelzeichen	Einheit	Einheitenzeichen
------	---------------	---------	------------------

Luftdruck	p	Millibar	mbar
------------------	---	----------	------

Definition: Der Luftdruck ist jener Druck, den eine atmosphärische Luftsäule aufgrund ihres Gewichtes auf die darunter befindende Begrenzungsfläche ausübt [12]. Die Einheit Millibar (mbar) entspricht der SI-Einheit Hektopascal (hPa).

relative Luftfeuchte	r.F.	Prozent	%
-----------------------------	------	---------	---

Definition: Die Luftfeuchtigkeit beschreibt den Wasserdampfgehalt in der Luft. Die Aufnahmefähigkeit für Wasserdampf für Luft nimmt mit steigender Temperatur zu. In Relation zur maximalen Luftfeuchtigkeit wird die relative Luftfeuchtigkeit angegeben. Sie beschreibt, wieviel Prozent der maximal möglichen Feuchte die Luft tatsächlich enthält. [13]

Aktivität	A	Becquerel	Bq
------------------	---	-----------	----

Definition: „Die Aktivität A einer Menge an radioaktiven Kernen in einem bestimmten Energiezustand zu einem bestimmten Zeitpunkt ist der Quotient von dN^* durch dt, wobei dN^* der Erwartungswert der Anzahl der spontanen Umwandlungen von dem bestimmten Energiezustand im Zeitintervall dt ist. Die Einheit der Aktivität ist 1 Becquerel (Bq), wobei $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$.“ [14]

Aktivitätskonzentration	A_c (IRC)	<i>Becquerel / Kubikmeter</i>	Bq/m^3
--------------------------------	-------------	-------------------------------	----------

Definition: „Die Aktivitätskonzentration beschreibt das Verhältnis der Aktivität eines Radionuklids zum Volumen des Materials, in dem das Radionuklid verteilt ist. Die Aktivitätskonzentration in der Luft wird in der Einheit Becquerel pro Kubikmeter (Bq/m^3) angegeben. Die Aktivitätskonzentration der Luft gibt an, welche Aktivität eines bestimmten Radionuklids in einem Kubikmeter Luft enthalten ist.“ [15] In dieser Arbeit beschränkt sich die Aktivitätskonzentration auf die „Radon-Aktivitätskonzentration in Innenräume“ (Indoor Radon-Concentration) weshalb hierfür das Formelzeichen „IRC“ verwendet wird.

Halbwertszeit	$T_{1/2}$	Sekunde	s
----------------------	-----------	---------	---

Definition: Die Halbwertszeit entspricht in der Radiochemie jener Zeit, in der die Hälfte der radioaktiven Isotope entsprechend einer Exponentialfunktion zerfallen sind. Sie dient zur Kennzeichnung der Stabilität von Radionukliden. [16]

Abkürzungsverzeichnis

A	Massenzahl
a	Jahre
AGES	Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit
BEV	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen
BfS	Deutsches Bundesamt für Strahlenschutz
Bi	Bismut
Bq	Becquerel
CSV	Comma-separated values
d	Tage
D6X	Windrichtung (GeoSphere Austria)
E1MA	AlphaE Nr.1 der MA39, Stadt Wien
E2MA	AlphaE Nr.2 der MA39, Stadt Wien
E4MA	AlphaE Nr.4 der MA39, Stadt Wien
Euratom	Europäische Atomgemeinschaft
F	Korrekturfaktor
FFX	äußere relative Luftfeuchtigkeit (GeoSphere Austria)
FS	Faktor Sommer
FW	Faktor Winter
FWS	Faktor Winter/Sommer
G1MA	AlphaGuard Nr.1 der MA39, Stadt Wien
G2MA	AlphaGuard Nr.2 der MA39, Stadt Wien
G3SL	AlphaGuard Nr.3 Seibersdorf Laboratories
G4SL	AlphaGuard Nr.4 Seibersdorf Laboratories
ICRP	Internationale Strahlenschutzkommission
IRC	Indoor Radon Concentration
KZM	Kurzzeitmessung
LZM	Langzeitmessung
MA39	Magistratsabteilung 39, Stadt Wien
min	Minuten
MS-Excel	Microsoft-Excel
n	beliebige natürliche Zahl

NaOH	Natriumhydroxid
NOE	Niederösterreich
OOE	Oberösterreich
ÖNRAP	Österreichische Nationale Radonprojekt
PADC	Polyallyldiglycolcarbonat
Pb	Blei
Po	Polonium
PPX	Außenluftdruck (GeoSphere Austria)
R1FJM	RadonEye Franz Josef Maringer
R2BEV	RadonEye des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen
Ra	Radium
Rn	Radon
RnV	Radonschutzverordnung
RSX	Niederschlagsmenge (GeoSphere Austria)
SL	Seibersdorf Laboratories
$T_{1/2}$	Halbwertszeit
Thorium	Th
TIR	Tirol
TTX	Außentemperatur (GeoSphere Austria)
TU	Technische Universität
U	Uran
UTC	koordinierte Weltzeit
VVX	Windgeschwindigkeit (GeoSphere Austria)

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
Abstract	4
Glossar	6
Abkürzungsverzeichnis	8
1. Hintergrund	13
1.1 <i>Allgemeines über Radon</i>	13
1.1.1 Radon und natürliche Zerfallsreihen	13
1.1.2 Radon Emanation und Anreicherung in Gebäuden	14
1.1.3 Radon und Gesundheit	15
1.2 <i>Rechtliche Rahmenbedingungen</i>	16
1.2.1 Strahlenschutzrichtlinie 2013/59/EURATOM	16
1.2.2 Strahlenschutzgesetz 2020	16
1.2.3 Radonschutzverordnung	16
1.3 <i>Radonsituation in österreichischen Privathaushalten</i>	18
1.4 <i>Einflussfaktoren auf die Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen (IRC)</i>	19
1.4.1 Geologie und Bodenbeschaffenheit	19
1.4.2 Bauweise und Gebäudezustand	21
1.4.3 Nutzungsverhalten der Bewohner:innen	22
1.4.4 Meteorologische Einflüsse und Saisonale Veränderungen der IRC	22
2. Ziel der Diplomarbeit	23
3. Materialien und Methoden	24
3.1 <i>Datenerhebung - Messkonzept</i>	24
3.2 <i>Auswahl der Studien-Haushalte</i>	25
3.2.1 Allgemeine Vorgangsweise	25
3.2.2 Haushalte im südlichen Niederösterreich	26
3.2.3 Haushalte in Oberösterreich	28
3.2.4 Haushalte in Tirol	29
3.2.5 Haushalte in Wien und Umgebung	30
3.3 <i>Gebäudedaten und Nutzungsverhalten</i>	31

3.4	<i>Kurzzeitmessungen mit aktiven Messgeräten</i>	31
3.4.1	Aktive Messgeräte	31
3.4.2	Durchführung der Messungen	33
3.4.3	Zeitliche Koordination der Kurzzeitmessungen	33
3.4.4	Vergleichsmessungen der aktiven Radonmessgeräte	35
3.4.5	Vergleichsmessung im Strahlenschutzlabor der Stadt Wien	36
3.4.6	Vergleichsmessung in Simmering	37
3.4.7	Vergleichsmessung im südlichen Niederösterreich	37
3.4.8	Ermittlung der Korrekturfaktoren einer Vergleichsmessung	39
3.4.9	Ermittlung der Unsicherheiten der Korrekturfaktoren	40
3.4.10	Zusammenfassung der Korrekturfaktoren und deren Unsicherheiten	42
3.4.11	Datenübertragung und Datenaufbereitung	44
3.5	<i>Langzeitmessungen mit Kernspur-Exposimeter</i>	47
3.5.1	Passive Kernspur-Detektoren	47
3.5.2	Vorbereitung der Kernspur-Detektoren	48
3.5.3	Messdurchführung	49
3.5.4	Entwicklung der Kernspur-Detektoren	50
3.5.5	Auswertung der Kernspur-Detektoren	52
3.5.6	Datenaufbereitung	53
3.6	<i>Erhebung meteorologischer Daten</i>	54
3.7	<i>Statistische Analyse</i>	55
3.7.1	Spearman-Rangkorrelationen der IRC mit den Studiendaten	55
3.7.2	ETA-Koeffizient der IRC mit den Gebäudedaten und den Lüftungsgewohnheiten	58
4.	Ergebnisse	60
4.1	<i>Kurzzeitmessungen in den Studienhaushalten</i>	60
4.2	<i>Langzeitmessungen in den Räumen der Kurzzeitmessungen</i>	62
4.3	<i>Gegenüberstellung der Kurzzeitmessungen mit den jeweiligen Langzeitmessungen</i>	62
4.4	<i>Relativer Überblick der Messergebnisse</i>	65
4.5	<i>Statistische Parameter</i>	67
4.5.1	Statistische Parameter der Kurzzeit- und Langzeitmessungen	67
4.5.2	Statistische Parameter der relativen Faktoren	67
4.6	<i>Einfluss der Geologie und Bodenbeschaffenheit auf die IRC</i>	70
4.7	<i>Einfluss der Bauweise und des Gebäudezustandes auf die IRC</i>	72
4.7.1	Erhebungen in den Studienhaushalten	72
4.7.2	IRC-Ergebnisse und Eigenschaften aller Räume der Studie	73
4.7.3	Parallele Kurzzeitmessungen bei NOE_01 in drei Räumen	77
4.8	<i>Einfluss des Nutzungsverhaltens der Bewohner:innen auf die IRC</i>	78
4.8.1	Veränderung der Türstellung zu angrenzendem Raum	78
4.8.2	Lüftungsverhalten und IRC-Veränderung bei längerer Abwesenheit	78
4.8.3	Jahreszeitenabhängiges Lüftungsverhalten	79
4.8.4	Veränderung des Lüftungsverhaltens aller Studienteilnehmer:innen	81
4.9	<i>Einfluss von meteorologischen Parametern auf die IRC</i>	83
4.9.1	Spearman-Rangkorrelationen mit den Umwelt- und Wetterparametern	83
4.9.2	Zusammenfassung der Spearman-Rangkorrelationen	85
4.9.3	Einfluss von meteorologischen Parameter bei NOE_02	86

5. Diskussion.....	88
5.1 Allgemeine Erkenntnisse.....	88
5.2 Erkenntnisse des Einflusses der Geologie und der Bodenbeschaffenheit auf die IRC.....	91
5.3 Erkenntnisse des Einflusses der Bauweise auf die IRC.....	92
5.4 Erkenntnisse des Einflusses des Nutzungsverhaltens der Bewohner:innen auf die IRC.....	95
5.5 Erkenntnisse des Einflusses der meteorologischen Parameter auf die IRC.....	97
5.5.1 Einfluss der Temperatur auf die IRC.....	97
5.5.2 Korrelationen der IRC mit dem Luftdruck.....	98
5.5.3 Korrelationen der IRC mit der relative Luftfeuchtigkeit.....	98
5.5.4 Korrelationen der IRC mit der Windgeschwindigkeit.....	99
6. Fazit	100
7. Literaturverzeichnis.....	102
8. Abbildungsverzeichnis.....	106
9. Tabellenverzeichnis.....	108
10. Anhang	109
10.1 Studien-Information und Einverständniserklärung.....	109
10.2 Studien-Fragebogen.....	115

1. Hintergrund

1.1 Allgemeines über Radon

1.1.1 Radon und natürliche Zerfallsreihen

Das radioaktive chemische Element Radon hat das Symbol „Rn“, die Ordnungszahl 86 und befindet sich im Periodensystem der Elemente in der Hauptgruppe der Edelgase. Radon hat fünf natürlich vorkommende Isotope, welche Folgeprodukte der drei natürlichen Zerfallsreihen sind [17]. Die Mutternuklide dieser Zerfallsketten sind die primordialen Radionuklide U-238 ($T_{1/2} = 4,468 \cdot 10^9$ a), U-235 ($T_{1/2} = 7,038 \cdot 10^8$ a), und Th-232 ($T_{1/2} = 1,405 \cdot 10^{10}$ a), welche bereits bei der Erdentstehung gebildet wurden und aufgrund ihrer langen Halbwertszeiten noch in der Natur existieren. Schwere radioaktive Radionuklide, wie jene der natürlichen Zerfallsreihen, emittieren beim Zerfall vorwiegend Alphateilchen ($A = 4$), wobei sich die Massenzahl der jeweiligen Tochternuklide um vier vermindert. Aufgrund dieser Massenverhältnisse waren ursprünglich vier natürliche Zerfallsreihen vorhanden. Da jedoch das Mutternuklid Neptunium-237 ($T_{1/2} = 2,144 \cdot 10^6$ a) eine im Vergleich zum Erdzeitalter ($4,5 \cdot 10^9$ a) kurze Halbwertszeit aufweist, ist diese Zerfallsreihe in der Natur nicht mehr existent. [18]

Thorium-Reihe ($A = 4n + 0$)

Neptunium-Reihe ($A = 4n + 1$)

Uran-Radium-Reihe ($A = 4n + 2$)

Uran-Actinium-Reihe ($A = 4n + 3$)

Die Tochternuklide der drei primordialen Zerfallsketten haben im Vergleich zu den Mutternukliden kurze Halbwertszeiten, welche meist im Sekunden- bis Jahresbereich liegen. Die Radionuklide der drei noch existierenden Zerfallsreihen bilden über mehrere Schritte durch Alpha- beziehungsweise Beta-Zerfälle instabile Folgenuklide. Die drei natürlichen Zerfallsreihen enden letztendlich bei stabilen Blei-Isotopen [18].

Rn-222 hat eine Halbwertszeit von 3,82 Tagen, ist Teil der Uran-Radium-Zerfallsreihe und hat mit 90 % die höchste natürliche Häufigkeit der Radon-Isotope. Das Isotop Rn-220 mit einer Halbwertszeit von 55,60 Sekunden ist deutlich kurzlebiger und hat in der Natur das zweithäufigste Auftreten (9 % relative Häufigkeit). Es ist ein Zerfallsprodukt der Thorium-Reihe und wird im Strahlenschutz als „Thoron“ bezeichnet. Rn-219 hat eine Halbwertszeit von 3,96 Sekunden, die natürliche Häufigkeit von 1 % und hat radiologisch kaum eine Relevanz. Es ist ein Zerfallsprodukt des Ra-223 innerhalb der Uran-Actinium-Reihe und wird auch als „Actinon“ bezeichnet. Rn-218 entsteht mit geringer Zerfallswahrscheinlichkeit in der Uran-Radium-Reihe und hat eine Halbwertszeit von nur 0,35 Millisekunden. Rn-223, aus der Uran-Actinium-Reihe, ist das Folgeprodukt von Ra-227, welches mit einer äußerst geringen Zerfallswahrscheinlichkeit aus Thorium-231 entsteht. Wegen ihrer Seltenheit kommen die beiden Isotope in der Natur nur in Spuren vor und sind daher radiologisch nicht von Bedeutung. [17]

1.1.2 Radon Emanation und Anreicherung in Gebäuden

Aufgrund seiner verhältnismäßig langen Halbwertszeit und der damit verbundenen Häufigkeit ist das Rn-222 der Uran-Radium-Reihe das relevanteste Radon-Isotop für die Strahlenexposition des Menschen [14]. Wird in Strahlenschutz von „Radon“ gesprochen, ist das Isotop Rn-222 und dessen Folgeprodukte gemeint [17]. In der Erdkruste hat U-238 abhängig von der mineralischen Zusammensetzung etwa 30 bis 90 Bq/kg [14]. Die ersten Folgeprodukte des U-238 haben einschließlich dem Ra-226 ($T_{1/2} = 1620$ a) einen festen Aggregatzustand und sind somit in der Erdkruste gebunden [19]. Ra-226 wandelt sich unter Emission von Alphastrahlung in Rn-222 um, welches als Edelgas keine chemischen Verbindungen eingeht und aus dem Herkunftsmaterial austreten kann [19]. Da U-238 und Ra-226 in allen Gesteinen in verschiedensten Konzentrationen auftreten, bildet sich ständig neues Rn-222 nach [19]. Durch Strömungen und Diffusion wird Rn-222 an die Erdoberfläche befördert und gelangt so in die Atmosphäre [20]. In Regionen, welche eine hohe Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft aufweisen und das Radongas leicht an die Oberfläche gelangen kann, dringt Radon auch über Bauelemente im Fundamentbereich in Gebäude ein und kann sich dort in Innenräumen anreichern [14], [21]. Dieser Prozess tritt vor allem dann auf, wenn keine bauliche Abdichtung gegen den Untergrund vorhanden ist [21]. In weiterer Folge wandelt sich Rn-222 ($T_{1/2} = 3,82$ d) über mehrere Alpha- beziehungsweise Betazerfälle in Pb-210 um, welches eine relativ lange Halbwertszeit hat ($T_{1/2} = 22,23$ a). Die Zwischenprodukte sind die radioaktiven Schwermetalle Po-218, Pb-214, Bi-214 und Po-214, welche verhältnismäßig kurze Halbwertszeiten im Minuten- beziehungsweise Sekundenbereich haben und daher für den Strahlenschutz von großer Bedeutung sind. [21]

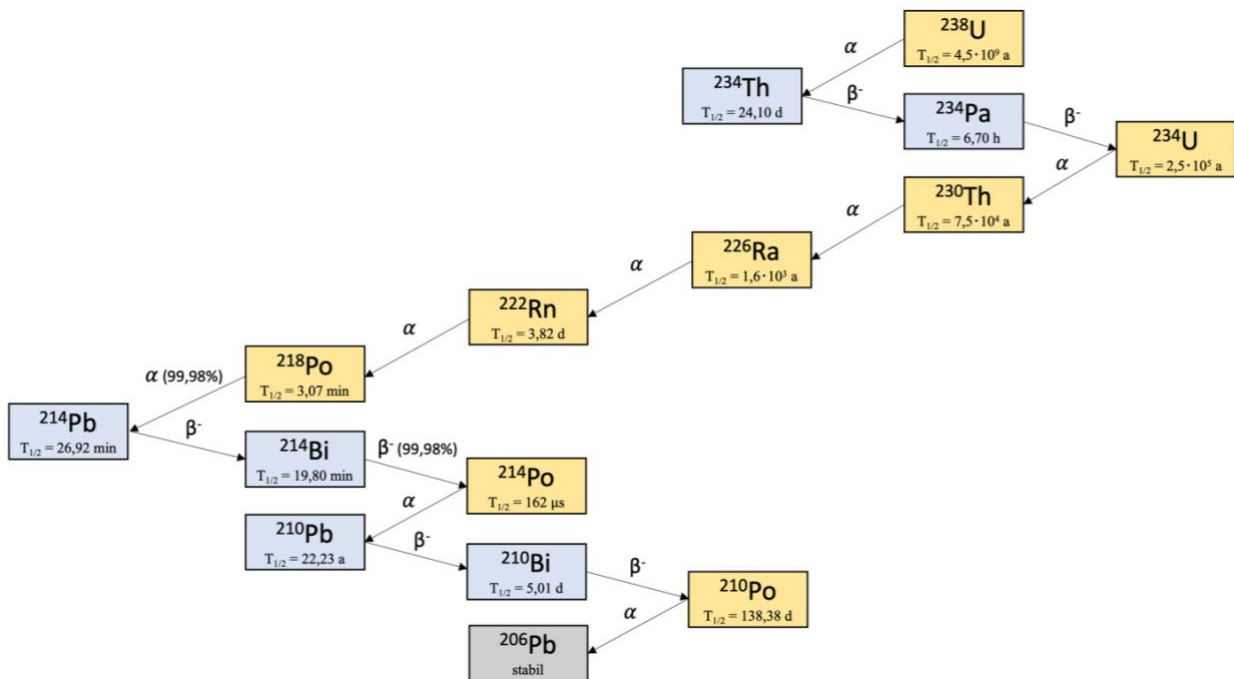


Abb. 1: Uran-Radium-Zerfallsreihe¹

¹ $T_{1/2}$ und Zerfallswahrscheinlichkeiten aus: <http://www.lnhb.fr/accueil/donnees-nucleaires/module-lara/>

1.1.3 Radon und Gesundheit

Tritt Radongas in Innenräume ein, kann es sich wegen Druckunterschiede durch Konvektion beziehungsweise durch Diffusion verbreiten [22]. Das inerte Radongas, sowie dessen radioaktiven Folgeprodukte schweben frei in der Raumluft, wobei sich die Radon-Zerfallsprodukte an feine Partikel in der Luft anlagern, und folglich auch an Oberflächen haften bleiben. Das reaktionsträge Radongas wird von Menschen bei der Atmung größtenteils wieder ausgeatmet, jedoch lagern sich die radioaktiven Folgeprodukte des Radongases im Atemtrakt ab. Vor allem die Alphastrahlung beim Zerfall der kurzlebigen Isotope Po-218 und Po-214 können zur Schädigung des Lungengewebes führen. [21]

Radon und dessen Folgeprodukte sind durchschnittlich für den größten Anteil der Strahlenexposition der Bevölkerung in Österreich verantwortlich. Eine hohe Konzentration von Radon kann sich negativ auf die Gesundheit des Menschen auswirken. Nach dem Rauchen stellt es die häufigste Ursache für Lungenkrebs dar. [23] Es wird geschätzt, dass Radon zwischen drei und 14 Prozent aller weltweiten Lungenkrebserkrankungen verursacht. Die Werte sind von der durchschnittlichen IRC und der Raucher:innen-Prävalenz des jeweiligen Staates abhängig. [24]

Schon im 16. Jahrhundert wurden häufig tödlich verlaufende Lungenkrankheiten unter jungen Bergarbeitern im Erzgebirge in Sachsen beobachtet („Schneeberger Krankheit“). Epidemiologische Bergarbeiter-Studien zeigen, dass das Lungenkrebsrisiko durch Radon erhöht wird. [25]

Einer dieser Studien, die „Wismut Uranbergarbeit-Kohortenstudie“ wird vom Deutschen Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) seit 1990 durchgeführt, um die gesundheitlichen Folgen durch Staub- und Strahlenbelastung wissenschaftlich zu erforschen. Die Studie umfasst ausführliche Untersuchungen an 59.000 männlichen Arbeitern, welche im Zeitraum von 1946 bis 1990 im Uranbergbau in der DDR beschäftigt waren. Für jeden einzelnen Bergarbeiter wurde unter Verwendung von Arbeitsunterlagen die Staub- und Strahlenexposition abgeschätzt. Die Kohortenstudie ist wegen des langen Beobachtungszeitraums sowie der zahlreichen gewonnenen Informationen einzigartig. Mithilfe der Daten der Studie kann unter anderem die Wahrscheinlichkeit berechnet werden, an Lungenkrebs in Zusammenhang mit Radon zu sterben. [26]

Darüber hinaus haben Studien in Europa, Nordamerika und China bestätigt, dass auch niedrige Radonkonzentrationen gesundheitliche Risiken bergen können und zum Auftreten von Lungenkrebs beitragen [21]. Durch eine Erhöhung der mittleren IRC um 100 Bq/m^3 steigt das relative Lungenkrebsrisiko um etwa 16 Prozent. Es wird davon ausgegangen, dass die Dosis-Wirkungs-Beziehung linear ist, also das Krebsrisiko direkt proportional mit der IRC steigt. Das Lungenkrebsrisiko durch Radon ist bei Raucher:innen etwa um den Faktor 25 mal höher als bei Personen, welche ein Leben lang nie geraucht haben. [27]

1.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

1.2.1 Strahlenschutzrichtlinie 2013/59/EURATOM

Die Europäische Union, als Teil der Europäischen Atomgemeinschaft (Euratom), ist für die Aufstellung und Umsetzung von einheitlichen Sicherheitsnormen zum Schutz der Bevölkerung verpflichtet. Seit 2013 sind die grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz vor ionisierender Strahlung in der 2013/59/EURATOM Richtlinie festgelegt. Diese Strahlenschutzrichtlinie beruht auf Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP Publikation 103) und deckt sich mit den Sicherheitsstandards der internationalen Atomenergie Organisation (IAEA). Die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union haben die Pflicht diese Sicherheitsnormen in nationales Recht umzusetzen. [14]

1.2.2 Strahlenschutzgesetz 2020

Österreich hat die Strahlenschutzrichtlinie 2013/59/EURATOM durch das Strahlenschutzgesetz 2020 umgesetzt. Am 01.08.2020 wurde das „Bundesgesetz über Maßnahmen zum Schutz vor Gefahren durch ionisierende Strahlung“ rechtsverbindlich. Zusammen mit mehreren Verordnungen, unter anderem der Radonschutzverordnung (RnV), dient es als gesetzliche Grundlage bei Gefahren durch ionisierende Strahlung. [28]

1.2.3 Radonschutzverordnung

Die „Verordnung über Maßnahmen zum Schutz von Personen vor Gefahren durch Radon“ ist seit dem 10.11.2020 rechtverbindlich. Das Ziel ist der Schutz vor Radon in Aufenthaltsräumen von Wohngebäuden und an Arbeitsplätzen. In der Verordnung sind unter anderem die Referenzwerte der Radonkonzentrationen festgelegt, die Ermittlung der Radonkonzentration geregelt, sowie die Radonschutz- und Radonvorsorgegebiete ausgewiesen. [29]

Für die **Referenzwerte** ist festgelegt:

- „§ 3. (1) Der Referenzwert für die Radonkonzentration im Jahresmittel in Aufenthaltsräumen von Wohngebäuden beträgt 300 Becquerel pro Kubikmeter.
(2) Der Referenzwert für die Radonkonzentration im Jahresmittel an Arbeitsplätzen beträgt 300 Becquerel pro Kubikmeter.“ [30]

Zur **Ermittlung der Radonkonzentration in Aufenthaltsräumen von Wohngebäuden** gilt:

„Anlage 2 zu § 5

Messort: Die Radonkonzentration ist in den beiden meistgenutzten Aufenthaltsräumen einer Wohneinheit zu messen.

Messdauer: Die Messdauer hat mindestens sechs Monate zu betragen. Die Messung hat mindestens zur Hälfte im Zeitraum zwischen 15. Oktober und 15. April zu erfolgen.

Ergebnis: Als Radonkonzentration für einen Aufenthaltsraum gilt die mittlere Radonkonzentration über die gesamte Messdauer.

Referenzwertvergleich: Zur Überprüfung der Einhaltung des Referenzwertes gemäß § 3 Abs. 1 ist der arithmetische Mittelwert der Radonkonzentrationen der beiden Aufenthaltsräume ohne Berücksichtigung der Messunsicherheit mit dem Referenzwert zu vergleichen.“ [30]

Als Radonschutzgebiete werden in Österreich die Gemeinden bezeichnet, für die verpflichtende Maßnahmen zum Schutz für Arbeitnehmer:innen vorgeschrieben sind [31]. Dazu zählen jene 104 Gemeinden, in denen beim „zweiten Österreichischen Nationalen Radonprojekt“ (ÖNRAP 2) eine mittlere Radonkonzentration von über 300 Bq/m³ prognostiziert wurde [32].

Neben den Radonschutzgebieten sind auch Radonvorsorgegebiete festgelegt. In diesen Bezirken kann es aufgrund geologischer Faktoren zu erhöhten Radonkonzentrationen kommen, weshalb hier Radonvorsorgemaßnahmen bei Neubauten vorgesehen sind. Dazu zählen jene Bezirke, in denen beim ÖNRAP 2 eine mittlere Radonkonzentration von über 150 Bq/m³ (unter Berücksichtigung des 95% Konfidenzintervalls) prognostiziert wurde. Mit Ausnahme der Stadt Wien und zehn österreichischen Bezirken, ist das gesamte Staatsgebiet nach dieser Definition ein Radonvorsorgegebiet. Die Radonvorsorgemaßnahmen bei Neubauten sind in den jeweiligen Landesbaugesetzen festgelegt. [32]

1.3 Radonsituation in österreichischen Privathaushalten

Die gesetzlich vorgeschriebenen Ermittlungen der IRC wie in Kapitel 1.2 beschrieben, sowie die Radonschutzmaßnahmen und Vorsorgemaßnahmen gelten für Arbeitsplätze in Radonschutzgebieten, sind jedoch für Privathaushalte nicht verpflichtend. Aufgrund der örtlichen Geologie können aber insbesondere in Radonschutzgebieten und Radonvorsorgegebieten auch in Wohngebäuden hohe Radonwerte vorliegen. Wie in Abb. 2 ersichtlich, befinden sich beinahe alle österreichische Gemeinden zumindest in der Kategorie Radonvorsorgegebiet.

Außerdem weisen tendenziell Altbauten eine höhere Radonbelastung als Neubauten auf, da das Gas leichter durch Schwachstellen beziehungsweise Undichtheiten erdberührender Bauteile eindringen kann (fehlende Feuchteisolation und Leitungsdurchführungen, keine durchgehende Fundamentplatte, Eintrittswege wie Spalten und Risse etc.) [33].

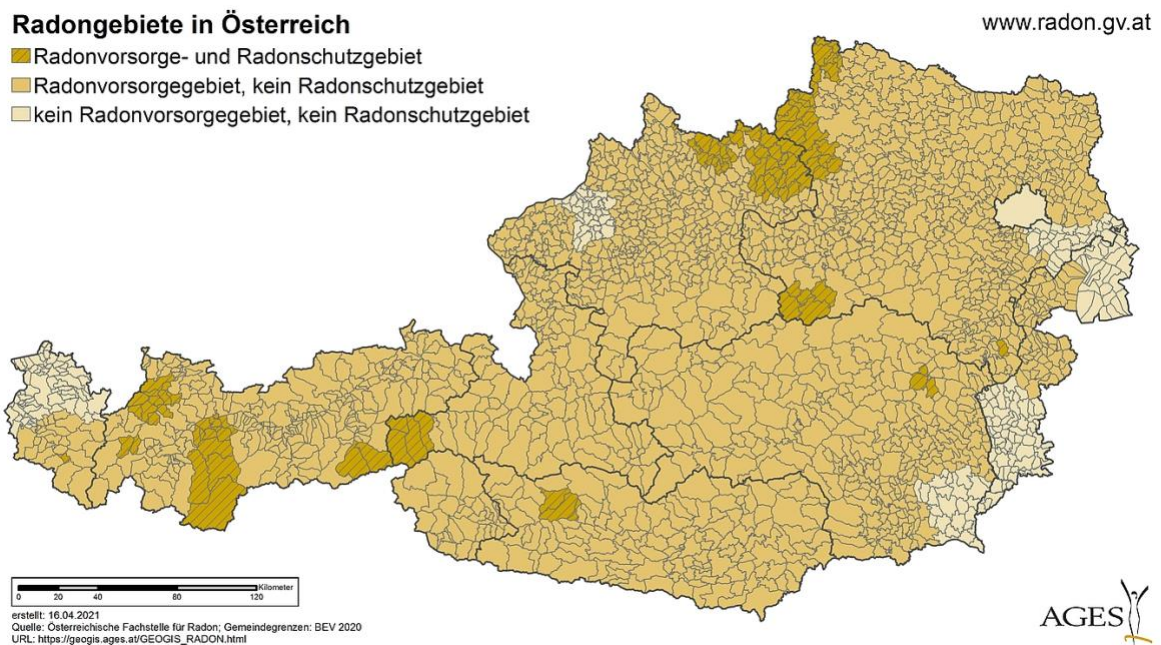


Abb. 2: Radonkarte Österreich [31]

Eine Abschätzung des ÖNRAP 2 ergab, dass ca. 34 % aller österreichischen Haushalte eine IRC über 100 Bq/m^3 und ca. 6 % über dem gesetzlichen Referenzwert von 300 Bq/m^3 aufweisen. Demzufolge leben etwa 500.000 Österreicher:innen in Haushalten, in denen die mittlere IRC über dem Referenzwert liegt. Der Referenzwert kann in Privathaushalten in allen österreichischen Gemeinden überschritten werden, auch wenn diese keinem Radonschutz- beziehungsweise Radonvorsorgegebiet entsprechen. [32]

1.4 Einflussfaktoren auf die Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen (IRC)

Die IRC wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Dazu zählen vorwiegend geologische Faktoren, wie der Gesteinsuntergrund und die Bodenbeschaffenheit unter dem Gebäude, der Gebäudezustand (Art des Fundaments, Isolierung etc.), das Nutzungsverhalten der Bewohner:innen (Lüftungsgewohnheiten, Raumtemperatur etc.), sowie meteorologische Einflüsse (Außentemperatur, Luftdruck etc.). [34] Aufgrund der genannten Einflüsse unterliegt die IRC grundsätzlich zeitlichen Veränderungen [21]. Gebäude haben daher in Bezug auf die IRC auch tageszeitliches, saisonales und jahreszeitliche Verhalten [2]. Die folgenden Unterkapitel (1.4.1, 1.4.2, 1.4.3 und 1.4.4) widmen sich im Detail den genannten Einflussfaktoren.

1.4.1 Geologie und Bodenbeschaffenheit

Das mögliche Radonpotenzial im Untergrund wird sowohl durch die Urankonzentration in den Gesteinen, als auch durch die Permeabilität des Bodens bestimmt. [32] Wie in Kapitel 1.1.2 beschrieben, kann Rn-222 als Edelgas aus dem Herkunftsmaterial austreten und in den Porenraum des Gesteins beziehungsweise des Bodens freigesetzt werden (Radon-Emanation). Die Menge des bei diesem Prozess frei werdenden Radongases ist unter anderem von der Korngrößenverteilung der Minerale, sowie von der Feuchtigkeit abhängig. Aufgrund dessen müssen die Uran- und Radiumgehalte von Mineralien nicht mit der freigesetzten Radonmenge übereinstimmen. Das Radongas wird im Untergrund in Zwischenräumen der Mineralien weitestgehend aufgrund von Konzentrationsunterschieden weitertransportiert. Die Diffusion der Radonatome ist dabei von den Eigenschaften der Poren und den Hohlräumen abhängig. Radon kann auch in Wasser gelöst beziehungsweise gemeinsam mit Bodengasen durch Klüften und Verwerfungen befördert werden. In der Bodenluft sind Radonkonzentrationen in der Höhe von mehreren Tausend Bq/m³ typisch. [21] Lokal können zwischen Gesteinsschichten, im Bereich von Bergstürzen oder an Bergsenkungen sehr hohe Radonaktivitätskonzentrationen mit mehreren Million Bq/m³ auftreten [21], [35].

Österreich besitzt auf relativ kleinem Raum eine große geologische Diversität. Den flächenmäßig größten Teil nimmt der Alpenbogen ein, in dem vorwiegend magmatische, metamorphe und sedimentäre Gesteine auftreten. Der Norden von Oberösterreich und Niederösterreich ist durch die Böhmisches Masse geprägt, dessen Gesteine eine hohe Urankonzentration aufweisen. Aufgrund dessen besitzen die Granitoide und Migmatite in dieser Region die höchste mittlere Radonaktivitätskonzentration in Österreich. Auch Karbonate, die vor allem in den nördlichen Kalkalpen präsent sind, können trotz geringem Urangehalt hohe Radonkonzentrationen freisetzen. [32] Der Grund hierfür ist, dass durch Verkarstung der Karbonate die Permeabilität stark erhöht wird, wodurch das Radongas leicht an die Oberfläche befördert werden kann [36]. Die Radonkonzentration in Paragneissen ist in der Böhmisches Masse höher, als in den Zentralalpen. Dies liegt vermutlich daran, dass sich deren Ausgangsgesteine voneinander unterscheiden, sowie an den verschiedenen Graden der Metamorphose. [32]

Quartäre Ablagerungen sind aus verschiedenen geologischen Einheiten zusammengesetzt, weshalb unterschiedlich hohe Radonkonzentrationen auftreten können. Pelit, Phyllit, Molasse und Flysch zeigen die geringsten Radonaktivitätskonzentrationen, jedoch können auch hier kleinräumige geogen bedingte Radon-Hotspots auftreten. [32] Anhand der geologischen Einheiten kann das Risiko einer Radonbelastung angegeben werden. Da jedoch die IRC von weiteren Faktoren beeinflusst wird, kann anhand der geologischen Einheiten alleine keine Aussage darüber gemacht werden, wie hoch die tatsächliche IRC in einem Gebäude ist. [32]

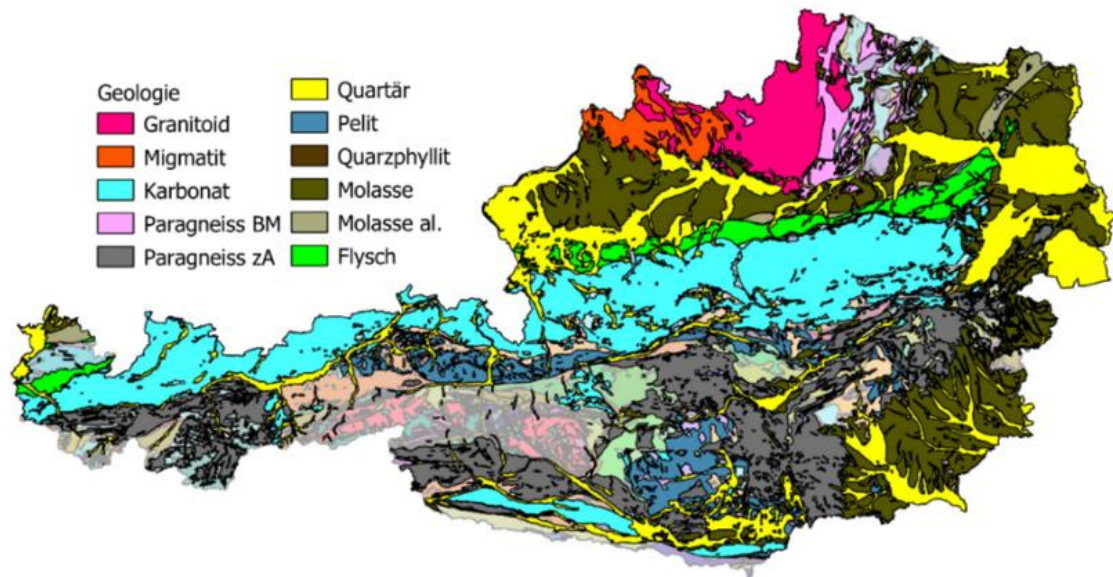


Abb. 3: Geologische Einheiten in Österreich [32]

In oberflächlichen Bodenschichten wird der Radontransport vorwiegend durch die Gaspermeabilität des Bodens und durch den Einfluss der Witterung bestimmt. Je mehr Risse und Spalten vorhanden sind, desto leichter kann sich das Gas ausbreiten und in die Erdatmosphäre gelangen. [37] Besonders bei Schuttkegeln, Hanglagen und Schotterböden kann Radongas aufgrund der großen Durchlässigkeit an die Oberfläche gelangen [38]. In der oberflächennahen Erdschicht können Regen, Schnee und Frost den Porenraum den Radonaustritt behindern, wodurch sich das Radongas darunter ansammeln kann. [37]

1.4.2 Bauweise und Gebäudezustand

Auch in geologischen Einheiten, welche prinzipiell geringe Radonkonzentrationen aufweisen, gibt es Gebäude mit hohen Radonwerten [32]. Dies liegt mitunter daran, dass die IRC neben der Geologie und der Bodenbeschaffenheit auch von den Eigenschaften des Gebäudes beeinflusst wird. Ein entscheidender Faktor ist der Bereich des Hauses, der in direktem Kontakt mit dem Erdboden steht. [39] In Häusern, die gut gegen das Erdreich abgedichtet sind, kann weniger Radon eindringen, als beispielsweise in bestehende Gebäude, die keine durchgehende Fundamentplatte aufweisen [21], [32]. Auch durch kleine Undichtheiten wie Spalten, Risse oder Kabel- und Rohrdurchführungen kann das Radongas in das Hausinnere gelangen [39]. Tendenziell ist die IRC in älteren Gebäuden höher als in Neubauten, da diese aufgrund überholter Bauweisen dem Radongas mehr Eintrittspforten bieten beziehungsweise aufgrund von Materialverschleiß mehr Undichtheiten aufweisen [27]. Meist sind neue Häuser im Fundamentbereich mit Feuchtigkeitsabdichtungen ausgestattet, die auch gut vor Radoneintritt schützen [32], [40]. Nachteilig für die Höhe der IRC in modernen Gebäuden ist, dass diese zur Erzielung eines Vollwärmeschutzes auch oft gegen die Außenluft abgedichtet sind, wodurch die Luftwechselrate reduziert wird und das Radongas schlechter entweichen kann [32]. So kann auch der Einbau neuer dichter Fenster und Türen bei Sanierungen zu einer Erhöhung der IRC führen [38].

Innerhalb eines Gebäudes ist die IRC auch von der Lage der Räume abhängig. Erdberührte Räume zeigen deutlich höhere Radonaktivitätskonzentration als jene, die einen Abstand zum Untergrund aufweisen. Aufgrund dessen ist die IRC in Kellerräumen beziehungsweise in nicht-unterkellerten Erdgeschoßen meist höher als in den Stockwerken darüber. [32]

Da Radium in allen Gesteinsarten vorkommt, wird Radon als Folgeprodukt aus den Oberflächen von mineralischen Baustoffen ständig neu freigesetzt, jedoch ist der dadurch verursachte Beitrag an der IRC in den meisten Fällen nur sehr gering. Durch gegenwärtige Baustoffe erhöht sich die IRC um maximal 15 Bq/m^3 , meist jedoch deutlich weniger. [21]

1.4.3 Nutzungsverhalten der Bewohner:innen

Die Höhe der IRC ist auch vom Nutzungsverhalten der Bewohner:innen abhängig [41]. Ein großer Faktor ist das Lüftungsverhalten, da starkes Lüften zu einer hohen Luftwechselrate mit der Außenluft führt und ein Großteil des Radongases ins Freie entweichen kann [21], [32]. Bereits etwa zwei Stunden nach dem Lüften, kann die IRC wieder den Wert des Ausgangsniveaus erreichen [38]. Da in der Nacht tendenziell weniger gelüftet wird, kommt es dann häufig zu einem Anstieg der IRC [41]. Nicht nur der Luftwechsel mit der Außenluft, auch der Luftaustausch innerhalb eines Gebäudes, beispielsweise durch Öffnen von Innentüren, beeinflusst die Höhe und den zeitlichen Verlauf der IRC in den jeweiligen Räumen [41].

