



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

SCHRIFTENREIHE REAKTORSICHERHEIT UND STRAHLENSCHUTZ

**ENTWICKLUNG EINER MESSMETHODIK
ZUR BESTIMMUNG DER RADONQUELLSTÄRKE
GROßER FLÄCHEN UND BEWERTUNG DER
RADONDÄMMWIRKUNG VON ABDECKSCHICHTEN**

BMU - 2003-622



WIR STEuern UM AUF ERNEUERBARE ENERGIEN.

BMU – 2003-622

**Entwicklung einer Messmethodik zur Bestimmung der
Radonquellstärke großer Flächen und Bewertung der
Radondämmwirkung von Abdeckschichten**

Dr. rer. nat. habil Hartmut Schulz

Prof. Dr. sc. nat. L. Funke

Dipl. Ing. (FH) B. Knittel

Anja Koschemann

S. Rothe

Dipl. Ing. Astrid Schellenberger

Dipl. Ing. (FH) W. Vogel

IMPRESSUM

Dieser Band enthält einen Abschlussbericht über ein vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördertes Vorhaben. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BMU übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Eigentümer behält sich alle Rechte an der weiteren Nutzung oder Vervielfältigung des Berichts vor.

Der Bericht wurde durch IAF-Radioökologie GmbH Dresden erstellt.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BMU übereinstimmen.

Herausgeber:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Arbeitsgruppe RS I 1
Postfach 12 06 29
53048 Bonn

Erscheinungsjahr: 2003

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einführung zum Gesamtziel des Fördervorhabens	4
2 Einführung zum Radontransport	11
2.1 Transportgleichung für Radon	11
2.2 Lösung der Transportgleichung für ein unendlich ausgedehntes Medium bei ausschließlicher Betrachtung diffusiver Prozesse	13
2.3 Berechnung der Exhalationsrate	14
3 Messung der Radonexhalation	19
3.1 Statische Methode	19
3.2 Quasikontinuierliches Meßregime	20
4 Messung der Radonkonzentration in der bodennahen Luft in Höhen von 5 cm bis 1,5 m	24
4.1 Vorbemerkung zur Herangehensweise und Zielstellung	24
4.2 Messung des BfS in Johannegeorgenstadt (Trockendammhalde Steigerdorf)	24
4.2.1 Radon-Freiluftkonzentration in 1,5 m Höhe	24
4.2.2 Warum Messung der Radonkonzentration in geringen Höhen?	28
4.2.3 Quasikontinuierliche Messung der Radonexhalation	35
4.2.4 Zusammenfassung des Radonexhalationsverhaltens der Trockendammhalde (Steigerdorf)	43
4.3 Qualitative Interpretation der beobachteten Exhalationsmuster	45
4.3.1 Vorbemerkung zum Sachstand	45
4.3.2 Einfaches Haldenmodell (2-Kompartimentdarstellung)	47
4.3.3 Quantitative Abschätzung der Konvektionsgeschwindigkeit	51
4.4 Messung der Radonexhalation auf nicht haldenartigen Flächen	55
4.4.1 Vorbemerkung zur Zielstellung	55
4.4.2 Messung der Radonexhalation auf einer Wiese	56
4.4.2.1 Sommermeßperiode	57
4.4.2.2 Wintermeßperiode	64
4.4.3 Schlußfolgerungen aus den Ergebnissen der Exhalationsmessungen auf der Wiese	67
5 Aufbau und Auswahl von Meßfeldern	68
5.1 Vorbemerkung zur Vorgehensweise	68
5.2 Beschreibung und Aufbau von Testfeldern	69
5.2.1 Künstlich angelegte Testfelder	69
5.2.2 Testfeld Wiese	72
5.2.2.1 Testfeld Wiese 1	72
5.2.2.2 Testfeld Wiese 2	76

