



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Unterschrift des Betreuers

DIPLOMARBEIT

Radon-Bodengasmessungen in einer geologisch vielseitigen Region als Basis zur Verbesserung der Vorhersage von Gebieten erhöhten Radonpotentials

Ausgeführt am

Atominstitut
der Technischen Universität Wien
und
Low-Level Counting Laboratory Arsenal
der Universität für Bodenkultur Wien

unter der Anleitung von
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Josef Maringer

durch

Franz Kabrt BSc
0507074

Datum

Unterschrift (Student)

Erklärung zur Verfassung der Arbeit

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst habe, dass ich die verwendeten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben habe und dass ich die Stellen der Arbeit - einschließlich Tabellen, Karten und Abbildungen, die anderen Werken oder dem Internet im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Wien, am

(Franz Kabrt)

Zusammenfassung

Radon ist ein radioaktives Edelgas und nach dem Rauchen der häufigste Grund an Lungenkrebs zu Erkranken. Das Risiko einer Erkrankung ist proportional zur ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration in Innenräumen. Das Radonpotential einer Region stellt den Erwartungswert dieser dar. Zur Verbesserung der Bestimmung des Radonpotentials wurden in Gemeinden der Steiermark verschiedene Messungen durchgeführt, um einen breiten Datensatz zu erheben.

An 100 Orten wurden jeweils drei Einzelmessungen der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration in der Bodenluft und der Permeabilität des Bodens durchgeführt. Darüber hinaus wurde an den Messpunkten die Ortsdosisleistung erhoben und Bodenproben genommen, welche auf die Aktivitätskonzentrationen natürlicher Radionuklide untersucht wurden. Während den beiden Untersuchungszeiträumen wurden Langzeitmesstellen eingerichtet. Diese zeichneten den zeitlichen Verlauf der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen auf. Die gesammelten Ergebnisse werden verglichen und auf Abhängigkeiten untereinander untersucht.

Die verschiedenen Messgrößen zeigen teilweise eine Abhängigkeit untereinander und von der Geologie. So ist es möglich aus geologischen Verhältnissen einer Region erste Hinweise auf vorkommende ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen zu erlangen und zielgerecht weitere Maßnahmen zu treffen. Weiters kann innerhalb eines Gebietes durch geologische Aspekte eine Verteilung der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen abgeschätzt werden, um Orte mit hohen Werten ausfindig zu machen. Während des Projekts wurden von der Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit ^{222}Rn -Innenraum-Aktivitätskonzentrationen gemessen. Deren Auswertung und der Vergleich mit den erhobenen Messergebnissen werden einen weiteren wichtigen Beitrag zur Bestimmung des Radonpotentials liefern.

Abstract

Radon is a radioactive noble gas and is after smoking the highest cause of lung cancer. The risk of an incidence is proportional to the ^{222}Rn indoor activity concentration. The radon potential of an area gives back the expected concentration. Different measurements were carried out in an area in Styria collecting detailed data, to improve the prediction of the radon potential.

At 100 sites the radon soil gas activity concentration and the soil permeability were measured, each with three single measurements. Furthermore the local dose rate was determined and soil samples were taken at each site to determine the activity concentration of natural radionuclides. During two investigation periods, long-term soil gas radon measurements were made, to study the chronological sequence of the radon activity concentration. All the results are compared and investigated for correlations among each other.

The different measurements partially show dependencies among each other and on the geology. Knowing the area's geologic characteristics gives first references to occurring ^{222}Rn activity concentrations. So further actions be chosen properly. Within an area the distribution of the ^{222}Rn activity concentration can be estimated on the basis of geological aspects to find hot spots. At the same time of the project ^{222}Rn indoor activity concentrations were measured by the Agency for Health and Food Safety. The analysis of these and the comparison with the taken measurements will make an important contribution to the prediction of the radon potential.

Danksagung

Mein aufrichtiger Dank gilt Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Josef Maringer für die fachkundige Betreuung dieser Arbeit und die darüber hinausgehende Unterstützung. Weiters möchte ich mich bei ao. Univ.-Prof. Mag. Dr. Harry Friedmann für seine umstandslose Hilfestellung bedanken. Ich danke herzlich meinen liebgewonnenen Kollegen des LLC-Labor Arsenal, zu denen neben meinem Betreuer auch Andreas Baumgartner, Claudia Seidel, Fabian Rechberger, Michael Schuff und Michael Stietka gehören, für die freundliche Aufnahme in die Arbeitsgemeinschaft, für die Unterstützung und die Förderung die sie mir zukommen haben lassen, sowie für die netten Stunden im Arsenal.

Weiters bin ich meinen Eltern und meiner Schwester für ihre bedingungslose Fürsorge, ihre Geduld und die finanzielle Ermöglichung meines Studiums dankbar. Ich danke meiner Partnerin Geli für ihre Motivation und Aufmunterung während des Studiums, für den uneingeschränkten Beistand den sie mir bietet, natürlich für ihre Liebenswürdigkeit und vor allem dafür, dass sie immer für mich da ist.

Neben den erwähnten Personen danke ich all meinen Freunden und meinen Verwandten, die mich auf meinem Lebensweg begleitet haben.

„Im Grunde sind es doch die Verbindungen mit Menschen, die dem Leben seinen Wert geben.“

Wilhelm von Humboldt

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Pilotprojekt	1
1.3. Ziele und Durchführung des Projekts in der Steiermark	2
1.4. Paper	3
I. Grundlagen	
2. Radioaktivität	11
2.1. Radioaktiver Zerfall	11
2.1.1. Alpha-Strahlung	13
2.1.2. Beta-Strahlung	14
2.1.3. Gamma-Strahlung	15
2.2. Verhalten ionisierender Strahlung von radioaktiven Prozessen in Materie	16
2.2.1. Geladene Teilchen	16
2.2.2. Photonen in Materie	17
2.3. Zerfallsgesetz	18
2.4. Aktivität	22
2.5. Dosis	23
3. Ursprung, Vorkommen und Eigenschaften von Radon	27
3.1. Eigenschaften	27
3.1.1. ²²² Radon in der Uran-Radium Zerfallsreihe	27
3.1.2. Emanation	29
3.1.3. Migration	29
3.1.4. Tiefenverteilung	29
3.2. Radonkonzentrationen in Gebäuden	31
3.2.1. Grenzwerte	31
3.2.2. Messungen in Innenräumen	32
3.3. Radonpotential	33
4. Wirkung von ionisierender Strahlung und im speziellen von Radon auf die Gesundheit	35
4.1. Durchschnittliche Strahlenexposition	35

4.2. Gesundheitsschädigende Wirkungen von ionisierender Strahlung	36
4.3. Beitrag von Radon zum Lungenkrebsrisiko	37
II. Methodik	
5. Untersuchung des Bodengases auf Radon	41
5.1. Probenahme des Bodengases	41
5.2. Alphaguard Messgerät	42
5.2.1. Kalibrierfaktor	43
5.2.2. Korrektur des Kalibrierfaktors	43
5.3. Auswertung	46
5.3.1. Korrektur der Sondentiefe	47
5.3.2. Messwert	47
5.3.3. Unsicherheit	47
5.4. Langzeitmessungen	48
6. Abschätzung der Permeabilität des Bodens	51
6.1. Permeabilität	51
6.2. Messung mittels Durchflussmesser und Manometer	52
6.3. Messung mittels Radon-Jok	52
7. Bodenproben, Ortsdosisleistung und Geologie	55
7.1. Bodenproben	55
7.2. Ortsdosisleistung	56
7.3. Koordinaten und Geologie	57
III. Ergebnisse	
8. Übersicht	61
8.1. Geographische und Geologische Daten der untersuchten Region	61
8.2. Ergebnisse im Gemeindegebiet Ganz	64
8.3. Ergebnisse im Gemeindegebiet Kapellen	70
8.4. Ergebnisse im Gemeindegebiet Langenwang	74
8.5. Ergebnisse im Gemeindegebiet Spital am Semmering	80
9. Auswertungen	87
9.1. ²²² Radon im Bodengas	87
9.2. Permeabilität des Bodens	92
9.3. Ortsdosisleistung	95
9.4. Radionuklide im Boden	96
9.5. Kartierung	100

9.6. Langzeitmessungen	102
9.7. Anpassung der Messwerte an den Verlauf der Langzeitmessungen	104
10. Diskussion und Ausblick	105
10.1. Durchführung der Bodengasmessungen	105
10.2. Ergebnisse der Bodengasmessungen	105
10.3. Vergleich der Messsysteme für die Permeabilität des Bodens	106
10.4. Korrelation der Messgrößen	107
10.5. Ergebnisse in Hinblick auf das Radonpotential	107
10.6. Ausblick	109
Literaturverzeichnis	111
IV. Anhang	
A. Präsentationsfolien des Kongresses in Prag	119
B. Kalibrierfaktor	127
C. Vergleich der verschieden feinen Geologieeinteilungen	129
D. Diagramme der Langzeitmessungen	133
E. Detaillierte Daten der Einzelmessungen	139

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Karlsruher Nuklidkarte (Matthias 2010).	12
2.2.	Zeitlicher Verlauf einer Menge von ^{222}Rn .	19
2.3.	τ mit dem Verlauf des Zerfalls und dem aufgespannten Rechteck.	20
2.4.	Beim Zerfall von ^{222}Rn in ^{218}Po stellt sich ein Gleichgewicht ein.	21
2.5.	Beim Zerfall von ^{214}Po in ^{210}Pb stellt sich kein Gleichgewicht ein.	22
2.6.	Abhängigkeit zwischen Wichtungsfaktor und Energie bei Neutronen (ICRP 2007).	25
3.1.	Zerfälle und Radionuklide der Uran-Radium-Reihe (Pajs 2007).	28
3.2.	Darstellung der relativen ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration in Abhängigkeit zur Tiefe (Kemski et al. 1996).	30
3.3.	Veranschaulichung der Freisetzung, Transportes und auftretender Aktivitätskonzentrationen von ^{222}Rn (Kemski et al. 2013).	32
3.4.	Österreichische Radonpotentialkarte (Friedmann 2013).	34
4.1.	Beiträge zur durchschnittlichen Strahlenbelastung eines Österreicherers in einem Jahr (Maringer et al. 2012).	35
4.2.	Erhöhung des Risikos einer Lungenkrebskrankung durch die ^{222}Rn Exposition in Wohnräumen (Darby et al. 2004).	38
5.1.	Prinzip der verlorenen Spitze (Fass 2004).	41
5.2.	Extraktion der Bodenluft.	42
5.3.	Alphaguards mit angesteckten Spritzen während einer Messung.	43
5.4.	System zur Langzeitmessung.	48
6.1.	Geräteaufbau zur Permeabilitätsmessung.	52
6.2.	Radon-Jok mit einem Gewicht.	53
7.1.	Stechbohrer beim Einschlagen.	55
7.2.	Gewonnene Probe mittels Stechbohrer.	56
7.3.	Die Szintillatorsonde bei der Messung.	56
8.1.	Lage der beprobten Gemeinden in Österreich.	61
8.2.	Geologische Karte der untersuchten Region.	63
8.3.	Messpunkt im nördlichen Teil von Ganz.	65
8.4.	Messpunkte im mittleren Teil von Ganz.	67
8.5.	Messpunkt im südlichen Teil von Ganz.	69

Abbildungsverzeichnis

8.6.	Messpunkte im östlichen Teil von Kapellen.	71
8.7.	Messpunkte im westlichen Teil von Kapellen.	73
8.8.	Messpunkte im nördlichen Teil von Langenwang.	75
8.9.	Messpunkte im nordwestlichen Teil von Langenwang.	77
8.10.	Messpunkte im südlichen Teil von Langenwang.	79
8.11.	Messpunkte im südöstlichen Teil Spital am Semmering.	81
8.12.	Messpunkte im östlichen Teil von Spital am Semmering.	83
8.13.	Messpunkte im westlichen Teil von Spital am Semmering.	85
9.1.	Boxplot der ^{222}R adon-Aktivitätskonzentrationen in den verschiedenen geologischen Kategorien.	90
9.2.	Relative Summenhäufigkeit der ^{222}R adon-Aktivitätskonzentrationen.	91
9.3.	Boxplot der Permeabilität in den verschiedenen geologischen Kategorien.	92
9.4.	Relative Summenhäufigkeit der Permeabilität.	93
9.5.	Vergleich von Permeabilität mit ^{222}R adon-Aktivitätskonzentration.	93
9.6.	Vergleich der Messwerte des Radon-Joks mit herkömmlichen Messsystem.	94
9.7.	Vergleich von Ortsdosisleistung und ^{222}R adon-Aktivitätskonzentration.	95
9.8.	Vergleich zwischen den Aktivitätskonzentrationen von ^{226}Ra dium und ^{238}U ran.	96
9.9.	Vergleich zwischen den Aktivitätskonzentrationen von ^{222}R adon und ^{238}U ran und der Permeabilität.	97
9.10.	Vergleich zwischen den Aktivitätskonzentrationen von ^{222}R adon und ^{226}Ra dium und der Permeabilität.	98
9.11.	Vergleich zwischen ^{222}R adon und ^{238}U ran und der Permeabilität mit Radon-Jok.	98
9.12.	Vergleich zwischen ^{222}R adon und ^{226}Ra dium und der Permeabilität mit Radon-Jok.	99
9.13.	Eine interpolierte Karte der ^{222}R adon-Aktivitätskonzentrationen in der untersuchten Region.	101
9.14.	Messpunkte und Geologie innerhalb des Untersuchungsgebietes.	101
9.15.	Zeitlicher Verlauf der ^{222}R adon-Aktivitätskonzentration und des Luftdruckes an Messort 40.	102
9.16.	Zeitlicher Verlauf der ^{222}R adon-Aktivitätskonzentration und des Luftdruckes an Messort 40 mit veränderter Skalierung der zeitlichen Achsen.	103
D.1.	Zeitliche Verlauf der ^{222}R adon-Aktivitätskonzentration und der Luftfeuchtigkeit an Messort 40.	134
D.2.	Zeitliche Verlauf der ^{222}R adon-Aktivitätskonzentration und des Luftdruckes an Messort 42.	135
D.3.	Zeitlicher Verlauf der ^{222}R adon-Aktivitätskonzentration und der Luftfeuchtigkeit an Messort 42.	136
D.4.	Zeitliche Verlauf der ^{222}R adon-Aktivitätskonzentration und des Luftdruckes an Messort 43.	137

D.5. Zeitliche Verlauf der ²²²Radon-Aktivitätskonzentration und der Luftfeuchtigkeit
an Messort 43. 138

Tabellenverzeichnis

2.1.	Ausgangs und Endnuklide der natürlichen Zerfallsreihen.	12
2.2.	Wichtungsfaktor diverser Strahlungsarten (ICRP 2007).	25
2.3.	Werte für w_T (ICRP 2007).	26
3.1.	Eigenschaften der drei häufigsten Radonisotope.	27
3.2.	Zerfälle ab $^{226}\text{Radium}$	28
3.3.	Diffusions-weiten und Koeffizienten für verschiedene Böden (Kemski et al. 1996).	30
4.1.	Werte für den Risikoanstieg einer Lungenkrebserkrankung durch eine $^{222}\text{Radon}$ Exposition mit dem, nach den Varianzen gewichtete, Mittel und die, die Schwankungen der Aktivitätskonzentration miteinbeziehenden, Schätzung (WHO 2009).	37
4.2.	Wahrscheinlichkeit mit 75 Jahren an Lungenkrebs zu erkranken (Darby et al. 2004).	38
5.1.	Aktivitätskonzentrationen und Dauer von verschiedenen Spülungen.	44
5.2.	Auflistung der Geräte und deren Kalibrierfaktoren aus früheren Messungen.	44
5.3.	Liste der gemessenen Aktivitätskonzentrationen mit den sich daraus ergebenden Kalibrierfaktoren.	46
5.4.	Mittelwert, Standardabweichung und Unsicherheit des berechneten Kalibrierfaktors.	46
6.1.	Einteilung der Permeabilität.	51
8.1.	Legende zu den in Abbildung 8.2 dargestellten geologischen Einheiten.	62
8.2.	Ergebnisse des in Abbildung 8.3 gezeigten Messpunktes.	64
8.3.	Ergebnisse der in Abbildung 8.4 gezeigten Messpunkte.	66
8.4.	Ergebnisse des in Abbildung 8.5 gezeigten Messpunktes.	68
8.5.	Ergebnisse der in Abbildung 8.6 gezeigten Messpunkte.	70
8.6.	Ergebnisse der in Abbildung 8.7 gezeigten Messpunkte.	72
8.7.	Ergebnisse der in Abbildung 8.8 gezeigten Messpunkte.	74
8.8.	Ergebnisse der in Abbildung 8.9 gezeigten Messpunkte.	76
8.9.	Ergebnisse der in Abbildung 8.10 gezeigten Messpunkte.	78
8.10.	Ergebnisse der in Abbildung 8.11 gezeigten Messpunkte.	80
8.11.	Ergebnisse der in Abbildung 8.12 gezeigten Messpunkte.	82
8.12.	Ergebnisse der in Abbildung 8.13 gezeigten Messpunkte.	84
9.1.	Zusammenfassung der geologischen Einheiten.	88
9.1.	Zusammenfassung der geologischen Einheiten.	89

Tabellenverzeichnis

9.2.	Vergleich der gemessenen und der zeitlich angepassten ²²² Radon-Aktivitätskonzentrationen.	104
B.1.	Details zur Berechnung des Kalibrierfaktors für 150 ml.	128
C.1.	Mittelwerte, Standardabweichung und Unsicherheiten der feinen Geologie.	130
C.2.	Mittelwerte, Standardabweichung und Unsicherheiten der mittleren Geologie.	130
C.3.	Mittelwerte, Standardabweichung und Unsicherheiten der groben Geologie.	131
E.1.	Detaillierte Daten von Standort 1.	140
E.2.	Detaillierte Daten von Standort 2.	140
E.3.	Detaillierte Daten von Standort 3.	141
E.4.	Detaillierte Daten von Standort 4.	141
E.5.	Detaillierte Daten von Standort 5.	142
E.6.	Detaillierte Daten von Standort 6.	142
E.7.	Detaillierte Daten von Standort 7.	143
E.8.	Detaillierte Daten von Standort 8.	143
E.9.	Detaillierte Daten von Standort 9.	144
E.10.	Detaillierte Daten von Standort 10.	144
E.11.	Detaillierte Daten von Standort 11.	145
E.12.	Detaillierte Daten von Standort 12.	145
E.13.	Detaillierte Daten von Standort 13.	146
E.14.	Detaillierte Daten von Standort 14.	146
E.15.	Detaillierte Daten von Standort 15.	147
E.16.	Detaillierte Daten von Standort 16.	147
E.17.	Detaillierte Daten von Standort 17.	148
E.18.	Detaillierte Daten von Standort 18.	148
E.19.	Detaillierte Daten von Standort 19.	149
E.20.	Detaillierte Daten von Standort 20.	149
E.21.	Detaillierte Daten von Standort 21.	150
E.22.	Detaillierte Daten von Standort 22.	150
E.23.	Detaillierte Daten von Standort 23.	151
E.24.	Detaillierte Daten von Standort 24.	151
E.25.	Detaillierte Daten von Standort 25.	152
E.26.	Detaillierte Daten von Standort 26.	152
E.27.	Detaillierte Daten von Standort 27.	153
E.28.	Detaillierte Daten von Standort 28.	153
E.29.	Detaillierte Daten von Standort 29.	154
E.30.	Detaillierte Daten von Standort 30.	154
E.31.	Detaillierte Daten von Standort 31.	155
E.32.	Detaillierte Daten von Standort 32.	155
E.33.	Detaillierte Daten von Standort 33.	156

E.34.	Detaillierte Daten von Standort 34.	156
E.35.	Detaillierte Daten von Standort 35.	157
E.36.	Detaillierte Daten von Standort 36.	157
E.37.	Detaillierte Daten von Standort 37.	158
E.38.	Detaillierte Daten von Standort 38.	158
E.39.	Detaillierte Daten von Standort 39.	159
E.40.	Detaillierte Daten von Standort 40.	159
E.41.	Detaillierte Daten von Standort 41.	160
E.42.	Detaillierte Daten von Standort 42.	160
E.43.	Detaillierte Daten von Standort 43.	161
E.44.	Detaillierte Daten von Standort 44.	161
E.45.	Detaillierte Daten von Standort 45.	162
E.46.	Detaillierte Daten von Standort 46.	162
E.47.	Detaillierte Daten von Standort 47.	163
E.48.	Detaillierte Daten von Standort 48.	163
E.49.	Detaillierte Daten von Standort 49.	164
E.50.	Detaillierte Daten von Standort 50.	164
E.51.	Detaillierte Daten von Standort 51.	165
E.52.	Detaillierte Daten von Standort 52.	165
E.53.	Detaillierte Daten von Standort 53.	166
E.54.	Detaillierte Daten von Standort 54.	166
E.55.	Detaillierte Daten von Standort 55.	167
E.56.	Detaillierte Daten von Standort 56.	167
E.57.	Detaillierte Daten von Standort 57.	168
E.58.	Detaillierte Daten von Standort 58.	168
E.59.	Detaillierte Daten von Standort 59.	169
E.60.	Detaillierte Daten von Standort 60.	169
E.61.	Detaillierte Daten von Standort 61.	170
E.62.	Detaillierte Daten von Standort 62.	170
E.63.	Detaillierte Daten von Standort 63.	171
E.64.	Detaillierte Daten von Standort 64.	171
E.65.	Detaillierte Daten von Standort 65.	172
E.66.	Detaillierte Daten von Standort 66.	172
E.67.	Detaillierte Daten von Standort 67.	173
E.68.	Detaillierte Daten von Standort 68.	173
E.69.	Detaillierte Daten von Standort 69.	174
E.70.	Detaillierte Daten von Standort 70.	174
E.71.	Detaillierte Daten von Standort 71.	175
E.72.	Detaillierte Daten von Standort 72.	175
E.73.	Detaillierte Daten von Standort 73.	176
E.74.	Detaillierte Daten von Standort 74.	176

Tabellenverzeichnis

E.75.	Detaillierte Daten von Standort 75.	177
E.76.	Detaillierte Daten von Standort 76.	177
E.77.	Detaillierte Daten von Standort 77.	178
E.78.	Detaillierte Daten von Standort 78.	178
E.79.	Detaillierte Daten von Standort 79.	179
E.80.	Detaillierte Daten von Standort 80.	179
E.81.	Detaillierte Daten von Standort 81.	180
E.82.	Detaillierte Daten von Standort 82.	180
E.83.	Detaillierte Daten von Standort 83.	181
E.84.	Detaillierte Daten von Standort 84.	181
E.85.	Detaillierte Daten von Standort 85.	182
E.86.	Detaillierte Daten von Standort 86.	182
E.87.	Detaillierte Daten von Standort 87.	183
E.88.	Detaillierte Daten von Standort 88.	183
E.89.	Detaillierte Daten von Standort 89.	184
E.90.	Detaillierte Daten von Standort 90.	184
E.91.	Detaillierte Daten von Standort 91.	185
E.92.	Detaillierte Daten von Standort 92.	185
E.93.	Detaillierte Daten von Standort 93.	186
E.94.	Detaillierte Daten von Standort 94.	186
E.95.	Detaillierte Daten von Standort 95.	187
E.96.	Detaillierte Daten von Standort 96.	187
E.97.	Detaillierte Daten von Standort 97.	188
E.98.	Detaillierte Daten von Standort 98.	188
E.99.	Detaillierte Daten von Standort 99.	189
E.100.	Detaillierte Daten von Standort 100.	189

1. Einleitung

1.1. Motivation

Die durchschnittliche Strahlenexposition eines Österreicherers beträgt 4,61 mSv im Jahr. Davon sind 53,8 % auf die Inhalation von Radon und dessen radioaktive Folgeprodukte zurückzuführen (Maringer et al. 2012). Radon ist ein radioaktives Edelgas, das durch radioaktiven Zerfall von Radium entsteht. Es ist Teil der Uran-Radium-Zerfallsreihe, deren Radionuklide überall in der Erdkruste vorkommen. Aus dem Boden diffundiert Radon in Häuser, wo es zu hohen Radon Innenraumkonzentrationen kommen kann. Besonders tiefgelegene Teile des Hauses, wie der Keller sind davon betroffen, wodurch Personen, die sich in solchen Räumlichkeiten aufhalten, kontinuierlich Radon ausgesetzt werden. Durch Inhalation gelangt Radon in die Lunge, in welcher vor allem seine Folgeprodukte durch radioaktive Strahlung das Lungengewebe schädigen.

Laut WHO¹ ist Radon nach dem Rauchen die größte Ursache für Lungenkrebs. Die Erhöhung des Risikos einer Erkrankung steigt proportional mit der Exposition durch Radon. Es kann kein Schwellenwert gefunden werden, unter dem die Gefährdung verschwindet (WHO 2009).

Innerhalb des nationalen Österreichischen Radon Projekts (kurz ÖNRAP) wurden über 40 000 Innenraummessungen durchgeführt (Friedmann ÖNRAP). Mittels der Resultate wurde eine Radonpotentialkarte von Österreich erstellt, in die laufend neue Daten einfließen. Das Radonpotential gibt die erwartete Radon ²²²Radon-Aktivitätskonzentration in Innenräumen in einem bestimmten Gebiet an.

Innerhalb der Strahlenschutzrichtlinien der europäischen Union (Euratom 2013) wird auf die Radonexposition in Innenräumen eingegangen. Das Önrp Projekt, das in Kapitel 1.2 beschriebene Pilotprojekt und die hier vorgelegte Arbeit stellen wichtige Grundlagen für die Umsetzung des in Artikel 103 der EU-Richtlinie beschriebenen Radon-Maßnahmenplanes dar.

1.2. Pilotprojekt

2011 wurde in den drei oberösterreichischen Gemeinden Reichenau, Haibach und Ottenschlag im Mühlkreis im böhmischen Massiv ein Pilotprojekt durchgeführt (Ringer 2011). Diese Region wurde aufgrund der hohen Radonkonzentrationen die dort erwartet wurden gewählt. Innerhalb des Projekts wurden vom LLCL² Arsenal der BOKU³ Wien die ²²²Radon-Aktivitätskonzentrationen im Bodengas gemessen, die Permeabilität des Bodens erhoben und Bodenproben

¹World-Health-Organisation

²Low-Level-Counting-Labor

³Universität für Bodenkultur

1. Einleitung

genommen, welche im Labor gammaspektroskopisch analysiert wurden. Von der AGES⁴ wurden zeitgleiche Messungen der ²²²Radon-Aktivitätskonzentrationen in Innenräume organisiert. Weiters waren bei der Planung, Durchführung und Auswertung das Land Oberösterreich, Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft beziehungsweise Direktion Solziales und Gesundheit, Linz, die Universität Wien, Fakultät für Physik - Kernphysik, Wien und die Verwaltungsgemeinschaft Reichenau, Haibach und Ottenschlag im Mühlkreis beteiligt. Bei der Auswertung der Ergebnisse wurden die geologischen Bedingungen an den beprobten Stellen miteinbezogen.

Die ²²²Radon-Aktivitätskonzentrationen zeigte eine Abhängigkeit vom geologischen Untergrund und der Tiefe im Boden. In Gneis und Mylonit wurden die höchsten Werte gemessen (Seidel 2011). Ziel der Studie war es zu ermitteln, in welchem Ausmaß Daten flächendeckend und vollständig über eine Region vorhanden sein müssen, um ihr Radonpotential bestimmen zu können. In dem geologisch homogenen Untersuchungsgebiet des Pilotprojektes zeigte sich die Möglichkeit aus unvollständig vorhandenen Daten und unterschiedlich vorhandenen Informationen das Radonpotential bestimmen zu können. Jedoch musste dieses Ergebnis erst für ein Gebiet geologischer Diversität verifiziert werden, um allgemein gültige Erkenntnisse zu erhalten.

1.3. Ziele und Durchführung des Projekts in der Steiermark

So wurde, der Studie folgend, im Herbst 2012 und Frühjahr 2013 ein Projekt in einer geologisch vielseitigen Region in der Steiermark durchgeführt, um die Aussagen des Pilotprojektes auf ihre allgemeine Gültigkeit in Bezug auf die Geologie zu überprüfen. Schon in früheren Studien ist ein Zusammenhang zwischen der ²²²Radon-Aktivitätskonzentration und der Geologie belegt worden (Maringer et al. 2000, Maringer et al. 2001). Bei dem Gebiet handelt es sich um die Gemeinden Spital am Semmering, Langenwang, Ganz und Kapellen im Bezirk Mürzzuschlag, wobei die Gemeinde Kapellen aus dem Projekt ausgestiegen ist, weswegen nur Messergebnisse aus dem Herbst vorliegen. Informationsveranstaltungen für die Bevölkerung über Ablauf und Nutzen des Projektes wurden kurz vor Beginn der Probenahme im Herbst veranstaltet. In einem der Bezirke des untersuchten Gebietes lag das Radonpotential zwischen 201 und 400 Bq/m³ und in den anderen beiden Bezirken unter 200 Bq/m³.

Neben den gleichen Messungen wie im Vorgängerprojekt wurde auch die Ortsdosisleistung an den einzelnen Messpunkten bestimmt und bei der zweiten Messreihe für die Permeabilitätsmessungen des Bodens ein zusätzliches Gerät, der Radon-Jok verwendet. Zusätzlich wurden während der Zeit der Probenahme Langzeitmessstellen eingerichtet, die den zeitlichen Verlauf der ²²²Radon-Aktivitätskonzentration im Boden aufzeichneten. Ziel war im Allgemeinen die Sammlung von Daten, welche relevant für die Ermittlung des Radonpotentials sind. Deren Auswertung sollten allgemein gültige Aussagen zur Verbesserung der Radonpotentialvorhersage zulassen. Besonders der Einfluss von geologischen Bedingungen wurde im Zuge des Projektes untersucht.

Die in Teil II beschriebenen Messungen wurden vom LLCL Arsenal der BOKU Wien durch-

⁴Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit

geführt. Für die Innenraum Messungen war die AGES zuständig. Die Leitung des Projektes oblag ao. Univ.-Prof. Mag. Dr. Harry Friedmann von der Universität Wien⁵. Die finanziellen Mittel für das Projekt wurden vom Lebensministerium⁶ bereitgestellt.

1.4. Paper

Teile der Diplomarbeit wurden bei der „7th International Conference on Protection Against Radon at Home and at Work“ in Prag, Tschechische Republik, präsentiert, welche von 2. – 6. September 2013 stattgefunden hat. Im Zuge dessen wurde ein *paper* im Radiation Protection Dosimetry 2014 (doi: 10.1093/rpd/ncu086) nach einem *peer review* veröffentlicht. Auf den folgenden Seiten ist dieses *paper* eingefügt, während im Anhang A die Präsentationfolien für die Konferenz abgebildet sind.

This is a pre-copy-editing, author-produced PDF of an article accepted for publication in Radiation Protection Dosimetry 2014 following peer review. The definitive publisher-authenticated version doi: 10.1093/rpd/ncu086 is available online at: <http://rpd.oxfordjournals.org/cgi/content/full/ncu086?ijkey=xD3wANJnnDC7Mvn&keytype=ref>.

⁵Isotopenforschung und Kernphysik

⁶Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft

RADON SOIL GAS MEASUREMENTS IN A GEOLOGICAL VERSATILE REGION AS BASIS TO IMPROVE THE PREDICTION OF AREAS WITH A HIGH RADON POTENTIAL

Franz Kabrt^{1,2,*}, Claudia Seidel¹, Andreas Baumgartner¹, Harry Friedmann³, Fabian Rechberger¹, Michael Schuff¹ and Franz Josef Maringer^{1,2,4}

¹LLC-Laboratory Arsenal, BOKU—University of Natural Resources and Life Sciences Vienna, Faradaygasse 3, Arsenal 214, Vienna 1030, Austria

²Vienna University of Technology, Karlsplatz 13, Vienna 1040, Austria

³Nuclear Physics, University of Vienna, Währinger Straße 17, Vienna 1090, Austria

⁴BEV—Federal Office of Metrology and Surveying, Arltgasse 35, Vienna 1160, Austria

*Corresponding author: franz.kabrt@mailz.at

With the aim to predict the radon potential by geological data, radon soil gas measurements were made in a selected region in Styria, Austria. This region is characterised by mean indoor radon potentials of 130–280 Bq m⁻³ and a high geological diversity. The distribution of the individual measuring sites was selected on the basis of geological aspects and the distribution of area settlements. In this work, the radon soil gas activity concentration and the soil permeability were measured at 100 sites, each with three single measurements. Furthermore, the local dose rate was determined and soil samples were taken at each site to determine the activity concentration of natural radionuclides. During two investigation periods, long-term soil gas radon measurements were made to study the time dependency of the radon activity concentration. All the results will be compared and investigated for correlation among each other to improve the prediction of areas with high radon potential.

INTRODUCTION

The mean exposure of an Austrian citizen caused by radiation is 4.61 mSv y⁻¹. About 54 % thereof is due to the inhalation of the radioactive noble gas radon⁽¹⁾. Radon originates from the radioactive decay of uranium, which can be found all over the world in the earth's crust. From the ground radon diffuses into buildings, where, especially in lower floor levels, high indoor concentrations of the gas can occur. So, people are constantly exposed to radon and its decay products, which increases the risk of cancer by decaying in lungs after inhalation. According to the WHO⁽²⁾, radon is the second greatest cause of lung cancer after smoking. The risk increases proportionally with the exposure to radon. A threshold under which the increase of cancer risk disappears could not be found⁽²⁾. According to the ICRP⁽³⁾, the causal relationship between radon, its decay products and lung cancer has hitherto been far underestimated.

Within a national Austrian project, the ÖNRAP⁽⁴⁾, over 40 000 indoor measurements were conducted as basis. The results were taken to compile a radon potential map of Austria, in which new data are regularly integrated. The radon potential represents the anticipated year's mean radon indoor activity concentration of a living room in the ground floor. In the Austrian radon potential map, the mean values of areas are shown. So in 2011, in three Upper Austrian municipalities in the Bohemian Massif, which are situated in an area of a high radon potential, a pilot

project⁽⁵⁾ was arranged, in which ²²²Rn indoor and soil gas activity concentrations were measured. Furthermore, the soil permeabilities and soil samples were analysed. Additionally, the geological characteristics were taken into account analysing the radon activity concentration's behaviour. It was possible to carry out many measurements in a short period. The thereby generated results of the ²²²Rn soil gas activity concentration gave back a representative overview of the area's radon potential. 'Hot spots' with high ²²²Rn soil gas activity concentrations could be found⁽⁶⁾. The aim of the project was to predict the radon potential of an area on the base of different incomplete pieces of information, which did not cover the whole area and had partially high levels of uncertainty. The results showed that the prediction is possible with such data. The investigation was, however, carried out in a geological homogenous region, and so, a conclusion derived therefrom could, as of now, not be verified for a geologically versatile environment.

So, following the described project, a new one was executed in three Styrian municipalities, which lie in an area of a high geological diversity. Their location is shown on the maps in Figure 1. According to the Austrian radon potential map, in one municipality, ²²²Rn indoor activity concentrations between 201 and 400 Bq m⁻³ can be expected. In such areas indoor measurements in rooms, which are in close vicinity to the ground, are recommended by the Austrian Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management⁽⁷⁾. In the other two municipalities,

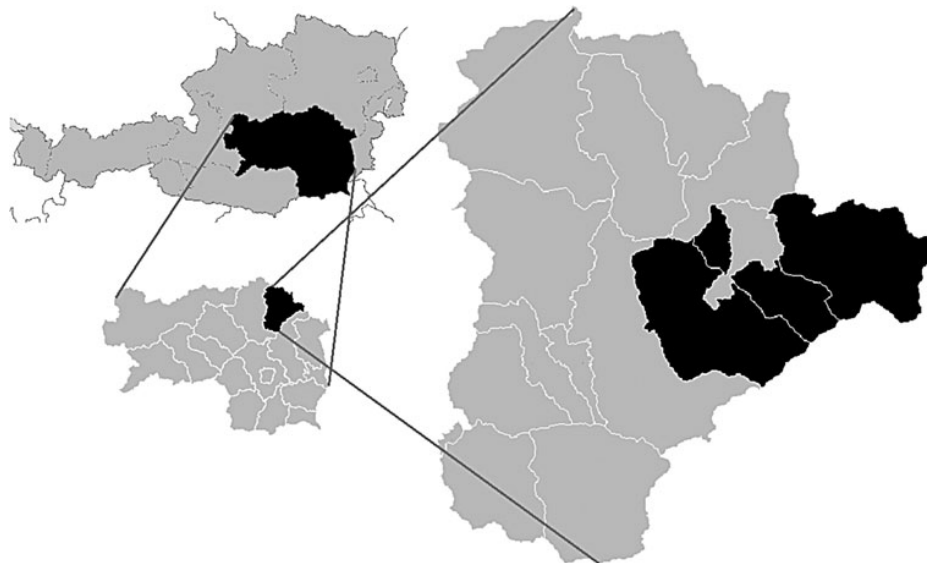


Figure 1. Maps of the investigated areas (Austria is in the top left, Styria in the bottom left and the three municipalities marked in the right).

the radon potential is $<200 \text{ Bq m}^{-3}$. The project was carried out in cooperation with the Low-Level Counting Laboratory Arsenal of the University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna, the University of Vienna and the Austrian Agency for Health and Food Safety.

MATERIALS AND METHODS

With the aim of the prediction of high radon potential areas, two measuring series were carried out in autumn 2012 and spring 2013. Altogether 100 sites were selected by geological aspects and the distribution of residential areas.

At each site three probes (1.6 m long and 12 mm diameter), at which pointy tips have been attached, were hammered up to 1.4 m into the ground. Afterwards, the tips were lowered deeper into the ground, using a rod, to create a 5-cm hole. Then soil gas was extracted from the probes with a 200-ml syringe. The first extracted volume was refused, because it mainly included fresh air, which had initially filled the probe. Afterwards, 100 ml of the second extracted volume, containing soil gas, was injected into measurement devices 'Alpha Guard' by Saphymo GmbH. Due to the fact, that the injected volume did not completely fill the detector volume of 620 ml, the results had to be multiplied using a calibration factor, which was determined before the measurements. The results from probes, which did not stick 1.4 m deep, were adjusted to the depth they have been in.

Additionally, the soil permeability was estimated for each probe. The flow rate and pressure were measured

simultaneously when gas was pumped out of the probe. According to Damkjaer and Korsbech⁽⁸⁾, the permeability was calculated using a geometry factor, considering the 5-cm long hole under the probe, and the gas' viscosity, which was approximated.

At all 100 sites, the measurements were carried out using a system consisting of a flow measuring device and a manometer. At 60 sites an additional system, the 'Radon Jok' by Radon v.o.s., which refers to the same calculation, was used. Thereby the flow rate was determined by the time needed to fill a sack of known volume, sucking the gas out of the probes. The pressure was given by the weights attached to the sack.

At each site soil samples were taken from depths up to 1 m, to determine the ^{226}Ra and ^{238}U mass activity by gamma ray spectroscopy.

The local dose rate was measured with a dosimeter, 6150 AD 6/E with a connected scintillator 6150AD-b by Automess, 1 m above the ground. The mean values of a 5-min period were taken as results.

At all sites the geographic coordinates were taken, to identify the local geology with the help of the Styrian geographical information system⁽⁹⁾.

RESULTS AND DISCUSSION

For the analysis, the different geological units were categorised as presented in Table 1. It includes the shortcuts which are used in the figures as well as the number of measuring sites in the applied geological areas. It has to be noted that the talus material, low terrace (LT) and alluvial fan (AF) are conglomerates of other geological units and indicate how and where the material is gathered.

Table 1. The classification of the geological units.

Geology	Short	Number of measuring sites
Semmering quartzite	SQ	6
Alluvial deposits (sand, tone)	AD	17
Dolomite, lime	DL	12
Mica slate, phyllite, sericite schist	MS	19
Gneiss	GN	15
Talus material	TM	10
Lower terrace	LT	6
Alluvial fan	AF	9

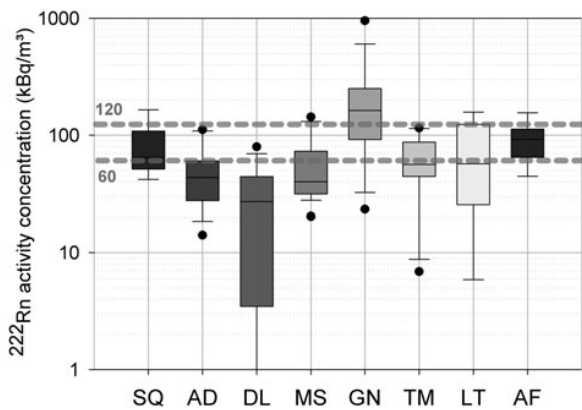


Figure 2. The ²²²Rn soil gas activity concentrations in different geological units shown in a box plot.

Not all sites were able to be categorised. The distribution of the ²²²Rn activity concentration is shown in the box plot in Figure 2. It can be observed that, over all geological categories, 58 % of the ²²²Rn activity concentration values are <60 kBq m⁻³, 27 % are between 60 and 120 kBq m⁻³ and 15 % are >120 kBq m⁻³.

In the ELORA^(10, 11), the ²²²Rn activity concentration in soil is classified into three categories; <60 kBq m⁻³, 60–120 kBq m⁻³ and >120 kBq m⁻³. The two borderlines are marked with two grey lines in the figure. The ²²²Rn activity concentration of the gneiss can be classified in the third category, whereas the bigger part of the quartzite, LT and AF values is in the second category. Due to the fact that the values of the different unit range over the categories, it is disputable if a classification is reasonable.

Nevertheless, the ²²²Rn activity concentration shows a connection to the geological underground they were taken from. Although the ranges are overlapping, the values have a different distribution within different geological units. For example, the gneiss shows a much wider and higher range of values than the other units. Even within the different geological units, the values vary highly. An LT shows with few points a high distribution, which can be explained by the possibility of a versatile composition. For a better impression of the different value ranges Figure 4 is suggested, as the scale is linear and not logarithmic as in Figure 2.

The values from the permeability are the results from the measuring system with flow measuring device and manometer, because it was used with every single measurement. According to Kemski

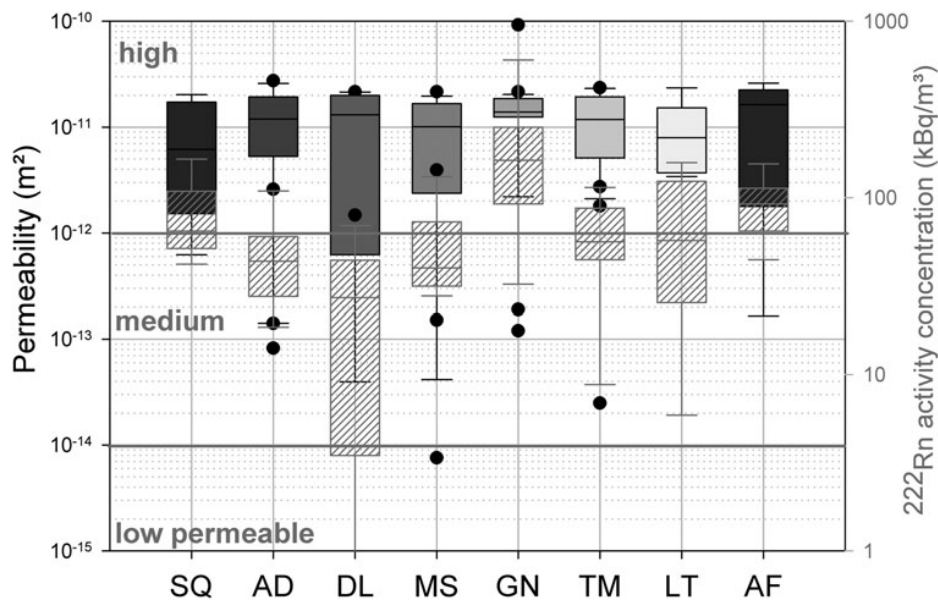


Figure 3. The permeability compared with the ²²²Rn soil gas activity concentration.

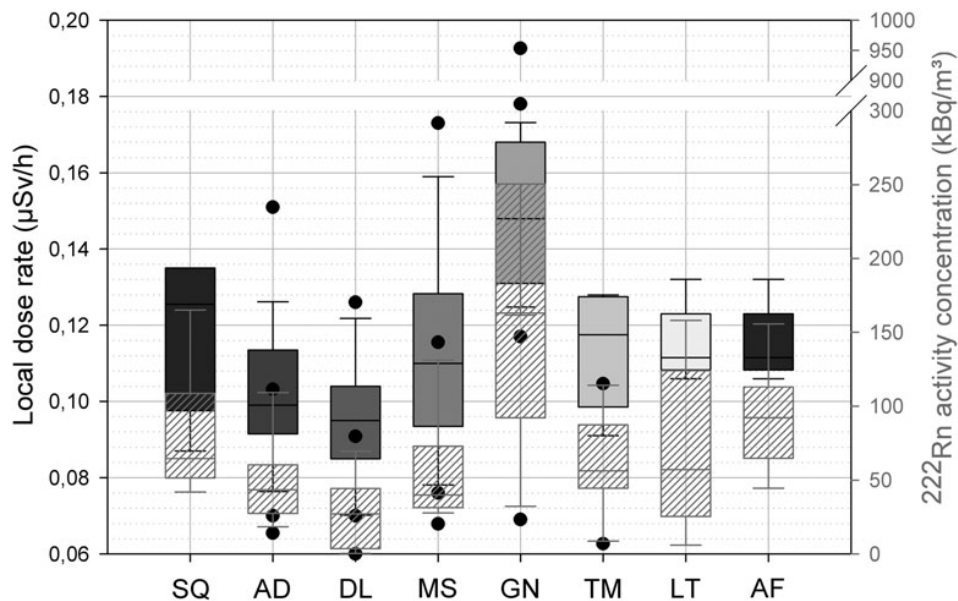


Figure 4. The local dose rate compared with the ^{222}Rn soil gas activity concentration.

et al.⁽¹²⁾ the permeability can be classified into high ($>10^{-12} \text{ m}^{-2}$), medium (10^{-12} – 10^{-14} m^{-2}) and low ($<10^{-14} \text{ m}^{-2}$). Just 12 % of the sites' values are not high permeable.

Figure 3 shows the permeability values of soil and the ^{222}Rn soil gas activity concentration value. On the one hand, the gneiss has got high permeable values and high activity concentrations; on the other hand, the alluvial deposit has low activity concentrations despite its high permeability.

The mean values of the ^{238}U mass activity, categorised in the geological units, are between 27 and 57 Bq kg^{-1} . The mean values of the ^{226}Ra mass activity are between 34 and 76 Bq kg^{-1} . A comparison only between the mean values of the ^{222}Rn soil gas activity concentrations and the ^{226}Ra and ^{238}U mass activity concentrations shows no direct correlation. Although the gneiss shows the mean values' maxima of all three observables, higher ^{222}Rn values do not mean automatically higher ^{226}Ra and ^{238}U values in the same geological areas. The results will be analysed further to elucidate correlations between the different observables, in which the permeability will be considered too.

As in Figure 4 shown, the local dose rate is compared with the ^{222}Rn soil gas activity concentration. A certain connection between the two parameters is observable here. Within a geological unit, comparatively high values of the local dose rate go along with high values of the ^{222}Rn soil gas activity concentration.

The measuring itself can be carried out easily, but the weather and soil conditions were factors complicating the planned accomplishment. For example, the second measuring series was scheduled in spring time.

Due to the late snowmelt that year the soil was too wet to extract soil gas and the beginning of the measuring was delayed. Nevertheless both series of measurements together, containing 100 sites, were carried out within a rather short period of 6 weeks.

For a good prediction, measurements apparently have to be taken in certain areas, where higher ^{222}Rn soil gas activity concentrations or wide ranges of values are expected. The gneiss shows such characteristics, which can lead to high radon concentration indoors. So, the results suggest more measurements in gneiss than in dolomite areas.

The different parameters show valid correlations among each other, which suggests that the aim to predict the radon potential with imperfect data should be possible. A lack of information of an observable should be able to be substituted by another observable.

OUTLOOK

The next step will be the further illumination of the findings at hand with measurements conducted indoors by the Austrian Agency for Health and Food Safety. Especially the correlation between the ^{222}Rn soil gas activity concentration, the geological units and the ^{222}Rn indoor activity concentration is supposed to provide a better information basis for quantifying procedures to allow an easier prediction of areas with a high radon potential and consequently the prediction of areas, where high ^{222}Rn indoor activity concentrations can be found.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to the municipalities of Spital am Semmering, Ganz, Langenwang and Kapellen, the owners of the land for providing the test areas and the Austrian Agency for Health and Food Safety for their technical support.

FUNDING

This study was funded by the Austrian Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management (project no. BMLFUW-UW 1.1.8/0208-V/7/2012).

REFERENCES

1. Maringer *et al.* *Ermittlung der aktuellen Häufigkeitsverteilung der natürlichen Strahlenexposition der österreichischen Bevölkerung, 2012*. Endbericht. Auftraggeber Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Abt. V/7-Strahlenschutz (2012) (in German).
2. World Health Organization. *WHO Handbook on Indoor Radon—A Public Health Perspective*. World Health Organization. (2009) ISBN-978-9-241-54767-3.
3. ICRP *International Commission on Radiological Protection Statement on Radon*. ICRP Ref 00/902/09. ICRP (2009).
4. Friedmann, H. *et al.* *Das österreichische nationale Radonprojekt – ÖNRAP, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft*. Umwelt und Wasserwirtschaft (2007) (in German).
5. Dr. Wolfgang Ringer, Radonvollerhebung in den Gemeinden Reichenau, Haubach und Ottenschlag i.M., Austrian Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management, Stubenring 1, 1010 Vienna, Austria, http://www.bmlfuw.gv.at/dms/lmat/umwelt/strahlen-atom/strahlenschutz/radon/radonmessung/Expertenbericht_Radonvollerhebung_Reichenau_finalb.pdf (in German) (accessed on April, 2014).
6. Seidel, C. *et al.* *Soil gas radon measurements in a region of the Bohemian Massif: investigations in the framework of an Austrian pilot study*. Radiat. Protect. **145**(2–3), 329–332 (2011).
7. Austrian Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management. <http://www.radon.gv.at/radonsuche.html> (2010). (accessed on April, 2014).
8. Damkjaer, A. and Korsbech, U. *A small-diameter probe for in situ measurements of gas permeability of soils*. Radiat. Prot. Dosim. **45**, 85–89 (1992).
9. Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Landesamtsdirektion. *Referat Kommunikation Land Steiermark*. <http://www.gis.steiermark.at/>. (accessed on April, 2014).
10. Maringer, F. J., Heiss, G. and Jung, M. *Ermittlung des lokalen Radonpotentials aus geogenen Faktoren mittels eines geografischen Informationssystems und in-situ Bodenluftmessungen – Pilotstudie (ELORA)*. Endbericht, Arsenal Research (2000) (in German).
11. Maringer, F. J., Heiss, G., Jung, M., Futschnik, A., Friedmann, H. and Bossew, P. *A new combined geostatistical and empirical method for assessing the value and the geographical distribution of the radon availability in soil*. In: Proceeding of the Third Eurosymposium on Project Against Radon, Liège, 10 and 11 May 2001, AIM, Univ. of Liège, Belgium, pp. 143–148 (2001).
12. Kemski, J., Klingel, R. and Siehl, A. *Das geogene radon-potential*. In: Umweltradioaktivität. S. Reihe Geologie und Ökologie im Kontext. Siehl, A. (Hrsg.). Ernst & Sohn. Berlin, pp. 179–222 (1996) (in German).

Teil I.

Grundlagen

2. Radioaktivität

2.1. Radioaktiver Zerfall

Laut dem Bohr'schen Atommodell besteht ein Atom aus einem relativ kleinen, dichten Kern, der sich wiederum aus Protonen und Neutronen zusammensetzt, und aus einer Hülle, deren Elektronen den Kern umkreisen. Ihre Bahnen machen den Großteil des Atomvolumens aus.