Neben dem Lüftungsverhalten ist die IRC auch vom Heizverhalten der Bewohner:innen abhängig [41]. Bei kalten Außentemperaturen führt starkes Heizen zu einem großen Temperaturunterschied zwischen dem Hausinneren und der Umgebung. Die wärmere Innenluft hat eine geringere Dichte als die kalte Außenluft und steigt auf. Durch den Druckabfall strömt im Bereich des Fundaments kalte Luft aus dem Boden und der Umgebung nach, wodurch auch Radongas in das Hausinnere gelangen kann. [34], [41], [42]. Da dieses Phänomen oft bei Kaminen beobachtet wird, wird es allgemein hin als „Kamin-Effekt“ bezeichnet [43].

1.4.4 Meteorologische Einflüsse und Saisonale Veränderungen der IRC

Aufgrund der in Kapitel 1.4.3 genannten Einflüsse bestehen zwischen der IRC und dem Nutzungsverhalten der Bewohner:innen meist komplexen Zusammenhänge [41]. In einer Reihe von bisher veröffentlichten Studien wurde festgestellt, dass die IRC in verschiedensten Ländern generell jahreszeitlichen Variationen unterliegt. Diese zeigen, dass das häufigste auftretende Verhaltensmuster einer hohen IRC im Winter und niedrigen Konzentrationen in den Sommermonaten entspricht [4], [5], [6]. Eine Ursache hierfür ist das Auftreten des Kamineffekts im Winter infolge des verstärkten Heizverhaltens der Bewohner:innen. Im Sommer hingegen, führen hohe Außentemperaturen dazu, dass in Innenräumen der Druck größer ist als außerhalb und somit das Edelgas generell in geringerem Maß eindringen kann. Ein weiterer Grund für eine niedrigere IRC in den Sommermonaten ist das Lüftungsverhalten der Bewohner:innen. Aufgrund der höheren Temperaturen im Sommerhalbjahr wird im Normalfall häufiger gelüftet, wodurch das Radon mit der Außenluft verdünnt und infolgedessen die IRC gesenkt wird. [34]

Mehrere internationale Studien weisen darauf hin, dass die IRC grundsätzlich auch von meteorologischen Parametern beeinflusst wird [34], [44], [45]. Miles et al zeigte in einer Studie, dass die IRC in verschiedenen Häusern sehr unterschiedlich auf Außentemperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung reagiert [44]. Aus einer Schweizer Studie von Rey et al geht hervor, dass die Außentemperatur jener Parameter ist, der die IRC am stärksten beeinflusst und meist mit der IRC antikorreliert. Die IRC ist auch vom Wind abhängig, jedoch kommt der Einfluss auf die Intensität und auf die Windrichtung an, sowie auf die Bauweise des Gebäudes. Auch die Niederschlagsmenge beeinflusst die Höhe der IRC. Außenluftdruck, sowie die relative Luftfeuchtigkeit scheinen keine großen Einflussfaktoren auf die IRC zu sein. [34]

2. Ziel der Diplomarbeit

Die Erhebung der mittleren jährlichen IRC in Privathaushalten in Österreich erfordert im Allgemeinen eine Langzeitmessung über mindestens sechs Monate, wodurch etwaige saisonale und tageszeitliche Fluktuationen ausgeglichen werden können [3]. Da in der Heizsaison mit höheren IRC-Werten zu rechnen ist, muss mindestens die Hälfte des Messzeitraums zwischen 15. Oktober und 15. April liegen [46].

Der gesetzliche Referenzwert der mittleren IRC liegt in Österreich bei 300 Bq/m^3 . Wird der Referenzwert überschritten, können verschiedene Radon-Sanierungsmaßnahmen die IRC senken. Je nach Höhe der vorliegenden IRC, reichen diese von kostengünstigen Abdichtungsmaßnahmen bis hin zu komplexen Unterbodenabsaugungen (Radonbrunnen). [47]

Da bei Altbauten oft aufwendigere Radonsanierungen anfallen, können die Kosten minimiert werden, wenn diese zeitgleich mit einer generellen Gebäudesanierung durchgeführt werden. Mitunter ist zu beachten, dass es nach einer thermischen Sanierung zu einem Anstieg der IRC kommen kann. [47] Deshalb ist, neben den gesundheitlichen Risiken durch Radon, bei Planung einer Altbausanierung eine rasche Ermittlung der mittleren IRC von Vorteil. Hier sind insbesondere Erwerber:innen von Bestandsimmobilien zu erwähnen, welche eine schnelle Abklärung der vorliegenden Radonsituation anstreben, um mit Sanierungsarbeiten nicht die Dauer einer Langzeitmessung abwarten zu müssen. Es stellt sich die Frage, ob auch kürzere Radonmessungen zur Ermittlung der mittleren jährlichen Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen herangezogen werden können.

Diese Diplomarbeit ist Teil einer Radon-Studie, deren Ziel es ist, ein Verfahren zu entwickeln, den Jahresmittelwert der IRC anhand von Kurzzeitmessungen in Grenzen abschätzen zu können. Im Rahmen dieser Studie soll die IRC in Wohn- und Schlafräumen österreichischer Privathaushalte untersucht werden. Zur Eruierung zeitlichen Veränderungen der IRC sind in allen Haushalten Kurzzeitmessungen mittels aktiver Radonmessgeräte sowohl in den Wintermonaten, als auch nach der Heizperiode durchzuführen. Mittels passiver Kernspur-Detektoren soll die mittlere jährliche IRC in den untersuchten Räumen ermittelt werden. Neben der IRC sind, auf Basis des von der österreichischen Radonfachstelle der AGES bei Radonmessungen erhobenen Datensatzes, wesentliche Gebäudedaten (Baujahr, Haustyp, Baumaterial etc.) zu ermitteln. Die Bewohner:innen sind zu ihren Lüftungsgewohnheiten in den Wohnräumen zu befragen. Zur Untersuchung des Einflusses der meteorologischen Parameter auf die zeitlichen Veränderungen der IRC sind Umweltdaten (Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und Temperatur) zu erheben, sowie Daten nächstgelegener Wetterstationen zu sammeln. Es soll untersucht werden, ob statistische Beziehungen zwischen der IRC und den Wetterdaten vorliegen.

Im Zuge dieser Diplomarbeit soll anhand der gesammelten Daten geklärt werden, unter welchen Voraussetzungen die Anwendung von Kurzzeitmessungen mit aktiven Radonmessgeräten zur Abschätzung der mittleren jährlichen IRC herangezogen werden können. Dabei soll untersucht werden, welche Parameter die IRC stark beeinflussen, beziehungsweise welche Faktoren für zeitliche Veränderungen der IRC jedenfalls berücksichtigt werden müssen.

3. Materialien und Methoden²

3.1 Datenerhebung - Messkonzept

Im Rahmen der Studie wurde der tageszeitliche und saisonale Verlauf der IRC in Wohnräumen verschiedenster österreichischer Privathaushalte erforscht. Es kamen hierfür aktive Radonmessgeräte zum Einsatz, welche die IRC stündlich erfasst und aufgezeichnet haben. Diese standen für die Studie im Zeitraum von Ende Oktober 2022 bis Ende August 2023 zur Verfügung. Neben den zeitlichen Veränderungen der IRC wurde auch die mittlere jährliche IRC ermittelt. Hierfür wurden Langzeitmessungen (LZM) mit passiven Kernspur-Exposimetern durchgeführt.

Um saisonale Veränderungen der IRC zu beobachten, wurden von jedem teilnehmenden Haushalt Radon-Messwerte sowohl während der Wintermonate, als auch außerhalb der Heizperiode erhoben. Um aussagekräftige Ergebnisse zu bekommen, wurde eine Mindestdauer dieser Kurzzeitmessungen (KZM) von drei Wochen veranschlagt. Zusätzlich zur Dauer einer KZM musste ein zeitlicher Puffer für Standortwechsel der Geräte berücksichtigt werden. Da es sich bei den Studienteilnehmer:innen um Privatpersonen handelt, welche freiwillig an der Studie mitwirkten, wurden selbstverständlich auch persönliche Präferenzen für den Messzeitraum berücksichtigt. [48]

² In der Projektarbeit „Abschätzung des Jahresmittelwerts der Rn-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen mittels aktiver Kurzzeitmessungen – Messungen im südlichen Niederösterreich“ im Rahmen der LV 141.A72 Metrologie an der TU Wien, vorgelegt von M. Blum werden studienspezifische Details der verwendeten Materialien und Methoden behandelt. Für die Diplomarbeit relevante Passagen dieser Projektarbeit werden folgend mit der Quellen-Nummer „[48]“ versehen.

3.2 Auswahl der Studien-Haushalte

3.2.1 Allgemeine Vorgangsweise

Zu Beginn der Studie mussten potentielle Studienteilnehmer:innen akquiriert werden. Um zeitliche Veränderungen der IRC vom statistischen Rauschen der Messgeräte unterscheiden zu können, sollte die Auswahl der Studien-Haushalte ein Mindest-Radonpotential aufweisen. Hierfür wurde zu Beginn dieser Studie ein Wert von 100 Bq/m^3 festgelegt. Prinzipiell ist in Radonschutzgebieten, Altbauten, sowie in erdberührten Wohnräumen mit höheren IRC zu rechnen [33]. Diese Kriterien wurden bei der Auswahl der Häuser berücksichtigt. Der Kontakt zu potentiellen Studienteilnehmer:innen wurde über den Freundes- und Bekanntenkreis der Studierenden, welche an dieser Studie mitwirkten, hergestellt. [48]

Den potentiellen Studienteilnehmer:innen wurde ein Informationsschreiben ausgehändigt, welches allgemeine Informationen zu Radon beinhaltet, sowie die Rahmenbedingungen der Studie erklärt (Zweck der Studie, Vorgehensweise, Aufstellungsort der Detektoren und Messgeräte etc.) Das Informationsschreiben umfasst zusätzlich eine Einverständniserklärung, welche von den Interessent:innen zu unterzeichnen war. Damit bestätigten die Teilnehmer:innen, dass sie über die Studie vollständig aufgeklärt wurden, ihre Daten anonym für wissenschaftliche Zwecke verwendet werden dürfen und sie mit der freiwilligen Teilnahme an der Studie einverstanden sind. Die Vorlage des vollständigen, sechsseitigen Informationsschreibens befindet sich im Anhang der Diplomarbeit.

Nach Zusage durch die potentiellen Teilnehmer:innen wurden Probemessungen in den Haushalten der Interessent:innen durchgeführt. Um das Radonpotential zu ermitteln, wurden die Teilnehmer:innen im Vorfeld der Messungen gebeten, die Wohnräume für einige Stunden nicht zu lüften. Anschließend wurden die aktiven Messgeräte für mehrere Stunden in den meistbenutzten Wohnräumen aufgestellt und die IRC gemessen. Sofern die IRC in einem der Wohnräume das Mindest-Radonpotential erreicht hat, konnte der Privathaushalt für die Studie herangezogen werden. [48]

Aufgrund des Mindest-Radonpotenzials, sowie der begrenzten Anzahl der verfügbaren Messgeräte, wurden für die Studie letztendlich 24 Privathaushalte ausgewählt. Zehn Häuser befinden sich im südlichen Niederösterreich (NOE_01 bis NOE_10), acht in Radonschutzgebieten in Oberösterreich (OOE_01 bis OOE_08), drei in Tirol (TIR_01 bis TIR_03), sowie drei in Wien und Umgebung (FJM_01 bis FJM_03). [48]

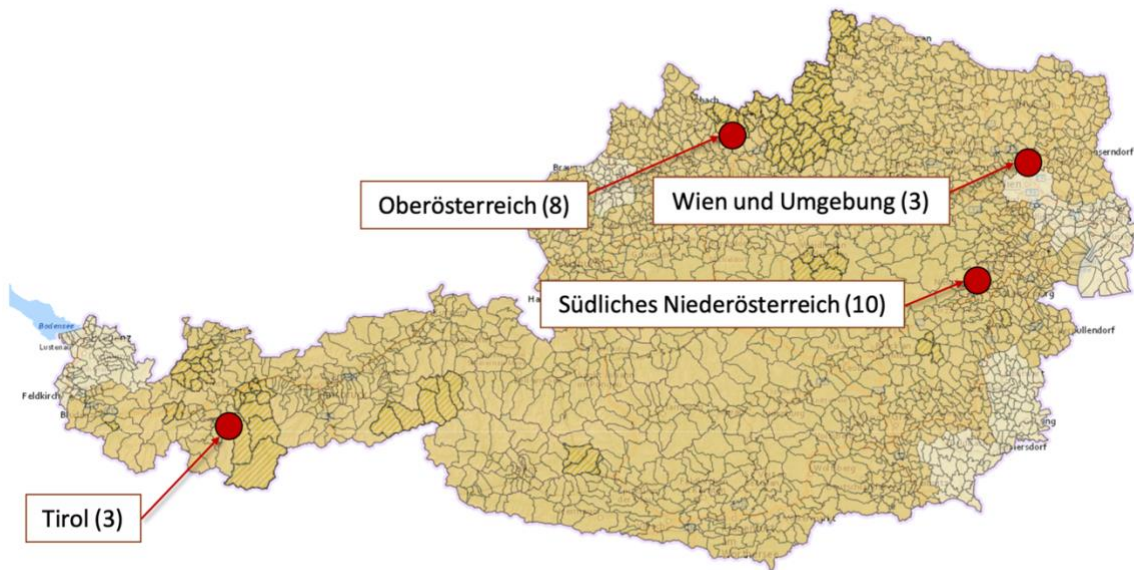


Abb. 4: Standorte der Messungen [49]

3.2.2 Haushalte im südlichen Niederösterreich

Eine große Zahl an Interessent:innen konnte im Bezirk Neunkirchen gefunden werden. Alle Gemeinden im Bezirk Neunkirchen liegen in Radonvorsorgegebieten. Um Haushalte mit hohem Radonpotential zu finden, wurden bei den ersten Probemessungen vorrangig Altbauten und erdberührte Wohnräume ausgewählt. Trotz dieser Kriterien, lag die IRC in den Häusern einiger Interessent:innen unter dem festgelegten Mindestwert von 100 Bq/m^3 . Im Laufe weiterer Probemessungen im Bezirk Neunkirchen zeigte sich, dass jeweils zwei Haushalte in Gloggnitz, Grimmenstein, Neunkirchen und Ternitz, sowie ein Haushalt in Feistritz ein höheres Radonpotential aufwiesen. Zusätzlich konnte ein weiterer Haushalt aus einem Radonschutzgebiet in der Gemeinde Lichtenegg (Bezirk Wiener Neustadt-Land) akquiriert werden. [48]

Eine Überlegung war, dass für die Studie der Einfluss meteorologischer Parameter auf die IRC besser untersucht werden kann, wenn zeitliche Veränderungen der IRC von zueinander nahestehenden Häusern gleichzeitig gemessen werden. Aus diesem Grund und um den logistischen Aufwand gering zu halten, wurden in den Gemeinden Gloggnitz, Grimmenstein, Neunkirchen und Ternitz die aktiven Radonmessungen, sofern als möglich, zeitlich parallel durchgeführt. [48]

Letztendlich konnten aus dem südlichen Niederösterreich zehn Haushalte für die Studie verwendet werden. Die studieninternen Bezeichnungen der Haushalte, die jeweiligen Gemeinden und Radonpotentiale sind in der Tab. 1 zu sehen. In Abb. 5 sind die jeweiligen Standorte der Häuser in der Radonkarte der AGES abgebildet. [48]

Tab. 1: Studienhaushalte im südlichen Niederösterreich

Südliches Niederösterreich		
NR	ORT	Potential (Bq/m ³) (Probemessung)
NOE_01	TERNITZ	600
NOE_02	TERNITZ	1500
NOE_03	GRIMMENSTEIN	1600
NOE_04	GRIMMENSTEIN	300
NOE_05	FEISTRITZ/WECHSEL	700
NOE_06	LICHTENEGG	700
NOE_07	GLOGGNITZ	900
NOE_08	GLOGGNITZ	300
NOE_09	NEUNKIRCHEN	600
NOE_10	NEUNKIRCHEN	600

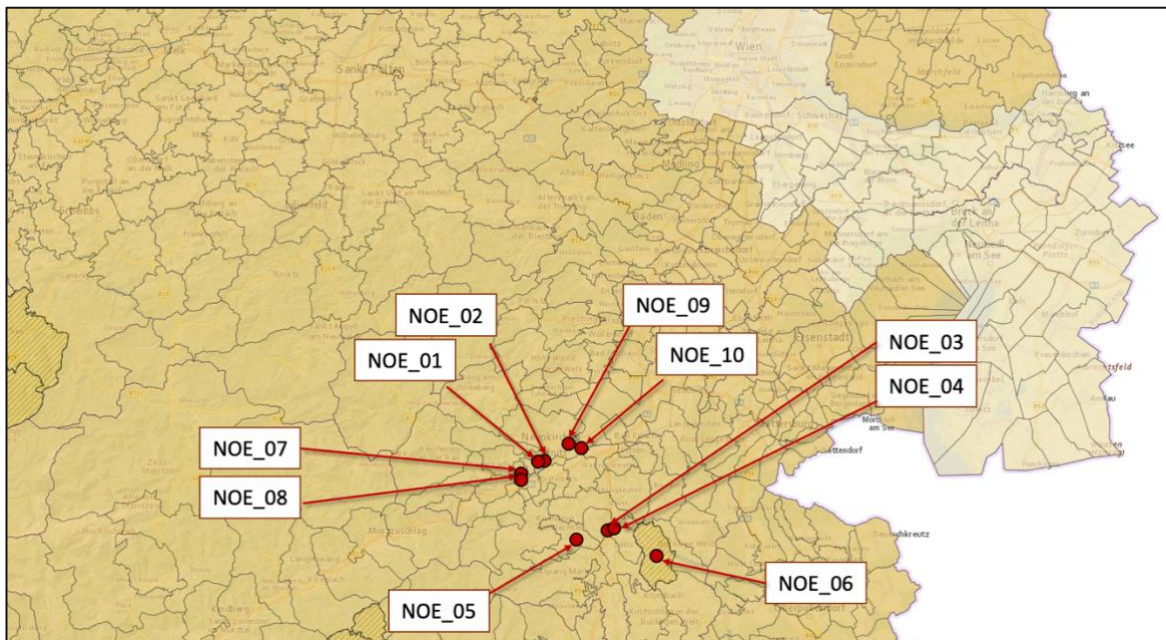


Abb. 5: Standorte im südlichen Niederösterreich [49]

3.2.3 Haushalte in Oberösterreich

Alle acht Haushalte in Oberösterreich befinden sich im Bezirk Urfahr-Umgebung im Mühlviertel. Geografisch liegt der Bezirk im Granit und Gneishochland der Böhmisches Masse mit hohem Radonpotential, weshalb hier mit verhältnismäßig geringem Aufwand Haushalte akquiriert werden konnten, die den Mindestwert von 100 Bq/m³ erreichten. Die Häuser der Studienteilnehmer:innen stehen alle in Radonschutzgebieten. Fünf Haushalte befinden sich in der Gemeinde Bad Leonfelden. Die weiteren drei Haushalte liegen in verschiedenen Gemeinden (Reichenau, Ottenschlag und Haibach), jedoch räumlich eng zueinander.

Tab. 2: Studienhaushalte in Oberösterreich

Oberösterreich		
NR	ORT	Potential (Bq/m ³) (Probemessung)
OOE_01	BAD LEONFELDEN	300
OOE_02	BAD LEONFELDEN	350
OOE_03	BAD LEONFELDEN	1500
OOE_04	BAD LEONFELDEN	500
OOE_05	BAD LEONFELDEN	600
OOE_06	OTTENSCHLAG	400
OOE_07	HAIBACH	300
OOE_08	REICHENAU	300

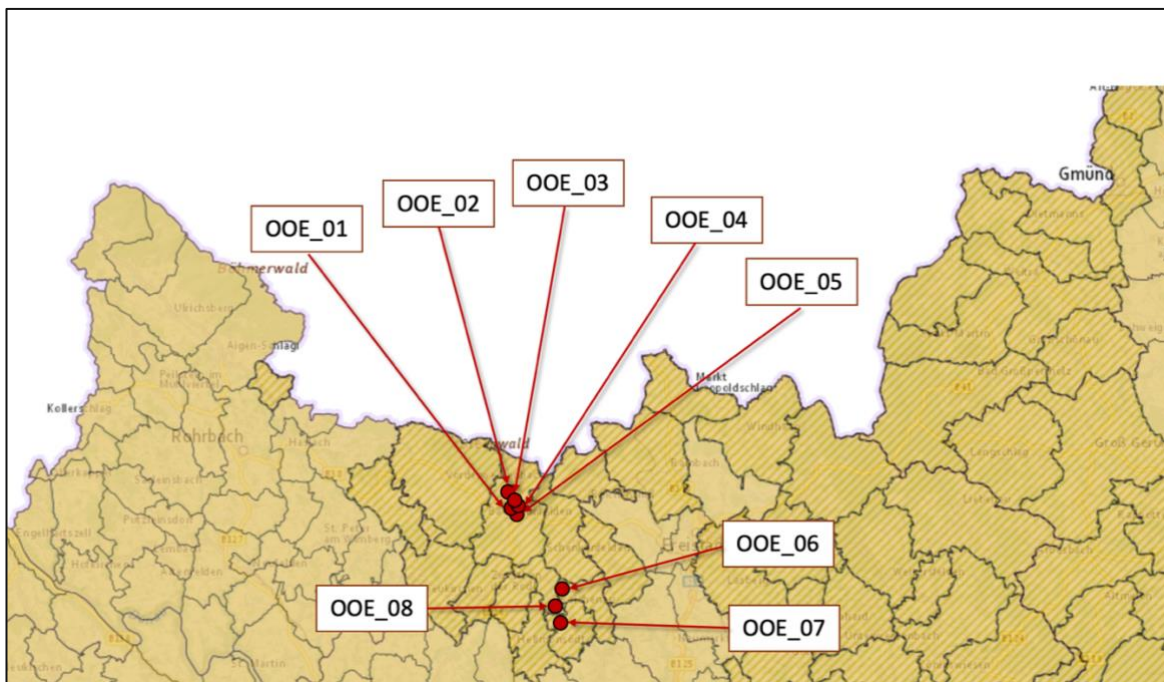


Abb. 6: Standorte in Oberösterreich [49]

3.2.4 Haushalte in Tirol

In Tirol konnten drei Haushalte in den Bezirken Landeck und Imst akquiriert werden. In Landeck befindet sich ein Haus in der Gemeinde Flirsch (Radonschutzgebiet), sowie eines in Zams (Radonvorsorgegebiet). Der Haushalt im Bezirk Imst liegt in der Gemeinde Umhausen. Die Geologie in Umhausen weist aufgrund starker innerer Zerrüttung durch einen Bergsturz hohe Radon-Emanationsraten auf, wodurch es in Gebäuden zu extremen IRC-Anomalien kommen kann [35]. Der Studienhaushalt TIR_02 hatte bei der Probemessung jedoch ein verhältnismäßig geringes Radonpotential (IRC Werte im Bereich von 300 Bq/m³).

Tab. 3: Studienhaushalte in Tirol

Tirol		
NR	ORT	Potential (Bq/m ³) (Probemessung)
TIR_01	FLIRSCH	400
TIR_02	UMHAUSEN	300
TIR_03	ZAMS	300

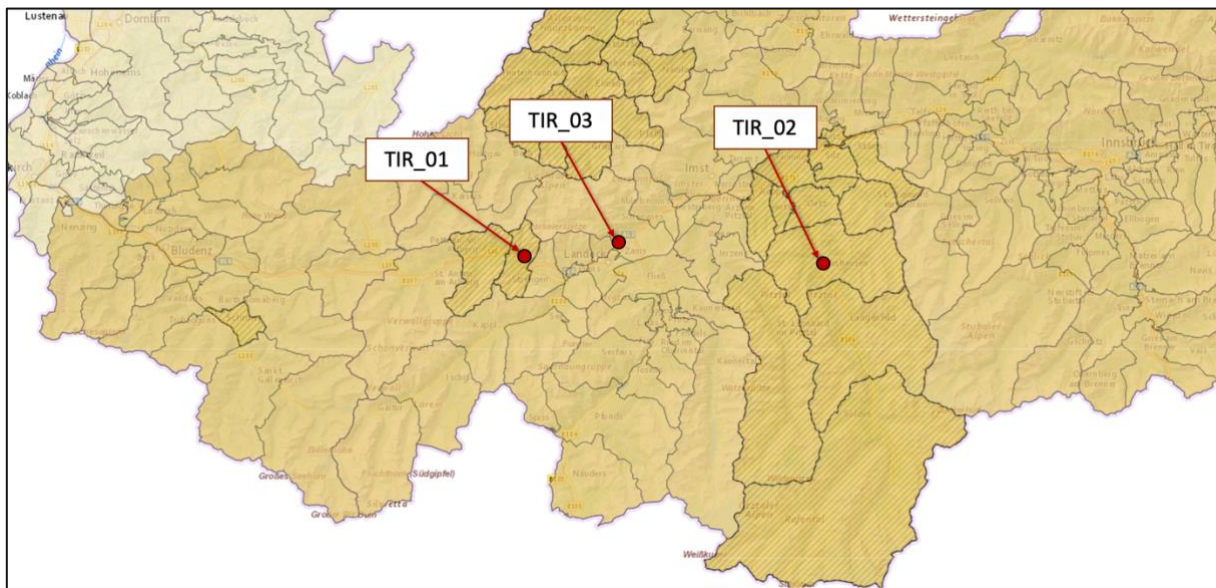


Abb. 7: Standorte in Tirol [49]

3.2.5 Haushalte in Wien und Umgebung

In Wien konnte ein Haushalt aus dem Bezirk Simmering akquiriert werden. In der Nähe zu Wien konnten zwei weitere Haushalte für die Studie aus Radonvorsorgegebieten herangezogen werden. Ein Haus steht nordwestlich von Wien in der Gemeinde Oberolberndorf im Bezirk Korneuburg. Der zweite Haushalt befindet sich nordöstlich von Wien in der Gemeinde Ebenthal im Bezirk Gänserndorf.

Im Vergleich zu den anderen Regionen, welche für die Studie herangezogen wurden, hatten die Haushalte in Wien und Umgebung verhältnismäßig geringe Radonpotentiale. Die beiden Häuser nördlich von Wien hatten bei den Probemessungen ein Radonpotential, welches im Bereich des studieninternen Mindestwerts (100 Bq/m^3) lag. Die verhältnismäßig niedrigen Werte können mitunter dadurch begründet werden, dass diese Region geologisch durch die Einheiten Quartär, Molasse und Flysch gekennzeichnet ist, welche prinzipiell ein geringes geogenes Radonpotential aufweisen [50].

Tab. 4: Studienhaushalte in Wien und Umgebung

Wien und Umgebung		
NR	ORT	Potential (Bq/m^3) (Probemessung)
FJM_01	SIMMERING	200
FJM_02	OBEROLBERNDORF	100
FJM_03	EBENTHAL	100

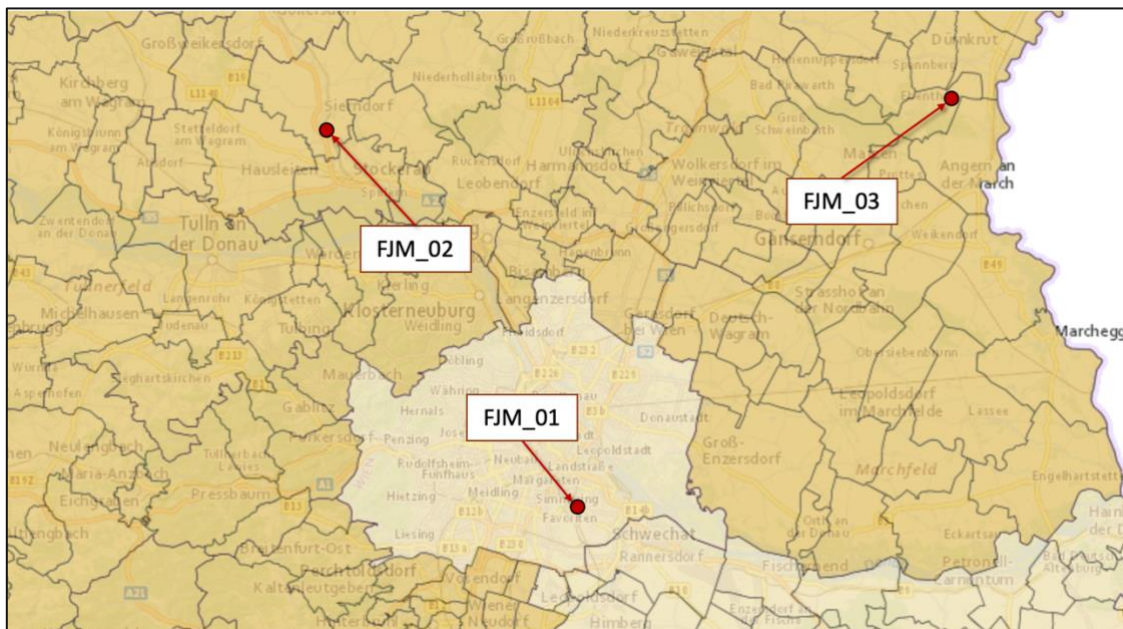


Abb. 8: Standorte in Wien und Umgebung [49]

3.3 Gebäudedaten und Nutzungsverhalten

Den Studienteilnehmer:innen wurde ein Fragebogen ausgehändigt, der entsprechend einer approbierten Vorlage der AGES Fragen zu relevanten Parametern beinhaltet, welche die IRC stark beeinflussen können. Einerseits wurden gebäudespezifische Daten wie Baujahr, Fundamenttyp, Unterkellerung, Dichte der Fenster etc. erhoben, sowie das Lüftungsverhalten in jedem Messraum abgefragt. Außerdem wurden die Teilnehmer:innen darauf hingewiesen, während der Dauer der Messungen ihr alltägliches Nutzungsverhalten beizubehalten. [48] Die Vorlage des vollständigen, fünfseitigen Fragebogens befindet sich im Anhang dieser Arbeit.

3.4 Kurzzeitmessungen mit aktiven Messgeräten

3.4.1 Aktive Messgeräte

Das Projekt wurde von der für aktive und passive Radonmessungen akkreditierten Prüf-, Inspektions- und Zertifizierungsstelle MA39 (Strahlenschutzlabor der Stadt Wien) mit zwei AlphaGuards (DF2000, Bertin Instruments, Baujahr 2020), sowie drei AlphaEs (Bertin Instruments) unterstützt. Seibersdorf Laboratories (SL), ebenfalls für passive Radonmessungen akkreditiert, stellte zwei AlphaGuards (P30, Bertin Instruments, Baujahr 1995) zur Verfügung. Alle Messgeräte des Typs AlphaGuard arbeiten nach dem Prinzip einer Ionisationskammer. Der Detektor der AlphaE Messgeräte besteht aus einer Diffusionskammer und einer Siliziumdiode. Für die Studie wurden die Stundenmittelwerte der Rn-222-Aktivitätskonzentrationen (Bq/m^3), sowie deren Unsicherheiten jeweils zur vollen Stunde erfasst und gespeichert. Neben der IRC liefern die Geräte Stundenmittelwerte für die Raumtemperatur ($^{\circ}\text{C}$), Luftdruck (mbar), sowie für die relative Luftfeuchtigkeit (%). Das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, sowie der Projektleiter (Franz Josef Maringer) haben jeweils ein Radoneye Plus2 (RD200P2, FTLAB, Baujahr 2019) bereitgestellt. Diese Ionisationskammern zeichnen die Radonaktivitätskonzentration (Bq/m^3), die Raumtemperatur ($^{\circ}\text{C}$), sowie die relative Luftfeuchtigkeit (%) auf. [48]

Tab. 5: Daten der aktiven Messgeräte

Messgerät	Bezeichnung	Model Name	Hersteller	Serien-Nr:	Institut
E1MA	AlphaE_1	AlphaE	Bertin Instruments	MR001207	MA39
E2MA	AlphaE_2	AlphaE	Bertin Instruments	MR001208	MA39
E4MA	AlphaE_4	AlphaE	Bertin Instruments	MR001210	MA39
G1MA	AlphaGuard	DF2000	Bertin Instruments	AG000269	MA39
G2MA	AlphaGuard	DF2000	Bertin Instruments	AG000271	MA39
G3SL	AlphaGuard	P30	Bertin Instruments	EF1812	Seibersdorf Laboratories
G4SL	AlphaGuard	P30	Bertin Instruments	EF1813	Seibersdorf Laboratories
R1FJM	Radoneye Plus2	RD200P2	FTLAB co., LTD	PE22203280178	FJM
R2BEV	RadonEye Plus2	RD200P2	FTLAB co., LTD	PE21909160036	BEV



Abb. 9: AlphaGuard P30 (oben) und AlphaGuard DF2000 (unten)



Abb. 10: RadonEye Plus2 (R2BEV)



Abb. 11: AlphaE 1,2 und 4 (oben) und AlphaGuard P30 (unten)

3.4.2 Durchführung der Messungen

Im Rahmen der Studie wurden in jedem Studienhaushalt mindestens zwei Kurzzeitmessungen durchgeführt, eine Messung während der Wintermonate, sowie eine Messung außerhalb der Heizperiode. Für eine einzelne KZM wurde ein aktives Messgerät in einem der meistgenutzten Räume, vorzugsweise in Wohn- und Schlafräume, aufgestellt und an die örtliche Stromversorgung angeschlossen. Nach dem Einschalten des aktiven Messgeräts startete dies automatisch mit der Aufzeichnung und der Speicherung der Rn-222-Stundenmittelwerte und der Umweltparameter.

Für die Wahl des Aufstellungsortes des Messgeräts innerhalb eines Raumes wurden die Vorgaben der ÖNORM S 5280 - 1 beachtet. Aus diesem Grund wurden die aktiven Messgeräte an einem Ort platziert, der

- nicht direkt neben einem Fenster liegt und an dem keine Zugluft herrscht,
- nicht direkt an einer Wand liegt (mindestens 10 cm Abstand),
- nicht stark erwärmt wird,
- sich in normaler Atemhöhe befindet (1 m bis 2 m),
- unzugänglich für Kleinkinder und Haustiere ist,
- keine kondensierende Feuchtigkeit aufweist. [51]

Der Standort des Messgeräts wurde über die Dauer der Messung nicht verändert. Auch die individuellen Nutzungsgewohnheiten der Bewohner:innen in den Räumen wurden während der Dauer der Messungen aufrecht erhalten (Lüftungs- und Heizgewohnheiten, Raumnutzungszeiten etc.). Nach Abschluss der KZM wurden die Messdaten auf einen PC übertragen, das Messgerät vom örtlichen Stromnetz getrennt und ausgeschaltet. Anschließend stand das Messgerät für einen weiteren Einsatz in einem anderen Haushalt zur Verfügung. In jedem Haushalt wurde der jeweilige Standort des Messgeräts für alle KZM (Winter- und Sommermessungen) beibehalten.

3.4.3 Zeitliche Koordination der Kurzzeitmessungen

Aufgrund der Mindestdauer einer KZM (drei Wochen), der Standortwechsel, sowie der persönlichen Präferenzen der freiwilligen Studienteilnehmer:innen nahm eine Messreihe durchschnittlich dreieinhalb bis vier Wochen Zeit in Anspruch. Die grob veranschlagten Messzeiträume wurden im Herbst 2022 mit den Studienteilnehmer:innen besprochen, um etwaige Terminkollisionen (Urlaub etc.) für die Aufstellung und Abholung der Geräte zu vermeiden. Die genauen Messzeiträume wurden jeweils einige Tage vor Beginn einer Messreihe koordiniert. [48]

Die KZM während der Heizsaison wurden zwischen Ende Oktober 2022 und Ende Februar 2023 durchgeführt (Abb. 12 und Abb. 13). Um die Zuverlässigkeit der Messergebnisse zu gewährleisten, wurden Mitte Dezember 2022 und Anfang März 2023 Vergleichsmessungen mit allen für die Studie zur Verfügung stehenden aktiven Messgeräte durchgeführt (Kapitel 3.4.4). Um für eine optimale Geräteauslastung zu sorgen und die Datenlage der Studie zu verbessern, ging der Messzeitraum bei einigen Häusern über die Mindestdauer einer KZM hinaus. Bei den Studienhaushalten NOE_01 und NOE_2 wurden in der Übergangszeit zusätzliche KZM durchgeführt. Ab Ende März 2023 wurde mit den Kurzzeitmessungen außerhalb der Heizsaison begonnen. (Abb. 14) Die letzte KZM (FJM_01_S) wurde in den Monaten Juli und August 2023 durchgeführt (Abb. 15).

Gerät	November				Dezember		
	31.10.22	07.11.22	14.11.22	21.11.22	28.11.22	05.12.22	12.12.22
E1MA							Vergleichsmessungen 1 und 2
E2MA		OOE_01_W					Vergleichsmessungen 1 und 2
E4MA							Vergleichsmessungen 1 und 2
G2MA							Vergleichsmessungen 1 und 2
G3SL	TIR_01_W			TIR_02_W			Vergleichsmessungen 1 und 2
G4SL		NOE_01_W					Vergleichsmessungen 1 und 2
R1FJM							Vergleichsmessungen 1 und 2
R2BEV		NOE_02_W					Vergleichsmessungen 1 und 2

Abb. 12: Kurzzeitmessungen während der Heizsaison (1 von 2)

Gerät	Jänner						Februar				
	19.12.22	26.12.22	02.01.22	09.01.22	16.01.22	23.01.22	30.01.22	06.02.22	13.02.22	20.02.22	27.02.22
E1MA			OOE_02_W						OOE_06_W		
E2MA			OOE_04_W						OOE_07_W		
E4MA			OOE_03_W						OOE_08_W		
G2MA	NOE_03_W			NOE_07_W			NOE_09_W				
G3SL		TIR_03_W									
G4SL	NOE_04_W			NOE_06_W				OOE_05_W			
R1FJM	FJM_01			FJM_02_W			FJM_03_W				
R2BEV	NOE_05_W			NOE_08_W			NOE_10_W				

Abb. 13: Kurzzeitmessungen während der Heizsaison (2 von 2)

Gerät	März				April			Mai	
	06.03.22	13.03.22	20.03.22	27.03.22	03.04.22	10.04.22	17.04.22	24.04.22	01.05.22
E1MA	Vergleichsmessung 3		OOE_02_S				OOE_06_S		
E2MA	Vergleichsmessung 3		OOE_01_S				OOE_07_S		
E4MA	Vergleichsmessung 3		OOE_03_S				OOE_08_S		
G2MA	Vergleichsmessung 3	NOE_03_S							
G3SL	Vergleichsmessung 3		TIR_01						
G4SL	Vergleichsmessung 3	NOE_01_S1				NOE_04_S			
R1FJM	Vergleichsmessung 3								
R2BEV	Vergleichsmessung 3	NOE_02_S1				NOE_05_S			

Abb. 14: Kurzzeitmessungen außerhalb der Heizsaison (1 von 2)

Gerät	Mai				Juni				Juli			
	08.05.22	15.05.22	22.05.22	29.05.22	05.06.22	12.06.22	19.06.22	26.06.22	03.07.22	10.07.22	17.07.22	24.07.22
E1MA	OOE_06_S											
E2MA	OOE_07_S	OOE_04_S										
E4MA	OOE_08_S	OOE_05_S										
G2MA	NOE_07_S			NOE_09_S								
G3SL			TIR_02_S				TIR_03_S					
G4SL	NOE_06_S							NOE_01_S2				
R1FJM		FJM_02_S					FJM_03_S		FJM_01_S			
R2BEV	NOE_08_S			NOE_10_S				NOE_02_S2				

Abb. 15: Kurzzeitmessungen außerhalb der Heizsaison (2 von 2)

3.4.4 Vergleichsmessungen der aktiven Radonmessgeräte

Nicht alle für die Studie verwendeten aktiven Messgeräte hatten während der Messungen eine aufrechte Kalibrierung. Um die Zuverlässigkeit aller Messergebnisse gewährleisten zu können, wurden die verwendeten Geräte mit einem kalibrierten Referenzmessgerät verglichen. Dazu wurden mehrere Vergleichsmessungen mit allen zum Zeitpunkt der Messungen verfügbaren Geräte durchgeführt. Die Messgeräte wurden über mehrere Stunden zeitgleich nebeneinander an denselben Orten positioniert und die IRC jeweils stündlich aufgezeichnet. Anschließend wurden alle Messwerte ausgewertet und einer Vergleichsanalyse unterzogen. Dabei wurde für jedes Gerät ein Korrekturfaktor „ F_i “ ermittelt, der die Abweichung der jeweiligen Messwerte von den Ergebnissen des kalibrierten Referenzgeräts beschreibt.

$$x_{korr_{ji}} = x_j \cdot F_i \quad (1)$$

wobei:

$x_{korr_{ji}}$ korrigierter IRC-Stundenmittelwert „j“ des Messgeräts „i“ (Bq/m³)
 x_j angezeigter IRC-Stundenmittelwert „j“ des Messgeräts „i“ (Bq/m³)
 F_i Korrekturfaktor des Messgeräts „i“

Durch Anwendung dieses Korrekturfaktors auf die vom jeweiligen Messgerät angezeigten Werte, kann eine vertrauenswürdigere Einschätzung der tatsächlichen Rn-222-Aktivitätskonzentration (IRC (Bq/m³)) erhalten werden.

Um festzustellen, ob sich die Korrekturfaktoren in verschieden hohen Konzentrationsbereichen voneinander unterscheiden, wurden die Messwerte bei unterschiedlich hohen Radonpotenzial verglichen.