5.3	Messung der Radonexhalation auf den Testfeldern	80
5.3.1	Boxmethode und E-Perm-Monitore	80
5.3.2	Kernspur-Radonflux-Monitor	83
5.4	Messungen der Radonkonzentration in niedrigen Höhen auf den Testfeldern	85
5.4.1	Vorbemerkung zu den Messungen	85
5.4.2	Meßergebnisse für die Radonkonzentration in 5 und 10 cm Höhe über den Meßfeldern 1 und 2	86
5.4.3	Messung der Radonexhalation auf dem Meßfeld Wiese 2	91
6	Durchführung eines Feldversuchs zur Bestimmung der Radonquellstärke	95
6.1	Vorbemerkung	95
6.2	Rastermessung der Radonkonzentration	99
6.3	Messung der Radonexhalation	103
6.4	Untersuchungen zur Mächtigkeit der Abdeckung	109
6.5	Meßergebnisse der Radonkonzentration für den Dammbereich	112
6.6	Berechnung der Radonquellstärke und Zusammenfassung der Ergebnisse	116
6.7	Vereinfachte quantitative Modellierung der in geringen Höhen gemessenen Radonkonzentration	119
7	Zusammenfassung	127
7.1	Einzelzielsetzungen	127
7.2	Meßmethodik	127
7.3	Durchführung	128
7.4	Ergebnisse	128
7.5	Geplante Weiterarbeit	131
8	Quellennachweis	132

1 Einführung zum Gesamtziel des Fördervorhabens

Bei der Bewertung der Radontransporteigenschaften von Böden ist eine Vielzahl von Effekten einzuschließen, so daß in letzter Konsequenz generelle Aussagen über den Radontransport im Medium, die Zeiträume von einigen Jahrzehnten bis Jahrhunderten umfassen sollen, durch die derzeit nach Stand der Technik durchgeführten sporadischen Messungen der Radonkonzentration in der Bodenluft und der Radonexhalation nur schwer ableitbar sind. Die Kenntnis der Langzeitaspekte des Radontransports ist vor allem dann wichtig, wenn z.B. die Dimensionierung von Abdeckschichten von Tailingsflächen oder Halden quantifiziert werden soll oder die Güte solcher Abdeckungen über längere Zeiträume überprüft werden muß.

Zu den wichtigen beeinflussenden Faktoren, die sich auf eine momentane Messung der Radonkonzentration in der Bodenluft und der Radonexhalation mehr oder weniger stark auswirken, zählen:

- die Bodenbeschaffenheit der Abdeckschicht (Feuchtigkeit, Korngrößenverteilung, Permeabilität, Porosität),
- die Beschaffenheit des radonproduzierenden Mediums (Tailings, Haldenmaterial, geomechanische und geochemische Beschaffenheit, Mächtigkeit des Mediums, hydrogeologische Eigenschaften),
- der Einfluß der jahreszeitlichen und täglichen meteorologischen Bedingungen (Luftdruck, Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchte, Regen, Sonnenschein, Hitze- und Frostperioden, Schneebedeckung etc.),
- die Erfassung der wesentlichen Transportmechanismen (Wechselspiel von Diffusion und Konvektion, Zeitabhängigkeit der Transportprozesse und ihre Korrelation mit den verschiedensten meteorologischen und bodenphysikalischen Parametern) sowie auch
- der Bewuchs und die Durchwurzelung der Abdeckung (Wald, Gras, Feuchtgebiet, Bioturbationen etc.).

Im Rahmen eines Forschungsprojekts [1], [2] wurden Möglichkeiten einer alternativen Methode zur Beurteilung der Radondämmwirkung von Abdeckungen untersucht, wobei nicht die Bestimmung der Konzentration von Rn-222, sondern die des Radonfolgeprodukts Pb-210 im Vordergrund stand. Als Untersuchungsgröße wurde die Differenz der spezifischen Aktivität von Pb-210 und Ra-226, die als Bleispur

ferenz der spezifischen Aktivität von Pb-210 und Ra-226, die als Bleispur bezeichnet wurde, eingeführt.