Instabile Atome können unter anderem durch Spaltung und Aussendung von Elektronen, Positronen oder α -Teilchen in andere Atomkerne übergehen. Für die Stabilität eines Atoms ist das Verhältnis von Neutronen zu Protonen maßgebend. Protonen stoßen sich wegen der elektromagnetischen Wechselwirkung ab, während Neutronen aufgrund der starken Wechselwirkung sowohl Protonen und Neutronen anziehen. Die Quarks, aus denen die Nukleonen bestehen, können auch mit den Quarks anderer Nukleonen wechselwirken, da die Abstände zwischen den Nukleonen im Atomkern so gering sind. Bei der Wechselwirkung zwischen Protonen überwiegt allerdings die elektromagnetische Wechselwirkung, weswegen sie sich abstoßen. Sind zu wenige Neutronen in einem Kern, ist die abstoßende Wirkung der elektromagnetischen Kräfte zwischen den Protonen größer als die anziehende Kraft zwischen allen Nukleonen und somit der Kern instabil. Allerdings sind auch Kerne die sich aus zu vielen Neutronen zusammensetzen instabil. Die Karlsruher Nuklidkarte, gezeigt in Abbildung 2.1, veranschaulicht diese Umstände. Auf der X-Achse sind die Zahl der Neutronen aufgetragen und auf der Y-Achse die Zahl der Protonen. Die unterschiedlichen Farben geben die verschiedenen Umwandlungsarten an, während stabile Kerne schwarz eingezeichnet sind. Aus der Karte ist ersichtlich, dass leichte, stabile Kerne die gleiche Anzahl an Protonen sowie Neutronen haben, während sich bei schweren, stabilen Kernen einhalb mehr Neutronen als Protonen im Kern befinden.

Angeregte Atome, die durch Emission von elektromagnetischer Strahlung in einen nicht oder weniger angeregten Zustand übergehen, werden ebenfalls als instabil bezeichnet. Dabei entspricht die Strahlungsenergie der Differenz der Energieniveaus des Überganges.

Kommen die zerfallenden Radionuklide in der Natur vor, werden sie als natürliche Radionuklide bezeichnet. Werden sie jedoch künstlich, z.B. in Kernreaktoren, gebildet, werden sie als künstliche Radionuklide bezeichnet. Alle natürlich vorkommenden Radionuklide lassen sich in vier Zerfallsreihen einordnen, deren Ausgangs- und Endnuklide in Tabelle 2.1 angegeben sind. Manche Radionuklide können auch auf mehrere Arten mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten zerfallen. Dadurch kommt es zu Verzweigungen innerhalb einer Reihe. Trotzdem hat jede Reihe nur ein stabiles Endnuklid, da solche Verzweigungen zu den gleichen Nukliden führen.

Die Anfangsnuklide einer Reihe sind primordiale Radionuklide, welche seit der Entstehung der Erde vor 4,6 Milliarden Jahren existieren. Bei der Thoriumreihe kommen noch Vorgänger-

2. Radioaktivität

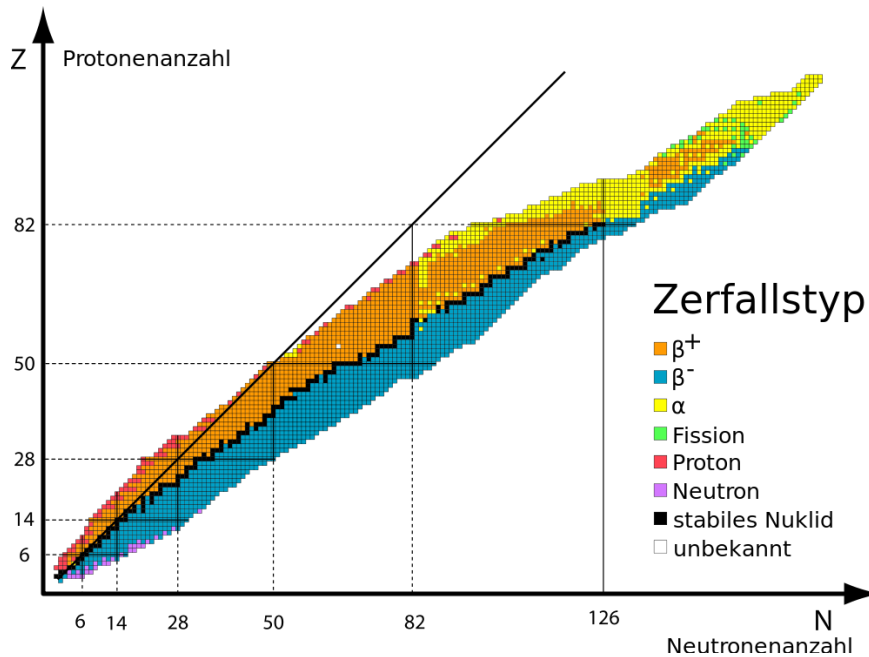


Abbildung 2.1.: Karlsruher Nuklidkarte (Matthias 2010).

Tabelle 2.1.: Ausgangs- und Endnuklide der natürlichen Zerfallsreihen.

Name	Anfangsnuklid	Endnuklid
Thoriumreihe	^{232}Th	^{208}Pb
Uran-Aktinium-Reihe	^{235}U	^{207}Pb
Uran-Radium-Reihe	^{238}U	^{206}Pb
Neptuniumreihe	^{237}Np	^{209}Bi

nuklide bis ^{244}Pu auf der Erde vor, jedoch in sehr geringen Mengen, sodass ^{232}Th als Anfangsnuklid genannt wird. Aufgrund der relativ geringen Halbwertszeiten der Radionuklide in der Neptuniumreihe ist nur noch das Endnuklid ^{209}Bi nachweisbar, welches eigentlich auch ein Radionuklid mit einer Halbwertszeit von $19 \cdot 10^{18}$ Jahren ist.

Im Gegensatz zu den primordialen können kosmogene Radionuklide erzeugt werden, wenn kosmische Strahlung mit Nukliden in der Erdatmosphäre wechselwirkt. Auf diese Weise wird ^{14}C Kohlenstoff erzeugt. Durch kosmische Strahlung wird aus Kernen ein Neutron freigesetzt, welches bei einem Zusammenstoß aus einem ^{14}N Stickstoff ein Proton herausschlagen kann (Krieger 2007, Strelt 2011).



Bei einem radioaktiven Zerfall entsteht α -, β - und γ -Strahlung. Zum Zeitpunkt ihrer Benennung waren die unterschiedlichen Zerfälle und somit der Ursprung der Teilchen und Strahlen noch nicht identifiziert worden. Damals wurden sie anhand ihres Durchdringungsvermögens und der ihnen wiederfahrenden Ablenkungen innerhalb eines Magnetfeldes unterschieden. Jede der radioaktiven Strahlenarten ist ionisierend; sie können auf direkte oder indirekte Weise Elektronen aus Atomen oder Molekülen entfernen.

Die Masse eines gebundenen Atomkernes ist niedriger als die Summe der Massen an Protonen

und Neutronen, aus denen er aufgebaut ist. Diese Differenz wird Massendefekt genannt und entspricht gemäß der Einstein'schen Relation $\Delta E = m \cdot c^2$ der Bindungsenergie des Kernes. Spontan kann ein Atomkern nur zerfallen wenn seine Masse größer oder gleichgroß der Summe der Massen der Folgeprodukte ist. Die Differenz der Massen entspricht der frei werdenden Bindungsenergie, aus der die emittierten Teilchen ihre kinetische Energie beziehen. Wegen der Impulserhaltung erhält auch der Tochterkern eine bestimmte kinetische Energie. Diese fällt jedoch sehr gering aus, da ihre Masse viel größer ist als die der emittierten Teilchen.

2.1.1. Alpha-Strahlung

Beim α -Zerfall (2.2) emittiert ein Mutterkern X mit der Nukleonenzahl A und der Protonenzahl Z, welche beim Tochterkern Y jeweils um zwei niedriger sind, einen Heliumkern He. Dieser besteht aus zwei Neutronen und zwei Protonen und wird auch α -Teilchen genannt. Im Unterschied zu anderen Zerfallsarten, werden hier keine Nukleonen umgewandelt.



Die kinetischen Energien der α -Teilchen haben bestimmte, diskrete Werte, die von der Stärke der Anregung des Tochterkerns abhängig sind, wobei die Summe der Anregungsenergie und der kinetischen Energien der Zerfallsprodukte dem Betrag der frei gewordenen Bindungsenergie entspricht. Somit sind diese Energien charakteristisch für das zerfallende Nuklid und durch deren Messung lässt sich auf das zerfallende Nuklid identifizieren. Ein α -Teilchen lässt sich bereits mit einem Blatt Papier abschirmen.

Von allen leichten Nukliden besitzen Heliumkerne die größte Bindungsenergie, welche ein Indikator für die Stärke der Bindung ist. Dieser Umstand erklärt warum gerade α -Teilchen aus einem zerfallenden Nuklid emittiert werden. Im Periodensystem tritt der α -Zerfall ab den Lanthaniden und verstärkt bei den Aktiniden auf.

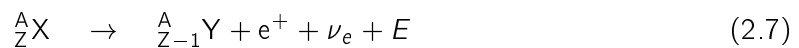
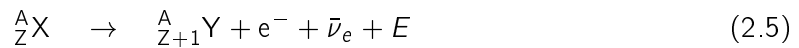
Die frei werdende Energie lässt sich mit der Zerfallswahrscheinlichkeit in Verbindung bringen. Der Zusammenhang wird in Formel 2.3 beschrieben.

$$\log(E_\alpha) = a + b \cdot \log(\lambda) \quad (2.3)$$

Dabei ist die Konstante b für alle Zerfallsreihen konstant, während a von der Reihe abhängt und für alle Nuklide einer Reihe gleich ist. Der Zusammenhang zwischen Energie und Zerfallswahrscheinlichkeit lässt sich durch die Annahme, dass sich das α -Teilchen bereits innerhalb des Kernes mit der später erhaltenen Energie bewegt, gut veranschaulichen. Denn mit höheren Energien haben die Teilchen eine höhere Wahrscheinlichkeit, die den Kern zusammenhaltende Energiebarriere (den Potentialtopf) mittels des Tunneleffekts zu durchdringen (Demtröder 2010, Krieger 2007).

2.1.2. Beta-Strahlung

Beim β^- -Zerfall (2.5) wandelt sich ein Neutron (n) in ein Proton (p) (2.4) um, welches im Kern gebunden bleibt, und ein Elektron (e^-) sowie ein Elektronen-Antineutrino ($\bar{\nu}_e$) werden emittiert. Beim β^+ -Zerfall (2.7) wandelt sich ein Proton zu einem Neutron (2.6) um, welches im Kern gebunden bleibt, und ein Positron (e^+) sowie ein Elektronen-Neutrino (ν_e) werden emittiert.



Während der Umwandlung zwischen Protonen zu Neutronen und umgekehrt werden keine Teilchenerhaltungssätze verletzt, da beide aus drei Quarks aufgebaut sind. Elektronen und Positronen gehören zu den Leptonen, die ebenfalls Erhaltungssätzen unterliegen. Aus diesem Grund müssen bei deren Bildung auch die entsprechenden Antiteilchen erzeugt werden. Da Neutrinos als ungeladene Leptonen nur der schwachen Wechselwirkung unterliegen, werden β -Zerfälle den Prozessen der schwachen Wechselwirkung zugeordnet.

Mutter- und Tochternuklide des β -Zerfalles sind Isobare, weil ihre Massenzahl bei der Umwandlung konstant bleibt. Ein β -Zerfall tritt auf, wenn im Atomkern das entstehende Nukleon einen energetisch günstigeren Platz einnehmen kann als das ursprüngliche Teilchen. Die Art des β -Zerfalls hängt von dem Verhältnis der Anzahl an Protonen (Z) und Neutronen ($A - Z$) zwischen Mutter- und Tochterkern ab.

- β^- -Zerfall: $(A-Z)_{\text{Mutter nuklid}} > (A-Z)_{\text{Tochter nuklid}}$, $(Z)_{\text{Mutter nuklid}} < (Z)_{\text{Tochter nuklid}}$
- β^+ -Zerfall: $(A-Z)_{\text{Mutter nuklid}} < (A-Z)_{\text{Tochter nuklid}}$, $(Z)_{\text{Mutter nuklid}} > (Z)_{\text{Tochter nuklid}}$

Es gibt lediglich vier stabile Atomkerne mit ungeraden Protonen- und ungeraden Neutronenzahlen (${}^2\text{Wasserstoff}$, ${}^6\text{Lithium}$, ${}^{10}\text{Bor}$, ${}^{14}\text{Stickstoff}$). Nuklide mit geraden Protonen- und geraden Neutronenzahlen zeichnen sich hingegen durch eine hohe Stabilität aus.

Die frei werdende Bindungsenergie wird als kinetische Energie auf die drei Zerfallsprodukte aufgeteilt. Dabei erhält ein einzelnes Teilchen eine Energie zwischen Null und der gesamten frei werdenden Bindungsenergie, wodurch sich für das Nuklid charakteristische Obergrenzen hinsichtlich den Energien der Zerfallsprodukte ergeben. In Luft beträgt die Reichweite von β -Strahlung zwischen 1,5 m für 0,5 MeV und 8,5 m für 2 MeV.

Da das Proton eine kleinere Masse aufweist als das Neutron, müssen bei der β^+ -Umwandlung die entsprechenden Teilchen durch Zuführen von Energie gebildet werden. Die frei werdende Bindungsenergie muss einen entsprechenden Betrag aufweisen um den Prozess zu ermöglichen¹. Jener Betrag der Zerfallsenergie, der nicht für die Umwandlung der Teilchen benötigt wird, wird

¹Ruheenergien:

Proton: 938,3 MeV

als kinetische Energie auf die übrigen Teilchen aufgeteilt. Bislang wurde noch kein β^+ -Zerfall in einem freien Proton beobachtet. Von den natürlichen β^+ -Radionukliden kommt $^{40}\text{Kalium}$ am häufigsten vor.

Eine Spezialfall des β -Zerfalls ist der K-Einfang (2.8). Dabei wird ein Elektron aus der Atomhülle, meistens aus der K-Schale, vom Kern eingefangen und wandelt sich mit einem Proton zu einem Neutron um, unter Aussendung eines Elektronenneutrinos (2.9) (Demtröder 2010, Krieger 2007, Strelt 2011).



2.1.3. Gamma-Strahlung

Nach einem radioaktiven Zerfall verbleibt der entstandene Tochterkern oft in einem angeregten Zustand. Beim Übergang in ein energetisch niedrigeres Niveau emittiert der Kern elektromagnetische Strahlung, die γ -Strahlung genannt wird. Somit ist die γ -Strahlung genau genommen kein Zerfall und unterliegt der elektromagnetischen Wechselwirkung. Sie folgt aber aus einem Zerfall und vermindert die Energie des Kerns, wodurch auch eine Verminderung seiner Masse folgt.



Die Frequenz der abgegebenen Strahlung entspricht der Energiedifferenz der Niveaus, welche durch das Planck'sche Wirkungsquantum dividiert wird.

$$\left(\nu = \frac{E_1 - E_2}{h}\right) \quad (2.11)$$

Ein Atomkern kann nicht nur als Folge von Zerfällen angeregt werden, sondern auch durch Stöße mit anderen Teilchen, die dabei Energie auf das Atom übertragen. Neben γ -Strahlung entsteht auch Röntgenstrahlung durch Übergänge zwischen Energieniveaus im Atom. Allerdings finden diese Übergänge bei γ -Strahlung im Kern und bei Röntgenstrahlung in der Hülle statt. Es gibt keine scharfe Grenze zwischen den Energien der beiden Strahlungen. Im Allgemeinen wird ein Energiebereich der γ -Strahlung von 10 keV bis 10 MeV angegeben. Die γ -Strahlen besitzen ein hohes Durchdringungsvermögen von Materie und lassen sich somit nur schwer abschirmen. (Demtröder 2010, Krieger 2007)

Bei der Gammaskopie wird die emittierte γ -Strahlung einer Substanz untersucht. Da beim Zerfall bestimmter Isotope immer γ -Quanten derselben Energie abgegeben werden, sind diese Energien charakteristisch für den jeweiligen Zerfall des Isotops. Wird nun die Anzahl an γ -Quanten einer bestimmten Energie über einen bestimmten Zeitabschnitt gemessen, lässt sich dadurch auf die Aktivität eines bestimmten Nuklides in der Probe rückschließen.

Neutron: 939,7 MeV

Elektron: 0,511 MeV

Elektron-Neutrino: $< 10^{-6}$ MeV

2.2. Verhalten ionisierender Strahlung von radioaktiven Prozessen in Materie

Ionisierende Strahlung wird von der europäischen Atomgemeinschaft (Euratom 1996) definiert als „Transfer von Energie in Form von Teilchen oder elektromagnetischen Wellen mit einer Wellenlänge von 100 Nanometer oder weniger oder einer Frequenz von $3 \cdot 10^{15}$ Hertz oder mehr, die direkt oder indirekt Ionen erzeugen können“. Zu dieser Kategorie gehören die Strahlenarten, die bei radioaktiven Prozessen entstehen. Bei deren Verhalten in Materie muss zwischen geladenen Teilchen und Photonen unterschieden werden. Zu den geladenen Teilchen gehören die α -Teilchen, Elektronen und Positronen. Neutrinos unterliegen als ungeladene Leptonen nur der schwachen Wechselwirkung und sind Punktteilchen, weswegen sie kaum mit Materie wechselwirken.

Eine wichtige Größe ist der lineare Energietransfer (*LET*). Er gibt an wieviel Energie ein geladenes Teilchen in Materie pro Wegeinheit abgibt. Aus ihm lässt sich ableiten, nach welcher Wegstrecke ein Teilchen bestimmter Energie in Materie zum stehen kommt.

$$LET = \frac{dE}{dx} \quad (2.12)$$

2.2.1. Geladene Teilchen

Insgesamt werden mehrere Vorgänge von Wechselwirkungen unterschieden, wenn geladene Teilchen mit Materie wechselwirken.

- Beim elastischen Stoß wird ein Teilchen an dem Coulombfeld der Atomhülle abgelenkt. Dabei kommt es zu keinem Energieübertrag und keiner Ionisation.
- Beim inelastischen Stoß kommt es jedoch zu einer Ionisation oder einem Energieübertrag. Durch den Energieübertrag kann ein gebundenes Elektron in einen energetisch höheren Zustand gehoben werden, es bleibt also gebunden. Das gesamte Atom ist dadurch nicht ionisiert aber angeregt.
- Wenn das einfallende Teilchen schneller ist als die Lichtgeschwindigkeit in dem durchqueren Medium, wird Cerenkov-Strahlung emittiert. Der Effekt ist vergleichbar mit einem Überschallknall in Luft.
- Wird ein Teilchen am elektrischen Feld des Atomkerns abgelenkt, gibt es wegen der Richtungsänderung Photonenstrahlung ab, wodurch es abgebremst wird. Die Strahlung wird Bremsstrahlung genannt (Krieger 2007, Turner 2007).

Schwere geladene Teilchen

Von den Teilchen, die bei radioaktiven Zerfällen entstehen, gehören die α -Teilchen zu den schweren geladenen Teilchen. In Materie bewegen sich schwere geladene Teilchen fast geradlinig. Dabei geben sie Energien an die Hüllenelektronen ab, deren Atome sie passieren. Wenn

dabei der Energieübertrag ausreicht, können Elektronen aus der Hülle geschlagen werden, wodurch die Atome ionisiert werden. Reicht der Energieübertrag dazu nicht aus, werden die Elektronen lediglich angeregt und somit das ganze Atom. Wenn ein schweres Teilchen jedoch direkt auf einen Atomkern trifft, kann es gestreut oder sogar zurückgeworfen werden (Turner 2007).

Leichte geladene Teilchen

Leichte geladene Teilchen sind unter anderem Elektronen und Positronen, die beim β -Zerfall entstehen. Wie bei den schweren geladenen Teilchen kommt es in Materie zu Stößen zwischen den emittierten Elektronen und den Hüllenelektronen der Atome in der durchquerten Materie. Dabei kann es zur Ionisierung und Anregung der passierten Atome kommen. Außerdem können leichte geladene Teilchen von der Atomhülle elastisch gestreut werden, oder durch Ablenkung am Atomkern sogenannte Bremsstrahlung entsenden. Generell geben geladene Teilchen Strahlung ab, wenn sie beschleunigt werden, wozu in der Physik auch eine Richtungsänderung zählt. Bei einem Stoß mit einem Hüllenelektron können Elektronen einen hohen Anteil ihrer eigenen Energie abgeben. Aufgrund ihrer kleinen Masse werden die β -Teilchen um einen großen Winkel abgelenkt.

Ein Positron und ein Elektron vernichten sich bei einem Aufeinandertreffen, weil Protonen die Antiteilchen von Elektronen sind. Bei diesem Annihilation genannten Prozess, wird elektromagnetische Strahlung emittiert, deren Energie der Summe der kinetischen Energien und der Ruheenergien der beiden Teilchen entspricht. Befinden sich die beiden Teilchen bei ihrer Vernichtung in Ruhe werden zwei Photonen mit jeweils einer Energie von 511 keV emittiert. Vor ihrer Vernichtung können das Positron und das Elektron für einen kurzen Zeitraum ein Positronium binden. Dabei handelt es sich um einen Wasserstoffatom ähnlichen, gebundenen Zustand, bei dem die beiden Teilchen um den gemeinsamen Schwerpunkt kreisen (Turner 2007, Strelt 2011).

2.2.2. Photonen in Materie

Als Photonen werden die kleinsten Einheiten einer elektromagnetischen Welle bezeichnet. In der Teilchentheorie des Lichts entspricht das Photon einem einzelnen Lichtteilchen. Da sie nicht geladen sind verlieren Photonen in Materie nicht kontinuierlich Energie in den elektrischen Feldern ihrer Atome. Wenn sie auf ein Atom treffen können sie auf unterschiedliche Weise interagieren:

- Photonen können von freien Elektronen absorbiert werden, und in eine andere Richtung abgestrahlt werden. Es handelt sich also um Streuung ohne Energieverlust und wird Thompsonstreuung genannt.
- Eine ebenfalls elastische Streuung ist die Rayleigh-Streuung, bei der elektromagnetische Strahlung an Teilchen abgelenkt wird. Der Durchmesser der Teilchen muss dafür kleiner sein als die Wellenlänge der Strahlung. Die Stärke der Streuung ist proportional zur Frequenz der Welle, weswegen Strahlen verschiedener Frequenzen unterschiedlich stark gestreut werden.

2. Radioaktivität

- Beim sogenannten äußeren Photoelektrischen Effekt werden Elektronen durch Bestrahlung mittels Photonen aus einem Metall gelöst. Die kinetische Energie der Elektronen danach ist nur von der Frequenz der Photonen und der Austrittsarbeit abhängig ($E_{kin} = h\nu - W_{Aus}$). Hingegen ist die Anzahl der herausgelösten Elektronen proportional zur Intensität der Strahlung.
- Der Compton Effekt beschreibt die inkohärente Streuung von Photonen an quasifreien Hüllenelektronen. Der Vorgang kann als elastischer Stoß zwischen dem einfallenden Photon und einem schwach gebundenen Elektron im Streumaterial angesehen werden. Dabei verliert das Photon Energie. Der Energieverlust ist abhängig vom Streuwinkel und macht sich durch die Vergrößerung der Wellenlänge des Photons bemerkbar.
- Im elektromagnetischen Feld des Atomkernes kann ein Photon ein Elektron und ein Positron erzeugen. Dazu muss seine Energie größer als das Doppelte der Elektronenruheenergie sein ($h\nu > 2m_e$). Aus der überschüssigen Energie beziehen die erzeugten Teilchen ihre Bewegungsenergie.
- Hat ein Photon genügend große Energie, kann es ein Nukleon aus dem Atomkern schlagen. Dabei muss es mehr Energie als die Bindungsenergie besitzen, die im Bereich von einigen MeV liegt. Die Differenz der beiden Energien geht in die kinetische Energie des emittierten Teilchens über. Zum Beispiel kann ein ^{206}Pb Kern ein γ -Photon absorbieren und dabei ein Neutron entsenden (Turner 2007, Demtröder 2005).

2.3. Zerfallsgesetz

Die im vorigen Abschnitt besprochenen radioaktiven Zerfälle instabiler Nuklide sind statistische Vorgänge und geschehen spontan. Bei einem einzelnen Nuklid lassen sich Aussagen bezüglich der mittleren Lebensdauer (2.19) treffen, aber nicht über den exakten Zeitpunkt seines Zerfalles. Erst die Betrachtung einer bestimmten Menge derselben Sorte von Radionukliden lässt weitere Schlüsse zu, wie einerseits die Anzahl von Zerfällen für einen bestimmten Zeitpunkt, als auch der Betrag der bereits zerfallenen und überbleibenden Menge. Allerdings sind diese Aussagen mit einem statistischen Fehler behaftet, der kleiner wird je größer die Menge des beobachteten Radionuklides ist.

Eine Menge N radioaktiver Nuklide nimmt mit einer bestimmten Rate $\frac{dN}{dt}$ ab. Diese Rate ist proportional zur Anzahl der noch vorhandenen Nuklide. Dabei beschreibt die Konstante λ diese Proportionalität.

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (2.13)$$

Hieraus ist ersichtlich, dass die mittlere relative Zerfallsrate konstant ist. Diese ist die Abnahmerate dividiert durch die Ausgangsmenge und ist durch die Zerfallskonstante λ gegeben.

$$\frac{dN}{N \cdot dt} = -\lambda \quad (2.14)$$

Wird diese Gleichung integriert (2.15), ergibt sich daraus das radioaktive Zerfallsgesetz (2.16).

$$\int_{N_0}^N \frac{1}{N'} dN' = \int_0^t -\lambda dt \quad \rightarrow \quad \ln N - \ln N_0 = -\lambda \cdot t \quad (2.15)$$

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.16)$$

Radioaktiver Zerfall zeigt also ein exponentielles Verhalten, welches in Abbildung 2.2 veranschaulicht wird. In dieser wird dargestellt wieviel von einer Menge $^{222}\text{Radon}$, mit einer Halbwertszeit von 3,8 Tagen, nach einer bestimmten Zeit übrig ist.

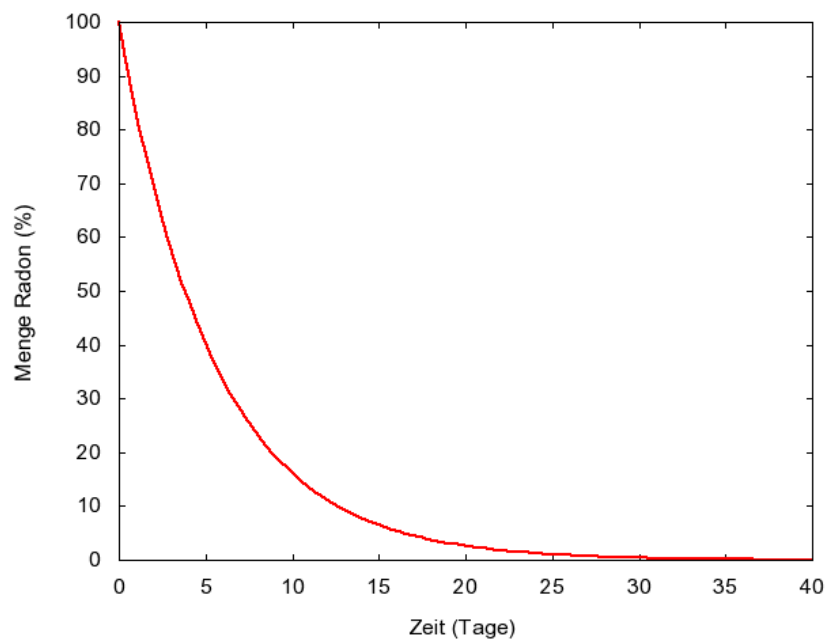


Abbildung 2.2.: Zeitlicher Verlauf einer Menge von $^{222}\text{Radon}$.

Halbwertszeit

In der Praxis wird mit der Halbwertszeit ($T_{1/2}$) eines Elements gerechnet. Diese gibt die Zeitdauer an, nach der die Hälfte einer Substanz zerfallen ist.

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 \cdot e^{-\lambda T_{1/2}} \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \quad \rightarrow \quad N(t) = N_0 \cdot e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}} t} \quad (2.17)$$

Um genau zu sein ist damit die physikalische Halbwertszeit gemeint. Für diese ergibt sich nach Umformung von 2.17 folgender Wert.

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (2.18)$$

2. Radioaktivität

Mittlere Lebensdauer

Die mittlere Lebensdauer τ gibt an, nach welcher Zeit ein Isotop am wahrscheinlichsten zerfällt und wird in 2.19 berechnet.

$$\tau = \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = -\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln(2)} \quad (2.19)$$

Eingesetzt in 2.16 zeigt sich, dass nach der Zeit τ eine Menge von Radionukliden auf den Wert $1/e$ seiner Anfangsmenge gefallen ist.

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \rightarrow N(\tau) = \frac{N_0}{e} \quad (2.20)$$

τ ist das Mittel aus den Werten t der Kurve in Abbildung 2.3 und entspricht dem Rechteck, das in derselben Abbildung eingezeichnet ist. Dieses Rechteck ist äquivalent zu der Fläche unter der Kurve (Turner 2007).

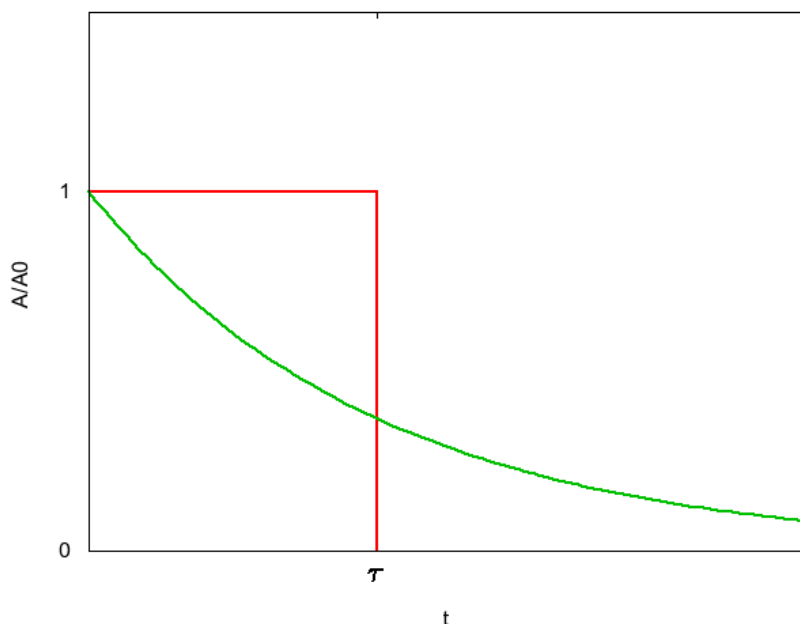


Abbildung 2.3.: τ mit dem Verlauf des Zerfalls und dem aufgespannten Rechteck.

Zerfallskonstante bei unterschiedlichen möglichen Zerfällen

Viele Radionuklide können auf verschiedene Arten zerfallen. Zum Beispiel kann sich $^{214}\text{Bismut}$, siehe Tabelle 3.1, durch β^- - als auch durch α - Zerfall in ein anderes Nuklid umwandeln. Werden die Zerfallskonstanten der verschiedenen Arten von Zerfällen eines Radionuklides addiert, ergibt sich eine neue Konstante. Diese beschreibt das Zerfallsverhalten ungeachtet der Art des Zerfalls.

$$\lambda_{tot} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (2.21)$$

Effektive Halbwertszeit

Neben der physikalischen Halbwertszeit, gibt es auch die biologische Halbwertszeit. Diese beschreibt die Verweildauer der entsprechenden Radionuklide im Körper unter der Annahme, dass die Ausscheidung aus dem Körper einem exponentiellen Verlauf folgt. Aus der Summe der Kehrwerte von biologischer und physikalischer Halbwertszeit ergibt sich die effektive Halbwertszeit. Diese beschreibt die effektiv im Körper stattfindenden Zerfälle und berücksichtigt die physikalischen und biologischen Aspekte (Demtröder 2010, Krieger 2007).

$$\frac{1}{T_{1/2}^{eff}} = \frac{1}{T_{1/2}^{bio}} + \frac{1}{T_{1/2}^{phys}} \quad (2.22)$$

Mutter-Tochter-System

Von einem Mutter-Tochter-System ist die Rede, wenn man den Zerfall eines Radionuklides und dessen Folgeprodukte betrachtet. Formel 2.23 zeigt die Berechnung der Menge N_2 des Tochternuklides, wenn diese bei $t = 0$ Null ist, sowie einer Anfangsmenge N_{10} des Mutternuklides. Abhängig von den Verhältnissen der Halbwertszeiten zwischen Mutter und Tochternuklid stellt sich ein Gleichgewicht der Aktivitäten ein (siehe Abbildungen 2.4 und 2.5) (Bethge Walter Wiedemann 2008).

$$N_2(t) = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.23)$$

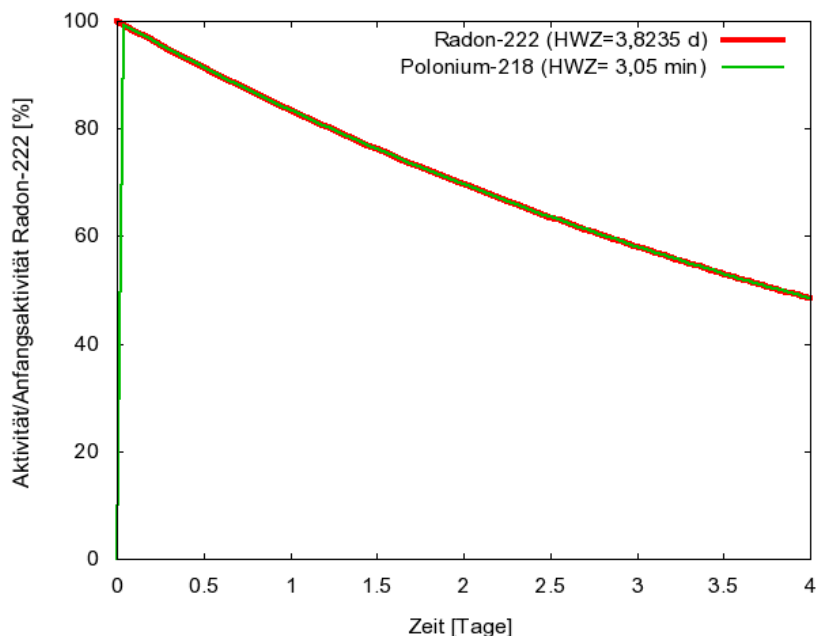


Abbildung 2.4.: Beim Zerfall von ^{222}Rn in ^{218}Po stellt sich ein Gleichgewicht ein.

2. Radioaktivität

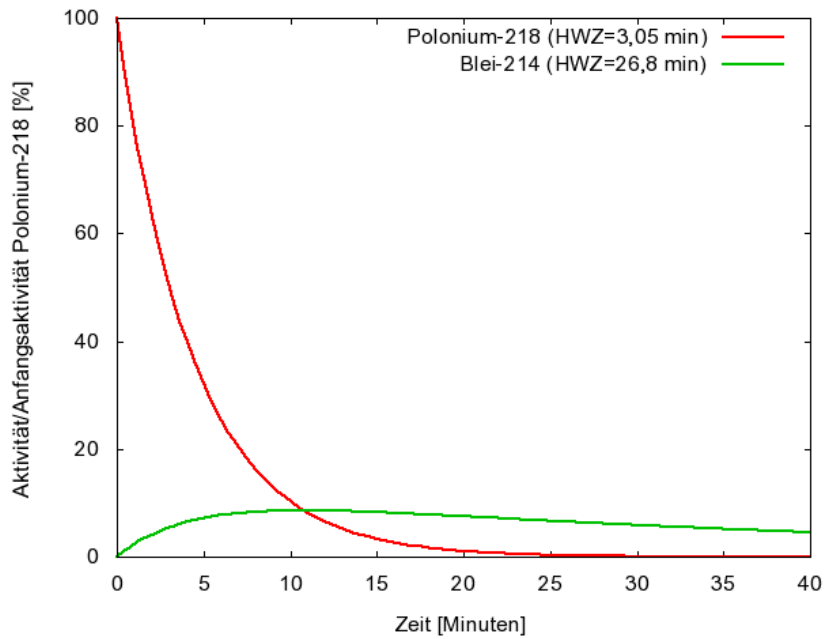


Abbildung 2.5.: Beim Zerfall von $^{214}\text{Polonium}$ in $^{214}\text{Blei}$ stellt sich kein Gleichgewicht ein.

2.4. Aktivität

Euratom (Euratom 1996) definiert „die Aktivität A einer Menge eines Radionuklids in einem bestimmten Energiezustand zu einer gegebenen Zeit ist der Quotient aus dN und dt ; dabei ist dN der Erwartungswert der Anzahl der spontanen Kernübergänge aus diesem Energiezustand im Zeitintervall dt .“ Die Aktivität (2.24) wird in der Einheit Becquerel² angegeben (2.25).

$$A = \frac{dN}{dt} \quad (2.24)$$

$$[A] = \frac{1}{s} = 1 \text{ Bq} \quad (2.25)$$

Durch die Multiplikation von Gleichung 2.16 mit der Zerfallskonstante λ und $A = \lambda N$ wird ersichtlich, dass auch die Aktivität einem zeitlichen, exponentiellen Verlauf folgt.

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.26)$$

Aktivitätskonzentration

Laut ÖNORM A 6601 (2011) ist die Aktivitätskonzentration der „Quotient aus der Aktivität eines in einem Material enthaltenen radioaktiven Stoffes und der Masse oder dem Volumen des Materials“. Dabei werden die massenbezogenen (2.27) und volumsbezogene Aktivitätskonzentration (2.28) unterschieden. Als spezifische Aktivitätskonzentration wird die massenbezogene Aktivitätskonzentration bezeichnet, wenn es sich bei der Substanz um die Masse eines reinen Radionuklides handelt.

²Historische Einheit: 1 Curie = 1 Ci = $3,70 \cdot 10^{10}$ Bq = 37 GBq

$$a = \frac{A}{m} \quad [a] = \text{Bq/kg} \quad (2.27)$$

$$c_A = \frac{A}{V} \quad [c_A] = \text{Bq/m}^3 \quad (2.28)$$

2.5. Dosis

Wird Materie ionisierender Strahlung ausgesetzt findet durch die verschiedenen Wechselwirkungen ein Energieübertrag statt. Die Dosis gibt an, wieviel Energie dabei von der Materie absorbiert wird. Die Auswirkungen sind sowohl von den verschiedenen Strahlungsarten, als auch von der Art der bestrahlten Materie abhängig. Deswegen ist es sinnvoll, mehrere Dosisarten zu definieren, um die verschiedenen Aspekte berücksichtigen zu können.

Energiedosis

Die Energiedosis D als „Differentialquotient $d\bar{\epsilon}$ durch dm “ definiert, wie in Formel 2.29 veranschaulicht wird. Sie ist demnach die Messgröße für den Energieübertrag ionisierender Strahlung auf ein Volumenelement von Materie mit bestimmter Masse und wird in der Einheit Gray angegeben (2.30) (ÖNORM A 6601).

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\bar{\epsilon}}{dV} \quad (2.29)$$

- $d\bar{\epsilon}$... Mittlere Energie, die durch ionisierende Strahlung auf das Material in einem Volumenelement übertragen wird
- dm ... Masse des Volumenelements
- ρ ... Dichte des Materials in dem Volumenelement
- dV ... Volumen des Volumenelements

$$[D] = 1\text{Gy} = 1\text{J/kg} \quad (2.30)$$

Energiedosisleistung

Die Energiedosisleistung \dot{D} gibt die erzeugte Dosis in einem gewissen Zeitintervall an und ist somit ein Differentialquotient und hat die Einheit Gray pro Sekunde (ÖNORM A 6601).

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (2.31)$$

- dD ... Energiedosis, die in der Zeit dt erzeugt wird
- dt ... Zeitintervall

$$[\dot{D}] = 1\text{Gy/s} \quad (2.32)$$

Äquivalentdosis

Bei der Äquivalentdosis H wird die biologische Wirkung verschiedener Strahlenarten und Energien auf das Gewebe berücksichtigt (2.37). Der Qualitätsfaktor korreliert mit dem LET -Wert einer Strahlenart. Denn innerhalb einer Energiedosis ist Strahlung mit einem hohen LET -Wert schädlicher als mit einem niedrigen, da innerhalb einer bestimmten Weglänge ein höherer Energieübertrag auf das Gewebe stattfindet.

$$H = Q \cdot D \quad (2.33)$$

Q ... Qualitätsfaktor

D ... Energiedosis für ICRU-Weichteilegewebe³

Äquivalentdosisleistung

Die Äquivalentdosisleistung \dot{H} (2.34) gibt die erzeugte Dosis in einem gewissen Zeitintervall an und ist somit ein Differentialquotient und hat die Einheit Sievert pro Sekunde (2.35) (ÖNORM A 6601).

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt} \quad (2.34)$$

dH ... Äquivalenzdosisleistung, die in der Zeit dt erzeugt wird

dt ... Zeitintervall

$$[\dot{H}] = 1 \text{ Sv/s} \quad (2.35)$$

Ortsdosisleistung

Die Ortsdosisleistung ist die Äquivalentdosisleistung, welche an einem bestimmten Ort gemessen wird und hat dieselbe Einheit (Sv/s).

Organdosis

Da verschiedene Strahlenarten verschiedene Gewebearten unterschiedlich stark schädigen, wurde der Strahlungs-Wichtungsfaktor w_R eingeführt. Die Abhängigkeit seiner Werte von den unterschiedlichen Strahlungsarten ist aus Tabelle 2.2 ersichtlich. Für den Wichtungsfaktor von Neutronen gilt die in 2.36 angegebene Abhängigkeit von der Energie, welche in Abbildung 2.6 veranschaulicht wird. Die Werte wurden den Vorgaben der ICRP⁴ 103 (ICRP 2007) entnommen.

³Gewebeäquivalentes Material der Dichte 1 g/cm^3 mit Massenanteilen aus 72,2% Sauerstoff; 11,1% Kohlenstoff; 10,1% Wasserstoff und 2,6% Stickstoff

⁴International Commission on Radiological Protection - Internationale Strahlenschutzkommission

Tabelle 2.2.: Wichtungsfaktor diverser Strahlungsarten (ICRP 2007).

Strahlungsart	w_R
Photonen	1
Elektronen und Myonen	1
Protonen und geladene Pionen	2
Alphateilchen, Spaltfragmente und Schwerionen	20

$$w_R = \begin{cases} 2,5 + 18,2 \cdot e^{-\ln(E_n)^2/6} & E_n < 1 \text{ MeV} \\ 5,0 + 17,0 \cdot e^{-\ln(2 \cdot E_n)^2/6} & 1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV} \\ 2,5 + 3,25 \cdot e^{-\ln(0,04 \cdot E_n)^2/6} & E_n > 50 \text{ MeV} \end{cases} \quad (2.36)$$

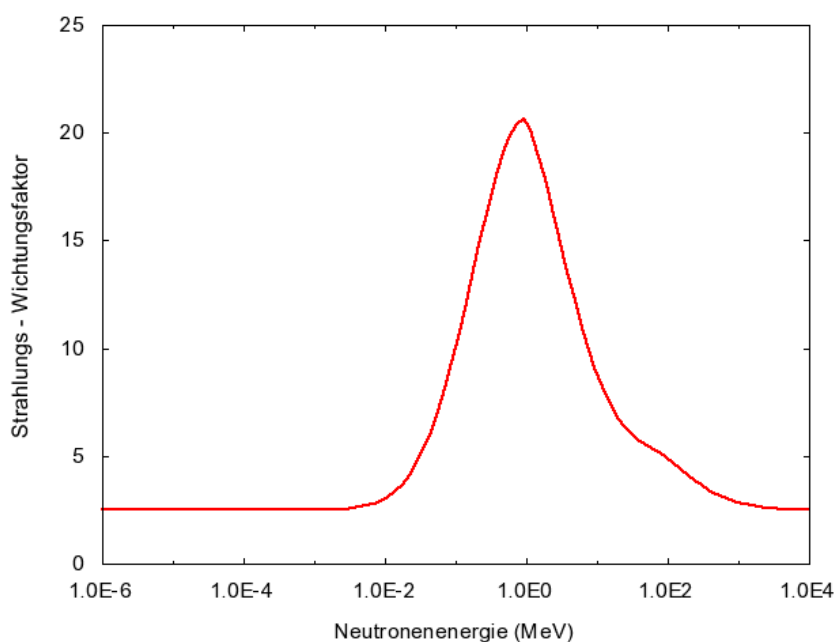


Abbildung 2.6.: Abhängigkeit zwischen Wichtungsfaktor und Energie bei Neutronen (ICRP 2007).

Aus der Multiplikation der Energiedosis mit dem Wichtungsfaktor ergibt sich die Organdosis H_T (2.37). T gibt die Gewebeart an, die bei der Berechnung der effektiven Dosis betrachtet wird. Dadurch eignet sie sich für Betrachtungen, bei denen auf Schädigungen des Gewebes Bezug genommen wird. Die Organdosis wird in der Einheit Sievert angegeben (2.38) (Krieger 2007, Turner 2007).

$$H_T = \sum_R D_{T,R} \cdot w_R \quad (2.37)$$

$$[H_T] = 1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg} \quad (2.38)$$

2. Radioaktivität

Effektive Dosis

Die Schädigung bestrahlten Gewebes ist nicht nur von der Art der Strahlung, sondern auch von der Art des Gewebes abhängig. Die effektive Dosis E beschreibt die Auswirkungen von Strahlung auf verschiedene Gewebearten. Dazu wird die Organdosis mit einem Faktor w_T multipliziert (2.39).

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (2.39)$$

In w_T fließen unterschiedliche Aspekte wie Sterblichkeit und verschiedene tödliche Auswirkungen (Krebs, genetische Effekte, Verkürzung der Lebenszeit) ein. Tabelle 2.3 gibt die Werte für den Faktor w_T an, die auf die Empfehlung der ICRP (ICRP 2007) zurückgehen (Krieger 2007, Turner 2007).

Tabelle 2.3.: Werte für w_T (ICRP 2007).

Gewebe	w_T	w_T
Knochenmark (rot), Kolon, Lunge, Magen, Brust, restliche Gewebearten	0,12	0,72
Keimdrüsen	0,08	0,08
Blase, Oesophagus, Leber, Schilddrüse	0,04	0,16
Knochenoberfläche, Gehirn, Speicheldrüsen, Haut	0,01	0,04
	Σ	1,00

3. Ursprung, Vorkommen und Eigenschaften von Radon

3.1. Eigenschaften

Radon ist ein radioaktives Edelgas, hat die Ordnungszahl 86 und wird im Periodensystem mit dem Symbol Rn angegeben. Unter Normalbedingungen¹ hat es weder Farbe, Geruch noch Geschmack. Da ²³⁸Uran fast überall im Boden als Spurenelement auftaucht, ist auch ²²²Radon weit verbreitet. Innerhalb der natürlichen Zerfallsreihen treten fünf Isotope auf, von denen drei den Hauptanteil des Vorkommens ausmachen. Ihre Eigenschaften sind in Tabelle 3.1 aufgelistet. Aus historischen Gründen wird ²²⁰Radon als Thoron, weil es in der Thorium-Reihe vorkommt und ²¹⁹Radon als Actinon bezeichnet, weil es in der Uran-Aktinium-Reihe vorkommt. Mit Radon ist im Allgemeinen ²²²Radon gemeint, weil es von den Radon-Isotopen am Häufigsten auftritt.

Tabelle 3.1.: Eigenschaften der drei häufigsten Radonisotope.

Isotop	²²² Rn	²²⁰ Rn	²¹⁹ Rn
Name		Thoron	Action
$T_{1/2}$	3,8 d	55,6 s	3,96 s
Isotopenverhältnis	90 %	9 %	1 %
Zerfallsart	α	α	α
Zerfallsprodukt	²¹⁸ Po	²¹⁶ Po	²¹⁵ Po
Zerfallsenergie	5,590 MeV	6,405 MeV	6,946 MeV

3.1.1. ²²²Radon in der Uran-Radium Zerfallsreihe

²²²Radon tritt innerhalb der Uran-Radium-Zerfallsreihe auf, welche in Abbildung 3.1 in einem Neutronen-Protonen-Koordinatensystem dargestellt ist. Dabei beschreibt eine Linie über zwei Kästchen nach links unten einen α -Zerfall und eine Linie nach rechts unten einen β^- -Zerfall. Aufgrund der langen Halbwertszeit von ²³⁸Uran mit $4,5 \cdot 10^9$ Jahren sind sämtliche Radionuklide der Reihe in der Natur auffindbar. Genauere Informationen über den Mutterkern sowie die Zerfallsprodukte ab ²²²Radon enthält Tabelle 3.2. Manche Isotope können auf zwei Arten zerfallen. In der Tabelle werden nur jene mit der höheren Zerfallswahrscheinlichkeit angegeben, welche mindestens 99,8 % beträgt.

¹273,15 K, 101,325 Pa

3. Ursprung, Vorkommen und Eigenschaften von Radon

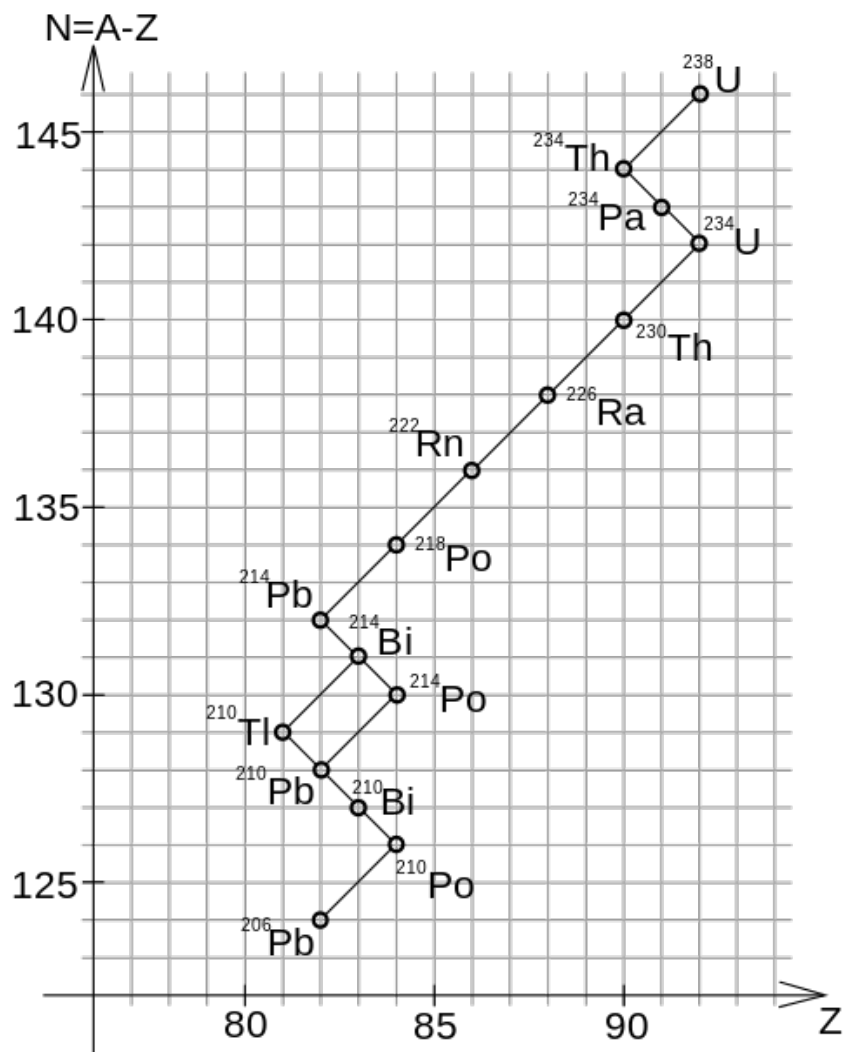


Abbildung 3.1.: Zerfälle und Radionuklide der Uran-Radium-Reihe (Pajs 2007).