3.4.5 Vergleichsmessung im Strahlenschutzlabor der Stadt Wien

Die erste Vergleichsmessung wurde zwischen 12. und 14. Dezember 2022 in einem Radon-Kalibrierfass im Strahlenschutzlabor der Stadt Wien (MA39) mithilfe eines Ra-226 Standards durchgeführt. Die luftdichte Edelstahltonne (Bertin Instruments, Container for Emanation & Calibration) fasst ein Volumen von 101,4 Liter, und verfügt über einen abnehmbaren Deckel mit diversen Anschlüssen und zwei Sichtfenstern. Die Messgeräte, sowie das kalibrierte Referenzgerät des Typs AlphaGuard DF2000 der MA39 (G1MA), wurden übereinander in der Tonne positioniert, anschließend wurde die Tonne luftdicht verschlossen. Mit einer Luftpumpe wurde Rn-222 über Schläuche aus dem Ra-226 Standard in die Kalibriertonne geleitet. Durch eines der Sichtfenster im Deckel konnte die IRC an einem der Messgeräte abgelesen werden. Es sollte soviel Rn-222 in die Tonne geleitet werden, sodass sich anfangs eine IRC von etwa 2000 Bq/m³ einstellt, welche in etwa einer hohen IRC in einem Privathaushalt entspricht. Durch den radioaktiven Zerfall des Rn-222 ($T_{1/2} = 3,82 \text{ d}$) nimmt die IRC kontinuierlich über die Zeit ab, sodass die Messwerte auch bei niedrigen Konzentrationen verglichen werden können. Da die IRC anfangs bei etwa 5000 Bq/m³ lag, wurde der Deckel kurz geöffnet, um die IRC in der Tonne zu senken. Nach einer halben Stunde konnte durch das Sichtfenster ein Wert von etwa 2000 Bq/m³ an einem der Geräte abgelesen werden. Am Abend des 12. Dezembers 2022, kurz vor Ende der Öffnungszeit des Strahlenschutzlabors, wurde studienintern vereinbart, die Messung nach 40 Stunden zu beenden. Bei der anschließenden Vergleichsanalyse wurde festgestellt, dass die IRC in der Tonne bereits nach kurzer Zeit auf unter 300 Bq/m³ gefallen war, weshalb keine relevanten Vergleichsdaten im hohen Konzentrationsbereich vorlagen.

Hinzu kam, dass eine Vergleichsmessung in der luftdichten Kalibriertonne ein Betrieb der aktiven Messgeräte ohne Netzanschluss erforderte. Zwar bietet der Tonnendeckel einen Netzanschluss für ein einzelnes Messgerät, jedoch sind vier der für die Studie erforderlichen Messgeräte aufgrund ihrer Bauweise, beziehungsweise ihrer eingeschränkten Akkukapazität auf eine externe Stromversorgung angewiesen. Aus diesem Grund können mit der Kalibriertonne nicht alle Messgeräte mit dem kalibrierten Referenzgerät verglichen werden, weshalb eine zweite Vergleichsmessung bei höherem Radonpotential in der Kalibriertonne verworfen wurde. Stattdessen wurde studienintern vereinbart, zwei Vergleichsmessungen, eine bei hohem und eine bei niedrigem Radonpotential in Privathaushalten durchzuführen.



Abb. 16: Kalibriertonne der MA39



Abb. 17: Ra-226 Standard

3.4.6 Vergleichsmessung in Simmering

Mit einigen Studienteilnehmer:innen wurden Kurzzeitmessungen ab dem 18. Dezember 2022 vereinbart, weshalb die Messgeräte bis dahin an die jeweiligen Standorte verteilt werden mussten. Aufgrund ihres Einsatzes bei den Teilnehmer:innen konnten die Messgeräte erst nach Beendigung der Wintermessungen wieder an einem Standort zusammengebracht werden. Da für die zwei beschlossenen Vergleichsmessungen in Privathaushalten zwei Termine erforderlich waren, wurde kurzfristig nach Ende der Vergleichsmessung bei der MA39 ein weiterer Vergleich mit allen Messgeräten zwischen 14. und 16. Dezember 2022 in einem Privathaushalt in Wien Simmering anberaumt. Dieser fand bei niedrigem Radonpotenzial für 36 Stunden im Haus eines Studienteilnehmers (FJM_01) statt. Als kalibriertes Referenzgerät diente erneut das AlphaGuard DF2000 der MA39 (G1MA), welches über die Dauer der Vergleichsmessung eine mittlere IRC von etwa 150 Bq/m^3 aufzeichnete.



Abb. 18: Vergleichsmessung in Wien Simmering (FJM_01)

3.4.7 Vergleichsmessung im südlichen Niederösterreich

Als Termin für die Vergleichsmessung bei höherem Radonpotenzial wurde der Zeitraum zwischen den Winter-KZM und den Messungen nach der Heizsaison vereinbart, da in der Übergangszeit alle Messgeräte verfügbar waren und an einen zentralen Ort gebracht werden konnten. Als Vergleichsort wurde ein Schlafzimmer in einem Haushalt im südlichen Niederösterreich (NOE_07) herangezogen, da das Zimmer während der Wintermessungen höhere IRC aufwies. Die letzten Wintermessungen wurden Ende Februar 2023 abgeschlossen, weshalb die Vergleichsmessung darauffolgend zwischen 03. und 10. März 2023 durchgeführt werden konnte.

Das kalibrierte AlphaGuard DF2000 der MA39 (G1MA), welches bei den vorherigen Vergleichsmessungen als Referenzgerät diente, war von der MA39 auf unbestimmte Zeit für anderwärtige Messungen im Einsatz, weshalb es für die Studie nicht herangezogen werden konnte. Aus diesem Grund wurde bei der Vergleichsmessung im südlichen Niederösterreich das zweite AlphaGuard DF2000 der MA39 (G2MA) als Referenzgerät verwendet, welches zum Zeitpunkt der Messung ebenfalls eine aufrechte Kalibrierung hatte.

Das Referenzgerät zeichnete über die Dauer der 186 stündigen Vergleichsmessung eine mittlere IRC von etwa 560 Bq/m^3 auf. Abb. 19 zeigt den Aufbau der Vergleichsmessung im südlichen Niederösterreich. In Abb. 20 ist der zeitliche Verlauf der IRC-Stundenmittelwerte zu sehen, welche die jeweiligen aktiven Messgeräte aufzeichneten.



Abb. 19: Vergleichsmessung im südlichen Niederösterreich (NOE_07)

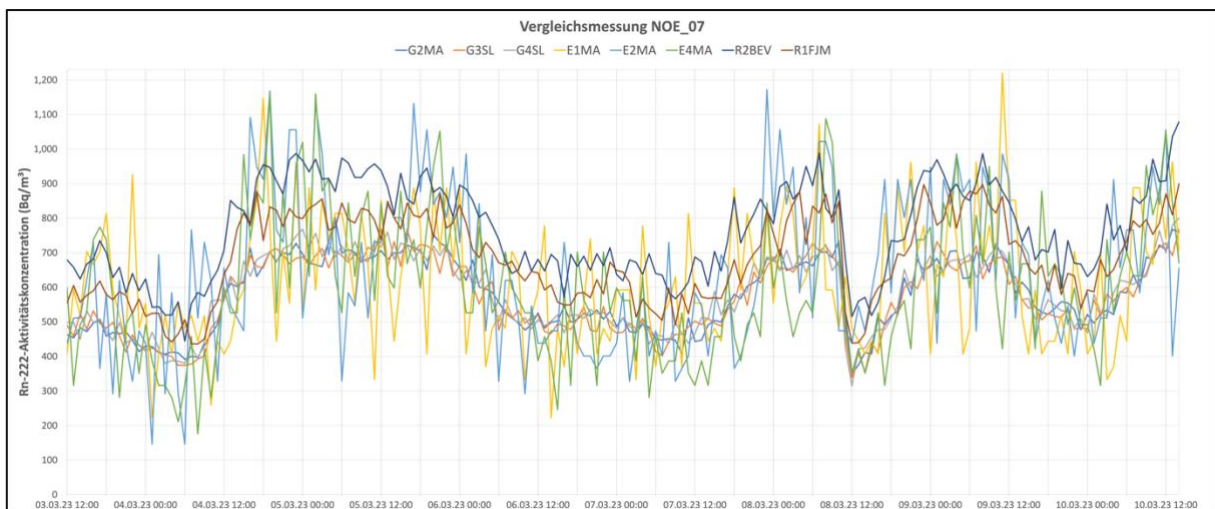


Abb. 20: Stundenmittelwerte der aktiven Radonmessgeräte bei der Vergleichsmessung im südlichen NÖ

3.4.8 Ermittlung der Korrekturfaktoren einer Vergleichsmessung

Zur Ermittlung des Korrekturfaktors eines Messgeräts „i“ wurde über den Zeitraum der jeweiligen Vergleichsmessung der Mittelwert aller Stundenmittelwerte der Radonaktivitätskonzentrationen gebildet, welche das Messgerät aufgezeichnet hat.

$$M_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n x_j \quad (2)$$

wobei:

M_i Mittelwert der IRC des Messgeräts über den Zeitraum der Vergleichsmessung (Bq/m^3)

n Anzahl der Stundenmittelwerte der jeweiligen Vergleichsmessung

x_j IRC-Stundenmittelwert „j“ des Messgeräts „i“ (Bq/m^3)

Auf die gleiche Weise war der Mittelwert der Stundenmittelwerte des kalibrierten Referenzgeräts zu bilden.

$$R = \frac{1}{n} \cdot \sum_{r=1}^n x_r \quad (3)$$

wobei:

R Mittelwert der IRC des Referenzgeräts über den Zeitraum der Vergleichsmessung (Bq/m^3)

n Anzahl der Stundenmittelwerte der jeweiligen Vergleichsmessung

x_r IRC-Stundenmittelwert „r“ des Referenzgeräts (Bq/m^3)

Der Korrekturfaktor „ F_i “ eines Messgeräts „i“ ergab sich aus dem Quotienten des Mittelwerts des Referenzgeräts „ R “ und des Mittelwerts des Messgeräts „ M_i “.

$$F_i = \frac{R}{M_i} \quad (4)$$

wobei:

F_i Korrekturfaktor eines Messgeräts „i“ einer Vergleichsmessung

R Mittelwert der IRC des Referenzgeräts über den Zeitraum der Vergleichsmessung (Bq/m^3)

M_i Mittelwert der IRC des Messgeräts „i“ über den Zeitraum der Vergleichsmessung (Bq/m^3)

3.4.9 Ermittlung der Unsicherheiten der Korrekturfaktoren

Zu jedem Korrekturfaktor war auch die entsprechende Unsicherheit „ u_{Fi} “ zu ermitteln. Hierfür wurde zunächst die Unsicherheit des Mittelwerts der IRC des Messgeräts „ u_{Mi} “ mithilfe der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung berechnet.

$$u_{M_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial M}{\partial x_j}\right)^2 \cdot u_{x_j}^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{n}\right)^2 \cdot u_{x_j}^2} = \frac{1}{n} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^n u_{x_j}^2} \quad (5)$$

wobei:

- u_{M_i} ... Unsicherheit des Mittelwerts der IRC des Messgeräts „i“ einer Vergleichsmessung (Bq/m³)
- n Anzahl der Stundenmittelwerte der jeweiligen Vergleichsmessung
- M Mittelwert der IRC des Messgeräts über den Zeitraum der Vergleichsmessung (Bq/m³)
- u_{x_j} Unsicherheit des IRC-Stundenmittelwerts „j“ des Messgeräts i (Bq/m³)

Anders als die AlphaGuard und AlphaE Geräte, zeichnen die Messgeräte des Typs RadonEye Plus 2 die Messunsicherheit der IRC-Stundenmittelwerte nicht auf, weshalb diese mit der Formel (6) abgeschätzt wurden.

$$u_{x_j} = \sqrt{x_j} + 0,05 \cdot x_j \quad (6)$$

wobei:

- u_{x_j} Messunsicherheit des IRC-Stundenmittelwerts „j“ des Messgeräts Radoneye Plus 2 (Bq/m³)
- x_j IRC-Stundenmittelwert „j“ des Messgeräts Radoneye Plus 2 (Bq/m³)

In weiterer Folge war auch die Unsicherheit des Mittelwerts der IRC des kalibrierten Referenzgeräts „ u_R “ mithilfe der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung zu berechnen.

$$u_R = \sqrt{\sum_{r=1}^n \left(\frac{\partial R}{\partial x_r}\right)^2 \cdot u_{x_r}^2} = \sqrt{\sum_{r=1}^n \left(\frac{1}{n}\right)^2 \cdot u_{x_r}^2} = \frac{1}{n} \cdot \sqrt{\sum_{r=1}^n u_{x_r}^2} \quad (7)$$

wobei:

- u_R Unsicherheit des Mittelwerts der IRC des Referenzgeräts einer Vergleichsmessung (Bq/m³)
- n Anzahl der Stundenmittelwerte der jeweiligen Vergleichsmessung
- R Mittelwert der IRC des Referenzgeräts über den Zeitraum der Vergleichsmessung (Bq/m³)
- u_{x_r} Unsicherheiten des IRC-Stundenmittelwerts „r“ des Referenzgeräts (Bq/m³)

Die Unsicherheit des Korrekturfaktors „ u_{F_i} “ wurde mittels Gauß'scher Fehlerfortpflanzung nach Formel (8) berechnet.

$$u_{F_i} = \sqrt{\left(\frac{\partial F_i(R, M_i)}{\partial R}\right)^2 \cdot u_{R^2} + \left(\frac{\partial F_i(R, M_i)}{\partial M_i}\right)^2 \cdot u_{M_i^2}} \quad (8)$$

$$u_{F_i} = \sqrt{\left(\frac{1}{M_i}\right)^2 \cdot u_{R^2} + \left(\frac{R}{M_i^2}\right)^2 \cdot u_{M_i^2}} = \sqrt{\frac{1}{M_i^2} \cdot u_{R^2} + \frac{R^2}{M_i^4} \cdot u_{M_i^2}} \quad (9)$$

wobei:

u_{F_i} Unsicherheit des Korrekturfaktors F_i

F_i Korrekturfaktor eines Messgeräts „i“ einer Vergleichsmessung

M_i Mittelwert der IRC des Messgeräts „i“ über den Zeitraum der Vergleichsmessung (Bq/m³)

u_{M_i} ... Unsicherheit des Mittelwerts der IRC des Messgeräts „i“ einer Vergleichsmessung (Bq/m³)

R Mittelwert der IRC des Referenzgeräts über den Zeitraum der Vergleichsmessung (Bq/m³)

u_R Unsicherheit des Mittelwerts der IRC des Referenzgeräts einer Vergleichsmessung (Bq/m³)

3.4.10 Zusammenfassung der Korrekturfaktoren und deren Unsicherheiten

Die verwendeten aktiven Messgeräte wiesen unterschiedliche Abweichungen von den kalibrierten Referenzgeräten auf. Als Ursache für die Abweichungen sind in jedem Fall die unterschiedlichen Bauarten zu nennen. Außerdem sind die Unterschiede auf eventuell divergierende interne Berechnungsalgorithmen zurückzuführen. Nebenbei stellte sich im Zuge der Vergleichsmessungen auch heraus, dass die Abweichungen der Korrekturfaktoren von der Höhe der IRC abhängig waren. Im Rahmen der Studie wurden alle von den jeweiligen Messgeräten angezeigten IRC-Stundenmittelwerte aller KZM mit den entsprechenden Korrekturfaktoren F_i multipliziert.

Für den IRC-Wertebereich $0 \leq x < 196 \text{ Bq/m}^3$ wurden die gerätespezifischen Korrekturfaktoren der Vergleichsmessung in Simmering verwendet.

Für jene Messgeräte für die IRC-Werte der Messung in der Kalibriertonne der MA39 vorlagen, wurden für den Stundenmittelwerte-Bereich $196 \leq x < 330 \text{ Bq/m}^3$ die Korrekturfaktoren der Vergleichsmessung im Strahlenschutzlabor der Stadt Wien herangezogen. Die Messgeräte E4MA, G4SL sowie R2BEV lieferten bei der Vergleichsmessung der MA39 aufgrund ihrer fehlenden Stromversorgung keine Messwerte. Für diese Geräte wurde für den Wertebereich $0 \leq x < 330 \text{ Bq/m}^3$ der Korrekturfaktor der Vergleichsmessung Simmering verwendet.

Für alle Messwerte ab 330 Bq/m^3 wurden die angezeigten Messwerte mit den Korrekturfaktoren der Vergleichsmessung im südlichen Niederösterreich multipliziert.

In Tab. 6, Tab. 7 und Tab. 8 sind die ermittelten Werte, Korrekturfaktoren und Unsicherheiten aller Vergleichsmessungen zusammengefasst. „ n “ gibt Anzahl der Stundenmittelwerte der jeweiligen Vergleichsmessung an, „ M_i “ den Mittelwert der IRC des Messgeräts über den Zeitraum der Vergleichsmessung (Bq/m^3) und „ u_{M_i} “ die Unsicherheit des Mittelwerts (Bq/m^3). „ F_i “ zeigt den berechneten Korrekturfaktor und „ u_{F_i} “ die Unsicherheit des Korrekturfaktors aller Messgeräte. In der letzten Zeile sind die Korrekturfaktor-Unsicherheiten in Prozent angegeben. Der Vollständigkeit halber sind in den rot hinterlegten Spalten auch jene Messgeräte angeführt, welche bei der jeweiligen Vergleichsmessung nicht beteiligt waren.

Tab. 6: Korrekturfaktoren der Messgeräte bei der MA39 (mittlerer IRC-Bereich)

Vergleichsmessung MA39									
Für Werte laut Referenzgerät (G1MA) zwischen 195 Bq/m ³ und 310 Bq/m ³									
Messgerät	G1MA (Referenz)	G2MA	E1MA	E2MA	E4MA	G3SL	G4SL	R1FJM	R2BEV
n	40	40	40	40	-	40	-	40	-
M_i (Bq/m³)	258.28	260.76	263.63	270.89	-	257.98	-	268.33	-
u_{M_i} (Bq/m³)	4.60	4.62	20.03	20.31	-	3.96	-	4.72	-
F_i	1.00	0.99	0.98	0.95	-	1.00	-	0.96	-
u_{F_i}	0.03	0.03	0.08	0.07	-	0.02	-	0.02	-
u_{F_i} (%)	2.52	2.51	7.80	7.71	-	2.35	-	2.50	-

Tab. 7: Korrekturfaktoren der Messgeräte in Simmering (niedriger IRC-Bereich)

Vergleichsmessung Simmering									
Für Werte laut Referenzgerät (G1MA) zwischen 77 Bq/m ³ und 182 Bq/m ³									
Messgerät	G1MA (Referenz)	G2MA	E1MA	E2MA	E4MA	G3SL	G4SL	R1FJM	R2BEV
n	37	37	37	37	37	37	37	37	37
M_i (Bq/m³)	119.59	124.15	137.02	149.06	113.09	120.39	120.82	130.76	158.37
u_{M_i} (Bq/m³)	2.86	2.93	14.15	14.78	12.48	2.57	2.58	2.97	3.35
F_i	1.00	0.96	0.87	0.80	1.06	0.99	0.99	0.91	0.76
u_{F_i}	0.03	0.03	0.09	0.08	0.12	0.03	0.03	0.03	0.02
u_{F_i} (%)	3.38	3.36	10.60	10.20	11.29	3.20	3.20	3.30	3.19

Tab. 8: Korrekturfaktoren der Messgeräte im südlichen NÖ (hoher IRC-Bereich)

Vergleichsmessung Gloggnitz									
Für Werte laut Referenzgerät (G2MA) zwischen 330 Bq/m ³ und 800 Bq/m ³									
Messgerät	G1MA	G2MA (Referenz)	E1MA	E2MA	E4MA	G3SL	G4SL	R1FJM	R2BEV
n	-	187	187	187	187	187	187	187	187
M_i (Bq/m³)	-	560.65	596.33	621.03	582.81	553.04	562.04	685.30	745.14
u_{M_i} (Bq/m³)	-	3.56	15.39	15.78	14.92	2.89	2.92	4.66	4.77
F_i	-	1.00	0.94	0.90	0.96	1.01	1.00	0.82	0.75
u_{F_i}	-	0.01	0.03	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01
u_{F_i} (%)	-	0.90	2.66	2.62	2.64	0.82	0.82	0.93	0.90

Aus den Tab. 6, Tab. 7 und Tab. 8 ist ersichtlich, dass die Messwerte der AlphaGuard Geräte, unter anderem auch jene der beiden älteren P30-Modelle (G3SL und G4SL, Baujahr 1995) sehr gut mit den Messwerten der Referenzgeräte übereinstimmten. Als augenscheinlicher Grund hierfür können die großen Volumina der Ionisationskammern angeführt werden, welche eine genaue Messung ermöglichen. Aufgrund ihrer Genauigkeit und ihrer Zuverlässigkeit sind die Geräte im oberen Preissegment angesiedelt. Die beiden Radoneye Plus 2 zeigten zwar stets höhere Werte als das Referenzgerät an, jedoch konnten deren Korrekturfaktoren mit äußerst geringer Unsicherheit bestimmt werden. Die Stundenmittelwerte der AlphaE Geräte wiesen starke Fluktuationen auf, zeigten jedoch im Mittel, über mehrere Stunden, geringere Abweichungen als die Radoneye Plus 2 Geräte. Dies hat zur Folge, dass die AlphaE Geräte einen Korrekturfaktor nahe am Wert „Eins“ hatten, allerdings große Korrekturfaktor- Unsicherheiten aufwiesen.

3.4.11 Datenübertragung und Datenaufbereitung

Nach Abschluss einer Kurzzeitmessung wurden die gerätespezifischen, aufgezeichneten Messwerte auf einen PC übertragen und aufbereitet, um eine einheitliche Weiterverarbeitung der Datensätze für eine statistische Analyse zu ermöglichen.

Daten der AlphaGuard und AlphaE

Die AlphaGuard und AlphaE Messgeräte zeichnen die Stundenmittelwerte der IRC („Rn222 (Bq/m³)“) und der Messunsicherheit („Rn222 +/- Unsicherheit (Bq/m³)“), des Luftdrucks (mbar), der relativen Luftfeuchte (%) und der Raumtemperatur (°C) auf. Die Messwerte konnten mit der zur Verfügung stehenden Software (DataView) auf einen PC übertragen werden und in MS-Excel konvertiert werden. Es war zu beachten, dass die AlphaGuard und AlphaE Geräte die Zeitumstellung nicht berücksichtigen. Dies musste nach Auswertung der Messreihen in Excel korrigiert werden. [48]

Daten der RadonEye Plus 2

Die Radoneye Plus 2 Geräte ermitteln neben den Stundenmittelwerten der IRC auch die Raumtemperatur (°C) und die Luftfeuchtigkeit (%). Es war zu beachten, dass diese Messgeräte die Messdaten nicht zur vollen Stunde speichern. Sollen die Daten zur vollen Stunde ausgegeben werden, ist das Netzteil des Geräts um XX:56 Uhr an die Spannungsversorgung anzuschließen. Nach einem etwa 4 minütigen Kalibriervorgang beginnt die Aufzeichnung der Messwerte. Da das Gerät keinen eingebauten Akku besitzt, beendet das Gerät die Messung bei Unterbrechung der Spannungsversorgung (z.B. Stromausfall), speichert die Messdaten und beginnt mit einer neuen Messreihe. Bei der Auswertung der Daten waren etwaige Unterbrechungen der Spannungsversorgung durch Zeitsprünge erkennbar. Die Messdaten der RadonEye Plus 2 wurden mittels Bluetooth übertragen und konnten als *.txt Datei abgespeichert werden. Zur Aufbereitung der Daten wurden diese anschließend in Excel übertragen. [48]

FTLab Radon Data					
Model Name:		Radon Eye Plus2			
S/N:		PE21909160036			
Unit:		Bq/m3			
Time step:		1hour			
Data No: 672					
1)	2023-06-20	14:03:55	223	23.0°C	50%
2)	2023-06-20	15:03:55	191	23.0°C	50%
3)	2023-06-20	16:03:55	183	23.0°C	50%
4)	2023-06-20	17:03:55	212	23.0°C	50%
5)	2023-06-20	18:03:55	152	23.0°C	50%
6)	2023-06-20	19:03:55	164	22.5°C	50%
7)	2023-06-20	20:03:55	177	22.5°C	51%
8)	2023-06-20	21:03:55	158	22.5°C	51%
9)	2023-06-20	22:03:55	139	22.5°C	51%

Abb. 21: Ausschnitt der Messdaten der RadonEye Plus 2 (Stundenmittelwerte)

Datenkorrektur in MS Excel

Jeder einzelne ermittelte IRC-Stundenmittelwert eines jeden Messgeräts wurde in Excel mit dem geräteabhängigen Korrekturfaktor F_i (Kapitel 3.4.4, Formel (1)) multipliziert. Je nachdem in welchem Wertebereich der jeweilige IRC-Stundenmittelwert liegt, wurden unterschiedliche Korrekturfaktoren angewandt, die in Kapitel 3.4.10 zusammengefasst sind.

Als Beispiel ist in Abb. 22 ein Ausschnitt der Datenkorrektur ersichtlich. Die IRC-Stundenmittelwerte des Messgeräts R2BEV (Spalte C) wurden für IRC-Werte im Bereich $0 \leq x < 330$ Bq/m³ mit dem bei der Vergleichsmessung Simmering ermittelten Korrekturfaktor „0,76“ multipliziert. Für Werte ab 330 Bq/m³ wurde der R2BEV-Korrekturfaktor „0,75“ der Vergleichsmessung im südlichen Niederösterreich angewandt.

zeit	Rn222 (Bq/m3)	Rn222 +/- Unsicherheit (Bq/m3)	Luftdruck (mbar)	Luftfeuchte_innen (%)	Temperatur_innen (°C)	Faktor	Faktor_Uns. +-:	Rn222_korrigiert (Bq/m3)	Rn222_korr_Uns. +-:
21.06.23 02:03	267	29.69	-	51	22.5	0.76	0.024	203	23
21.06.23 03:03	256	28.80	-	51	22.5	0.76	0.024	195	23
21.06.23 04:03	333	34.90	-	51	22.5	0.75	0.007	250	26
21.06.23 05:03	331	34.74	-	51	22.5	0.75	0.007	=C18*\$I18	26
21.06.23 06:03	185	22.85	-	55	22.0	0.76	0.024	141	18
21.06.23 07:03	141	18.92	-	53	22.5	0.76	0.024	107	15

Abb. 22: Messdaten der Messreihe NOE_02_S_R2BEV

Sowohl die angezeigten IRC-Stundenmittelwerte des jeweiligen Messgeräts „i“, als auch die Korrekturfaktoren des Messgeräts „i“ sind mit Unsicherheiten behaftet. Aufgrund dessen war für die Ermittlung der Messunsicherheit der korrigierten IRC-Stundenmittelwerte „j“ des Messgeräts „i“ eine Gauß'sche Fehlerfortpflanzung gemäß Formel (10) notwendig (Abb. 23).

$$u_{x_korr_j} = \sqrt{\sum_k \left(\frac{\partial x_korr_j(v_k)}{\partial v_k} \right)^2 \cdot u_{v_k}^2} \quad (10)$$

$$u_{x_korr_{ji}} = \sqrt{\left(\frac{\partial x_korr_{ji}}{\partial x_j} \right)^2 \cdot u_{x_j}^2 + \left(\frac{\partial x_korr_{ji}}{\partial F_i} \right)^2 \cdot u_{F_i}^2} \quad (11)$$

$$u_{x_korr_{ji}} = \sqrt{F_i^2 \cdot u_{x_j}^2 + x_j^2 \cdot u_{F_i}^2} \quad (12)$$

wobei:

- $u_{x_korr_{ji}}$ Messunsicherheit des korrigierten IRC-Stundenmittelwerts „j“ des Messgeräts „i“ (Bq/m³)
- x_korr_{ji} korrigierter IRC-Stundenmittelwert „j“ des Messgeräts „i“ (Bq/m³)
- v_k beliebige Variable „k“
- x_j angezeigter IRC-Stundenmittelwert „j“ des Messgeräts „i“ (Bq/m³)
- u_{x_i} Messunsicherheit des angezeigten IRC-Stundenmittelwerts „j“ des Messgeräts „i“ (Bq/m³)
- F_i Korrekturfaktor des Messgeräts „i“
- u_{F_i} Messunsicherheit des Korrekturfaktors F_i

$$f_x = \text{WURZEL}((\$I18^2)*(\$D18^2)+(\$C18^2)*(\$J18^2))$$

NOE_02_S_R2BEV									
zeit	Rn222 (Bq/m3)	Rn222 +/- Unsicherheit (Bq/m3)	Luftdruck (mbar)	Luftfeuchte_innen (%)	Temperatur_innen (°C)	Faktor	Faktor_Uns. +/-	Rn222_korrigiert (Bq/m3)	Rn222_korr_Uns. +/-
21.06.23 02:03	267	29.69	-	51	22.5	0.76	0.024	203	23
21.06.23 03:03	256	28.80	-	51	22.5	0.76	0.024	195	23
21.06.23 04:03	333	34.90	-	51	22.5	0.75	0.007	250	26
21.06.23 05:03	331	34.74	-	51	22.5	0.75	0.007	248	(\$I18^2)
21.06.23 06:03	185	22.85	-	55	22.0	0.76	0.024	141	18
21.06.23 07:03	141	18.92	-	53	22.5	0.76	0.024	107	15
21.06.23 08:03	156	20.29	-	52	23.0	0.76	0.024	119	16
21.06.23 09:03	145	19.29	-	51	23.0	0.76	0.024	110	15
21.06.23 10:03	185	22.85	-	51	23.0	0.76	0.024	141	18

Abb. 23: Ermittlung der Messunsicherheit der Messreihe NOE_02_S_R2BEV

3.5 Langzeitmessungen mit Kernspur-Exposimeter

3.5.1 Passive Kernspur-Detektoren

Für die Studie haben die beiden nach ISO 11665-4 akkreditierten Radondosimetrie-Prüfstellen MA39 und Seibersdorf Laboratories jeweils 49 passive Kernspur-Exposimeter zur Verfügung gestellt. Beide Institute verwenden das „TASLIMAGE Radon Dosimetry System“ von Track Analysis Systems Ltd mit Hauptsitz in Bristol im Vereinigten Königreich. Die Detektoren bestehen aus einem zweiteiligen Kunststoffgehäuse, in welchem ein 25 mm x 25 mm großer, durchsichtiger TASTRAK-Kernspurdetektor positioniert ist [52]. Der Hauptbestandteil des hochempfindlichen Kunststoffdetektors ist Polyallyldiglycolcarbonat (PADC), welcher unter anderem als Material von Brillengläsern Verwendung findet. Zwischen Gehäuseboden und Gehäusedeckel befindet sich ein etwa 0,1 mm großer, ringförmiger Luftspalt, der das Radongas, jedoch nicht dessen kurzlebigen Folgeprodukte in das Gehäuse passieren lässt. Das Rn-222, welches in den Innerraum des Gehäuses diffundiert, zerfällt in unmittelbarer Nähe zum Kunststoffdetektor. Auch die Folgeprodukte des Rn-222 geben ihre Energie in der Umgebung des Detektors ab. Die emittierenden Alphateilchen des Rn-222 und der Folgeprodukte, welche auf den TASTRAK-Detektor treffen, haben je nach Energie im Detektor eine Reichweite von etwa 30 μm bis 60 μm . [52] Die Alphateilchen erzeugen im Detektor Spuren, welche sich je nach Eintrittswinkel und Energie der Alphastrahlung voneinander unterscheiden. Nach der Exposition können die Spuren durch Ätzen des Kunststoffdetektors in Natriumhydroxid vergrößert und sichtbar gemacht werden [53].



Abb. 24: TASTRAK-Kunststoffdetektor (PADC)



Abb. 25: Kunststoffgehäuse

3.5.2 Vorbereitung der Kernspur-Detektoren

Beim Umgang mit dem hochempfindlichen Detektormaterial ist auf Sauberkeit zu achten, weshalb bei der Vorbereitung der Exposimeter medizinische Einmalhandschuhe getragen wurden. Die Kunststoffdetektoren wurden vor der Exposition in einem Gefrierschrank gelagert, um das Material vor Radon und thermischen Einflüssen zu schützen. Die einzelnen TASTRAK-Exposimeter wurden aus einem Kunststoffbogen durch Herausbrechen vom Anguss getrennt. Anschließend wurden die Detektoren mittig in den Gehäuseboden gelegt. Die Exposimeter verfügen über eine sechsstellige Identifikationsnummer und einen entsprechenden Punktcode für die Auswertesoftware. Um die Exposimeter im geschlossenen Zustand erkennen zu können, wurde der Gehäusedeckel mit der entsprechenden Identifikationsnummer beschriftet. Anschließend wurden die Gehäusenhälften durch Aneinanderpressen verschlossen. Um eine Manipulation der Detektoren zu verhindern, können die Gehäuse nicht zerstörungsfrei geöffnet werden.



Abb. 26: Kunststoffdetektor-Bogen der Detektoren 000 331 bis 000 440



Abb. 27: zweiteiliges offenes Kunststoffgehäuse und Kunststoffdetektor 000 007



Abb. 28: geschlossenes Exposimeter mit sechsstelliger Identifikationsnummer 000 646

3.5.3 Messdurchführung

Die Langzeitmessungen mittels passiver Kernspur-Detektoren ermöglichten die Ermittlung der mittleren jährlichen IRC in den Räumen der Studienteilnehmer:innen, um diese mit den Radonmesswerten der KZM vergleichen zu können. Die Ermittlung der mittleren jährlichen IRC sollte sich an die nationalen Vorgaben einer akkreditierten Radonmessung halten (sechsmonatige LZM und mindestens die Hälfte der Zeit zwischen 15. Oktober und 15. April [46]). Aus diesen Gründen wurden die LZM in allen teilnehmenden Haushalten zwischen Mitte Dezember 2022 und Anfang Jänner 2023 gestartet und Ende Juni 2023 ausgewertet.

Nach der Vorbereitung wurden die Exposimeter in luftdicht verschließbaren Kunststoffbeuteln zwischengelagert, um diese vor einer vorzeitigen Radonexposition zu schützen. Anschließend wurden die Detektoren zu den Studienhaushalten gebracht. In den Räumen der KZM wurden die Exposimeter in unmittelbarer Nähe zu den Aufstellungsorten der aktiven Messgeräte platziert. Um Informationen über IRC-Verteilung in den Studienhaushalten zu erhalten, wurden in den Häusern Exposimeter in mehreren Räumen und Stockwerken positioniert. Außerdem wurden in einigen Räumen Detektoren beider Prüfstellen (MA39 und SL) nebeneinander positioniert, um die Qualität der LZM zu evaluieren [48].

Für die Aufstellungsorte der Exposimeter wurden die Vorgaben der ÖNORM S 5280-1 beachtet, welche bereits bei der Positionierung der aktiven KZM als Richtmaße dienten (Kapitel 3.4.2). Der Standort eines jeden Exposimeters wurde über die Dauer der Messung nicht verändert. Auch die individuellen Nutzungsverhalten der Räume wurden über die Dauer der Messungen aufrecht erhalten (Lüftungs- und Heizgewohnheiten, Raumnutzungszeiten etc.). Es wurde eine Liste erstellt, welche alle Exposimeter und die entsprechenden Daten enthält (Identifikationsnummer, Aufstellungsort, Raum-Nr., Messbeginn und Messende). Zusätzlich wurde zur Verifizierung von jedem Exposimeter und der dazugehörigen Identifikationsnummer ein Foto am jeweiligen Standort aufgenommen, um ein Vertauschen der Vielzahl an Exposimeter vorzubeugen.

In ausgewählten Studienhaushalten im südlichen Niederösterreich, sowie in Wien und Umgebung wurden parallel zu der Studie kostenfrei angebotene Radonmessungen der AGES durchgeführt, welche die Aussagekraft der LZM zusätzlich absichern sollten [48].



Abb. 29: Kernspur-Exposimeter in einem Studienhaushalt (MA39 und SL)

3.5.4 Entwicklung der Kernspur-Detektoren

Nach der Exposition wurden die Detektoren in luftdicht verschließbaren Kunststoffbeuteln zwischengelagert, um diese vor einer vorzeitigen Radonexposition zu schützen. Anschließend wurden die Exposimeter zur Entwicklung in die jeweiligen Institute gebracht. Die Entwicklung im Strahlenschutzlabor der Stadt Wien, MA39 erfolgte am 22.06.2023. Die Detektoren von Seibersdorf Laboratories wurden am 28.06.2023 entwickelt. Die TASTRAK-Detektoren wurden geätzt, um die Ionenspuren zu vergrößern. Der genaue Entwicklungsprozess wurde anhand der Bedienungsanleitung des Herstellers (TASLIMAGE Radon Dosimetry System) durchgeführt. Hierfür wurde zu Beginn ein Ätzbad vorbereitet. Da beim Prozess mit heißer Lauge hantiert wurde, war verpflichtend Schutzkleidung (hitzebeständige Handschuhe, Labormantel und Schutzbrille) zu tragen. Es wurde Natronlauge mit destilliertem Wasser vermengt, in einem Wärmebad erhitzt und anschließend konstant auf 98 °C gehalten. Für die optimalen Bedingungen war das Mischungsverhältnis von NaOH und H₂O so einzustellen, dass die Dichte der Lösung 1,181 g/cm³ bei 98 °C entsprach. Zur Bestimmung der Dichte wurde ein Aräometer in die Lösung getaucht. Lag die Dichte der Lösung über dem Sollwert, wurde zusätzliches destilliertes H₂O beigemengt. Im Falle von zu geringer Dichte konnte der Sollwert durch Verdampfen der Lösung erreicht werden. In Abb. 30 sind die jeweiligen Komponenten der Entwicklungsbäder zu sehen. Rechts befindet sich das Heizbad, links drei Becken zur Neutralisation und Spülung der Detektoren.



Abb. 30: Einrichtung zur Entwicklung der Detektoren

Je nach Institut wurden die beiden Gehäusenhälften mit einem Schraubenzieher beziehungsweise mit einer Öffnungsvorrichtung destruktiv geöffnet. Aufgrund des hochempfindlichen Detektormaterials waren beim Hantieren mit den TASTRAK-Detektoren medizinische Einmalhandschuhe zu tragen. Die Detektoren wurden entsprechend ihrer Identifikationsnummer geordnet zwischen zwei Edelstahlplatten positioniert, welche über Ausnehmungen für die Detektoren verfügt. Anschließend wurden die beiden Platten verschraubt, wodurch die Detektoren formschlüssig fixiert wurden. Danach wurden die Edelstahlplatten mit den Detektoren in eine Edelstahlvorrichtung eingeschoben und fixiert. Die Vorrichtung wurde anschließend mit Distanzwerkzeugen für eine Stunde in das Wärmebad getaucht. Danach wurde die Detektorvorrichtung in ein Becken mit destilliertem Wasser getaucht und für 15 Sekunden durch horizontale Schwenkbewegungen gespült. Darauf folgend wurden die Detektoren für 30 Minuten in ein Neutralisationsbad getaucht, in welchem zuvor 5 Liter destilliertes Wasser und 100 ml Essigsäure vermengt wurden. Um die Detektoren homogen mit der Lösung zu benetzen, wurde die Vorrichtung in Zeitabständen von 30 Sekunden horizontal geschwenkt. Anschließend wurden die Detektoren abermals in ein Becken mit destilliertem Wasser getaucht und für zehn Minuten durch horizontale Schwenkbewegungen gespült. Zum Abschluss wurden die Detektoren für etwa 90 Minuten luftgetrocknet.



Abb. 31: Vorrichtung zur Gehäuseöffnung



Abb. 32: Detektorvorrichtung in Spülbad

3.5.5 Auswertung der Kernspur-Detektoren

Bei beiden Instituten werden die Detektoren mit dem TASLImage™ Bildanalyzesystem von Track Analysis Systems Ltd ausgewertet, welches speziell für die Messung von Ätzspuren in den TASTRAK-Detektoren entwickelt wurde. Das System nutzt eine Spurerkennungssoftware, welche die Ätzspuren anhand ihrer Geometrien identifiziert. [54] Die Hauptkomponenten des Systems sind ein Mikroskop, eine Kamera, ein PC mit entsprechender Software, sowie eine Aufnahmekonstruktion für die Detektorvorrichtung, welche durch Schrittmotoren angesteuert wird, um die einzelnen Detektoren unter dem Mikroskop positionieren zu können.

Nach der Trocknungsphase wurden die Edelstahlplatten mit den geätzten Detektoren unter dem Mikroskop auf die Aufnahmekonstruktion geschraubt. Anhand der Lochcodes der Detektoren registrierte die Kamera die entsprechende Identifikationsnummer. Die Software positionierte einen Ausschnitt eines Detektors mithilfe der Schrittmotoren mittig unter dem Mikroskop. Die Kamera fokussierte automatisch auf die durch das Mikroskop sichtbaren Ätzspuren im Detektor. Anhand der unterschiedlichen Spurengeometrien konnte die Software die Ätzspuren der Rn-222-Alphaeilchen von jenen der Tochternuklide (Po-214 und Po-218) unterscheiden. Das System rasterte die umliegenden Bereiche des gewählten Ausschnitts ab und zählte dabei die Anzahl der registrierten Rn-222-Ätzspuren, welche ein Maß für die Anzahl der Radonzerfälle im Expositimeter sind. Nach der Auswertung eines Detektors positionierte die Software den nächsten Detektor unter dem Mikroskop und die Auswertung für diesen Detektor startete. Nach der Auslesung des letzten der 49 Detektoren beendete das System die Auswertung automatisch und speicherte die Ergebnisse auf dem PC ab. In Abb. 33 sind das TASLImage™ Bildanalyzesystem sowie die Edelstahlplatte mit den Detektoren abgebildet. In der Abb. 34 ist ein Ausschnitt eines Detektors mit geätzten Kernspuren unter dem Mikroskop zu sehen.



Abb. 33: TASLImage™ Bildanalyzesystem



Abb. 34: Kernspuren unter dem Mikroskop

3.5.6 Datenaufbereitung

Die Detektoren können prinzipiell beliebig oft ausgelesen werden, da die Auswertung den Kunststoff-Detektor, beziehungsweise die Kernspuren nicht beeinflusst. Bei jeder Auswertung kann der vom System ausgewählte Auslesebereich des Detektors variieren, weshalb sich auch die registrierten Ätzspuren unterscheiden können. Da der Alphazerfall des Rn-222 ein statistischer Prozess ist, ist das Auftreten der Ätzspuren ebenso statistischer Natur. Die Software berechnet anhand der registrierten Ätzspuren die Anzahl der Zerfälle pro Kubikmeter (Exposition (kBq·h/m³)), sowie deren Messunsicherheit (Uncertainty (kBq·h/m³)).