Mit einer Halbwertszeit von 22,3 Jahren ist das Radionuklid Pb-210 prädestiniert, Langzeiteffekte des Radontransports über die Messung seiner spezifischen Aktivität in Bodenproben zu extrahieren. Insbesondere die Messung des tiefenabhängigen Pb-210-Konzentrationsprofils bzw. der Bleispur in Böden und Abdeckungen liefert Informationen über die tatsächliche Exhalation von Radon bzw. die Radonkonzentration in der Bodenluft, die das Transportverhalten über Zeiträume von mehr als 30 Jahren reflektieren.

Dem Projekt lag als Ausgangsidee zugrunde, daß durch das Bestimmen der Bleispur die Nettoeffekte von wichtigen Einflußfaktoren, wie z.B. das Wechselspiel von Diffusion und Konvektion, die Zeitabhängigkeit der Transportprozesse und ihre Korrelation mit den verschiedenen meteorologischen und bodenphysikalischen Parametern sowie die Heterogenität der Schichtungen oder die Art des Bewuchses summarisch mit erfaßt werden. Dabei ist von einem Zeitmittel > 30 Jahre auszugehen.

Ein wichtiges Untersuchungsgebiet waren Abdeckschichten, die im Zuge des Uranbergbaus entstanden. Solche Abdeckungen sind ursprünglich nicht unter dem Blickwinkel einer Reduktion der Radonexhalation aufgetragen worden. Aus dem Fehlen bzw. Vorhandensein einer positiven Bleispur in Abdeckungen konnten modellunabhängige Informationen über die Dimensionierung von Abdeckschichten gewonnen werden. Es zeigte sich, daß in vielen Fällen die Radonmigrationslänge im Bereich von 1 m liegt, wobei die Durchwurzelung eine besondere Rolle zu spielen scheint. Erste Untersuchungsergebnisse weisen z.B. darauf hin, daß sich in stark durchwurzelten Bereichen keine positive Bleispur ausbildet, während in nicht durchwurzelten Bereichen positive Bleispuren festgestellt wurden. Diese Ergebnisse können als eindeutiger Hinweis dafür gewertet werden, daß sich über die Wurzelkanäle zusätzliche Wegsamkeiten für den Radontransport eröffnen. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, durch welche Art von Abdeckung überhaupt eine dauerhafte Reduktion der Radonexhalation von Halden oder IAA's erzielt werden kann.

Die Modellierung der experimentell bestimmten Bleispuren lieferte dann detaillierte Aussagen über die Migrationslängen und somit auch die Informationen über die Dimensionierung von Abdeckschichten.

Die Untersuchungen haben auch gezeigt, daß mit Hilfe der tiefenabhängigen Bleispur wichtige Informationen über die "Herkunft" der in der Bodenluft gemessenen Radonkonzentration gewonnen werden können. Solche Untersuchungen stellen in dieser Art ein Novum dar. Eine positive Bleispur in Tiefen von 1 oder 2 Metern signalisiert, daß Radon aus noch größeren Tiefen herantransportiert wird. Werden hohe Radonkonzentrationen in der Bodenluft gemessen und gleichzeitig am Meßpunkt eine negative Bleispur nachgewiesen, so bedeutet dies, daß eher sehr lokale Effekte, wie z.B. ein eingeschränkter Porenraum, die Konzentrationserhöhung bedingen und sich nicht zwangsweise aus einer hohen Radonkonzentration in der Bodenluft ein erhöhtes Radonpotential ableiten läßt. Damit ergibt sich eine zusätzliche Möglichkeit, das Radonrisiko von Verdachtsflächen oder Baugrundstücken einzuschätzen.