Tabelle 3.2.: Zerfälle ab $^{226}\text{Radium}$.

Isotop	Zerfall	$T_{1/2}$	Energie (MeV)	Folgeprodukt
^{226}Ra	α	1602 a	4,871	^{222}Rn
^{222}Rn	α	3,8235 d	5,59	^{218}Po
^{218}Po	α	3,05 min	6,115	^{214}Pb
^{214}Pb	β^-	26,8 min	1,024	^{214}Bi
^{214}Bi	β^-	19,9 min	3,272	^{214}Po
^{214}Po	α	164 s	7,883	^{210}Pb
^{210}Pb	β^-	22,3 a	0,064	^{210}Bi
^{210}Bi	β^-	5,013 d	1,426	^{210}Po
^{210}Po	α	138,367 d	5,407	^{206}Pb
^{206}Pb		stabil		

3.1.2. Emanation

Unter Emanation versteht man die Freisetzung des Festen ^{222}Rn in die Porenräume des Gesteins. Der Prozess wird durch die Verteilung des Radiums im Mineral beeinflusst. Das Maß für die Anzahl an ^{222}Rn Radonatonen, die in einem Festkörper gebildet werden und diesen wirklich verlassen, ist durch den Emanationskoeffizienten gegeben. Die Atome können nur aus dem Festkörper austreten, wenn ihre Entfernung zu der Kornoberfläche geringer ist als die Diffusionsweite oder der Rückstoßreichweite des Alphazerfalls. Um aus tiefer gelegenen Schichten zu entweichen sind kristallinterne Freiräume notwendig.

3.1.3. Migration

Die Migration ist die Bewegung von ^{222}Rn innerhalb des Gesteins und Bodens und hängt unter anderem von der Permeabilität des Bodens ab. Die Transportgleichung dieses Prozesses ist in Formel 3.1 gegeben. Dabei haben die vorkommenden Terme auf der rechten Seite der Gleichung folgende Bedeutung:

1. Term ... Diffusion von Radon
2. Term ... Konvektion
3. Term ... Radonproduktion
4. Term ... Radioaktiver Zerfall des Radons während des Transportvorganges

$$\frac{\partial a_{\text{Rn}}}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot D_e \cdot \vec{\nabla} a_{\text{Rn}} - \vec{\nabla} \cdot a_{\text{Rn}} \cdot \vec{v} + \epsilon \cdot \rho_s \cdot \frac{1-n}{n} \cdot A_{\text{Ra}} \cdot \lambda_{\text{Rn}} - \lambda_{\text{Rn}} \cdot a_{\text{Rn}} \quad (3.1)$$

- a_{Rn} ... ^{222}Rn Radon Aktivitätskonzentration (Bq/m^3)
 D_e ... effektiver Diffusionskoeffizient (m^2/s)
 \vec{v} ... Konvektionsgeschwindigkeit (m/s)
 n ... Porosität
 ϵ ... Emanationsanteil
 ρ_s ... Dichte der Bodenkörner ($2,65 \cdot 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$)
 A_{Ra} ... $^{226}\text{Radium}$ Aktivitätskonzentration (Bq/kg)
 λ_{Rn} ... ^{222}Rn Radon Zerfallskonstante ($2,1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$)

3.1.4. Tiefenverteilung

Die Tiefenverteilung von ^{222}Rn ist von der Diffusionsweite l (3.2) abhängig, welche die Entfernung der Quelle angibt, in der die Radonkonzentration auf $1/e$ abgefallen ist. Dabei stellt laut Fick'schem Gesetz die Diffusionskonstante D^* die Proportionalität zwischen dem Teilchenfluss und dem räumlichen Konzentrationsgefälle dar.

$$l = \sqrt{D^* \cdot \lambda^{-1}} \quad (3.2)$$

Die Verteilung von ^{222}Rn im Bodengas bei verschiedenen Tiefen ergibt sich aus Formel

3. Ursprung, Vorkommen und Eigenschaften von Radon

3.3. Sie zeigt ein exponentielles Verhalten und nimmt exponentiell mit der Entfernung von der Oberfläche ab bis sie einen konstanten Wert z annimmt.

Tabelle 3.3.: Diffusions-weiten und Koeffizienten für verschiedene Böden (Kemski et al. 1996).

Medium	$l^{222\text{Rn}}$ (cm)	D^* (cm^2/s)
Wasser	2,2	10^{-5}
wassergesättigter Boden	7-10	$10^{-4} - 10^{-3}$
feuchte Tone und Lehme	20 - 155	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$
trockene Sande und Kiese	155 - 195	$5 - 8 \cdot 10^{-2}$
Luft	220	10^{-1}

$$a_z = a_{const}(1 - e^{-\frac{z}{l}}) \quad (3.3)$$

a_z ... ^{222}Rn Aktivitätskonzentration in der Tiefe z (Bq/m^3)
 a_{const} ... konstante ^{222}Rn Aktivitätskonzentration (Randbedingung in hoher Tiefe) (Bq/m^3)

Das Verhältniss der relativen Aktivitätskonzentration zur Tiefe für verschiedenen Diffusionsweiten wird in Abbildung 3.2 dargestellt.

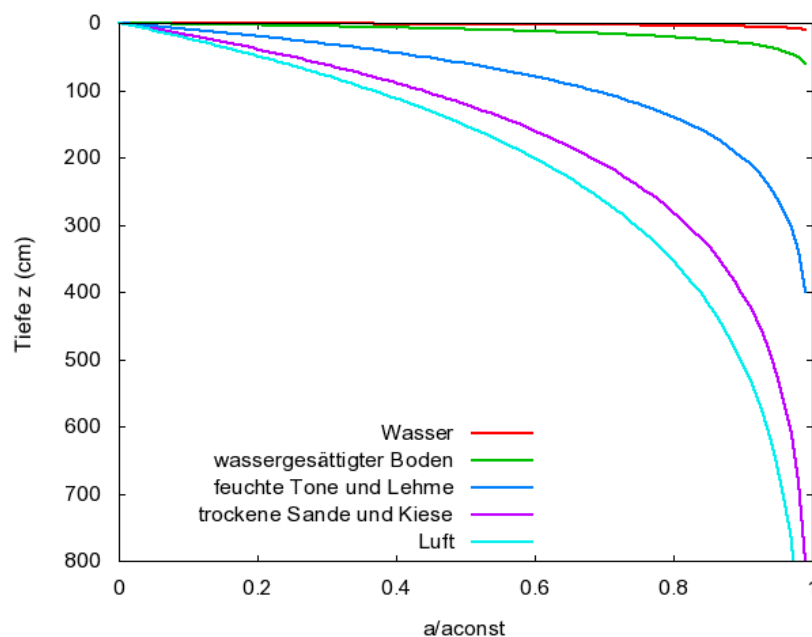


Abbildung 3.2.: Darstellung der relativen ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration in Abhängigkeit zur Tiefe (Kemski et al. 1996).

In der Nähe der Oberfläche exhaliert ^{222}Rn an die Frischluft weswegen die ^{222}Rn Konzentration im Boden mit der Tiefe anfänglich steigt. Die Berechnung der Exhalationsrate J ist in Gleichung 3.4 gegeben (Kemski et al. 1996, Baumgartner 2006).

$$J = n \cdot [v_e \cdot a_z - D_e \cdot \frac{\partial a_z}{\partial z}] \quad (3.4)$$

J ... Exhalationsrate ($\text{Bq}/\text{m}^2\text{s}$)

3.2. Radonkonzentrationen in Gebäuden

Neben der Zusammensetzung des Bodens (dem Vorkommen an $^{238}\text{Uran}$ und $^{226}\text{Radium}$), sind somit auch dessen Korngröße und Durchlässigkeit von Bedeutung. Denn nicht nur die Menge an $^{222}\text{Radon}$, sondern auch die Leichtigkeit seiner Entweichung tragen zu der Konzentration in Gebäuden bei, welche schließlich in Hinblick auf die gesundheitsschädigenden Auswirkungen relevant ist. Aufgrund seiner Halbwertszeit von etwa vier Tagen kann $^{222}\text{Radon}$ nach der Entstehung aus dem Boden treten und in das Gebäude diffundieren ohne vorher vollständig zu zerfallen.

Ein Faktor für die $^{222}\text{Radon}$ in Gebäuden sind die Grenzen zwischen diesem und dem Erdreich. So sind die Beschaffenheit des Fundamentes bzw. die der Mauern mit Erdkontakt maßgeblich für die Radondurchlässigkeit. An Fugen, Rissen, Spalten oder entlang von Rohren oder Kabelleitungen kann $^{222}\text{Radon}$ leicht in Gebäude gelangen, wobei der Kamineffekt eine wesentliche Rolle spielt. Da warme Luft aufsteigt, entsteht ein leichter Unterdruck am Boden des Raumes beziehungsweise im Keller des Gebäudes, wodurch ein Sog entsteht, der radonhaltige Bodenluft ansaugt.

Im Gebäude haben sowohl die Luftdurchmischung innerhalb des Hauses als auch der Luftaustausch mit der freien Umgebung einen großen Einfluss auf die Konzentration von $^{222}\text{Radon}$ in der Raumluft. Bestehen beispielsweise offene Verbindungen zu Räumen mit Bodenkontakt kann sich das $^{222}\text{Radon}$ leicht in die angrenzenden Räume verbreiten. Durch Lüften wird das $^{222}\text{Radon}$ jedoch schnell in den Außenbereich abtransportiert sowie die Innenraumkonzentration verringert. Während eines Jahres können die Konzentrationen von $^{222}\text{Radon}$ in Gebäuden erheblich schwanken, da trotz geschlossener Fenster die Witterungsverhältnisse durch die Temperaturdifferenzen zwischen Außen- und Innenluft einen Einfluss auf die Luftdurchmischung haben. Einerseits sind Fenster nicht vollkommen dicht, andererseits spielt vor allem das Lüftverhalten der Bewohner eine Rolle. Die Vorkommen von $^{222}\text{Radon}$ in der Umwelt und der Transport von $^{222}\text{Radon}$ in das Haus sowie Werte für auftretende $^{222}\text{Radon}$ Aktivitätskonzentrationen werden in Abbildung 3.3 dargestellt.

3.2.1. Grenzwerte

In Österreich gilt für die $^{222}\text{Radon}$ Aktivitätskonzentration ein Richtwert von maximal $200 \text{ Bq}/\text{m}^3$ bei Neubauten und $400 \text{ Bq}/\text{m}^3$ bei bereits bestehenden Bauten. Von der WHO wird jedoch ein genereller Grenzwert von $100 \text{ Bq}/\text{m}^3$ vorgeschlagen, $300 \text{ Bq}/\text{m}^3$ sollten in keinem Fall überschritten werden (WHO 2009).

Maßnahmen zur Vorsorge und Verringerung der Radonkonzentration sind in der ÖNORM S 5280-2 (2008) festgelegt, in der Methoden zur Abdichtung und Belüftung angegeben sind. In jedem Fall sollen aber Messungen durchgeführt werden, auch wenn bauliche Präventionsmaßnahmen getroffen wurden, da diese keinen ausreichenden Schutz garantieren (WHO 2009).

3. Ursprung, Vorkommen und Eigenschaften von Radon

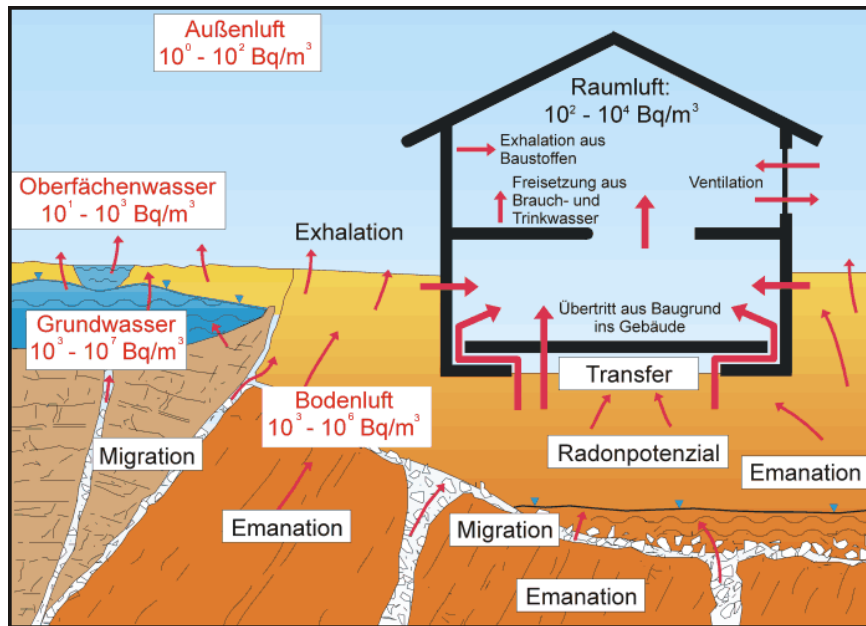


Abbildung 3.3.: Veranschaulichung der Freisetzung, Transportes und auftretender Aktivitätskonzentrationen von $^{222}\text{Radon}$ (Kemski et al. 2013).

3.2.2. Messungen in Innenräumen

Laut ÖNORM S 5280-1 (2008) sollten bei Messungen folgende Aspekte beachtet werden:

- Die Messungen sollen in mindestens zwei Räumen durchgeführt werden, wobei jene mit den längsten Aufenthaltszeiten, also Wohn-, Schlaf- und Kinderzimmer, bevorzugt werden.
- Räumlichkeiten im Erdgeschoß sind von größerem Interesse, da diese an das Erdreich grenzen, aus dem das $^{222}\text{Radon}$ hinausdiffundiert.
- Das Messgerät sollte von Kinder und Haustieren unerreichbar platziert werden.
- Es soll an einem Ort mit Abstand von der Wand, ohne viel Zugluft und keiner starken Erwärmung unterliegend in Atemhöhe aufgestellt werden.
- Aufgrund der Schwankungen in der Konzentration von $^{222}\text{Radon}$ in Innenräumen, sollte eine langzeitintegrierende Messung über ein Jahr lang durchgeführt werden. Ist sie nur kürzer möglich, müssen bestimmte Bedingungen eingehalten werden, um auf den Jahresmittelwert schließen zu können. So muss die Messzeit mit einer Mindestdauer von drei Monaten zumindest zur Hälfte zwischen dem 15. Oktober und dem 15. April liegen, weil im Winter durch Heizen der Kamineffekt verstärkt wird und weniger gelüftet wird.

Für die Messungen werden etwa Alpha-track Detektoren verwendet. Sie sind klein, kostengünstig und leicht zu handhaben. Durch einen Filter gelangt die Umgebungsluft in eine Diffusionskammer, wo sich ein Plastikmaterial befindet, auf dem α -Teilchen Schäden bzw. Spuren hinterlassen. Das Verhältnis von der Anzahl dieser Spuren zur Fläche gibt bei der Auswertung

die gemessene Durchschnittsaktivität pro Luftvolumen an. Die Nutzung von verschiedenen Filtermaterialien hat Auswirkungen auf die Zeitdauer, die die Umgebungsluft benötigt, um in die Kammer zu gelangen. Durch eine Erhöhung dieser Zeit können auch Einflüsse von Thoronzerfallsprozessen eliminiert werden, da dadurch der Großteil von Thoron zerfällt, bevor es in die Kammer gelangt (WHO 2009).

3.3. Radonpotential

Im Zuge des ÖNRAP-Projekts (Friedmann ÖNRAP) wurden innerhalb von Österreich über 40 000 Innenraummessungen durchgeführt. Anhand dieser Daten wurde eine Radonpotentialkarte erstellt, welche in Abbildung 3.4 dargestellt ist und in die laufend neue Daten einfließen. Das Radonpotential wurde wie folgt definiert: „Das Radonpotential ist der Erwartungswert für die über das Jahr gemittelte Radonkonzentration in einem, in üblicher Weise genutzten Wohnraum im Erdgeschoss in einem nicht oder nur teilweise unterkellerten Haus, das nicht aus Stein erbaut ist, wobei die Wohnung von zwei Erwachsenen und weniger als zwei Kindern bewohnt ist und keine einfachen Fenster aufweist.“

Für das Radonpotential ergeben sich also folgende Parameter:

- Jahresmittelwert
- Wohnraum im Erdgeschoss
- Übliche Nutzung (z.B. kein Wochenendhaus)
- Nicht oder nur teilweise unterkellert
- Kein Steinbau
- Keine einfachen Fenster
- Zwei Erwachsene
- Weniger als zwei Kinder

Messergebnisse aus Räumlichkeiten die nicht den angegebenen Charakteristiken entsprechen wurden mit Korrekturfaktoren angepasst. Um das Radonpotential einer Region zu berechnen, wurden die korrigierten Messwerte aus dem entsprechenden Gebiet gemittelt. Das Radonpotential ist ein statistischer Wert und sollte nicht als Vorhersage des Wertes eines einzelnen Hauses herangezogen werden.

Somit stellt die Radonpotentialkarte die Umsetzung des Radon-Maßnahmenplanes aus Artikel 103(3) der europäischen Strahlenschutzrichtlinien dar (Euratom 2013): „Die Mitgliedstaaten ermitteln Gebiete, für die erwartet wird, dass die Radonkonzentration (im Jahresmittel) in einer beträchtlichen Zahl von Gebäuden den einschlägigen nationalen Referenzwert überschreitet.“

3. Ursprung, Vorkommen und Eigenschaften von Radon

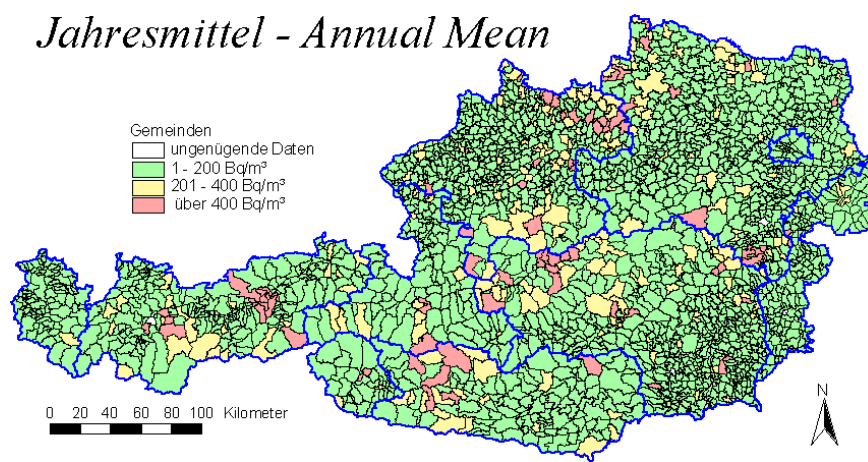


Abbildung 3.4.: Österreichische Radonpotentialkarte (Friedmann 2013).

4. Wirkung von ionisierender Strahlung und im speziellen von Radon auf die Gesundheit

4.1. Durchschnittliche Strahlenexposition

Die effektive Strahlendosis eines Österreicherers beträgt durchschnittlich 4,61 mSv pro Jahr, wovon 2,48 mSv, also 53,8 %, auf die Inhalation von ²²²Radon und dessen Folgeprodukte zurückzuführen sind. Eine genauere Aufschlüsselung der verschiedenen Beiträge liefert der sogenannte „Strahlenkuchen“, der in Abbildung 4.1 gezeigt wird. Die verschiedenen Beiträge zu der Dosis können sowohl durch äußere Bestrahlung als auch von Innen durch Einatmen (Inhalation) sowie Einnahme (Ingestion) aufgenommen werden. Der Strahlenkuchen gibt die durchschnittliche Exposition an, wobei für ein Individuum die Anteile stark von dem abgebildeten Diagramm abweichen können. Beispielsweise kann die Exposition durch medizinische Anwendungen stark variieren, je nach dem welche und wieviele Untersuchungen erfolgten. Generell ist eine Reduzierung der Dosis auf null nicht möglich, da es bereits in der Natur genügend Strahlenquellen gibt, denen man sich nicht entziehen kann.

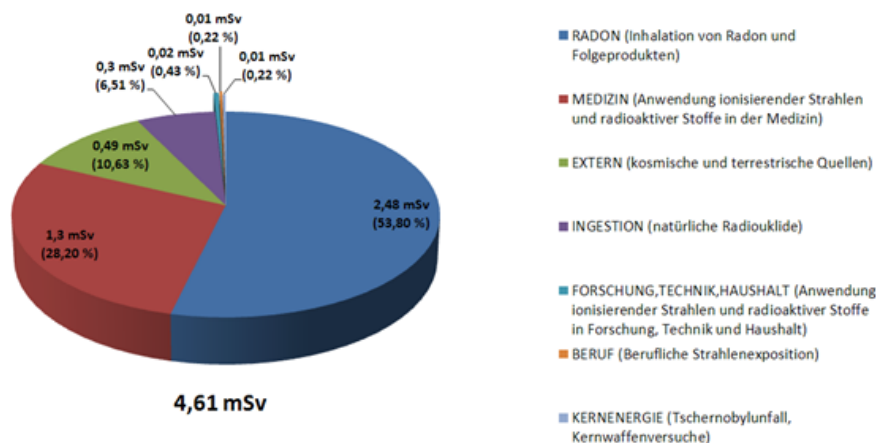


Abbildung 4.1.: Beiträge zur durchschnittlichen Strahlenbelastung eines Österreicherers in einem Jahr (Maringer et al. 2012).

Im Strahlenschutz gilt allgemein das ALARA Prinzip, was für As Low As Reasonably Achievable steht. Eine Strahlenexposition und die damit verbundene erhaltene Dosis soll also so gering gehalten werden, wie es vernünftige Aspekte zulassen. Ebenfalls muss abgewogen werden, ob der Zweck die Exposition überhaupt rechtfertigt. Die Dosis kann durch eine Verringerung der

4. Wirkung von ionisierender Strahlung und im speziellen von Radon auf die Gesundheit

Zeit während der Exposition, eine bessere Abschirmung oder eine Vergrößerung der Distanz zur Strahlenquelle reduziert werden.

4.2. Gesundheitsschädigende Wirkungen von ionisierender Strahlung

Die Schäden und Auswirkungen von ionisierender Strahlung können in Hinblick auf ihre Wirkungsweise und Auswirkungen unterschieden werden.

Direkte und indirekte Schäden

Direkte Schäden durch ionisierende Strahlung treten physikalisch durch Ionisation von Biomolekülen auf. Dadurch können DNA-Stränge aufgebrochen werden oder anderen Zellstrukturen Schaden zugefügt werden. Die direkten Schäden erfolgen augenblicklich.

Durch die Wirkung ionisierender Strahlung können unter anderem im Zellwasser Radikale gebildet werden, welche das Zellmaterial chemisch schädigen. Auf diese Weise verursachen Strahlen auf indirekte Weise Schäden.

Schlussendlich führen die direkten und indirekten Schäden zu sehr ähnlichen Auswirkungen.

Somatische und genetische Effekte

Somatische Schäden betreffen das bestrahlte Individuum selbst und führen unter anderem zu Sterilität, Blutarmut, Krebs, einer verkürzten Lebenszeit oder Tod. Wirken sich Mutationen von geschädigten Keimzellen auf die bestrahlte Person selbst aus, ist von somatischen Schäden die Rede. Allerdings können durch Mutationen auch die nachkommenden Generationen betroffen werden, was als genetischer Effekt bezeichnet wird. Darunter fallen Brüche oder der Verlust von Chromosomen, wodurch Fehlbildungen, Stoffwechselstörungen und Immunschäden verursacht werden.

Stochastische und deterministische Auswirkungen

Bei stochastischen Schäden steigt die Eintrittswahrscheinlichkeit mit der Dosis, wobei der Schadensumfang unabhängig von dieser ist. Dazu gehören Krebs und Leukämie, da eine Exposition ionisierender Strahlung die Wahrscheinlichkeit des Eintretens der Krankheit erhöht. Grundsätzlich kann in jedem Gewebe oder Organ, das ionisierender Strahlung ausgesetzt wird, Krebs entstehen. Die Schwere der Krebserkrankung selbst wird durch die Höhe der Dosis nicht beeinflusst. Es gibt auch keine Dosisgrenze unter welcher eine Erkrankung ausgeschlossen werden kann.

Im Gegensatz dazu sind deterministische Schäden Effekte, die erst ab einem gewissen Schwellenwert auftreten. Deren Ausmaß und Zeitpunkt, an dem die Krankheit eintritt, sind ebenfalls von der Dosis abhängig. Beispielsweise sind ab 500 mSv Haarausfall, Blutarmut, Verlust der

Fruchtbarkeit, Strahlenkrankheit oder Verbrennungen der Haut möglich. Schädigung und Abtötung von Zellen desselben Organes oder selben Gewebes haben Auswirkungen auf deren Funktion (Bevelacqua 2010, BFS 2014, Maringer 2011).

4.3. Beitrag von Radon zum Lungenkrebsrisiko

Für die Gesundheitsgefährdung ist nicht nur ^{222}Rn selbst, sondern hauptsächlich dessen Folgeprodukte verantwortlich. Während ^{222}Rn nach der Inhalation wieder ausgeatmet wird, bleiben die Folgeprodukte an den feuchten Lungenwänden haften, wo die entsendete ionisierende Strahlung direkt auf das Lungengewebe wirken kann.

Radon selbst hat zwar eine vergleichsweise lange Halbwertszeit, jedoch die einzelnen Halbwertszeiten der vier Folgeprodukte befinden sich jeweils unter einer halben Stunde. Dadurch geschehen fünf relativ raschen Zerfälle, begonnen mit dem von ^{222}Rn , bevor wegen der Halbwertszeit von ^{210}Pb mit 22 Jahren lange kein Zerfall eintritt (vgl. Tabelle 3.2).

Laut WHO (2009) beträgt der Anteil der ^{222}Rn bedingten Lungenkrebserkrankungen zwischen 3 % und 14 %, wobei die Werte von der Art ihrer Berechnung und dem jeweiligen Land abhängen. Damit ist es nach dem Rauchen der häufigste Grund für Lungenkrebs und somit für Nichtraucher die Hauptursache an Lungenkrebs zu erkranken. Das Risiko einer Erkrankung ist proportional zur Exposition mit ^{222}Rn und es gibt keine Grenze unter der kein Risiko mehr besteht. Bereits ein α -Teilchen ist in der Lage einen erheblichen genetischen Schaden an einer Zelle anzurichten, welcher als Ausgangspunkt für ein Krebsgeschwür genügen kann.

Aus dem Vergleich der WHO von Ergebnisse zusammengelegter Studien aus verschiedenen Ländern, kann das Ansteigen des Erkrankungsrisikos in Zusammenhang mit der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration gestellt werden. Die dabei ermittelten Werte werden in Tabelle 4.1 aufgelistet, wobei nur die europäische Studie auf die jährliche Schwankungen der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration in Wohnräumen eingeht. Um diese Schwankungen miteinzubeziehen wird ein weiterer Wert abgeschätzt, in welchen Messungen und Daten zur zeitlichen Abhängigkeit der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration aus anderen Studien einfließen. Für verschiedene Alter oder Geschlechter wurden keine spezifischen Zusammenhänge gefunden.

Tabelle 4.1.: Werte für den Risikoanstieg einer Lungenkrebserkrankung durch eine ^{222}Rn Exposition mit dem, nach den Varianzen gewichtete, Mittel und die, die Schwankungen der Aktivitätskonzentration miteinbeziehenden, Schätzung (WHO 2009).

Land	Risikoanstieg pro 100 Bq/m ³	Varianz
Europa	8 %	3 – 16 %
Europa - Langzeit	16 %	5 – 31 %
Nordamerika	11 %	0 – 28 %
China	13 %	1 – 36 %
Gewichtetes Mittel	10 %	
Schätzung	20 %	

Die europäischen Daten gehen auf die Studie von S. Darby (2005) zurück, welche wieder-

4. Wirkung von ionisierender Strahlung und im speziellen von Radon auf die Gesundheit

um die Daten von 13 Studien aus neun europäischen Ländern verwendet. Dabei betragen die ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen von Personen, die an Lungenkrebs erkrankten, im Mittel 104 Bq/m^3 . Der berechnete Anstieg einer Erkrankung an Lungenkrebs, abhängig von der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration in Häusern, wird in Abbildung 4.2 dargestellt. Es scheint eine lineare Proportionalität vorzuliegen, weswegen durch die Punkte eine Gerade gelegt worden war. Die Balken geben den Vertrauensbereich mit 95 % an. Es gibt keine Grenzwerte unter der keine Erhöhung des Erkrankungsrisikos durch eine Exposition von ^{222}Rn statt findet. In der Studie wird die Wahrscheinlichkeiten angegeben im Alter von 75 Jahren an Lungenkrebs zu erkranken, welche in Tabelle 4.2 aufgelistet werden. Es wird angenommen, dass 9 % der Lungenkrebserkrankungen und 2 % aller Krebserkrankungen in Europa auf ^{222}Rn zurückzuführen sind.

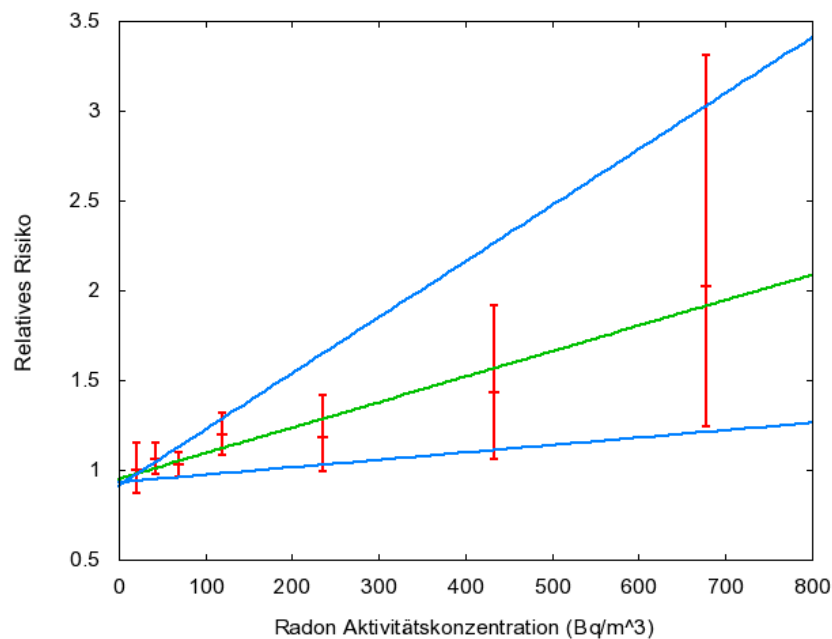


Abbildung 4.2.: Erhöhung des Risikos einer Lungenkrebserkrankung durch die ^{222}Rn Exposition in Wohnräumen (Darby et al. 2004).

Tabelle 4.2.: Wahrscheinlichkeit mit 75 Jahren an Lungenkrebs zu erkranken (Darby et al. 2004).

^{222}Rn -Aktivitätskonzentration	0 Bq/m^3	100 Bq/m^3	400 Bq/m^3
Lebenslanger Nichtraucher	0,4 %	0,5 %	0,7 %
Raucher	10 %	12 %	16 %

Teil II.

Methodik

5. Untersuchung des Bodengases auf Radon

5.1. Probenahme des Bodengases

An jedem Messort werden drei Metallsonden (Länge = 1,6 m, $\varnothing = 12$ mm) ungefähr 1,4 m tief in den Boden geschlagen, wobei ein Hammer und ein Schlagaufsatz verwendet werden. Die Punkte, an denen die drei Sonden eingeschlagen werden, sollen dabei im Idealfall ein gleichseitiges Dreieck mit 1 m Kantenlänge bilden. Danach wird eine dünne Stange, der Dorn, durch die Sonden geschlagen. Dadurch wird die lose Metallspitze, die vor dem Einschlagen der Sonde an ihrem unteren Ende angebracht wurde, weiter abgesenkt. Dieses System wird als „Prinzip der verlorenen Spitze“ bezeichnet und schafft einen 5 cm langen Hohlraum unter der Sonde wie in Abbildung 5.1 dargestellt wird. Bei der Berechnung des Formfaktors für die Abschätzung der Permeabilität in Formel 6.2, stellt dieser Hohlraum das effektive Sondenvolumen dar.

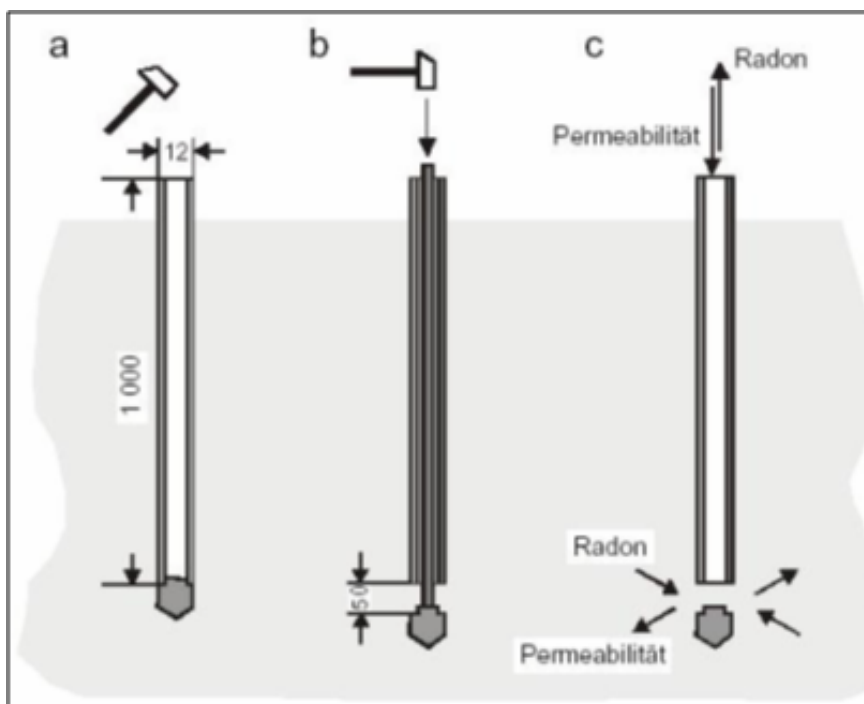


Abbildung 5.1.: Prinzip der verlorenen Spitze (Fass 2004).

Als nächstes wird ein Schlauch mit Verschluss auf die Spitze der Sonde gesteckt. Durch diesen Verschluss ist eine Nadelspitze gestochen, an der eine Spritze angesetzt wird, um die Bodenluft aus den Sonden zu extrahieren, wie in Abbildung 5.2 gezeigt wird. Der erste volle Spritzeninhalt wird verworfen, da neben dem Bodengas die Frischluft angesogen wird, die sich

5. Untersuchung des Bodengases auf Radon

vor dem Einschlagen in der Sonde befand. Anschließend wird das unverdünnte Gas aus dem Boden gezogen und 100 ml Bodengas in die Alphaguard Messgeräte eingespeist.



Abbildung 5.2.: Extraktion der Bodenluft.

Die ersten vier angezeigten Messwerte, die sich alle zehn Minuten aktualisieren, werden dokumentiert. Nach der zweiten Aktualisierung kann, aufgrund der geringen Halbwertszeit, der Thoron bedingte Einfluss auf die Messung vernachlässigt werden.

5.2. Alphaguard Messgerät

Zur Messung der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration im entnommenen Bodengas wurden Alphaguards der Firma Genitron verwendet. Dabei handelt es sich um portable Ionisationskammern mit alphaspektrometrischer Auswertung. Ihr gesamtes Detektorvolumen beträgt 0,62l und das aktive Detektorvolumen 0,56l. Die Messgeräte sind in Abbildung 5.3 während einer Messung dargestellt.

Bei den Messungen werden aus einer Spritze 100 ml des entnommenen Bodengases in das Gerät eingespeist. Dieses befindet sich im Durchflussmodus, in dem der Wert alle zehn Minuten aktualisiert wird. Der Verschluss auf der rückwertigen Seite ist aufgeschraubt, um ein Entweichen des eingespeisten Gases zu verhindern.



Abbildung 5.3.: Alphaguards mit angesteckten Spritzen während einer Messung.

Nach den Messungen werden die Eingänge der Alphaguards an Ausgänge von Alphapumps geschlossen, um sie mit Frischluft durchzuspülen, wobei die Verschlüsse von den Messgeräten abgeschraubt werden. Der Wert vor dem Einspeisen einer Probe soll möglichst gering sein, da er den Leerwert der Messung darstellt.

Der Spülvorgang sollte nicht länger als zehn Minuten benötigen, um bei der maximalen Pumpleistung von 1 l/min , die Luft des gesamte Detektorvolumen zu tauschen. Sollten jedoch die angezeigten Werte nicht schnell genug fallen, ist eine längere Zeitdauer nötig. Das Verhalten der Werte während und nach dem Spülen werden in Tabelle 5.1 aufgelistet. Die dargestellten Messwerte stammen aus den Messungen für die Berechnungen des Kalibrierfaktors in Kapitel 5.2.2. Dabei fällt mindestens der erste Folgewert noch in den Zeitraum des Spülens. Die angezeigten Aktivitätskonzentrationen können nach zehnmütigem Spülen deutlich über dem Leerwert liegen, wodurch längere Spülvorgänge nötig sind. Bei Messungen mit höheren $^{222}\text{Radon}$ -Aktivitätskonzentrationen kann jedoch ein viel langsames Abfallen der Werte beobachtet werden.

5.2.1. Kalibrierfaktor

Das beprobte Gas wird zusätzlich, zu der sich bereits im Gerät befindlichen Luft, eingespeist. Zur Bestimmung der tatsächlichen $^{222}\text{Radon}$ -Aktivitätskonzentration ist somit ein Kalibrierfaktor nötig. Dieser ist größer als eins, da das Gas nicht das gesamte Detektorvolumen ausfüllt, sondern verdünnt wird. Bei den Geräten mit bekannten Kalibrierfaktoren, werden die bekannten Werte aus früheren Kalibrierungen von Gruber(2004) übernommen. Die unbekannt Kalibrierfaktoren werden mit dem Wert acht angenommen. In Tabelle 5.2 werden die Geräte mit ihren Kalibrierfaktoren für 100 ml eingespeisten Gases aufgelistet.

5.2.2. Korrektur des Kalibrierfaktors

Im Frühjahr wurden bei den Probenahmen jeweils 150 ml Probevolumen in die Geräte eingespeist, wodurch für die Berechnung des tatsächlichen $^{222}\text{Radon}$ -Aktivitätskonzentrationswerts

5. Untersuchung des Bodengases auf Radon

Tabelle 5.1.: Aktivitätskonzentrationen und Dauer von verschiedenen Spülungen.

$a_{222\text{Rn}}$ letzter Messwert (Bq/m ³)	t Spüldauer (min)	$a_{222\text{Rn}}$ Folgewerte (Bq/m ³)		
408 ± 74	10	< 37		
560 ± 90	10	238	47 ± 44	
829 ± 119	10	442	< 50	
615 ± 101	10	231	57 ± 50	
449 ± 88	10	167	97 ± 53	
727 ± 110	19	259	< 50	
289 ± 63	10	115	48 ± 38	
417 ± 77	10	281	95 ± 48	
398 ± 75	10	354	53 ± 43	
280 ± 65	10	182	58 ± 43	
364 ± 72	10	151	< 39	
408 ± 77	10	313	< 42	
574 ± 92	10	219	< 43	
396 ± 78	20	223	< 43	
240 ± 58	10	112	70	41 ± 36
398 ± 74	30	176	62	< 37

Tabelle 5.2.: Auflistung der Geräte und deren Kalibrierfaktoren aus früheren Messungen.

Gerät	Nummer	Kalibrierfaktor
AG6	EF 1625	8
Kaineder	EF 943	8,1
	EF 1256	8
AG4	EF 1623	8
Kaineder	EF 0924	7,98
Kaineder	EF 0943	8,1
BEV	EF 1338	8,07
AG2	EF 1621	8

nicht der Kalibrierfaktor für 100 ml verwendet werden kann. Der neue Kalibrierfaktor wurde aus experimentellen Messungen ermittelt. Um diesem Wert mit einem theoretischen Modell zu verbinden, wurden Berechnungen des Kalibrierfaktors durchgeführt, die auf zwei unterschiedlichen Annahmen beruhen.

Verlust von Bodengas bei Einspeisung

Bei diesem Modell geht während der Einspeisung des Bodengases ein Teil verloren und nur ein gewisser Prozentsatz P gelangt in den Detektor (Formel 5.1). Das Bodengas, welches in den Detektor gelangt, verdrängt dabei Luft aus dem Detektor, dessen Volumen konstant ist.

$$\text{Kalibrierfaktor} = \frac{V_{\text{Detektor}}}{V_{\text{Bodengas}} \cdot P} \quad (5.1)$$

Ein Kalibrierfaktor von acht ergibt sich, wenn sich nach der Einspeisung 77,5 % der 100 ml an Bodengas in den 620 ml des Detektorvolumens befinden (Formel 5.2).

$$8 = \frac{620 \text{ ml}}{100 \text{ ml} \cdot P} \quad \rightarrow \quad P = 0,775 \quad (5.2)$$

Bei 150 ml an Bodengas und dem gleichen Prozentsatz sowie Detektorvolumen ergibt sich ein Kalibrierfaktor von 5,3 (Formel 5.3).

$$\frac{620 \text{ ml}}{150 \text{ ml} \cdot 0,775} = 5,3 \quad (5.3)$$

Verlust von vollkommen durchmischtem Gas

Nun wird angenommen, dass es bei der Einspeisung zu einer vollkommenen Durchmischung des Bodengases und des Gases im Alphaguard kommt, bevor etwas von dem Gemisch verloren geht. In diesem Modell gibt der Prozentsatz an wieviel von dem Gemisch im Detektor verbleibt (Formel 5.4).

$$\text{Kalibrierfaktor} = \frac{V_{\text{Detektor}} + V_{\text{Bodengas}}}{V_{\text{Bodengas}}} \cdot P \quad (5.4)$$

Für den Kalibrierfaktor acht, ein Detektorvolumen von 620 ml und 100 ml Bodengas ergibt sich ein Prozentsatz von 111,1 % (Formel 5.5). Der Prozentsatz über 100 ergibt sich aus der Kompression des Gasgemischs im Detektor, was zu einem höherem Gesamtvolumen als dem ursprünglichen Detektorvolumen führt.

$$8 = \frac{720 \text{ ml}}{100 \text{ ml}} \cdot P \quad \rightarrow \quad P = 1,111 \quad (5.5)$$

Werden 100 ml Bodengas eingespeist und derselbe Prozentsatz des Gasgemischs geht verloren, ergibt sich ein Kalibrierfaktor von 5,7 (5.6).

$$\frac{770 \text{ ml}}{150 \text{ ml}} \cdot 1,111 = 5,7 \quad (5.6)$$

Experimentelle Messung

Zur Berechnung des tatsächlich vorliegenden Kalibrierfaktors für 150 ml werden die Ergebnisse praktischer Messungen benutzt. Es wird, wie bereits in Kapitel 5.1 beschrieben, eine Sonde in den Boden geschlagen. Aus dieser wird mittels einer Spritze mehrmals Bodenluft gesogen und in einen Ballon gefüllt. In diesem Ballon befindet sich somit ein Gasgemisch mit einheitlicher Radonkonzentration. Aus diesem Gemisch werden einmal 150 ml und einmal 100 ml in das Alphaguard gespeist und gemessen. Nach den Messungen wird mit jeweils einer der beiden Füllmengen wieder Bodengas in den Ballon gefüllt, wobei anschließend abgewechselt wird ob zu erst 150 ml oder 100 ml Bodengas in das Messgerät eingespeist werden. Es handelt sich also nicht bei allen Messungen um dieselbe Konzentration, jedoch ist immer bei zwei Messungen mit unterschiedlicher Füllmenge die Konzentration gleich.

In Tabelle 5.3 sind die Daten der Messreihen angeführt. Der Kalibrierfaktor ergibt sich aus

5. Untersuchung des Bodengases auf Radon

dem Quotienten des Wertes für 100 ml und 150 ml multipliziert mit acht, dem Kalibrierfaktor für 100 ml. Anders als bei den theoretischen Modellen, wird nicht direkt der Kalibrierfaktor für 150 ml ermittelt, sondern der Kalibrierfaktor für 100 ml angepasst.

$$\frac{a^{100 \text{ ml}}}{a^{150 \text{ ml}}} \cdot 8 = \text{angepasster Kalibrierfaktor} \quad (5.7)$$

Tabelle 5.3.: Liste der gemessenen Aktivitätskonzentrationen mit den sich daraus ergebenden Kalibrierfaktoren.

V Menge (ml)	$a_{222\text{Rn}}$ (Bq/m ³)	Kalibrierfaktor
100	357,5	5,18
150	552,5	
150	801	5,75
100	576	
100	472,5	5,39
150	701	
100	309	5,53
150	447	
150	441	4,92
100	271	
100	344,5	6,56
150	420	
150	588	5,67
100	416,5	
100	245,5	5,10
150	385	

Für den neuen Kalibrierfaktor werden die Faktoren gemittelt, was einen Wert von 5,51 (siehe Tabelle 5.4) ergibt. Das Mittel aus den Werten für die theoretischen Modelle 5,7 und 5,3 beträgt 5,5. Der experimentell Ermittelte Wert steht demnach in guten Einklang mit den Annahmen über die Einflüsse des Kalibrierfaktors.

Tabelle 5.4.: Mittelwert, Standardabweichung und Unsicherheit des berechneten Kalibrierfaktors.

	Mittelwert	Standardabweichung	Unsicherheit
Neuer Kalibrierfaktor	5,51	0,51	9,29 %

5.3. Auswertung

Bei der Auswertung der Messwerte müssen verschieden Aspekte berücksichtigt werden, um ein repräsentatives Ergebnis zu erhalten. Die Sondentiefe kann das Ergebnis beeinflussen und durch Inhomogenitäten im Boden kann es zu Ausreißern der Einzelmessungen kommen, von welchen die Endergebnisse bereinigt werden. Für die Berechnung der Unsicherheit des Endergebnisses müssen auch die Unsicherheiten dieser Einzelmessungen miteinbezogen werden.

5.3.1. Korrektur der Sondentiefe

Oft können auf Grund der Bodenbeschaffenheiten die Sonden nicht 1,4 m tief in die Erde geschlagen werden. Um die Messergebnisse trotzdem vergleichen zu können, werden diese hinsichtlich der eingeschlagenen Tiefe korrigiert. Die Abhängigkeit der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration von der Bodentiefe wird in Kapitel 3.1.4 beschrieben.

Die Diffusionskonstante D^* ist zwar von den Bodenbeschaffenheiten abhängig, wurde jedoch für die Korrekturberechnung einheitlich mit $D^* = 5 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ festgesetzt. Dadurch werden sowohl feuchte Tone als auch trockener Sand abgedeckt. Wird noch die Radonkonstante mit $\lambda_{Rn} = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ angenommen, ergibt sich für die Diffusionsweite $l = 154,3 \text{ cm}$.

5.3.2. Messwert

Als Messwert eines Ortes wird der Mittelwert aus den drei, nach den Sondentiefen korrigierten, Einzelmessungen herangezogen. Der Wert einer Einzelmessung ergibt sich aus dem Mittelwert des zweiten und dritten Messwertes des Alphaguards. Von denen wird zuvor der Wert vor der Einspeisung des Bodengases, also der Leerwert, abgezogen. Der erste Messwert wird nicht berücksichtigt, da einerseits das Bodengas erst während des Messzykluses eingespeist wurde und andererseits noch kein Einfluss von Thoron auf den Messwert ausgeschlossen werden kann.

5.3.3. Unsicherheit

Die Unsicherheit des Mittelwertes beinhaltet sowohl die statistischen Standardunsicherheiten als auch die Standardabweichung der Einzelmessungen.

- Es wird eine Fehlerfortpflanzung durchgeführt der Unsicherheiten von den einzelnen Messungen durchgeführt. Dabei wird aus der Summe ihrer Quadrate die Wurzel gezogen.

$$u_a = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \quad (5.8)$$

- Die Standardabweichung der Werte der Einzelmessungen wird mit dem Studentfaktor t multipliziert (1,32 für $n = 3$; 1,84 für $n = 2$) und durch die Wurzel von n dividiert.

$$u_b = \frac{\sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (u_i - \bar{u})^2 \cdot t(n)}}{\sqrt{n}} \quad (5.9)$$

- Die Messunsicherheit eines Ortes wird durch Fehlerfortpflanzung aus u_a und u_b berechnet.

$$u_{Ort} = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \quad (5.10)$$

Mit der gleichen Methode wird auch die Unsicherheit der Werte berechnet, nachdem sie in Bezug auf die Tiefe korrigiert wurden. Schließlich werden nach der Tiefenkorrektur die Werte

5. Untersuchung des Bodengases auf Radon

eines Messpunkts von Ausreißern der Einzelmessungen bereinigt. Ein Ausreißer ist ein Wert einer Einzelmessung, der um mehr als die Messunsicherheit geringer als der Mittelwert der drei Einzelmessungen ist.

5.4. Langzeitmessungen

Zeitgleich zu den Probenahmen an den verschiedenen Orten, wurden stationäre Langzeitmessungen durchgeführt. Im Herbst war eine Messstelle im Garten des Gemeindeamtes von Spital am Semmering aufgebaut (Messort 40), während sich im Frühling sowohl an gleicher Stelle (Messort 43), als auch im Garten eines Gasthauses in Ganz (Messort 42) Messstellen befanden.

Bei einer Langzeitmessung wird kontinuierlich Bodengas aus einer Sonde dem Alphaguard zugeführt. Dieses befindet sich im Durchflussmodus, wobei alle zehn Minuten eine Aktualisierung des Messergebnisses erfolgt. Die Sonde ist über einen Schlauch ($\varnothing = 3\text{ mm}$) mit dem Alphaguard verbunden. Dazwischen sind noch ein Durchflussbegrenzer, eine Pumpe sowie eine Waschflasche angebracht, um das Eindringen von Wasser in das Messgerät zu verhindern. Das so zusammengesetzte Messsystem ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Der Zusammenschluss aus Pumpe und Durchflussbegrenzer wird der Alphapumpe vorgezogen, da diese in dem benötigten Durchflussbereich nicht kontinuierlich pumpt. Vom Ausgang des Alphaguards führt ein Schlauch in die Außenluft, um eine Erhöhung der Radonkonzentration in den Innenräumen zu verhindern.



Abbildung 5.4.: System zur Langzeitmessung.

Der Durchfluss wird auf $0,1\text{ l}/\text{min}$ begrenzt. Außerdem wird die Schlauchlänge vor dem Alphaguard so gewählt, dass das Bodengas eine ausreichend lange Transportzeit zum Messgerät erhält. Somit reduziert sich zerfallsbedingt die Thoronkonzentration so weit, um dessen Einfluss auf die Messung nicht berücksichtigen zu müssen. Das Austauschvolumen vor den Messgeräten

(Summe der Volumina von Schlauch und Waschflasche) betrug bei aufgestellten Messstationen mindestens 0,7 l. Dadurch ist die Thoronkonzentration im abgesaugten Bodengas bei der Ankunft im Messgerät bereits auf 0,52 % seines Ausgangswerts zerfallen.

6. Abschätzung der Permeabilität des Bodens

6.1. Permeabilität

Die Permeabilität ist ein Maß der Durchlässigkeit eines Bodens für ein Gas und lässt sich in drei Kategorien einteilen, welche in Tabelle 6.1 aufgelistet sind. Bei den zwei verwendeten Messsystemen liegt dasselbe Prinzip zugrunde. Dieses wird zu erst in den Formeln 6.1 und 6.2 erläutert, bevor auf die verschiedenen Geräte eingegangen wird (Kemski et al. 2011).

Tabelle 6.1.: Einteilung der Permeabilität.