Um zufällige Abweichungen vom Erwartungswert der Zerfälle pro Kubikmeter zu reduzieren, wurde jeder Detektor vier Mal ausgelesen und anschließend der Mittelwert der vier Ergebnisse (MW Exposition (kBq·h/m³)) und der Messunsicherheit (MW Uns. (kBq·h/m³)) gebildet. Die Ausreißer wurden mit der 1,5·IQR-Regel eliminiert. In Abb. 35 sind als Beispiel die Ergebnisse und Messunsicherheiten der vier Auswertungen des Detektors „003 330“ ersichtlich. Die türkisfarbene Auswertung (MW Exposition = 431 kBq·h/m³) ist entsprechend der 1,5·IQR-Regel ein Ausreißer und wurde für die Mittelwertbildung nicht berücksichtigt. Der Mittelwert der drei verbleibenden Auswertungen ergab 446,3 kBq·h/m³, der Mittelwert der Messunsicherheit 23,0 kBq·h/m³.

MW TrackD	MW Exposition (kBq·h/m ³)	STABW.S Exposition (%)	MW Uns. (kBq·h/m ³)	Q1-IQR*1.5 Exposition (kBq·h/m ³)	Q3+IQR*1.5 Exposition (kBq·h/m ³)	
1075.0	446.3	0.7	23.0	432.5	454.5	
Device	FileDate	TrackD	KBq_m3_h	Uncertainty	Quality	Status
..\IMG0003330	28.06.2023 12:5	1070	444		22	OK
..\IMG0003330	28.06.2023 13:2	1083	450		22	OK
..\IMG0003330	28.06.2023 13:4	1072	445		25	OK
..\IMG0003330	28.06.2023 14:1	1039	431		21	OK

Abb. 35: Software-Auswertung des Detektors „003 330“

Um die mittlere IRC zu berechnen, wurde der „Mittelwert der Zerfälle pro Kubikmeter“ (MW Exposition (kBq·h/m³)) durch die Anzahl der Stunden der Exposition dividiert. Der Detektor „003 330“ wurde für 187 Tage exponiert. Entsprechend der Formel (13) wurde für den Detektor „003 330“ eine IRC von 99 Bq/m³ ermittelt.

$$IRC \left(Bq/m^3 \right) = \frac{MW \text{ Exposition } \left(kBq \cdot h/m^3 \right)}{Days \left(d \right) \cdot 24 \text{ hours } \left(h/d \right)} = \frac{446.3 \left(kBq \cdot h/m^3 \right)}{187 \left(d \right) \cdot 24 \left(h/d \right)} = 99 \left(Bq/m^3 \right) \quad (13)$$

Auf vergleichbare Weise wurde die Messunsicherheit nach Formel (14) ermittelt. Für den Detektor „003 330“ ergab die Messunsicherheit 5 Bq/m³.

$$Uns_{IRC} \left(Bq/m^3 \right) = \frac{MW \text{ Uns } \left(kBq \cdot h/m^3 \right)}{Days \left(d \right) \cdot 24 \text{ hours } \left(h/d \right)} = \frac{23.0 \left(kBq \cdot h/m^3 \right)}{187 \left(d \right) \cdot 24 \left(h/d \right)} = 5 \left(Bq/m^3 \right) \quad (14)$$

3.6 Erhebung meteorologischer Daten

Zur Untersuchung des Einflusses von meteorologischen Parameter auf die zeitlichen Veränderungen der IRC wurden Daten der GeoSphere Austria (Meteorologischer Dienst für Österreich) für die jeweiligen Messzeiträume der KZM gesammelt. Hierfür wurde auf Daten der jeweils zu den Studienhaushalten nächstgelegenen Wetterstationen zugegriffen. Je nach verfügbarer Infrastruktur der Wetterstation können unterschiedliche Parameter abgerufen werden. Einige Stationen zeichnen deutlich mehr Daten auf als andere, weshalb für die Studie nur jene Parameter gewählt wurden, welche bei allen relevanten Wetterstationen abrufbar waren. Weiterführend wurden die gewählten Parameter auf jene eingeschränkt, welche die IRC auf Basis bisheriger veröffentlichten Studienergebnisse beeinflussen könnten.

Die gewählten Daten umfassten Außentemperatur (*TTX*), äußerer Luftdruck (*PPX*), Windgeschwindigkeit (*VVX*), Windrichtung (*D6X*), relative Luftfeuchtigkeit (*FFX*) und Niederschlag (*RSX*). Die dafür verwendeten sogenannten STD-Datensätze setzen sich tageweise aus 24 Stundenwerten zusammen. [55] Jeweils zur vollen Stunde wurde ein neuer Zeitstempel in der koordinierten Weltzeit (UTC) erstellt. Die Daten der ausgewählten meteorologischen Parameter wurden als CSV-Datei heruntergeladen und in MS-Excel konvertiert. Anschließend wurden die jeweiligen Parameter den IRC-Stundenmittelwerten der Kurzzeitmessungen zur gleichen Zeit gegenübergestellt. Hierbei waren Korrekturen erforderlich, da die STD-Datensätze mit dem UTC-Zeitstempel versehen sind, die Rn-222-Stundenmittelwerte der aktiven Radonmessgeräte jedoch in der MEZ-Zeit angegeben sind. Vor allem in gebirgigen Regionen weicht die geographische Höhe der Studienhaushalte teils erheblich von jener der nächstgelegenen Wetterstationen ab. Aufgrund dessen wurden die Stundenmittelwerte des Luftdrucks (*PPX*) der Wetterstationen entsprechend der barometrischen Höhenformel auf die geographische Höhe des Studienhaushalts korrigiert.

In weiterer Folge wurden in Kombination mit den Umweltdaten (Raumtemperatur und Innenraum-Luftdruck) die abgeleitete Größen „Temperaturdifferenz“ und die „Druckdifferenz“ (zwischen Innen- und Außenraum) berechnet, welche ebenfalls den IRC-Stundenmittelwerten gegenübergestellt wurden.

Wetterdaten	Pottschach (416hm)	Lufttemperatur_außen_2m [°C]	Luftdruck_außen [mbar]	Windgeschwindigkeit [m/s]	Windrichtung [°]	relative Feuchte_außen [%]	Niederschlag [mm]		Druckdifferenz (mbar)	Druckdifferenz gemittelt (mbar)	Temperaturdifferenz (°C)
Zeit (MEZ)	Station	TTX	PPX	VVX	D6X	FFX	RSX				
10.11.22 00:00	10531	2.4	970	0.9	256	96	0		1.52	1.55	20.1
10.11.22 01:00	10531	1.2	970.3	0.7	260	95	0		1.52	1.54	21.3
10.11.22 02:00	10531	0.7	970.9	0.4	260	96	0		1.54	1.53	21.68
10.11.22 03:00	10531	0.4	971.3	0.6	268	97	0		1.57	1.51	21.85
10.11.22 04:00	10531	0.9	971.5	0.4	237	97	0		1.60	1.49	21.23
10.11.22 05:00	10531	1.8	972	0.2	215	97	0		1.65	1.50	20.2
10.11.22 06:00	10531	2.7	972.3	0.2	327	97	0		1.49	1.49	20.43
10.11.22 07:00	10531	3.5	972.9	0.5	211	97	0		1.39	1.49	20.13
10.11.22 08:00	10531	4.9	974.2	0.5	208	97	0.1		1.40	1.46	18.73
10.11.22 09:00	10531	6.6	974.9	0.4	252	97	0.3		1.30	1.44	17.03
10.11.22 10:00	10531	8.6	975.6	0.5	234	97	0		1.51	1.41	14.65
10.11.22 11:00	10531	10	976.4	0.2	261	97	0		1.45	1.39	13
10.11.22 12:00	10531	12.5	977	1.8	311	68	0		1.45	1.39	10.25
10.11.22 13:00	10531	12.6	977	2	316	65	0		1.24	1.39	9.9
10.11.22 14:00	10531	12.7	977.6	2.3	312	63	0		1.31	1.39	9.8
10.11.22 15:00	10531	12.1	978.1	1.8	295	66	0		1.34	1.40	10.28

Abb. 36: Ausschnitt der meteorologischen Daten (Station 10531 in Pottschach)

3.7 Statistische Analyse

Für die statistische Analyse der umfangreichen Datensätze der Kurzzeitmessungen, Langzeitmessungen, der meteorologischen Parameter etc. wurde die Software „IBM SPSS Statistics“ herangezogen. Mit SPSS wurden einerseits statistische Kennwerte berechnet, aber auch untersucht, ob Zusammenhänge zwischen den zeitlichen Änderungen der IRC und den zeitlichen Änderungen der jeweiligen meteorologischen Parametern, beziehungsweise den abgeleiteten Größen beobachtet werden können.

3.7.1 Spearman-Rangkorrelationen der IRC mit den Studiendaten

Um Zusammenhänge zwischen zwei Variablen beschreiben zu können, wird in der Statistik häufig die Pearson-Korrelation angewendet. Vor der Anwendung des Pearson-Korrelationskoeffizienten war zu ermitteln, ob alle Voraussetzungen erfüllt waren, um diesen anwenden zu dürfen. Die Pearson-Korrelation gibt die lineare Beziehung zwischen metrisch skalierten Variablen an. Voraussetzungen für die Anwendung ist, dass die Daten einer Normalverteilung unterliegen und ein linearer Zusammenhang zwischen den Daten vorliegt. [56] Die Spearman-Rangkorrelation hingegen verwendet den Rang der Daten, um die monotone Beziehung zwischen den Variablen zu messen [57]. Sie entspricht dem nicht parametrischen Äquivalent der Pearson-Korrelation. Die Spearman-Korrelation kann auch dann verwendet werden, wenn die Daten nicht normalverteilt sind. [56]

Im Zuge der Datenanalyse mit SPSS wurde festgestellt, dass ein Großteil der Datensätze der KZM, als auch der meteorologischen Parameter nicht normalverteilt sind. Als Beispiel sind in Abb. 37 die Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov Tests und des Shapiro-Wilk Tests einzusehen. Ist der Wert der Signifikanz beider Tests $> 0,05$, ist die Annahme einer Normalverteilung nicht verletzt. In diesem Beispiel hingegen, ist der Wert der Signifikanz beider Tests $< 0,001$, weshalb davon auszugehen ist, dass die Daten keiner Normalverteilung unterliegen. In Abb. 38 ist die Häufigkeitsverteilung dieser Daten (IRC-Stundenmittelwerte der Kurzzeitmessung NOE_02_S in Bq/m^3) grafisch dargestellt.

Da bei einigen Daten keine Normalverteilung vorliegt, wurde für die Korrelationsanalyse die Spearman-Rangkorrelation herangezogen. Der Rangkorrelationskoeffizient (ρ) kann Werte zwischen -1 und +1 annehmen. Für einen positiven linearen Zusammenhang zwischen den Variablen ist $\rho > 0$. Je höher der Wert, desto stärker ist der Zusammenhang. Für Werte zwischen $0,0 < 0,1$ liegt kein Zusammenhang vor. Im Bereich zwischen $0,1 < 0,3$ besteht ein geringer Zusammenhang und für Werte zwischen $0,3 < 0,5$ ein mittlerer Zusammenhang. Zwischen $0,5 < 0,7$ wird von einem hohen, für Werte zwischen $0,7 < 1$ von einem sehr hohen Zusammenhang gesprochen. [56] Umgekehrt beschreibt ein Wert von < 0 einen negativen Zusammenhang, wobei $\rho = -1$ eine perfekte Antikorrelation beschreibt [58].

Tests auf Normalverteilung						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
NOE_02_S	,139	664	<,001	,819	664	<,001

a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

Abb. 37: Tests auf Normalverteilung (IRC-Stundenmittelwerte der KZM NOE_02_S)

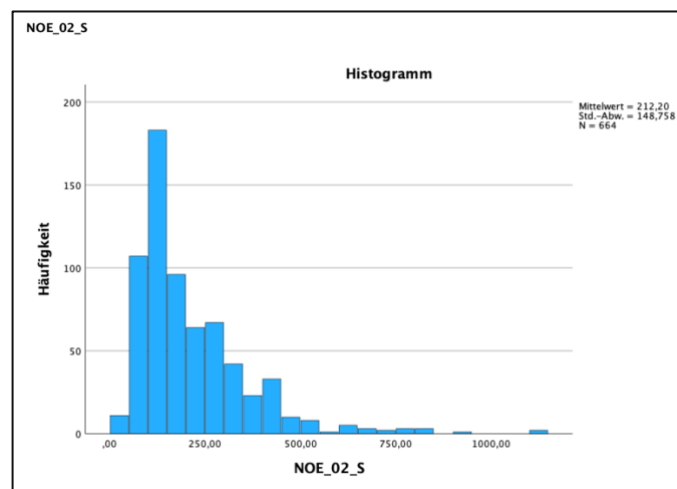


Abb. 38: Häufigkeitsverteilung der IRC-Stundenmittelwerte (NOE_02_S) in Bq/m³

Für die Spearman-Rangkorrelationsanalyse wurden die Datenreihen aller Winter-KZM „W“, sowie jene der Sommer-KZM „S“ in MS-Excel aufbereitet und anschließend in SPSS übertragen. In weiterer Folge wurden die Datensätze der IRC-Stundenmittelwerte der jeweiligen KZM den Stundenmittelwerten der folgenden Datensätze gegenübergestellt:

- der Umweltdaten:
 - Innenluftdruck („p_innen“)
 - Innenraumtemperatur („T_innen“)
 - relative Innenraum-Luftfeuchtigkeit („F_innen“)
- der meteorologischen Parameter der nächstgelegenen Wetterstation:
 - Außenluftdruck („p_außen“)
 - Außenlufttemperatur („T_außen“)
 - relative Außenluftfeuchtigkeit („F_außen“)
 - Niederschlagsmenge („Niederschlag“)
 - Windgeschwindigkeit („Windgeschw“)
 - Windrichtung („Windri“)
- der abgeleiteten Größen:
 - Differenz zwischen Außenluftdruck und Innenraumluftdruck („p_Diff“)
 - Differenz zwischen Innenraumtemperatur und Außenlufttemperatur („T_Diff“).

	IRC_W	p_innen_W	T_innen_W	F_innen_W	p_außen_W	T_außen_W	F_außen_W	Niederschlag_W	Windgeschw_W	Windri_W	p_Diff_W	T_Diff_W	IRC_S	p_innen_S	T_innen_S	F_innen_S
1	400,00	967,84	19,08	41,20	969,40	4,10	68,00	,00	3,00	271,00	1,56	14,98	74,00	973,38	20,38	56,71
2	421,00	969,51	18,91	41,56	970,10	4,30	57,00	,20	3,80	277,00	,59	14,61	78,00	973,75	20,20	56,24
3	448,00	969,24	18,63	42,06	969,90	4,00	57,00	,00	3,20	255,00	,66	14,63	71,00	973,59	20,12	55,80
4	458,00	969,17	18,70	41,86	970,90	4,10	59,00	,10	6,20	280,00	1,73	14,60	51,00	973,47	20,08	53,51
5	474,00	970,06	18,44	41,82	970,70	3,80	63,00	,20	4,20	278,00	,64	14,64	66,00	973,54	19,99	53,16
6	535,00	970,18	17,97	42,25	971,00	4,80	51,00	,10	2,60	260,00	,83	13,17	37,00	973,63	19,90	52,96
7	467,00	970,24	17,52	42,19	971,50	2,50	78,00	,30	5,90	291,00	1,26	15,02	26,00	973,61	19,83	52,69
8	290,00	970,78	17,04	41,65	971,70	1,60	86,00	1,00	3,90	282,00	,92	15,44	26,00	973,52	19,76	52,91
9	214,00	971,30	16,51	41,69	972,00	2,20	78,00	,90	2,30	301,00	,71	14,31	25,00	973,64	19,68	52,89
10	133,00	971,37	16,07	41,93	972,00	3,30	64,00	,60	2,50	287,00	,63	12,77	26,00	973,99	19,59	51,85
11	114,00	971,33	15,69	42,09	972,10	3,80	60,00	,10	4,00	294,00	,77	11,89	29,00	974,10	19,51	52,77
12	112,00	971,69	15,39	42,24	972,60	3,90	58,00	,10	4,80	288,00	,91	11,49	25,00	974,26	19,83	51,54
13	61,00	972,02	15,10	42,33	972,80	4,00	56,00	,40	4,40	289,00	,78	11,10	22,00	974,43	20,25	50,85
14	80,00	972,63	14,85	42,81	973,50	3,60	60,00	,20	3,30	296,00	,87	11,25	29,00	974,54	20,63	51,46
15	127,00	973,49	15,43	44,55	974,80	2,70	69,00	,20	3,70	295,00	1,31	12,73	37,00	974,78	20,79	51,80
16	216,00	974,24	16,65	43,61	974,80	3,80	53,00	,00	4,70	293,00	,56	12,85	36,00	974,87	20,80	52,72
17	289,00	974,79	17,46	42,25	975,70	1,80	85,00	,20	2,70	298,00	,92	15,66	53,00	974,75	20,73	53,06
18	352,00	974,97	17,64	41,57	975,40	3,80	56,00	,00	2,70	277,00	,43	13,84	53,00	974,48	20,65	53,24
19	403,00	975,23	17,53	41,58	975,50	4,40	49,00	,00	2,20	289,00	,27	13,13	64,00	974,11	20,62	53,54
20	424,00	974,79	17,76	41,48	974,90	6,20	44,00	,00	,40	281,00	,11	11,56	55,00	973,88	20,61	53,76
21	485,00	974,40	17,84	41,24	974,70	6,10	44,00	,00	2,20	231,00	,31	11,74	73,00	973,85	20,60	53,76

Abb. 39: Ausschnitt der Stundenmittelwerte der Datensätze in SPSS eines Studienhaushalts

Anschließend wurde mit SPSS für jeden Studienhaushalt die Spearman-Rangkorrelation der IRC-Stundenmittelwerte mit den Stundenmittelwerten der jeweiligen Parameter berechnet. In Abb. 40, in der ersten Zeile, sind die mit SPSS berechneten Rangkorrelationskoeffizienten (ρ) zwischen dem zeitlichen Verlauf der IRC während der Winter-KZM im Studienhaushalt NOE_01 und den zeitlichen Verläufen der jeweiligen gegenübergestellten Parameter ersichtlich. In der zweiten Zeile sind die jeweils berechneten Signifikanzen der Korrelationskoeffizienten angeführt. In der dritten Zeile gibt „N“ die Anzahl der verglichenen Datenpaare an. Da sich die KZM über 496 Stunden erstreckte, wurden bei dieser Korrelationsanalyse 496 Stundenmittelwerte-Paare verglichen.

	IRC_W	p_innen_W	T_innen_W	F_innen_W	p_außen_W	T_außen_W	F_außen_W	Niederschlag_W	Windgeschw_W	Windri_W	p_Diff_W	T_Diff_W
Korrelationskoeffizient	1,000	-,145*	-,221*	,384*	-,172*	-,395*	,499*	0,055	-,159*	0,029	,253*	,361*
Sig. (2-seitig)		0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,221	0,000	0,525	0,000	0,000
N	496	496	496	496	496	496	496	496	496	496	496	496

Abb. 40: Ausschnitt der Spearman-Rangkorrelation der Kurzzeitmessung NOE_01_W

Aus Abb. 40 ist beispielsweise ersichtlich, dass zwischen der IRC und dem Parameter „Differenz zwischen Innenraumtemperatur und Außenlufttemperatur („T_Diff“)“ ein mittlerer Zusammenhang ($\rho = 0,361$) berechnet wurde. In Abb. 41 sind die zeitlichen Verläufe der beiden Parameter grafisch dargestellt.

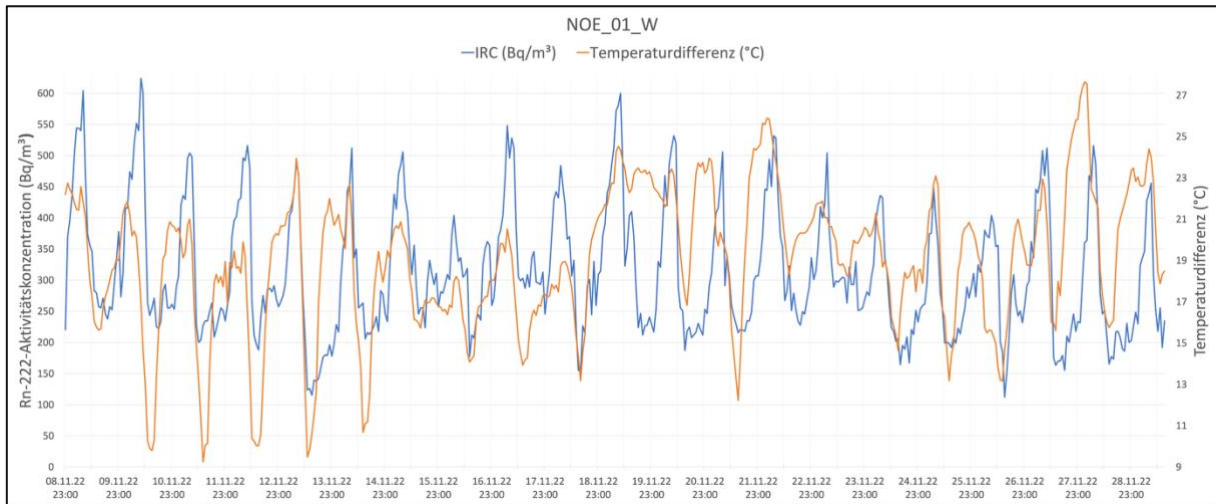


Abb. 41: Zeitlicher Verlauf der IRC und der Temperaturdifferenz (NOE_01_W)

3.7.2 ETA-Koeffizient der IRC mit den Gebäudedaten und den Lüftungsgewohnheiten

Es wurde untersucht, ob ein Einfluss bestimmter Gebäudeparameter (Hanglage, Unterkellerung etc.) auf die Höhe der mittleren jährlichen IRC der Haushalte beobachtet werden kann. Zusätzlich wurde analysiert, ob ein Zusammenhang zwischen dem Lüftungsverhalten der Studienteilnehmer:innen und der Höhe der IRC der LZM, beziehungsweise der Mittelwerte der jeweiligen KZM besteht.

Hierfür wurden die Einträge der Fragebögen, die den Teilnehmer:innen ausgehändigt wurden, analysiert und in MS-Excel zusammengefasst. Bei den Fragebogen-Einträgen handelt es sich um nominale Variablen, welche kategorisiert werden können, jedoch keiner logischen Reihung unterliegen. Den jeweiligen Kategorien wurden Nummern zugeordnet, um sie in einer statistischen Analyse in SPSS einbinden zu können. Ein Auszug der Fragebogen-Daten mit den jeweils zugeordneten Nummern ist in Abb. 42 ersichtlich.

	Wurden Gebäude-Sanierungen durchgeführt?:	SPSS-NR	Lüftungsverhalten Winter	SPSS-NR	Lüftungsverhalten Sommer	SPSS-NR	Bei Sommermessung mehr gelüftet?:	SPSS-NR	Raum erdberührt?:	SPSS-NR
NOE_01	Nein	1	wenig	2	wenig	2	wenig mehr	2	Ja	2
NOE_02	Nein	1	wenig	2	viel	3	viel mehr	3	Ja	2
NOE_03	thermische Sanierung	2	viel	3	viel	3	etwa gleich	1	Ja	2
NOE_04	thermische Sanierung	2	wenig	2	wenig	2	wenig mehr	2	Nein	1
NOE_05	Nein	1	wenig	2	wenig	2	etwa gleich	1	Ja	2
NOE_06	Nein	1	wenig	2	wenig	2	wenig mehr	2	Nein	1
NOE_07	Nein	1	kaum/nie	1	kaum/nie	1	etwa gleich	1	Ja	2
NOE_08	Nein	1	wenig	2	wenig	2	wenig mehr	2	Nein	1
NOE_09	thermische Sanierung	2	wenig	2	viel	3	viel mehr	3	Ja	2
NOE_10	Nein	1	wenig	2	viel	3	viel mehr	3	Nein	1
OOE_01	Nein	1	viel	3	viel	3	etwa gleich	1	Ja	2
OOE_02	thermische Sanierung	2	kaum/nie	1	kaum/nie	1	etwa gleich	1	Ja	2
OOE_03	thermische Sanierung	2	wenig	2	wenig	2	etwa gleich	1	Ja	2
OOE_04	Nein	1	kaum/nie	1	wenig	2	wenig mehr	2	Ja	2
OOE_05	Nein	1	wenig	2	wenig	2	etwa gleich	1	Nein	1
OOE_06	Nein	1	kaum/nie	1	kaum/nie	1	etwa gleich	1	Ja	2
OOE_07	Nein	1	wenig	2	viel	3	wenig mehr	2	Ja	2
OOE_08	Nein	1	wenig	2	viel	3	wenig mehr	2	Ja	2
TIR_01	Nein	1	viel	3	viel	3	etwa gleich	1	Ja	2
TIR_02	Nein	1	wenig	2	wenig	2	wenig mehr	2	Nein	1
TIR_03	Nein	1	wenig	2	viel	3	viel mehr	3	Nein	1
FJM_01	Nein	1	wenig	2	wenig	2	etwas mehr	2	Nein	1
FJM_02	Nein	1	kaum/nie	1	kaum/nie	1	etwas mehr	2	Nein	1
FJM_03	thermische Sanierung	2	kaum/nie	1	wenig	2	viel mehr	3	Nein	1

Abb. 42: Auszug der Fragebogen-Einträge und zugeordnete Nummern

Anders als die Fragebogen-Einträge ist die IRC eine intervallskalierte Variable. Für die statistische Analyse wurde deshalb der ETA-Koeffizient berechnet. Der ETA-Koeffizient ist ein Zusammenhangsmaß, welches die Beziehung zwischen einer intervallskalierten abhängigen Variable und einer nominalen Variable beschreibt [59]. Der ETA-Koeffizient kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei ein Wert von 0 keinen Zusammenhang beschreibt. Je höher der Wert, desto stärker ist der Zusammenhang [59]. Bereits ein Wert $> 0,3$ kann als starker Zusammenhang interpretiert werden. Allerdings kann der Koeffizient nicht die Richtung des Zusammenhangs beschreiben. [60]

Für die Anwendung des ETA-Koeffizienten wurden die Datensätze in SPSS importiert und Kreuztabellen mit den intervallskalierten Variablen und den nominalen Variablen gebildet. Anschließend wurden die ETA-Koeffizienten, sowie die Signifikanzen der ETA-Koeffizienten berechnet.

Als Beispiel ist in Abb. 43 die Kreuztabelle der mittleren jährlichen IRC aller Studienhaushalte und der Angabe über die Hanglage ersichtlich. In Abb. 44 ist der berechnete ETA-Koeffizient (0,429) angeführt. Die Signifikanz (0,037) des ETA-Koeffizienten ist in SPSS anhand der Tabelle „Tests der Zwischensubjekteffekte“ ersichtlich. Andere Einträge dieser Tabelle sind für die Signifikanz des ETA-Koeffizienten nicht von Bedeutung. Da die Signifikanz $< 0,05$ ist, besteht ein signifikanter mittlerer Zusammenhang zwischen der mittleren jährlichen IRC und der Angabe der Hanglage.

Anzahl	IRC_Lang	Hanglage		Gesamt
		Nein	Ja	
82,00		1	0	1
99,00		1	0	1
110,00		1	0	1
122,00		2	0	2
125,00		0	1	1
151,00		0	1	1
168,00		1	0	1
174,00		1	0	1
201,00		1	0	1
209,00		1	0	1
211,00		0	1	1
252,00		1	0	1
365,00		0	1	1
374,00		0	1	1
401,00		1	0	1
405,00		0	1	1
418,00		1	0	1
434,00		0	1	1
451,00		0	1	1
570,00		1	0	1
901,00		0	1	1
1597,00		0	1	1
2419,00		0	1	1
Gesamt		13	11	24

Abb. 43: Kreuztabelle der mittleren jährlichen IRC und der Hanglage

Nominal bezüglich Intervall	Eta	IRC_Lang abhängig	Wert
		Hanglage abhängig	,429
			1,000

Abhängige Variable: IRC_Lang					
Quelle	Typ III Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Korrigiertes Modell	1209226,47 ^a	1	1209226,469	4,956	,037
Konstanter Term	4836530,469	1	4836530,469	19,821	<,001
Hanglage	1209226,469	1	1209226,469	4,956	,037
Fehler	5368348,490	22	244015,840		
Gesamt	11050505,0	24			
Korrigierte Gesamtvariation	6577574,958	23			

a. R-Quadrat = ,184 (korrigiertes R-Quadrat = ,147)

Abb. 44: ETA-Koeffizient und Signifikanz

4. Ergebnisse

4.1 Kurzzeitmessungen in den Studienhaushalten

Im Zeitraum zwischen Oktober 2022 und August 2023 wurden von allen Studienhaushalten Kurzzeitmessungen während der Wintermonate, als auch außerhalb der Heizsaison durchgeführt. Jede Messreihe wurde entsprechend dem gerätespezifischen Korrekturfaktor aufbereitet. Die zeitlichen Verläufe der IRC-Stundenmittelwerte wurden in Diagramme grafisch dargestellt, wie es anhand des Beispiels der Winter-KZM NOE_03_W in Abb. 45 ersichtlich ist. In der Grafik ist zu sehen, dass die IRC starken tageszeitlichen Fluktuationen unterliegen kann. In diesem konkreten Beispiel wurden im Zeitraum von drei Wochen IRC-Stundenmittelwerte zwischen 42 Bq/m^3 und 2588 Bq/m^3 gemessen. Für jede KZM wurde der Mittelwert der IRC-Stundenmittelwerte gebildet und ebenfalls in die Diagramme eingetragen. Der Mittelwert über den Zeitraum der NOE_03_W-KZM lag bei 824 Bq/m^3 .

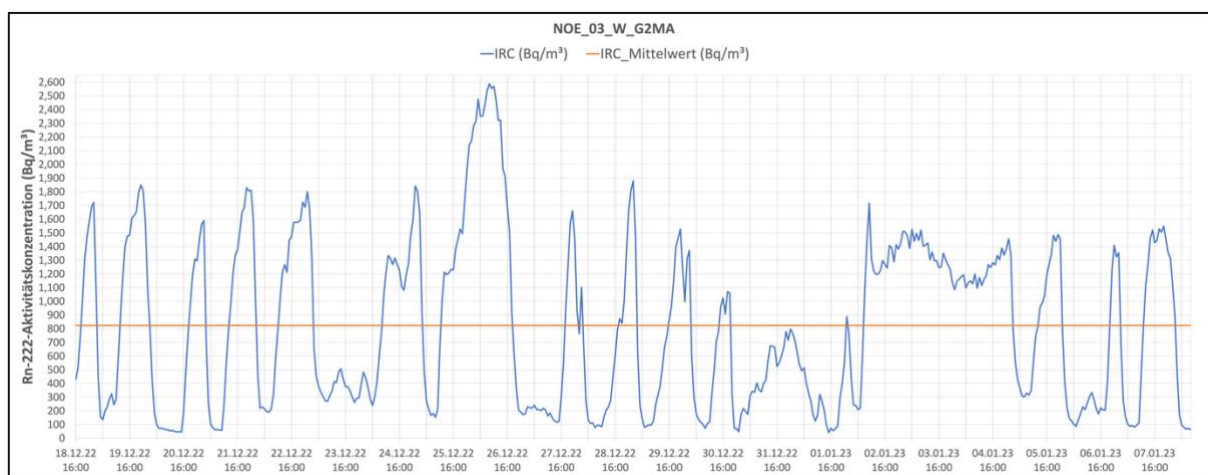


Abb. 45: NOE_03 IRC-Stundenmittelwerte und IRC-Mittelwert über 21 Tage während der Heizsaison

In Tab. 9 bis Tab. 12 sind die Mittelwerte der IRC-Stundenmittelwerte der Winter-Kurzzeitmessungen und die der Sommer-Kurzzeitmessungen aller Studienstandorte zusammengefasst. In den Ergebnissen sind auch die verwendeten aktiven Messgeräte, die Radonpotentiale bei den jeweiligen Probemessungen, sowie die genauen Messzeiträume angeführt. Mit Ausnahme des Studienhaushaltes in Oberolberndorf (FJM_02) konnte die Mindestdauer der jeweiligen KZM von drei Wochen eingehalten werden. Bei FJM_02 dauerte die Winter-KZM 14 Tage, die Dauer der Sommer-KZM betrug 16 Tage.

Tab. 9: Kurzzeitmessungen im südlichen Niederösterreich

NR	Südliches Niederösterreich			Messungen während der Heizsaison			Messungen nach der Heizsaison		
	ORT	Messgerät	Potential (Bq/m ³) (Probemessung)	Beginn	Ende	IRC Mittelwert (Bq/m ³)	Beginn	Ende	IRC Mittelwert (Bq/m ³)
NOE_01	TERNITZ	G4SL	600	08.11.22	29.11.22	313 ± 11	19.06.23	18.07.23	166 ± 6
NOE_02	TERNITZ	R2BEV	1500	10.11.22	08.12.22	1371 ± 73	20.06.23	18.07.23	212 ± 12
NOE_03	GRIMMENSTEIN	G2MA	1600	18.12.22	08.01.23	824 ± 28	10.03.23	06.05.23	607 ± 20
NOE_04	GRIMMENSTEIN	G4SL	300	18.12.22	08.01.23	145 ± 5	07.04.23	04.05.23	137 ± 5
NOE_05	FEISTRITZ/WECHSEL	R2BEV	700	18.12.22	08.01.23	2889 ± 154	07.04.23	06.05.23	2835 ± 150
NOE_06	LICHTENEGG	G4SL	700	08.01.23	30.01.23	659 ± 22	06.05.23	19.06.23	235 ± 8
NOE_07	GLOGGNITZ	G2MA	900	08.01.23	29.01.23	722 ± 24	06.05.23	29.05.23	391 ± 13
NOE_08	GLOGGNITZ	R2BEV	300	08.01.23	29.01.23	220 ± 12	06.05.23	28.05.23	174 ± 10
NOE_09	NEUNKIRCHEN	G2MA	600	30.01.23	27.02.23	382 ± 13	29.05.23	20.06.23	83 ± 3
NOE_10	NEUNKIRCHEN	R2BEV	600	29.01.23	27.02.23	519 ± 28	29.05.23	20.06.23	96 ± 5

Tab. 10: Kurzzeitmessungen in Oberösterreich

NR	Oberösterreich			Messungen während der Heizsaison			Messungen nach der Heizsaison		
	ORT	Messgerät	Potential (Bq/m ³) (Probemessung)	Beginn	Ende	IRC Mittelwert (Bq/m ³)	Beginn	Ende	IRC Mittelwert (Bq/m ³)
OOE_01	BAD LEONFELDEN	E2MA	300	18.11.22	10.12.22	535 ± 45	23.03.23	15.04.23	580 ± 49
OOE_02	BAD LEONFELDEN	E1MA	350	05.01.23	26.01.23	165 ± 16	23.03.23	15.04.23	179 ± 17
OOE_03	BAD LEONFELDEN	E4MA	1500	05.01.23	26.01.23	732 ± 62	23.03.23	15.04.23	516 ± 44
OOE_04	BAD LEONFELDEN	E2MA	500	05.01.23	26.01.23	2371 ± 190	21.05.23	18.06.23	727 ± 60
OOE_05	BAD LEONFELDEN	G4SL/E4MA	600	08.02.23	01.03.23	480 ± 16	21.05.23	18.06.23	366 ± 32
OOE_06	OTTENSCHLAG	E1MA	400	08.02.23	01.03.23	716 ± 61	15.04.23	17.06.23	494 ± 39
OOE_07	HAIBACH	E2MA	300	08.02.23	01.03.23	134 ± 13	15.04.23	21.05.23	173 ± 15
OOE_08	REICHENAU	E4MA	300	08.02.23	01.03.23	417 ± 37	15.04.23	21.05.23	146 ± 13

Tab. 11: Kurzzeitmessungen in Tirol

NR	Tirol			Messungen während der Heizsaison			Messungen nach der Heizsaison		
	ORT	Messgerät	Potential (Bq/m ³) (Probemessung)	Beginn	Ende	IRC Mittelwert (Bq/m ³)	Beginn	Ende	IRC Mittelwert (Bq/m ³)
TIR_01	FLIRSCH	G3SL	400	26.10.22	15.11.22	445 ± 15	02.05.23	26.05.23	165 ± 6
TIR_02	UMHAUSEN	G3SL	300	15.11.22	07.12.22	365 ± 12	14.06.23	13.07.23	43 ± 2
TIR_03	ZAMS	G3SL	300	27.12.22	23.01.23	238 ± 08	17.07.23	13.08.23	82 ± 3

Tab. 12: Kurzzeitmessungen in Wien und Umgebung

NR	Wien und Umgebung			Messungen während der Heizsaison			Messungen nach der Heizsaison		
	ORT	Messgerät	Potential (Bq/m ³) (Probemessung)	Beginn	Ende	IRC Mittelwert (Bq/m ³)	Beginn	Ende	IRC Mittelwert (Bq/m ³)
FJM_01	SIMMERING	R1FJM	200	16.12.22	13.01.23	129 ± 7	13.07.23	01.09.23	68 ± 4
FJM_02	OBEROLBERNDORF	R1FJM	100	15.01.23	29.01.23	106 ± 6 ¹⁾	26.05.23	11.06.23	72 ± 4 ²⁾
FJM_03	EBENTHAL	R1FJM	100	31.01.23	21.02.23	107 ± 6	20.06.23	12.07.23	43 ± 3

¹⁾ 14-Tage-Messung

²⁾ 16-Tage-Messung

4.2 Langzeitmessungen in den Räumen der Kurzzeitmessungen

In Tab. 13 bis Tab. 16 sind die Ergebnisse der mittleren jährlichen IRC (Langzeitmessungen mit passiven Kernspur-Exposimetern der MA39 und SL) in den Räumen der Kurzzeitmessungen aller Studienhaushalte zusammengefasst. Bei allen Haushalten in Oberösterreich und in Tirol, sowie bei einigen Häusern im südlichen Niederösterreich wurden Exposimeter beider Institute nebeneinander platziert, um die Qualität der Langzeitmessungen zu evaluieren. In sieben Haushalten im südlichen Niederösterreich, sowie in Simmering (FJM_01) und Oberolberndorf (FJM_02) wurden parallel zur Studie kostenfrei angebotene Radonmessungen der AGES durchgeführt. Die Auswertung der AGES-Detektoren erfolgte bei Radonova Laboratories in Uppsala (Schweden). In den Tabellen sind außerdem die genauen Messzeiträume der jeweiligen Langzeitmessungen angeführt.

4.3 Gegenüberstellung der Kurzzeitmessungen mit den jeweiligen Langzeitmessungen

In Tab. 17 bis Tab. 20 sind für alle Studienhaushalte die IRC-Mittelwerte der beiden Kurzzeitmessungen (Winter- und Sommer-KZM) mit den Ergebnissen der jeweiligen Langzeitmessungen in den Räumen der KZM gegenübergestellt. Anhand der Ergebnisse ist zu sehen, dass sich die IRC-Mittelwerte zwischen Winter und Sommer-KZM eines Haushalts stark unterscheiden können. Dementsprechend können die IRC-Mittelwerte der Kurzzeitmessungen auch teils stark von den mittleren jährlichen IRC der Langzeitmessungen abweichen. Zur besseren Veranschaulichung werden im Kapitel 4.4 die Ergebnisse anhand eines relativen Überblicks dargestellt.