Um jedoch die Radonquellstärke einer Halde oder größeren Fläche abschätzen zu können, ist die Bestimmung der Bleispur von Schürfen von seit längerer Zeit abgedeckten Halden, IAA's oder Flächen zwar zielführend, doch der meßtechnische Aufwand ist hoch und somit kostentreibend. Außerdem ist zu berücksichtigen, daß auf einer frisch abgedeckten Halde oder sanierten Fläche sich noch keine deutlich nachweisbare Bleispur ausgebildet hat. Deshalb sind solche Flächen für die Bleispurmethode erst nach längeren Lagerungszeiten (> 30 Jahre) geeignet.

Die Exhalation des Radons hängt sowohl von den Boden- als auch den meteorologischen Parametern in unterschiedlichem Maße ab. Durch das komplizierte Wechselspiel aller Parameter läßt sich in Ausnahmefällen eine kausal bedingte Korrelation der Variation der Exhalationsrate mit einem der Parameter ableiten. Aus diesem Grund spiegelt die Messung der Radonexhalation an der Erdoberfläche den momentanen Zustand wider, der im Verlauf der Messung infolge diffusiver oder konvektiver Transportprozesse entsteht.

Eine anschauliche Demonstration des Einflusses der Bodentemperatur auf die Exhalationsrate liefert Abbildung 1, in der der Tagesgang der Exhalationsrate auf einem Haldenplateau dargestellt ist. Da die Exhalationsraten in den Morgenstunden, wenn die Boden- bzw. Lufttemperaturen noch verhältnismäßig niedrig sind, merklich höhere Werte annehmen, kann das Phänomen der Tagesgänge mit den thermodynamischen Kopplungen Halde↔Atmosphäre in Verbindung gebracht werden.

Wenn z.B. die Haldenoberfläche Temperaturwerte $T_H > 15\text{ °C}$ annimmt, wird die Exhalation infolge der konvektiven Transportvorgänge stark reduziert. In diesem Fall bildet sich kein aus der Haldenoberfläche in die umgebende Atmosphäre gerichteter Wärmestrom heraus, so daß eine abgeschwächte Exhalation zu erwarten ist. In den kühlen Morgenstunden oder nachts begünstigt der Wärmestrom die Exhalation, so daß ein starkes Anwachsen der Exhalation beobachtet wird.

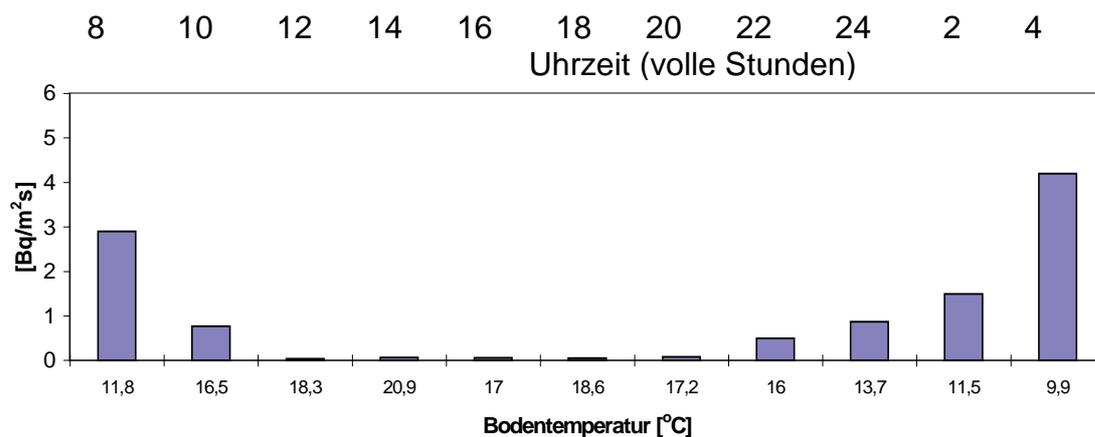


Abbildung 1: Abhängigkeit der Radonexhalationsrate von der Bodentemperatur auf dem Plateau einer Halde. Zum Vergleich ist die Uhrzeit für den Meßbeginn, gerundet auf volle Stunden, mit angegeben [3].