Wertebereich (m ²)	Kategorie
> 10 ⁻¹²	gut durchlässig
10 ⁻¹² – 10 ⁻¹⁴	mäßig durchlässig
< 10 ⁻¹⁴	schlecht durchlässig

$$Q = \frac{F \cdot k \cdot p}{\mu} \quad (6.1)$$

- Q ... Durchfluss (m³/s)
- F ... Formfaktor (von der Geometrie abhängig)
- k ... Permeabilität (m²)
- p ... Druck (Pa)
- μ ... Viskosität von Luft (1,75 · 10⁻⁵ Pas)

$$F = \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\ln \frac{2 \cdot l}{d} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot D - l}{4 \cdot D + l}}} \quad (6.2)$$

- l ... Länge des effektiven Sondenvolumens (Distanz zwischen Sonde und abgesenkter Spitze) (m)
- d ... Durchmesser des effektiven Sondenvolumens (Durchmesser von Sonde) (m)
- D ... untere Tiefe des effektiven Sondenvolumens unter der Bodenoberfläche (Sondentiefe und Länge des effektiven Sondenvolumens addiert) (m)

Für die Messung der Permeabilität müssen daher der Durchfluss und der Druck gemessen werden.

6.2. Messung mittels Durchflussmesser und Manometer

Bei dieser Methode saugt eine Alphapumpe Luft aus der Sonde. Zwischen Sonde und Pumpe sind sowohl ein Durchflussmesser als auch ein Manometer zwischengeschaltet. Abbildung 6.1 zeigt das Gerät an einem Messpunkt. Während des Betriebs der Pumpe werden der Durchfluss und Druck gemessen. Mit den erhaltenen Messwerten wird mittels Formel 6.1 die Permeabilität berechnet. Der Vorteil der Messmethode liegt im einfachen Transport der Geräte, da diese handlich und leicht sind. Mit diesem System wurde sowohl bei der Herbst- als auch bei der Wintermessreihe die Permeabilität ermittelt.



Abbildung 6.1.: Geräteaufbau zur Permeabilitätsmessung.

6.3. Messung mittels Radon-Jok

Beim Radon-Jok der Firma Radon v.o.s., gezeigt in Abbildung 6.2, handelt es sich um ein alternatives Messsystem zur Bestimmung der Permeabilität. Das Gerät besteht aus einem Messsack, an dessen Unterseite ein oder zwei Gewichte angebracht werden können. Auf diese Weise wird ein gleichmäßiger Druck bekannter Größe erzeugt. An der Oberseite wird der Sack durch einen Schlauch mit der Sonde verbunden. Dazwischen ist ein Ventil geschaltet, um den Durchfluss unterbrechen zu können. Für die Messung wird das Ventil gelöst, wodurch das Bodengas aus der Sonde in den Messsack gesaugt wird. An der Stange mit dem Gewicht sind Einkerbungen, welche die Positionen markieren an der Messsack jeweils ein bestimmtes Füllvolumen erreicht hat. Sowohl ein akustisches als auch optional ein visuelles Signal wird ausgegeben, wenn die jeweilige Position erreicht ist. Die Dauer, die zum Füllen des 2l großen Volumens benötigt wird, ergibt sich aus der zeitlichen Differenz der ausgegebenen Signale, wodurch der Durchfluss berechnet werden kann. Der Druck beträgt 2,16 kPa bei einem und 3,73 kPa bei zwei Gewichten. Auf diese Weise werden die für Formel 6.1 benötigten Werte ermittelt. Das Messgerät muss mit der Hilfe eines Pendels genau senkrecht aufgestellt werden,

um die Reibung der Stange beim Durchlauf des Signalgebers zu minimieren. Der Radon-Jok wurde nur während der Messreihe im Frühjahr benutzt.



Abbildung 6.2.: Radon-Jok mit einem Gewicht.

7. Bodenproben, Ortsdosisleistung und Geologie

7.1. Bodenproben

An jedem Messort wurden neben den Bodengasmessungen auch Bodenproben genommen. Dazu wird ein 1 m langer Stechbohrer mit einem Durchmesser von 2 cm verwendet. Dieser wird, in der Mitte zwischen den Bodengassonden, so tief wie möglich in den Boden geschlagen. Die Abbildungen 7.1 und 7.2 veranschaulichen die Probenahme. Die unterschiedliche Konsistenz der Böden an den verschiedenen Messorten führt zu einer unterschiedlichen Tiefe des entnommenen Materials, da bei besonders porösen Böden ein Materialverlust beim Herausziehen unvermeidbar ist.

Die Aufbereitung der Proben erfolgte im LLC-Labor Arsenal. Dabei wird das Material zu erst in einem Trockenschrank bei 105 °C etwa 24 Stunden lang getrocknet und anschließend in Messdosen überführt. Vor den gammaspektroskopischen Messungen werden diese mindestens drei Wochen gelagert, um ein radioaktives Gleichgewicht der Radionuklide innerhalb der Uranium-Radium-Zerfallsreihe zu erreichen. Schließlich werden die Bodenproben gammaspektroskopisch auf die Nuklide $^{40}\text{Kalium}$, $^{210}\text{Blei}$, $^{226}\text{Radium}$, $^{228}\text{Radium}$, $^{228}\text{Thorium}$ und $^{238}\text{Uran}$ untersucht.



Abbildung 7.1.: Stechbohrer beim Einschlagen.



Abbildung 7.2.: Gewonnene Probe mittels Stechbohrer.

7.2. Ortsdosisleistung

Um die Ortsdosisleistung an den verschiedenen Orten zu ermitteln, wurde ein geeichtes Ortsdosimeter des Herstellers FAG, Typ FH 40 F2, verwendet. Bei der Messung wird das Gerät in einem Meter Höhe gehalten. Der Wert wird ungefähr eine Minute nach dem Einschalten abgelesen, sobald der Wert keinen großen Schwankungen mehr unterliegt.

Im Sommer wurden alle Messungen an Orten die zugänglich waren noch einmal mit einem weiteren Gerät untersucht. Dafür wurde ein Dosisleistungsmesser 6150 AD 6/E mit einer zusätzlich angeschlossenen Szintillatorsonde 6150AD-b der Firma Automess verwendet. Die Messung wird ebenfalls in 1 m Höhe durchgeführt (siehe Abbildung 7.3) und als Messwert wird der angezeigte Wert nach 5 min im Mittelwertmodus genommen. Die in den Ergebnissen angegebenen Werte sind die der zweiten Messung, da sich diese Methode besser für die Ermittlung eines repräsentativen Wertes der Ortsdosisleistung eignet.



Abbildung 7.3.: Die Szintillatorsonde bei der Messung.

7.3. Koordinaten und Geologie

Die Koordinaten wurden teilweise direkt in Gauß Krüger Koordinaten gemessen und teilweise in WGS84. In den Ergebnistabellen im Anhang E werden die Koordinaten im Gauß Krüger System M31 angegeben, wobei in der ersten Zeile der Rechtswert und in der zweiten Zeile der Hochwert steht.

Zur Ermittlung der geologischen Informationen zu den einzelnen Messpunkten und zum Umrechnen zwischen den verschiedenen Koordinatensystemen wurde der online Atlas des Geo-Informationssystems des Landes Steiermark verwendet (GIS-STMK 2014).

Teil III.

Ergebnisse

8. Übersicht

8.1. Geographische und Geologische Daten der untersuchten Region

Im Herbst 2012 wurden an den Punkten 1 bis 40 in den Gemeinden Ganz, Kapellen, Langenwang und Spital am Semmering in der Steiermark Messungen durchgeführt. Im Frühjahr 2013 stieg die Gemeinde Kapellen aus dem Projekt aus. Die Punkte 41 bis 100 verteilen sich deswegen auf die drei verbliebenen Gemeinden. Die genaue Lage der Gemeinden ist Abbildung 8.1 zu entnehmen. Abbildung 8.2 zeigt die geologischen Gegebenheiten der beprobten Region. Eine Legende der Geologie wird in Tabelle 8.1 gezeigt. In den Abbildungen 8.3 bis 8.13 sind geologische Karten der Gebiete, inklusive Lage der Messpunkte, dargestellt. In Tabellen 8.2 bis 8.12 werden die dazugehörigen Messergebnisse angegeben.

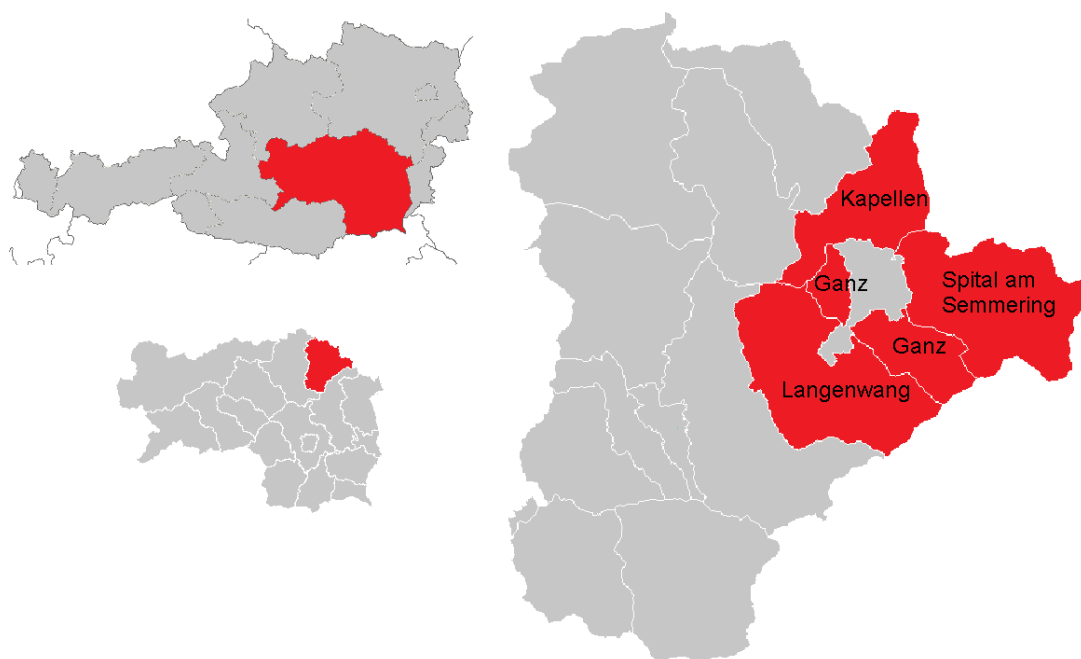


Abbildung 8.1.: Lage der beprobten Gemeinden in Österreich.

8. Übersicht

Tabelle 8.1.: Legende zu den in Abbildung 8.2 dargestellten geologischen Einheiten.

	Geologische Einheit
	Alpiner Verrucano- Roßkogelporphyroid
	Auzonen, Kolluvien, Wildbachschutt
	Gneisiger bis quarzitischer Glimmerschiefer, tw. Biotit führend
	Gneisiger tw. quarzitischer Glimmerschiefer
	Graphitreicher Phyllit
	Grauer Albitphyllit
	Grauer Sandstein, dunkelgrauer Schiefer (Veitscher Decke)
	Grobgneis (granitischer Augengneis)
	Hangschutt, Schutthalden (teilweise Würm)
	Heller Dolomit (gebankt tw. massig)
	Heller Kalk und Dolomit, teilweise Rauhwanke (ungegliedert)
	Inneralpines Jungtertiär i.a. (Kies, Sand, Ton, lehmiger Sand)
	Kalk, Bänderkalk bis Kalkmarmor (weiß bis rosa, schwarz, bläulichgrau)
	Muskovit-Plagioklas-Mikroklingneis (feinkörnig)
	Niedere Alluvialterasse, Auenablagerung (Sand, Kies, Lehm)
	Niederterasse
	Phyllitischer bis phyllonitischer Glimmerschiefer (Hüllschiefer-Serie)
	Phyllitischer bis phyllonitischer Glimmerschiefer (Hüllschiefer-Serie)
	Rauhwanke
	Schwarzgrauer geschichteter Dolomitmarmor
	Schwemmfächer, Schwemmkegel, Murenkegel (z.T. spät- postglazial)
	Semmering-Quarzit
	Semmering-Quarzit, Lantschfeldquarzit, Alpiner Verrucano: Serizitphyllite
	Serizitphyllit der Silbersberg-Gruppe, tw. quarzitisch (Norische Decke)
	Violetter und grüner Serizitschiefer; tw. mit Dolomit und Rauhwanke



Das Land
Steiermark

Digitaler Atlas Steiermark Überblick

A7 - Geoinformation
A-8010 Graz, Stempferg. 7
Tel.+43 316-877-4275
Fax.+43 316-877-2067
geoinformation@stmk.gv.at
<http://www.gis.steiermark.at>

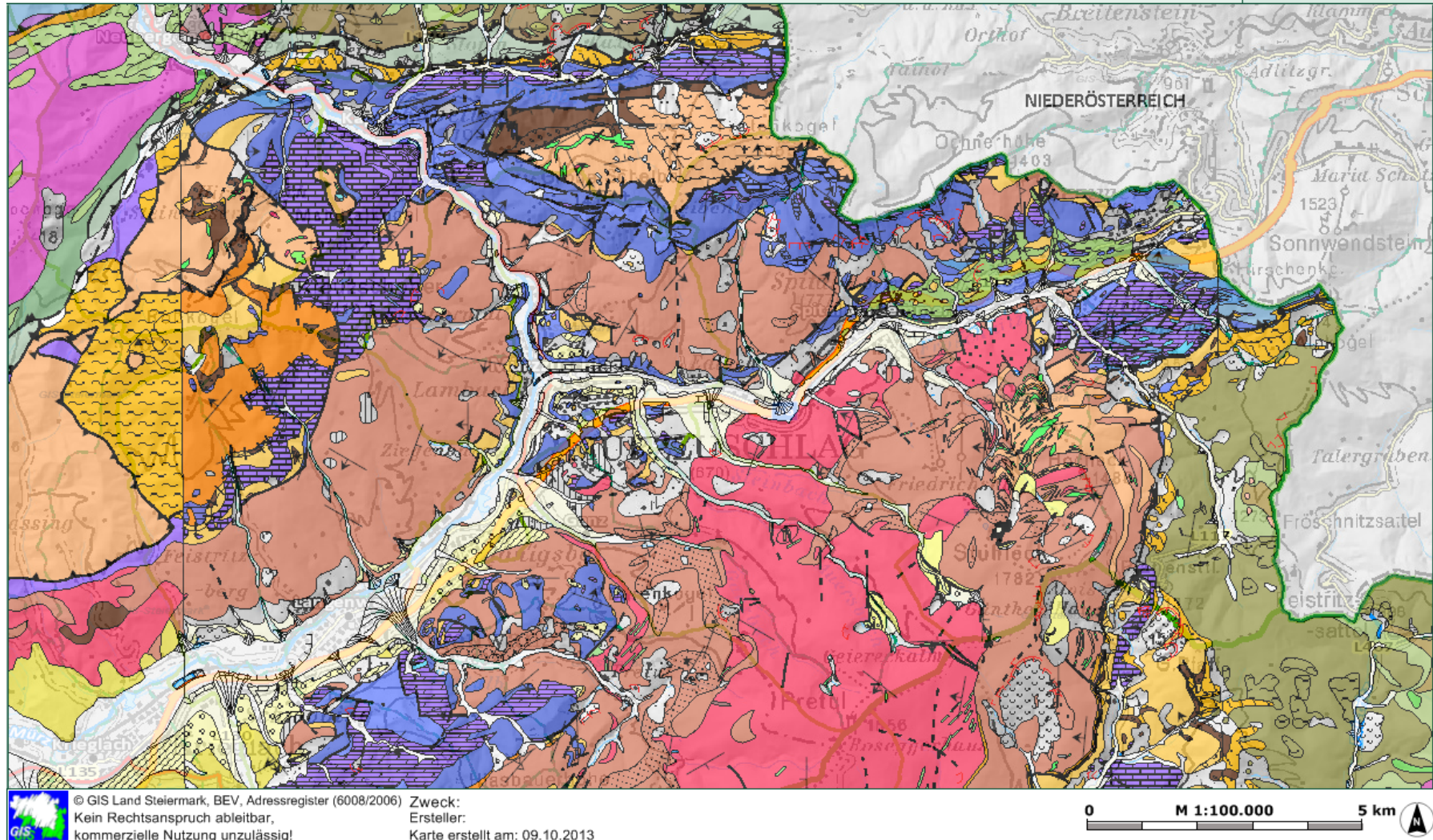


Abbildung 8.2.: Geologische Karte der untersuchten Region.

8.2. Ergebnisse im Gemeindegebiet Ganz

Die Ergebnisse der Messungen in Ganz werden in den Tabellen 8.2 bis 8.4 angegeben, deren Messpunkte auf den jeweiligen Karten in den Abbildungen 8.3 bis 8.5 dargestellt sind.

Tabelle 8.2.: Ergebnisse des in Abbildung 8.3 gezeigten Messpunktes.

Nr.	Geologische Einheit	See. (m)	Perm. (m ²)	²²² Radon (kBq/m ³)	± (kBq/m ³)	Maximum (kBq/m ³)	ODL (μSv/h)	²²⁶ Radium (Bq/kg)	²³⁸ Uran (Bq/kg)
4	Hangschutt	791	8,97E-12	6,26E+01	3,24E+01	7,99E+01	1,28E-01	4,00E+01	4,40E+01

See. = Seehöhe

Perm. = Permeabilität

ODL = Ortsdosisleistung

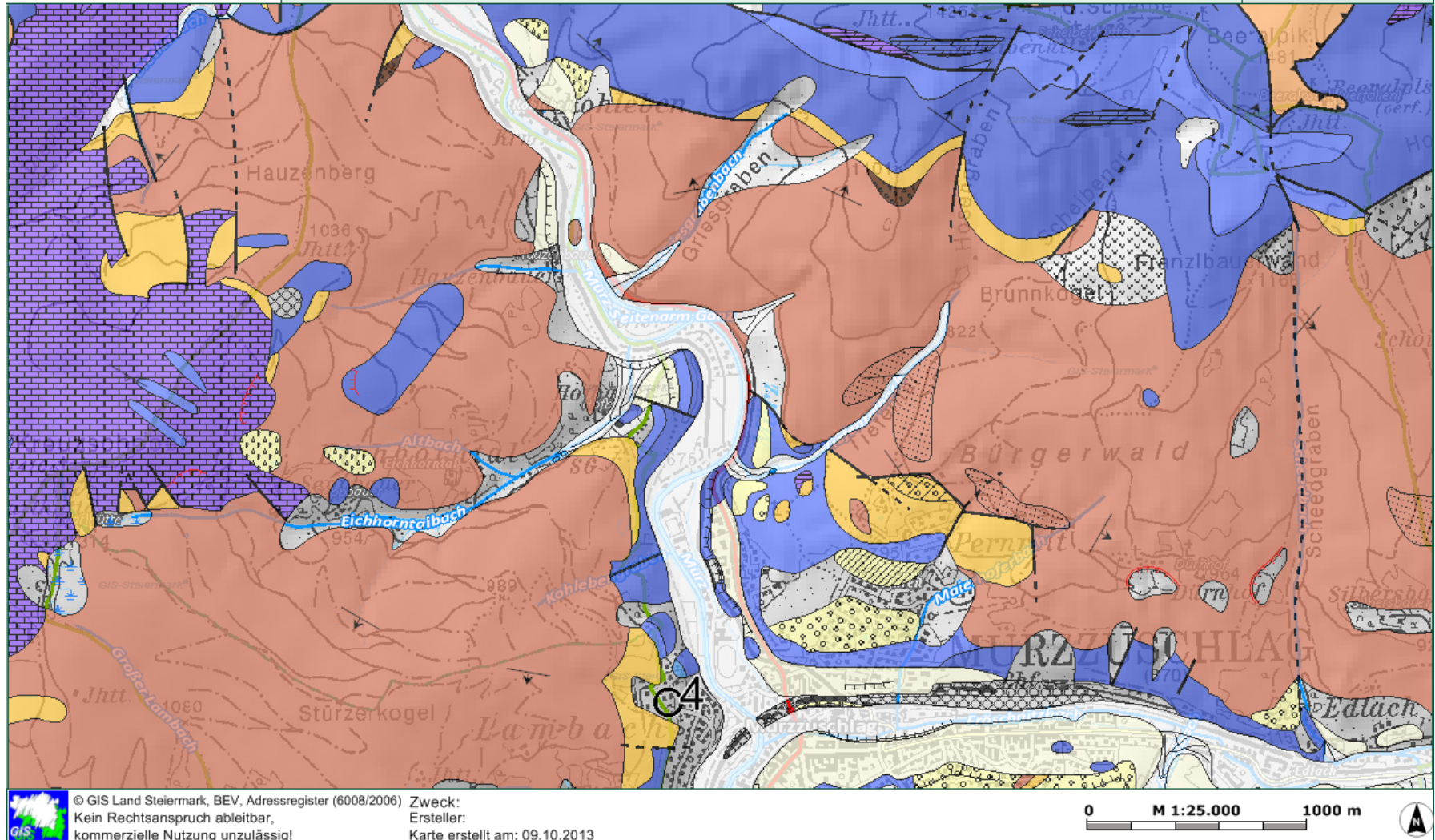


Abbildung 8.3.: Messpunkt im nördlichen Teil von Ganz.

Tabelle 8.3.: Ergebnisse der in Abbildung 8.4 gezeigten Messpunkte.

Nr.	Geologische Einheit	See. (m)	Perm. (m ²)	²²² Radon (kBq/m ³)	± (kBq/m ³)	Maximum (kBq/m ³)	ODL (μSv/h)	²²⁶ Radium (Bq/kg)	²³⁸ Uran (Bq/kg)
1	Grobgneis	1105	1,96E-11	1,19E+02	4,00E+00	1,19E+02	1,48E-01		
65	Grobgneis	971	1,86E-11	9,21E+01	1,20E+01	9,66E+01	1,48E-01	9,40E+01	5,30E+01
2	Glimmerschiefer	965	2,16E-11	4,63E+01	1,72E+01	5,48E+01	1,73E-01		
18	Grobgneis	951	1,40E-11	7,92E+01	9,56E+00	8,00E+01	1,78E-01	6,50E+01	7,10E+01
42	Hangschutt	794	4,90E-12	5,07E+01	7,47E+01	9,12E+01	9,10E-02	3,53E+01	3,50E+01
60	Hangschutt	800	1,40E-11	2,59E+01	3,80E+00	2,69E+01	1,12E-01	4,98E+01	2,10E+01
61	Phyllitischer Glimmerschiefer	847	6,15E-13	4,00E+01	8,06E+00	4,37E+01	7,60E-02	1,60E+01	1,90E+01
62	Phyllitischer Glimmerschiefer	965	1,67E-11	1,31E+02	3,26E+01	1,76E+02	1,29E-01	4,44E+01	4,20E+01
63	Hangschutt	815	9,58E-12	5,27E+01	1,60E+01	6,07E+01	9,50E-02	3,16E+01	2,00E+01
64	Auzonen, Kolluvien	761	1,44E-11	6,29E+01	8,95E+00	7,02E+01	1,17E-01	2,75E+01	1,50E+01

See. = Seehöhe

Perm. = Permeabilität

ODL = Ortsdosisleistung

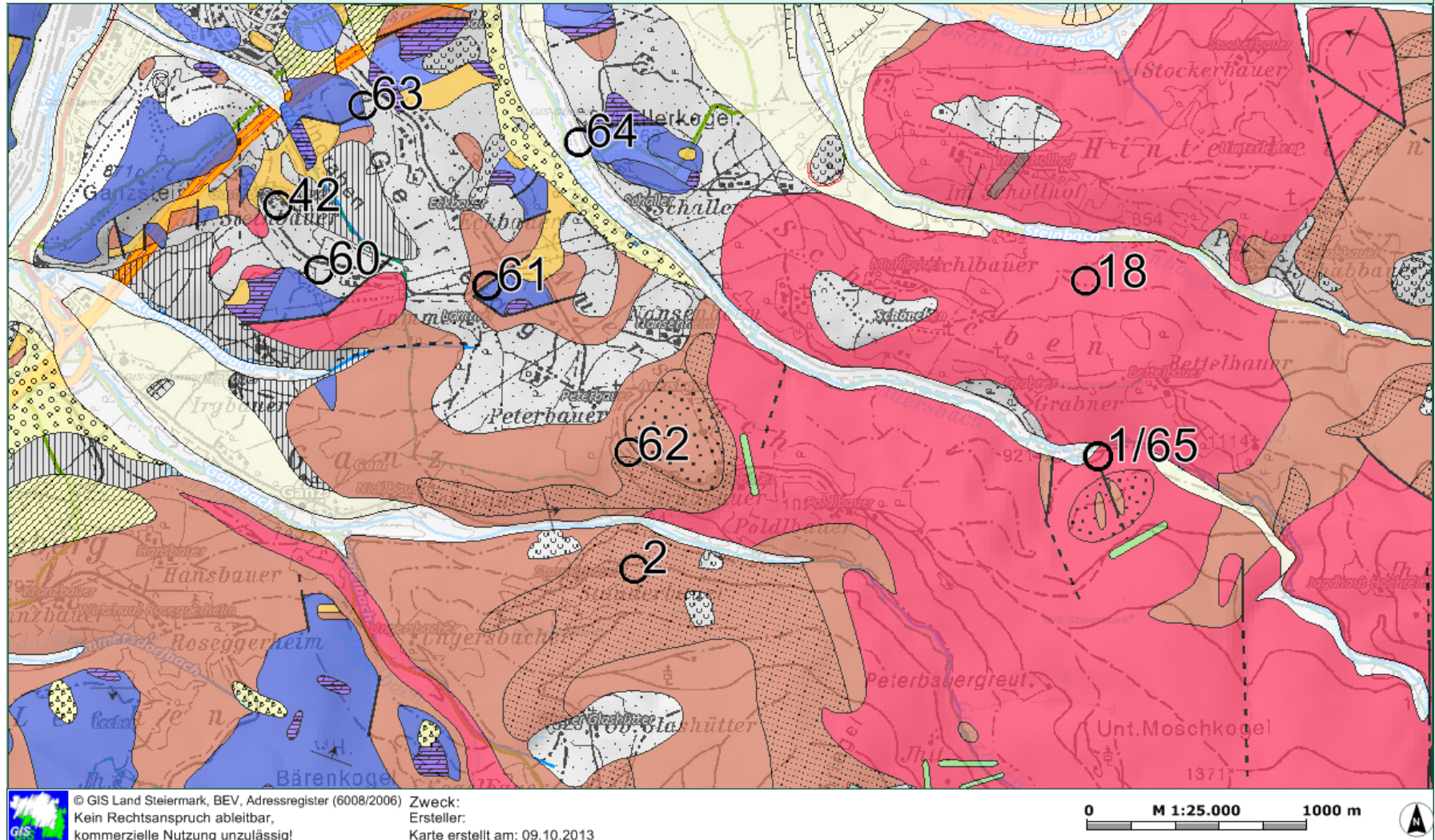


Abbildung 8.4.: Messpunkte im mittleren Teil von Ganz.

Tabelle 8.4.: Ergebnisse des in Abbildung 8.5 gezeigten Messpunktes.

Nr.	Geologische Einheit	See. (m)	Perm. (m ²)	²²² Radon (kBq/m ³)	± (kBq/m ³)	Maximum (kBq/m ³)	ODL (μSv/h)	²²⁶ Radium (Bq/kg)	²³⁸ Uran (Bq/kg)
5	Grobgneis	1605	1,20E-13	2,51E+02	1,59E+02	3,36E+02	1,30E-01	3,60E+01	4,10E+01

See. = Seehöhe

Perm. = Permeabilität

ODL = Ortsdosisleistung

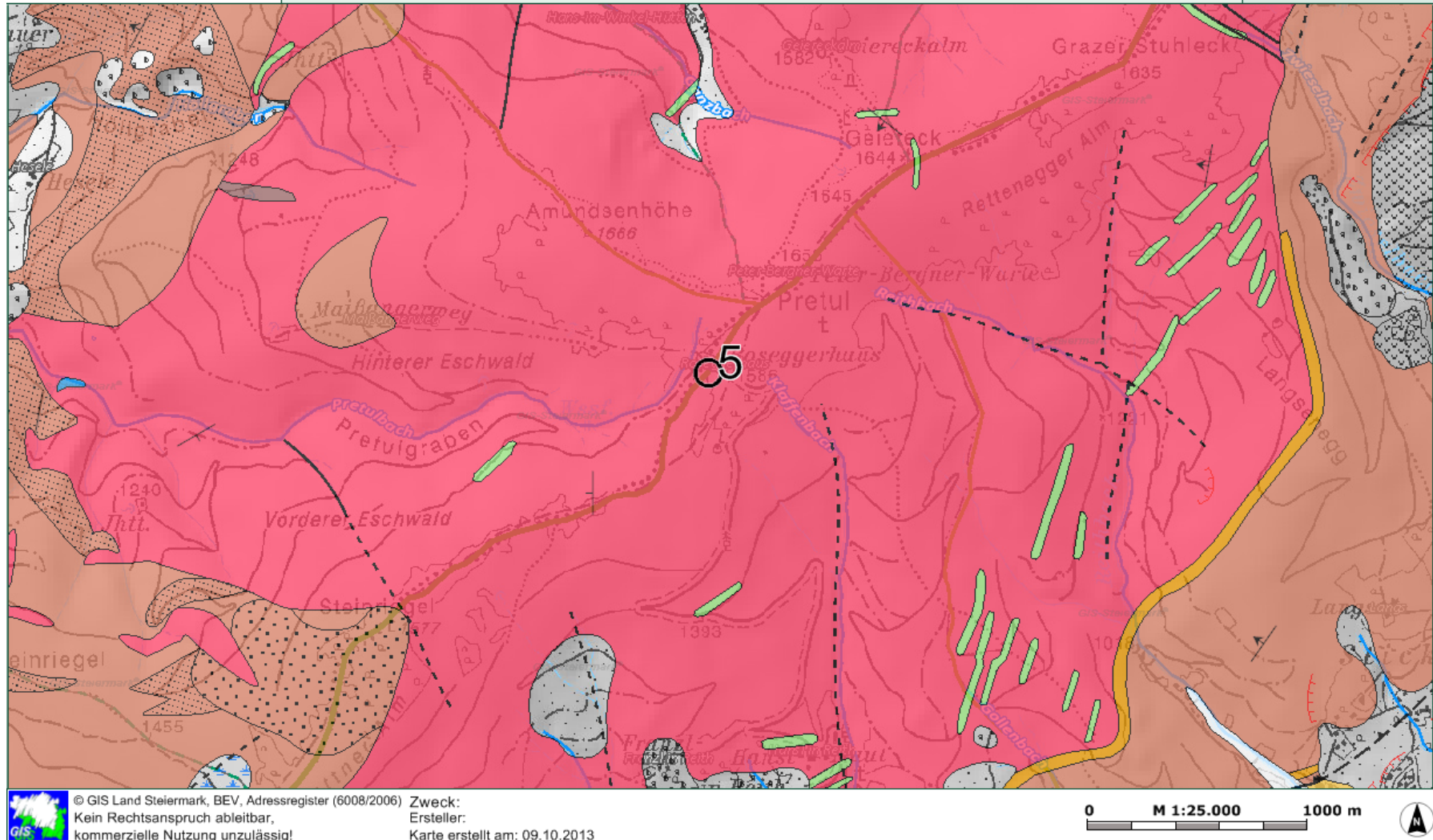


Abbildung 8.5.: Messpunkt im südlichen Teil von Ganz.

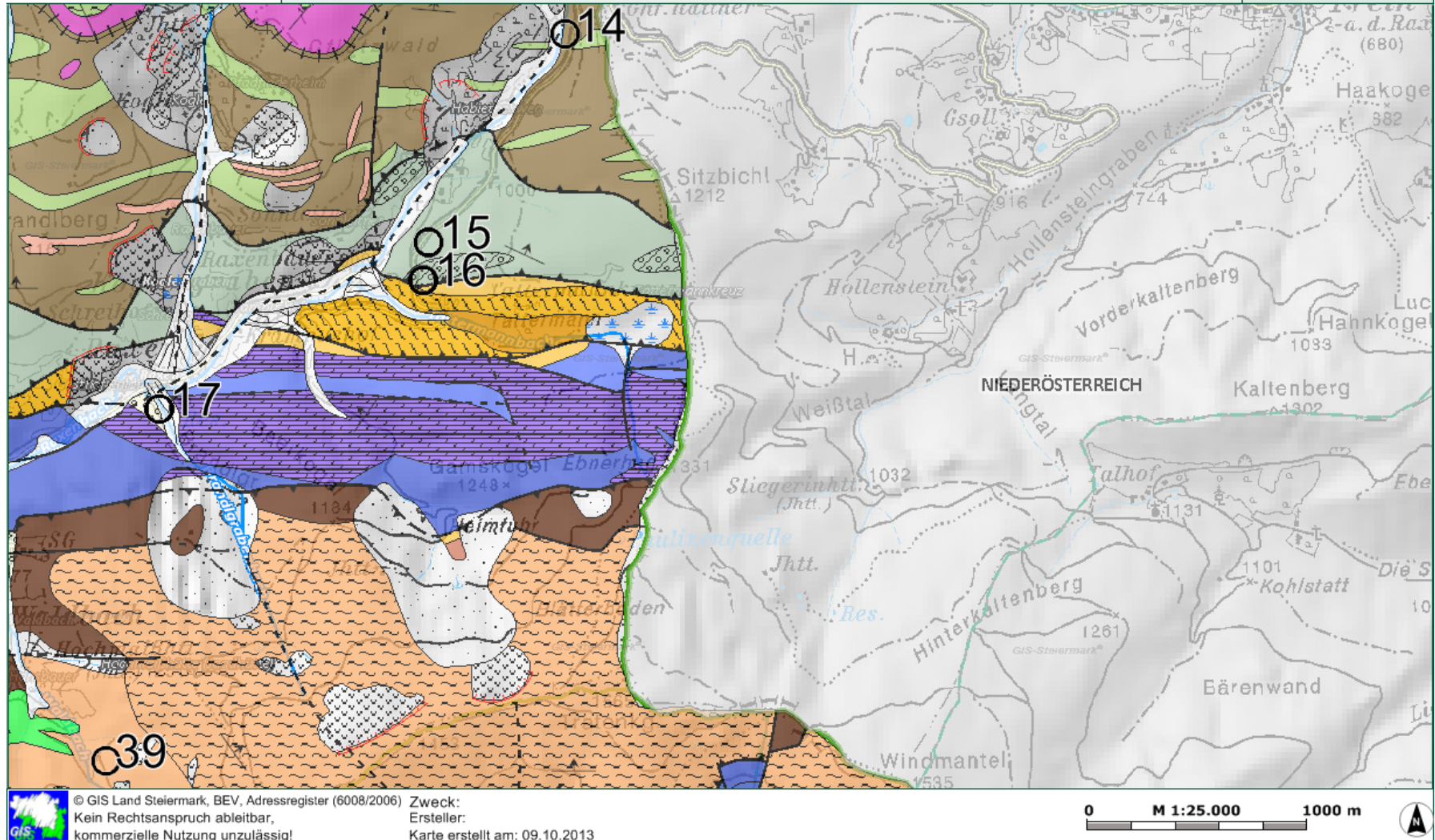
8.3. Ergebnisse im Gemeindegebiet Kapellen

Die Ergebnisse der Messungen in Kapellen werden in den Tabellen 8.5 bis 8.6 angegeben, deren Messpunkte auf den jeweiligen Karten in den Abbildungen 8.6 bis 8.7 dargestellt sind.

Tabelle 8.5.: Ergebnisse der in Abbildung 8.6 gezeigten Messpunkte.

Nr.	Geologische Einheit	See. (m)	Perm. (m ²)	²²² Radon (kBq/m ³)	± (kBq/m ³)	Maximum (kBq/m ³)	ODL (μSv/h)	²²⁶ Radium (Bq/kg)	²³⁸ Uran (Bq/kg)
14	Serizitphyllit	1123	7,55E-15	2,03E+01	1,36E+01	2,75E+01	8,70E-02	1,90E+01	1,60E+01
15	Grauer Sandstein, Schiefer	1058	1,96E-11	2,08E+01	7,92E+00	3,06E+01	1,04E-01	4,30E+01	4,40E+01
16	Semmeringquarzit	1087	6,21E-13	8,97E+01	3,12E+01	1,06E+02	1,01E-01		
17	Heller Dolomit	954	1,31E-11	3,34E+01	5,12E+00	3,40E+01	1,26E-01	4,00E+01	4,00E+01
39	Glimmerschiefer	1129	1,19E-11	4,72E+01	1,70E+01	4,92E+01			

See. = Seehöhe
 Perm. = Permeabilität
 ODL = Ortsdosisleistung



© GIS Land Steiermark, BEV, Adressregister (6008/2006) Zweck:
Kein Rechtsanspruch ableitbar, Ersteller:
kommerzielle Nutzung unzulässig! Karte erstellt am: 09.10.2013

Abbildung 8.6.: Messpunkte im östlichen Teil von Kapellen.

Tabelle 8.6.: Ergebnisse der in Abbildung 8.7 gezeigten Messpunkte.

Nr.	Geologische Einheit	See. (m)	Perm. (m ²)	²²² Radon (kBq/m ³)	± (kBq/m ³)	Maximum (kBq/m ³)	ODL (μSv/h)	²²⁶ Radium (Bq/kg)	²³⁸ Uran (Bq/kg)
3	Rauhacke	707	1,97E-13	4,48E+01	3,00E+00	4,48E+01	8,80E-02	6,30E+01	5,60E+01
13	Heller Dolomit	791	6,51E-13	3,45E+00	1,80E+00	4,46E+00	1,04E-01	3,70E+01	3,90E+01
20	Rauhacke	821	2,16E-11	1,27E+01	4,83E+00	1,65E+01	9,90E-02		
21	Heller Kalk und Dolomit	1423	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-1,01E-01	8,70E-02	4,40E+01	4,60E+01
22	Rauhacke	967	1,99E-11	3,55E+00	2,79E+00	5,20E+00	8,50E-02	3,50E+01	3,20E+01
36	Grauer Sandstein, Schiefer	664	1,96E-11	1,10E+02	1,29E+01	1,12E+02	1,27E-01	6,40E+01	4,90E+01
37	Serizitphyllit	1091	1,41E-11	2,80E+01	4,44E+00	2,96E+01	1,10E-01	2,50E+01	2,50E+01

See. = Seehöhe

Perm. = Permeabilität

ODL = Ortsdosisleistung

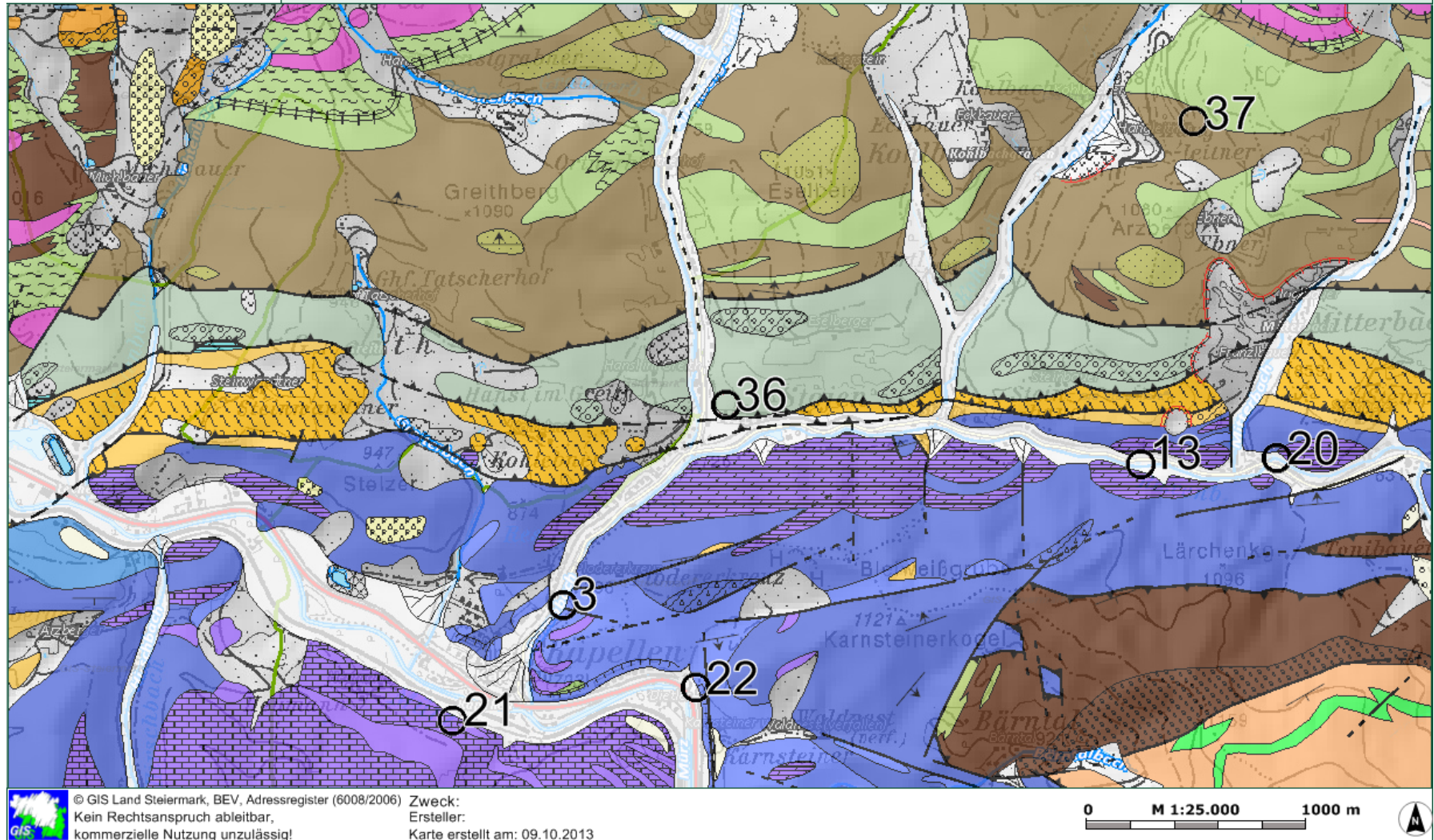


Abbildung 8.7.: Messpunkte im westlichen Teil von Kapellen.

8.4. Ergebnisse im Gemeindegebiet Langenwang

Die Ergebnisse der Messungen in Langenwang werden in den Tabellen 8.7 bis 8.9 angegeben, deren Messpunkte auf den jeweiligen Karten in den Abbildungen 8.8 bis 8.10 dargestellt sind.

Tabelle 8.7.: Ergebnisse der in Abbildung 8.8 gezeigten Messpunkte.

Nr.	Geologische Einheit	See. (m)	Perm. (m ²)	²²² Radon (kBq/m ³)	± (kBq/m ³)	Maximum (kBq/m ³)	ODL (μSv/h)	²²⁶ Radium (Bq/kg)	²³⁸ Uran (Bq/kg)
9	Glimmerschiefer	812	1,83E-11	4,31E+01	1,70E+01	6,72E+01	1,08E-01	6,50E+01	9,00E+01
10	Heller Kalk und Dolomit	1046	1,63E-11	3,66E+01	9,03E+00	4,07E+01	9,70E-02	4,00E+01	7,00E+01
11	Alpiner Verrucano	1110	2,03E-11	4,77E+01	1,26E+01	5,37E+01	1,18E-01	4,40E+01	4,00E+01
66	Niedere Alluvialterrasse	649	1,89E-11	1,41E+01	2,63E+00	1,58E+01	1,51E-01	1,55E+02	1,14E+02
67	Hangschutt, Schutthalden	741	1,47E-11	1,06E+02	1,11E+01	1,10E+02	1,23E-01	4,86E+01	3,20E+01
69	Hangschutt, Schutthalden	751	2,35E-11	5,12E+01	2,36E+01	8,55E+01	1,09E-01	2,49E+01	2,70E+01
73	Niedere Alluvialterrasse	640	2,55E-11	4,64E+01	5,92E+00	4,78E+01	9,80E-02	5,84E+01	3,10E+01
74	Niedere Alluvialterrasse	643	2,74E-11	4,84E+01	6,43E+00	5,23E+01	8,40E-02	3,76E+01	1,30E+01
75	Schwemmfächer	645	2,29E-11	4,46E+01	6,96E+00	4,80E+01	1,23E-01	4,70E+01	3,20E+01
76	Niedere Alluvialterrasse	643	2,35E-11	3,91E+01	5,40E+00	4,26E+01	1,05E-01	3,29E+01	2,40E+01
77	Niederterrasse	650	2,35E-11	6,90E+01	8,04E+00	7,04E+01	1,06E-01	5,87E+01	5,00E+01
78	Schwemmfächer	652	1,89E-11	9,21E+01	8,92E+00	9,40E+01	1,13E-01	5,66E+01	4,50E+01
79	Schwemmfächer	653	2,61E-11	7,25E+01	8,49E+00	7,44E+01	1,31E-01	4,47E+01	3,80E+01
80	Schwemmfächer	666	2,22E-11	9,77E+01	1,14E+01	1,03E+02	1,22E-01	6,54E+01	1,33E+02
81	Schwemmfächer	676	1,36E-12	1,28E+02	1,20E+01	1,29E+02	1,25E-01	4,68E+01	4,00E+01
82	Schwemmfächer	657	2,20E-12	8,69E+01	1,04E+01	9,44E+01	1,12E-01	3,45E+01	2,10E+01

See. = Seehöhe

Perm. = Permeabilität

ODL = Ortsdosisleistung

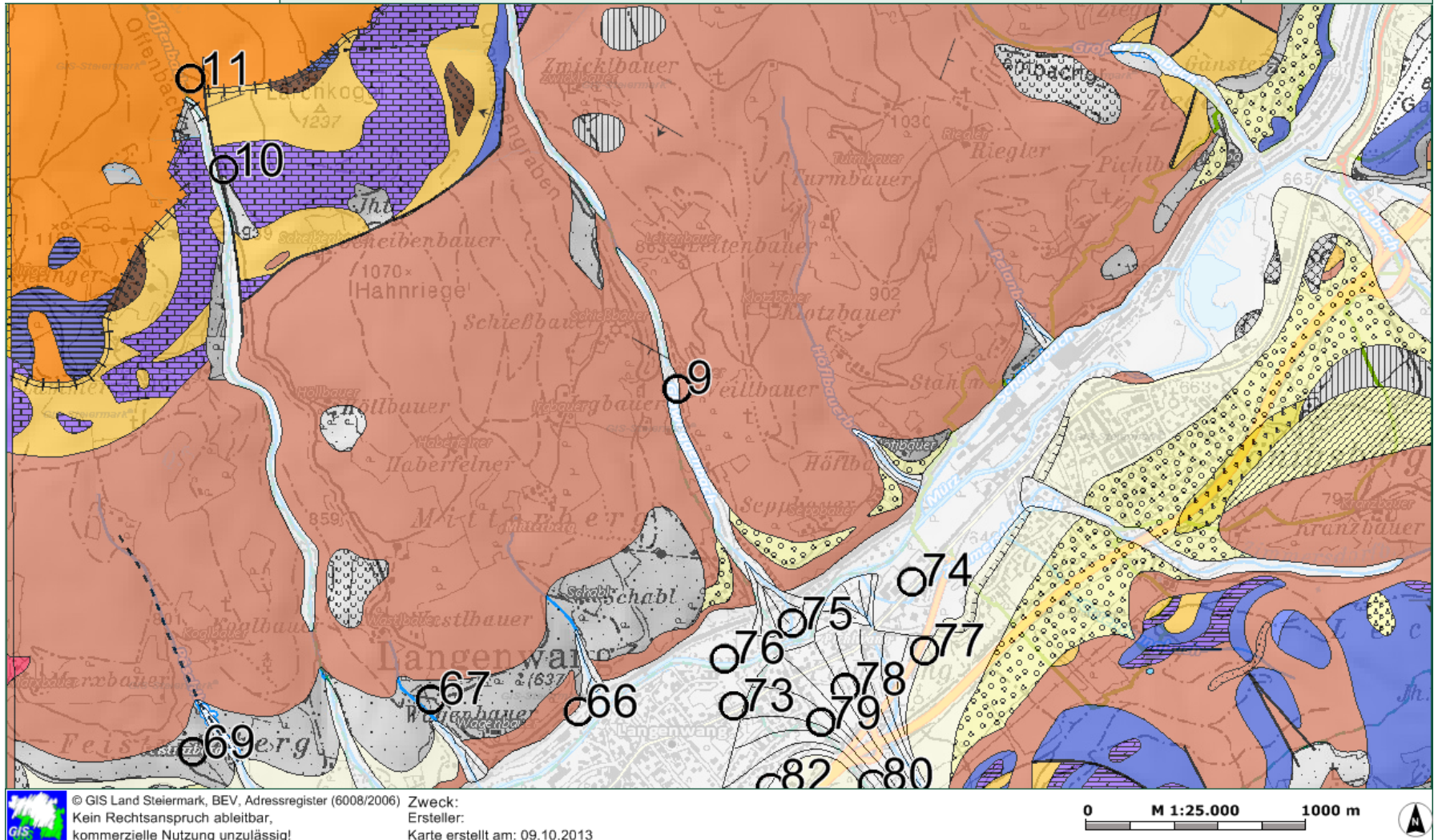


Abbildung 8.8.: Messpunkte im nördlichen Teil von Langenwang.

Tabelle 8.8.: Ergebnisse der in Abbildung 8.9 gezeigten Messpunkte.

Nr.	Geologische Einheit	See. (m)	Perm. (m ²)	²²² Radon (kBq/m ³)	± (kBq/m ³)	Maximum (kBq/m ³)	ODL (μ Sv/h)	²²⁶ Radium (Bq/kg)	²³⁸ Uran (Bq/kg)
12	Semmeringquarzit, Verrucano	1113	1,62E-11	5,47E+01	2,94E+01	7,02E+01	1,35E-01	4,00E+01	7,80E+01
71	Semmeringquarzit, Verrucano	1084	2,03E-11	7,02E+01	1,62E+01	9,03E+01	1,35E-01	3,76E+01	6,40E+01
59	Semmeringquarzit, Verrucano	919	6,86E-12	5,90E+01	8,45E+00	6,49E+01	1,32E-01	2,56E+01	2,50E+01

See. = Seehöhe

Perm. = Permeabilität

ODL = Ortsdosisleistung

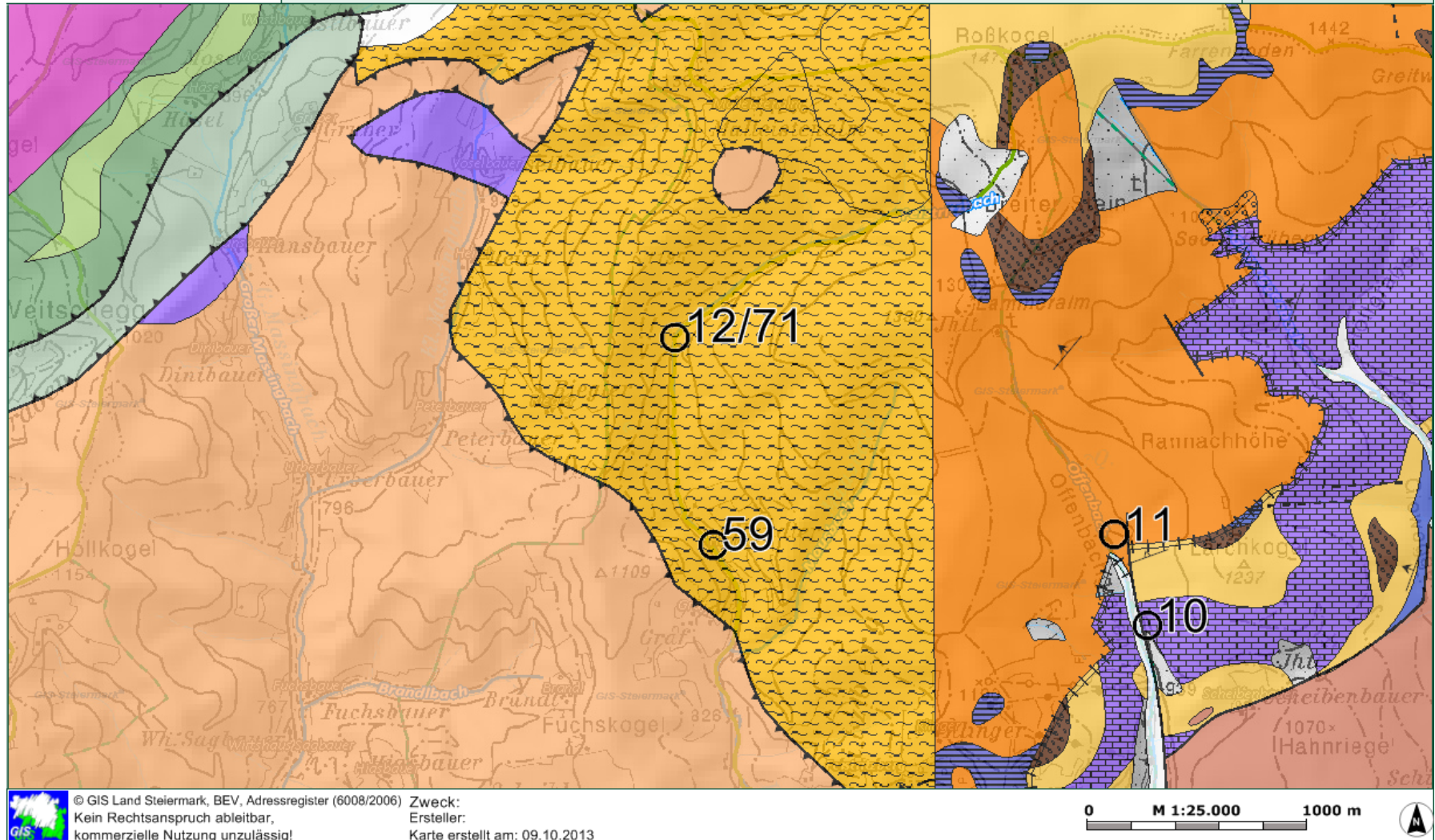


Abbildung 8.9.: Messpunkte im nordwestlichen Teil von Langenwang.