Tab. 13: Langzeitmessungen im südlichen Niederösterreich

Südliches Niederösterreich				MA39	SL	AGES
NR	ORT	Langzeitmessung begonnen am:	Langzeitmessung beendet am:	IRC Mittelwert (Bq/m ³) im Raum der Kurzzeitmessungen		
NOE_01	TERNITZ	19.12.22	20.06.23	-	252 ± 9	320 ± 40
NOE_02	TERNITZ	19.12.22	20.06.23	888 ± 23	913 ± 34	-
NOE_03	GRIMMENSTEIN	18.12.22	19.06.23	570 ± 13	-	641 ± 96
NOE_04	GRIMMENSTEIN	18.12.22	19.06.23	122 ± 5	-	140 ± 18
NOE_05	FEISTRITZ/WECHSEL	18.12.22	19.06.23	2504 ± 66	2333 ± 113	-
NOE_06	LICHTENEGG	29.12.22	19.06.23	-	374 ± 16	463 ± 58 ³⁾
NOE_07	GLOGGNITZ	19.12.22	20.06.23	438 ± 10	430 ± 14	515 ± 78 ⁴⁾
NOE_08	GLOGGNITZ	18.12.22	20.06.23	168 ± 5	-	216 ± 28
NOE_09	NEUNKIRCHEN	19.12.22	20.06.23	193 ± 5	208 ± 8	-
NOE_10	NEUNKIRCHEN	19.12.22	20.06.23	-	418 ± 15	488 ± 72

³⁾ Beginn der AGES-Langzeitmessung am 16.12.22

⁴⁾ Beginn der AGES-Langzeitmessung am 13.12.22

Tab. 14: Langzeitmessungen in Oberösterreich

Oberösterreich				MA39	SL
NR	ORT	Langzeitmessung begonnen am:	Langzeitmessung beendet am:	IRC Mittelwert (Bq/m ³) im Raum der Kurzzeitmessungen	
OOE_01	BAD LEONFELDEN	05.01.23	18.06.23	374 ± 9	428 ± 14
OOE_02	BAD LEONFELDEN	05.01.23	18.06.23	118 ± 3	125 ± 6
OOE_03	BAD LEONFELDEN	05.01.23	18.06.23	354 ± 10	376 ± 13
OOE_04	BAD LEONFELDEN	05.01.23	18.06.23	1595 ± 38	1599 ± 62
OOE_05	BAD LEONFELDEN	05.01.23	18.06.23	388 ± 11	421 ± 16
OOE_06	OTTENSCHLAG	06.01.23	17.06.23	450 ± 11	452 ± 17
OOE_07	HAIBACH	06.01.23	18.06.23	124 ± 4	125 ± 7
OOE_08	REICHENAU	06.01.23	18.06.23	142 ± 4	159 ± 6

Tab. 15: Langzeitmessungen in Tirol

Tirol				MA39	SL
NR	ORT	Langzeitmessung begonnen am:	Langzeitmessung beendet am:	IRC Mittelwert (Bq/m ³) im Raum der Kurzzeitmessungen	
TIR_01	FLIRSCH	29.12.22	16.06.23	209 ± 6	213 ± 9
TIR_02	UMHAUSEN	26.12.22	16.06.23	212 ± 7	206 ± 10
TIR_03	ZAMS	27.12.22	16.06.23	168 ± 4	179 ± 10

Tab. 16: Langzeitmessungen in Wien und Umgebung

Wien und Umgebung				MA39	SL	AGES
NR	ORT	Langzeitmessung begonnen am:	Langzeitmessung beendet am:	IRC Mittelwert (Bq/m ³) im Raum der Kurzzeitmessungen		
FJM_01	SIMMERING	16.12.22	21.06.23	-	99 ± 5	109 ± 14
FJM_02	OBEROLBERNDORF	07.01.23	11.06.23	-	110 ± 6	103 ± 16 ⁵⁾
FJM_03	EBENTHAL	31.01.23	18.06.23	82 ± 3	-	-

⁵⁾ Ende der AGES-Langzeitmessung am 12.07.23

Tab. 17: Gegenüberstellung Kurzzeit- und Langzeitmessungen im südlichen NÖ

Südliches Niederösterreich	1. Kurzzeitmessung	2. Kurzzeitmessung	Langzeitmessungen im Raum der Kurzzeitmessung		
	während der Heizsaison	nach der Heizsaison	MA39	SL	AGES
IRC Mittelwert (Bq/m³)					
NOE_01	313 ± 11	166 ± 6	-	252 ± 9	320 ± 40
NOE_02	1371 ± 73	212 ± 12	888 ± 23	913 ± 34	-
NOE_03	824 ± 28	607 ± 20	570 ± 13	-	641 ± 96
NOE_04	145 ± 5	137 ± 5	122 ± 5	-	140 ± 18
NOE_05	2889 ± 154	2835 ± 150	2504 ± 66	2333 ± 113	-
NOE_06	659 ± 22	235 ± 8	-	374 ± 16	463 ± 58
NOE_07	722 ± 24	391 ± 13	438 ± 10	430 ± 14	515 ± 78
NOE_08	220 ± 12	174 ± 10	168 ± 5	-	216 ± 28
NOE_09	382 ± 13	83 ± 3	193 ± 5	208 ± 8	-
NOE_10	519 ± 28	96 ± 5	-	418 ± 15	488 ± 72

Tab. 18: Gegenüberstellung Kurzzeit- und Langzeitmessungen in Oberösterreich

Oberösterreich	1. Kurzzeitmessung	2. Kurzzeitmessung	Langzeitmessungen im Raum der Kurzzeitmessung	
	während der Heizsaison	nach der Heizsaison	MA39	SL
IRC Mittelwert (Bq/m³)				
OOE_01	535 ± 45	580 ± 49	374 ± 9	428 ± 14
OOE_02	165 ± 16	179 ± 17	118 ± 3	125 ± 6
OOE_03	732 ± 62	516 ± 44	354 ± 10	376 ± 13
OOE_04	2371 ± 190	727 ± 60	1595 ± 38	1599 ± 62
OOE_05	480 ± 16	366 ± 32	388 ± 11	421 ± 16
OOE_06	716 ± 61	494 ± 39	450 ± 11	452 ± 17
OOE_07	134 ± 13	173 ± 15	124 ± 4	125 ± 7
OOE_08	417 ± 37	146 ± 13	142 ± 4	159 ± 6

Tab. 19: Gegenüberstellung Kurzzeit- und Langzeitmessungen in Tirol

Tirol	1. Kurzzeitmessung	2. Kurzzeitmessung	Langzeitmessungen im Raum der Kurzzeitmessung	
	während der Heizsaison	nach der Heizsaison	MA39	SL
IRC Mittelwert (Bq/m³)				
TIR_01	445 ± 15	165 ± 6	209 ± 6	213 ± 9
TIR_02	365 ± 12	43 ± 2	212 ± 7	206 ± 10
TIR_03	238 ± 08	82 ± 3	168 ± 4	179 ± 10

Tab. 20: Gegenüberstellung Kurzzeit- und Langzeitmessungen in Wien und Umgebung

Wien und Umgebung	1. Kurzzeitmessung	2. Kurzzeitmessung	Langzeitmessungen im Raum der Kurzzeitmessung		
	während der Heizsaison	nach der Heizsaison	MA39	SL	AGES
IRC Mittelwert (Bq/m³)					
FJM_01	129 ± 7	68 ± 4	-	99 ± 5	109 ± 14
FJM_02	106 ± 6	72 ± 4	-	110 ± 6	103 ± 16
FJM_03	107 ± 6	43 ± 3	82 ± 3	-	-

4.4 Relativer Überblick der Messergebnisse

Durch Einführung der Faktoren in den Formeln (15), (16) und (17) wird ein zusammenfassender relativer Überblick über die jeweiligen Messergebnisse eines Messstandortes erzielt.

Der Faktor FWS gibt das Verhältnis des Mittelwerts der Winter-KZM zum Mittelwert der KZM nach der Heizsaison an. Der Faktor FW entspricht dem Quotienten des Mittelwerts der Winter-KZM und dem Ergebnis der LZM. FS gibt das Verhältnis des Mittelwerts der Sommer-KZM zum Ergebnis der LZM eines Messstandortes an. Ist der Wert der Faktoren FW beziehungsweise FS größer als Eins, dann ist der Mittelwert der KZM höher als das Ergebnis der jeweiligen LZM. Ein Wert kleiner Eins bedeutet, dass der Mittelwert der KZM niedriger ist, als das Ergebnis der jeweiligen LZM. Wurden in einem Raum die Kernspur-Exposimeter beider Institute (MA39 und Seibersdorf Laboratories) platziert, entspricht der Wert der IRC_{lang} dem Mittelwert der beiden Langzeitergebnisse. Die Ergebnisse der AGES-Radonmessungen wurden hierbei nicht berücksichtigt.

$$FWS = IRC_{k_Winter}/IRC_{k_Sommer} \quad (15)$$

$$FW = IRC_{k_Winter}/IRC_{lang} \quad (16)$$

$$FS = IRC_{k_Sommer}/IRC_{lang} \quad (17)$$

wobei:

IRC_{k_Winter} Mittelwert der Winter-KZM (Bq/m^3)

IRC_{k_Sommer} Mittelwert der Sommer-KZM (Bq/m^3)

IRC_{lang} Mittelwert der Langzeitmessung (Bq/m^3)

In Tab. 21 bis Tab. 24 sind die Ergebnisse der Faktoren FWS, FW und FS der jeweiligen Messstandorte aller Studienhaushalte zusammengefasst. Die Unsicherheiten der Faktoren wurden mithilfe der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung berechnet (Formeln 18, 19 und 20).

$$u_{FWS} = \sqrt{\left(\frac{1}{IRC_{k_Sommer}}\right)^2 \cdot u_{IRC_{k_Winter}}^2 + \left(\frac{IRC_{k_Winter}}{IRC_{k_Sommer}^2}\right)^2 \cdot u_{IRC_{k_Sommer}}^2} \quad (18)$$

$$u_{FW} = \sqrt{\left(\frac{1}{IRC_{lang}}\right)^2 \cdot u_{IRC_{k_Winter}}^2 + \left(\frac{IRC_{k_Winter}}{IRC_{lang}^2}\right)^2 \cdot u_{IRC_{lang}}^2} \quad (19)$$

$$u_{FS} = \sqrt{\left(\frac{1}{IRC_{lang}}\right)^2 \cdot u_{IRC_{k_sommer}}^2 + \left(\frac{IRC_{k_Sommer}}{IRC_{lang}^2}\right)^2 \cdot u_{IRC_{lang}}^2} \quad (20)$$

Tab. 21: Relativer Überblick der Messergebnisse im südlichen Niederösterreich

Südliches Niederösterreich	ORT	FWS	FW	FS
NOE_01	TERNITZ	1.89 ± 0.10	1.24 ± 0.06	0.66 ± 0.03
NOE_02	TERNITZ	6.47 ± 0.50	1.52 ± 0.10	0.24 ± 0.02
NOE_03	GRIMMENSTEIN	1.36 ± 0.06	1.45 ± 0.06	1.06 ± 0.04
NOE_04	GRIMMENSTEIN	1.06 ± 0.05	1.19 ± 0.06	1.12 ± 0.06
NOE_05	FEISTRITZ/WECHSEL	1.02 ± 0.08	1.19 ± 0.08	1.17 ± 0.08
NOE_06	LICHTENEGG	2.80 ± 0.13	1.76 ± 0.10	0.63 ± 0.03
NOE_07	GLOGGNITZ	1.85 ± 0.09	1.66 ± 0.08	0.90 ± 0.04
NOE_08	GLOGGNITZ	1.26 ± 0.10	1.31 ± 0.08	1.04 ± 0.07
NOE_09	NEUNKIRCHEN	4.60 ± 0.23	1.91 ± 0.10	0.41 ± 0.02
NOE_10	NEUNKIRCHEN	5.41 ± 0.41	1.24 ± 0.08	0.23 ± 0.01

Tab. 22: Relativer Überblick der Messergebnisse in Oberösterreich

Oberösterreich	ORT	FWS	FW	FS
OOE_01	BAD LEONFELDEN	0.92 ± 0.11	1.33 ± 0.12	1.45 ± 0.13
OOE_02	BAD LEONFELDEN	0.92 ± 0.13	1.36 ± 0.15	1.47 ± 0.16
OOE_03	BAD LEONFELDEN	1.42 ± 0.17	2.01 ± 0.18	1.41 ± 0.13
OOE_04	BAD LEONFELDEN	3.26 ± 0.38	1.48 ± 0.13	0.46 ± 0.04
OOE_05	BAD LEONFELDEN	1.31 ± 0.12	1.19 ± 0.06	0.90 ± 0.09
OOE_06	OTTENSCHLAG	1.45 ± 0.17	1.59 ± 0.15	1.10 ± 0.10
OOE_07	HAIBACH	0.77 ± 0.10	1.08 ± 0.12	1.39 ± 0.14
OOE_08	REICHENAU	2.86 ± 0.36	2.77 ± 0.27	0.97 ± 0.09

Tab. 23: Relativer Überblick der Messergebnisse in Tirol

Tirol	ORT	FWS	FW	FS
TIR_01	FLIRSCH	2.70 ± 0.13	2.11 ± 0.11	0.78 ± 0.04
TIR_02	UMHAUSEN	8.49 ± 0.48	1.75 ± 0.10	0.21 ± 0.01
TIR_03	ZAMS	2.90 ± 0.14	1.37 ± 0.09	0.47 ± 0.03

Tab. 24: Relativer Überblick der Messergebnisse in Wien und Umgebung

Wien und Umgebung	ORT	FWS	FW	FS
FJM_01	SIMMERING	1.90 ± 0.15	1.30 ± 0.10	0.69 ± 0.05
FJM_02	OBEROLBERNDORF	1.47 ± 0.12	0.96 ± 0.08	0.65 ± 0.05
FJM_03	EBENTHAL	2.49 ± 0.22	1.3 ± 0.09	0.52 ± 0.04

4.5 Statistische Parameter

4.5.1 Statistische Parameter der Kurzzeit- und Langzeitmessungen

In der Tab. 25 sind statistische Parameter zu den Kurzzeit- und Langzeitmessungen in den Räumen der KZM aller 24 Studienhaushalte zusammengefasst. Es sind die Mittelwerte, die Standardabweichungen, Minima und Maxima, sowie das 25 %-, 50 %- und 75 % - Perzentil angeführt.

Tab. 25: Statistische Parameter der Kurzzeit- und Langzeitmessungen

	IRC_Lang	IRC_W	IRC_S
n	24	24	24
Mittelwert (Bq/m ³)	432	624	358
Std.-Abweichung (Bq/m ³)	535	689	564
Minimum (Bq/m ³)	82	106	43
Maximum (Bq/m ³)	2419	2889	2835
Perzentile	25	132	86
	50	232	174
	75	430	721

4.5.2 Statistische Parameter der relativen Faktoren

In der Tab. 26 sind statistische Parameter zu den relativen Faktoren (FWS, FW und FS) aller 24 Studienhaushalte zusammengefasst. Es sind die Mittelwerte, die Standardabweichungen, Minima und Maxima, sowie das 25 %-, 50 %- und 75 % - Perzentil angeführt.

Tab. 26: Statistische Parameter der relativen Faktoren

	FWS	FW	FS	
n	24	24	24	
Mittelwert	2.52	1.50	0.83	
Mittelwert-Uns.	± 0.05	± 0.02	± 0.02	
Std.-Abweichung	1.94	0.40	0.40	
Minimum	0.77	0.96	0.21	
Maximum	8.49	2.77	1.47	
Perzentile	25	1.27	1.24	0.48
	50	1.87	1.37	0.84
	75	2.89	1.73	1.12

In Abb. 46 und Abb. 47 sind die Häufigkeitsverteilungen der Faktoren „FW“ und „FS“ aller 24 Studienhaushalte abgebildet.

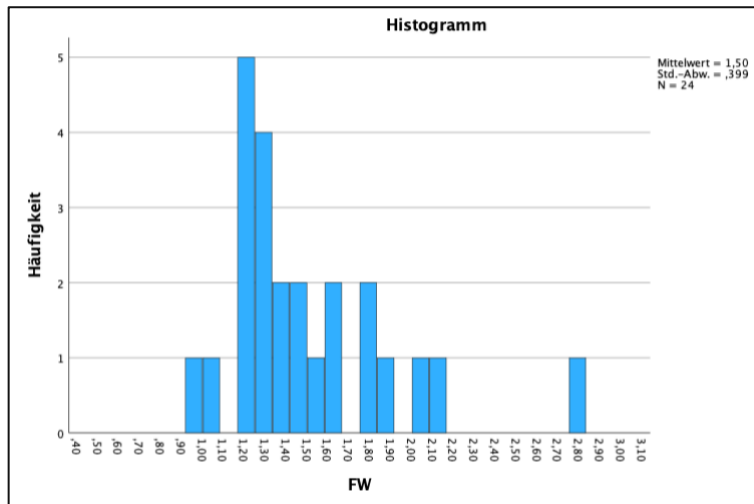


Abb. 46: Häufigkeitsverteilung des Faktors FW aller 24 Studienhaushalte

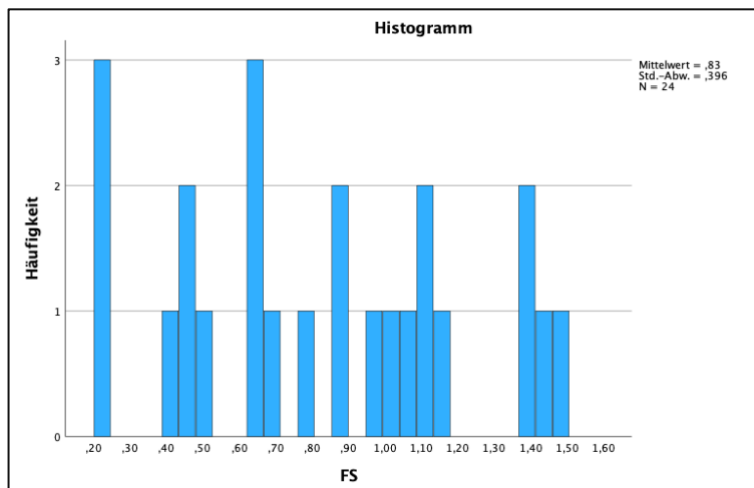


Abb. 47: Häufigkeitsverteilung des Faktors FS aller 24 Studienhaushalte

In Abb. 48 sind die Boxplots der Faktoren „FW“ und „FS“ aller 24 Studienhaushalte abgebildet.

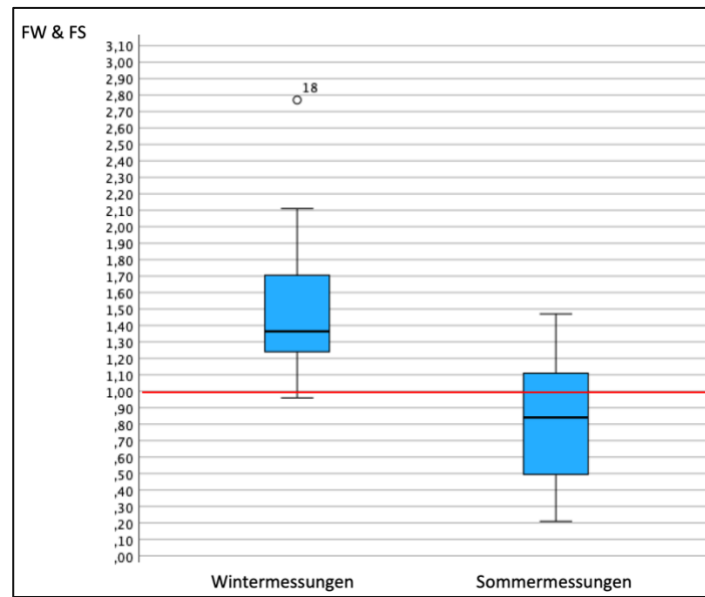


Abb. 48: Boxplots der Faktoren FW und FS

4.6 Einfluss der Geologie und Bodenbeschaffenheit auf die IRC

In der Tab. 27 ist eine Kreuztabelle ersichtlich, welche die Beziehung zwischen den Ergebnissen der Langzeitmessungen und den „Radongebieten“ zeigt, in welchen sich die jeweiligen Studienhaushalte befinden. Elf Häuser stehen in Radonschutzgebieten, zwölf Studienhaushalte in Radonvorsorgegebieten und ein Haus (FJM_01) befindet sich in Wien, welches kein Radonvorsorgegebiet ist.

Tab. 27: Kreuztabelle der Langzeitmessungen und der Radongebiete

IRC_Lang * Radongebiet Kreuztabelle					
Anzahl	IRC_Lang	Radongebiet			Gesamt
		Rn-Schutzgebiet	Rn-Vorsorgegebiet	kein	
	82,00	0	1	0	1
	99,00	0	0	1	1
	110,00	0	1	0	1
	122,00	1	1	0	2
	125,00	1	0	0	1
	151,00	1	0	0	1
	168,00	0	1	0	1
	174,00	0	1	0	1
	201,00	0	1	0	1
	209,00	1	0	0	1
	211,00	1	0	0	1
	252,00	0	1	0	1
	365,00	1	0	0	1
	374,00	1	0	0	1
	401,00	1	0	0	1
	405,00	1	0	0	1
	418,00	0	1	0	1
	434,00	0	1	0	1
	451,00	1	0	0	1
	570,00	0	1	0	1
	901,00	0	1	0	1
	1597,00	1	0	0	1
	2419,00	0	1	0	1
Gesamt		11	12	1	24

In der Tab. 28 ist eine Kreuztabelle zu sehen, welche die Beziehung zwischen den Ergebnissen der Langzeitmessungen und der Lage der Häuser zeigt. 13 Studienhaushalte befinden sich in einer Hanglage, elf Häuser stehen auf einem ebenen Grundstück.

In Abb. 49 ist der berechnete ETA-Koeffizient (0,429) angeführt. Die Signifikanz (0,037) des ETA-Koeffizienten ist in SPSS anhand der Tabelle „Tests der Zwischensubjekteffekte“ ersichtlich. Andere Einträge dieser Tabelle sind für die Signifikanz des ETA-Koeffizienten nicht von Bedeutung. Auf Basis der beiden Werte besteht eine mittlere signifikante Korrelation zwischen den Ergebnissen der Langzeitmessungen und der Lage der Häuser.

Tab. 28: Kreuztabelle der Langzeitmessungen und der Hanglage

Anzahl	Hanglage		Gesamt	
	Nein	Ja		
IRC_Lang	82,00	1	0	1
	99,00	1	0	1
	110,00	1	0	1
	122,00	2	0	2
	125,00	0	1	1
	151,00	0	1	1
	168,00	1	0	1
	174,00	1	0	1
	201,00	1	0	1
	209,00	1	0	1
	211,00	0	1	1
	252,00	1	0	1
	365,00	0	1	1
	374,00	0	1	1
	401,00	1	0	1
	405,00	0	1	1
	418,00	1	0	1
	434,00	0	1	1
	451,00	0	1	1
	570,00	1	0	1
	901,00	0	1	1
	1597,00	0	1	1
	2419,00	0	1	1
Gesamt		13	11	24

		Wert	
Nominal bezüglich Intervall	Eta	IRC_Lang abhängig	,429
		Hanglage abhängig	1,000

Abhängige Variable: IRC_Lang					
Quelle	Typ III Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Korrigiertes Modell	1209226,47 ^a	1	1209226,469	4,956	,037
Konstanter Term	4836530,469	1	4836530,469	19,821	<,001
Hanglage	1209226,469	1	1209226,469	4,956	,037
Fehler	5368348,490	22	244015,840		
Gesamt	11050505,0	24			
Korrigierte Gesamtvariation	6577574,958	23			

a. R-Quadrat = ,184 (korrigiertes R-Quadrat = ,147)

Abb. 49: ETA-Koeffizient und Signifikanz

4.7 Einfluss der Bauweise und des Gebäudezustandes auf die IRC

4.7.1 Erhebungen in den Studienhaushalten

In den Tab. 29 bis Tab. 32 sind wesentliche Erhebungen zur Bauweise und zum Gebäudezustand aller Studienhaushalte einzusehen. Zu den Daten zählt das Alter des Gebäudes (Fertigstellung des Hauses), die Anwesenheit eines Kellers, der Fundamenttyp, die Dichte der Fenster, sowie das Vorhandensein von Gebäudesanierungen. In den Tabellen sind zusätzlich die Ergebnisse der LZM in den Räumen der KZM angeführt.

Tab. 29: Erhebungen zur Bauweise und dem Gebäudezustand (1/4)

Nr	Fertigstellung des Hauses:	Unterkellerung des Hauses:	Fundamenttyp	Dichte der Fenster:	Wurden Gebäude-Sanierungen durchgeführt?:	IRC-Mittelwert (Bq/m ³)
NOE_01	1971-2000	Teilweise	Fundamentplatte teilweise	Wenig dicht	Nein	252 ± 9
NOE_02	1971-2000	Teilweise	Streifenfundament	Dicht	Nein	901 ± 34
NOE_03	Vor 1919	Teilweise	Kein Fundament	Dicht	thermische Sanierung	570 ± 13
NOE_04	1971-2000	Ganz	Fundamentplatte durchgehend	Sehr dicht	thermische Sanierung	122 ± 5
NOE_05	1971-2000	Ganz	Fundamentplatte durchgehend	Dicht	Nein	2419 ± 113
NOE_06	1971-2000	Teilweise	Fundamentplatte durchgehend	Dicht	Nein	374 ± 16
NOE_07	1971-2000	Ganz	Streifenfundament	Dicht	Nein	434 ± 14
NOE_08	Nach 2000	Ganz	Fundamentplatte außer Erdkeller	Sehr dicht	Nein	168 ± 5
NOE_09	Vor 1919	Teilweise	Kein Fundament	Dicht	thermische Sanierung	201 ± 8
NOE_10	Vor 1919	Teilweise	Kein Fundament	Dicht	Nein	418 ± 15

Tab. 30: Erhebungen zur Bauweise und dem Gebäudezustand (2/4)

Nr	Fertigstellung des Hauses:	Unterkellerung des Hauses:	Fundamenttyp	Dichte der Fenster:	Wurden Gebäude-Sanierungen durchgeführt?:	IRC-Mittelwert (Bq/m ³)
OOE_01	Nach 2000	Teilweise	Unbekannt	Dicht	Nein	401 ± 14
OOE_02	1971-2000	Teilweise	Fundamentplatte durchgehend	Dicht	thermische Sanierung	122 ± 6
OOE_03	1971-2000	Ganz	Fundamentplatte durchgehend	Sehr dicht	thermische Sanierung	365 ± 13
OOE_04	1971-2000	Nicht	Fundamentplatte durchgehend	Dicht	Nein	1597 ± 62
OOE_05	Nach 2000	Ganz	Fundamentplatte durchgehend	Dicht	Nein	405 ± 16
OOE_06	1945-1970	Teilweise	Unbekannt	Dicht	Nein	451 ± 17
OOE_07	1971-2000	Nicht	Fundamentplatte durchgehend	Dicht	Nein	125 ± 7
OOE_08	Nach 2000	Teilweise	Fundamentplatte durchgehend	Sehr dicht	Nein	151 ± 6

Tab. 31: Erhebungen zur Bauweise und dem Gebäudezustand (3/4)

Nr	Fertigstellung des Hauses:	Unterkellerung des Hauses:	Fundamenttyp	Dichte der Fenster:	Wurden Gebäude-Sanierungen durchgeführt?:	IRC-Mittelwert (Bq/m ³)
TIR_01	1971-2000	Ganz	Streifenfundament	Dicht	Nein	211 ± 9
TIR_02	1971-2000	Teilweise	Fundamentplatte durchgehend	Dicht	Nein	209 ± 10
TIR_03	Nach 2000	Ganz	Fundamentplatte durchgehend	Sehr dicht	Nein	174 ± 10

Tab. 32: Erhebungen zur Bauweise und dem Gebäudezustand (4/4)

Nr	Fertigstellung des Hauses:	Unterkellerung des Hauses:	Fundamenttyp	Dichte der Fenster:	Wurden Gebäude-Sanierungen durchgeführt?:	IRC-Mittelwert (Bq/m ³)
FJM_01	1971-2000	Ganz	Streifenfundament	Sehr dicht	Nein	99 ± 5
FJM_02	Nach 2000	Ganz	Fundamentplatte durchgehend	Sehr dicht	Nein	110 ± 6
FJM_03	1971-2000	Ganz	Fundamentplatte durchgehend	Sehr dicht	thermische Sanierung	83 ± 3

4.7.2 IRC-Ergebnisse und Eigenschaften aller Räume der Studie

In Tab. 33 bis Tab. 38 sind die Ergebnisse der LZM in allen Räumen der Studienhaushalte ersichtlich. Es sind die Bezeichnungen der Räume, die Stockwerke, sowie Angaben zur Erdberührung der Räume angeführt, in welchen die Expositometer platziert wurden. In Räumen in denen Expositometer beider Institute (MA39 und SL) platziert wurden, entspricht der Wert des IRC-Mittelwerts dem Mittelwert der beiden Langzeitergebnisse.

Tab. 33: Alle Langzeitmessungen im südlichen NÖ (1/2)

Aufstellungsort	Raum-Nr	Bezeichnung	Stockwerk	Erdberührt	IRC-Mittelwert (Bq/m ³)
NOE_01	1	Esszimmer	Erdgeschoss	ja	252 ± 9
NOE_01	2	Schlafzimmer	1. Stock	nein	111 ± 6
NOE_01	3	Wohnzimmer	Erdgeschoss	nein	129 ± 6
NOE_01	4	Schlafzimmer	Erdgeschoss	nein	78 ± 4
NOE_01	5	Schlafzimmer	1. Stock	nein	109 ± 6
NOE_01	6	Büro	Erdgeschoss	ja	237 ± 15
NOE_01	7	Sonstiges	Kellergeschoss	ja	106 ± 5
NOE_02	1	Wohnzimmer	Erdgeschoss	ja	901 ± 34
NOE_02	2	Vorraum	Erdgeschoss	nein	381 ± 10
NOE_02	3	Schlafzimmer	1. Stock	nein	76 ± 3
NOE_03	1	Schlafzimmer	Erdgeschoss	ja	570 ± 13
NOE_03	2	Wohnzimmer	Erdgeschoss	ja	510 ± 13
NOE_03	3	Wohnzimmer	1. Stock	nein	159 ± 6
NOE_04	1	Wohnzimmer	Erdgeschoss	nein	122 ± 5
NOE_04	2	Wintergarten	Erdgeschoss	nein	102 ± 6
NOE_04	3	Schlafzimmer	1. Stock	nein	137 ± 5
NOE_04	4	Schlafzimmer	1. Stock	nein	108 ± 4
NOE_05	1	Wohnzimmer	Kellergeschoss	ja	2419 ± 113
NOE_05	2	Wohnzimmer	Kellergeschoss	ja	1968 ± 55
NOE_05	3	Schlafzimmer	Erdgeschoss	nein	1915 ± 51

Tab. 34: Alle Langzeitmessungen im südlichen NÖ (2/2)

Aufstellungsort	Raum-Nr	Bezeichnung	Stockwerk	Erdberührt	IRC-Mittelwert (Bq/m ³)
NOE_06	1	Wohnzimmer	Erdgeschoss	nein	374 ± 16
NOE_06	2	Schlafzimmer	Erdgeschoss	nein	259 ± 13
NOE_06	3	Wohnküche	Erdgeschoss	nein	402 ± 15
NOE_06	4	Fitnessraum	Kellergeschoss	ja	935 ± 31
NOE_07	1	Schlafzimmer	Kellergeschoss	ja	434 ± 14
NOE_07	2	Wohnzimmer	Erdgeschoss	nein	57 ± 2
NOE_08	1	Wohnzimmer	Erdgeschoss	nein	168 ± 5
NOE_08	2	Schlafzimmer	1. Stock	nein	176 ± 5
NOE_08	3	Waschküche	Kellergeschoss	ja	243 ± 6
NOE_08	4	Erdkeller	Kellergeschoss	ja	505 ± 12
NOE_09	1	Schlafzimmer	Erdgeschoss	ja	201 ± 8
NOE_09	2	Sonstiges	Erdgeschoss	ja	172 ± 7
NOE_09	3	Schlafzimmer	Erdgeschoss	nein	161 ± 7
NOE_09	4	Wohnzimmer	Erdgeschoss	nein	177 ± 7
NOE_10	1	Wohnzimmer	Erdgeschoss	nein	418 ± 15
NOE_10	2	Schlafzimmer	1. Stock	nein	225 ± 9

Tab. 35: Alle Langzeitmessungen in OÖ (1/2)

Aufstellungsort	Raum-Nr	Bezeichnung	Stockwerk	Erdberührt	IRC-Mittelwert (Bq/m ³)
OOE_01	1	Wohnzimmer	Erdgeschoss	ja	401 ± 14
OOE_02	1	Büro	Erdgeschoss	ja	122 ± 6
OOE_02	2	Sonstiges	Erdgeschoss	nein	126 ± 6
OOE_02	3	Wohnzimmer	Kellergeschoss	ja	2470 ± 64
OOE_03	1	Schlafzimmer	Erdgeschoss	ja	365 ± 13
OOE_03	2	Wohnzimmer	Erdgeschoss	nein	477 ± 12
OOE_03	3	Wohnküche	Erdgeschoss	nein	603 ± 21
OOE_04	1	Sonstiges	Erdgeschoss	ja	1597 ± 62
OOE_04	2	Schlafzimmer	1. Stock	nein	453 ± 15
OOE_04	3	Wohnzimmer	1. Stock	nein	474 ± 18

Tab. 36: Alle Langzeitmessungen in OÖ (2/2)

Aufstellungsort	Raum-Nr	Bezeichnung	Stockwerk	Erdberührt	IRC-Mittelwert (Bq/m ³)
OOE_05	1	Wohnzimmer	Erdgeschoss	nein	405 ± 16
OOE_05	2	Wäscherraum	Erdgeschoss	nein	175 ± 5
OOE_06	1	Musikraum	Kellergeschoss	ja	451 ± 17
OOE_06	2	Wohnzimmer	Kellergeschoss	ja	404 ± 9
OOE_06	3	Sonstiges	Kellergeschoss	ja	553 ± 27
OOE_07	1	Wohnzimmer	Erdgeschoss	ja	125 ± 7
OOE_07	2	Wohnzimmer	1. Stock	nein	49 ± 3
OOE_08	1	Sonstiges	Kellergeschoss	ja	151 ± 6
OOE_08	2	Sonstiges	Kellergeschoss	ja	202 ± 5
OOE_08	3	Sonstiges	Kellergeschoss	ja	60 ± 5

Tab. 37: Alle Langzeitmessungen in Tirol

Aufstellungsort	Raum-Nr	Bezeichnung	Stockwerk	Erdberührt	IRC-Mittelwert (Bq/m ³)
TIR_01	1	Sonstiges	Kellergeschoss	ja	211 ± 9
TIR_01	2	Wohnzimmer	Erdgeschoss	nein	75 ± 5
TIR_01	3	Sonstiges	Erdgeschoss	nein	130 ± 6
TIR_02	1	Wohnzimmer	Erdgeschoss	nein	209 ± 10
TIR_02	2	Sonstiges	Kellergeschoss	ja	529 ± 14
TIR_02	3	Sonstiges	Kellergeschoss	ja	384 ± 13
TIR_03	1	Wohnzimmer	Erdgeschoss	nein	174 ± 10
TIR_03	2	Schlafzimmer	1. Stock	nein	75 ± 4
TIR_03	3	Sonstiges	Kellergeschoss	ja	78 ± 5

Tab. 38: Alle Langzeitmessungen in Wien und Umgebung

Aufstellungsort	Raum-Nr	Bezeichnung	Stockwerk	Erdberührt	IRC-Mittelwert (Bq/m ³)
FJM_01	1	Büro	1.Stock	nein	99 ± 5
FJM_01	2	Schlafzimmer	1.Stock	nein	70 ± 5
FJM_01	3	Sonstiges	Keller	ja	127 ± 9
FJM_02	1	Wohnküche	Erdgeschoss	nein	110 ± 6
FJM_02	2	Schlafzimmer	Erdgeschoss	nein	110 ± 7
FJM_02	3	Sonstiges	Kellergeschoss	ja	127 ± 7
FJM_03	1	Wohnzimmer	Erdgeschoss	nein	83 ± 3
FJM_03	2	Schlafzimmer	Erdgeschoss	nein	76 ± 3
FJM_03	3	Schlafzimmer	Kellergeschoss	ja	253 ± 6

In der Tab. 39 ist eine Kreuztabelle zu sehen, welche die Beziehung der Ergebnisse aller 74 Langzeitmessungen der Studie und der Angabe zur Erdberührung des jeweiligen Raumes zeigt, in welchem die LZM durchgeführt wurde. 55,4 % der gemessenen Räume sind erdberührt, bei 44,6 % der Räume befindet sich mindestens ein Raum zwischen dem Aufstellungsort und dem Erdboden. In Abb. 50 sind der berechnete ETA-Koeffizient (0,306), sowie die Signifikanz (0,008) angeführt. Auf Basis dieser beiden Werte besteht eine mittlere signifikante Korrelation zwischen den beiden Variablen.

Tab. 39: Kreuztabelle der Langzeitmessungen und der Erdberührung des Raumes

Langzeitmessungen * Raum_erdberührt Kreuztabelle											
IRC-Lang (Bq/m ³)	Raum_erdberührt		Gesamt	IRC-Lang (Bq/m ³)	Raum_erdberührt		Gesamt	IRC-Lang (Bq/m ³)	Raum_erdberührt		Gesamt
	nein	ja			nein	ja			nein	ja	
49,00	1	0	1	159,00	1	0	1	402,00	1	0	1
57,00	1	0	1	161,00	1	0	1	404,00	0	1	1
60,00	0	1	1	168,00	1	0	1	405,00	1	0	1
70,00	1	0	1	172,00	0	1	1	418,00	1	0	1
75,00	2	0	2	174,00	1	0	1	434,00	0	1	1
76,00	2	0	2	175,00	1	0	1	451,00	0	1	1
78,00	1	1	2	176,00	1	0	1	453,00	1	0	1
83,00	1	0	1	177,00	1	0	1	474,00	1	0	1
99,00	1	0	1	201,00	0	1	1	477,00	1	0	1
102,00	1	0	1	202,00	0	1	1	505,00	0	1	1
106,00	0	1	1	209,00	1	0	1	510,00	0	1	1
108,00	1	0	1	211,00	0	1	1	529,00	0	1	1
109,00	1	0	1	225,00	1	0	1	553,00	0	1	1
110,00	2	0	2	237,00	0	1	1	570,00	0	1	1
111,00	1	0	1	243,00	0	1	1	603,00	1	0	1
122,00	1	1	2	252,00	0	1	1	901,00	0	1	1
125,00	0	1	1	253,00	0	1	1	935,00	0	1	1
126,00	1	0	1	259,00	1	0	1	1597,00	0	1	1
127,00	0	2	2	365,00	0	1	1	1915,00	1	0	1
129,00	1	0	1	374,00	1	0	1	1968,00	0	1	1
130,00	1	0	1	381,00	1	0	1	2419,00	0	1	1
137,00	1	0	1	384,00	0	1	1	2470,00	0	1	1
151,00	0	1	1	401,00	0	1	1	Gesamt	41	33	74

Richtungsmaße				Wert	
Nominal bezüglich Intervall	Eta	Langzeitmessungen abhängig			,306
		Raum_erdberührt abhängig			,972

Tests der Zwischensubjekteffekte						
Abhängige Variable: Langzeitmessungen						
Quelle	Typ III Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	
Korrigiertes Modell	1733623,89 ^a	1	1733623,888	7,431	,008	
Konstanter Term	11318730,4	1	11318730,4	48,514	<,001	
Raum_erdberührt	1733623,888	1	1733623,888	7,431	,008	
Fehler	16798299,7	72	233309,719			
Gesamt	29035902,0	74				
Korrigierte Gesamtvariation	18531923,6	73				

a. R-Quadrat = ,094 (korrigiertes R-Quadrat = ,081)

Abb. 50: ETA-Koeffizient und Signifikanz für Langzeitmessung · Raum erdberührt

4.7.3 Parallele Kurzzeitmessungen bei NOE_01 in drei Räumen

Im Studienhaushalt NOE_01 wurden zwischen 23.06.2023 und 18.07.2023 parallele aktive KZM in drei Räumen durchgeführt. Dabei wurden die IRC-Stundenmittelwerte in allen Räumen zeitgleich erhoben und anschließend aufbereitet. Ein Auszug der Daten ist in der Tab. 40 ersichtlich. In Abb. 51 sind die IRC-Stundenmittelwerte der parallelen KZM ersichtlich. Anhand der Grafik ist zu erkennen, dass sich die Höhe der IRC in den Räumen teils stark unterscheiden. Die Messung „NOE_01_S_G4SL“ wurde im Esszimmer durchgeführt, welches erdberührt ist und keine Fundamentplatte aufweist. „NOE_01_S_G2MA_SZ“ erfolgte in einem Schlafzimmer im 1. Stock, welches sich über dem Esszimmer befindet. Die Räume sind durch eine Dübeldecke und durch Estrich voneinander getrennt. Die Messung „NOE_01_S_E1MA_WZ“ wurde im Wohnzimmer im Erdgeschoß durchgeführt. Anders als die Messung „NOE_01_S_G4SL“ ist das Wohnzimmer durch einen Dichtbetonkeller vom Erdreich abgetrennt.

Tab. 40: Auszug der parallelen Kurzzeitmessungen bei NOE_01

NOE_01_S_G4SL Esszimmer (Erdgeschoß)		NOE_01_S_G2MA_SZ Schlafzimmer (1.Stock)		NOE_01_S_E1MA_WZ Wohnzimmer (Erdgeschoß)		
Messzeit	Rn222_korrigiert (Bq/m ³)	Messzeit	Rn222_korrigiert (Bq/m ³)	Messzeit	Rn222_korrigiert (Bq/m ³)	Rn222_korrigiert (Bq/m ³)_gemittelt
23.06.23 00:00	34	23.06.23 00:00	17	23.06.23 00:00	32	65
23.06.23 01:00	34	23.06.23 01:00	26	23.06.23 01:00	64	64
23.06.23 02:00	61	23.06.23 02:00	20	23.06.23 02:00	97	64
23.06.23 03:00	66	23.06.23 03:00	24	23.06.23 03:00	64	55
23.06.23 04:00	74	23.06.23 04:00	32	23.06.23 04:00	97	51
23.06.23 05:00	80	23.06.23 05:00	35	23.06.23 05:00	32	55
23.06.23 06:00	70	23.06.23 06:00	29	23.06.23 06:00	0	60
23.06.23 07:00	75	23.06.23 07:00	29	23.06.23 07:00	0	51
23.06.23 08:00	114	23.06.23 08:00	30	23.06.23 08:00	97	41
23.06.23 09:00	107	23.06.23 09:00	33	23.06.23 09:00	129	41
23.06.23 10:00	93	23.06.23 10:00	33	23.06.23 10:00	0	41
23.06.23 11:00	49	23.06.23 11:00	20	23.06.23 11:00	32	51
23.06.23 12:00	36	23.06.23 12:00	26	23.06.23 12:00	32	41
23.06.23 13:00	32	23.06.23 13:00	20	23.06.23 13:00	0	23
23.06.23 14:00	22	23.06.23 14:00	20	23.06.23 14:00	64	28
23.06.23 15:00	34	23.06.23 15:00	15	23.06.23 15:00	32	28
23.06.23 16:00	72	23.06.23 16:00	15	23.06.23 16:00	0	59
23.06.23 17:00	126	23.06.23 17:00	30	23.06.23 17:00	32	73

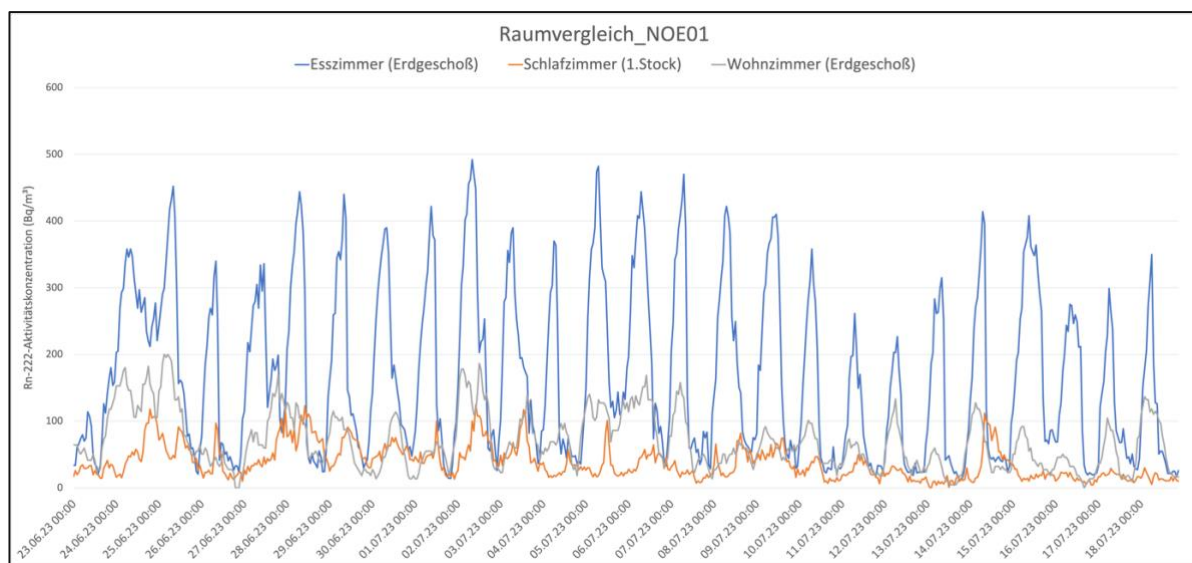


Abb. 51: IRC-Stundenmittelwerte der parallelen Kurzzeitmessungen bei NOE_01

4.8 Einfluss des Nutzungsverhaltens der Bewohner:innen auf die IRC

Die Studienteilnehmer:innen zeigten teils große Unterschiede in ihren Raumnutzungsgewohnheiten sowie in ihren Lüftungsverhalten. In den folgenden Unterkapiteln wird dies anhand von verschiedenen Beispielen verdeutlicht.