Den Tagesgängen sind die jahreszeitlichen Gänge überlagert, so daß sich insgesamt ein sehr komplexes Verhalten der Halden hinsichtlich der Radonexhalation ergibt. Die Situation wird des weiteren noch dadurch kompliziert, daß charakteristische Tages- und Jahregänge am Haldenfuß auftreten. Auf die Gesamtproblematik der Messung der Radonexhalation auf Halden und ihre physikalische Interpretation wird im Abschnitt 4.2 im Detail eingegangen.

Auch die Radonexhalation auf einer nicht anthropogen beeinflussten Fläche ohne Haldenstruktur (Wiese) liefert ausgeprägte Tagesgänge, die ebenfalls durch die Temperaturunterschiede zwischen der Erdoberfläche und der umgebenden Luft getriggert werden. Exhalationsraten, gemessen gegen Mittag und um Mitternacht, unterscheiden sich etwa um den Faktor 2 - 3. Auf diese Meßergebnisse wird im Abschnitt 4.4 eingegangen. Dieser Unterschied in den Exhalationsraten ist nicht vernachlässigbar und bei der Bewertung der Radonquellstärke ins Kalkül zu ziehen.

Um ein möglichst realistisches Abbild der Radonexhalation über die gesamte Halde oder Fläche zu erhalten, wird deshalb ein neues Verfahren vorgeschlagen. Es beruht auf einer Rastermessung der Radonkonzentration in der bodennahen Luft, wobei Kernspurdetektoren in einem Raster von z.B. 20 m x 20 m und verschiedenen Höhen von 10 cm bis 100 cm über der Geländeoberfläche angebracht werden. Durch dieses Screening-Verfahren wird über die gemessenen Radonkonzentrationen ein differenziertes Abbild der Radonquellstärkeverteilung über die gesamte Halde oder Fläche erhalten. Damit ist es möglich, einzelne Gebiete hinsichtlich ihrer Radonexhalation zu klassifizieren.

Die Grundidee dieser Verfahrensweise besteht darin, daß die mittlere Radonkonzentration, gemessen in 5 - 10 cm über der Oberfläche, hauptsächlich durch die lokalen Exhalationsvorgänge in einem sehr nahen Umkreis geprägt wird, während die Radonkonzentrationen in 1 - 1,5 m Höhe das Ergebnis eines Wechselspiels von komplizierten Transportvorgängen reflektieren. Dadurch sind aufgrund der Verdünnungseffekte die Radonkonzentrationen, gemessen in 1 - 1,5 m über einer Fläche, deutlich geringer als die in 5 - 10 cm über der Oberfläche gemessenen Werte.

Über Haldenoberflächen können Unterschiede von mehr als 2 Größenordnungen auftreten. Dies bedeutet z.B., daß Konzentrationswerten von 10.000 - 20.000 Bq/m³ über dem Erdboden lediglich 100 - 200 Bq/m³ in Höhen von 1 - 1,5 m gegenüberstehen. Letztere enthalten wegen der enormen Verdünnungseffekte weit weniger Information über die lokalen Exhalationsverhältnisse als Meßwerte, die unmittelbar über dem Boden gewonnen werden.

Daraus ergeben sich dann direkte, durch Meßwerte untersetzte, Schlußfolgerungen über die Dimensionierung der Abdeckung bzw. über Maßnahmen zur Minimierung der Kosten. Z.B. kann die Abdeckung von Gebieten geringer bzw. vernachlässigbarer Radonquellstärke nur noch unter dem Blickwinkel einer möglichst kostengünstigen Renaturierung dimensioniert werden, ohne dabei die radiologischen Probleme zu tangieren.

Des Weiteren können Sanierungseffekte von frisch abgedeckten Halden oder Flächen mit relativ geringem Aufwand kontrolliert und bewertet werden.