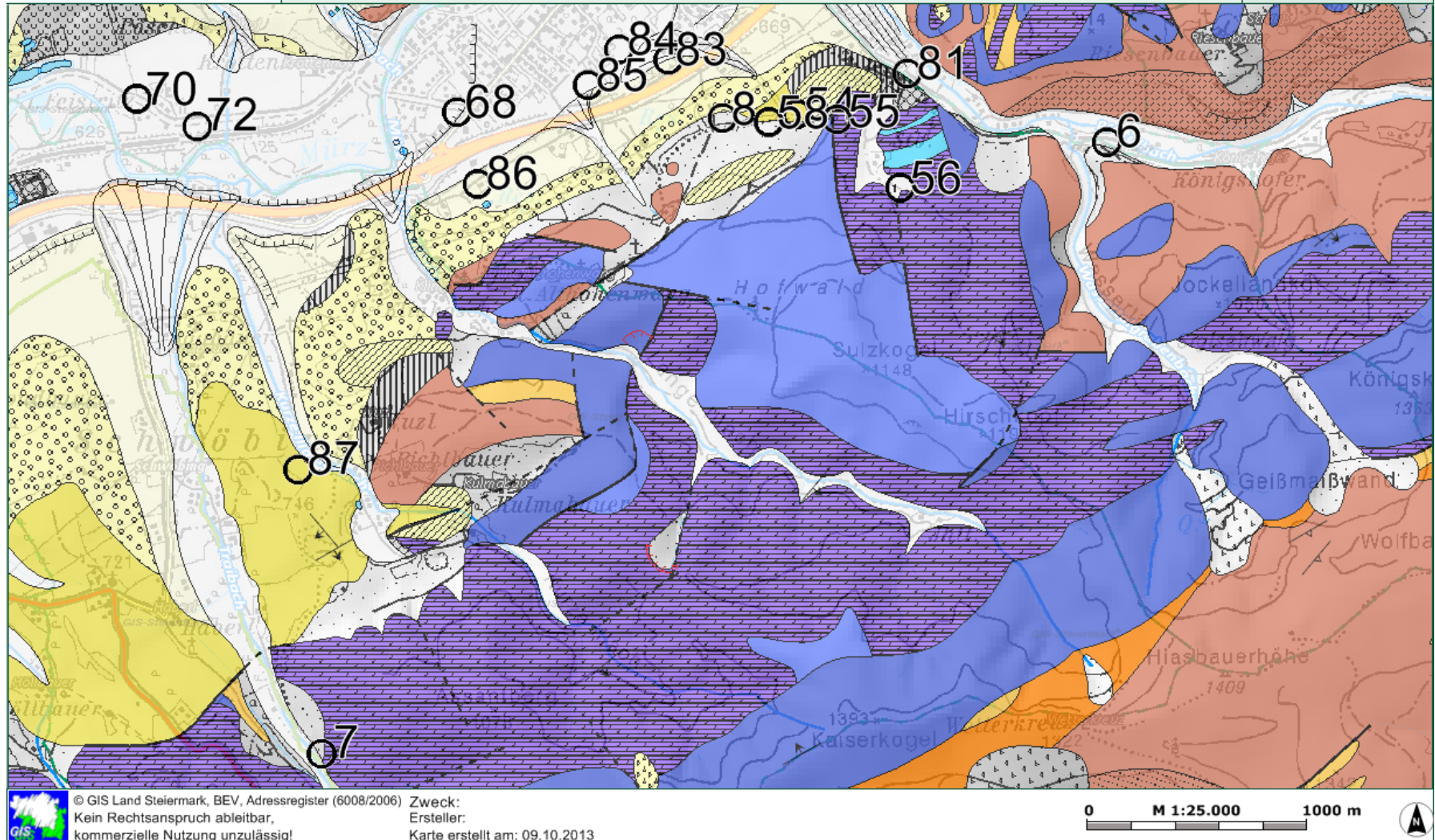
Tabelle 8.9.: Ergebnisse der in Abbildung 8.10 gezeigten Messpunkte.

Nr.	Geologische Einheit	See. (m)	Perm. (m ²)	²²² Radon (kBq/m ³)	± (kBq/m ³)	Maximum (kBq/m ³)	ODL (μSv/h)	²²⁶ Radium (Bq/kg)	²³⁸ Uran (Bq/kg)
6	Glimmerschiefer	819	1,05E-11	3,86E+01	1,04E+01	5,17E+01	1,26E-01	3,50E+01	4,00E+01
7	Heller Dolomit	791	1,63E-11	2,09E+01	1,25E+01	3,88E+01	7,00E-02	2,00E+01	1,90E+01
8	Schutt auf Hochterrasse	797	3,67E-12	3,15E+01	1,12E+01	4,58E+01	7,90E-02	4,40E+01	4,00E+01
54	Inneralpines Jungtertiär	738	5,10E-12	1,08E+02	1,31E+01	1,18E+02	1,18E-01	5,37E+01	3,60E+01
55	Heller Dolomit	758	6,21E-13	7,95E+01	2,59E+01	1,15E+02	9,50E-02	3,97E+01	2,90E+01
56	Auzonen, Kolluvien	799	1,19E-11	2,52E+01	7,82E+00	2,91E+01	7,00E-02	3,79E+01	1,80E+01
58	Inneralpines Jungtertiär	711	1,96E-11	2,95E+01	7,84E+00	3,94E+01	9,10E-02	3,87E+01	2,80E+01
68	Niedere Alluvialterrasse	632	1,76E-11	3,39E+01	5,12E+00	3,71E+01	7,80E-02	3,59E+01	1,70E+01
70	Niedere Alluvialterrasse	625	1,41E-13	1,96E+01	3,13E+00	2,02E+01	9,90E-02	3,68E+01	2,00E+01
72	Niedere Alluvialterrasse	625	1,41E-13	2,76E+01	5,68E+00	3,29E+01	9,70E-02	4,90E+01	5,30E+01
83	Schwemmfächer	655	1,65E-13	1,56E+02	1,70E+01	1,68E+02	1,15E-01	4,25E+01	3,20E+01
84	Niedere Alluvialterrasse	642	7,19E-12	4,36E+01	6,81E+00	4,57E+01	9,20E-02	6,59E+01	3,80E+01
85	Niedere Alluvialterrasse	633	1,70E-11	2,75E+01	4,50E+00	2,88E+01	9,70E-02	4,46E+01	2,40E+01
86	Niederterrasse	638	1,24E-11	3,20E+01	4,69E+00	3,32E+01	1,11E-01	3,17E+01	1,90E+01
87	Inneralpines Jungtertiär	718	4,05E-13	1,11E+02	1,58E+01	1,18E+02	1,10E-01	3,88E+01	1,70E+01

See. = Seehöhe

Perm. = Permeabilität

ODL = Ortsdosisleistung



© GIS Land Steiermark, BEV, Adressregister (6008/2006) Zweck:
Kein Rechtsanspruch ableitbar, Ersteller:
kommerzielle Nutzung unzulässig! Karte erstellt am: 09.10.2013

Abbildung 8.10.: Messpunkte im südlichen Teil von Langenwang.

8.5. Ergebnisse im Gemeindegebiet Spital am Semmering

Die Ergebnisse der Messungen in Spital am Semmering werden in den Tabellen 8.10 bis 8.12 angegeben, deren Messpunkte auf den jeweiligen Karten in den Abbildungen 8.11 bis 8.13 dargestellt sind.

Tabelle 8.10.: Ergebnisse der in Abbildung 8.11 gezeigten Messpunkte.

Nr.	Geologische Einheit	See. (m)	Perm. (m ²)	²²² Radon (kBq/m ³)	± (kBq/m ³)	Maximum (kBq/m ³)	ODL (μSv/h)	²²⁶ Radium (Bq/kg)	²³⁸ Uran (Bq/kg)
23	Graphitreicher Phyllit	786	7,43E-12	3,96E+01	2,09E+01	6,92E+01		2,60E+01	2,10E+01
24	Grauer Albitphyllit	1146	1,01E-11	3,26E+01	2,77E+01	4,75E+01	1,13E-01		
25	Grauer Albitphyllit	1203	1,96E-11	7,47E+01	3,28E+01	1,22E+02		4,10E+01	4,10E+01
26	Grauer Albitphyllit	1195	4,17E-14	4,14E+01	4,10E+01	1,02E+02	9,90E-02	3,40E+01	4,10E+01
31	Hagschutt	1262	1,89E-11	8,10E+01	9,32E+00	8,26E+01		3,50E+01	1,30E+01
32	Glimmerschiefer	1644	9,38E-12	2,78E+01	1,07E+01	4,23E+01	1,12E-01	1,90E+01	1,50E+01
33	Grobgneis	958	9,79E-12	3,85E+01	5,79E+00	3,97E+01	1,32E-01	6,00E+01	1,40E+02

See. = Seehöhe

Perm. = Permeabilität

ODL = Ortsdosisleistung

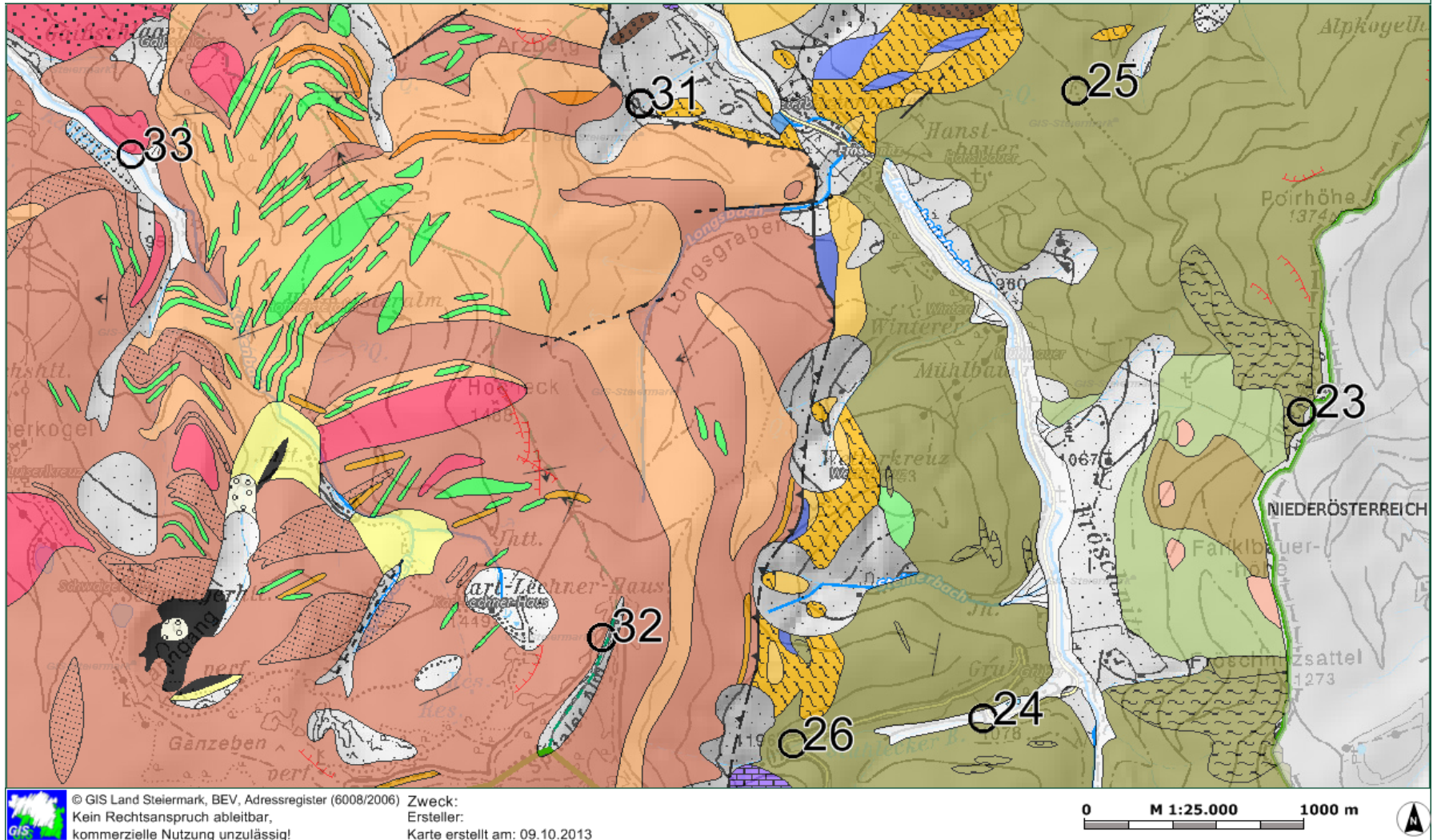


Abbildung 8.11.: Messpunkte im südöstlichen Teil Spital am Semmering.

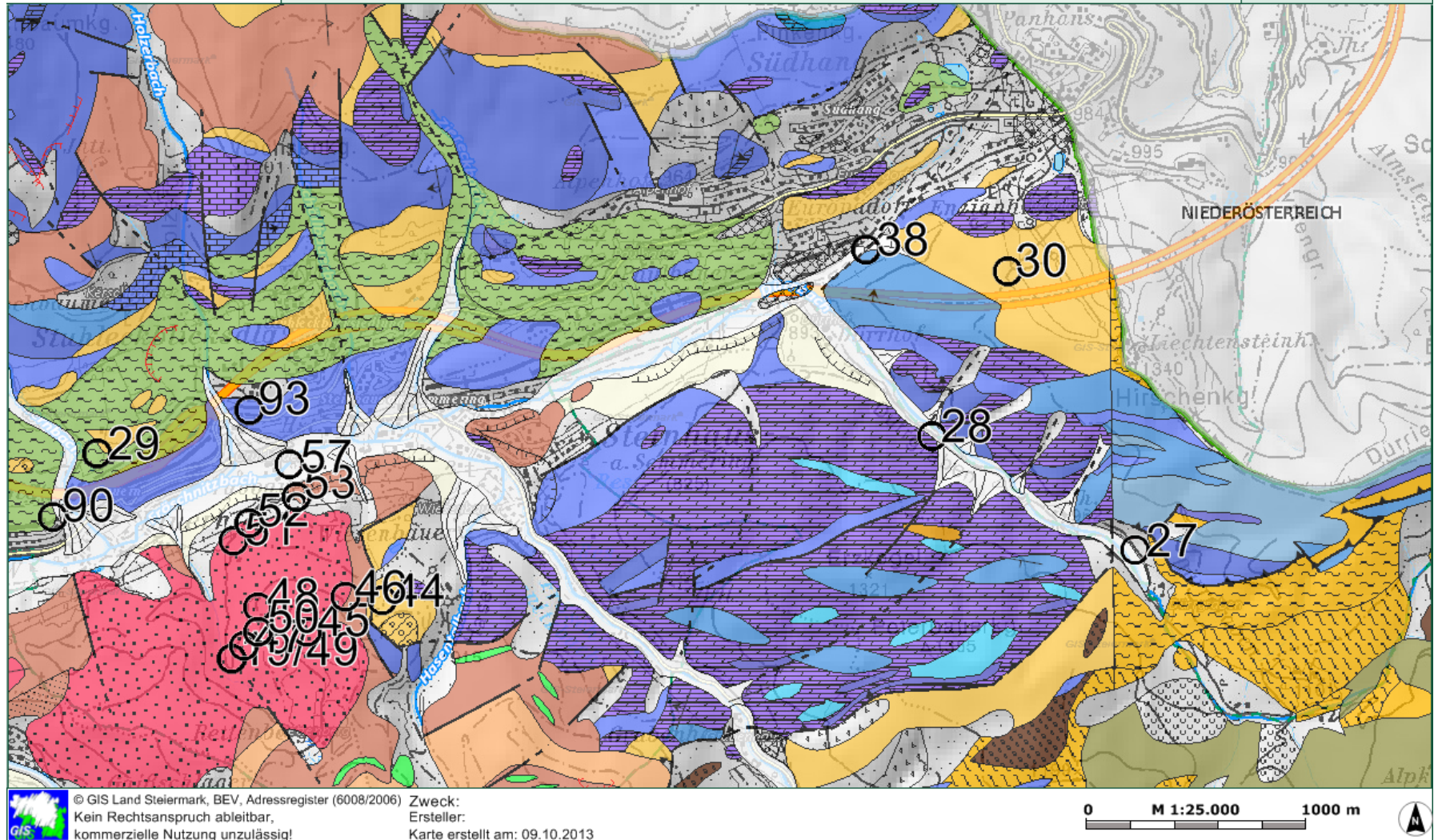
Tabelle 8.11.: Ergebnisse der in Abbildung 8.12 gezeigten Messpunkte.

Nr.	Geologische Einheit	See. (m)	Perm. (m ²)	²²² Radon (kBq/m ³)	± (kBq/m ³)	Maximum (kBq/m ³)	ODL (μSv/h)	²²⁶ Radium (Bq/kg)	²³⁸ Uran (Bq/kg)
27	Hangschutt	1082	2,06E-11	6,87E+00	2,00E+00	7,18E+00		2,50E+01	1,90E+01
28	Heller Dolomit	985	2,12E-11	9,20E-01	1,95E+00	1,28E+00	7,10E-02	1,40E+01	2,20E+01
29	Serizitschiefer	910	2,38E-12	3,50E+01	7,96E+00	4,13E+01	1,10E-01	4,10E+01	4,00E+01
30	Semmeringquarzit	1226	5,46E-12	1,65E+02	1,39E+02	2,40E+02	8,70E-02	3,80E+01	3,00E+01
38	Dolomitmarmor	986	1,96E-11	2,50E+01	3,00E+00	2,50E+01	9,60E-02		
44	Semmeringquarzit	961	1,82E-12	4,20E+01	5,63E+00	4,59E+01	1,19E-01	2,83E+01	3,50E+01
45	Mikroklingneis	1017	1,34E-11	1,63E+02	1,93E+01	1,81E+02	1,48E-01	1,80E+01	1,60E+01
46	Mikroklingneis	1025	1,31E-11	2,33E+01	8,82E+00	3,40E+01	1,32E-01	1,35E+02	8,20E+01
47	Mikroklingneis	939	3,58E-12	1,83E+02	2,15E+02	5,08E+02	1,68E-01	1,68E+02	1,22E+02
48	Mikroklingneis	965	1,86E-11	1,37E+02	3,51E+01	1,85E+02	1,31E-01	4,44E+01	1,20E+01
19	Mikroklingneis	939	1,40E-11	9,53E+02	2,86E+02	1,11E+03	1,70E-01	1,20E+02	5,40E+01
49	Mikroklingneis	942	1,96E-11	3,31E+02	1,32E+02	5,27E+02	1,70E-01	6,31E+01	3,00E+01
50	Mikroklingneis	895	1,39E-11	2,30E+02	2,38E+01	2,48E+02	1,51E-01	3,70E+01	< 22
51	Mikroklingneis	863	2,16E-11	2,14E+02	2,39E+01	2,28E+02	1,56E-01	8,12E+01	4,10E+01
52	Mikroklingneis	868	1,34E-11	9,89E+01	4,54E+01	1,65E+02	1,17E-01	9,38E+01	5,40E+01
53	Glimmerschiefer	838	1,16E-12	1,43E+02	1,84E+01	1,58E+02	1,53E-01	5,21E+01	5,10E+01
57	Niedere Alluvialterrasse	824	5,49E-12	5,78E+01	9,09E+00	6,08E+01	1,01E-01	4,53E+01	3,50E+01
90	Serizitschiefer	836	1,61E-11	3,09E+01	6,59E+00	3,88E+01	1,35E-01	3,48E+01	2,20E+01
93	Rauhwanke	856	1,05E-11	4,26E+01	5,81E+00	4,34E+01	1,05E-01	4,26E+01	2,60E+01

See. = Seehöhe

Perm. = Permeabilität

ODL = Ortsdosisleistung



© GIS Land Steiermark, BEV, Adressregister (6008/2006)
Kein Rechtsanspruch ableitbar,
kommerzielle Nutzung unzulässig!

Zweck:
Ersteller:
Karte erstellt am: 09.10.2013

0 M 1:25.000 1000 m



Abbildung 8.12.: Messpunkte im östlichen Teil von Spital am Semmering.

Tabelle 8.12.: Ergebnisse der in Abbildung 8.13 gezeigten Messpunkte.

Nr.	Geologische Einheit	See. (m)	Perm. (m ²)	²²² Radon (kBq/m ³)	± (kBq/m ³)	Maximum (kBq/m ³)	ODL (μSv/h)	²²⁶ Radium (Bq/kg)	²³⁸ Uran (Bq/kg)
34	Niederterrasse	798	9,84E-12	5,88E+00	9,80E+00	1,11E+01	1,20E-01		
35	Schwemmfächer	812	3,80E-12	9,61E+01	1,83E+01	1,05E+02	1,28E-01	5,30E+01	8,40E+01
40	Anthropogene Aufschüttung	848	1,90E-11	9,24E+00	3,48E+00	1,23E+01	1,03E-01		
43	Anthropogene Aufschüttung	848	3,28E-12	4,37E+00	3,57E+00	6,25E+00	1,03E-01	3,31E+01	2,40E+01
41	Grobgneis	864	1,24E-11	3,71E+02	8,98E+01	4,17E+02	1,30E-01	4,83E+01	2,80E+01
88	Serizitschiefer/ Rauhwacke	813	1,96E-11	7,29E+01	8,66E+00	7,70E+01	9,50E-02	6,33E+01	3,70E+01
89	Serizitschiefer/ Rauhwacke	834	6,59E-12	7,96E+01	8,56E+00	8,05E+01	9,30E-02	3,81E+01	2,80E+01
91	Hangschutt, Schutthalden	859	1,79E-12	1,15E+02	1,59E+01	1,31E+02	1,26E-01	5,29E+01	4,60E+01
92	Niederterrasse	776	3,41E-12	1,58E+02	1,68E+01	1,64E+02	1,32E-01	4,94E+01	5,30E+01
94	Niedere Alluvialterrasse	746	1,01E-11	6,70E+01	6,94E+00	6,72E+01	1,20E-01	3,75E+01	2,60E+01
95	Schwemmfächer	808	1,63E-11	5,68E+01	8,49E+00	6,26E+01	1,15E-01	3,46E+01	2,40E+01
96	Kalk	822	1,45E-11	1,43E+01	3,56E+00	1,68E+01	1,11E-01	2,57E+01	2,30E+01
97	Hangschutt, Schutthalden	776	5,19E-12	6,00E+01	2,57E+01	7,35E+01	1,28E-01	2,55E+01	1,40E+01
98	Niederterrasse	804	3,79E-12	1,13E+02	1,16E+01	1,15E+02	1,12E-01	4,16E+01	2,90E+01
99	Auzonen, Kolluvien	808	1,18E-11	5,46E+01	7,46E+00	5,51E+01	1,01E-01	3,18E+01	2,60E+01
100	Niederterrasse	814	6,03E-12	4,52E+01	7,55E+00	4,78E+01	1,09E-01	2,96E+01	2,60E+01

See. = Seehöhe
 Perm. = Permeabilität
 ODL = Ortsdosisleistung

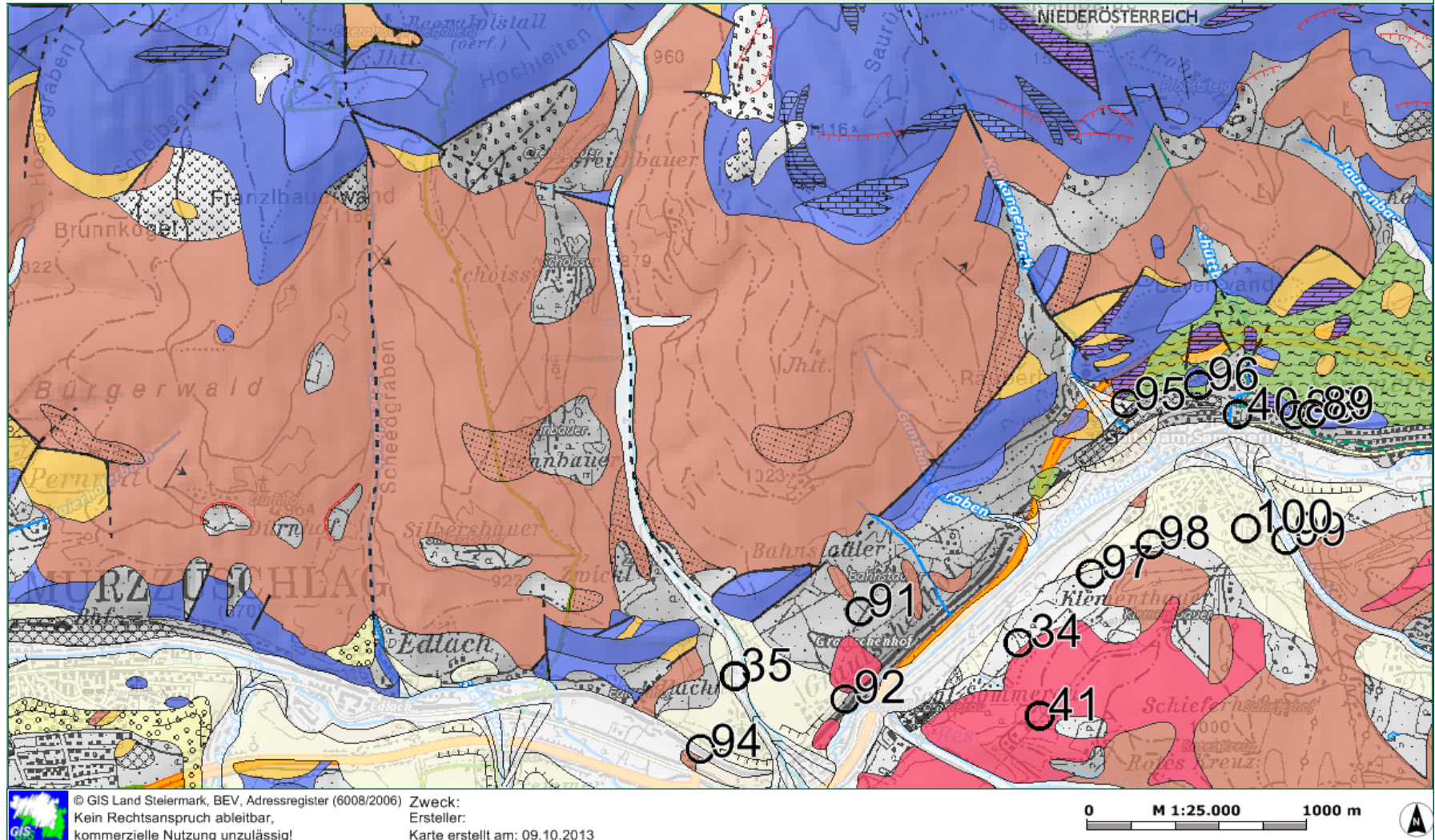


Abbildung 8.13.: Messpunkte im westlichen Teil von Spital am Semmering.

9. Auswertungen

9.1. ²²²Radon im Bodengas

Für die Auswertungen der Ergebnisse werden die geologischen Einheiten in Kategorien zusammengefasst, welche in Tabelle 9.1 aufgelistet werden. Die Zahl in den Klammern gibt die Anzahl der Messpunkte in den betreffenden Geologien wieder. Dabei ist zu beachten, dass sich die Kategorien Hangschutt, Schwemmfächer und Niederterasse aus unterschiedlichen geologischen Materialien zusammensetzen. Ihre Charakterisierung geht auf ihren Ursprung, Bildung und Lage zurück.

Zur Darstellung der Messergebnisse werden Boxplotdiagramme und Summenhäufigkeitsverteilungen verwendet. Erstere zeigen die Messwerte in Balken, Antennen und Punkten. Innerhalb eines Balken liegen die Werte zwischen 25 % und 75 % der Werte. Die Querlinie in dieser Box stellt den Median dar und teilt alle Werte in die Hälfte. Innerhalb der Antennen, die durch horizontale Striche begrenzt sind, liegen die Werte von 10 bis 90 %. Davon sind die Ausreißer ausgenommen, die durch einzelne Punkte dargestellt werden.

Bei der Summenhäufigkeitsverteilung wird die relative Summenhäufigkeit angegeben, bei der die Messwerte gegen eine Prozentskala aufgetragen wird. So kann aus einem einzelnen Punkt herausgelesen werden, wieviel Prozent der Messwerte unter diesem Wert liegen, den Wert selbst mit eingeschlossen. Deswegen hat der höchste Wert eine relative Summenhäufigkeit von 100 %, da alle Werte kleiner oder gleich diesem sind. Der niedrigste Wert wiederum hat den Prozentsatz den eine einzelne Messung an der Summe aller Messungen ausmacht (Zum Beispiel macht bei 50 Messungen eine Messung 2 % aus.).

Tabelle 9.1.: Zusammenfassung der geologischen Einheiten.

Zusammengefasste Einheit	Ursprüngliche Einheit
Auzonen/ Alluvialterasse (Sand, Ton) (AU)	Inneralpines Jungtertiär i.a. (Kies, Sand, Ton, lehmiger Sand)
	Auzonen, Kolluvien, Wildbachschutt
	Niedere Alluvialterasse, Auenablagerung (Sand, Kies, Lehm)
Dolomit, Kalk, Rauhacke (DKR)	Heller Dolomit (gebankt teilweise massig)
	Heller Kalk und Dolomit, teilweise Rauhacke (ungegliedert)
	Kalk, Bänderkalk bis Kalkmarmor (weiß bis rosa, schwarz, bläulichgrau)
	Rauhacke
Glimmerschiefer, Phyllit, Serizitschiefer (GPS)	Gneisiger bis quarzitischer Glimmerschiefer, tw. Biotit führend
	Phyllitischer bis phyllonitischer Glimmerschiefer
	Schutt auf Hochterrasse (unterhalb von Kalk, Dolomit)
	Phyllitischer bis phyllonitischer Glimmerschiefer (Hüllschiefer-Serie)
	Violetter und grüner Serizitschiefer; tw. mit Dolomit und Rauhacke
	Serizitphyllit der Silbersberg-Gruppe, tw. quarzitischer (Norische Decke)
	Graphitreicher Phyllit
	Grauer Albitphyllit
Grobgneis, Mikroklingneis (GN)	Muskovit-Plagioklas-Mikroklingneis (feinkörnig)
	Grobgneis (granitischer Augengneis)

Tabelle 9.1.: Zusammenfassung der geologischen Einheiten.

Zusammengefasste Einheit	Ursprüngliche Einheit
Hangschutt (HS)	Hangschutt (Semmering Quarzit, Glimmerschiefer)
	Hangschutt (Kalk, Dolomit, Semmering Quarzit)
	Hagschutt (Glimmerschiefer)
	Hangschutt, Schutthalden (teilweise Würm)
Niederterasse (NT)	Niederterasse (Grobgneis)
	Niederterasse
Schwemmfächer (SF)	Schwemmfächer (Glimmerschiefer)
	Schwemmfächer, Schwemmkegel, Murenkegel (z.T. spät- postglazial)
Semmering Quarzit (SQ)	Semmering Quarzit
	Semmering Quarzit, Lantschfeldquarzit, Alpiner Verrucano

9. Auswertungen

In der Abbildung 9.1 sind die unterschiedlichen Werteverteilungen der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen, abhängig von der geologischen Kategorie, ersichtlich. So zeigt der Gneis ein breites Spektrum und die höchsten Werte. Die Box, die 50 % der Werte enthält, liegt Großteils über 100 kBq/m^3 . Hingegen deckt die Box der Auzonen nur einen Bereich unter 40 kBq/m^3 ab und weist eine dichte Verteilung auf. Die niedrigsten Werte weist die Kategorie auf, in der Dolomit, Kalk und Rauhwaacke inbegriffen sind. Generell liegen die Boxen von Auzonen, Glimmerschiefer und Semmering Quarzit im ähnlichen Bereich zwischen 30 kBq/m^3 und 100 kBq/m^3 und zeigen somit Werte mittlerer Größenordnung verglichen mit den niedrigen Werten der Messpunkte im Kalk und den hohen Werten im Gneis. Die Werte von Hangschutt, Niederterasse und Schwemmfächer liegen ebenfalls in diesem mittleren Bereich. Dieser Umstand ist darauf zurückzuführen, dass ihre Kategorisierung auf ihre Entstehung und Vorkommen zurückgeht und sich ihre Materialien aus unterschiedlichen Geologien zusammensetzt.

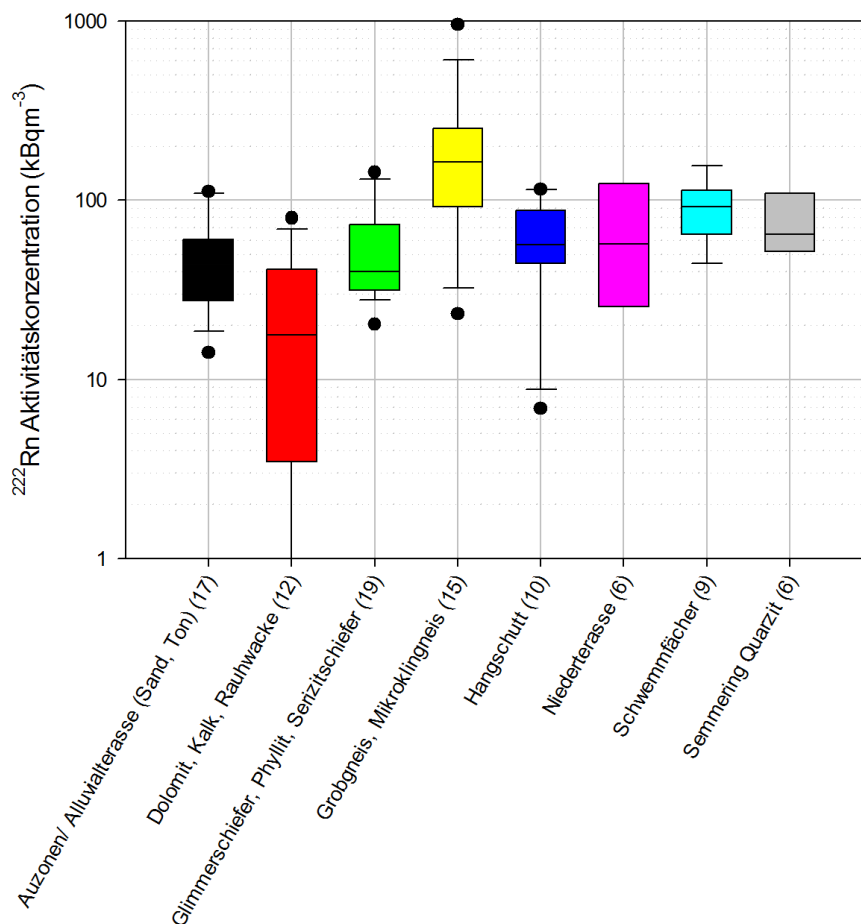


Abbildung 9.1.: Boxplot der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen in den verschiedenen geologischen Kategorien.

In Abbildung 9.2 ist die relative Summenhäufigkeit der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen, unabhängig von den geologischen Kategorien, dargestellt. Dabei liegen 50 % der Werte unter 50 kBq/m^3 , 78 % unter 100 kBq/m^3 und 94 % unter 200 kBq/m^3 .

Im digitalen Atlas der GIS Steiermark sind neben der feinen, auch noch eine mittlere und grobe Einteilung der Geologie anwählbar. Die bereits besprochene und weiter verwendete Ka-

tegorisierung bezieht sich dabei auf die feine Unterteilung. Mit abnehmender Auflösung hängen die Gebiete einer geologischen Einheit stärker zusammen und verteilen sich homogener über die Region. In den Tabelle C.1, C.2 und C.3 im Anhang werden die Mittelwerte der ²²²Radon-Aktivitätskonzentrationen der verschiedenen geologischen Einheiten und deren Standardabweichung angegeben.

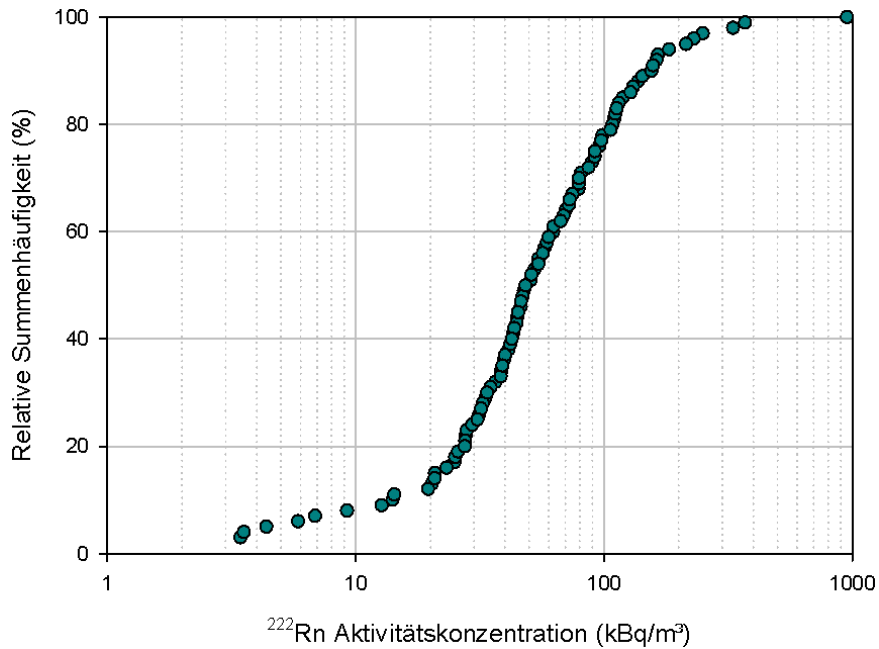


Abbildung 9.2.: Relative Summenhäufigkeit der ²²²Radon-Aktivitätskonzentrationen.

9.2. Permeabilität des Bodens

In der Abbildung 9.3 ist ein Boxplot der gemessenen Permeabilität abgebildet, aus welchem die Abhängigkeit der Durchlässigkeit für Gase von der Geologie ersichtlich ist. Die Kategorien, unterteilt in hoch, mittel und wenig permeabel, gehen auf Kemski (Kemski et al. 1996) zurück. Ein Unterschied zwischen den Verteilungen ist erkennbar, wenn betrachtet wird, wie weit die Boxen in den weniger permeablen Wertebereich hineinragen. Außerdem unterscheidet sich die Gleichmäßigkeit der Verteilung der Werte zwischen Minimum und Maximum, was an der Lage der Medianlinie zu erkennen ist.

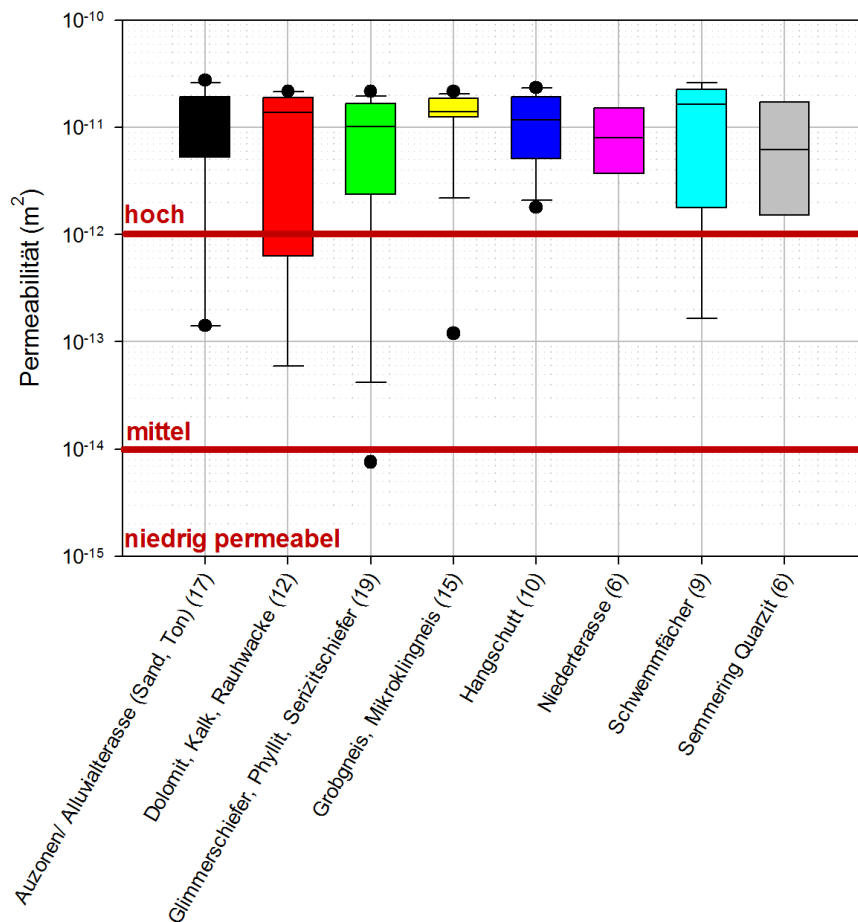


Abbildung 9.3.: Boxplot der Permeabilität in den verschiedenen geologischen Kategorien.

Von den gemessenen Werten sind 88 % hoch permeabel, wie aus der Summenhäufigkeit in Abbildung 9.4 hervorgeht. Es ist zu beachten, dass neue Punkte für Messungen gesucht wurden, wenn an einem Messpunkt keine Bodenluft extrahiert werden konnte. Dieses Problem hatte aber eher mit der Bodenfeuchte, als mit dem geologischen Untergrund zu tun. Teilweise konnte keine Luft angesaugt werden oder in manchen Fällen wurde sogar Wasser aus den Sonden gezogen. Es wird von keiner Verfälschung der Aussagen über die generellen Permeabilitätseigenschaften der Geologien ausgegangen.

In Abbildung 9.5 werden die Boxplots der Permeabilität mit jenen der ²²²Radon-Aktivitätskonzentration verglichen. Bei Betrachtung des Gneises liegt die Schlussfolgerung nahe, dass

eine hohe Permeabilität mit hohen Werten der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration einhergeht. Jedoch zeigt ein Vergleich der Werte bei den Alluvialterassen ein entgegengesetztes Bild.

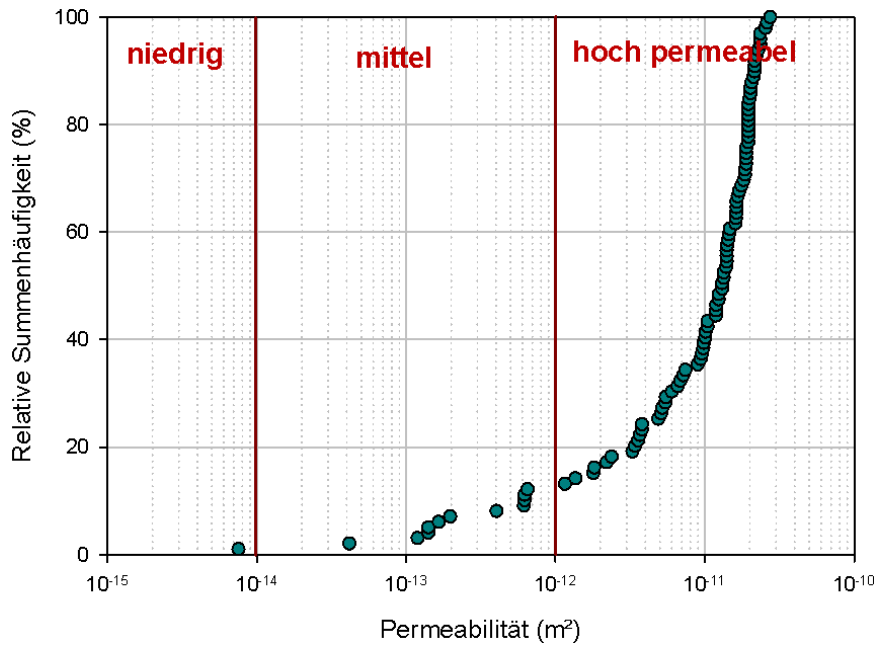


Abbildung 9.4.: Relative Summenhäufigkeit der Permeabilität.

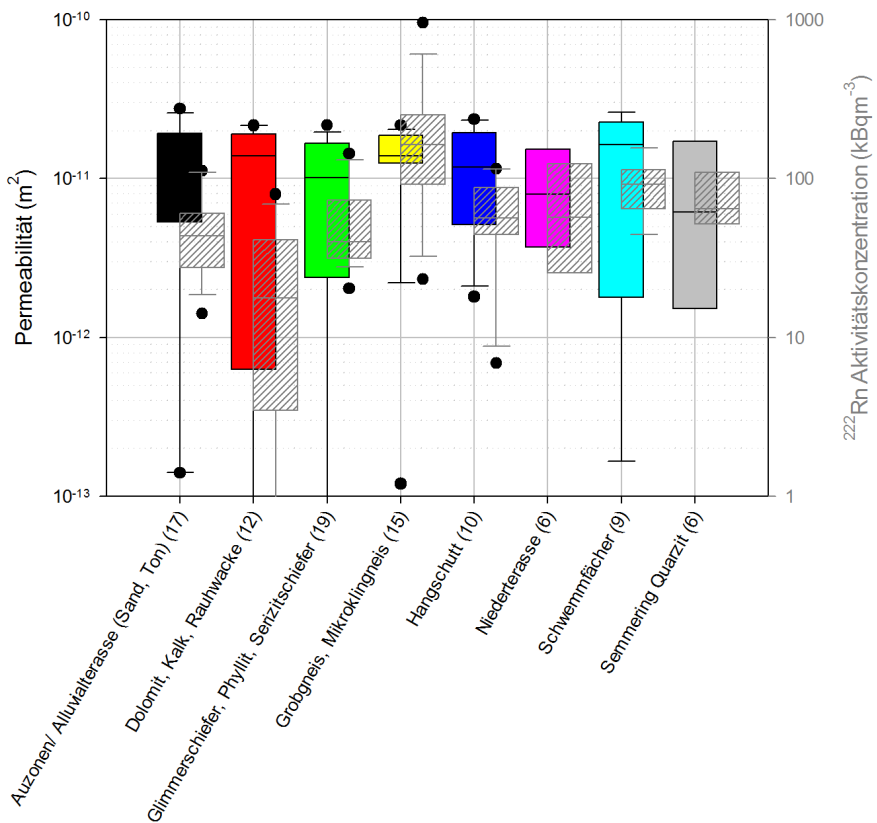


Abbildung 9.5.: Vergleich von Permeabilität mit ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration.

9. Auswertungen

Während der Messreihe im Frühjahr wurde bei den 60 Messpunkten die Permeabilität einerseits mit dem System bestehend aus Pumpe, Durchflussmesser und Manometer und andererseits mit dem Radon-Jok (siehe Kapitel 6.3) gemessen. Bei den folgenden Diagrammen wurden für alle Messwerte nur die Werte jener Orte verwendet, an denen auch mittels Radon-Jok gemessen wurde. Es ergibt sich somit eine andere Anzahl an Ergebnissen, die in die geologischen Kategorien einfließen. In Abbildung 9.6 werden die Werte des Radon-Joks mit denen des anderen Systems verglichen. Die Werte zeigen eine relativ gute Übereinstimmung.

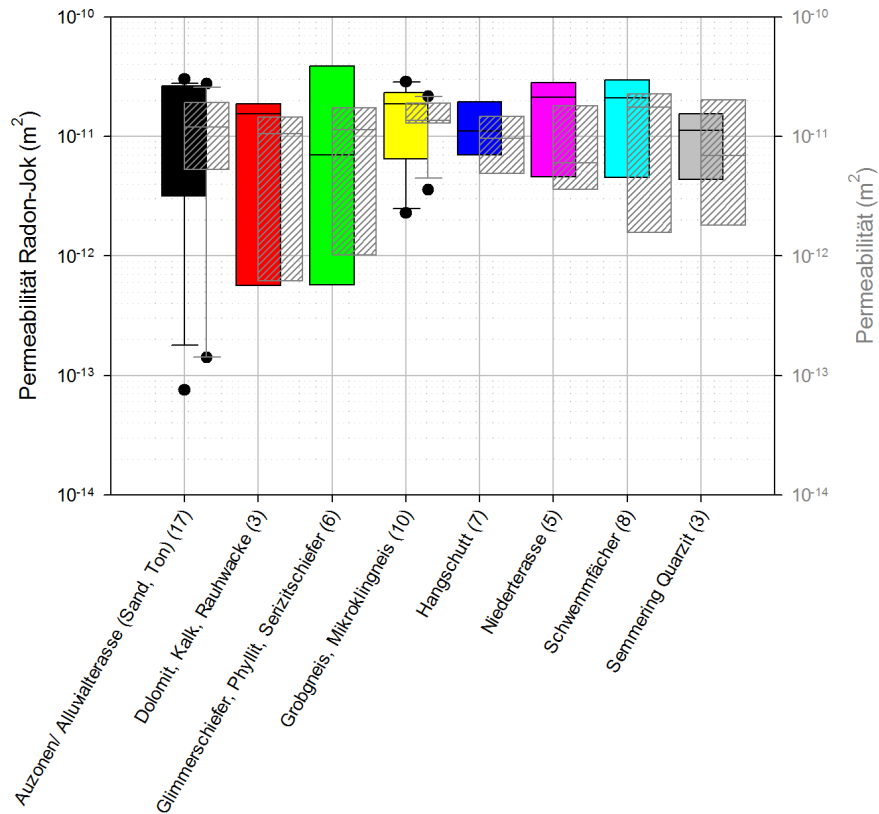


Abbildung 9.6.: Vergleich der Messwerte des Radon-Joks mit herkömmlichen Messsystem.