4.8.1 Veränderung der Türstellung zu angrenzendem Raum

In Abb. 52 ist der zeitliche Verlauf der IRC-Stundenmittelwerte der Winter-KZM im Esszimmer bei NOE_01 ersichtlich. Der Raum ist erdberührt und weist keine Fundamentplatte auf. Das Esszimmer ist direkt angrenzend an den großen Vorraum, der durch eine Dichtbetonplatte, sowie einem darunterliegenden Dichtbetonkeller vom Erdreich getrennt ist. Die Bewohner:innen gaben an, dass die Verbindungstüre zwischen dem Esszimmer und dem Vorraum prinzipiell tagsüber geöffnet war und in den Nachtstunden geschlossen wurde. In der Abb. 52 ist zu sehen, dass die IRC während dieser KZM stets spätabends anstieg und in den Morgenstunden ihr tageszeitliches Maximum erreichte.

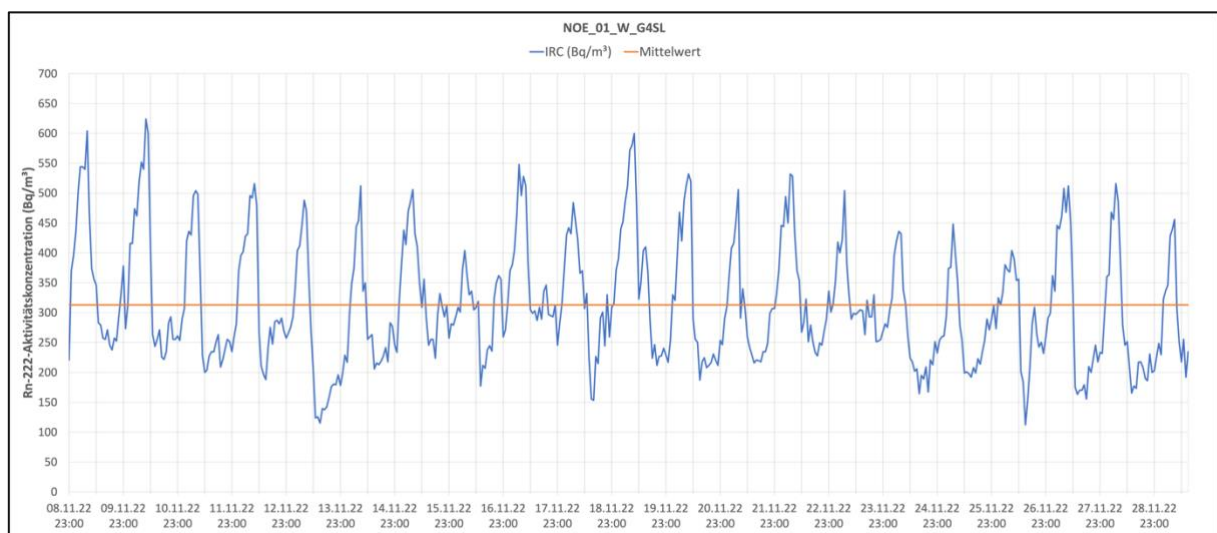


Abb. 52: NOE_01_W: Anstieg der IRC in den Nachtstunden

4.8.2 Lüftungsverhalten und IRC-Veränderung bei längerer Abwesenheit

In der Abb. 53 ist der zeitliche Verlauf der IRC-Stundenmittelwerte der Winter-KZM im Schlafzimmer bei NOE_09 ersichtlich. Die Bewohner:innen gaben an, dass das Schlafzimmerfenster prinzipiell untertags geschlossen war und in den Nachtstunden gekippt wurde. In der Abb. 53 ist zu sehen, dass die IRC während dieser KZM meist in den Abendstunden ihr tageszeitliches Maximum aufwies, in den Nachtstunden sank und in den Morgenstunden ihr tageszeitliches Minimum erreichte. Die Studienteilnehmer:innen gaben außerdem an, dass sie im Zeitraum zwischen 04.02.2023 und 12.02.2023 verreist waren und das Schlafzimmerfenster in dieser Zeit geschlossen gehalten haben. In der Abb. 53 ist ersichtlich, dass die IRC während ihrer Abwesenheit keine tageszeitlichen Fluktuationen aufwies und im Mittel höhere Werte zeigte, als in den Zeiträumen während ihrer Anwesenheit.

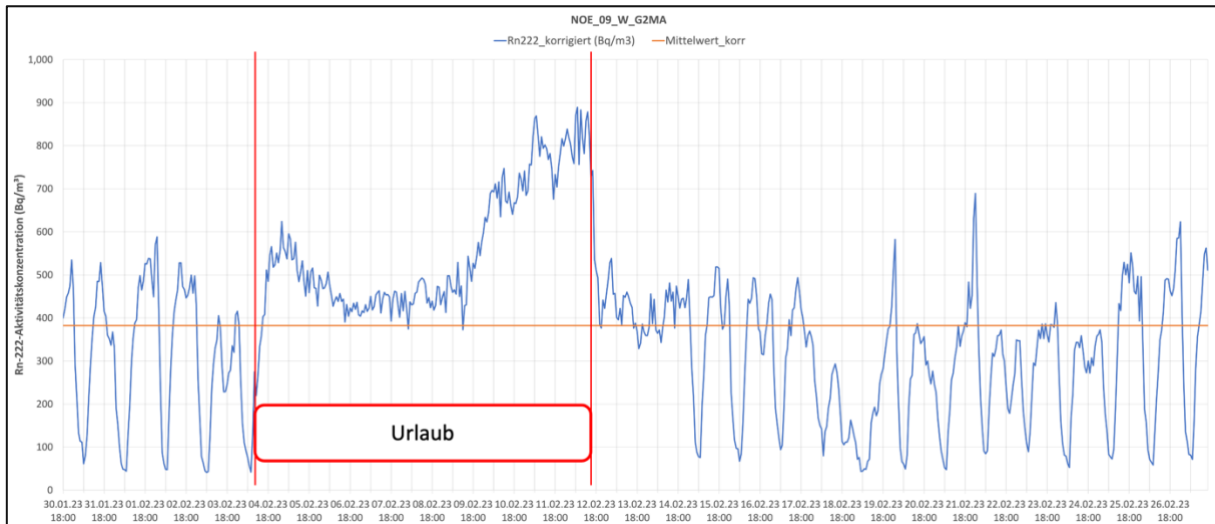


Abb. 53: NOE_09_W: Anstieg der IRC tagsüber sowie während des Urlaubs

4.8.3 Jahreszeitenabhängiges Lüftungsverhalten

In der Abb. 54 ist der zeitliche Verlauf der IRC-Stundenmittelwerte der Winter-KZM im Wohnzimmer bei NOE_10 ersichtlich. Die Abb. 55 zeigt den zeitlichen Verlauf der IRC während der Sommer-KZM. Sowohl für die Winter- als auch für die Sommer-KZM wurde dasselbe Messgerät, sowie dieselbe Aufstellungsposition gewählt. Die Bewohner:innen gaben an, dass sie während der Wintermonate den Raum prinzipiell einmal täglich für zehn bis 15 Minuten lüfteten. In den Sommermonaten hingegen, wurde das Wohnzimmer meist mehrstündig gelüftet. Unter Umständen war das Fenster während der heißen Jahreszeit durchgehend in der Kippposition.

In der Abb. 54 ist zu erkennen, dass die IRC während der Wintermessung meist starken tageszeitlichen Fluktuationen unterlag. Der IRC-Mittelwert lag bei der Wintermessung bei $519 \pm 28 \text{ Bq/m}^3$. In Abb. 55 ist zu sehen, dass die IRC während der Sommermessung grundsätzlich schwache tageszeitliche Veränderungen zeigte. Der IRC-Mittelwert lag bei dieser Messung bei $96 \pm 5 \text{ Bq/m}^3$.

Die Studienteilnehmer:innen gaben außerdem an, dass sie im Zeitraum zwischen 06.02.2023 und 11.02.2023 verreist waren und das Wohnzimmerfenster in dieser Zeit geschlossen gehalten hatten. In der Abb. 54 ist ersichtlich, dass die IRC während ihrer Abwesenheit keine tageszeitlichen Fluktuationen aufwies und im Mittel höhere Werte zeigte, als in den Zeiträumen während ihrer Anwesenheit. Zwischen 02.06.2023 und 06.06.2023 wurde das Haus aufgrund Teilabwesenheit der Bewohner:innen weniger stark gelüftet. In diesem Zeitraum war das Haus zwar weiterhin bewohnt, jedoch weniger frequentiert und das Wohnzimmerfenster durchgehend geschlossen. In der Abb. 55 ist ersichtlich, dass die IRC während dieser Zeit ein Maximum von $640 \pm 54 \text{ Bq/m}^3$ aufwies.

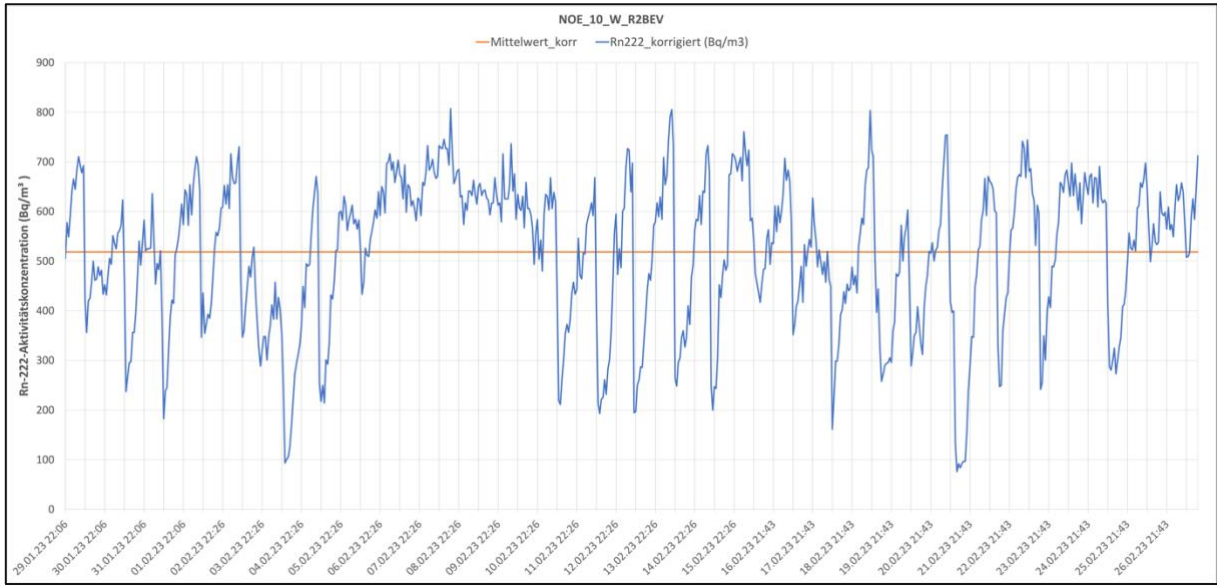


Abb. 54: Kurzzeitmessung_NOE_10_W: Stoßlüften bei Wintermessung

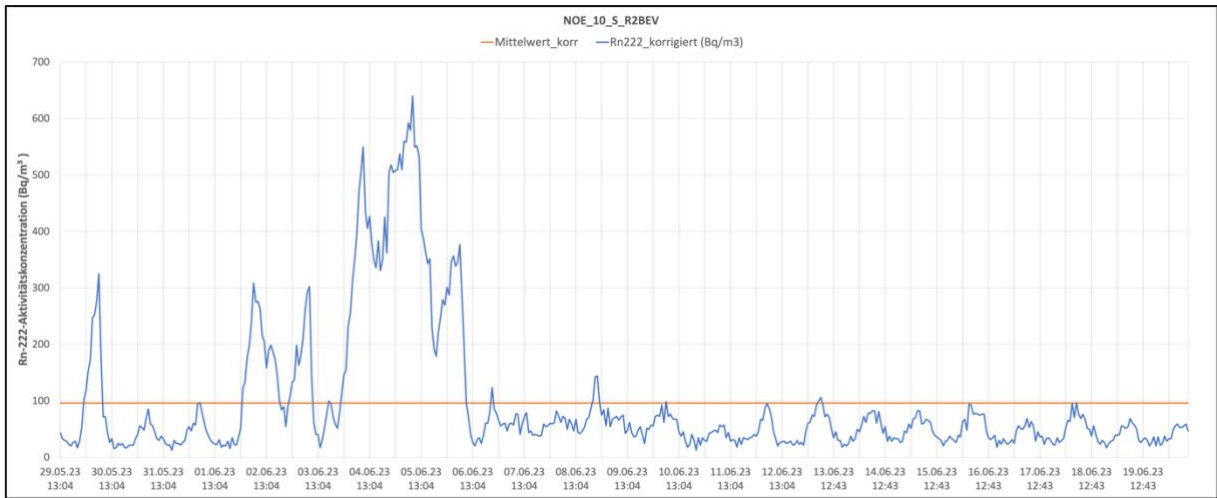


Abb. 55: Kurzzeitmessung_NOE_10_S: gekipptes Fenster bei Sommermessung

4.8.4 Veränderung des Lüftungsverhaltens aller Studienteilnehmer:innen

Die Studienteilnehmer:innen wurden nach ihrem Lüftungsverhalten während der KZM befragt beziehungsweise haben sie in den Fragebögen Angaben zu ihren Lüftungsgewohnheiten gemacht. In der Tab. 41 ist eine Kreuztabelle zu sehen, welche die Beziehung der Ergebnisse des Faktors FWS³ und des „Lüftungsverhaltens bei Sommermessungen im Vergleich zu den Wintermessungen“ zeigt. In der Tabelle wird unterschieden, ob der jeweilige Raum während der Sommermessung „etwa gleich“, „wenig mehr“, oder „viel mehr“ gelüftet wurde, als während der Wintermessung. In neun Räumen wurde während der Sommermessungen etwa gleich gelüftet wie während der Wintermessungen. In zehn Räumen wurde während der Sommermonate etwas mehr und in fünf Räumen viel mehr gelüftet, als während der Wintermessungen.

In der Kreuztabelle ist zu sehen, dass Räume, welche im Sommer stärker als im Winter gelüftet wurden, tendenziell einen höheren FWS-Faktor aufweisen. In Abb. 56 ist der berechnete ETA-Koeffizient (0,566), sowie die Signifikanz (0,017) der Kreuztabelle angeführt. Auf Basis des ETA-Koeffizienten und der Signifikanz besteht eine hohe signifikante Korrelation zwischen dem Faktor FWS und dem Lüftungsverhalten.

Tab. 41: Kreuztabelle für Faktor FWS und dem Lüftungsverhalten bei Sommermessungen

Anzahl		Kreuztabelle			Gesamt
		Lüftungsverhalten bei Sommermessungen im Vergleich zu Wintermessungen			
		etwa gleich	wenig mehr	viel mehr	
FWS	,77	0	1	0	1
	,92	2	0	0	2
	1,02	1	0	0	1
	1,06	0	1	0	1
	1,26	0	1	0	1
	1,31	1	0	0	1
	1,36	1	0	0	1
	1,42	1	0	0	1
	1,45	1	0	0	1
	1,47	0	1	0	1
	1,85	1	0	0	1
	1,89	0	1	0	1
	1,90	0	1	0	1
	2,49	0	0	1	1
	2,70	1	0	0	1
	2,80	0	1	0	1
	2,86	0	1	0	1
	2,90	0	0	1	1
	3,26	0	1	0	1
	4,60	0	0	1	1
5,41	0	0	1	1	
6,47	0	0	1	1	
8,49	0	1	0	1	
Gesamt		9	10	5	24

³ FWS: Der Faktor FWS gibt das Verhältnis des Mittelwerts der Winter-Kurzzeitmessung zum Mittelwert der Kurzzeitmessung nach der Heizsaison wieder (Kapitel 4.4).

Richtungsmaße			
			Wert
Nominal bezüglich Intervall	Eta	FWS abhängig	,566
		Lüften bei Sommermessungen im Vergleich zu Wintermessungen abhängig	1,000

Tests der Zwischensubjekteffekte					
Abhängige Variable: FWS					
Quelle	Typ III Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Korrigiertes Modell	27,737 ^a	2	13,868	4,957	,017
Konstanter Term	171,179	1	171,179	61,184	<,001
Lüften bei Sommermessungen im Vergleich zu Wintermessungen	27,737	2	13,868	4,957	,017
Fehler	58,753	21	2,798		
Gesamt	239,404	24			
Korrigierte Gesamtvariation	86,490	23			

Abb. 56: ETA-Koeffizient und Signifikanz für FWS · Lüften bei Sommermessungen

4.9 Einfluss von meteorologischen Parametern auf die IRC

4.9.1 Spearman-Rangkorrelationen mit den Umwelt- und Wetterparametern

Wie in Kapitel 3.7.1 beschrieben, wurde für jede KZM die Spearman-Rangkorrelation der IRC-Stundenmittelwerte mit den jeweiligen meteorologischen Parametern, den Umweltparametern, beziehungsweise den abgeleiteten Größen berechnet. In Tab. 42 bis Tab. 44 sind die berechneten signifikanten Spearman-Rangkorrelationen aller KZM zu sehen. In den Tabellen sind die Zusammenhänge je nach Stärke farblich gekennzeichnet. Schwache signifikante Korrelationen ($\rho > 0,2$) sind hellgrün, mittlere signifikante Korrelationen grün und starke signifikante Korrelationen dunkelgrün markiert. Schwache signifikante Anti-Korrelationen ($\rho < -0,2$) sind hellrot, mittlere signifikante Anti-Korrelationen rot und starke signifikante Anti-Korrelationen dunkelrot gekennzeichnet.

Tab. 42: Spearman-Rangkorrelationen aller KZM im südlichen Niederösterreich⁴

Korrelationen			p_innen	T_innen	F_innen	p_außen	T_außen	F_außen	Nieder schlag	Wind geschw	Wind richtung	p_Diff	T_Diff
1	NOE_01_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	-,145**	-,221**	,384*	-,172**	-,395**	,499*	0,055	-,159**	0,029	,253**	,361*
	NOE_01_F	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	,134**	-,280**	,096	,137**	-,336**	,375*	-0,076	-,144**	-,079*	,173**	,314*
	NOE_01_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	,109**	-,449**	-0,051	,120**	-,473**	,339*	-0,003	-,212**	,076*	,341**	,430*
2	NOE_02_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC		-,220**	,175*	-,192**	-,233**	,162*	-0,057	-,099**	,118*		,192*
	NOE_02_F	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC		-,236**	,227*	,283**	-,608**	,291*	-0,012	-0,032	-0,003		,589*
	NOE_02_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC		-,280**	-,207*	0,058	-,268**	,096*	-,089*	-,143**	0,001		,249*
3	NOE_03_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	-0,033	,253**	,613*	-0,033	0,076	,164*	,103*	-0,063	0,080	0,039	0,002
	NOE_03_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	-,115**	-0,041	,179*	-,114**	,112**	-,124*	,105*	0,025	-0,014	,054*	-,126*
4	NOE_04_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	-,214**	,232**	,287*	-,212**	0,050	,420*	0,085	-,246**	,141*	,221**	0,032
	NOE_04_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	,162**	-,120*	,156*	,156**	-,265**	,188*	,186*	-0,009	0,012	-,325**	,282*
5	NOE_05_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC		-,094*	,094*	-0,005	-,363**	,344*	-0,041	-,123**	-0,038		,359*
	NOE_05_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC		0,067	,076*	0,032	-,412**	,321*	,091*	-,163**	-0,067		,400*
6	NOE_06_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	0,044	0,073	,095*	,093*	-,634**	-0,048	,105*	,388**	-0,069	,700**	,606*
	NOE_06_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	,071*	,273**	,164*	,171**	-,763**	,552*	,187*	-,225**	-,066*	,754**	,761*
7	NOE_07_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	-,587**	,535**	,518*	-,593**	,421*	-,356*	,090*	,161**	,299*	-,169**	-,300*
	NOE_07_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	-,354**	-,349**	,159*	-,340**	-0,078	,157*	,179*	-0,048	,185*	,157**	-0,034
8	NOE_08_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC		-,399*	0,038	,142**	-,197**	,481*	,098*	-,267**	-,162*		,115*
	NOE_08_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC		-,416**	-,107*	-0,030	-,611**	,533*	,197*	-,353**	,107*		,563*
9	NOE_09_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	,495**	,184*	-,498**	,494**	-,321**	-,106*	-,144*	-,126**	-,103*	-,268**	,386*
	NOE_09_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	-,119**	-0,042	,502**	-,113**	0,054	,269*	,109*	-0,071	0,039	0,071	-0,057
10	NOE_10_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC		-,448**	-,113*	,163**	-,473**	,362*	-,078*	-,366**	-,231*		,417*
	NOE_10_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC		-0,045	0,062	,162**	-,457**	,501*	,140*	-,387**	0,045		,475*

Tab. 43: Spearman-Rangkorrelationen aller KZM in Oberösterreich⁴

Korrelationen			p_innen	T_innen	F_innen	p_außen	T_außen	F_außen	Nieder schlag	Wind geschw	Wind richtung	p_Diff	T_Diff
1	OOE_01_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	-,395**	-,395**	-0,017	0,036	-,170**	-0,076	0,064	,123**	0,051	,160**	-0,077
	OOE_01_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	-,164**	-,376**	,128*	-,173**	-0,070	,125*	-0,009	-,144**	,146*	-,307**	-0,070
2	OOE_02_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	-0,057	,107*	-0,061	-0,056	-,167**	,114*	0,060	-,150**	0,006	-0,038	,173*
	OOE_02_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	-,187**	,181**	0,000	-,186**	,127**	0,067	,136*	-0,011	-,117**	-0,029	-,084*
3	OOE_03_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	-,385**	,201**	,511*	-,385**	,089*	-0,082	-0,074	-,191**	-,104*	0,015	-0,030
	OOE_03_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	-,164**	,084*	,439*	-,165**	,089*	,367*	0,057	-,161**	-0,075	-,107**	-0,047
4	OOE_04_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	,414**	-,388**	-0,002	,411**	-,308**	,576*	-,160**	,115**	,217*	,128**	,171*
	OOE_04_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	,176**	0,036	,139*	,181**	-,208**	,185*	0,058	-0,002	,139*	,088**	,217*
5	OOE_05_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	-,161**	-,256**	,205*	-,156**	-,193**	,341*	-,096*	-,409**	0,005	,226**	,161*
	OOE_05_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	-,108**	-,318**	,200*	,106**	-,079**	,129*	0,071	,135**	,124*	0,008	0,030
6	OOE_06_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	-,404**	,188**	,614*	-,409**	,569**	,319*	,333*	-,093*	0,030	-0,098**	-,486*
	OOE_06_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	-,218**	-,298**	-,171**	-,215**	-,112**	,129*	,169*	,114**	-0,012	0,018	0,036
7	OOE_07_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	0,037	-0,079	,120*	0,034	-0,067	,168*	-0,026	-,315**	0,010	-,099**	0,020
	OOE_07_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	,078*	-0,044	,087*	,081*	-,068*	0,048	0,011	-,092**	0,008	0,023	0,062
8	OOE_08_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	,753**	,466**	-,271**	,756**	-,279**	-0,042	-,204**	-,241**	0,002	-,179**	,389*
	OOE_08_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	,096**	-0,002	-,134*	,100**	,093**	-,136*	-0,035	,214**	,270**	,222**	-,095*

4

*Die Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant (zweiseitig).

**Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

Tab. 44: Spearman-Rangkorrelationen aller KZM in Tirol und in Wien und Umgebung⁴

Korrelationen			p_innen	T_innen	F_innen	p_außen	T_außen	F_außen	Nieder schlag	Wind geschw	Wind richtung	p_Diff	T_Diff
1	TIR_01_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	-,125**	-,189**	0,080	-,125**	-,644**	,436*	0,080	,111*	,134*	0,071	,669*
	TIR_01_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	,167**	-,095*	-0,038	,143**	-,332**	,318*	-0,015	-,250**	-,270**	-,292**	,362*
2	TIR_02_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	-0,061	-,147**	,409*	-0,060	-,241**	,377*	0,012	-,089*	-,141**	,127**	,099*
	TIR_02_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	,149**	-,315**	,252*	,165**	-,527**	,530*	-0,012	-,582**	-,442**	0,044	,499*
3	TIR_03_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	-,441**	-0,071	-,420**	-,442**	-,274**	-,090*	,084*	-,161**	-,141**	,279**	,261*
	TIR_03_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC	,085	-,176**	-,170*	0,077	-,293**	,183*	-0,017	-0,006	-0,031	-,078*	,320*
1	FJM_01_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC		-0,030	,213*	-,254**	,155**	,288*	0,047	-,326**	-,137**		-,161*
	FJM_01_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC		,105**	,230*	-,215**	-,155**	,214*	,128**	,064*	,134*		,202*
2	FJM_02_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC		-0,064	0,103	-0,074	,327**	-0,093	-,193*	-,208**	-0,080		-,385*
	FJM_02_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC		,451**	,416*	-,423**	0,092	,289*	,188**	-,258**	,127*		-0,045
3	FJM_03_W	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC		-,291**	-,425**	,547**	-,543**	,313*	-,230*	-,678**	-,285**		,278*
	FJM_03_S	Spearman-Rho-Korrelation mit IRC		-0,020	0,060	-,156**	-0,021	,097*	-0,030	-,184**	-,127**		0,026

Aus Tab. 42 ist ersichtlich, dass bei der KZM NOE_06_S eine starke signifikante Korrelation ($\rho = 0,76$) zwischen dem zeitlichen Verlauf der IRC und dem zeitlichen Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen auftrat. In der Abb. 57 ist der zeitliche Verlauf der IRC und der Temperaturdifferenz der KZM NOE_06_S dargestellt.

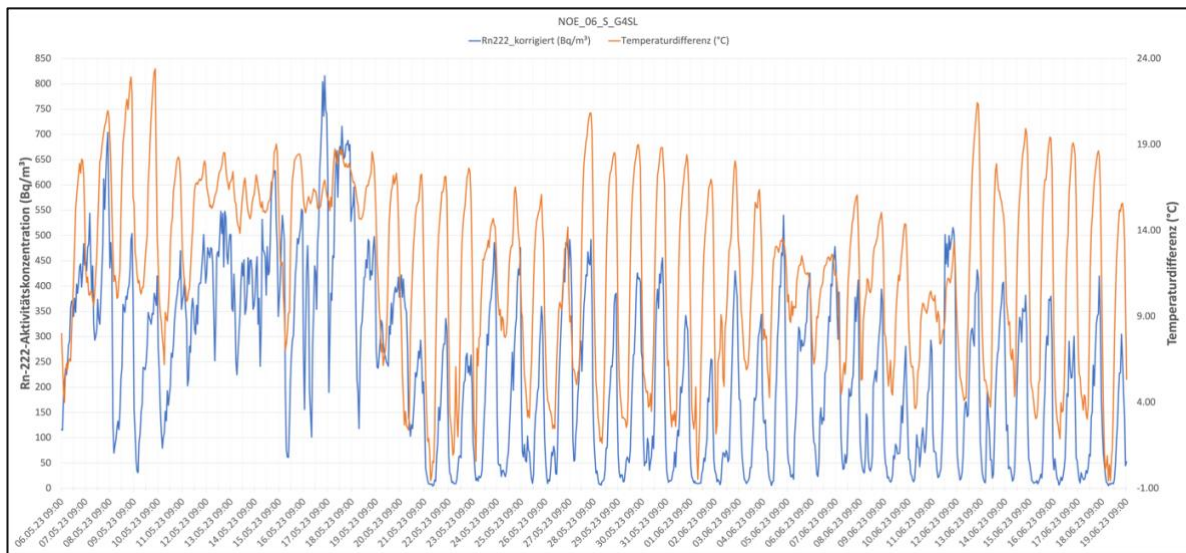


Abb. 57: NOE_06_S IRC und Temperaturdifferenz zwischen innen und außen

In der Tab. 44 ist zu sehen, dass bei der KZM FJM_03_W eine starke signifikante Anti-Korrelation ($\rho = 0,68$) zwischen den zeitlichen Verläufen der IRC und der Windgeschwindigkeit vorlag. In der Abb. 58 ist der zeitliche Verlauf der IRC und der Windgeschwindigkeit bei FJM_03_W dargestellt.

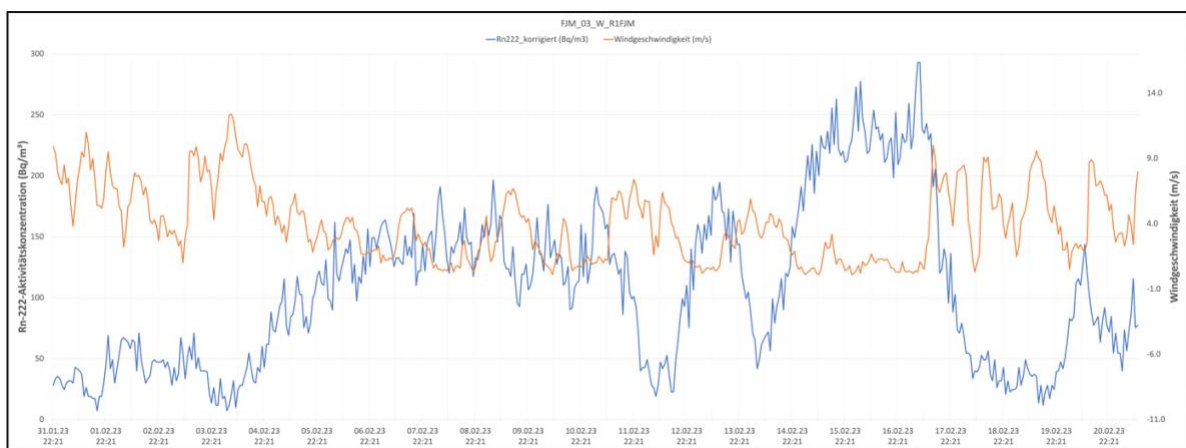


Abb. 58: FJM_03_W IRC und Windgeschwindigkeit

4.9.2 Zusammenfassung der Spearman-Rangkorrelationen

Tab. 45 zeigt eine Zusammenfassung der Spearman-Rangkorrelationen der IRC mit den meteorologischen Parametern, den Umweltparametern und den abgeleiteten Größen. Die Zahleinträge entsprechen der Summe der aufgetretenen Korrelationen aller 50 Kurzzeitmessungen. Bei Parametern die viele (Anti-)Korrelationen mit der IRC zeigten, sind die Zahleneinträge „fett“ und „größer“ gekennzeichnet. Da die Radoneye-Messgeräte keinen Luftdruck aufzeichnen, konnten für die 15 Radoneye-KZM keine Korrelationen der IRC mit dem Innenluftdruck ermittelt werden. Dementsprechend war auch keine Ermittlung der Korrelationen mit der abgeleiteten Größe „Druckdifferenz“ möglich. Aufgrund dessen waren für diese beiden Parameter nur 35 statt 50 KZM vorhanden.

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass viele Korrelationen der IRC mit den Parametern „relative Innen-Luftfeuchte“, „relative Außen-Luftfeuchte“, sowie mit den abgeleiteten Größen „Druckdifferenz“ und „Temperaturdifferenz“ auftraten. Außerdem zeigte die IRC viele Antikorrelationen mit den Parametern „Innen-Raumtemperatur“, „Außentemperatur“ und der „Windgeschwindigkeit“.

Die meisten signifikanten (Anti-)Korrelationen sind zwischen der IRC und der Außentemperatur aufgetreten. Bei 52% der KZM wurden zumindest schwache Anti-Korrelationen mit $\rho < -0,2$ festgestellt. 17 von 50 KZM (34 %) zeigten mindestens eine mittlere Anti-Korrelationen mit $\rho < -0,3$. Bei 7 von 50 (14 %) aller KZM wurden sogar starke signifikante Anti-Korrelationen mit $\rho < -0,5$ festgestellt.

Tab. 45: Zusammenfassung der Korrelationen aller Kurzzeitmessungen

Spearman-Rho-Korrelationen mit IRC	p_innen	T_innen	F_innen	p_außen	T_außen	F_außen	Nieder schlag	Wind geschw	Wind richtung	p_Diff	T_Diff
Summe der Korrelationen (über 0,2)	3	7	16	5	3	25	1	2	3	10	23
Summe der Korrelationen (über 0,3)	3	3	9	4	3	20	1	1	0	4	17
Summe der Korrelationen (über 0,5)	1	1	5	2	1	5	0	0	0	2	5
Summe der Antikorrelationen (kleiner als -0,2)	7	18	5	10	26	1	2	16	4	6	3
Summe der Antikorrelationen (kleiner als -0,3)	5	10	3	6	17	1	0	8	1	1	2
Summe der Antikorrelationen (kleiner als -0,5)	1	0	0	1	7	0	0	2	0	0	1
	von 35	von 50	von 50	von 50	von 50	von 50	von 50	von 50	von 50	von 35	von 50

4.9.3 Einfluss von meteorologischen Parameter bei NOE_02

In der Abb. 59 ist eine Überlagerung der zeitlichen Verläufe der IRC der Winter-KZM und der Frühlings-KZM bei NOE_02 dargestellt. Für den Vergleich wurden für die Wintermessung der Zeitraum 10.11.2022 bis 03.12.2022 und für die Frühlingsmessung der Zeitraum 13.03.2023 bis 05.04.2023 herangezogen. Für beide KZM wurde dasselbe Messgerät, sowie dieselbe Aufstellungsposition gewählt. Die Messungen wurden in einem großen, erdberührten Raum durchgeführt, welcher einerseits als Wohnzimmer und andererseits als Esszimmer dient. Eine Raumhälfte verfügt über eine durchgehende Fundamentplatte, die zweite Hälfte weist ein Streifenfundament auf. Die Bewohner:innen gaben an, vor, während und nach den Messungen keine baulichen Veränderungen vorgenommen zu haben. Auch ihr Raumnutzungsverhalten, sowie ihr Lüftungsverhalten veränderten sich über den Zeitraum der beiden Messungen nicht. Die Bewohner:innen gaben an, dass sie während der beiden Messungen generell den Raum in der Früh für etwa fünf Minuten lüfteten. Im Winter und im Frühling wurden die Fenster zu anderen Tageszeiten prinzipiell geschlossen gehalten. In der Abb. 59 ist zu erkennen, dass die IRC bei beiden Messungen tageszeitliche Fluktuationen aufwies. Meist stieg die IRC in der Nacht an und erreichte in den frühen Morgenstunden, vor dem Lüften, ihr tageszeitliches Maximum. Im Unterschied zur Winter-KZM zeigte die Frühling-KZM deutlich stärkere tageszeitliche Fluktuationen.

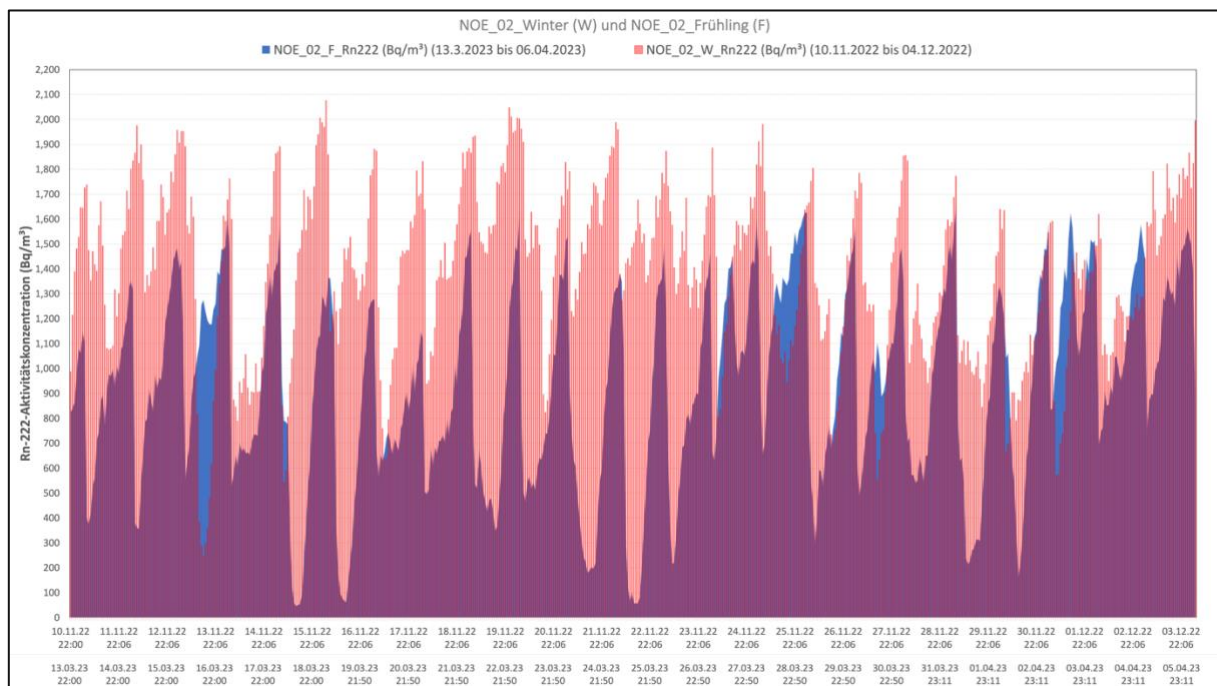


Abb. 59: Überlagerung NOE_02_W und NOE_02_F über 24 Tage

In Abb. 60 und Abb. 61 sind die zeitlichen Verläufe der IRC der beiden KZM und die zeitlichen Verläufe der Außentemperaturen in 2 Meter Höhe (°C) der nächstgelegenen Wetterstation (Pottschach 10531) dargestellt. Anhand Abb. 60 und Abb. 61 ist zu erkennen, dass während der Frühlingsmessung im Mittel höhere Außentemperaturen gemessen wurden als während der Wintermessung. Die gemessene Durchschnittstemperatur entsprach über die Dauer der Winter-KZM etwa 3,3 °C und während der Frühlings-KZM etwa 7,4 °C. Meist zeigte die Außentemperatur im Frühling tagesüber deutlich höhere Werte als nachts. Die Spearman-Rangkorrelation ergab für den Zusammenhang zwischen der IRC und der Außentemperatur für die Winter-KZM eine schwache Anti-Korrelation ($\rho = -0,23$) und für die Frühlings-KZM eine starke Anti-Korrelation ($\rho = -0,61$).