Diese Vorgehensweise ermöglicht auch, die Struktur der Haldenschüttung mit den lokalen Radonquellstärken zu korrelieren und daraus wichtige Anhaltspunkte für die Wirksamkeit der gegenwärtig vorhandenen Abdeckung zu erhalten. In Fällen, wo

z.B. eine signifikante Reduzierung der Exhalation beobachtet wird, kann mit Hilfe von zusätzlichen Erkundungen, z.B. Bohrungen oder Schürfen, ergründet werden, warum eine bestimmte Haldenschüttung hinsichtlich der Reduzierung der Exhalation besonders effektiv ist. Allein durch die Realisierung der Zusammenhänge vor Ort können weitere wichtige Kenntnisse für eine kostengünstige Dimensionierung der Abdeckung der Halde gewonnen werden, ohne daß z.B. komplizierte Transportmodelle, die zusätzliche Modellannahmen benutzen und zum Teil auf nicht genügend bekannten Transportparametern basieren, hinzugezogen werden müssen.

Wichtig ist, daß die Messungen aufgrund ihrer Spezifik, d.h. ihres integrierenden Charakters, alle Effekte, wie z.B. Tagesgänge, Regen, Schnee, Kälte- oder Wärmeperioden, Bewuchs etc. summarisch in der Radonkonzentration erfassen. Diese Messungen der Radonkonzentration in geringen Höhen müssen jedoch punktuell mit direkten Exhalationsmessungen flankiert werden, um die Radonkonzentration in geringer Höhe über der Haldenoberfläche hinsichtlich ihrer Aussage über die Exhalationsrate interpretieren bzw. kalibrieren zu können. Dies wird für singuläre Punkte nicht in jedem Fall möglich sein.

Eine direkte Bestimmung der Exhalation mit Hilfe der üblichen Anreicherungsbox (s. Abschnitt 3.1) liefert in der Regel nur eine Information über den momentanen Zustand der exhalierten Fläche. Wiederholungsmessungen am gleichen Tage zeigen bereits deutliche und nicht zu vernachlässigende Abhängigkeiten von der Tageszeit und den Witterungsbedingungen. Exhalationsmessungen, die sich über längere Zeiträume erstrecken und auch widrige Witterungsbedingungen einschließen, liegen erfahrungsgemäß nicht vor, so daß die Messungen, die mit Hilfe der Anreicherungsbox über einen Zeitraum von ca. 1 Stunde durchgeführt werden, Ausgangspunkt der Abschätzung der Radonquellstärke einer Fläche sind. Inwieweit diese singulären Messungen die tatsächlichen Verhältnisse widerspiegeln, kann nur durch Vergleiche mit Langzeitmessungen zur Radonexhalation, die aber ihrerseits sehr aufwendig sind, erhalten werden.

Die vorgeschlagene Messung der Radonkonzentration in geringen Höhen stellt diesbezüglich eine einfach zu realisierende Alternative dar, die durch weitere Maßnahmen zu flankieren ist, um die Exhalationsrate bzw. Radonquellstärke von Flächen genauer bestimmen zu können. Um z.B. Informationen über die Wirksamkeit einer Abdeckung zu gewinnen, liefert bereits die Gegenüberstellung von Radonkonzentra-

tionsmessungen in geringen Höhen über ab- und unabgedeckten Flächen wichtige Ausgangsdaten. Die Wiederholung dieser Messungen im Jahresrhythmus liefert dann z.B. auch die wichtigen Erkenntnisse über die Langzeitwirkung von Sanierungsmaßnahmen.