9.3. Ortsdosisleistung

Wie bei den Messwerten der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration und der Permeabilität zeigt auch die Ortsdosisleistungen eine Abhängigkeit von den unterschiedlichen geologischen Einheiten. In Abbildung 9.7 werden die Ortsdosisleistungen mit den ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen verglichen. Bei dem Vergleich ist erkennbar, wie die relativen Lagen der Werteverteilungen einander ähneln. Ein Grund für diese Korrelation kann der Einfluss der im Boden verbliebene Folgeprodukte von ^{222}Rn auf die Ortsdosisleistung sein. Zerfällt ^{222}Rn im Boden, bleiben seine festen Folgeprodukte im Untergrund. Deren Zerfälle sind proportional zur ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen im Bodengas und die dabei entstehende Gammastrahlung kann sich auf die Höhe der Ortsdosisleistung über dem Boden auswirken.

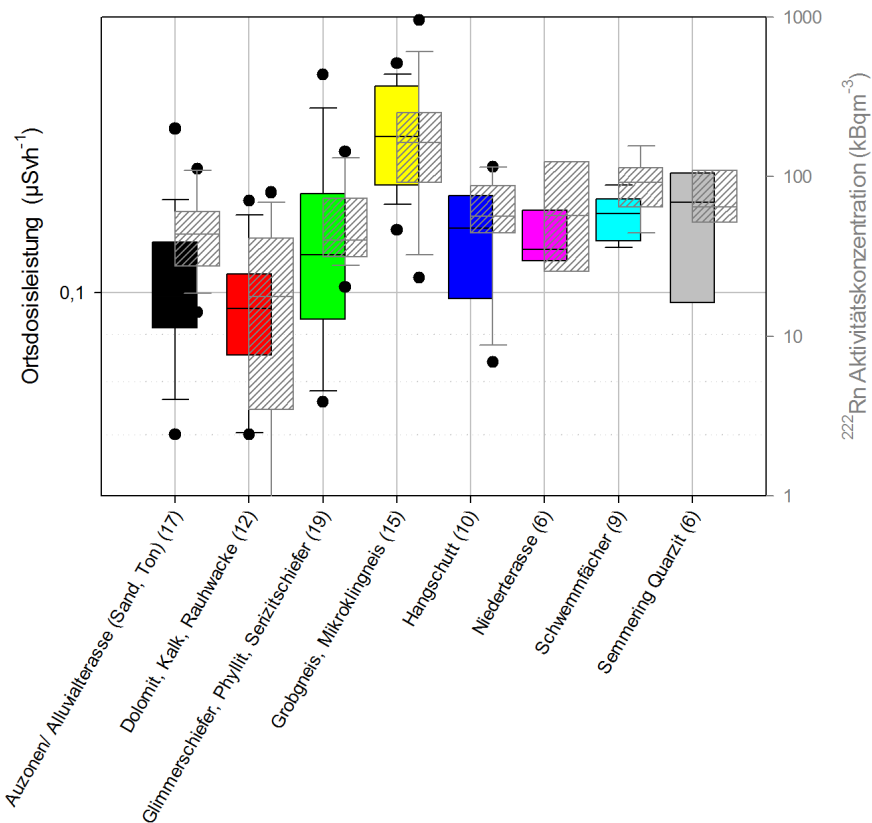


Abbildung 9.7.: Vergleich von Ortsdosisleistung und ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration.

9.4. Radionuklide im Boden

Für den Vergleich zwischen den Aktivitätskonzentrationen von ^{222}Rn in der Bodenluft, ^{238}U und ^{226}Ra im Boden und der Permeabilität des Bodens werden die verschiedenen Boxplots einer geologischen Kategorie übereinander gelegt. Die Farben stellen nun die verschiedenen Messgrößen dar. Die Reihenfolge der geologischen Kategorien wird beibehalten.

- Rot: ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration in der Bodenluft (kBq/m^3)
- Grün: ^{238}U - bzw. ^{226}Ra -Aktivitätskonzentration im Boden (Bq/kg)
- Blau: Permeabilität des Bodens (m^2)

^{226}Ra stellt die Quelle von ^{222}Rn dar und an der Spitze ihrer Zerfallskette steht ^{238}U . Da ^{226}Ra ein Folgeprodukt von ^{238}U ist und eine viel geringere Halbwertszeit als dieses besitzt, sollten ihre Aktivitäten im radioaktiven Gleichgewicht sein. In Abbildung 9.8 werden ihre Aktivitätskonzentrationen miteinander verglichen. Dabei ist ersichtlich, dass die Aktivitätskonzentrationen von ^{226}Ra eher über denen von ^{238}U liegen.

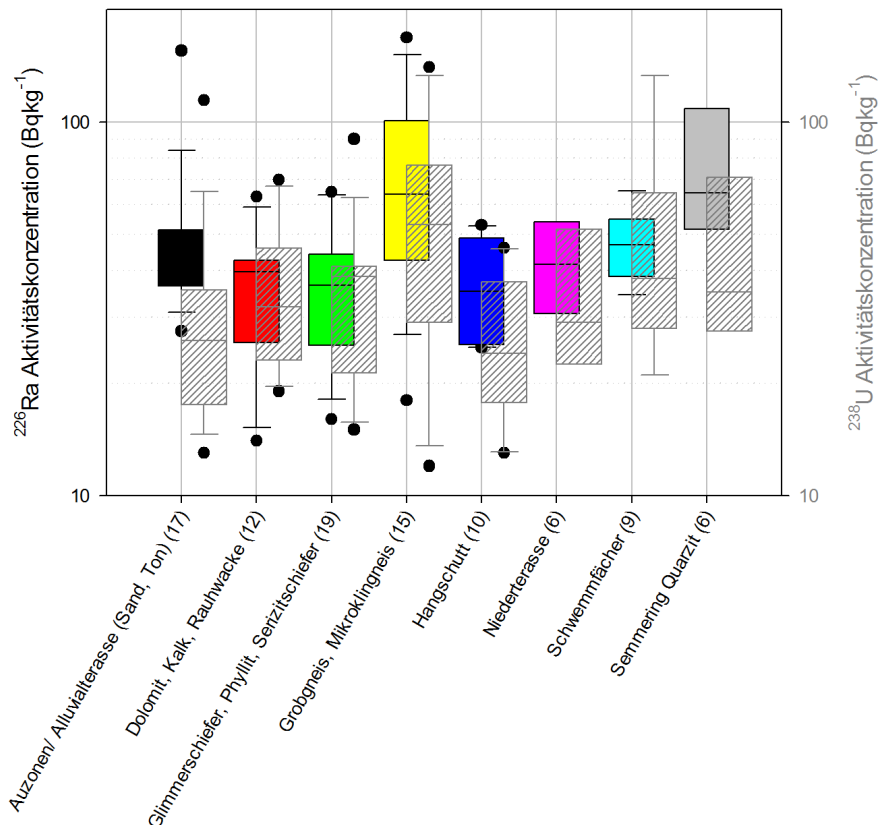


Abbildung 9.8.: Vergleich zwischen den Aktivitätskonzentrationen von ^{226}Ra und ^{238}U .

Eine geringe Permeabilität könnte die Proportionalität zwischen den Aktivitätskonzentrationen von ^{222}Rn und ^{226}Ra bzw. ^{238}U beeinflussen, wenn sich das Gas nur wenig von der Quelle aus verbreiten kann. Die dadurch entstehende Korrelation zwischen diesen Messgrößen kann teilweise aus den Abbildungen 9.9 und 9.10 entnommen werden. Das Kriterium

dafür sind die relativen Lagen der Boxplotbalken zueinander. Diese ähneln sich beim Vergleich zwischen der Aktivitätskonzentrationen von ^{222}Rn und ^{238}U bzw. ^{226}Ra .

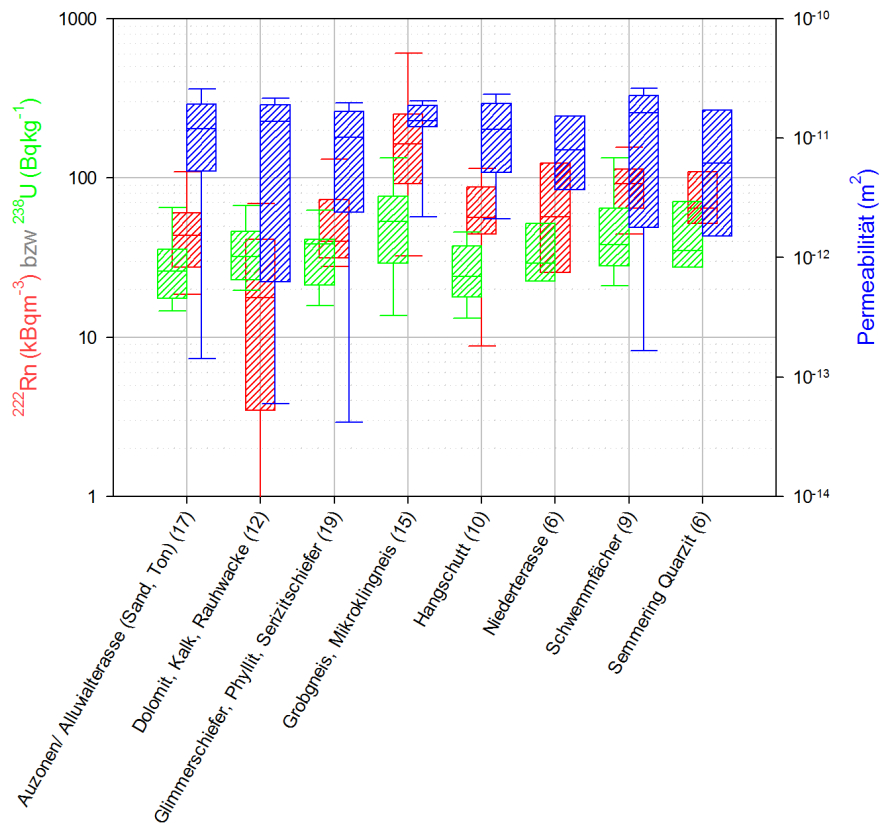


Abbildung 9.9.: Vergleich zwischen den Aktivitätskonzentrationen von ^{222}Rn und ^{238}U und der Permeabilität.

Bei den Messpunkten im Kalk, zweite Spalte, kann angenommen werden, dass aufgrund der Permeabilität die weite Verteilung der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration in den tiefen Wertebereich hinein entsteht, trotz der kompakten Verteilung der Aktivitätskonzentration von ^{238}U bzw. ^{226}Ra .

Durch hohe Permeabilitäten verteilt sich die ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration im Boden homogener, da sich das Bodengas leichter durchmischen kann. Dieser Umstand würde eine höhere Abweichung der ^{222}Rn Aktivitätskonzentration von der seiner Mutternuklide an dem Messpunkt ermöglichen, da sich das ^{222}Rn weiter von der Quelle wegbewegen kann. Im Gegensatz dazu führt eine niedrige Permeabilität bei einer inhomogenen Verteilung von ^{238}U bzw. ^{226}Ra im Erdreich zu einer ungleichmäßigen Verteilung von ^{222}Rn im Boden.

Die Vergleiche zwischen den Aktivitätskonzentrationen und der Permeabilität des Radon-Joks werden in Abbildung 9.11 und 9.12 gezeigt. Hier zeigen sich ähnliche Korrelationen wie bei den Vergleichen der Aktivitätskonzentrationen mit der Permeabilität des Bodens, gemessen mit dem System aus Durchflussmesser und Manometer.

9. Auswertungen

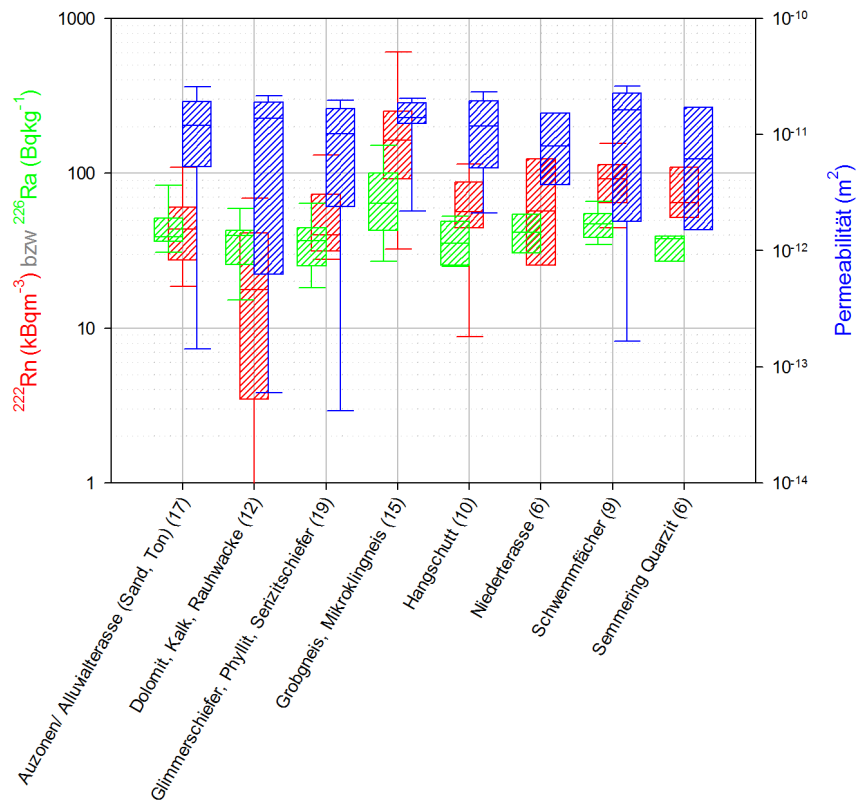


Abbildung 9.10.: Vergleich zwischen den Aktivitätskonzentrationen von $^{222}\text{Radon}$ und $^{226}\text{Radium}$ und der Permeabilität.

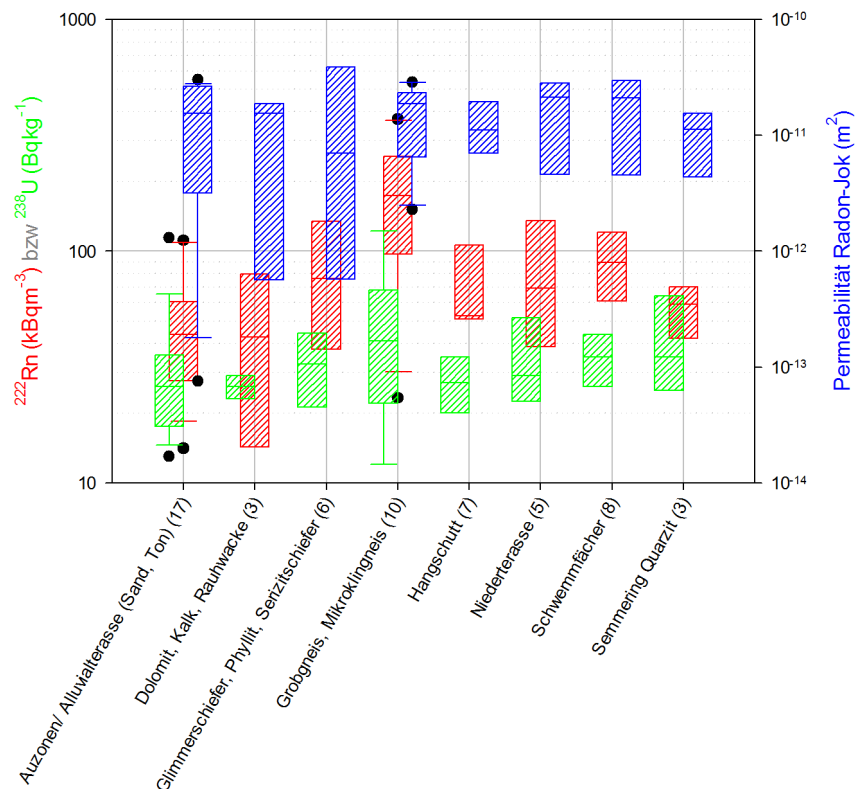


Abbildung 9.11.: Vergleich zwischen $^{222}\text{Radon}$ und $^{238}\text{Uran}$ und der Permeabilität mit Radon-Jok.

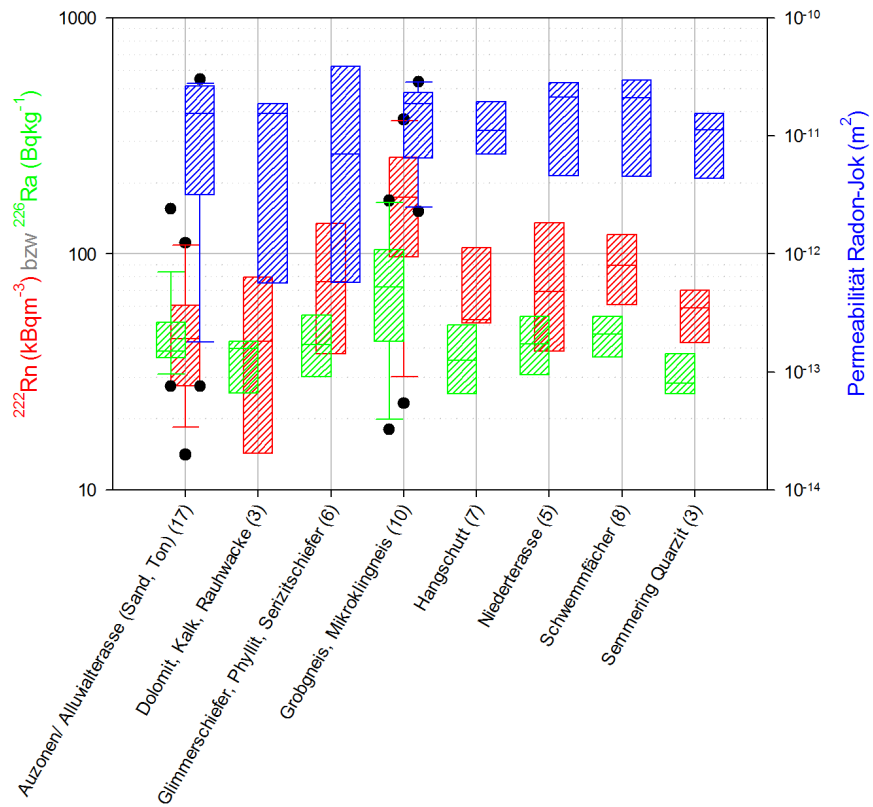


Abbildung 9.12.: Vergleich zwischen ^{222}Rn Radon und ^{226}Ra Radium und der Permeabilität mit Radon-Jok.

9.5. Kartierung

Von dem beprobten Gebiet wurde eine Karte der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen erstellt, um einen Überblick über die Region zu erlangen. Für die Interpolation der Punkte zwischen den Messorten wurde die Inverse-Distanz-Gewichtungs-Interpolation verwendet, welche in Formel 9.1 angeführt wird (Reudenbach 2013). Bei dieser fließen die Entfernungen zu den Messplätzen und die Höhe der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen ein. Die geologischen Gegebenheiten werden dabei außer Acht gelassen.

$$\hat{v}_i = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p} v_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad (9.1)$$

- v_i ... bekannte Punkte
- \hat{v}_i ... zu schätzende Punkte
- d_i ... Distanzen zwischen den jeweiligen bekannten und zu schätzenden Punkten
- p ... Exponent um die Distanzen zu gewichten

Die Berechnung der Punkte wurde mittels eines eigens geschriebenen Python Programmes und die graphische Darstellung mittels Gnuplot durchgeführt. Die dabei erstellte Karte mit Legende ist in Abbildung 9.13 zu sehen. Für die Interpolation wurde ein gewichtender Exponent mit $p = 2,5$ gewählt, da sich bei diesem Wert ein gleichmäßig stetiger Übergang der interpolierten Punkte zwischen den fixen Messpunkten zu ergeben scheint. Die Lage der Messpunkte und ein Überblick über die geologischen Beschaffenheiten in dem Untersuchungsgebiet sind in Abbildung 9.14 dargestellt. Auf den Flächen mit gneisigem Untergrund, welche rot gefärbt sind, lassen sich hohe Messwerte erkennen. Auf der restlichen Fläche sind mittlere und niedrigere ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen vorzufinden.

Ein Vergleich der Karte mit den geologischen Gegebenheiten und der Verteilung der Messpunkte über das Gebiet kann mit Abbildung 9.14 angestellt werden. Dadurch ist ersichtlich, dass die, in Hinblick auf die ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration, homogen wirkenden Gebiete hauptsächlich durch die lockere Verteilung der Messpunkte auf deren Flächen entsteht. Das Gebiet mit ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen über 160 kBq/m^3 liegt auf der Fläche mit gneisigem Untergrund, was mit den Ergebnissen aus 9.1 gut übereinstimmt.

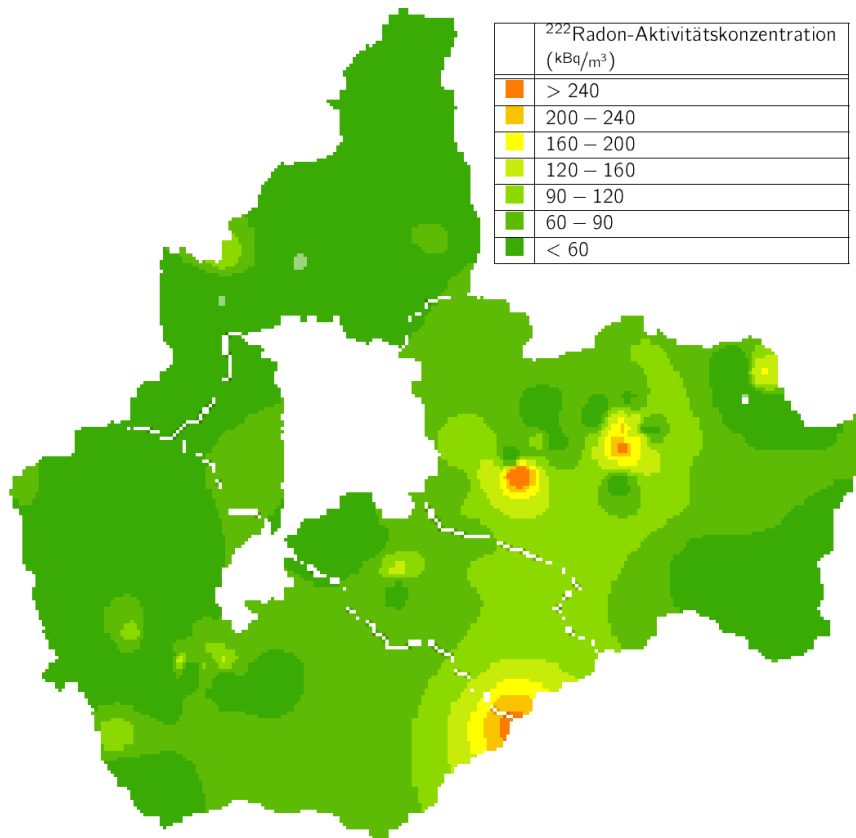


Abbildung 9.13.: Eine interpolierte Karte der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen in der untersuchten Region.

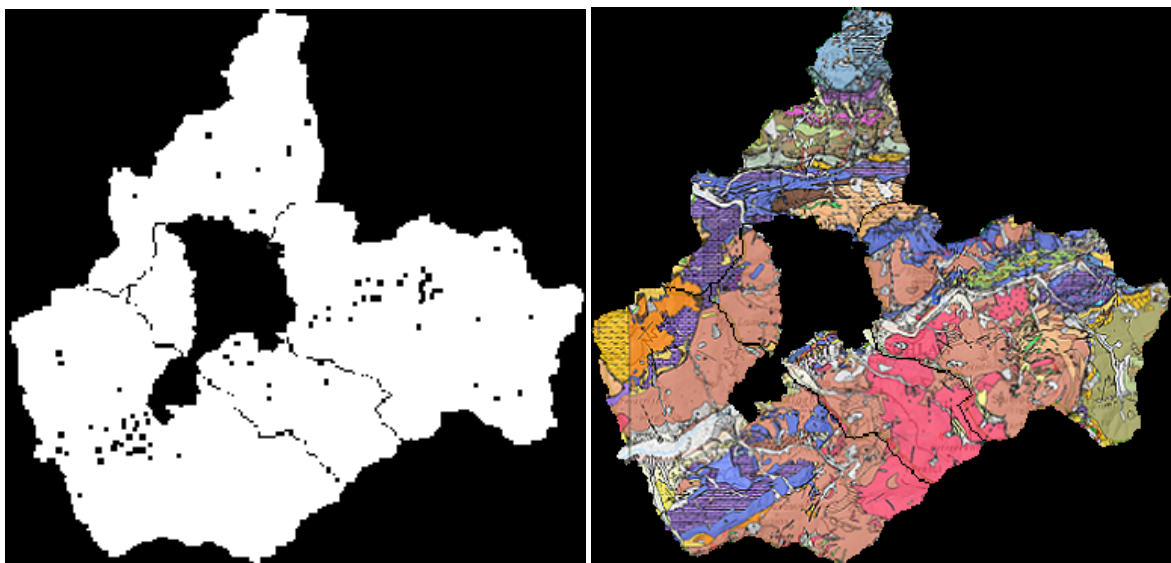


Abbildung 9.14.: Messpunkte und Geologie innerhalb des Untersuchungsgebietes.

9.6. Langzeitmessungen

Bei den Langzeitmessungen wurde jeweils der zeitliche Verlauf der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration, der des Luftdruckes und jener der Luftfeuchtigkeit aufgezeichnet. Während den Messungen wurden die Messgeräte zu deren Schutz in privaten Räumlichkeiten aufgestellt, wobei der Raum in Spital am Semmering zusätzlich beheizt wurde. Der Umstand, dass die Messgeräte nicht im Freien aufgestellt wurden, mindert die Ersichtlichkeit der Korrelationen zwischen der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration im Bodengas und dem Luftdruck als auch der Luftfeuchtigkeit.

In Abbildung 9.15 ist der zeitliche Verlauf der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration und des Luftdruckes während der Messreihe im Herbst, gemessen in Spital am Semmering, dargestellt. Werden Anfangs- und Endzeitpunkt der zeitlichen Achse des Luftdruckes gegenüber der Achse der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration geändert, kann eine vage Korrelation zwischen den beiden Verläufen herausgesehen werden, wie in Abbildung 9.16 dargestellt ist.

Im Anhang D unter D.1 bis D.5 sind die übrigen Diagramme dargestellt, die die Verläufe der drei Messgrößen im Herbst und im Frühjahr in Spital am Semmering und im Frühjahr in Ganz vergleichen. Aus diesen Diagrammen ist keine eindeutige Korrelation zwischen den zeitlichen Verläufen ersichtlich.

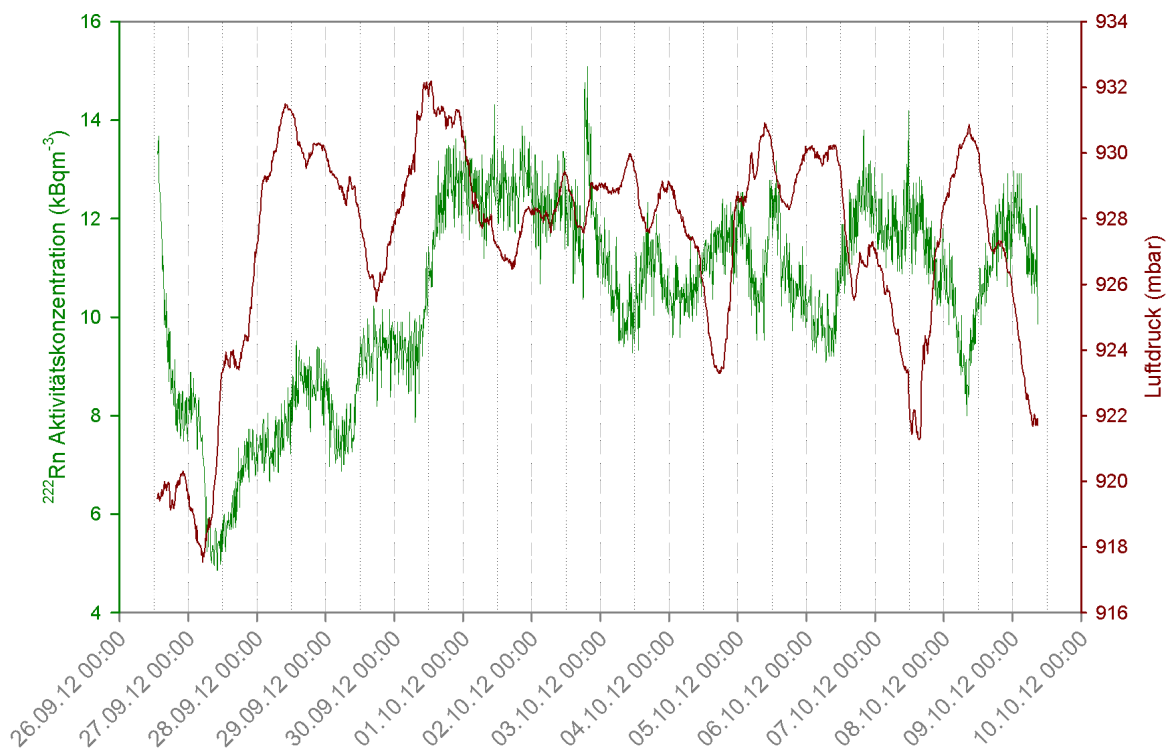


Abbildung 9.15.: Zeitlicher Verlauf der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration und des Luftdruckes an Messort 40.

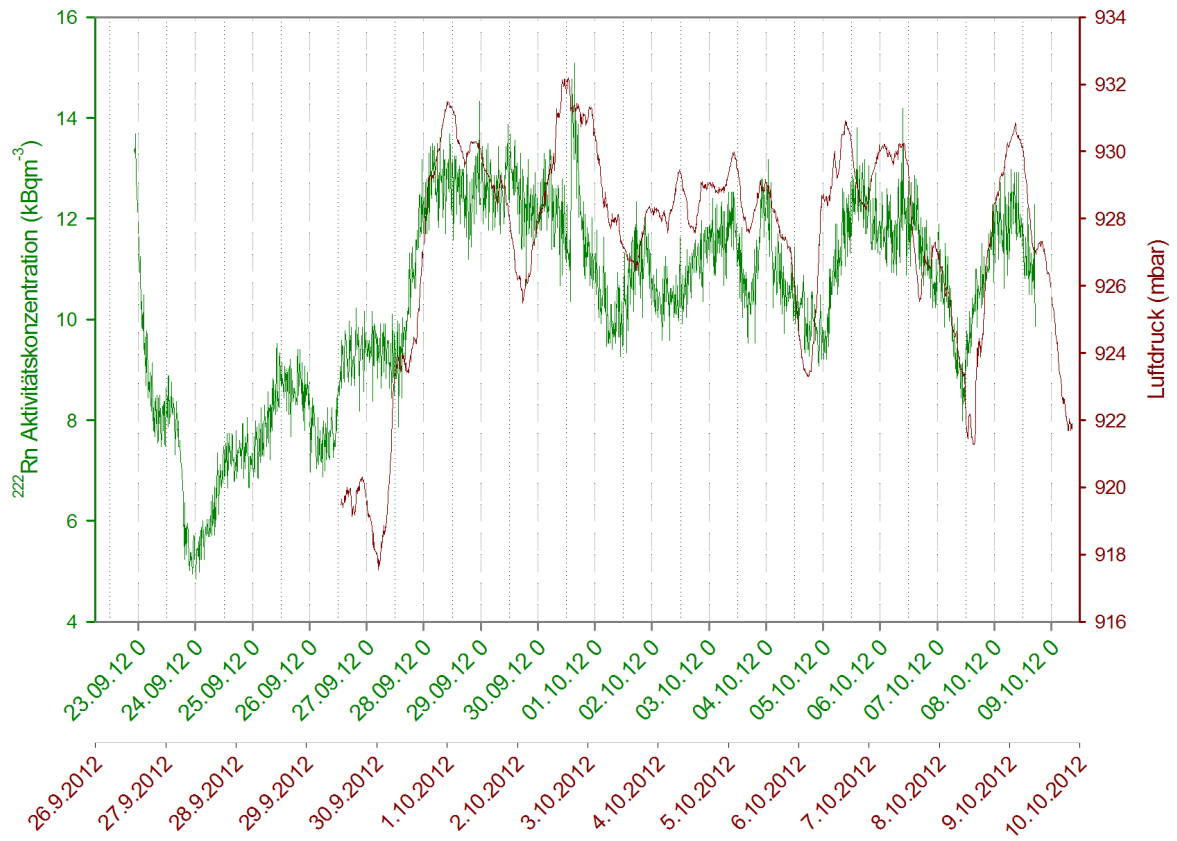


Abbildung 9.16.: Zeitlicher Verlauf der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration und des Luftdruckes an Messort 40 mit veränderter Skalierung der zeitlichen Achsen.

9.7. Anpassung der Messwerte an den Verlauf der Langzeitmessungen

Die Langzeitmessungen zeigen, dass der Verlauf der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration im Bodengas zeitlichen Schwankungen unterliegt. Nun wird die Hypothese überprüft, dass die zeitlichen Verläufe der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen an den Messorten und den Orten der Langzeitmessungen sich gleichen. Dadurch lässt sich das Ergebnis einer Einzelmessung diesen Schwankungen anpassen. Vom zeitlichen Verlauf der Messungen wird der Mittelwert, sowie das Verhältniss zwischen Mittelwert und dem Wert der Langzeitmessung bestimmt, für den Zeitpunkt an dem eine Einzelmessung durchgeführt worden ist. Bei den Messungen der zweiten Messreihe wurden die Verhältnisse der beiden Langzeitmessungen gemittelt. Durch die Annahme, dass bei der Einzelmessung das selbe Verhältnis von Messwert zu Mittelwert wie bei der Langzeitmessung herrscht, kann das Ergebnis der Einzelmessung durch Multiplikation mit diesem Verhältnis angepasst werden. Dieser neue Wert entspricht nun dem Mittelwert an einer Messtelle, wenn dort dieselbe zeitliche Schwankung angenommen wird wie bei der Langzeitmesstelle.

In Tabelle 9.2 werden, unterteilt in geologische Einheiten, die Mittelwerte und Standardabweichungen der Messergebnisse mit denen der angepassten Werte verglichen. Die Standardabweichungen der angepassten Werte sind höher als die der ursprünglichen Ergebnisse, was bedeutet, dass die Annahmen für die Berechnungen nicht zu einer eindeutigeren Charakteristik der geologischen Kategorien führt. Die Schwankungen der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen an den verschiedenen Orten unterscheiden sich zu stark, als dass von den Schwankungen eines Ortes auf die eines anderen Ortes geschlossen werden kann.

Tabelle 9.2.: Vergleich der gemessenen und der zeitlich angepassten ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen.

Geologie	^{222}Rn	\pm	$^{222}\text{Rn}_{\text{angepasst}}$	\pm
	(kBq/m ³)	(%)	(kBq/m ³)	(%)
Semmering Quarzit (6)	80,1	51	59,2	61
Schwemmfächer (9)	92,3	35	53,2	55
Niederterasse (6)	70,5	73	37,4	82
Hangschutt (10)	61,3	51	34,9	83
Grobgneis, Mikroklingneis (15)	219,0	100	177,9	128
Glimmerschiefer, Phyllit, Serizitschiefer (19)	52,8	62	36,8	54
Dolomit, Kalk, Rauhacke (12)	24,4	94	18,8	87
Auzonen/ Alluvialterasse (Sand, Ton) (17)	48,1	56	23,8	50
Mittel		65		75

10. Diskussion und Ausblick

10.1. Durchführung der Bodengasmessungen

Die Bodengasmessungen konnten in einem relativ kurzem Zeitraum durchgeführt werden und geben einen guten Überblick über die ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen im Bodengas des beprobten Gebietes. Insgesamt wurden für die 100 Messpunkte sechs Wochen benötigt.

Komplikationen ergaben sich hauptsächlich durch die Suche geeigneter Messpunkte, da die Orte aufgrund der umfangreichen Ausrüstung gut mit dem Auto erreichbar sein mussten. Weiters war die Anzahl der Punkte innerhalb eines geologischen Gebiets vorgegeben, wodurch sich teilweise ein relativ kleines Areal ergab, in dem ein geeigneter Ort gefunden werden musste. Im Pilotprojekt in Oberösterreich wurden zu erst die Messpunkte vor Ort mit einer ortskundigen Person bestimmt, was den Ablauf der Messungen vereinfachte. Die Messungen im Frühjahr erfolgten kurz nach, bzw. während der Schneeschmelze, weswegen der Boden oft noch sehr nass war. Aus diesem Grund kam es vor, dass aus dem Boden keine Luft extrahiert werden konnte oder Wasser angesaugt wurde, wodurch der Messpunkt verlegt werden musste.

Manche Bewohner in den untersuchten Gemeinden wussten nichts von den Probenahmen. Im Herbst war erst kurz vor den Messungen eine Informationsveranstaltung angesetzt, weswegen das Wissen über diese bei deren Durchführung noch nicht weit verbreitet war. Dieser Umstand war hinderlich bei der Einholung der Erlaubnis, auf einem Grundstück Messungen durchführen zu dürfen. Diese wurde teilweise verweigert weil eine Wertminderung des Grundstücks befürchtet, oder die Sinnhaftigkeit des Projekts bezweifelt wurde.

Für die Zeitplanung zukünftiger Projekte sind Aspekte wie der Wettereinfluss und die Auffindung geeigneter Messpunkte stärker in Betracht zu ziehen. Diese können sich besonders negativ auf die Dauer der Probenahme auswirken. Ebenso sollte die Informationskampagne für die Bevölkerung rechtzeitig erfolgen, damit die Bürger zum Zeitpunkt der Probenahme über das Projekt in Kenntnis gesetzt sind, und um ihnen genügend Zeit zu geben sich eine Meinung darüber bilden zu können.

10.2. Ergebnisse der Bodengasmessungen

Die Ergebnisse der Bodengasmessungen zeigen eine Abhängigkeit der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration in der Bodenluft vom geologischen Untergrund. Dabei hat der Gneis mit Abstand die höchsten Werte und Kalke die niedrigsten. Die ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration der restlichen Geologien überlappen sich in dem Wertebereich dazwischen. Somit stellt das Gebiet des Gneises den „Hot Spot“ der Region dar. So geben allein der Gneis und Kalk Hinweise auf hohe

bzw. niedrige ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen. Über die restlichen Geologien können im Vorhinein keine Abschätzungen gemacht werden, wodurch Messungen notwendig sind.

Durch die Abhängigkeit der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration in der Bodenluft von dem geologischen Untergrund ergeben sich hohe Schwankungen innerhalb eines geologisch inhomogenen Gebietes, wie es beim Untersuchungsgebiet der Fall ist. Durch das Wissen über die geologischen Beschaffenheiten einer Region lassen sich erste Hinweise über die Verteilung der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration innerhalb dieser treffen und etwaige Messungen zielgerecht zu einer genauen Bestimmung der Werte und Verteilung einsetzen.

10.3. Vergleich der Messsysteme für die Permeabilität des Bodens

In Hinblick auf die Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen mittels Radon-Jok lässt sich kein Vorteil gegenüber der Messung mittels der Vorrichtung aus Pumpe, Durchflussmesser und Manometer feststellen. Bei einem Vergleich der beiden Messsysteme muss das Augenmerk also eher auf die Durchführung der Messung und die Bedienung des Gerätes als auf die Ergebnisse gelegt werden.

Der Radon-Jok ist ein simples System, das leicht zu handhaben ist. Seine Größe und sein Gewicht sind jedoch für einen raschen Transport und Aufbau hinderlich. Beim Aufstellen des Geräts muss auf eine genau waagrecht Ausrichtung der Grundplatte geachtet werden, wobei ein am Gerät befestigtes Pendel hilft.

Grundsätzlich benötigt der Radon-Jok keine Stromversorgung, da auch akustische Signale in Form von Klicklauten ausgegeben werden und bei Messungen im Feld vorteilhaft ist. Mit eingesetzten Batterien kann auch eine Lichtausgabe eingeschaltet werden, welche etwas besser als die Klicklaute wahrnehmbar sind, da das Lichtsignal über einen längeren Zeitraum gegeben wird. Während der Messung werden aber mehr Signale gegeben als nötig, was die ersten Auswertungen des Gerätes verkompliziert. Deswegen braucht es etwas Eingewöhnungszeit bei der Interpretation der Signale, bei der die Kenntnis wichtig ist, bei welchem Füllgrad des Sackes die wichtigen Signale gegeben werden.

Bei sehr niedrigen Permeabilitäten kann eine Messung sehr lange, bis zu einer dreiviertel Stunde, in Anspruch nehmen, wobei es teilweise sehr schwierig ist einen unmittelbaren Fortschritt auszumachen. Wird ein Stillstand, bei dem überhaupt kein Bodengas angesaugt wird, nicht rechtzeitig erkannt, führt dieser zu einem Zeitverlust bei der Probenahme. Bei nassen Böden erweist sich dieser Stillstand als Vorteil, weil dadurch kein Wasser ins Messgerät gelangt. Beim anderen System wurde teilweise das Wasser in den Durchflussmesser gesogen, welcher dann für weitere Messungen getrocknet werden musste.

Zusammengefasst liegen die Vorteile des Radon-Joks bei der einfachen Bauweise des Messsystems, die Nachteile jedoch bei seinem Gewicht, der Sperrigkeit und der mitunter langen Messdauer. Die Vorteile des Systems aus Pumpe, Durchflussmesser und Manometer liegen bei der schnellen Anwendung und des einfachen Transports. Die Nachteile liegen bei der Gefahr Wasser anzusaugen, der Abhängigkeit von Batterien bzw. aufgeladenem Akku und der Unhandlichkeit, die durch das Zusammensetzen der drei Geräte entsteht.

10.4. Korrelation der Messgrößen

Die Ergebnisse der Messgrößen zeigen Abhängigkeit von einander, wie aus den verschiedenen Diagrammen in den Kapiteln 9.1 bis 9.4 hervorgeht. In den Abbildungen ist zu erkennen, dass sich die verschiedenen Messgrößen, aufgetragen gegen die geologischen Kategorien, in den relativen Lagen ihrer Werteverteilungen ähneln. Zum Beispiel zeigt der Gneis bei allen Messgrößen relativ hohe Werte, hingegen die kalkhaltige Kategorie die geringsten Werte. Durch diese Eigenschaften lassen sich die unterschiedlichen Geologien gut charakterisieren. Dies ist von Vorteil in Hinblick auf weitere Messungen und die Erhebung des Radonpotentials, wie in Kapitel 10.5 beschrieben wird.

Aus den Ergebnissen ist kein deutlicher Zusammenhang zwischen den Messgrößen ersichtlich. ²³⁸Uran bzw. ²²⁶Radium stellen die Quellen für ²²²Radon dar und die Permeabilität beeinflusst die Fähigkeit des Gases sich im Boden zu verteilen und sich mit anderen Gasen zu durchmischen, was schließlich zu der tatsächlichen ²²²Radon-Aktivitätskonzentration führt. Von dieser kann auch die Ortsdosisleistung über dem Boden abhängig sein, wenn sie durch die im Boden verbliebenen Folgeprodukte von ²²²Radon beeinflusst wird. Teilweise können aus den Ergebnissen die erwarteten Beziehungen zwischen den Messgrößen herausgelesen werden.

Die Auswertung der Langzeitmessungen stellt die Zusammenhänge des zeitlichen Verlauf der ²²²Radon-Aktivitätskonzentration mit der Luftfeuchtigkeit und des Luftdruckes dar. Die Auswertung in Kapitel 9.7 verdeutlicht, dass von den zeitlichen Schwankungen der ²²²Radon-Aktivitätskonzentration an einem Punkt nicht auf die eines anderen Punktes geschlossen werden kann.

Insgesamt kann durch die verschiedenen Messgrößen auch ein unterschiedlich starker Einfluss auf die ²²²Radon-Aktivitätskonzentration in Innerräumen angenommen werden. Dadurch ergeben sich weitere Möglichkeiten verschiedene Arten von Messungen durchzuführen, um auf das Radonpotential zu schließen.

10.5. Ergebnisse in Hinblick auf das Radonpotential

Bis zu dem Pilotprojekt ging das Radonpotential einer Gemeinde nur auf Innenraummessungen zurück. Diese sind allerdings sehr aufwendig flächendeckend und in repräsentativen Ausmaß durchzuführen. Sie dauern lange, die Mitarbeit der Bevölkerung ist notwendig und die Organisation einer gleichzeitigen Durchführung bei einer großen Anzahl an Messungen ist mit einem hohen Aufwand verbunden. Deswegen ist es notwendig weitere Messverfahren und Kriterien bei der Bestimmung des Radonpotentials zu implementieren. Die Unabhängigkeit von der Bevölkerung stellt bei der Bestimmung des Radonpotentials einen großen Vorteil dar. Weiters ist die Radonpotentialkarte ein wichtiges Instrument beim Bau eines neuen Gebäudes. So kann die Wahrscheinlichkeit von hohen ²²²Radon-Innenraum-Aktivitätskonzentrationen abgeschätzt werden. Bodengasmessungen können in Hinblick auf diesen weiteren Aufschluss geben. Aufgrund dieser Informationen ist es möglich die nötigen Maßnahmen beim Bau zu treffen um hohen ²²²Radon-Innenraum-Aktivitätskonzentrationen präventiv entgegenzuwirken.

Parallel zu den Bodengasmessungen wurden im Rahmen dieses Projekts von der AGES Messungen der ^{222}Rn -Innenraum-Aktivitätskonzentrationen in Häusern der untersuchten Gemeinden durchgeführt. Hinsichtlich einer Verbesserung der Vorhersage des Radonpotentials ist die Auswertung dieser Messungen und die Korrelation dieser mit den Ergebnissen der Bodenluftmessungen entscheidend. So wird untersucht, wie die verschiedenen Messgrößen mit der ^{222}Rn -Innenraum-Aktivitätskonzentration zusammenhängen und wie stark sie von diesen beeinflusst wird, wobei besonders auf die geologischen Aspekte Wert gelegt wird.

Bei der Vorhersagen des Radonpotentials ist die Auffindung von Orten, an denen hohe ^{222}Rn -Innenraum-Aktivitätskonzentrationen auftreten können von besonderem Interesse. Dabei geht es nicht darum die höchsten Werte zu finden, sondern all jene, die den Grenzwert überschreiten. Für die zukünftige Bestimmung des Radonpotentials sollen die geologischen Charakteristiken miteinbezogen werden. Die Ergebnisse der Bodengasmessungen zeigen, dass diese eine sinnvolle Hilfe sind. So sind im Gneis allgemein sehr hohe Werte der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration und Permeabilität auffindbar, wodurch die Voraussetzungen für hohe Konzentrationen in Innenräumen gegeben sind. Hingegen lassen kalkhaltige Geologien nur vergleichsweise geringe Werte zu. Ob solche Gebiete in Hinblick auf ein hohes Radonpotential vernachlässigt werden können, werden die weiteren Auswertungen der Innenraummessungen zeigen.

Die Kenntnisse über die geologischen Eigenschaften in Bezug auf Radon sind ebenfalls hilfreich bei der Planung von Messungen. Wird zum Beispiel ein Gebiet auf die ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen beprobt, könnten, den Ergebnissen der Bodengasmessungen folgend, Gneise und Kalke vernachlässigt werden. Die Möglichkeit ergibt sich durch den Umstand, dass von vornherein in diesen Gebieten nur hohe oder niedrige Werte erwartet werden. Eine genaue Abstufung der Werte ist nicht von Interesse, da es schließlich um die Überschreitung des Grenzwertes der Innenraum-Konzentrationen geht. Somit bietet sich die Gelegenheit im restlichen Gebiet mehr Messungen durchzuführen, um in diesem einen besseren Überblick zu bekommen. Ein weiterer Vorteil eines fundierten Wissens über die Abhängigkeit von ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen von der Geologie liegt bei der Einschätzung unbeprobter Regionen. Liegen keine weiteren Daten als die geologischen Eigenschaften eines Gebietes vor, können Anhand dieser rasch Aussagen bezüglich des Radonpotentials getroffen werden. So fällt es leichter abzuschätzen ob weitere Maßnahmen zur Bestimmung des Radonpotentials nötig sind und Ressourcen können zielgerechter eingesetzt werden.

Die Ergebnisse zeigen hohe Schwankungen der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen in der Bodenluft innerhalb des untersuchten Gebietes. Allerdings lassen sich diese Schwankungen durch die Kategorisierung der Werte nach der Geologie erklären. Zur Zeit gibt die Radonpotentialkarte Informationen auf das Radonpotential gesamter Gemeinden. Es kann vermutet werden, dass die starken Abweichungen der Werte der ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen in der Bodenluft ebenso für die Werte in Innenräumen gelten. Somit lassen sich die Gemeindegebiete nicht pauschalisieren. Allerdings geben geologische Charakteristika die Möglichkeit auf die Verteilung des Radonpotentials innerhalb des Areal zu schließen. Dadurch lässt sich aus bereits gesammelten Daten und Einschätzungen des Radonpotentials von Gemeinden eine

höhere lokalere Auflösung erzielen.

Schlussendlich ist für die Verifikation der Aussagen die Auswertung der Innenraummessungen notwendig. In den beprobten Untergründen liegen die ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen in einem Bereich von 3 000–1 000 000 Bq/m³. Hingegen ist der maximal vorgeschlagene Grenzwert der WHO für Innenräume bei 300 Bq/m³ angesetzt. Somit übersteigen selbst die niedrigen Werte der gemessenen ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen diesen Grenzwert, wodurch grundsätzlich die Bedingung gegeben ist, diesen in Innenräumen zu überschreiten.

10.6. Ausblick

^{222}Rn hat einen ernstzunehmenden Einfluss auf die Gesundheit von Personen. Dieser Umstand wird auch durch die Art der Krankheit, den Lungenkrebs, deutlich. Treten bei einem Patienten Symptome von Lungenkrebs auf, ist die Wahrscheinlichkeit einer Heilung im Allgemeinen sehr gering. Dieser Umstand hebt die Bedeutsamkeit präventiver Maßnahmen hervor. Dazu gehören sowohl die Verringerung der Radon-Innenraumkonzentration bei bestehenden Gebäuden als auch die Beachtung einer entsprechenden Vorsorge bei zu errichtenden Bauten.

Bei Neubauten muss auf die Einhaltung des Grenzwertes für Innenraumkonzentrationen geachtet werden. Messungen und die Radonpotentialkarte geben dafür hilfreiche Informationen in Hinblick auf die Auswahl und die Planung der erforderlichen Maßnahmen. In Anbetracht der Privathaushalte ist vor allem ein Bewusstsein über Radon in der Bevölkerung zu schaffen, da im Endeffekt diese bei der Auffindung und Entgegenwirkung hoher ^{222}Rn -Innenraum-Aktivitätskonzentrationen relevant ist. Die dazu benötigte Unterstützung und Hilfestellung muss durch öffentliche Stellen erfolgen. Dabei stellen Bodengasmessungen und die Radonpotentialkarte die wichtigsten Anhaltspunkte dar, um die vorhandenen Mittel zielgerecht einzusetzen.

Innerhalb der europäischen Strahlenschutzrichtlinien wird unter anderem die Auffindung von Gebieten erhöhter ^{222}Rn -Innenraum-Aktivitätskonzentration durch die Ermittlung von ^{222}Rn -Aktivitätskonzentrationen in Innenräumen und Bodengas sowie weiterer relevanter Parameter gefordert. Die österreichische Radonpotentialkarte dient zur Umsetzung dieser Forderungen. Zur Zeit gibt die Radonpotentialkarte nur einen groben Überblick, da teilweise nur wenige Messungen in die Bestimmung eines Potentials eingeflossen ist. Allerdings muss die Radonpotentialkarte aufgrund ihrer Bedeutsamkeit zu einem aussagekräftigen Instrument entwickelt werden, um in Zukunft eine genauere und effizientere Auffindung von Regionen mit erhöhtem Radonpotential zu ermöglichen. Dazu ist es notwendig, die Ermittlung des Radonpotentials zu optimieren und die Messmethoden zu verbessern bzw. die Relevanz der verschiedenen Parameter zu untersuchen. Um dieses Ziel umsetzen zu können, sind die Erhebungen breiter Datensätze unumgänglich, was innerhalb des vorliegenden Projektes geschehen ist. Die Ergebnisse dieses Projektes sind richtungsweisend für weitere Studien und liefern essentielle Aussagen in Hinblick auf die Verbesserung der Radonpotentialkarte. Die Wichtigkeit dieser ist unbestritten, da das Radonpotential in direktem Zusammenhang mit dem Gesundheitsrisiko der Bevölkerung steht.