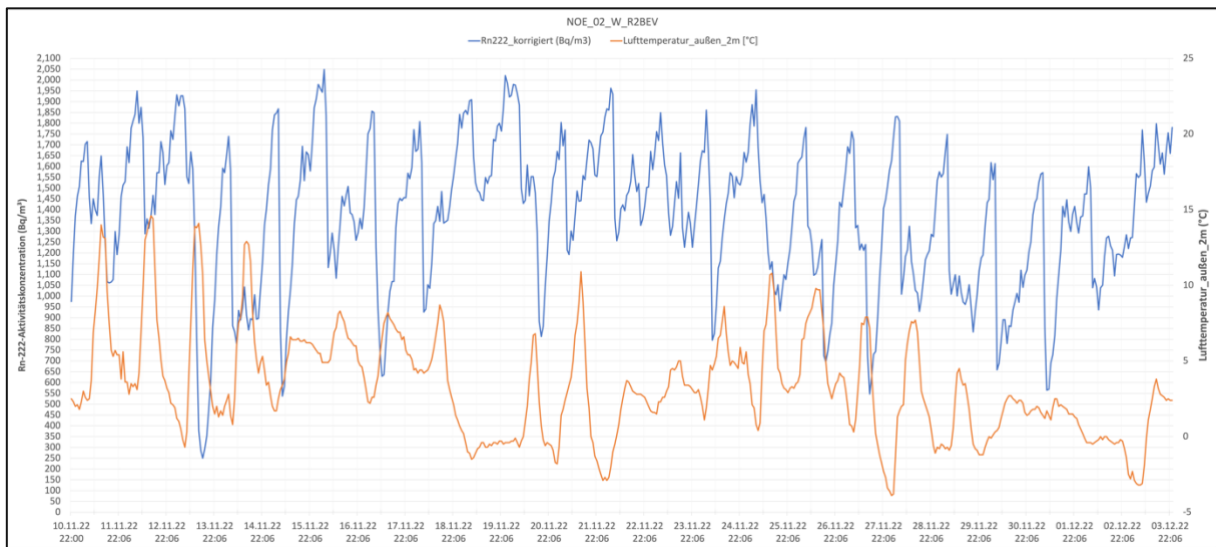


Abb. 60: NOE_02_W und Lufttemperatur_außen_2m über 24 Tage

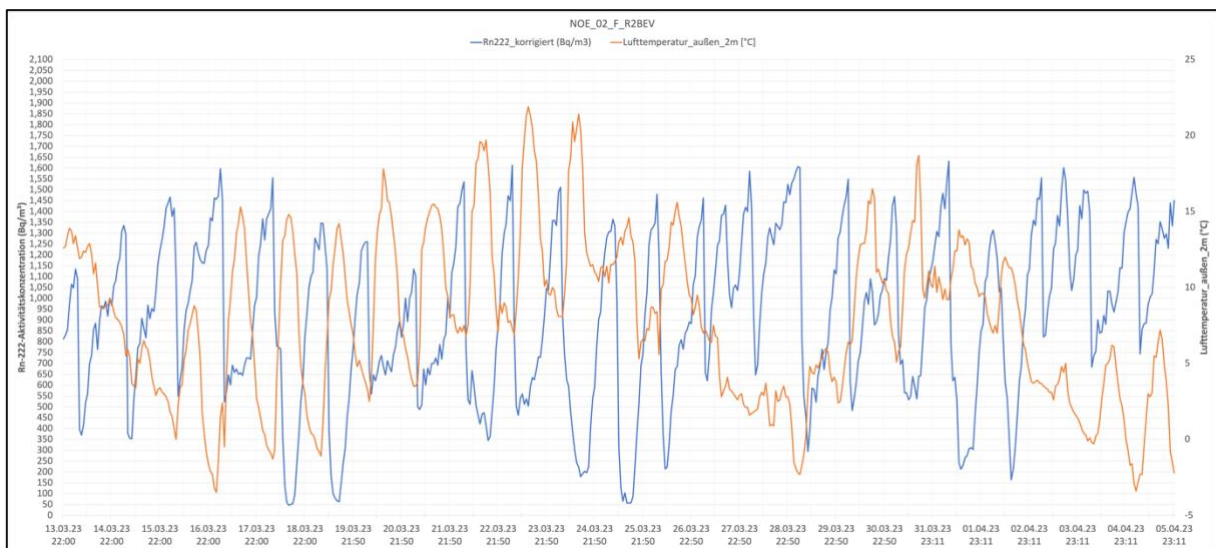


Abb. 61: NOE_02_F und Lufttemperatur_außen_2m über 24 Tage

5. Diskussion

5.1 Allgemeine Erkenntnisse

Die AGES hat im Zuge des ÖNRAP 2 zwischen 2013 und 2019 etwa 50.000 flächendeckende Radonmessungen in österreichischen Haushalten durchgeführt. Der robuste Datensatz ergab ein arithmetisches Mittel der IRC von 166 Bq/m^3 . [32] In Tab. 25 sind statistische Parameter zu den Kurzzeit- und Langzeitmessungen in den Räumen der Kurzzeitmessungen aller 24 Studienhaushalte zusammengefasst. Der Mittelwert über alle 24 IRC-Langzeitmessungen lag mit $431,71 \text{ Bq/m}^3$ deutlich über den Erhebungen des ÖNRAP 2. Der Hauptgrund für die verhältnismäßig hohen Werte ist, dass für die Studie explizit Häuser ausgewählt wurden, welche ein Mindest-Radonpotenzial von 100 Bq/m^3 aufweisen sollten, um zeitliche Veränderungen der IRC vom statistischen Rauschen der Messgeräte unterscheiden zu können. Aus diesem Grund wurden Häuser ausgewählt, deren Eigenschaften eine hohe IRC ermöglichen. Zu den Kriterien zählten vor allem eine Erdberührung der meistgenutzten Räume, Häuser in Radonschutzgebieten, Räume ohne durchgehende Fundamentplatte, Hanglage, ältere Bauweise und Kombinationen der genannten Eigenschaften.

Die Tab. 13 bis Tab. 16 fassen die Ergebnisse der Langzeitmessungen mit den passiven Kernspur-Exposimeter in den Räumen der Kurzzeitmessungen zusammen. Anhand der Ergebnisse ist zu erkennen, dass sich die Messwerte der MA39 sehr gut mit jenen von Seibersdorf Laboratories decken. Ein Grund für die Übereinstimmung ist, dass beide Institute die gleichen Detektoren und das gleiche Auswertesystem (TASLIMAGE Radon Dosimetry System) nutzen und beide Laboratorien für diese Messungen akkreditiert sind. Es ist jedoch zu erwähnen, dass das Ätzen beim Entwicklungsprozess der Exposimeter einen großen Einfluss auf die Ergebnisse haben kann. Je nach Konzentration der Lauge, Ätzdauer und Temperatur werden unterschiedlich viele Kernspuren, aber auch andere Defekte auf der Detektoroberfläche sichtbar. Da die Ätzvorgänge der Detektoren in den jeweiligen Institutslaboratorien getrennt voneinander stattfanden, sind die Übereinstimmungen der Ergebnisse doch bemerkenswert. Einzig die Messunsicherheit zeigte einen erkennbaren Unterschied zwischen den Ergebnissen der beiden Institute, da diese bei den SL-Exposimetern deutlich größer war. Ein augenscheinlicher Grund hierfür ist, dass Seibersdorf Laboratories bei ihren Detektoren weitere Unsicherheitsfaktoren berücksichtigt. In einigen Haushalten wurden zudem parallele Radonmessungen der AGES durchgeführt, welche Exposimeter von Radonova Laboratories nutzten. Die Ergebnisse der AGES-Exposimeter wiesen jeweils höhere Messwerte auf, als jene der TASL Detektoren. Als Grund hierfür kommen die unterschiedlichen Detektoren und Auswertesysteme in Frage.

Anhand der Faktoren FWS, FW und FS in Tab. 26 ist zu erkennen, dass die IRC in den Studienhaushalten im Mittel in den Wintermonaten höher war als in der wärmeren Jahreszeit. Das auftretende Verhaltensmuster einer hohen IRC im Winter und niedrigen Konzentrationen in den Sommermonaten deckt sich mit den Erkenntnissen anderer bisheriger veröffentlichten Studien wie [4], [5] und [6] zeigen.

Der Mittelwert des Faktor FW lag bei 1,50 (SD = 0,40) und jener des Faktors FS bei 0,83 (SD = 0,40). Das heißt, dass die Winter-Kurzzeitmessungen im Mittel um + 50 % von den durch Langzeitmessungen ermittelten, jährlichen mittleren IRC der 24 Studienhaushalte abwichen. Die Sommer-Kurzzeitmessungen hingegen wichen im Mittel um - 17 % von den Jahresmittelwerten ab.

Sowohl der Mittelwert des Faktors FW, als auch jener des Faktors FS wiesen eine Standardabweichung von SD = 0,40 auf. Zu beachten ist jedoch, dass die Standardabweichung nicht normiert ist, also Variablen mit größerem Erwartungswert prinzipiell größeren Streuungen unterliegen. Zum Vergleich der Streuungen der beiden Faktoren kann ein relatives Streuungsmaß wie der Variationskoeffizient betrachtet werden, der dem Quotienten der Standardabweichung und des Erwartungswerts entspricht.

$$\text{Variationskoeffizient} = \frac{\text{Standardabweichung}}{\text{Erwartungswert}} \quad (21)$$

Dieser ergab für den Faktor FW einen Wert von 0,27 und für FS den Wert 0,48. Dies zeigt, dass die relative Streuung beim Faktor FS deutlich höher ist als jene des Faktors FW. Als möglicher Grund hierfür kommt der große Messzeitraum der Sommer-Kurzzeitmessungen in Frage. Sowohl die Winter-KZM, als auch die Sommer-KZM konnten aufgrund der limitierten Menge an aktiven Messgeräten und der begrenzten Zeit, nicht gleichzeitig durchgeführt werden. So gab es Studienhaushalte, wie beispielsweise OOE_01 und OOE_02, bei denen die KZM nach der Heizsaison bereits sehr früh am 23. März 2023 gestartet und am 15. April 2023 beendet wurden. Ein Viertel der 24 Sommer-KZM lag größtenteils im kühlen Zeitraum März und April 2023, wobei der April 2023 im Mittel 1,7 Grad unter der Durchschnittstemperatur der vergangenen Jahrzehnte lag [61]. Der April 2023 war der erste Aprilmonat seit dem Jahr 2008, in dem es keinen Sommertag gab [61]. Die Ergebnisse der KZM nach der Heizsaison beziehungsweise des Faktors FS in diesen Haushalten sind daher nicht repräsentativ für Sommermessungen.

Dies hat auch einen Einfluss auf den Faktor FWS, der das Verhältnis der Winter-KZM zur jeweiligen Sommer-KZM beschreibt. Der Mittelwert über alle 24 Studienhaushalte des FWS lag bei 2,52 (SD = 1,94). Als denkbare Ursache für die verhältnismäßig große Standardabweichung von 1,94 sind abermals die unterschiedlichen Messzeiträume der Kurzzeitmessungen anzuführen. Nur bei drei der 24 Studienhaushalte war der FWS-Wert kleiner als 1. Das heißt, dass bei diesen Haushalten der Mittelwert der Sommer-KZM höher war, als jener der Winter-KZM. Bei den drei Studienhaushalten handelt es sich einerseits um OOE_01, OOE_02, bei denen die Sommer-KZM vollständig im Zeitraum März und April 2023 bei kühlen Außentemperaturen lag, sowie um OOE_07, bei dem die Sommer-KZM bereits am 15. April 2023 gestartet wurde.

Hingegen gab es einige Studienhaushalte, wie beispielsweise NOE_09 und NOE_10, bei denen zwischen den Winter- und Sommer-KZM große Temperaturunterschiede vorlagen. Bei zehn der 24 Studienhaushalte war der FWS im Bereich von $2,49 \pm 0,22$ bis $8,49 \pm 0,48$, also der Mittelwert der Winter-KZM mindestens 2,49 mal höher als jener der Sommer-KZM. Es zeigt sich, dass bei all diesen zehn Haushalten die Winter-KZM größtenteils in der kalten Jahreszeit (November 2022 bis Februar 2023) stattfanden und die Sommer-KZM ausschließlich in der warmen Jahreszeit zwischen Mai und August 2023. Die einzige Ausnahme stellt der Haushalt OOE_08 dar, bei dem die Sommer-KZM bereits am 15. April 2023 gestartet wurde. Aber auch hier lag der Großteil des Messzeitraumes im Mai, da die Messung am 21. Mai 2023 beendet wurde.

Bei 14 von 24 Studienhaushalten lag der Faktor FWS im Bereich von $0,77 \pm 0,10$ bis $1,90 \pm 0,15$. Das heißt, dass bei diesen Haushalten der Mittelwert der Winter-KZM maximal um 23 % kleiner, beziehungsweise um 90 % größer war als der Mittelwert der Sommer-KZM.

Wie bereits in Kapitel 1.4 angeführt, wird die Veränderung beziehungsweise die Höhe der IRC von mehreren Parametern beeinflusst. So wird die IRC durch die Kombination von Geologie, Bauweise, Nutzungsverhalten der Bewohner:innen und den meteorologischen Einflüssen bestimmt. Die Erkenntnisse der Einflussparameter bezogen auf die IRC der Studienhaushalte werden nachfolgend näher ausgeführt.

5.2 Erkenntnisse des Einflusses der Geologie und der Bodenbeschaffenheit auf die IRC

Wie in der Tab. 27 ersichtlich, befinden sich 23 der 24 Studienhaushalte zumindest in Radonvorsorgegebieten. Rund 46 % der Studienhaushalte stehen sogar in Radonschutzgebieten. Der prozentuelle Anteil an Haushalten in Radonschutzgebieten ist deutlich höher als der tatsächlich vorherrschende Anteil in Österreich, da nur 104 der 2093 Gemeinden als Radonschutzgebiete ausgewiesen sind und diese keine größeren Städte mit vielen Einwohnern umfassen. Die Ursache für die starke Abweichung ist, wie bereits in Kapitel 5.1 begründet, dass explizit Häuser mit hohem Radonpotenzial für die Studie ausgewählt wurden, welche zu einem großen Teil in Radonschutzgebieten gefunden wurden.

Anhand der Tab. 27 ist zu sehen, dass elf der 24 Langzeitmessungen in den Wohnräumen der Kurzzeitmessungen den gesetzlichen Referenzwert von 300 Bq/m^3 überschritten haben. Nur sechs der elf Räume liegen in Radonschutzgebieten, die anderen fünf in Radonvorsorgegebieten. Der höchste IRC-Langzeit-Mittelwert wurde beim Studienhaushalt NOE_05 gemessen, welcher sich in einem Radonvorsorgegebiet befindet. Der Wert lag mit $2504 \pm 66 \text{ Bq/m}^3$ (MA39) beziehungsweise $2333 \pm 113 \text{ Bq/m}^3$ (SL) deutlich über dem gesetzlichen Referenzwert von 300 Bq/m^3 . Der IRC-Langzeit-Mittelwert in jenem Haus, welches in keinem Radonvorsorgegebiet steht, hatte mit 99 Bq/m^3 den zweitniedrigsten Langzeitmittelwert. Die Ergebnisse zeigen, dass nicht nur Häuser in Radonschutzgebieten, sondern auch Wohnräume in Radonvorsorgegebieten sehr hohe IRC aufweisen können.

Im Zuge der Akquirierung von Studienteilnehmer:innen wurden auch in zwei Häusern, welche in unmittelbarer Umgebung von NOE_05 stehen, Probemessungen durchgeführt. Die potentiellen Studienhaushalte waren dem NOE_05 in der Bauweise und der Lage sehr ähnlich, jedoch wurden sie nicht für die Studie herangezogen, da in allen untersuchten Räumen bei den Probemessungen das Mindest-Radonpotential nicht erreicht werden konnte. Dies deutet darauf hin, dass neben der Geologie auch die örtliche Bodenbeschaffenheit einen großen Einfluss auf die Höhe der IRC haben kann. Auch die Räume der Kurzzeitmessungen der Studienhaushalte NOE_01 und NOE_02 wiesen deutliche Unterschiede in der Höhe der IRC auf, obwohl die beiden Häuser nur 340 m Luftlinie voneinander getrennt sind und der Fundamenttyp, das Alter der Häuser, sowie das Lüftungsverhalten in den Räumen ähnlich sind. Ein wesentlicher Unterschied ist jedoch, dass sich NOE_02, dessen mittlere jährliche IRC etwa viermal so hoch war wie jene des NOE_01, sich in Hanglage befindet und NOE_01 auf ebenem Untergrund steht. Wie in Kapitel 1.4.1 beschrieben, kann das Radongas in Hanglagen aufgrund der dabei oft vorfindenden Durchlässigkeit des Untergrunds leicht an die Oberfläche gelangen [38]. Der Zusammenhang zwischen hoher IRC und Häusern in Hanglage wurde auch bei den Studienergebnissen festgestellt. Die Kreuztabelle in Tab. 28 zeigt die Beziehung zwischen der Ergebnisse der Langzeitmessungen und der Lage der Häuser. In der Abb. 49 ist der ETA-Koeffizient mit dem Wert 0,429 angeführt, sowie die berechnete Signifikanz mit dem Wert 0,037, welche kleiner als 0,5 ist. Den beiden Werten zufolge besteht eine mittlere signifikante Korrelation zwischen den Ergebnissen der Langzeitmessungen und der Lage der Häuser. Folglich weisen die Studienhaushalte in Hanglage tendenziell höhere mittlere IRC auf als Häuser, die auf ebenem Untergrund stehen.

5.3 Erkenntnisse des Einflusses der Bauweise auf die IRC

Wie in 1.4.2 beschrieben, kann auch die Bauweise beziehungsweise die Gebäudeeigenschaften einen Einfluss auf die Höhe der IRC haben. In den Tab. 29 bis Tab. 32 sind wesentliche Erhebungen zur Bauweise und dem Gebäudezustand aller Studienhaushalte einzusehen, sowie die ermittelte jährliche mittlere IRC in den Räumen der Kurzzeitmessungen. Da die Häuser das Mindest-Radonpotenzial von 100 Bq/m^3 erreichen mussten und Altbauten tendenziell höhere IRC aufweisen als Neubauten, schließt die Studie verhältnismäßig viele Altbauten ein. Drei der 24 Häuser wurden vor 1919 errichtet, eines zwischen 1945 und 1970 und 14 Studienobjekte wurden zwischen 1971 und 2000 gebaut. Sechs Häuser wurden nach 2000 errichtet.

Es zeigt sich, dass die meisten Studienhaushalte komplett beziehungsweise teilunterkellert sind. Außerdem weist ein Großteil der Wohnobjekte eine durchgehende Fundamentplatte auf, wenige Häuser besitzen kein Fundament beziehungsweise nur ein Streifenfundament. Die meisten Studienteilnehmer:innen gaben an, dass ihre Fenster „sehr dicht“ beziehungsweise „dicht“ sind. Ein Viertel der Häuser wurde thermisch saniert, bei den restlichen Objekten wurden keine großen Veränderungen seit ihrer Fertigstellung unternommen.

Um den Einfluss des Stockwerks und der Erdberührung auf die IRC zu untersuchen, wurden in den meisten Studienhaushalten mehrere Exposimeter in verschiedenen Räumen gleichzeitig positioniert und die IRC gemessen. Wie in Tab. 33 bis Tab. 38 ersichtlich, zeigen die Ergebnisse der Langzeitmessungen teils erhebliche Unterschiede innerhalb eines Hauses. Diese Erkenntnisse werden im Folgenden anhand einiger Beispiele genauer analysiert.

Im Studienhaushalt NOE_01 wurden Exposimeter in sieben verschiedenen Räumen positioniert. Das Haus hat einen nichtunterkellerten Altbauteil, der keine Fundamentplatte aufweist, sowie ein Zubau, der in den 1990er Jahren angebaut wurde. Im Erdgeschoss des Altbaus befinden sich die Räume 1 und 6, welche mit $252 \pm 9 \text{ Bq/m}^3$ und $237 \pm 15 \text{ Bq/m}^3$ die höchsten IRC aufwiesen. Die Räume 2 und 5 befinden sich im 1. Stock über dem Altbauteil. Hier wurden deutlich niedrigere IRC gemessen ($111 \pm 6 \text{ Bq/m}^3$ $109 \pm 6 \text{ Bq/m}^3$). Der Zubau ist durch einen Dichtbetonkeller vom Erdreich getrennt. Auffallend ist, dass die IRC im Dichtbetonkeller (Raum 7) mit $106 \pm 5 \text{ Bq/m}^3$ niedriger war, als im Wohnzimmer (Raum 3) darüber ($129 \pm 6 \text{ Bq/m}^3$). Dies weist darauf hin, dass das Radongas vermutlich vom Altbauteil in den angrenzenden Neubau strömte. Die niedrigste IRC wurde im Schlafzimmer im Zubauteil (Raum 4) mit $78 \pm 4 \text{ Bq/m}^3$ gemessen. Hier ist zu erwähnen, dass dieser Raum ebenfalls durch den Dichtbetonkeller vom Erdreich getrennt ist und die Türe die meiste Zeit geschlossen war, sodass das Radongas, anders als beim Raum 3, nicht so leicht in den Raum eindringen konnte.

Wie in Kapitel 4.7.3 beschrieben, wurden in NOE_01 zusätzlich zu den Langzeitmessungen parallele aktive Kurzzeitmessungen in drei Räume durchgeführt. Dabei handelt es sich um das Esszimmer im Altbauteil (Raum 1), das Schlafzimmer (Raum 2) über dem Esszimmer, sowie um das Wohnzimmer im Zubauteil (Raum 3). Anhand der Abb. 51 ist zu sehen, dass über den gesamten Messzeitraum (23.06.2023 bis 18.07.2023) die IRC im Esszimmer stets am höchsten war. Die Türe des Esszimmers war in der Nacht prinzipiell geschlossen. Anhand der Abb. 51 ist ersichtlich, dass die IRC im Esszimmer in den Nachtstunden sehr stark anstieg. Es sind bei allen drei Räumen tageszeitliche Fluktuationen der IRC erkennbar, jedoch waren diese im Esszimmer deutlich stärker als in den anderen beiden Räumen. Die Fluktuationen waren über die meiste Zeit beim Esszimmer und Wohnzimmer phasengleich, was darauf hindeutet, dass das Radongas möglicherweise den gleichen Ursprung hat. Die deutlich höhere IRC im Esszimmer ist ein weiteres Indiz dafür, dass das Radongas wahrscheinlich vom Esszimmer aus in das Wohnzimmer strömte. Das Schlafzimmer im 1. Stock zeigte ebenfalls Fluktuationen, jedoch nicht an jedem Tag. Hierbei ist zu erwähnen, dass der Messzeitraum bei hohen Außentemperaturen durchgeführt wurde. In dieser Zeit wurde das Schlafzimmer zu verschiedenen Tageszeiten stark gelüftet, weshalb sich der zeitliche Verlauf der IRC von den anderen Räumen deutlich unterscheiden konnte.

Auch bei NOE_02 zeigen sich erhebliche Unterschiede zwischen den mittleren jährlichen IRC der gemessenen Räume. Der Raum 1 befindet sich im nichtunterkellerten Erdgeschoss, wobei eine Raumhälfte eine durchgehende Fundamentplatte aufweist und die zweite Hälfte ein Streifenfundament. Die IRC wurde außerdem im Vorzimmer (Raum 2) gemessen, welches sich ebenfalls im Erdgeschoss befindet, jedoch unterkellert ist. Die mittlere IRC in diesem Raum lag mit $381 \pm 10 \text{ Bq/m}^3$ deutlich unter jenem Wert des nichtunterkellerten Raumes 1 ($901 \pm 34 \text{ Bq/m}^3$). Eine dritte Messung wurde in einem Schlafzimmer im 1. Stock durchgeführt, welches sich in etwa über dem Raum 2 befindet. Hier lag mit $76 \pm 3 \text{ Bq/m}^3$ eine verhältnismäßig geringe IRC vor. Ähnliches wurde unter anderem bei NOE_07 festgestellt. Die mittlere IRC war mit $434 \pm 14 \text{ Bq/m}^3$ im erdberührten Schlafzimmer über sieben Mal höher als im Wohnzimmer im 1. Stock ($57 \pm 2 \text{ Bq/m}^3$). Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass sowohl die Erdberührung, als auch das Stockwerk vermutlich einen wesentlichen Einfluss auf die IRC haben.

NOE_08 ist ein Neubau aus dem Jahr 2008 und weist, mit Ausnahme eines Erdkellers, eine durchgehende Fundamentplatte auf. Im Erdkeller (Raum 4), welcher kein Fundament hat, war die mittlere IRC mit $505 \pm 12 \text{ Bq/m}^3$ am höchsten. In der angrenzenden Waschküche (Raum 3) war die IRC mit $243 \pm 6 \text{ Bq/m}^3$ nur etwa halb so hoch. Interessant ist, dass die IRC im Schlafzimmer (Raum 2) im 1. Stock mit $176 \pm 5 \text{ Bq/m}^3$ etwa gleich hoch war, wie im Wohnzimmer im Erdgeschoss ($168 \pm 5 \text{ Bq/m}^3$). Eine Ursache hierfür könnte der Wäscheschacht sein, der für eine direkte Luftverbindung vom Keller in den 1. Stock sorgt.

NOE_05 befindet sich in Hanglage. Das Haus ist talseitig vom Keller und bergseitig vom Erdgeschoss aus ebenerdig begehbar. Das Wohnzimmer (Raum 1) im Keller hatte mit $2419 \pm 113 \text{ Bq/m}^3$ den höchsten Wert aller Studienhaushalte in den Räumen der Kurzzeitmessungen. In dem Haus wurden Langzeitmessungen in zwei weiteren Räumen durchgeführt. In einem zweiten Wohnzimmer (Raum 2), welches an das andere angrenzt, war die IRC mit $1968 \pm 55 \text{ Bq/m}^3$ etwas geringer, jedoch auf einem ähnlich hohen Niveau wie in Raum 1. Bemerkenswert ist, dass auch im Schlafzimmer im Erdgeschoss mit $1915 \pm 51 \text{ Bq/m}^3$ ähnlich hohe Werte wie im Wohnzimmer im Keller darunter gemessen wurden. Dies zeigt, dass auch Räume welche nicht erdberührt sind, hohe IRC aufweisen können.

Die Kreuztabelle in Tab. 39 zeigt die Beziehung zwischen den Ergebnissen aller 74 Langzeitmessungen der Studie und der Erdberührung des jeweiligen Raumes. In Abb. 50 ist der berechnete ETA-Koeffizient mit dem Wert 0,306 angeführt, sowie die Signifikanz mit dem Wert 0,008, welche kleiner als 0,5 ist. Auf Basis des ETA-Koeffizienten und der Signifikanz besteht eine mittlere signifikante Korrelation zwischen den zwei Parametern. Folglich wiesen die erdberührte Räume der Studie tendenziell höhere mittlere IRC auf, als jene Räume, die keinen direkten Kontakt mit dem Erdboden haben.

5.4 Erkenntnisse des Einflusses des Nutzungsverhaltens der Bewohner:innen auf die IRC

Wie anhand der Beispiele in Kapitel 4.8 ersichtlich hat das Nutzungsverhalten und insbesondere das Lüften einen erheblichen Einfluss auf die Höhe der IRC.

In Kapitel 4.8.1 wird beschrieben, dass die IRC im Esszimmer von NOE_01 prinzipiell spätabends, nach dem Schließen der Türe zum Vorraum stark anstieg. Am Morgen, nach dem Öffnen der Türe sank die IRC wieder. Die tageszeitlichen Fluktuationen der IRC in Kombination mit dem Öffnen und Schließen der Türe deuten darauf hin, dass nicht nur das Lüften ins Freie, sondern auch das Öffnen von Innenraumtüren die IRC in einem Raum senken kann. Obwohl die Türe keine Dichtung aufweist, fand erst durch das Öffnen der Türe ein Luftaustausch in dem Ausmaß statt, dass sich die Raumluft mit der Luft der umliegenden Räume verdünnte und so die IRC sank. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass es dadurch vermutlich zu einem Anstieg der IRC in den umliegenden Räumen kam.

In Kapitel 4.8.2 wird beschrieben, dass das Schlafzimmerfenster von NOE_09 in den Nachtstunden prinzipiell gekippt war. In der Abb. 53 ist deutlich zu sehen, dass die IRC prinzipiell starken tageszeitlichen Fluktuationen unterlag, in der Nacht sank und in der Früh ihr Minimum erreichte. Dass in der Zeit der Urlaubsabwesenheit nicht gelüftet wurde, ist eindeutig anhand der fehlenden tageszeitlichen Fluktuationen beziehungsweise anhand des hohen Radonniveaus im zeitlichen Verlauf der IRC in Abb. 53 ersichtlich. Anhand dieses Beispiels ist klar erkennbar, dass das Lüften die IRC erheblich senken kann.

In Kapitel 4.8.3 wird gezeigt, dass die IRC aufgrund der unterschiedlichen Lüftungsgewohnheiten der Bewohner:innen von NOE_10 zu verschiedenen Jahreszeiten einen erheblichen Einfluss auf die IRC haben kann. In Abb. 54 sind ähnliche tageszeitliche Fluktuationen wie in Abb. 53 bei NOE_09 zu sehen, jedoch wurde bei NOE_10 während der kalten Jahreszeit nur für zehn bis 15 Minuten stoßgelüftet. Dies deutet darauf hin, dass Stoßlüften für einige Minuten bereits für eine so starke Verdünnung der Luft sorgen kann, sodass die IRC erst nach einigen Stunden wieder ihr maximales Radonpotenzial erreicht.

In der Abb. 55 ist der zeitliche Verlauf der IRC während der Sommer-KZM bei NOE_10 ersichtlich. Das Fenster des Raumes wurde während der Messung die meiste Zeit in Kippstellung belassen. Der Mittelwert dieser Messung lag bei $96 \pm 5 \text{ Bq/m}^3$. Während der Teilabwesenheit der Bewohner:innen wurde weniger stark gelüftet und das Fenster des Raumes geschlossen. In dieser Zeit stieg die IRC auf den Maximalwert von $640 \pm 54 \text{ Bq/m}^3$. Anhand des zeitlichen Verlaufes der IRC in Abb. 55 ist zu sehen, dass die IRC durch ein gekipptes Fenster wesentlich gesenkt werden kann.

Die Kreuztabelle in Tab. 41 zeigt die Beziehung zwischen den Ergebnissen des Faktors FWS und dem „Lüftungsverhalten bei Sommermessungen im Vergleich zu den Wintermessungen“. In Abb. 56 ist der berechnete ETA-Koeffizient mit dem Wert 0,566 angeführt, sowie die Signifikanz mit dem Wert 0,017, welche kleiner als 0,5 ist. Auf Basis des ETA-Koeffizienten und der Signifikanz besteht eine hohe signifikante Korrelation zwischen den zwei Parametern. Das deutet darauf hin, dass Räume, welche im Sommer mehr gelüftet wurden als im Winter, im Sommer auch niedrigere IRC aufwiesen als im Winter.

5.5 Erkenntnisse des Einflusses der meteorologischen Parameter auf die IRC

Die Tab. 45 zeigt, dass bei vielen Studienhaushalten Spearman-Rangkorrelationen zwischen der IRC und den Wetterparametern, als auch mit den Umweltparametern (Innenraum-Luftdruck, Innenraum-Temperatur und relative Innenraum-Luftfeuchte) aufgetreten sind. Es wurden signifikante Zusammenhänge zwischen der IRC und den Parametern „relative Innen-Luftfeuchte“, „relative Außen-Luftfeuchte“, sowie mit den abgeleiteten Größen „Druckdifferenz“ und „Temperaturdifferenz“ festgestellt. Außerdem zeigt die IRC viele signifikante Anti-Korrelationen mit den Parametern „Innen-Raumtemperatur“, „Außentemperatur“ und der „Windgeschwindigkeit“.

5.5.1 Einfluss der Temperatur auf die IRC

Die Anti-Korrelationen zwischen der IRC und der Außentemperatur bei 52 % aller Kurzzeitmessungen weisen auf das Auftreten des Kamineffekts hin, welcher in Kapitel 1.4.3 beschrieben wurde und aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen durch starkes Heizen verursacht wird. Aus diesem Grund wurde auch die Korrelation der IRC mit der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen untersucht. Dabei wurden bei 46 % aller Kurzzeitmessungen signifikante Korrelationen zwischen der IRC und dem Temperaturdifferenz-Parameter festgestellt.

Signifikante Korrelationen zwischen der IRC und der Außentemperatur sind unter anderem bei der Winter-KZM und der Frühlings-KZM bei NOE_02 festgestellt worden, wie in Kapitel 4.9.3 beschrieben wurde. Die Spearman-Rangkorrelation ergab für den Zusammenhang zwischen der IRC und der Außentemperatur für die Winter-KZM eine schwache Anti-Korrelation ($\rho = -0,23$) und für die Frühlings-KZM eine starke Anti-Korrelation ($\rho = -0,61$). Die gemessene Durchschnittstemperatur entsprach über die Dauer der Winter-KZM etwa 3,3 °C und während der Frühlings-KZM etwa 7,4 °C. Wie in der Abb. 59 zu erkennen ist, unterlag die IRC bei der Frühlings-KZM starken tageszeitlichen Fluktuationen. Bei der Winter-KZM hingegen, blieb die IRC untertags auf einem höheren Niveau. Dass die IRC bei der Winter-KZM bei kälteren Außentemperaturen im Mittel höher war, als bei der Messung bei wärmeren Außentemperaturen, deutet auf das Auftreten des Kamineffekts hin. Dies unterstreichen auch die signifikanten Korrelationen der IRC mit den Außentemperaturen der beiden Messungen. Ein weiteres Indiz für das Auftreten des Kamineffekts ist, dass die Bewohner:innen ihr Raumnutzungsverhalten, sowie ihre Lüftungsgewohnheiten über die Dauer der Kurzzeitmessungen nicht änderten.

5.5.2 Korrelationen der IRC mit dem Luftdruck

Da beim Kamineffekt das Radongas aufgrund des Druckabfalls infolge der Temperaturdifferenz aus dem Boden in das Hausinnere strömt, wurde untersucht, ob auch Zusammenhänge zwischen der IRC und der Druckdifferenz zwischen innen und außen beobachtet werden können [42]. Es zeigte sich, dass bei etwa 29 % aller Kurzzeitmessungen signifikante Korrelationen zwischen der IRC und der Druckdifferenz festgestellt wurden. Zwischen der IRC und dem Außenluftdruck wurden hingegen nur bei 20 % aller KZM signifikante Korrelationen beobachtet. Bei der Messung der Druckdifferenz ist zu erwähnen, dass die zeitlichen Änderungen der Druckdifferenz meist im Bereich von unter einem Millibar lagen und diese durch zwei unterschiedliche Messgeräte ermittelt wurden (aktives Radonmessgerät und Wetterstation der GeoSphere Austria). Ob die Korrelationen zwischen der IRC und der Druckdifferenz aufgrund des Kamineffekts auftraten, oder ob kein kausaler Zusammenhang vorlag, bedarf weiteren Untersuchungen. Hier ist anzuführen, dass aus einer Schweizer Studie von Rey et al hervorgeht, dass Außenluftdruck keinen großen Einfluss auf die IRC hat [34].

5.5.3 Korrelationen der IRC mit der relative Luftfeuchtigkeit

Ebenfalls geht aus der Schweizer Studie hervor, dass die relative Luftfeuchtigkeit keinen großen Einfluss auf die IRC zu haben scheint [34]. Wie jedoch die Tab. 45 zeigt, wurden bei 50 % der KZM signifikante Korrelationen zwischen der IRC und der relativen Außenluftfeuchte beobachtet, sowie bei 32 % der KZM signifikante Korrelationen zwischen der IRC und der relativen Innenraum-Luftfeuchte festgestellt. Bei genauerer Betrachtung (Tab. 42 bis Tab. 44) zeigt sich aber, dass die Zusammenhänge oft bei KZM auftraten, welche starke tageszeitliche Fluktuationen der IRC aufwiesen, wobei die IRC in der Nacht anstieg und in den Morgenstunden ein Maximum aufwies. Beispiele hierfür sind NOE_01_W oder NOE_10_S. Hingegen treten die Korrelationen weniger bei KZM auf, welche ein umgekehrtes tageszeitliches IRC-Verhaltensmuster hatten. Ein Beispiel hierfür ist das Schlafzimmer bei NOE_03 welches in der Nacht niedrigere IRC aufwies, da in dieser Zeit der Raum durch ein gekipptes Fenster gelüftet wurde.

So wie das tageszeitliche Verhaltensmuster der IRC in einigen Räumen mit hohen Werten in den Nachtstunden und niedrigen Werten untertags, zeigt auch die relative Luftfeuchte oft ein ähnliches Verhalten. Die Ursache hierfür liegt jedoch vermutlich am Wasserdampf-Aufnahmevermögen. Da warme Luft mehr Wasserdampf aufnehmen kann als kältere, steigt die relative Luftfeuchtigkeit häufig in kalten Nächten an, wenn die Außenlufttemperatur sinkt. Sobald die Außentemperatur wieder zunimmt, sinkt die relative Luftfeuchte wieder. [62] Aus diesen Beobachtungen sowie aus den Ergebnissen der Schweizer Studie kann geschlossen werden, dass die Korrelationen zwischen der IRC und der relativen Luftfeuchte vermutlich nicht kausal sind.

5.5.4 Korrelationen der IRC mit der Windgeschwindigkeit

Es wurden signifikante Anti-Korrelationen zwischen der IRC und der Windgeschwindigkeit festgestellt. Bei 16 % aller Haushalte wurden schwache Anti-Korrelationen ($-0,3 \leq \rho < -0,2$) und bei weiteren 16 % zumindest mittlere Anti-Korrelationen ($-0,5 \leq \rho < -0,3$) beobachtet. Prinzipiell kann Wind, ähnlich wie der Kamineffekt, aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeiten zwischen innen und außen einen Unterdruck erzeugen und so einen Einfluss auf die IRC bewirken [21], [63]. Die Wirkung des Windes ist jedoch stark von der Intensität des Windes, der Windrichtung, der Lage des Hauses sowie von den Hauseigenschaften abhängig [21], [34].

6. Fazit

Im Rahmen dieser Studie wurden Kurzzeit- und Langzeitmessungen in Innenräumen von 24 österreichischen Studienhaushalten anhand aktiver und passiver Radonmessgeräte durchgeführt. Die mittlere jährliche Radon-222-Aktivitätskonzentration in den Innenräumen (IRC) liegt mit $431,71 \text{ Bq/m}^3$ deutlich über den Erhebungen des ÖNRAP 2 (166 Bq/m^3), bei denen etwa 50.000 flächendeckende Radonmessungen in österreichischen Haushalten durchgeführt wurden. Der Hauptgrund für die höheren Werte ist, dass für die Studie explizit Häuser ausgewählt wurden, welche ein Mindest-Radonpotenzial von 100 Bq/m^3 aufweisen sollten, um zeitliche Veränderungen der IRC vom statistischen Rauschen der Messgeräte unterscheiden zu können.

Die Studienergebnisse zeigten, dass eine etwa dreiwöchige Kurzzeitmessung innerhalb der Heizsaison im Mittel um den Faktor 1,50 (+ 50 %) von der mittleren jährlichen IRC abweicht (Faktor Mittelwert 1,50 (SD = 0,40) und Median = 1,37). Die Kurzzeitmessungen außerhalb der Heizsaison weichen im Mittel um den Faktor 0,83 (-17 %) von der mittleren jährlichen IRC ab (Mittelwert 0,83 (SD = 0,40) und Median = 0,84). Der Hauptgrund für die höhere IRC in der Heizsaison ist vermutlich das Auftreten des Kamineffekts, bei dem durch Temperaturunterschiede zwischen innen und außen das radioaktive Gas verstärkt in die Innenräume eindringt. Hingegen ist das verstärkte Lüftungsverhalten in der wärmeren Jahreszeit die Hauptursache für die niedrigeren Werte nach der Heizsaison. Das Lüften führt zu einer hohen Luftwechselrate mit der Außenluft, wodurch ein Großteil des Radongases ins Freie entweicht. Die verhältnismäßig großen Standardabweichungen der Ergebnisse sind möglicherweise auf die unterschiedlichen Messzeiträume der Kurzzeitmessungen zurückzuführen. Aufgrund der limitierten Anzahl an Messgeräten wurden einige Kurzzeitmessungen außerhalb der Heizsaison bereits im kühlen Frühling 2023 durchgeführt, hingegen in anderen Haushalten erst in den heißen Sommermonaten.

Außerdem wurde festgestellt, dass die mittlere jährliche IRC in den unterschiedlichen Wohnräumen innerhalb eines Haushalts große Unterschiede aufweisen kann. Baulich bedingte Gegebenheiten wie Stockwerk und Fundamenttyp des Raumes haben augenscheinlich einen starken Einfluss auf die Höhe des Radonpotentials. So zeigen die Ergebnisse von Langzeitmessungen in verschiedenen Räumen aller Studienhaushalte, dass erdberührte Räume generell höhere IRC haben als jene Räume, welche nicht in direktem Kontakt mit dem Erdboden stehen. Die Ergebnisse der Radonmessungen in einigen Studienhaushalten deuten außerdem darauf hin, dass Räume ohne Fundament, beziehungsweise Räume mit Streifenfundament, höhere IRC aufweisen als jene Räume, die eine durchgehende Fundamentplatte besitzen. Eine weitere Erkenntnis der Erhebungen ist, dass die mittlere IRC in Studienhaushalten in Hanglage tendenziell höher ist als in Häusern, die auf ebenem Untergrund stehen.

Es konnten mehrere signifikante (Anti-)Korrelationen zwischen der IRC und den meteorologischen Parametern festgestellt werden. Bei 52 % der Kurzzeitmessungen wurden signifikante Anti-Korrelationen ($\rho > 0,2$) zwischen der IRC und der Außentemperatur berechnet. Als mögliche Ursache hierfür ist, wie bereits oben beschrieben, das Auftreten des Kamineffekts zu nennen. Außerdem wurden signifikante (Anti-)Korrelationen zwischen der IRC und dem Luftdruck, dem Wind und der relativen Luftfeuchte festgestellt. Da die IRC in einigen Haushalten wegen der Lüftungssituation, hingegen die relative Luftfeuchte aufgrund des Wasserdampf-Aufnahmevermögens ähnliche tageszeitliche Fluktuationen aufwies, ist ein kausaler Zusammenhang zwischen den beiden Parametern unwahrscheinlich.

Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund der Einflussfaktoren (Geologie, Lüftungsverhalten, Bauweise sowie meteorologische Parameter) und der komplexen Zusammenhänge mit den bisher genutzten Methoden eine genaue Bestimmung der mittleren jährlichen Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen mittels Kurzzeitmessungen nicht möglich ist. Allerdings können die Daten dieser Arbeit dazu genutzt werden, das Radonpotenzial in einem Haushalt zu ermitteln. Um die mittlere jährliche IRC zumindest nicht zu gering zu bewerten, sollte übermäßiges Lüften während der Messungen vermieden werden. Zudem ist die Außenlufttemperatur zu beachten, da die Möglichkeit des Auftretens des Kamineffekts besteht. Wesentlich ist auch, das Stockwerk sowie die Erdberührung des Raumes zu berücksichtigen. Dabei sollte, falls möglich, die Messung in erdberührten Zimmern, sowie in Räumen, welche keine durchgehende Fundamentplatte aufweisen, durchgeführt werden.