Literaturverzeichnis

- [1] Maringer et al. Ermittlung der aktuellen Häufigkeitsverteilung der natürlichen Strahlenexposition der österreichischen Bevölkerung, 2012. Endbericht. Auftraggeber Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Abt. V/ 7-Strahlenschutz (2012) (in German).
- [2] World Health Organization. WHO Handbook on Indoor Radon - A Public Health Perspective. World Health Organization. (2009) ISBN-978-9-241-54767-3.
- [3] ICRP. International Commission on Radiological Protection Statement on Radon. ICRPRef 00/902/09. ICRP (2009).
- [4] Friedmann, H. et al. Das österreichische nationale Radonprojekt - ÖNRAP, Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft. Umwelt und Wasserwirtschaft (2007) (in German).
- [5] Dr. Wolfgang Ringer, Radonvollerhebung in den Gemeinden Reichenau, Haubach und Ottenschlag i.M., Austrian Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management, Stubenring 1, 1010 Vienna, Austria, http://www.bmlfuw.gv.at/dms/lmat/umwelt/strahlenatom/strahlenschutz/radon/radonmessung/Expertenbericht_Radonvollerhebung_Reichenau_finalb.pdf (in German) (Zugriff: April 2014).
- [6] Seidel, C. et al. Soil gas radon measurements in a region of the Bohemian Massif: investigations in the framework of an Austrian pilot study. *Radiat. Protect.* 145(2-3), 329-332 (2011).
- [7] Austrian Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management. <http://www.radon.gv.at/radonsuche.html> (2010). (Zugriff: April 2014).
- [8] Damkjaer, A. and Korsbech, U. A small-diameter probe for in situ measurements of gas permeability of soils. *Radiat. Prot. Dosim.* 45, 85-89 (1992).
- [9] Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Landesamtsdirektion. Referat Kommunikation Land Steiermark. <http://www.gis.steiermark.at/>. (Zugriff: April 2014).
- [10] Maringer, F. J., Heiss, G. and Jung, M. Ermittlung des lokalen Radonpotentials aus geogenen Faktoren mittels eines geografischen Informationssystems und in-situ Bodenluftmessungen - Pilotstudie (ELORA). Endbericht, Arsenal Research (2000) (in German).

- [11] Maringer, F. J., Heiss, G., Jung, M., Futschnik, A., Friedmann, H. and Bossew, P. A new combined geostatistical and empirical method for assessing the value and the geographical distribution of the radon availability in soil. In: Proceeding of the Third Eurosymposium on Project Against Radon, Liège, 10 and 11 May 2001, AIM, Univ. of Liège, Belgium, pp. 143-148 (2001).
- [12] Kemski, J., Klingel, R. and Siehl, A. Das geogene radonpotential. In: Umweltradioaktivität. S. Reihe Geologie und Ökologie im Kontext. Siehl, A. (Hrsg.). Ernst & Sohn. Berlin, pp. 179-222 (1996) (in German).
- [Baumgartner 2006] Baumgartner A., Entwicklung und Evaluierung messtechnischer Methoden zur Untersuchung und Bewertung der Rn-222 Aktivitätskonzentrationen in Bodenluft, Diplomarbeit ausgeführt am Atominstitut der Österreichischen Universitäten (2006)
- [Bethge Walter Wiedemann 2008] Bethge K., Walter G., Wiedemann B., Kernphysik eine Einführung, 3. aktualis. u. erw. Auflage, London: Springer (2008), ISBN: 978-3-540-74566-2
- [Bevelacqua 2010] Bevelacqua J.J., Basic Health Physics, 2. aktualis. u. erw. Auflage, New York: Wiley (2010), ISBN: 978-3-527-40823-8
- [BFS 2014] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Bundesrepublik Deutschland, http://www.bfs.de/de/ion/wirkungen/akut_strahlenschaeden.html, <http://www.bfs.de/de/ion/wirkungen/leukaemie.html>, http://www.bfs.de/de/ion/wirkungen/gen_schaeden.html, <http://www.bfs.de/de/ion/wirkungen/unfallfolgen.html> (2014)
- [Darby et al. 2004] Darby S., Hill D., Auvinen A., Barros-Dios J.M., Baysson H., Bochicchio F., Deo H., Falk R., Forastiere F., Hakama M., Heid I., Kreienbrock L., Kreuzer M., Lagarde F., Mäkeläinen I., Muirhead C., Oberaigner W., Pershagen G., Ruano-Ravina A., Ruosteenoja E., Schaffrath Rosario A., Tirmarche M., Tomášek L., Whitley E., Wichmann H.E., Doll R., Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies, BMJ, doi:10.1136/bmj.38308.477650.63 (published 21 December 2004)
- [Demtröder 2005] Demtröder W., Experimentalphysik 3 - Atome, Moleküle und Festkörper, 3. überarb. Aufl., Berlin: Springer DE (2005) ISBN: 978-3-540-21473-1
- [Demtröder 2010] Demtröder W., Experimentalphysik 4 - Kern-, Teilchen- und Astrophysik, Berlin: Springer DE (2010) ISBN: 978-3-642-01598-4
- [Euratom 1996] Euratom - Der Rat der europäischen Union, RICHTLINIE 96/29/EURATOM DES RATES vom 13. Mai 1996 zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlungen, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31996L0029&qid=1396265617876&from=EN> (1996)

- [Euratom 2013] Euratom - Der Rat der europäischen Union, RICHTLINIE 2013/59/EURATOM DES RATES vom 5. Dezember 2013 zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung und zur Aufhebung der Richtlinien 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom und 2003/122/Euratom, http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2014.013.01.0001.01.ENG (2013)
- [Fass 2004] Fass T., Radon- und Thoron-Messungen über einem Quarzgang im Randbereich des Steinwald-Granites südlich Fuchsmühl im Steinwald. Diplomarbeit Universität Bonn, http://www.unibonn.de/uzsadb/priv_hp/Diplomarbeit.pdf (Zugriff: 3.5.2004).
- [Friedmann ÖNRAP] Friedmann H., Das österreichische nationale Radonprojekt-ÖNRAP - Projekt-Endbericht, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Stubenring 1, 1012 Wien
- [Friedmann 2013] Friedmann H., Universität Wien Isotopenforschung und Kernphysik, Währinger Str. 17 1090 Wien http://homepage.univie.ac.at/harry.friedmann/Radon/j_mittel.gif (Zugriff: 5.11.2013)
- [GIS-STMK 2014] GIS Steiermark, Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Landesamtsdirektion, <http://www.gis.steiermark.at/cms/ziel/50190666/DE/> (Zugriff: 8.4.2014)
- [Gruber 2004] Gruber V., Untersuchung und Evaluierung der geogenen Radon-Aktivitätskonzentration in eiszeitlich-glazialen Ablagerungen in Oberösterreich, Diplomarbeit ausgeführt am Atominstitut der Österreichischen Universitäten (2004)
- [ICRP 2007] ICRP, Die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) von 2007, Deutsche Ausgabe, Bundesamt für Strahlenschutz (2007), urn:nbn:de:0221-2009082154, http://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-2009082154/1/BfS_2009_BfS-SCHR-47-09.pdf
- [Kemski et al. 1996] Kemski J., Klingel R., Siehl A., Das geogene Radon-Potential. In: Siehl, A. (Hrsg.) Umweltradioaktivität. S. 179-222. Reihe Geologie und Ökologie im Kontext, Berlin: Ernst & Sohn (1996)
- [Kemski et al. 2011] Kemski J., Klingel R., Siehl A., Neznal M., Matolin M., Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz - Erarbeitung fachlicher Grundlagen zur Beurteilung der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Messmethoden zur Bestimmung der Radonbodenluftkonzentration - Vorhaben 3609S10003 - Bd. 1 Abschlussbericht, 38201 Salzgitter: Bundesamt für Strahlenschutz (2011) urn:nbn:de:0221-201203237824
- [Kemski et al. 2013] Kemski & Partner Beratende Geologen, <http://www.radon-info.de/shtml/verhalten.shtml> (Zugriff: 09.07.2013)

- [Krieger 2007] Krieger H., Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes, 2. Aufl. 2007. überarb. u. erw., Wiesbaden: Teubner (2007) ISBN:978-3-8351-0199-9
- [Maringer et al. 2000] Maringer, F. J., Heiss, G. and Jung, M. Ermittlung des lokalen Radonpotentials aus geogenen Faktoren mittels eines geografischen Informationssystems und in-situ Bodenluftmessungen - Pilotstudie (ELORA). Endbericht, Arsenal Research (2000) (in German).
- [Maringer et al. 2001] Maringer, F. J., Heiss, G., Jung, M., Futschnik, A., Friedmann, H. and Bossew, P. A new combined geostatistical and empirical method for assessing the value and the geographical distribution of the radon availability in soil. In: Proceeding of the Third Eurosymposium on Project Against Radon, Liège, 10 and 11 May 2001, AIM, Univ. of Liège, Belgium, pp. 143-148 (2001).
- [Maringer 2011] Maringer F.J., Strahlenphysikalische und gesellschaftliche Aspekte des Strahlenschutzes, Skriptum zur Vorlesung (2011)
- [Maringer et al. 2012] Baumgartner A., Maringer F.J., Preinerstorfer A., Rechberger F., Schuff M., Seidel C., Stietka M., Ermittlung der aktuellen Häufigkeitsverteilung der natürlichen Strahlenexposition der österreichischen Bevölkerung, 2012. Endbericht, Auftraggeber Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Abt. V/7-Strahlenschutz (2012)
- [Matthias 2010] Matthias M., Wikipedia (2010), http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Isotopentabelle_Segre.svg
- [ÖNORM S 5280] ÖNORM S 5280, Radon - Messverfahren und deren Anwendungsbereiche (2008)
- [ÖNORM A 6601] ÖNORM A 6601, Strahlenschutz - Benennung und Definition für ionisierende Strahlung, (2011)
- [Pajs 2007] Pajs, Wikipedia (2007), http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Urano-va_rada.svg
- [Reudenbach 2013] Reudenbach C., Philipps-Universität Marburg, Abteilung GIS, Fachbereich Geographie http://gisbsc.gis-ma.org/GISBScL7/de/html/VL7a_V_lo7.html (Zugriff: 28.10.2013)
- [Ringer 2011] Baumgartner Alexander, Baumgartner Andreas, Bernreiter M., Edtstadler T., Friedmann H., Gräser J., Kaineder H., Kolmer C., Maringer F.J., Ringer W., Seiberl J., Seidel C., Sperker S., Waslmeier M., Wurm G., Radonvollerhebung in den Gemeinden Reichenau, Haibach und Ottenschlag i.M., Redaktion Dr. Wolfgang Ringer Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungswissicherheit (AGES), Österreichische Fachstelle für Radon, Linz (2011)

- [Seidel 2011] Seidel C., Baumgartner A., Ringer W., Gräser J., Friedmann H., Kaineder H., Maringer F.J., Soil Gas Radon Measurements in a Region of the Bohemian Massif: Investigations in the Framework of an Austrian Pilot Study, Radiation Protection Dosimetry Advance Access published April 16, (2011) doi:10.1093/rpd/ncr089
- [Streli 2011] Streli C., Unterlagen zur Lehrveranstaltung Strahlenphysik, Technische Universität Wien - Atominstitut Stadionallee 2, 1020 Wien (2011)
- [Turner 2007] Turner J.E., Atoms, Radiation, and Radiation Protection, Weinheim: WILEY-VCH (2007), ISBN: 978-3-527-40606-7
- [WHO 2009] World Health Organisation, Who Handbook on Indoor Radon - A Public Health Perspective, 1. Aufl., Geneva, Switzerland (2009) ISBN:978-9-241-54767-3.

Teil IV.

Anhang

A. Präsentationsfolien des Kongresses in Prag

Radon Soil Gas Measurements in a geological versatile Region as Basis to improve the Prediction of Areas with a high Radon Potential



Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources
and Life Sciences, Vienna

Franz Kabrt^{1,2}, Claudia Seidel¹, Andreas Baumgartner¹, Harry Friedmann³, Fabian Rechberger¹, Michael Schuff¹, Franz Josef Maringer^{1,2,4}
¹BOKU - University of Natural Resources and Life Sciences Vienna, LLC-Laboratory Arsenal, Faradaygasse 3, Arsenal 214, 1030 Vienna, Austria
²Vienna University of Technology, Karlsplatz 13 1040 Vienna, Austria
³University of Vienna, Währingerstraße 17, Nuclear Physics, 1090 Vienna, Austria
⁴BEV - Federal Office of Metrology and Surveying, Artlgasse 35, 1160 Vienna, Austria

Funded by the Austrian Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management, BMLFUW-UW 1.1.10/0080-V/7/2013



ÖNRAP-Project



Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources
and Life Sciences, Vienna

- The Austrian national Radon Project
- Over 40 000 indoor measurements 1994 – 2003
- Regularly new data integrated
- Introduction of the radon potential: the expected value of the year's mean ²²²Rn activity concentration in a living space in the ground floor

Franz Kabrt



Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources
and Life Sciences, Vienna

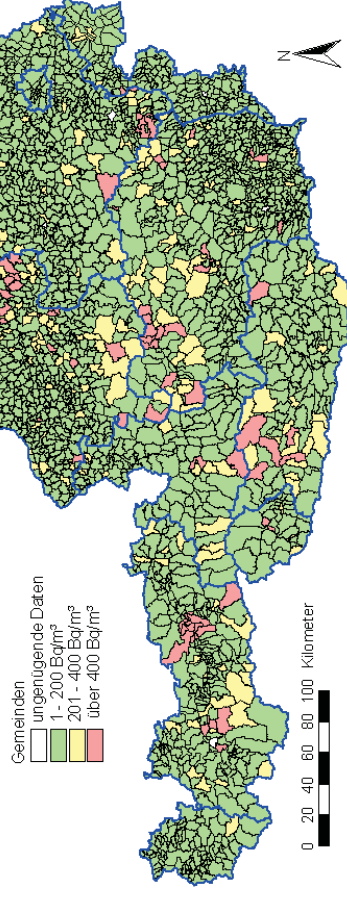
- Birthdate: 27.09.1985
- Current academic studies: Technical Physics at the Vienna University of Technology
- Master Thesis about the presentation's topic at the Low Level Counting Laboratory Arsenal under supervision of Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Franz Josef Maringer
- Contact: franz.kabrt@mailz.at

ÖNRAP-Project



Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources
and Life Sciences, Vienna

Jahresmittel - Annual Mean



Pilot-Project

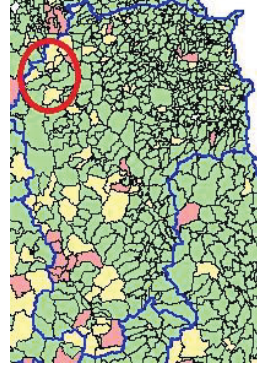
- LLC-Laboratory Arsenal, BOKU - University of Natural Resources and Life Sciences Vienna
- University of Vienna, Nuclear Physics
- Austrian Agency for Health and Food Safety

5.09.2012

Kabrt – ²²²Rn in soil gas

5

Investigation Area



5.09.2012

Kabrt – ²²²Rn in soil gas

7

Pilot-Project

- Measurements in three Municipals in Upper Austria in the Bohemian Massif
- All relevant ²²²Rn data were investigated by same methods as in current project, described later in presentation
- Good overview over the area with ²²²Rn soil gas activity measurements regarding the radon potential
- Aim: to predict an area's radon potential by imperfect data
- "Hot spots" could be found

5.09.2012

Kabrt – ²²²Rn in soil gas

6

Material and Methods

- 100 sites with three probes each
- Soil gas extraction by 200 ml syringe
- First 200 ml refused



5.09.2012

Kabrt – ²²²Rn in soil gas

8

Material and Methods

- Afterwards 150 ml injected in Alphaguards
- Result multiplied with calibration factor



5.09.2012

Kabrt – ²²²Rn in soil gas

9

Material and Methods

- Pump
- Flow measuring device
- Manometer

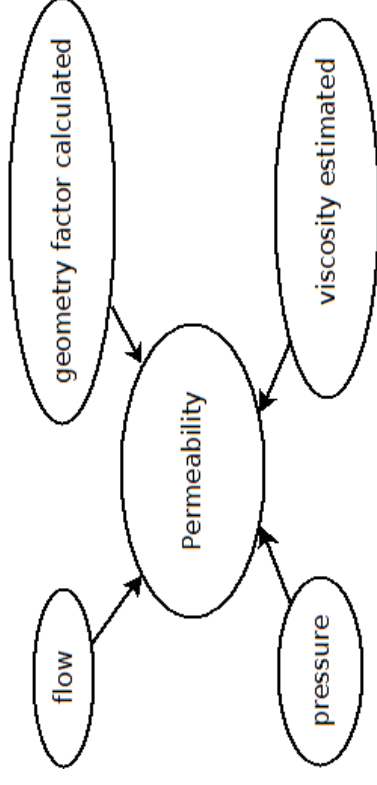


5.09.2012

Kabrt – ²²²Rn in soil gas

11

Material and Methods



5.09.2012

Kabrt – ²²²Rn in soil gas

10

Material and Methods

- Radon Jok by Radon v.o.s
- Flow by time needed to fill the sack with known volume
- Pressure by amount of attached weights to the sack



5.09.2012

Kabrt – ²²²Rn in soil gas

12

Material and Methods

- Local dose rate
- 100 cm over ground
- Mean value of 5 minutes

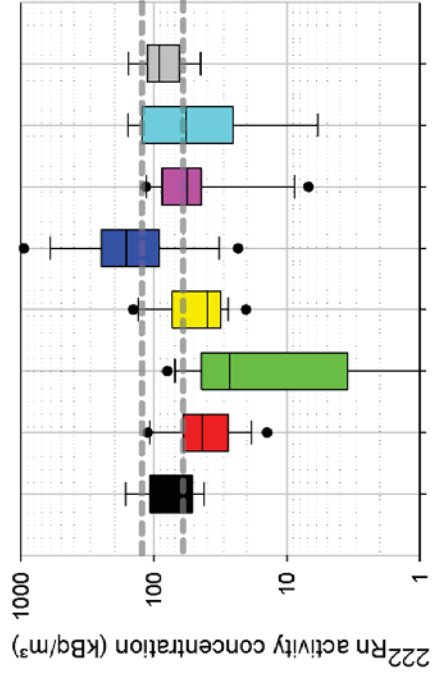


05.09.2013

Kabrt – ²²²Rn in soil gas

13

Results - ²²²Rn activity concentration



Categorized with boundaries
at 60 and 120 kBq/m³ by
ELORA

5.09.2012

Kabrt – ²²²Rn in soil gas

15

Material and Methods

- Soil samples
- Up to 100 cm depth
- Analysis of ²²⁶Radium and ²³⁸Uranium

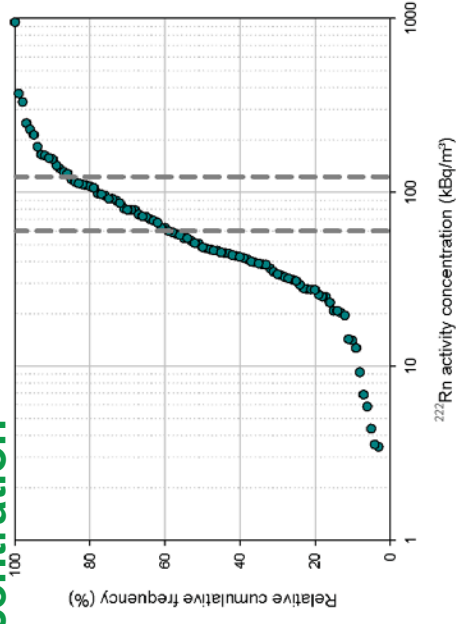


05.09.2013

Kabrt – ²²²Rn in soil gas

14

Results - ²²²Rn activity concentration

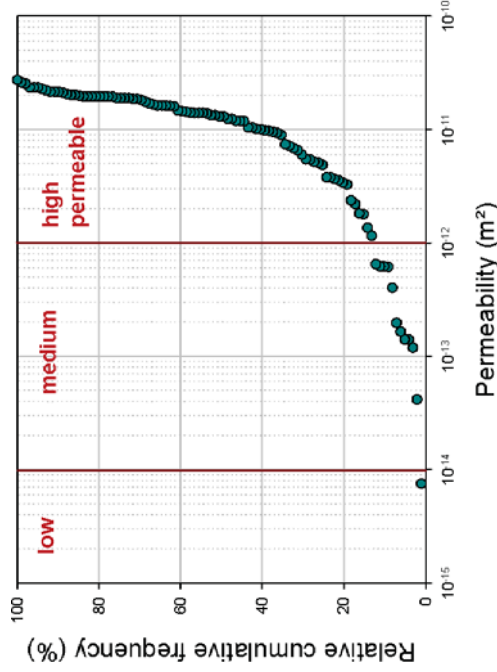


5.09.2012

Kabrt – ²²²Rn in soil gas

16

Results – soil permeability



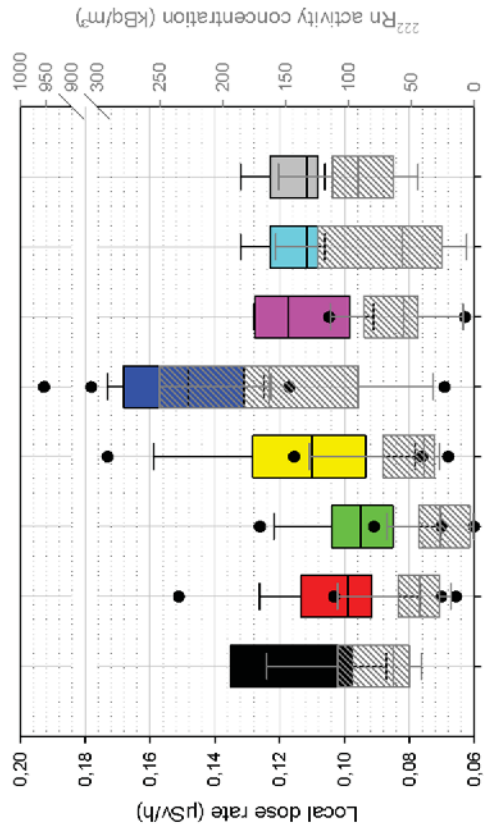
Categorized with boundaries at 10⁻¹⁴ and 10⁻¹² m² by Kemski

5.09.2012

Kabrt – ²²²Rn in soil gas

17

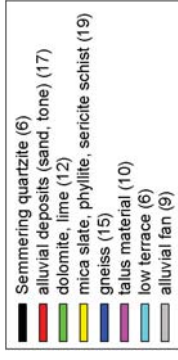
Results – local dose rate



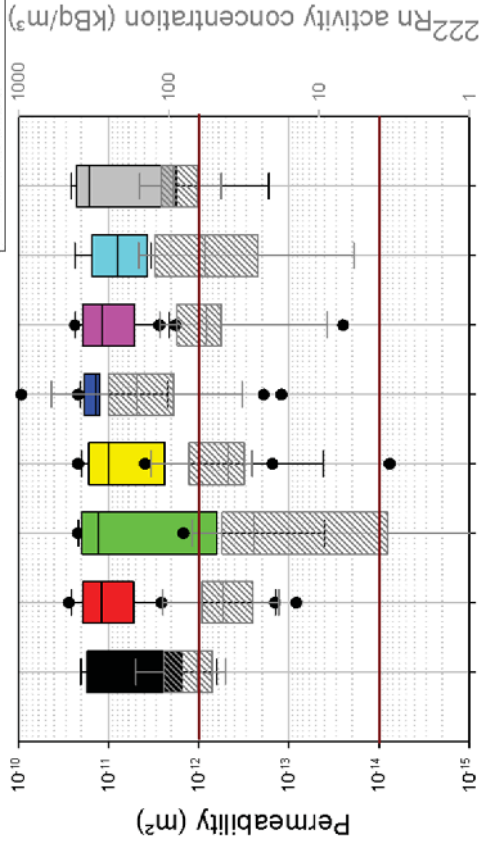
5.09.2012

Kabrt – ²²²Rn in soil gas

19



Results – soil permeability



5.09.2012

Kabrt – ²²²Rn in soil gas

18

Discussion and Outlook

- A high diversity within one geological unit hardens prediction
- Measurements of soil activity concentration in certain areas reasonable for good prediction
- A good overview of area with soil gas measurements
- Data will be investigated and correlated with indoor measurements from AGES

5.09.2012

Kabrt – ²²²Rn in soil gas

20

The End

Thank you for your attention



Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources
and Life Sciences, Vienna

B. Kalibrierfaktor

Tabelle B.1.: Details zur Berechnung des Kalibrierfaktors für 150 ml.

ml	a_{222Rn} (Bq/m ³)	±	°C	mbar	a_{222Rn} (Bq/m ³)	±	°C	mbar	a_{222Rn} (Bq/m ³)	±	°C	mbar	a_{222Rn} (Bq/m ³)	±	°C	mbar
100	49	29	23	996	318	62	24	996	405	75	24	996	408	74	24	996
150	< 37		24	996	379	72	24	996	545	87	24	996	560	90	24	996
150	47	44	25	996	381	75	25	996	773	106	25	996	829	119	25	996
100	< 50		25	995	145	58	25	996	537	94	25	996	615	101	25	996
100	57	50	25	995	388	78	25	995	496	94	25	995	449	88	24	995
150	97	53	24	996	523	92	24	996	675	102	24	996	727	110	24	996
100	< 26		23	1002	167	48	22	1002	329	65	22	1002	289	63	22	1002
150	48	38	22	1002	295	64	22	1002	477	80	22	1002	417	77	22	1002
150	50	36	28	1001	251	59	26	1001	484	83	25	1001	398	75	24	1000
100	53	43	24	1000	75	44	24	1000	262	63	24	1000	280	65	24	1000
100	50	41	24	1000					325	72	24	1000	364	72	24	1000
150	64	43	24	1000					432	77	24	1000	408	77	24	1000
150	< 42		24	1000	149	58	24	999	602	92	24	999	574	92	24	999
100	< 43		24	999	173	62	24	999	437	84	24	999	396	78	24	999
100	< 43		159	48	23	999	251	63	23	999	240	58	23	999	10	112
150	41	36	24	999	222	56	24	999	372	75	24	999	398	74	24	999

C. Vergleich der verschieden feinen Geologieeinteilungen

Tabelle C.1.: Mittelwerte, Standardabweichung und Unsicherheiten der feinen Geologie.

Geologie fein zusammengefasst	²²² Radon (kBq/m ³)	± (kBq/m ³)	± (%)
Semmering Quarzit (6)	80,1	40,8	51
Schwemmfächer (9)	92,3	32,2	35
Niederterasse (6)	70,5	51,2	73
Hangschutt (10)	61,3	31,4	51
Grobgneis, Mikroklingneis (15)	219,0	218,8	100
Glimmerschiefer, Phyllit, Serizitschiefer (19)	52,8	33,0	62
Dolomit, Kalk, Rauhwanke (12)	24,4	22,9	94
Auzonen/ Alluvialterasse (Sand, Ton) (17)	48,1	26,9	56

Tabelle C.2.: Mittelwerte, Standardabweichung und Unsicherheiten der mittleren Geologie.

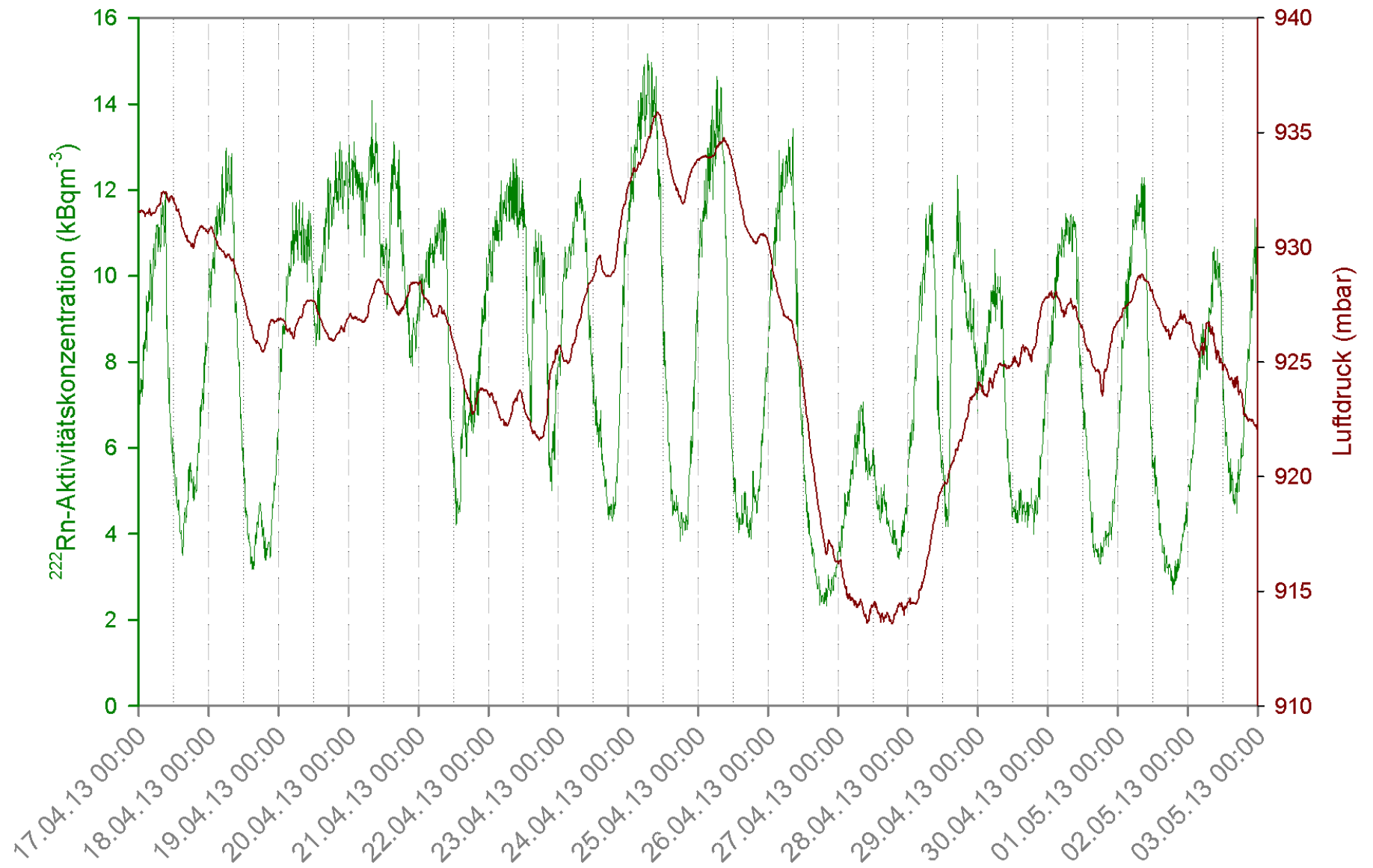
Geologie mittel	²²² Radon (kBq/m ³)	± (kBq/m ³)	± (%)
Wechselschiefer (4)	47,1	16,3	35
Silbersbergschichten, Gerichtsgrabengruppe, Kalwanger (2)	24,2	5,7	24
Semmeringquarzit, Plattlquarzit, Alpiner Verrucano, Rannachformation / Graphitkarbon; Karbon (3)	48,0	29,1	61
Semmeringquarzit, Lantschfeldquarzit (3)	82,4	58,5	71
Schwemmkegel (3)	87,4	5,7	7
RoÄYkogelporphyrroid; Perm (4)	57,9	8,2	14
Paragneis i. a., Plagioklasgneis (1)	47,2		
Niederterasse, Eisrandterrassen (3)	34,4	6,8	20
Kapellener Schiefer, Kalk und Dolomit, Gutensteiner Basisserie (10)	26,1	16,0	61
Inneralpines Jungtertiär (9)	75,2	42,1	56
Höhere Terrasse; Präwürm (1)	69,0		
Birkfelder Quarzphyllit, Mürztaler Quarzphyllit (19)	81,4	47,7	59
Augengneis i. a., Grobgneis, Weißstein (19)	283,1	239,2	84
Alluvialer Talboden, Kolluvien (28)	46,7	25,7	55

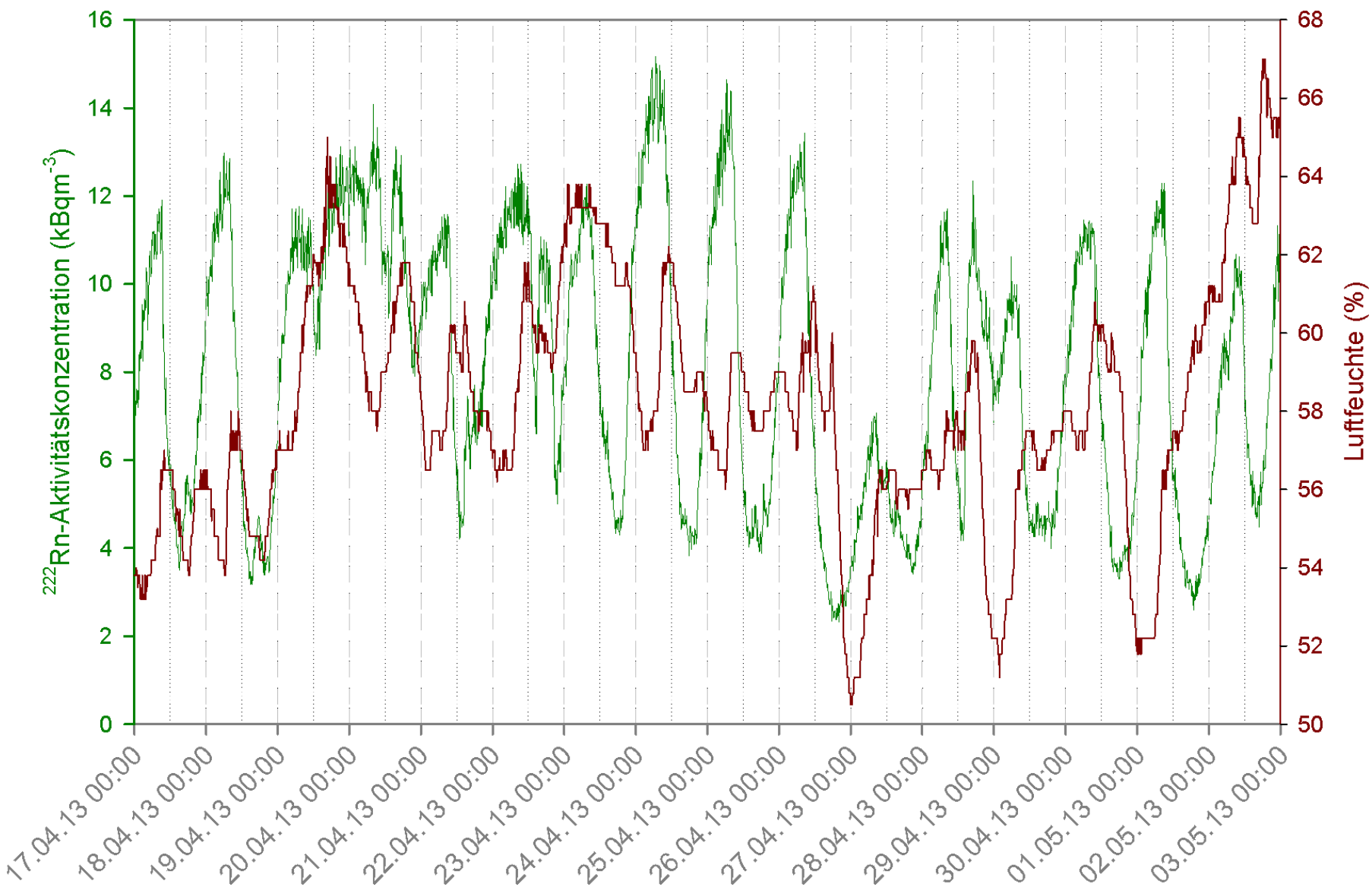
Tabelle C.3.: Mittelwerte, Standardabweichung und Unsicherheiten der groben Geologie.

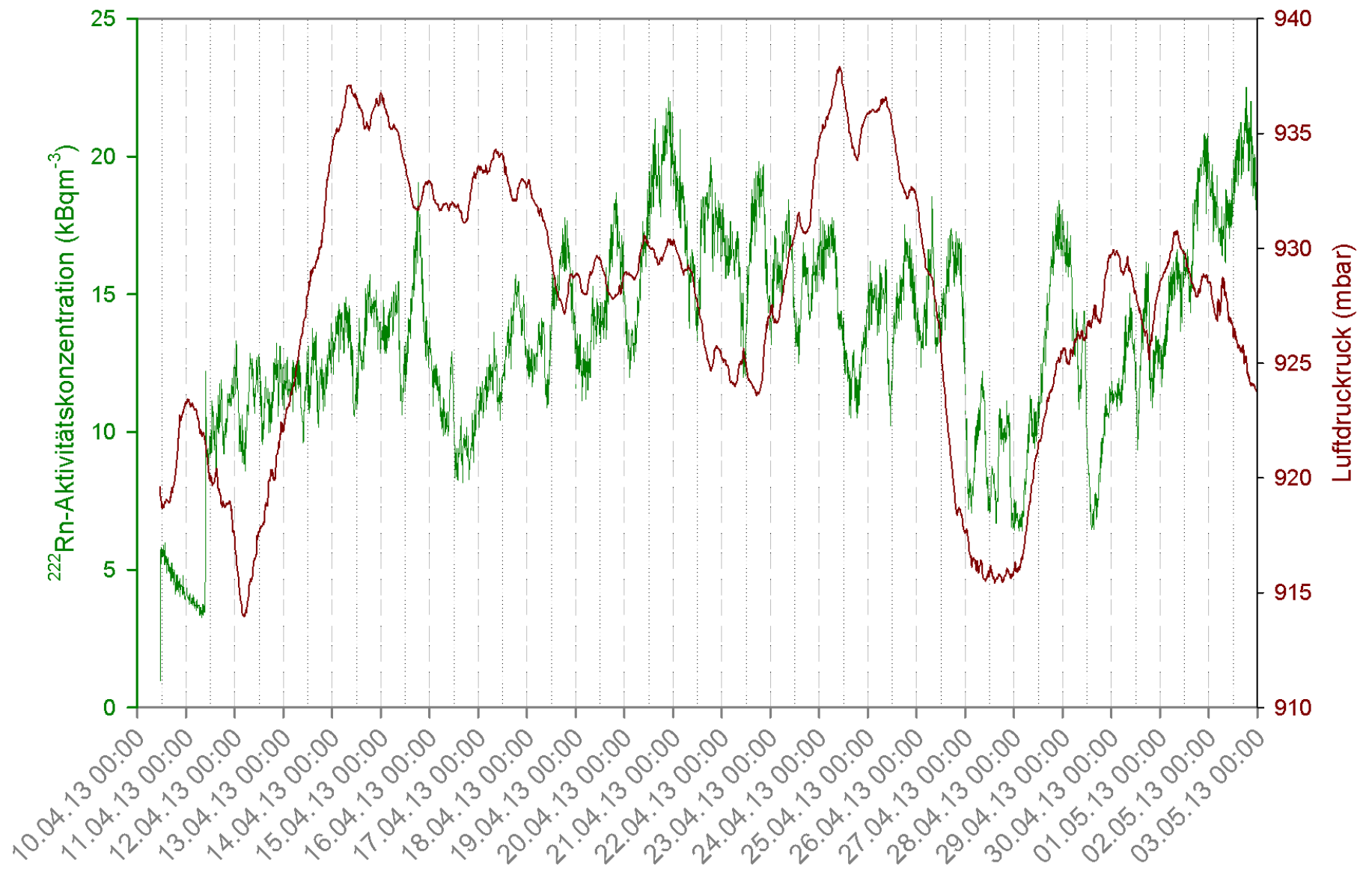
Geologie grob	²²² Radon (kBq/m ³)	± (kBq/m ³)	± (%)
Überwiegend Karbonatgestein, Mitteltrias - Jura (18)	46,1	31,3	68
Siliciklastika, Permoskyth (2)	55,3	34,4	62
Quartär i. a. (Alluvium, Pleistozän entl. der Flüsse und Moränen im Alpenvorland) (34)	65,6	47,9	73
Porphyroid, Permian (5)	53,7	11,2	21
Phyllit, Metaklastika, Metavulkanit (Grauwackenzone / Silbersberg - Decke) (1)	28,0		
Karbonatgestein, Klastika (Grauwackenzone / Veitscher Decke), oberes Vise (1)	110,0		
Inneralpine Becken, Neogen - Molasse - Zone (4)	86,7	20,3	23
Granitoid, Permokarbon (14)	205,0	236,8	115
Altkristallin i. a. (meist Paragneis, Glimmerschiefer, lok. auch Granatphyllit) (21)	55,5	22,4	40

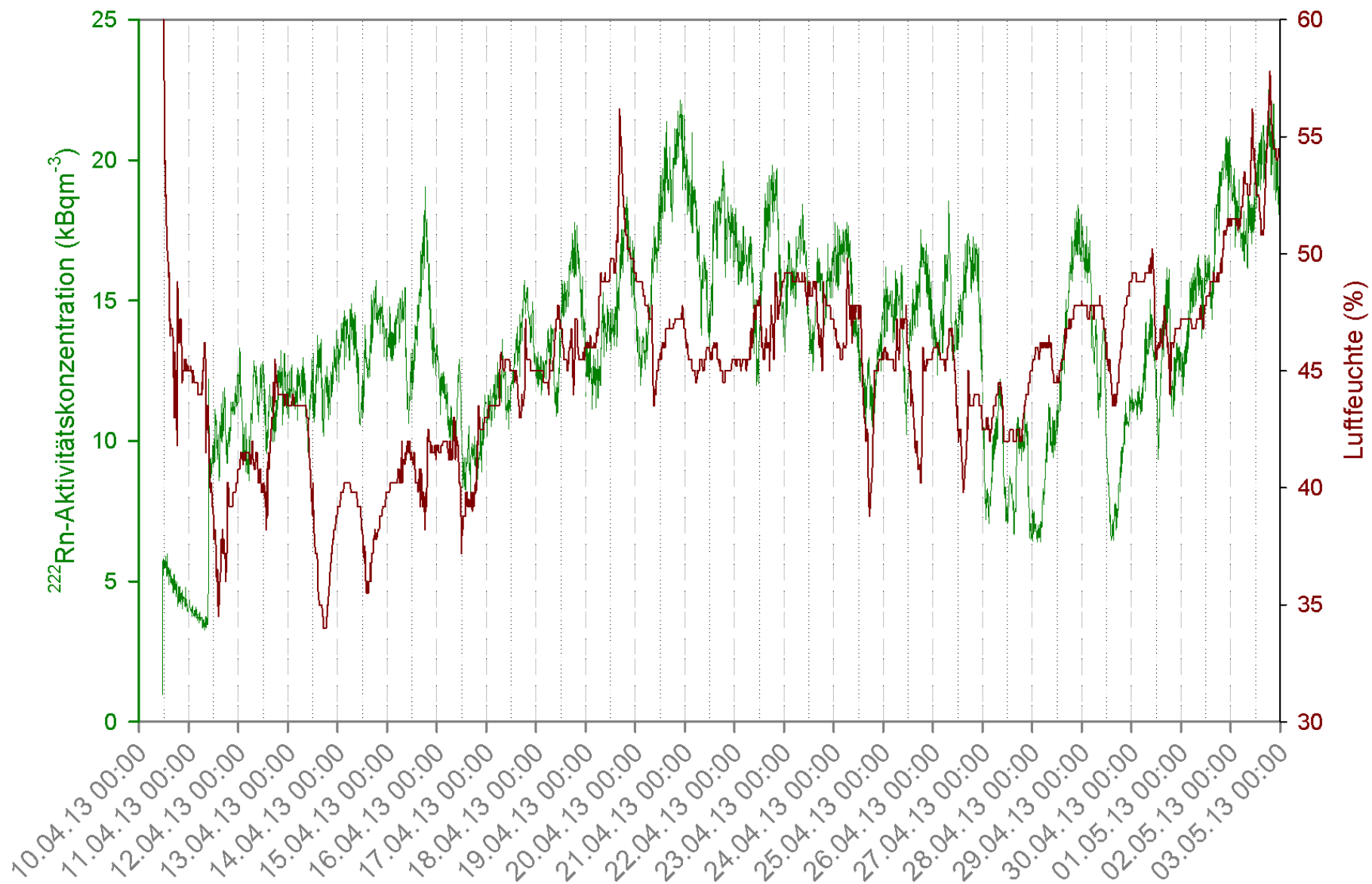
D. Diagramme der Langzeitmessungen

Abbildung D.1.: Zeitliche Verlauf der ^{222}Rn Radon-Aktivitätskonzentration und der Luftfeuchtigkeit an Messort 40.

Abbildung D.2.: Zeitliche Verlauf der ^{222}Rn -Radon-Aktivitätskonzentration und des Luftdruckes an Messort 42.

Abbildung D.3.: Zeitlicher Verlauf der ^{222}Rn -Radon-Aktivitätskonzentration und der Luftfeuchtigkeit an Messort 42.

Abbildung D.4.: Zeitliche Verlauf der ^{222}Rn -Radon-Aktivitätskonzentration und des Luftdruckes an Messort 43.

Abbildung D.5.: Zeitliche Verlauf der ^{222}Rn -Radon-Aktivitätskonzentration und der Luftfeuchtigkeit an Messort 43.

E. Detaillierte Daten der Einzelmessungen

Tabelle E.1.: Detaillierte Daten von Standort 1.

Standort 1									
Koordinaten (GK M31) (GK M31)		180171 274373							
Seehöhe (m)		1105							
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,148							
Geologischer Untergrund		Grogneis (granitischer Augengneis)							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korregiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	-	-	-	1,28	1,06	-	-	-	-
Sonde 2	119	4	2E-11	1,32	1,00	119	4	119	4
Sonde 3	-	-	-	1,28	1,06	-	-	-	-
Mittelwert	119	4	2E-11			119	4	119	4

Tabelle E.2.: Detaillierte Daten von Standort 2.

Standort 2									
Koordinaten (GK M31) (GK M31)		178027 273829							
Seehöhe (m)		965							
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,173							
Geologischer Untergrund		Gneisiger bis quarzitischer Glimmerschiefer, tw. Biotit führend							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korregiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	55	6	2E-11	1,35	1,00	55	6	55	6
Sonde 2	38	3	2E-11	1,41	1,00	38	3	38	3
Sonde 3	24	2	2E-11	1,46	1,00	24	2	A	2
Mittelwert	39	14	2E-11			39	14	46	17

Tabelle E.3.: Detaillierte Daten von Standort 3.

Standort 3									
Koordinaten (GK M31) (GK M31)		172878							
		281634							
Seehöhe (m)		707							
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,088							
Geologischer Untergrund			Rauhwanke						
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	-	-	6E-15	1,32	1,00	-	-	-	-
Sonde 2	-	-	6E-15	1,34	1,00	-	-	-	-
Sonde 3	45	3	6E-13	1,37	1,00	45	3	45	3
Mittelwert	45	3	2E-13			45	3	45	3

Tabelle E.4.: Detaillierte Daten von Standort 4.

Standort 4									
Koordinaten (GK M31)		175259							
		276994							
Seehöhe (m)		791							
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,128							
Geologischer Untergrund			Hangschutt (Semmering-Quarzit, Glimmerschiefer)						
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	33	4	5E-12	0,88	1,37	45	4	45	4
Sonde 2	62	4	1E-11	0,95	1,30	80	4	80	4
Sonde 3	14	2	1E-11	1,25	1,07	15	2	A	2
Mittelwert	36	19	9E-12			47	26	63	32

Tabelle E.5.: Detaillierte Daten von Standort 5.

Standort 5									
Koordinaten (GK M31)		181075 270275							
Seehöhe (m)		1605							
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,130							
Geologischer Untergrund		Grobgneis (granitischer Augengneis)							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	129	12	7E-14	0,97	1,28	165	12	165	12
Sonde 2	282	13	1E-13	1,07	1,19	336	13	336	13
Sonde 3	39	4	2E-13	1,13	1,15	45	4	A	4
Mittelwert	150	96	1E-13			182	113	251	159

Tabelle E.6.: Detaillierte Daten von Standort 6.

Standort 6									
Koordinaten (GK M31)		174618 271571							
Seehöhe (m)		819							
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,126							
Geologischer Untergrund		Phyllitischer bis phyllonitischer Glimmerschiefer							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	31	4	1E-11	1,36	1,00	31	4	31	4
Sonde 2	46	3	1E-11	1,18	1,12	52	3	52	3
Sonde 3	33	3	1E-11	1,38	1,00	33	3	33	3
Mittelwert	37	9	1E-11			39	10	39	10

Tabelle E.7.: Detaillierte Daten von Standort 7.

Standort 7									
Koordinaten (GK M31)	170968								
	268845								
Seehöhe (m)	791								
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)	0,070								
Geologischer Untergrund	Heller Dolomit (gebankt teilweise massig)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	12	2	2E-11	1,43	1,00	12	2	12	2
Sonde 2	39	3	1E-11	1,39	1,00	39	3	39	3
Sonde 3	12	2	2E-11	1,37	1,00	12	2	12	2
Mittelwert	21	13	2E-11			21	13	21	13

Tabelle E.8.: Detaillierte Daten von Standort 8.

Standort 8									
Koordinaten (GK M31)	172667								
	271704								
Seehöhe (m)	797								
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)	0,079								
Geologischer Untergrund	Schutt auf Hochterrasse (unterhalb von Kalk, Dolomit, vereinzelt Glimmerschiefer)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	27	4	1E-11	1,42	1,00	27	4	27	4
Sonde 2	46	4	1E-12	1,39	1,00	46	4	46	4
Sonde 3	22	2	9E-14	1,40	1,00	22	2	22	2
Mittelwert	31	11	4E-12			31	11	31	11

Tabelle E.9.: Detaillierte Daten von Standort 9.

Standort 9									
Koordinaten (GK M31)		172266 274110							
Seehöhe (m)		812							
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,108							
Geologischer Untergrund		Phyllitischer bis phyllonitischer Glimmerschiefer							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	25	3	2E-11	1,16	1,13	29	3	29	3
Sonde 2	61	4	2E-11	1,19	1,11	67	4	67	4
Sonde 3	28	2	1E-11	1,06	1,20	34	2	34	2
Mittelwert	38	16	2E-11			43	17	43	17

Tabelle E.10.: Detaillierte Daten von Standort 10.

Standort 10									
Koordinaten (GK M31)		170081 275056							
Seehöhe (m)		1046							
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,097							
Geologischer Untergrund		Heller Kalk und Dolomit, teilweise Rauhwaacke (ungegliedert)							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	24	3	1E-11	0,67	1,69	41	3	41	3
Sonde 2	30	3	2E-11	1,25	1,07	33	3	33	3
Sonde 3	18	2	2E-11	1,27	1,06	20	2	A	2
Mittelwert	24	7	2E-11			31	10	37	9

Tabelle E.11.: Detaillierte Daten von Standort 11.

Standort 11									
Koordinaten (GK M31)	169993 275454								
Seehöhe (m)	1110								
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)	0,118								
Geologischer Untergrund	Alpiner Verrucano- Roßkogelporphyrroid								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korregiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	49	5	2E-11	1,23	1,09	54	5	54	5
Sonde 2	42	3	2E-11	1,35	1,00	42	3	42	3
Sonde 3	23	2	2E-11	1,47	1,00	23	2	A	2
Mittelwert	38	12	2E-11			40	13	48	13

Tabelle E.12.: Detaillierte Daten von Standort 12.

Standort 12									
Koordinaten (GK M31)	167985 276090								
Seehöhe (m)	1113								
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)	0,135								
Geologischer Untergrund	Semmering-Quarzit, Lantschfeldquarzit, Alpiner Verrucano								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korregiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	39	4	2E-11	1,46	1,00	39	4	39	4
Sonde 2	70	5	2E-11	1,39	1,00	70	5	70	5
Sonde 3	23	3	9E-12	1,46	1,00	23	3	A	3
Mittelwert	44	20	2E-11			44	20	55	29

Tabelle E.13.: Detaillierte Daten von Standort 13.

Standort 13									
Koordinaten (GK M31)		175450 282295							
Seehöhe (m)		791							
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,104							
Geologischer Untergrund		Heller Dolomit (gebant, tw. massig)							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	3	1	7E-13	0,89	1,36	4	1	4	1
Sonde 2	2	0	7E-13	0,85	1,41	2	0	2	0
Sonde 3	2	1	6E-13	0,55	2,15	4	1	4	1
Mittelwert	2	2	7E-13			3	2	3	2

Tabelle E.14.: Detaillierte Daten von Standort 14.

Standort 14									
Koordinaten (GK M31)		179475 284405							
Seehöhe (m)		1123							
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,087							
Geologischer Untergrund		Serizitphyllit der Silbersberg-Gruppe, tw. quarzitisch (Norische Decke)							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	-	-	-	1,33	1,00	-	-	-	-
Sonde 2	26	2	8E-15	1,30	1,05	27	2	27	2
Sonde 3	13	2	7E-15	1,35	1,00	13	2	13	2
Mittelwert	20	12	8E-15			20	14	20	14

Tabelle E.15.: Detaillierte Daten von Standort 15.

Standort 15									
Koordinaten (GK M31)	178803								
	283398								
Seehöhe (m)	1058								
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)	0,104								
Geologischer Untergrund	Grauer Sandstein, dunkelgrauer Schiefer (Veitscher Decke)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	16	2	2E-11	1,24	1,08	18	2	18	2
Sonde 2	31	3	2E-11	1,41	1,00	31	3	31	3
Sonde 3	14	2	2E-11	1,45	1,00	14	2	14	2
Mittelwert	20	8	2E-11			21	8	21	8

Tabelle E.16.: Detaillierte Daten von Standort 16.

Standort 16									
Koordinaten (GK M31)	178791								
	283205								
Seehöhe (m)	1087								
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)	0,101								
Geologischer Untergrund	Semmering-Quarzit								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	3	1	2E-14	1,35	1,00	3	1	A	1
Sonde 2	106	7	8E-14	1,34	1,00	106	7	106	7
Sonde 3	73	6	2E-12	1,40	1,00	73	6	73	6
Mittelwert	61	41	6E-13			61	41	90	31

Tabelle E.17.: Detaillierte Daten von Standort 17.

Standort 17									
Koordinaten (GK M31)		177576 282557							
Seehöhe (m)		954							
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,126							
Geologischer Untergrund		Heller Dolomit (gebankt, tw. massig)							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	34	4	2E-11	1,34	1,00	34	4	34	4
Sonde 2	15	1	2E-11	1,33	1,00	15	1	A	1
Sonde 3	33	3	4E-14	1,45	1,00	33	3	33	3
Mittelwert	27	10	1E-11			27	10	33	5

Tabelle E.18.: Detaillierte Daten von Standort 18.

Standort 18									
Koordinaten (GK M31)		179960 275142							
Seehöhe (m)		951							
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,178							
Geologischer Untergrund		Grobgneis (granitischer Augengneis)							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	78	7	1E-11	1,41	1,00	78	7	78	7
Sonde 2	67	5	1E-11	1,07	1,19	80	5	80	5
Sonde 3	54	4	2E-11	1,25	1,07	58	4	A	4
Mittelwert	66	13	1E-11			72	13	79	10

Tabelle E.19.: Detaillierte Daten von Standort 19.

Standort 19									
Koordinaten (GK M31)	183910								
	277517								
Seehöhe (m)	939								
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)	0,170								
Geologischer Untergrund	Muskovit-Plagioklas-Mikroklingneis (feinkörnig)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	729	44	2E-11	0,77	1,52	1107	44	1107	44
Sonde 2	548	3	2E-11	0,81	1,46	800	3	800	3
Sonde 3	291	13	1E-12	0,95	1,30	378	13	A	13
Mittelwert	523	174	1E-11			761	283	953	286

Tabelle E.20.: Detaillierte Daten von Standort 20.

Standort 20									
Koordinaten (GK M31)	176049								
	282417								
Seehöhe (m)	821								
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)	0,099								
Geologischer Untergrund	Rauhwanke								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	13	3	2E-11	1,29	1,05	13	3	13	3
Sonde 2	16	2	2E-11	1,32	1,00	16	2	16	2
Sonde 3	8	1	2E-11	1,23	1,09	8	1	8	1
Mittelwert	12	5	2E-11			13	5	13	5

Tabelle E.21.: Detaillierte Daten von Standort 21.

Standort 21									
Koordinaten (GK M31)		172556 281042							
Seehöhe (m)		1423							
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,087							
Geologischer Untergrund		Heller Kalk und Dolomit, tw. Rauhwanke (ungegliedert), Boden nass							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	0	-	0E+00	0,91	1,34	0	-	0	-
Sonde 2	0	1	0E+00	1,40	1,00	0	1	0	1
Sonde 3	0	1	0E+00	1,35	1,00	0	1	0	1
Mittelwert	0	1	0E+00			0	1	0	0

Tabelle E.22.: Detaillierte Daten von Standort 22.

Standort 22									
Koordinaten (GK M31)		173483 281305							
Seehöhe (m)		967							
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,085							
Geologischer Untergrund		Rauhwanke							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	3	2	2E-11	1,17	1,12	4	2	4	2
Sonde 2	5	1	2E-11	1,24	1,08	5	1	5	1
Sonde 3	2	1	2E-11	1,23	1,09	2	1	2	1
Mittelwert	3	3	2E-11			4	3	4	3

Tabelle E.23.: Detaillierte Daten von Standort 23.

Standort 23									
Koordinaten (GK M31)	189116 275410								
Seehöhe (m)	786								
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)	-								
Geologischer Untergrund	Graphitreicher Phyllit								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	30	4	2E-11	1,33	1,00	30	4	30	4
Sonde 2	69	5	2E-12	1,46	1,00	69	5	69	5
Sonde 3	19	2	1E-12	1,28	1,06	20	2	20	2
Mittelwert	39	21	7E-12			40	21	40	21

Tabelle E.24.: Detaillierte Daten von Standort 24.

Standort 24									
Koordinaten (GK M31)	187700 274019								
Seehöhe (m)	1146								
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)	0,113								
Geologischer Untergrund	Grauer Albitphyllit								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	18	2	3E-12	1,42	1,00	18	2	18	2
Sonde 2	47	3	2E-11	1,45	1,00	47	3	47	3
Sonde 3	-	-	-	1,50	1,00	-	-	-	-
Mittelwert	33	28	1E-11			33	28	33	28

Tabelle E.25.: Detaillierte Daten von Standort 25.

Standort 25									
Koordinaten (GK M31)	188068 276871								
Seehöhe (m)	1203								
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)	-								
Geologischer Untergrund	Grauer Albitphyllit								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	46	5	2E-11	1,00	1,25	58	5	58	5
Sonde 2	93	6	2E-11	0,93	1,32	122	6	122	6
Sonde 3	36	3	2E-11	1,05	1,21	44	3	44	3
Mittelwert	59	24	2E-11			75	33	75	33

Tabelle E.26.: Detaillierte Daten von Standort 26.

Standort 26									
Koordinaten (GK M31)	186823 273841								
Seehöhe (m)	1195								
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)	0,099								
Geologischer Untergrund	Grauer Albitphyllit								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	66	7	8E-15	0,75	1,55	102	7	102	7
Sonde 2	13	1	2E-14	0,85	1,41	18	1	18	1
Sonde 3	3	1	1E-13	0,75	1,55	4	1	4	1
Mittelwert	27	27	4E-14			41	41	41	41

Tabelle E.27.: Detaillierte Daten von Standort 27.

Standort 27									
Koordinaten (GK M31)	188018								
	278158								
Seehöhe (m)	1082								
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)	-								
Geologischer Untergrund	Hangschutt (Kalk, Dolomit, Semmering-Quarzit)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	7	2	2E-11	1,36	1,00	7	2	7	2
Sonde 2	7	1	2E-11	1,34	1,00	7	1	7	1
Sonde 3	-	-	-	1,20	1,10	-	-	-	-
Mittelwert	7	2	2E-11			7	2	7	2

Tabelle E.28.: Detaillierte Daten von Standort 28.

Standort 28									
Koordinaten (GK M31)	187032								
	278668								
Seehöhe (m)	985								
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)	0,071								
Geologischer Untergrund	Heller Dolomit (gebankt, tw. massig)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	1	1	2E-11	1,23	1,09	1	1	1	1
Sonde 2	1	1	2E-11	1,01	1,24	1	1	1	1
Sonde 3	1	1	2E-11	1,08	1,18	1	1	1	1
Mittelwert	1	2	2E-11			1	2	1	2

Tabelle E.29.: Detaillierte Daten von Standort 29.

Standort 29									
Koordinaten (GK M31)		183297 278455							
Seehöhe (m)		910							
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,110							
Geologischer Untergrund		Violetter und grüner Serizitschiefer; tw. mit Dolomit und Rauhwanke (Bunter Keuper)							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	37	4	7E-12	1,35	1,00	37	4	37	4
Sonde 2	27	2	7E-15	1,46	1,00	27	2	27	2
Sonde 3	41	3	6E-13	1,41	1,00	41	3	41	3
Mittelwert	35	8	2E-12			35	8	35	8

Tabelle E.30.: Detaillierte Daten von Standort 30.

Standort 30									
Koordinaten (GK M31)		187455 279410							
Seehöhe (m)		1226							
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,087							
Geologischer Untergrund		Semmering-Quarzit							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	-	-	-	1,28	1,06	-	-	-	-
Sonde 2	223	12	1E-13	1,24	1,08	240	12	240	12
Sonde 3	90	6	1E-11	1,36	1,00	90	6	90	6
Mittelwert	156	123	5E-12			165	139	165	139

Tabelle E.31.: Detaillierte Daten von Standort 31.

Standort 31									
Koordinaten (GK M31)	186069								
	276752								
Seehöhe (m)	1262								
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)	-								
Geologischer Untergrund	Hagschutt (Glimmerschiefer)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	67	7	2E-11	1,08	1,18	79	7	79	7
Sonde 2	68	5	2E-11	1,04	1,22	83	5	83	5
Sonde 3	28	3	2E-11	1,25	1,07	30	3	A	3
Mittelwert	54	20	2E-11			64	24	81	9

Tabelle E.32.: Detaillierte Daten von Standort 32.

Standort 32									
Koordinaten (GK M31)	185964								
	274307								
Seehöhe (m)	1644								
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)	0,112								
Geologischer Untergrund	Phyllitischer bis phyllonitischer Glimmerschiefer (Hüllschiefer-Serie)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	34	4	2E-11	0,99	1,26	42	4	42	4
Sonde 2	12	1	2E-12	0,77	1,52	18	1	18	1
Sonde 3	17	2	8E-12	0,87	1,38	23	2	23	2
Mittelwert	21	10	9E-12			28	11	28	11

Tabelle E.33.: Detaillierte Daten von Standort 33.

Standort 33									
Koordinaten (GK M31)		183776 276467							
Seehöhe (m)		958							
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,132							
Geologischer Untergrund		Grobgneis (granitischer Augengneis)							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	28	4	1E-11	0,85	1,41	40	4	40	4
Sonde 2	34	3	1E-11	1,25	1,07	36	3	36	3
Sonde 3	39	3	1E-11	1,35	1,00	39	3	39	3
Mittelwert	34	7	1E-11			38	6	38	6

Tabelle E.34.: Detaillierte Daten von Standort 34.

Standort 34									
Koordinaten (GK M31)		180972 277167							
Seehöhe (m)		798							
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,120							
Geologischer Untergrund		Niederterrasse (Grobgneis)							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	11	2	2E-11	1,39	1,00	11	2	11	2
Sonde 2	-	-	-	1,24	1,08	-	-	-	-
Sonde 3	1	1	7E-14	1,38	1,00	1	1	1	1
Mittelwert	6	10	1E-11			6	10	6	10

Tabelle E.35.: Detaillierte Daten von Standort 35.

Standort 35									
Koordinaten (GK M31)	179766								
	276937								
Seehöhe (m)	812								
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)	0,128								
Geologischer Untergrund	Schwemmfächer (Glimmerschiefer)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	76	7	1E-11	0,88	1,37	105	7	105	7
Sonde 2	69	5	5E-13	0,99	1,26	87	5	87	5
Sonde 3	24	2	1E-13	1,24	1,08	26	2	A	2
Mittelwert	57	24	4E-12			73	33	96	18

Tabelle E.36.: Detaillierte Daten von Standort 36.

Standort 36									
Koordinaten (GK M31)	173542								
	282544								
Seehöhe (m)	664								
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)	0,127								
Geologischer Untergrund	Grauer Sandstein, dunkelgrauer Schiefer (Veitscher Decke)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	108	10	2E-11	1,38	1,00	108	10	108	10
Sonde 2	112	7	2E-11	1,40	1,00	112	7	112	7
Sonde 3	42	3	2E-11	1,38	1,00	42	3	A	3
Mittelwert	87	33	2E-11			87	33	110	13

Tabelle E.37.: Detaillierte Daten von Standort 37.

Standort 37									
Koordinaten (GK M31)		175657 283911							
Seehöhe (m)		1091							
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,110							
Geologischer Untergrund		Serizitphyllit der Silbersberg-Gruppe, tw. Quarzitisch (Norische Decke)							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	17	2	2E-11	0,75	1,55	26	2	26	2
Sonde 2	22	2	2E-11	0,90	1,35	30	2	30	2
Sonde 3	11	1	3E-12	1,30	1,05	11	1	A	1
Mittelwert	17	5	1E-11			22	8	28	4

Tabelle E.38.: Detaillierte Daten von Standort 38.

Standort 38									
Koordinaten (GK M31)		186783 279476							
Seehöhe (m)		986							
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,096							
Geologischer Untergrund		Schwarzgrauer geschichteter Dolomitmarmor							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	-	-	-	1,48	1,00	-	-	-	-
Sonde 2	25	3	2E-11	1,39	1,00	25	3	25	3
Sonde 3	-	-	-	1,55	1,00	-	-	-	-
Mittelwert	25	3	2E-11			25	3	25	3

Tabelle E.39.: Detaillierte Daten von Standort 39.

Standort 39									
Koordinaten (GK M31)	177362								
	281032								
Seehöhe (m)	1129								
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)	-								
Geologischer Untergrund	Gneisiger tw. quarzitischer Glimmerschiefer								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	35	4	2E-11	0,85	1,41	49	4	49	4
Sonde 2	35	3	7E-13	0,97	1,28	45	3	45	3
Sonde 3	12	2	2E-11	0,91	1,34	16	2	A	2
Mittelwert	27	11	1E-11			37	15	47	6

Tabelle E.40.: Detaillierte Daten von Standort 40.

Standort 40									
Koordinaten (GK M31)	182011								
	278162								
Seehöhe (m)	848								
Ortsdosis-leistung ($\mu\text{Sv/h}$)	0,103								
Geologischer Untergrund	Anthropogene Aufschüttung (Untergrund vermutlich Serizitschiefer)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)	Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	12	2	2E-11	1,45	1,00	12	2	12	2
Sonde 2	10	1	2E-11	1,45	1,00	10	1	10	1
Sonde 3	6	1	2E-11	1,45	1,00	6	1	6	1
Mittelwert	9	3	2E-11			9	3	9	3

Tabelle E.41.: Detaillierte Daten von Standort 41.

Standort 41										
Koordinaten (GK M31)		181146 276774								
Seehöhe (m)		864								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,130								
Geologischer Untergrund		Grobgneis (granitischer Augengneis)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	324	15	2E-11	8E-12	1,38	1,00	324	15	324	15
Sonde 2	169	14	4E-14	-	1,40	1,00	169	14	A	14
Sonde 3	417	19	2E-11	7E-12	1,41	1,00	417	19	417	19
Mittelwert	304	99	1E-11	7E-12			304	99	371	90

Tabelle E.42.: Detaillierte Daten von Standort 42.

Standort 42										
Koordinaten (GK M31)		176373 275424								
Seehöhe (m)		794								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,091								
Geologischer Untergrund		Hangschutt, Schutthalden (teilweise Würm)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	9	1	1E-11	3E-11	1,22	1,09	10	1	10	1
Sonde 2	-	-	-	-		-	-	-	-	-
Sonde 3	91	5	0E+00	-	1,46	1,00	91	5	91	5
Mittelwert	50	75	5E-12	3E-11			51	75	51	75

Tabelle E.43.: Detaillierte Daten von Standort 43.

Standort 43										
Koordinaten (GK M31)		182011								
		278162								
Seehöhe (m)		848								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,103								
Geologischer Untergrund			Anthropogene Aufschüttung (Untergrund vermutlich Serizitschiefer)							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korregiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	0	0	4E-15	-	0,70	1,64	0	0	A	0
Sonde 2	2	0	2E-12	-	1,04	1,22	2	0	2	0
Sonde 3	6	1	8E-12	3E-11	1,26	1,07	6	1	6	1
Mittelwert	3	2	3E-12	3E-11			3	3	4	4

Tabelle E.44.: Detaillierte Daten von Standort 44.

Standort 44										
Koordinaten (GK M31)		184603								
		277854								
Seehöhe (m)		961								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,119								
Geologischer Untergrund			Semmering-Quarzit							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korregiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	37	3	4E-12	2E-12	1,19	1,11	41	3	41	3
Sonde 2	39	3	1E-13	-	1,40	1,00	39	3	39	3
Sonde 3	46	3	1E-12	7E-12	1,44	1,00	46	3	46	3
Mittelwert	41	6	2E-12	4E-12			42	6	42	6

Tabelle E.45.: Detaillierte Daten von Standort 45.

Standort 45										
Koordinaten (GK M31)		184264 277695								
Seehöhe (m)		1017								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,148								
Geologischer Untergrund		Muskovit-Plagioklas-Mikroklingneis (feinkörnig)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	161	8	2E-11	3E-11	1,42	1,00	161	8	161	8
Sonde 2	160	8	1E-11	3E-11	1,15	1,14	181	8	181	8
Sonde 3	147	8	1E-11	3E-12	1,38	1,00	147	8	147	8
Mittelwert	156	15	1E-11	2E-11			163	19	163	19

Tabelle E.46.: Detaillierte Daten von Standort 46.

Standort 46										
Koordinaten (GK M31)		184437 277854								
Seehöhe (m)		1025								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,132								
Geologischer Untergrund		Muskovit-Plagioklas-Mikroklingneis /Phyllitischer bis phyllonitischer Glimmerschiefer								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	15	2	2E-11	3E-11	1,39	1,00	15	2	15	2
Sonde 2	34	3	1E-11	3E-11	1,39	1,00	34	3	34	3
Sonde 3	21	2	1E-11	3E-11	1,36	1,00	21	2	21	2
Mittelwert	23	9	1E-11	3E-11			23	9	23	9

Tabelle E.47.: Detaillierte Daten von Standort 47.

Standort 47										
Koordinaten (GK M31)		183973								
		277622								
Seehöhe (m)		939								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,168								
Geologischer Untergrund		Muskovit-Plagioklas-Mikroklingneis (feinkörnig)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korregiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	24	3	9E-12	5E-12	1,33	1,00	24	3	24	3
Sonde 2	17	2	3E-13	3E-13	1,26	1,07	18	2	18	2
Sonde 3	434	20	2E-12	1E-12	1,10	1,17	508	20	508	20
Mittelwert	158	183	4E-12	2E-12			183	215	183	215

Tabelle E.48.: Detaillierte Daten von Standort 48.

Standort 48										
Koordinaten (GK M31)		184043								
		277814								
Seehöhe (m)		965								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,131								
Geologischer Untergrund		Muskovit-Plagioklas-Mikroklingneis (feinkörnig)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korregiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	185	9	2E-11	5E-13	1,42	1,00	185	9	185	9
Sonde 2	106	7	1E-11	3E-11	1,40	1,00	106	7	106	7
Sonde 3	121	8	2E-11	3E-11	1,43	1,00	121	8	121	8
Mittelwert	137	35	2E-11	2E-11			137	35	137	35

Tabelle E.49.: Detaillierte Daten von Standort 49.

Standort 49										
Koordinaten (GK M31)		183908 277540								
Seehöhe (m)		942								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,170								
Geologischer Untergrund		Muskovit-Plagioklas-Mikroklingneis (feinkörnig)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	229	11	2E-11	3E-11	1,35	1,00	229	11	229	11
Sonde 2	238	11	2E-11	3E-11	1,41	1,00	238	11	238	11
Sonde 3	493	24	2E-11	1E-11	1,26	1,07	527	24	527	24
Mittelwert	320	118	2E-11	2E-11			331	132	331	132

Tabelle E.50.: Detaillierte Daten von Standort 50.

Standort 50										
Koordinaten (GK M31)		183907 277889								
Seehöhe (m)		895								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,151								
Geologischer Untergrund		Muskovit-Plagioklas-Mikroklingneis (feinkörnig)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	227	12	2E-11	2E-12	1,33	1,00	227	12	227	12
Sonde 2	248	12	5E-13	4E-13	1,37	1,00	248	12	248	12
Sonde 3	217	12	2E-11	1E-11	1,38	1,00	217	12	217	12
Mittelwert	230	24	1E-11	4E-12			230	24	230	24

Tabelle E.51.: Detaillierte Daten von Standort 51.

Standort 51										
Koordinaten (GK M31)		183920								
		278111								
Seehöhe (m)		863								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,156								
Geologischer Untergrund		Muskovit-Plagioklas-Mikroklingneis (feinkörnig)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	220	11	2E-11	2E-11	1,38	1,00	220	11	220	11
Sonde 2	194	10	2E-11	3E-11	1,40	1,00	194	10	194	10
Sonde 3	228	12	2E-11	4E-11	1,40	1,00	228	12	228	12
Mittelwert	214	24	2E-11	3E-11			214	24	214	24

Tabelle E.52.: Detaillierte Daten von Standort 52.

Standort 52										
Koordinaten (GK M31)		183987								
		278193								
Seehöhe (m)		868								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,117								
Geologischer Untergrund		Muskovit-Plagioklas-Mikroklingneis /Hangschutt, Schutthalden (teilweise Würm)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	65	6	2E-11	2E-11	1,33	1,00	65	6	65	6
Sonde 2	63	6	1E-11	2E-11	1,27	1,06	67	6	67	6
Sonde 3	165	9	1E-11	3E-12	1,37	1,00	165	9	165	9
Mittelwert	98	46	1E-11	2E-11			99	45	99	45

Tabelle E.53.: Detaillierte Daten von Standort 53.

Standort 53										
Koordinaten (GK M31)		184196 278325								
Seehöhe (m)		838								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,153								
Geologischer Untergrund		Phyllitischer bis phyllonitischer Glimmerschiefer ('Hüllschiefer-Serie')								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	158	9	5E-13	3E-13	1,40	1,00	158	9	158	9
Sonde 2	140	9	2E-12	9E-13	1,39	1,00	140	9	140	9
Sonde 3	132	9	8E-13	5E-13	1,47	1,00	132	9	132	9
Mittelwert	143	18	1E-12	6E-13			143	18	143	18

Tabelle E.54.: Detaillierte Daten von Standort 54.

Standort 54										
Koordinaten (GK M31)		173021 271788								
Seehöhe (m)		738								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,118								
Geologischer Untergrund		Inneralpines Jungtertiär i.a.(Kies, Sand, Ton, lehmiger Sand,								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	118	7	3E-13	3E-13	1,35	1,00	118	7	118	7
Sonde 2	102	6	7E-12	2E-12	1,35	1,00	102	6	102	6
Sonde 3	105	6	8E-12	8E-12	1,35	1,00	105	6	105	6
Mittelwert	108	13	5E-12	3E-12			108	13	108	13

Tabelle E.55.: Detaillierte Daten von Standort 55.

Standort 55										
Koordinaten (GK M31)		173207								
		271762								
Seehöhe (m)		758								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,095								
Geologischer Untergrund		Heller Dolomit (gebankt, teilweise massig)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	55	5	3E-13	5E-13	1,40	1,00	55	5	55	5
Sonde 2	68	5	9E-13	6E-13	1,34	1,00	68	5	68	5
Sonde 3	105	7	7E-13	6E-13	1,21	1,10	115	7	115	7
Mittelwert	76	22	6E-13	6E-13			79	26	79	26

Tabelle E.56.: Detaillierte Daten von Standort 56.

Standort 56										
Koordinaten (GK M31)		173499								
		271462								
Seehöhe (m)		799								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,070								
Geologischer Untergrund		Auzonen, Kolluvien, Wildbachschutt								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	19	2	8E-12	9E-12	1,22	1,09	21	2	21	2
Sonde 2	12	1	1E-11	2E-11	1,14	1,14	13	1	A	1
Sonde 3	25	2	1E-11	2E-11	1,13	1,15	29	2	29	2
Mittelwert	19	6	1E-11	2E-11			21	7	25	8

Tabelle E.57.: Detaillierte Daten von Standort 57.

Standort 57										
Koordinaten (GK M31)		184153 278463								
Seehöhe (m)		824								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,101								
Geologischer Untergrund		Niedere Alluvialterrasse, Auenablagerung (Sand, Kies, Lehm)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	57	5	9E-12	4E-12	1,41	1,00	57	5	57	5
Sonde 2	61	5	6E-12	4E-12	1,46	1,00	61	5	61	5
Sonde 3	55	5	2E-12	1E-12	1,45	1,00	55	5	55	5
Mittelwert	58	9	5E-12	3E-12			58	9	58	9

Tabelle E.58.: Detaillierte Daten von Standort 58.

Standort 58										
Koordinaten (GK M31)		172908 271748								
Seehöhe (m)		711								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,091								
Geologischer Untergrund		Inneralpines Jungtertiär i.a.(Kies, Sand, Ton, lehmiger Sand,								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	24	2	2E-11	2E-11	1,37	1,00	24	2	24	2
Sonde 2	25	2	2E-11	3E-11	1,33	1,00	25	2	25	2
Sonde 3	35	3	2E-11	2E-11	1,16	1,13	39	3	39	3
Mittelwert	28	6	2E-11	2E-11			29	8	29	8

Tabelle E.59.: Detaillierte Daten von Standort 59.

Standort 59										
Koordinaten (GK M31)		168185								
		275354								
Seehöhe (m)		919								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,132								
Geologischer Untergrund			Semmeringquarzit, Lantschfeldquarzit, Alpiner Verrucano: Serizitphyllite							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korregiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	61	4	8E-12	9E-12	1,27	1,06	65	4	65	4
Sonde 2	56	4	7E-12	1E-11	1,27	1,06	60	4	60	4
Sonde 3	52	4	6E-12	1E-11	1,32	1,00	52	4	52	4
Mittelwert	57	8	7E-12	1E-11			59	8	59	8

Tabelle E.60.: Detaillierte Daten von Standort 60.

Standort 60										
Koordinaten (GK M31)		176573								
		275131								
Seehöhe (m)		800								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,112								
Geologischer Untergrund			Hangschutt, Schutthalden (teilweise Würm)							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korregiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	25	2	3E-12	4E-12	1,25	1,07	27	2	27	2
Sonde 2	25	2	2E-11	3E-11	1,27	1,06	27	2	27	2
Sonde 3	24	2	2E-11	3E-11	1,35	1,00	24	2	24	2
Mittelwert	25	4	1E-11	2E-11			26	4	26	4

Tabelle E.61.: Detaillierte Daten von Standort 61.

Standort 61										
Koordinaten (GK M31)		177334 275070								
Seehöhe (m)		847								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,076								
Geologischer Untergrund		Phyllitischer bis phyllonitischer Glimmerschiefer ('Hüllschiefer-Serie')								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	39	3	9E-13	3E-14	1,17	1,12	44	3	44	3
Sonde 2	25	2	9E-13	7E-13	1,35	1,00	25	2	A	2
Sonde 3	36	3	4E-14	7E-13	1,32	1,00	36	3	36	3
Mittelwert	34	7	6E-13	5E-13			35	8	40	8

Tabelle E.62.: Detaillierte Daten von Standort 62.

Standort 62										
Koordinaten (GK M31)		177998 274329								
Seehöhe (m)		965								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,129								
Geologischer Untergrund		Phyllitischer bis phyllonitischer Glimmerschiefer ('Hüllschiefer-Serie')								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	117	7	1E-11	4E-12	1,34	1,00	117	7	117	7
Sonde 2	176	9	2E-11	8E-12	1,37	1,00	176	9	176	9
Sonde 3	101	6	2E-11	9E-12	1,38	1,00	101	6	101	6
Mittelwert	131	33	2E-11	7E-12			131	33	131	33

Tabelle E.63.: Detaillierte Daten von Standort 63.

Standort 63										
Koordinaten (GK M31)		176773								
		275870								
Seehöhe (m)		815								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,095								
Geologischer Untergrund			Hangschutt, Schutthalden (teilweise Würm)							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	29	3	1E-11	1E-11	1,36	1,00	29	3	A	3
Sonde 2	54	5	7E-12	5E-12	1,15	1,14	61	5	61	5
Sonde 3	41	3	1E-11	5E-12	1,24	1,08	45	3	45	3
Mittelwert	41	11	1E-11	7E-12			45	14	53	16

Tabelle E.64.: Detaillierte Daten von Standort 64.

Standort 64										
Koordinaten (GK M31)		177741								
		275724								
Seehöhe (m)		761								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,117								
Geologischer Untergrund			Auzonen, Kolluvien, Wildbachschutt							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	61	4	4E-12	3E-12	1,41	1,00	61	4	61	4
Sonde 2	57	4	2E-11	2E-11	1,39	1,00	57	4	57	4
Sonde 3	70	5	2E-11	7E-12	1,40	1,00	70	5	70	5
Mittelwert	63	9	1E-11	8E-12			63	9	63	9

Tabelle E.65.: Detaillierte Daten von Standort 65.

Standort 65										
Koordinaten (GK M31)		180169 274375								
Seehöhe (m)		971								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,148								
Geologischer Untergrund		Grobgnais (granitischer Augengneis)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	82	5	2E-11	5E-13	1,26	1,07	88	5	88	5
Sonde 2	91	5	2E-11	3E-11	1,28	1,06	97	5	97	5
Sonde 3	67	4	2E-11	4E-11	1,25	1,07	72	4	A	4
Mittelwert	80	13	2E-11	2E-11			85	13	92	12

Tabelle E.66.: Detaillierte Daten von Standort 66.

Standort 66										
Koordinaten (GK M31)		171837 272622								
Seehöhe (m)		649								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,151								
Geologischer Untergrund		Niedere Alluvialterrasse, Auenablagerung (Sand, Kies, Lehm)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	14	1	2E-11	3E-11	1,44	1,00	14	1	14	1
Sonde 2	16	1	2E-11	3E-11	1,39	1,00	16	1	16	1
Sonde 3	12	1	2E-11	3E-11	1,38	1,00	12	1	12	1
Mittelwert	14	3	2E-11	3E-11			14	3	14	3

Tabelle E.67.: Detaillierte Daten von Standort 67.

Standort 67										
Koordinaten (GK M31)		171165								
		272654								
Seehöhe (m)		741								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,123								
Geologischer Untergrund		Hangschutt, Schutthalden (teilweise Würm)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	101	6	2E-11	2E-11	1,26	1,07	108	6	108	6
Sonde 2	110	6	5E-12	3E-12	1,34	1,00	110	6	110	6
Sonde 3	102	6	2E-11	9E-12	1,32	1,00	102	6	102	6
Mittelwert	104	11	1E-11	1E-11			106	11	106	11

Tabelle E.68.: Detaillierte Daten von Standort 68.

Standort 68										
Koordinaten (GK M31)		171492								
		271750								
Seehöhe (m)		632								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,078								
Geologischer Untergrund		Niedere Alluvialterrasse, Auenablagerung (Sand, Kies, Lehm)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	31	3	2E-11	2E-11	1,06	1,20	37	3	37	3
Sonde 2	30	3	2E-11	1E-11	1,18	1,12	34	3	34	3
Sonde 3	26	2	2E-11	1E-11	1,08	1,18	31	2	31	2
Mittelwert	29	5	2E-11	2E-11			34	5	34	5

Tabelle E.69.: Detaillierte Daten von Standort 69.

Standort 69										
Koordinaten (GK M31)		170081 272411								
Seehöhe (m)		751								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,109								
Geologischer Untergrund		Hangschutt, Schutthalden (teilweise Würm)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	78	5	2E-11	8E-12	1,21	1,10	86	5	86	5
Sonde 2	38	3	3E-11	2E-11	1,31	1,00	38	3	38	3
Sonde 3	30	2	2E-11	2E-11	1,34	1,00	30	2	30	2
Mittelwert	49	20	2E-11	2E-11			51	24	51	24

Tabelle E.70.: Detaillierte Daten von Standort 70.

Standort 70										
Koordinaten (GK M31)		170043 271785								
Seehöhe (m)		625								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,099								
Geologischer Untergrund		Niedere Alluvialterrasse, Auenablagerung (Sand, Kies, Lehm)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	19	2	3E-13	2E-13	1,37	1,00	19	2	19	2
Sonde 2	20	2	6E-14	3E-14	1,33	1,00	20	2	20	2
Sonde 3	9	1	6E-14	3E-14	1,28	1,06	10	1	A	1
Mittelwert	16	5	1E-13	8E-14			16	5	20	3

Tabelle E.71.: Detaillierte Daten von Standort 71.

Standort 71										
Koordinaten (GK M31)		168033								
		276320								
Seehöhe (m)		1084								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,135								
Geologischer Untergrund			Semmeringquarzit, Lantschfeldquarzit, Alpiner Verrucano: Serizitphyllite							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korregiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	66	5	2E-11	1E-11	1,34	1,00	66	5	66	5
Sonde 2	90	6	2E-11	2E-11	1,32	1,00	90	6	90	6
Sonde 3	54	4	2E-11	1E-11	1,31	1,00	54	4	54	4
Mittelwert	70	16	2E-11	2E-11			70	16	70	16

Tabelle E.72.: Detaillierte Daten von Standort 72.

Standort 72										
Koordinaten (GK M31)		170330								
		271660								
Seehöhe (m)		625								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,097								
Geologischer Untergrund			Niedere Alluvialterrasse, Auenablagerung (Sand, Kies, Lehm)							
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korregiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	33	3	3E-13	-	1,35	1,00	33	3	33	3
Sonde 2	28	2	5E-14	-	1,32	1,00	28	2	28	2
Sonde 3	22	2	9E-14	2E-13	1,36	1,00	22	2	22	2
Mittelwert	28	6	1E-13	2E-13			28	6	28	6

Tabelle E.73.: Detaillierte Daten von Standort 73.

Standort 73										
Koordinaten (GK M31)		172534 272655								
Seehöhe (m)		640								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,098								
Geologischer Untergrund		Niedere Alluvialterrasse, Auenablagerung (Sand, Kies, Lehm)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	44	3	3E-11	2E-11	1,39	1,00	44	3	44	3
Sonde 2	48	3	2E-11	3E-11	1,35	1,00	48	3	48	3
Sonde 3	47	3	-	8E-13	1,42	1,00	47	3	47	3
Mittelwert	46	6	3E-11	2E-11			46	6	46	6

Tabelle E.74.: Detaillierte Daten von Standort 74.

Standort 74										
Koordinaten (GK M31)		173321 273239								
Seehöhe (m)		643								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,084								
Geologischer Untergrund		Niedere Alluvialterrasse, Auenablagerung (Sand, Kies, Lehm)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	43	3	3E-11	3E-11	1,22	1,09	47	3	47	3
Sonde 2	48	4	3E-11	2E-11	1,24	1,08	52	4	52	4
Sonde 3	44	3	3E-11	3E-11	1,29	1,05	46	3	46	3
Mittelwert	45	6	3E-11	3E-11			48	6	48	6

Tabelle E.75.: Detaillierte Daten von Standort 75.

Standort 75										
Koordinaten (GK M31)		172785 273045								
Seehöhe (m)		645								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,123								
Geologischer Untergrund		Schwemmfächer, Schwemmkegel, Murenkegel (z.T. spät- postglazial)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	48	3	2E-11	2E-11	1,34	1,00	48	3	48	3
Sonde 2	48	3	2E-11	3E-11	1,32	1,00	48	3	48	3
Sonde 3	38	3	2E-11	2E-11	1,38	1,00	38	3	38	3
Mittelwert	45	7	2E-11	2E-11			45	7	45	7

Tabelle E.76.: Detaillierte Daten von Standort 76.

Standort 76										
Koordinaten (GK M31)		172486 272874								
Seehöhe (m)		643								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,105								
Geologischer Untergrund		Niedere Alluvialterrasse, Auenablagerung (Sand, Kies, Lehm)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	35	3	2E-11	3E-11	1,30	1,05	37	3	37	3
Sonde 2	41	3	2E-11	3E-11	1,30	1,05	43	3	43	3
Sonde 3	36	3	2E-11	3E-11	1,30	1,05	38	3	38	3
Mittelwert	37	5	2E-11	3E-11			39	5	39	5

Tabelle E.77.: Detaillierte Daten von Standort 77.

Standort 77										
Koordinaten (GK M31)		173393 272926								
Seehöhe (m)		650								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,106								
Geologischer Untergrund		Niederterrasse / Schwemmfächer, Schwemmkegel, Murenkegel (z.T. spät- postglazial)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	68	5	2E-11	3E-11	1,36	1,00	68	5	68	5
Sonde 2	67	5	2E-11	3E-11	1,29	1,05	70	5	70	5
Sonde 3	69	5	2E-11	3E-11	1,38	1,00	69	5	69	5
Mittelwert	68	8	2E-11	3E-11			69	8	69	8

Tabelle E.78.: Detaillierte Daten von Standort 78.

Standort 78										
Koordinaten (GK M31)		173028 272748								
Seehöhe (m)		652								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,113								
Geologischer Untergrund		Schwemmfächer, Schwemmkegel, Murenkegel (z.T. spät- postglazial)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	77	5	3E-11	3E-11	1,10	1,17	90	5	90	5
Sonde 2	46	4	3E-11	3E-11	1,33	1,00	46	4	A	4
Sonde 3	80	5	2E-12	1E-12	1,09	1,18	94	5	94	5
Mittelwert	68	16	2E-11	2E-11			77	22	92	9

Tabelle E.79.: Detaillierte Daten von Standort 79.

Standort 79										
Koordinaten (GK M31)		172927								
		272596								
Seehöhe (m)		653								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,131								
Geologischer Untergrund		Schwemmfächer, Schwemmkegel, Murenkegel (z.T. spät- postglazial)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	64	5	3E-11	4E-11	1,22	1,09	70	5	70	5
Sonde 2	69	5	3E-11	3E-11	1,23	1,09	74	5	74	5
Sonde 3	65	5	2E-11	4E-11	1,16	1,13	73	5	73	5
Mittelwert	66	9	3E-11	3E-11			72	8	72	8

Tabelle E.80.: Detaillierte Daten von Standort 80.

Standort 80										
Koordinaten (GK M31)		173170								
		272318								
Seehöhe (m)		666								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,122								
Geologischer Untergrund		Schwemmfächer, Schwemmkegel, Murenkegel (z.T. spät- postglazial)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	95	6	2E-11	4E-11	1,31	1,00	95	6	95	6
Sonde 2	95	6	2E-11	3E-11	1,33	1,00	95	6	95	6
Sonde 3	103	6	2E-11	3E-11	1,39	1,00	103	6	103	6
Mittelwert	98	11	2E-11	3E-11			98	11	98	11

Tabelle E.81.: Detaillierte Daten von Standort 81.

Standort 81										
Koordinaten (GK M31)		173526 271978								
Seehöhe (m)		676								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,125								
Geologischer Untergrund		Schwemmfächer, Schwemmkegel, Murenkegel (z.T. spät- postglazial)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	129	7	4E-12	2E-12	1,40	1,00	129	7	129	7
Sonde 2	119	7	1E-13	1E-13	1,24	1,08	128	7	128	7
Sonde 3	103	6	7E-14	9E-14	1,37	1,00	103	6	A	6
Mittelwert	117	16	1E-12	7E-13			120	16	128	12

Tabelle E.82.: Detaillierte Daten von Standort 82.

Standort 82										
Koordinaten (GK M31)		172709 272292								
Seehöhe (m)		657								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,112								
Geologischer Untergrund		Schwemmfächer, Schwemmkegel, Murenkegel (z.T. spät- postglazial)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	94	6	2E-12	7E-12	1,44	1,00	94	6	94	6
Sonde 2	72	5	2E-12	3E-11	1,18	1,12	80	5	80	5
Sonde 3	81	5	2E-12	1E-11	1,28	1,06	86	5	86	5
Mittelwert	83	12	2E-12	2E-11			87	10	87	10

Tabelle E.83.: Detaillierte Daten von Standort 83.

Standort 83										
Koordinaten (GK M31)		172442								
		272007								
Seehöhe (m)		655								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,115								
Geologischer Untergrund		Schwemmfächer, Schwemmkegel, Murenkegel (z.T. spät- postglazial) / Niederterrasse								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korregiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	168	9	7E-14	1E-13	1,37	1,00	168	9	168	9
Sonde 2	149	8	2E-14	3E-13	1,35	1,00	149	8	149	8
Sonde 3	149	8	4E-13	1E-12	1,37	1,00	149	8	149	8
Mittelwert	156	17	2E-13	5E-13			156	17	156	17

Tabelle E.84.: Detaillierte Daten von Standort 84.

Standort 84										
Koordinaten (GK M31)		172217								
		272054								
Seehöhe (m)		642								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,092								
Geologischer Untergrund		Niedere Alluvialterrasse, Auenablagerung (Sand, Kies, Lehm)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korregiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	44	4	7E-12	3E-11	1,31	1,00	44	4	44	4
Sonde 2	46	4	8E-12	3E-11	1,35	1,00	46	4	46	4
Sonde 3	41	4	7E-12	3E-11	1,32	1,00	41	4	41	4
Mittelwert	44	7	7E-12	3E-11			44	7	44	7

Tabelle E.85.: Detaillierte Daten von Standort 85.

Standort 85										
Koordinaten (GK M31)		172077 271891								
Seehöhe (m)		633								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,097								
Geologischer Untergrund		Niedere Alluvialterrasse, Auenablagerung (Sand, Kies, Lehm)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	25	2	2E-11	3E-11	1,35	1,00	25	2	25	2
Sonde 2	29	2	2E-11	4E-11	1,34	1,00	29	2	29	2
Sonde 3	29	2	2E-11	3E-11	1,35	1,00	29	2	29	2
Mittelwert	28	4	2E-11	3E-11			28	4	28	4

Tabelle E.86.: Detaillierte Daten von Standort 86.

Standort 86										
Koordinaten (GK M31)		171586 271435								
Seehöhe (m)		638								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,111								
Geologischer Untergrund		Niederterrasse								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	33	3	2E-11	3E-11	1,36	1,00	33	3	33	3
Sonde 2	33	3	9E-12	3E-11	1,32	1,00	33	3	33	3
Sonde 3	30	3	9E-12	3E-11	1,33	1,00	30	3	30	3
Mittelwert	32	5	1E-11	3E-11			32	5	32	5

Tabelle E.87.: Detaillierte Daten von Standort 87.

Standort 87										
Koordinaten (GK M31)		170797								
		270115								
Seehöhe (m)		718								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,110								
Geologischer Untergrund		Inneralpines Jungtertiär i.a.(Kies, Sand, Ton, lehmiger Sand,								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korregiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	112	7	1E-12	7E-13	1,30	1,05	118	7	118	7
Sonde 2	105	7	1E-13	1E-13	1,35	1,00	105	7	105	7
Sonde 3	82	5	5E-14	4E-14	1,35	1,00	82	5	A	5
Mittelwert	100	16	4E-13	3E-13			101	18	111	16

Tabelle E.88.: Detaillierte Daten von Standort 88.

Standort 88										
Koordinaten (GK M31)		182291								
		278152								
Seehöhe (m)		813								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,095								
Geologischer Untergrund		Violetter und grüner Serizitschiefer; tw. mit Dolomit und Rauhwacke / Rauhwacke								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korregiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	72	5	2E-11	4E-11	1,36	1,00	72	5	72	5
Sonde 2	77	5	2E-11	3E-11	1,42	1,00	77	5	77	5
Sonde 3	69	5	2E-11	4E-11	1,37	1,00	69	5	69	5
Mittelwert	73	9	2E-11	3E-11			73	9	73	9

Tabelle E.89.: Detaillierte Daten von Standort 89.

Standort 89										
Koordinaten (GK M31)		182367 278157								
Seehöhe (m)		834								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,093								
Geologischer Untergrund		Violetter und grüner Serizitschiefer; tw. mit Dolomit und Rauhwanke / Rauhwanke								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	79	5	2E-13	-	1,35	1,00	79	5	79	5
Sonde 2	80	5	2E-11	5E-11	1,38	1,00	80	5	80	5
Sonde 3	53	4	1E-14	-	1,38	1,00	53	4	A	4
Mittelwert	71	15	7E-12	5E-11			71	15	80	9

Tabelle E.90.: Detaillierte Daten von Standort 90.

Standort 90										
Koordinaten (GK M31)		183109 278200								
Seehöhe (m)		836								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,135								
Geologischer Untergrund		Violetter und grüner Serizitschiefer; tw. mit Dolomit und Rauhwanke								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	39	3	3E-12	2E-12	1,41	1,00	39	3	39	3
Sonde 2	26	2	2E-11	1E-11	1,34	1,00	26	2	26	2
Sonde 3	28	2	2E-11	6E-12	1,33	1,00	28	2	28	2
Mittelwert	31	7	2E-11	7E-12			31	7	31	7

Tabelle E.91.: Detaillierte Daten von Standort 91.

Standort 91										
Koordinaten (GK M31)		180335								
		277224								
Seehöhe (m)		859								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,126								
Geologischer Untergrund		Hangschutt, Schutthalden (teilweise Würm)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	110	6	1E-12	9E-13	1,40	1,00	110	6	110	6
Sonde 2	131	8	4E-12	6E-12	1,40	1,00	131	8	131	8
Sonde 3	95	6	6E-13	6E-13	1,21	1,10	104	6	104	6
Mittelwert	112	18	2E-12	3E-12			115	16	115	16

Tabelle E.92.: Detaillierte Daten von Standort 92.

Standort 92										
Koordinaten (GK M31)		180278								
		276817								
Seehöhe (m)		776								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,132								
Geologischer Untergrund		Niederterrasse								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	147	8	5E-12	3E-11	1,37	1,00	147	8	147	8
Sonde 2	164	9	1E-13	2E-13	1,34	1,00	164	9	164	9
Sonde 3	163	9	5E-12	4E-11	1,40	1,00	163	9	163	9
Mittelwert	158	17	3E-12	2E-11			158	17	158	17

Tabelle E.93.: Detaillierte Daten von Standort 93.

Standort 93										
Koordinaten (GK M31)		183987 278698								
Seehöhe (m)		856								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,105								
Geologischer Untergrund		Rauhacke								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	31	3	1E-11	2E-11	1,40	1,00	31	3	A	3
Sonde 2	43	4	1E-11	1E-11	1,37	1,00	43	4	43	4
Sonde 3	42	3	1E-11	2E-11	1,44	1,00	42	3	42	3
Mittelwert	39	8	1E-11	2E-11			39	8	43	6

Tabelle E.94.: Detaillierte Daten von Standort 94.

Standort 94										
Koordinaten (GK M31)		179627 276591								
Seehöhe (m)		746								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,120								
Geologischer Untergrund		Niedere Alluvialterrasse, Auenablagerung (Sand, Kies, Lehm) / Niederterrasse								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	45	3	3E-12	2E-12	1,43	1,00	45	3	A	3
Sonde 2	67	4	2E-11	3E-11	1,36	1,00	67	4	67	4
Sonde 3	67	4	1E-11	2E-11	1,44	1,00	67	4	67	4
Mittelwert	60	12	1E-11	2E-11			60	12	67	7

Tabelle E.95.: Detaillierte Daten von Standort 95.

Standort 95										
Koordinaten (GK M31)		181523								
		278173								
Seehöhe (m)		808								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,115								
Geologischer Untergrund		Schwemmfächer, Schwemmkegel, Murenkegel (z.T. spät- postglazial)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	51	4	2E-11	3E-11	1,40	1,00	51	4	51	4
Sonde 2	57	4	2E-11	3E-11	1,37	1,00	57	4	57	4
Sonde 3	63	5	2E-11	3E-11	1,37	1,00	63	5	63	5
Mittelwert	57	8	2E-11	3E-11			57	8	57	8

Tabelle E.96.: Detaillierte Daten von Standort 96.

Standort 96										
Koordinaten (GK M31)		181851								
		278288								
Seehöhe (m)		822								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,111								
Geologischer Untergrund		Kalk, Bänderkalk bis Kalkmarmor (weiß bis rosa, schwarz, bläulichgrau)								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	11	1	2E-11	3E-11	1,38	1,00	11	1	11	1
Sonde 2	15	2	2E-11	3E-11	1,40	1,00	15	2	15	2
Sonde 3	17	2	2E-12	1E-12	1,38	1,00	17	2	17	2
Mittelwert	14	4	1E-11	2E-11			14	4	14	4

Tabelle E.97.: Detaillierte Daten von Standort 97.

Standort 97										
Koordinaten (GK M31)		181373 277410								
Seehöhe (m)		776								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,128								
Geologischer Untergrund		Hangschutt, Schutthalden (teilweise Würm) / Niederterrasse								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	26	3	1E-11	2E-11	0,95	1,30	34	3	A	3
Sonde 2	67	5	2E-13	-	1,21	1,10	73	5	73	5
Sonde 3	47	4	2E-12	2E-12	1,32	1,00	47	4	47	4
Mittelwert	47	17	5E-12	1E-11			51	17	60	26

Tabelle E.98.: Detaillierte Daten von Standort 98.

Standort 98										
Koordinaten (GK M31)		181651 277551								
Seehöhe (m)		804								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,112								
Geologischer Untergrund		Niederterrasse								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
Sonde 1	110	6	9E-12	1E-11	1,42	1,00	110	6	110	6
Sonde 2	115	7	3E-12	1E-12	1,38	1,00	115	7	115	7
Sonde 3	86	5	4E-14	2E-14	1,36	1,00	86	5	A	5
Mittelwert	104	16	4E-12	5E-12			104	16	113	12

Tabelle E.99.: Detaillierte Daten von Standort 99.

Standort 99										
Koordinaten (GK M31)		182265								
		277578								
Seehöhe (m)		808								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,101								
Geologischer Untergrund		Auzonen, Kolluvien, Wildbachschutt								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	54	5	1E-11	7E-12	1,36	1,00	54	5	54	5
Sonde 2	27	3	2E-13	1E-13	1,38	1,00	27	3	A	3
Sonde 3	55	5	2E-11	1E-11	1,34	1,00	55	5	55	5
Mittelwert	46	14	1E-11	7E-12			46	14	55	7

Tabelle E.100.: Detaillierte Daten von Standort 100.

Standort 100										
Koordinaten (GK M31)		182076								
		277633								
Seehöhe (m)		814								
Ortsdosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)		0,109								
Geologischer Untergrund		Niederterrasse								
	^{222}Rn (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	Permeabilität (m ²)		Tiefe (m)	Korrektur	^{222}Rn korrigiert (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)	^{222}Rn bereinigt (kBq/m ³)	\pm (kBq/m ³)
			Jok							
Sonde 1	32	3	2E-11	1E-11	1,41	1,00	32	3	A	3
Sonde 2	48	4	2E-13	2E-13	1,40	1,00	48	4	48	4
Sonde 3	43	3	2E-13	3E-13	1,45	1,00	43	3	43	3
Mittelwert	41	8	6E-12	4E-12			41	8	45	8