Neben der Ermittlung des Radonpotenzials können die Erkenntnisse dieser Arbeit dazu dienen, eine Verbesserung der Studienanalyse zu ermöglichen. Um eine genaue Ermittlung der mittleren jährlichen IRC zu erzielen, sind weitere Untersuchungen erforderlich und die bisher gesammelten Daten miteinzubeziehen. Bei weiteren Messungen sollten jedenfalls zusätzliche Häuser mit niedrigerem IRC hinzugezogen werden, um zu untersuchen, ob sich die Erkenntnisse auch hier zeigen. Die Einteilung der Kurzzeitmessungen innerhalb und außerhalb der Heizsaison erwies sich als zu unpräzise, um die erhobenen Daten miteinander vergleichen zu können. Bei weiteren Untersuchungen wäre eine Einteilung in kürzere Zeitspannen zweckmäßiger. Das Lüftungsverhalten hat augenscheinlich einen großen Einfluss auf die Messergebnisse. Ob viel oder wenig gelüftet wird, ist stark von der subjektiven Wahrnehmung der Bewohner:innen abhängig. Um die Ergebnisse besser einordnen zu können, kann bei weiteren Erhebungen ein Lüftungsprotokoll angefertigt werden. Darüber hinaus ist den signifikanten (Anti-)Korrelationen zwischen der IRC und dem Wind, sowie dem Luftdruck nachzugehen, welche im Zuge der statischen Analyse ermittelt wurden. Um den Einfluss des Windes zu erforschen, können bei weiteren Untersuchungen die Windrichtung und die Lage der Gebäude miteinbezogen werden. Auch zur Feststellung, ob die Korrelationen zwischen der IRC und dem Luftdruck aufgrund des Kamineffekts auftraten, bedarf es weiteren Analysen.

Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse dieser Arbeit, sowie unter Einbeziehung der genannten Anregungen, kann auf Basis von weiteren Messungen und physikalischen Überlegungen ein robustes radioökologisch-statistisches Modell erstellt werden, mit welchem die mittlere jährliche IRC anhand von Kurzzeitmessungen in Grenzen abgeschätzt werden kann.

7. Literaturverzeichnis

- [1] H. Friedmann *u. a.*, „Das österreichische nationale Radonprojekt – ÖNRAP Projekt-Endbericht (in German)“, 2007, doi: 10.13140/RG.2.2.34760.01285.
- [2] D. J. Steck, „Spatial and Temporal Indoor Radon Variations“, *Health Phys.*, Bd. 62, Nr. 4, S. 351–355, Apr. 1992, doi: 10.1097/00004032-199204000-00009.
- [3] „Wie messe ich Radon?“, Fachstelle für Radon. Zugegriffen: 6. Juni 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.radon.gv.at/zielgruppen/privatpersonen/wie-messe-ich-radon>
- [4] J. C. H. Miles, C. B. Howarth, und N. Hunter, „Seasonal variation of radon concentrations in UK homes“, *J. Radiol. Prot.*, Bd. 32, Nr. 3, S. 275–287, Sep. 2012, doi: 10.1088/0952-4746/32/3/275.
- [5] A. R. Denman, R. G. M. Crockett, C. J. Groves-Kirkby, P. S. Phillips, G. K. Gillmore, und A. C. Woolridge, „The value of Seasonal Correction Factors in assessing the health risk from domestic radon—A case study in Northamptonshire, UK“, *Environ. Int.*, Bd. 33, Nr. 1, S. 34–44, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.envint.2006.06.021.
- [6] F. Bochicchio *u. a.*, „Annual average and seasonal variations of residential radon concentration for all the Italian Regions“, *Radiat. Meas.*, Bd. 40, Nr. 2–6, S. 686–694, Nov. 2005, doi: 10.1016/j.radmeas.2004.12.023.
- [7] „Der Meter - PTB.de“. Zugegriffen: 5. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ptb.de/cms/de/forschung-entwicklung/forschung-zum-neuen-si/countdown-zum-neuen-si/der-meter.html#:~:text=Der%20Meter%20ist%20die%20L%C3%A4nge,%C3%BCberall%20ganzz%20genau%20so%20schnell.>
- [8] „Temperatur“. Zugegriffen: 5. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/temperatur/14380>
- [9] „Das Kelvin“. Zugegriffen: 5. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ptb.de/cms/forschung-entwicklung/forschung-zum-neuen-si/countdown-zum-neuen-si/das-kelvin.html>
- [10] WEB-Redaktion, „Was ist eine Sekunde?“ Zugegriffen: 5. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt4/fb-44/fragenzurzeit/fragenzurzeit14.html>
- [11] „Geschwindigkeit“. Zugegriffen: 5. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/geschwindigkeit/5784>
- [12] „Pascal“. Zugegriffen: 5. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/pascal/5853>
- [13] „Relative Luftfeuchte | Bauphysik | Glossar | Baunetz_Wissen“. Zugegriffen: 5. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.baunetzwissen.de/glossar/r/relative-luftfeuchte-4426217>
- [14] F. J. Maringer, „Skriptum zur Vorlesung 141.599 Strahlenphysik und gesellschaftliche Aspekte des Strahlenschutzes“, Technische Universität Wien, WS 2021.
- [15] „Aktivitätskonzentration“, BASE. Zugegriffen: 5. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.base.bund.de/SharedDocs/Glossareintraege/DE/A/aktivitaetskonzentration.html>
- [16] „Halbwertszeit“. Zugegriffen: 5. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/halbwertszeit/30294>
- [17] „Radon“. Zugegriffen: 7. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.chemie.de/lexikon/Radon.html>
- [18] H. Krieger, *Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. doi: 10.1007/978-3-662-60584-4.

- [19] R. K. und Öffentlichkeitsarbeit, „Was ist Radon? - Strahlenschutz - sachsen.de“. Zugegriffen: 8. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.strahlenschutz.sachsen.de/was-ist-radon-31266.html>
- [20] „Radon im Boden“, Bundesamt für Strahlenschutz. Zugegriffen: 8. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/vorkommen/boden.html>
- [21] „radon-handbuch.pdf“. Zugegriffen: 8. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschueren/ion/radon-handbuch.pdf?__blob=publicationFile&v=9
- [22] „Untersuchung des Einflusses baulicher Energiesparm.pdf“. Zugegriffen: 8. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmu.de/download/untersuchung-des-einflusses-baulicher-energiesparmassnahmen-auf-die-radonkonzentration-in-innenraeumen>
- [23] „Allgemeines zu Radon“. Zugegriffen: 5. Juni 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/strahlenschutz/radon/allgemein.html
- [24] „Snapshot“. Zugegriffen: 13. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health#:~:text=Radon%20is%20one%20of%20the,of%20radon%20and%20cigarette%20smoking.>
- [25] „BfS - Gesundheitliche Wirkungen von Radon - Forschung zur Wirkung von Radon auf die Gesundheit“. Zugegriffen: 13. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/wirkungen/forschung.html>
- [26] „Wismut Uranbergarbeiter-Kohortenstudie“, Bundesamt für Strahlenschutz. Zugegriffen: 13. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bfs.de/DE/bfs/wissenschaft-forschung/wirkung-risiken-ion/laufend/wismut.html>
- [27] S. Darby u. a., „Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies“, *BMJ*, Bd. 330, Nr. 7485, S. 223, Jan. 2005, doi: 10.1136/bmj.38308.477650.63.
- [28] „Strahlenschutzgesetz 2020 (StrSchG 2020)“. Zugegriffen: 20. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/strahlenschutz/recht/strahlenschutzgesetz.html
- [29] „Radonschutzverordnung (RnV)“. Zugegriffen: 20. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/strahlenschutz/recht/radonschutzverordnung.html
- [30] „RIS - Radonschutzverordnung - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 20.11.2023“. Zugegriffen: 20. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20011323&FassungVom=2023-11-20>
- [31] „Radonkarte“, Fachstelle für Radon. Zugegriffen: 20. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.radon.gv.at/informationen-zu-radon/radonkarte>
- [32] V. Gruber, S. Baumann, G. Wurm, W. Ringer, und O. Alber, „Radon in Österreich Messkampagne Radonkartierung Bevölkerungsexposition“, S. 169, Feb. 2022.
- [33] „Wann ist mein Haus / meine Wohnung besonders gefährdet?“, Bundesamt für Strahlenschutz. Zugegriffen: 6. Juni 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/schutz/gefaehrdung.html>
- [34] J. F. Rey, S. Goyette, M. Gandolla, M. Palacios, F. Barazza, und J. Goyette Pernot, „Long-Term Impacts of Weather Conditions on Indoor Radon Concentration Measurements in Switzerland“, *Atmosphere*, Bd. 13, Nr. 1, S. 92, Jan. 2022, doi: 10.3390/atmos13010092.
- [35] F. Purtscheller u. a., „Geologisch-petrographische Ursachen der Radonanomalie in Umhausen (Tirol)“.

- [36] R. Berka und C. Katzlberger, *Erläuterungen zur geologischen Themenkarte Radionuklide in Grundwässern, Gesteinen und Bachsedimenten Österreichs: 1:500000*. in Geologische Themenkarten der Republik Österreich. Wien: Verl. der Geologischen Bundesanstalt, 2014.
- [37] „Radon im Boden“, Bundesamt für Strahlenschutz. Zugegriffen: 17. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/vorkommen/boden.html>
- [38] „us_radon_sanierungen.pdf“. Zugegriffen: 6. Juni 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.land-oberoesterreich.gv.at/files/publikationen/us_radon_sanierungen.pdf
- [39] „Radon in Gebäuden - LfU Bayern“. Zugegriffen: 19. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.lfu.bayern.de/strahlung/radon_in_gebaeuden/index.htm
- [40] R. R. M. M. G. & C. KG, „Gebäudeabdichtung: Schutz vor Radon“, baustoffwissen.de. Zugegriffen: 21. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.baustoffwissen.de/gebäudeabdichtung-schutz-vor-radon-31102023>
- [41] Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, „2019_11_25_radonbroschuere_final.pdf“. Zugegriffen: 21. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://umwelt.hessen.de/sites/umwelt.hessen.de/files/2021-11/2019_11_25_radonbroschuere_final.pdf
- [42] J.-H. Jo, J.-H. Lim, S.-Y. Song, M.-S. Yeo, und K.-W. Kim, „Characteristics of pressure distribution and solution to the problems caused by stack effect in high-rise residential buildings“, *Build. Environ.*, Bd. 42, Nr. 1, S. 263–277, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.07.002.
- [43] „Kamineffekt | K | Lexikon | Isolier-Fuchs“. Zugegriffen: 21. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.isolier-fuchs.de/lexikon/kamineffekt/#>
- [44] J. Miles, „Temporal Variation of Radon Levels in Houses and Implications for Radon Measurement Strategies“, *Radiat. Prot. Dosimetry*, Bd. 93, Nr. 4, S. 369–375, Feb. 2001, doi: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006449.
- [45] J. Park, C. Lee, H. Lee, und D. Kang, „Estimation of Seasonal Correction Factors for Indoor Radon Concentrations in Korea“, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, Bd. 15, Nr. 10, S. 2251, Okt. 2018, doi: 10.3390/ijerph15102251.
- [46] „AGES - Strahlenschutz Serviceleistungen“, AGES. Zugegriffen: 6. Juni 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ages.at/umwelt/radioaktivitaet/strahlenschutz-serviceleistungen>
- [47] „AGES - Radon - Risiko, Messung & Schutz“, AGES. Zugegriffen: 6. Juni 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ages.at/umwelt/radioaktivitaet/radon>
- [48] M. Blum, „Abschätzung des Jahresmittelwerts der Rn-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen mittels aktiver Kurzzeitmessungen – Messungen im südlichen Niederösterreich“. 30. Dezember 2023.
- [49] „Radonkarte“. Zugegriffen: 3. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://geogis.ages.at/GEOGIS_RADON.html
- [50] V. Gruber, S. Baumann, G. Wurm, W. Ringer, und O. Alber, „The new Austrian indoor radon survey (ÖNRAP 2, 2013–2019): Design, implementation, results“, *J. Environ. Radioact.*, Bd. 233, S. 106618, Juli 2021, doi: 10.1016/j.jenvrad.2021.106618.
- [51] Austrian Standards Institute, „ÖNORM S 5280-1; Radon Teil 1: Messtechnische Aufgabenstellung und Beurteilung“. 1. November 2016.
- [52] Track Analysis Systems Ltd, „TASLimage training notes“. Zugegriffen: 4. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tasl.co.uk/downloads/202109-taslimage-training.pdf>
- [53] „TASTRAK PADC - Track Analysis Systems Ltd“. Zugegriffen: 4. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tasl.co.uk/tastrak-padc.php>

- [54] „TASL Image systems and CR-39 plastics - Track Analysis Systems Ltd“. Zugegriffen: 4. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tasl.co.uk/tasl-image.php>
- [55] „GeoSphere Austria Data Hub“. Zugegriffen: 23. Juni 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://data.hub.zamg.ac.at/dataset/klima-v1-1h>
- [56] „Korrelationsanalyse | Einfach erklärt | DATAtab“. Zugegriffen: 13. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://datatab.de/tutorial/korrelation>
- [57] W. A. Hemmerich, „Spearman-Korrelation: Spearman vs. Pearson | StatistikGuru.de“. Zugegriffen: 13. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://statistikguru.de/spss/spearman-korrelation/spearman-vs-pearson.html>
- [58] „Spearman-Korrelation in SPSS – StatistikGuru“. Zugegriffen: 13. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://statistikguru.de/spss/spearman-korrelation/spearman-einfuehrung.html#:~:text=Die%20Spearman%2DKorrelation%20zwischen%20zwei,sie%20li near%20sind%20oder%20nicht\).](https://statistikguru.de/spss/spearman-korrelation/spearman-einfuehrung.html#:~:text=Die%20Spearman%2DKorrelation%20zwischen%20zwei,sie%20li near%20sind%20oder%20nicht).)
- [59] „IBM Documentation“. Zugegriffen: 17. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ibm.com/docs/de/spss-statistics/saas?topic=crosstabs-statistics>
- [60] „Berechnung von eta mit Hilfe von SPSS - Statistik Leitfaden des Umfragetools 2ask | www.2ask.com“. Zugegriffen: 17. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.2ask.com/statistik/berechnung-von-eta-mit-hilfe-von-spss/>
- [61] „April nass, trüb und relativ kühl — ZAMG“. Zugegriffen: 7. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/april-nass-trueb-und-relativ-kuehl>
- [62] „Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Thema des Tages - Feuchte ist nicht gleich Feuchte“. Zugegriffen: 9. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2015/2/13.html#:~:text=Wie%20viel%20W asserdampf%20nun%20ein,deutlich%20h%C3%B6her%20ist%20als%20tags%C3%BCber
- [63] S. I. A. | I. A. A. SPA, „Woher kommt das Radonproblem? | Landesagentur für Umwelt und Klimaschutz | Autonome Provinz Bozen - Südtirol“, Landesagentur für Umwelt und Klimaschutz. Zugegriffen: 10. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://umwelt.provinz.bz.it/strahlung/radonproblem-woher.asp>

8. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Uran-Radium-Zerfallsreihe	14
Abb. 2: Radonkarte Österreich [31]	18
Abb. 3: Geologische Einheiten in Österreich [32]	20
Abb. 4: Standorte der Messungen [49].....	26
Abb. 5: Standorte im südlichen Niederösterreich [49].....	27
Abb. 6: Standorte in Oberösterreich [49]	28
Abb. 7: Standorte in Tirol [49].....	29
Abb. 8: Standorte in Wien und Umgebung [49]	30
Abb. 9: AlphaGuard P30 (oben) und AlphaGuard DF2000 (unten)	32
Abb. 10: RadonEye Plus2 (R2BEV)	32
Abb. 11: AlphaE 1,2 und 4 (oben) und AlphaGuard P30 (unten).....	32
Abb. 12: Kurzzeitmessungen während der Heizsaison (1 von 2)	34
Abb. 13: Kurzzeitmessungen während der Heizsaison (2 von 2)	34
Abb. 14: Kurzzeitmessungen außerhalb der Heizsaison (1 von 2)	34
Abb. 15: Kurzzeitmessungen außerhalb der Heizsaison (2 von 2)	34
Abb. 16: Kalibriertonne der MA39	36
Abb. 17: Ra-226 Standard	36
Abb. 18: Vergleichsmessung in Wien Simmering (FJM_01).....	37
Abb. 19: Vergleichsmessung im südlichen Niederösterreich (NOE_07)	38
Abb. 20: Stundenmittelwerte der aktiven Radonmessgeräte bei der Vergleichsmessung im südlichen NÖ.....	38
Abb. 21: Ausschnitt der Messdaten der RadonEye Plus 2 (Stundenmittelwerte)	44
Abb. 22: Messdaten der Messreihe NOE_02_S_R2BEV	45
Abb. 23: Ermittlung der Messunsicherheit der Messreihe NOE_02_S_R2BEV	46
Abb. 24: TASTRAK-Kunststoffdetektor (PADC).....	47
Abb. 25: Kunststoffgehäuse	47
Abb. 26: Kunststoffdetektor-Bogen der Detektoren 000 331 bis 000 440.....	48
Abb. 27: zweiteiliges offenes Kunststoffgehäuse und Kunststoffdetektor 000 007	48
Abb. 28: geschlossenes Exposimeter mit sechsstelliger Identifikationsnummer 000 646.....	48
Abb. 29: Kernspur-Exposimeter in einem Studienhaushalt (MA39 und SL)	49
Abb. 30: Einrichtung zur Entwicklung der Detektoren.....	50
Abb. 31: Vorrichtung zur Gehäuseöffnung.....	51
Abb. 32: Detektorvorrichtung in Spülbad	51
Abb. 33: TASLImage™ Bildanalysesystem	52
Abb. 34: Kernspuren unter dem Mikroskop.....	52
Abb. 35: Software-Auswertung des Detektors „003 330“	53
Abb. 36: Ausschnitt der meteorologischen Daten (Station 10531 in Pottschach.....	54
Abb. 37: Tests auf Normalverteilung (IRC-Stundenmittelwerte der KZM NOE_02_S)	56
Abb. 38: Häufigkeitsverteilung der IRC-Stundenmittelwerte (NOE_02_S) in Bq/m ³	56
Abb. 39: Ausschnitt der Stundenmittelwerte der Datensätze in SPSS eines Studienhaushalts	57
Abb. 40: Ausschnitt der Spearman-Rangkorrelation der Kurzzeitmessung NOE_01_W.....	57
Abb. 41: Zeitlicher Verlauf der IRC und der Temperaturdifferenz (NOE_01_W)	58
Abb. 42: Auszug der Fragebogen-Einträge und zugeordnete Nummern	58
Abb. 43: Kreuztabelle der mittleren jährlichen IRC und der Hanglage.....	59
Abb. 44: ETA-Koeffizient und Signifikanz	59
Abb. 45: NOE_03 IRC-Stundenmittelwerte und IRC-Mittelwert über 21 Tage während der Heizsaison	60
Abb. 46: Häufigkeitsverteilung des Faktors FW aller 24 Studienhaushalte	68

Abb. 47: Häufigkeitsverteilung des Faktors FS aller 24 Studienhaushalte	68
Abb. 48: Boxplots der Faktoren FW und FS	69
Abb. 49: ETA-Koeffizient und Signifikanz	71
Abb. 50: ETA-Koeffizient und Signifikanz für Langzeitmessung · Raum erdberührt	76
Abb. 51: IRC-Stundenmittelwerte der parallelen Kurzzeitmessungen bei NOE_01	77
Abb. 52: NOE_01_W: Anstieg der IRC in den Nachtstunden	78
Abb. 53: NOE_09_W: Anstieg der IRC tagsüber sowie während des Urlaubs	79
Abb. 54: Kurzzeitmessung_NOE_10_W: Stoßlüften bei Wintermessung	80
Abb. 55: Kurzzeitmessung_NOE_10_S: gekipptes Fenster bei Sommermessung	80
Abb. 56: ETA-Koeffizient und Signifikanz für FWS · Lüften bei Sommermessungen	82
Abb. 57: NOE_06_S IRC und Temperaturdifferenz zwischen innen und außen	84
Abb. 58: FJM_03_W IRC und Windgeschwindigkeit	84
Abb. 59: Überlagerung NOE_02_W und NOE_02_F über 24 Tage	86
Abb. 60: NOE_02_W und Lufttemperatur_außen_2m über 24 Tage	87
Abb. 61: NOE_02_F und Lufttemperatur_außen_2m über 24 Tage	87

9. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Studienhaushalte im südlichen Niederösterreich	27
Tab. 2: Studienhaushalte in Oberösterreich	28
Tab. 3: Studienhaushalte in Tirol	29
Tab. 4: Studienhaushalte in Wien und Umgebung	30
Tab. 5: Daten der aktiven Messgeräte	31
Tab. 6: Korrekturfaktoren der Messgeräte bei der MA39 (mittlerer IRC-Bereich)	43
Tab. 7: Korrekturfaktoren der Messgeräte in Simmering (niedriger IRC-Bereich)	43
Tab. 8: Korrekturfaktoren der Messgeräte im südlichen NÖ (hoher IRC-Bereich)	43
Tab. 9: Kurzzeitmessungen im südlichen Niederösterreich	61
Tab. 10: Kurzzeitmessungen in Oberösterreich	61
Tab. 11: Kurzzeitmessungen in Tirol	61
Tab. 12: Kurzzeitmessungen in Wien und Umgebung	61
Tab. 13: Langzeitmessungen im südlichen Niederösterreich	63
Tab. 14: Langzeitmessungen in Oberösterreich	63
Tab. 15: Langzeitmessungen in Tirol	63
Tab. 16: Langzeitmessungen in Wien und Umgebung	63
Tab. 17: Gegenüberstellung Kurzzeit- und Langzeitmessungen im südlichen NÖ	64
Tab. 18: Gegenüberstellung Kurzzeit- und Langzeitmessungen in Oberösterreich	64
Tab. 19: Gegenüberstellung Kurzzeit- und Langzeitmessungen in Tirol	64
Tab. 20: Gegenüberstellung Kurzzeit- und Langzeitmessungen in Wien und Umgebung	64
Tab. 21: Relativer Überblick der Messergebnisse im südlichen Niederösterreich	66
Tab. 22: Relativer Überblick der Messergebnisse in Oberösterreich	66
Tab. 23: Relativer Überblick der Messergebnisse in Tirol	66
Tab. 24: Relativer Überblick der Messergebnisse in Wien und Umgebung	66
Tab. 25: Statistische Parameter der Kurzzeit- und Langzeitmessungen	67
Tab. 26: Statistische Parameter der relativen Faktoren	67
Tab. 27: Kreuztabelle der Langzeitmessungen und der Radongebiete	70
Tab. 28: Kreuztabelle der Langzeitmessungen und der Hanglage	71
Tab. 29: Erhebungen zur Bauweise und dem Gebäudezustand (1/4)	72
Tab. 30: Erhebungen zur Bauweise und dem Gebäudezustand (2/4)	72
Tab. 31: Erhebungen zur Bauweise und dem Gebäudezustand (3/4)	72
Tab. 32: Erhebungen zur Bauweise und dem Gebäudezustand (4/4)	72
Tab. 33: Alle Langzeitmessungen im südlichen NÖ (1/2)	73
Tab. 34: Alle Langzeitmessungen im südlichen NÖ (2/2)	74
Tab. 35: Alle Langzeitmessungen in OÖ (1/2)	74
Tab. 36: Alle Langzeitmessungen in OÖ (2/2)	75
Tab. 37: Alle Langzeitmessungen in Tirol	75
Tab. 38: Alle Langzeitmessungen in Wien und Umgebung	75
Tab. 39: Kreuztabelle der Langzeitmessungen und der Erdberührung des Raumes	76
Tab. 40: Auszug der parallelen Kurzzeitmessungen bei NOE_01	77
Tab. 41: Kreuztabelle für Faktor FWS und dem Lüftungsverhalten bei Sommermessungen ..	81
Tab. 42: Spearman-Rangkorrelationen aller KZM im südlichen Niederösterreich	83
Tab. 43: Spearman-Rangkorrelationen aller KZM in Oberösterreich	83
Tab. 44: Spearman-Rangkorrelationen aller KZM in Tirol und in Wien und Umgebung ⁴	84
Tab. 45: Zusammenfassung der Korrelationen aller Kurzzeitmessungen	85

10. Anhang

10.1 Studien-Information und Einverständniserklärung



Informationen und Einladung zur Teilnahme an der Studie:

Untersuchung der Radonaktivitätskonzentration in Privathaushalten

Sehr geehrte Damen und Herren,

wir laden Sie ein, an der obengenannten wissenschaftlichen Studie teilzunehmen.

Radon und Gesundheit:

Radon ist ein radioaktives Gas, das durchschnittlich für den größten Anteil der Strahlenexposition der Bevölkerung in Österreich verantwortlich ist. Eine hohe Konzentration von Radon kann sich negativ auf die Gesundheit des Menschen auswirken. Es ist nach dem Rauchen die zweihäufigste Ursache für Lungenkrebs in Österreich.

Radon wird vorwiegend im Boden freigesetzt und kann sich in Innenräumen ansammeln. Die Radonbelastung hängt unter anderem vom geologischen Untergrund, der Bodenbeschaffenheit und dem Gebäudezustand ab. In einigen Gebieten Österreichs, insbesondere in Radonschutzgebieten, ist aufgrund der Beschaffenheit des Untergrundes mit erhöhten Radonkonzentrationen zu rechnen. Verschiedene Schutzmaßnahmen können dazu beitragen, die Radonbelastung in Gebäuden zu verringern und die Gesundheit der Bewohner*innen zu schützen.

Zweck der Studie:

Zahlreiche internationale Studien weisen darauf hin, dass sich die Aktivitätskonzentration von Radon in Innenräumen aufgrund äußerer Umwelteinflüsse wie Außentemperatur oder Luftdruck verändern kann. Es wurde festgestellt, dass einige Gebäude spezielle jahreszeitliche Verhaltensmuster aufweisen, häufig mit erhöhten Radon-Aktivitätskonzentrationen in den Wintermonaten und geringerer Aktivität im Sommer.

Die Ermittlung der mittleren jährlichen Radonkonzentration in Gebäuden erfordert im Allgemeinen eine Langzeitmessung der Konzentration über einen Zeitraum von mehreren Monaten. Aufgrund der möglichen gesundheitlichen Folgen von Radon ist eine rasche Ermittlung der durchschnittlichen Radonkonzentration in Privathaushalten erstrebenswert. Diese Studie soll dabei Auskunft geben, inwieweit Kurzzeitmessungen zur Ermittlung der mittleren jährlichen Radonkonzentration herangezogen werden können bzw. welche Faktoren für saisonale Konzentrationsschwankungen berücksichtigt werden müssen.

Vorgehensweise der Studie:

In einigen österreichischen Privathaushalten sollen die Radon-Aktivitätskonzentrationen mittels **Langzeit- und Kurzzeitmessungen** ermittelt werden.

Zur Ermittlung der mittleren jährlichen Radonkonzentration werden pro Haushalt mindestens zwei kleine passive Kernspur-Detektoren verwendet, welche die radioaktive Strahlung über einen Zeitraum von **sechs Monaten** (Jänner bis Juni) aufnehmen. Die Detektoren benötigen keine Stromversorgung und werden nach der Exposition im Labor ausgewertet.

Seite 1 von 6

Um die zeitliche Variation der Radon-Aktivitätskonzentration aufzuzeichnen, werden pro Haushalt **zwei Kurzzeit-Messungen** mittels aktiven, elektronischen Radon-Messinstrumenten über einen Zeitraum von **jeweils etwa drei Wochen** durchgeführt. Die erste Kurzzeit-Messung erfolgt während der Heizperiode (November bis März). Die zweite Kurzzeitmessung wird nach der Heizperiode zwischen April und Juni durchgeführt. Hierfür werden die Radonmessgeräte RadonEye RD200, AlphaGUARD bzw. AlphaE verwendet, welche nach dem Messprinzip einer Ionisationskammer funktionieren.

Alle Messgeräte und Detektoren sind für die Bewohner*innen ungefährlich, leise und senden selbst keine radioaktive Strahlung aus.

Das Messgerät und die zwei Detektoren sollen in **Aufenthaltsräumen im Erdgeschoß** – vorzugsweise in Wohn- und Schlafräumen – aufgestellt werden. Falls vorhanden, sind nicht-unterkellerte, erdberührte Aufenthaltsräume (z.B. im Kellergeschoß) vorzuziehen. Die Detektoren und Messinstrumente sollen an einem Ort platziert werden, der

- nicht direkt neben einem Fenster liegt und an dem keine Zugluft herrscht,
- nicht direkt an einer Wand liegt (mindestens 10 cm Abstand),
- nicht stark erwärmt wird (durch direkte Sonneneinstrahlung oder Heizung),
- sich in normaler Atemhöhe befindet (1 m bis 2 m),
- unzugänglich für Kleinkinder und Haustiere ist,
- keine kondensierende Feuchtigkeit aufweist.

Das individuelle Nutzungsverhalten der Räume soll während der Dauer der Messungen aufrecht erhalten bleiben (Lüftungs- und Heizgewohnheiten, Raumnutzungszeiten, etc.)

Neben der Aufzeichnung der Radon-Aktivitätskonzentration werden auch Gebäude- und Umweltdaten (Baujahr, Haustyp, Baumaterial, etc.), Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und Temperatur miterhoben.

Vorhersehbare Risiken der Studie: Keine.

Die Studie wird geleitet von:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Josef Maringer, Atominstitut, Technische Universität Wien, Stadionallee 2, 1020 Wien

Die Studie wird durchgeführt von:

Marius Blum, BSc, Masterarbeit im Rahmen des Masterstudiums Physikalische Energie- und Messtechnik, Technische Universität Wien

██████████ Projektarbeit im Rahmen des Masterstudiums Technische Physik, Technische Universität Wien

██████████ Bachelorarbeit im Rahmen des Bachelorstudiums Technische Physik, Technische Universität Wien

██████████ Projektarbeit im Rahmen des Masterstudiums Physikalische Energie- und Messtechnik, Technische Universität Wien

Nutzen für Teilnehmer*innen und Dritte: Die gemessenen Radon-Aktivitätskonzentrationen geben Auskunft über die Radonbelastung in den untersuchten Haushalten. Dadurch können Rückschlüsse auf eine mögliche gesundheitliche Gefährdung der Bewohner*innen gezogen werden bzw. festgestellt werden, ob etwaige Radonschutzmaßnahmen zu treffen sind.

Kosten: Aufgrund der Strom- bzw. Akku-betriebenen Messgeräte ist mit einem Energieverbrauch von insgesamt weniger als 2 kWh über die volle Messdauer (2 mal 3 Wochen) zu rechnen. Dieser Verbrauch entspricht laut den aktuellen Strompreisen Stromkosten in der Höhe von etwa 0,40 € bis 1,50 €. Auf Wunsch des/der Teilnehmer*in können diese Kosten refundiert werden.

Datenschutzmaßnahmen: Die erhobenen Daten werden im Einklang mit der Datenschutzgrundverordnung behandelt. Die Daten werden ausschließlich für die oben beschriebenen Forschungsziele genutzt.

Die Teilnahme an dieser Studie erfolgt freiwillig. Studienteilnehmer*innen können zu jeder Zeit die Einwilligung der Studienteilnahme ohne Angabe von Gründen zurückziehen. Die Ergebnisse der Messungen in der eigenen Wohnung werden den Studienteilnehmer*innen bekanntgegeben. Die ausgewerteten Ergebnisse der Studie werden in akademisch-wissenschaftlichen Arbeiten in anonymisierter Form verwendet und veröffentlicht, sodass keinerlei Rückschlüsse auf die Messorte gezogen werden können.

Fragen zur Studie und zum Schutz der Rechte der Teilnehmer*innen: Sollten Sie Fragen, Vorschläge oder Beschwerden haben, wenden Sie sich bitte an:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Josef Maringer

Tel: [REDACTED]

E-Mail: [REDACTED]

Marius Blum, BSc

Tel: [REDACTED]

E-Mail: [REDACTED]

[REDACTED]

Tel: [REDACTED]

E-Mail: [REDACTED]

[REDACTED]

Tel: [REDACTED]

E-Mail: [REDACTED]

[REDACTED]

Tel: [REDACTED]

E-Mail: [REDACTED]

Ihr Einverständnis: Falls Sie an der Studie teilnehmen möchten, bitten wir Sie, die nachfolgende Einverständniserklärung genau durchzulesen. Mit Ihrer Unterschrift bestätigen Sie, dass

- Sie an der Studie teilnehmen wollen,
- die erhobenen Daten für Forschungszwecke ausgewertet werden dürfen,
- diese in anonymer Form gespeichert werden,
- Sie wissen, dass die Teilnahme an der Studie freiwillig ist und die Zustimmung zur Teilnahme jederzeit und ohne Angaben von Gründen widerrufen werden kann.

Einverständniserklärung zur Mitwirkung an der wissenschaftlichen Studie

„Untersuchung der Radonaktivitätskonzentration in Privathaushalten“

Name, Adresse und Kontaktdaten des/der Studienteilnehmer(s)*in:

Ich wurde von der verantwortlichen Person für die oben genannte Studie vollständig über Wesen, Bedeutung und Tragweite der Studie aufgeklärt. Ich habe das Informationsschreiben gelesen und verstanden. Ich hatte die Möglichkeit, Fragen zu stellen. Ich habe die Antworten verstanden und akzeptiere sie. Ich bin über die mit der Teilnahme an der Studie verbundenen möglichen Risiken und Nutzen informiert.

Ich hatte ausreichend Zeit, mich zur Teilnahme an der Studie zu entscheiden und weiß, dass die Teilnahme freiwillig ist. Ich wurde darüber informiert, dass ich jederzeit und ohne Angabe von Gründen diese Zustimmung widerrufen kann, ohne dass dadurch Nachteile für mich entstehen.

Mir ist bekannt, dass meine Daten anonym gespeichert und ausschließlich für wissenschaftliche Zwecke verwendet werden.

Ich habe eine Kopie des Informationsschreibens und dieser Einverständniserklärung erhalten. Ich erkläre hiermit meine freiwillige Teilnahme an dieser Studie.

Ort, Datum

Unterschrift des/der Studienteilnehmer(s)*in

Unterschrift des Studienleiters

Seite 4 von 6

Im nachfolgenden Text finden Sie Informationen zum Thema Radon, sowie Links zu weiteren Informationsquellen

Was ist Radon?

Radon und seine Zerfallsprodukte sind mit durchschnittlich 2,5 mSv für den größten Anteil (ca. 54%) der jährlichen Strahlenexposition einer Person in Österreich verantwortlich. Radon ist ein natürlich vorkommendes radioaktives chemisches Element und zählt zu den Edelgasen. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird unter Radon das Isotop Radon-222 (Rn-222) verstanden. Es entsteht durch den natürlichen radioaktiven Zerfall von Uran, das überall in der Welt in vielen Gesteinen und mineralischen Baumaterialien in unterschiedlichen Mengen vorkommt.

Das Radongas wird aus allen uranhaltigen Materialien im Boden freigesetzt, diffundiert und strömt dabei aus Spalten, Poren und Rissen und gelangt so in die Gebäudeluft, wo es sich in Innenräumen ansammeln kann.

Durch den radioaktiven Zerfall des Radons entstehen Folgeprodukte, die ebenfalls radioaktiv sind. Werden die Folgeprodukte eingeatmet, können sie in der Lunge zerfallen und dort radioaktive Strahlung aussenden. Die Strahlung kann dabei Zellen im Lungengewebe schädigen und dadurch langfristig Lungenkrebs verursachen.

Radon kann man weder sehen, noch riechen oder schmecken, weshalb für die Detektion spezielle Messgeräte zum Einsatz kommen.

Radon-Aktivitätskonzentration (Bq/m³)

Die Einheit Becquerel (Bq) beschreibt die mittlere Anzahl an Atomkerne, welche in einer Sekunde zerfallen. Eine Radon-Aktivitätskonzentration von 300 Bq/m³ bedeutet, dass durchschnittlich 300 Radon-Atomkerne in einem Kubikmeter Luft pro Sekunde zerfallen und dabei ionisierende Strahlung aussenden.

Referenzwert

Das Bundesgesetz über Maßnahmen zum Schutz vor Gefahren durch ionisierende Strahlung (Strahlenschutzgesetz 2020 – StrSchG 2020) dient zur Umsetzung der Strahlenschutzgrundnormen-Richtlinie 2013/59/Euratom der EU. Es legt für die Radonkonzentration den Referenzwert von 300 Bq/m³ im Jahresmittel fest.

Liegt die durchschnittliche Radon-Aktivitätskonzentration über dem Referenzwert, werden Sanierungsmaßnahmen in bestehenden Gebäuden empfohlen. Bei Neubauten soll der Referenzwert deutlich unterschritten werden. Schätzungsweise weisen etwa 10 % aller Haushalte in Österreich Radon-Aktivitätskonzentrationen über 300 Bq/m³ auf.

Schwankungen der Radon-Aktivitätskonzentration in Innenräumen

Die Radon-Aktivitätskonzentration in Gebäuden ist von vielen Faktoren wie Untergrund, Bausubstanz (Dichtheit im Fundamentbereich bzw. erdberührende Wände), Bauweise, Unterkellerung, dem individuellen Nutzungsverhalten, Lüftungsgewohnheiten, klimatische Bedingungen, etc. abhängig. Aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren weisen die Radonkonzentrationen zeitliche und räumliche Schwankungen auf.

Weiterführende Informationen zum Thema Radon

<https://www.radon.gv.at>

https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/strahlenschutz/radon.html

<https://www.ages.at/umwelt/radioaktivitaet/radon>

https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/strahlenschutz/recht/radonschutzverordnung.html

https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/strahlenschutz/recht/eu_richtlinie.html

<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20011323>

https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/einfuehrung/einfuehrung_node.html

10.2 Studien-Fragebogen

Fragebogen zur Radonmessung	
Vorname:	Nachname:
Straße:	
Ort:	Postleitzahl:
Email:	
Telefon:	

Fragen zum Gebäude

1. Gesamtzahl der Wohneinheiten:

1 2 3 Mehr als 3

2. Nutzung des Gebäudes:

Ein-/Zweifamilienhaus Wohnung Bauernhaus

Sonstiges:

3. Gebäudetyp:

Konventionelle Bauweise Niedrigenergiehaus Passivhaus

Unbekannt Sonstiges:

4. Fertigstellung des Hauses:

Vor 1919 1919-1944 1945-1970

1971-2000 Nach 2000 Unbekannt

Baujahr (falls bekannt):

5. Hanglage:

Ja Nein

6. Unterkellerung des Hauses:

Ganz

Teilweise

Nicht

7. Fundamenttyp:

Fundamentplatte durchgehend

Fundamentplatte teilweise

Streifenfundament

Kein Fundament

Unbekannt

8. Hauptbaumaterial des Fundaments:

Beton

Ziegel

Sand/Erde

Unbekannt

Sonstiges:

9. Hauptbaumaterial der erdberührten Wände:

Beton

Ziegel

Stein

Unbekannt

Sonstiges:

10. Hauptbaumaterial der Wände:

Beton

Ziegel

Stein

Unbekannt

Holz

Sonstiges:

11. Dichte der Fenster:

Sehr dicht

Dicht

Wenig dicht

Unbekannt

12. Überwiegende Art der Heizung:

Hauszentralheizung Elektro Einzelofen
Etagenheizung Mechanische Wohnraumbelüftung
Sontiges:

13. Gibt es bereits bestehende Radonvorsorgemaßnahmen im Haus?:

Ja Nein Unbekannt

Wenn ja, welche?

14. Wurden Gebäude-Sanierungen durchgeführt?:

Nein Unbekannt
Radonsanierung Jahr (falls bekannt):
Thermische Sanierung Jahr (falls bekannt):

15. Frühere Radonmessungen:

Nein Unbekannt
Ja Jahr (falls bekannt):

16. Personen im Haushalt:

Erwachsene: Kinder (unter 15 Jahre):

Fragen zu den Messräumen

<u>1.Kurzzeitmessung:</u>		
Raum-Nr: <input style="width: 100%;" type="text"/>	Messbeginn: <input style="width: 100%;" type="text"/>	Messende: <input style="width: 100%;" type="text"/>
<u>2.Kurzzeitmessung:</u>		
Raum-Nr: <input style="width: 100%;" type="text"/>	Messbeginn: <input style="width: 100%;" type="text"/>	Messende: <input style="width: 100%;" type="text"/>

<u>Langzeitmessung:</u>		
Anzahl der Räume: <input style="width: 100%;" type="text"/>	Messbeginn: <input style="width: 100%;" type="text"/>	Messende: <input style="width: 100%;" type="text"/>
Raum-Nr: <input style="width: 100%;" type="text"/>	Dosimeter-Nr: <input style="width: 100%;" type="text"/>	
Raum-Nr: <input style="width: 100%;" type="text"/>	Dosimeter-Nr: <input style="width: 100%;" type="text"/>	
Raum-Nr: <input style="width: 100%;" type="text"/>	Dosimeter-Nr: <input style="width: 100%;" type="text"/>	
Raum-Nr: <input style="width: 100%;" type="text"/>	Dosimeter-Nr: <input style="width: 100%;" type="text"/>	
Raum-Nr: <input style="width: 100%;" type="text"/>	Dosimeter-Nr: <input style="width: 100%;" type="text"/>	
Raum-Nr: <input style="width: 100%;" type="text"/>	Dosimeter-Nr: <input style="width: 100%;" type="text"/>	

Raum-Nr: <input style="width: 50px;" type="text"/>		
Dosimeter-Nr: <input style="width: 95%; height: 30px;" type="text"/>		
<u>Bezeichnung des Raumes</u>	<u>Stockwerk</u>	<u>Raum erdberührt?</u>
Wohnzimmer <input type="checkbox"/>	Kellergeschoss <input type="checkbox"/>	Ja <input type="checkbox"/>
Schlafzimmer <input type="checkbox"/>	Erdgeschoss <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
Wohnküche <input type="checkbox"/>	1. Stock <input type="checkbox"/>	
Esszimmer <input type="checkbox"/>	Stockwerk: <input style="width: 50px;" type="text"/>	
Sonstiges: <input style="width: 150px;" type="text"/>		
Sonstige Bemerkungen: <input style="width: 95%; height: 40px;" type="text"/>		

Lüftungsverhalten im Raum

Wie oft wird der betreffende Raum täglich gelüftet?

Nie 1-2 Mal am Tag 3-5 Mal am Tag Öfter

Unregelmäßig/Sonstiges:

Wie lange wird der betreffende Raum schätzungsweise gelüftet?

Sonstige Bemerkungen:

Seite