2 Einführung zum Radontransport

2.1 Transportgleichung für Radon

Der Radontransport erfolgt im Medium durch Diffusion und Konvektion, wobei im Falle der Konvektion die Mobilität der Bodenluft von bestimmendem Einfluß ist. Betrachtet man ein 1-dimensionales Modell, lautet die entsprechende Transportgleichung

$$\frac{\partial C(t,z)}{\partial t} = D' \frac{\partial^2 C(t,z)}{\partial z^2} - v' \frac{\partial C(t,z)}{\partial z} - \lambda C(t,z) + \lambda C_0. \quad (1)$$

Der erste Term auf der rechten Seite von (1) beschreibt die Diffusion des Radons, wobei der effektive Diffusionskoeffizient $D' = D/n$ die Porosität n des Mediums berücksichtigt und die Dimension $[m^2/s]$ hat. Der zweite Term beschreibt die Konvektion. Hier ist die Konvektionsgeschwindigkeit im Porenraum durch $v' = v/n$ gegeben. Der dritte Term auf der rechten Seite in (1) berücksichtigt den Zerfall des Radons während des Transportvorganges, wobei $\lambda = 2,1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ die Zerfallskonstante des Radons ist. Der vierte Term beschreibt die Radonproduktion, wobei die Produktionsrate im Porenraum durch

$$G_{Rn} \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right] = \lambda \cdot c_{Rn}^P = \lambda \cdot E \frac{\rho_d \cdot A_{Ra}}{n} = \lambda \cdot C_0 \quad (2)$$

gegeben ist. Letztere ist der Emanation E , der Trockendichte des Bodens ρ_d und der spezifischen Ra-226-Aktivität A_{Ra} des Bodens proportional.

Einen Überblick über Emanationskoeffizienten von Gesteinen und Böden gibt Tabelle 1, in Tabelle 2 sind Diffusionskoeffizienten und Porositäten von einigen typischen Bodenarten zusammengestellt.

Tabelle 1: Emanationskoeffizient verschiedener Gesteine und Böden [4]

Gesteine	Emanationskoeffizient E
Granit	0,33
Granodiorit	0,40
Gneis	0,14
Syenit	0,093
Pegmatit	0,043
Gabbro	0,036
Basalt	0,025
Quarzit	0,053
Sandstein	0,052
Mergel	0,026
Tuff	0,017
Kalk	0,016
Böden	
granitisch	0,46
kalkig	0,33
tonig	0,30
sandig	0,09
vulkanisch	0,49

Tabelle 2: Diffusionskoeffizienten und Porosität einiger wichtiger Bodentypen [4]

Bodentyp	Diffusionskoeffizient D [m²/s]	Porosität n
Ton, naß	$2 \cdot 10^{-10}$	0,45
schluffiger Ton, feucht	$7 \cdot 10^{-8}$	0,45
schluffiger Sand	$3 \cdot 10^{-7}$	0,40
Schluff	$2 \cdot 10^{-7}$	0,40
kiesiger, sandiger Lehm, 4% Wasser	$2,7 \cdot 10^{-6}$	0,35
gleichförmiger feiner Sand, 17% Wasser	$5 \cdot 10^{-7}$	0,30
gleichförmiger mittlerer Sand	$6 \cdot 10^{-6}$	0,25
reiner Kies	$7 \cdot 10^{-6}$	0,20

2.2 Lösung der Transportgleichung für ein unendlich ausgedehntes Medium bei ausschließlicher Betrachtung diffusiver Prozesse

Löst man die Diffusionsgleichung (1) ohne Berücksichtigung der Konvektionsprozesse ($v' = 0$) für den stationären Fall $\frac{\partial C(t,z)}{\partial t} = 0$ unter Berücksichtigung der Randbedingungen

$$C(z = 0) = 0, \quad (3)$$

$$C(z \rightarrow \infty) = C_0, \quad (4)$$

ergibt sich die funktionale Abhängigkeit für das Tiefenprofil in der Form

$$C(z) = C_0 \left(1 - e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D'}} z} \right), \quad (5)$$

d.h. $z = 0$ entspricht in diesem Fall der Bodenoberfläche, während anwachsende positive Werte von z bedeuten, daß größere Tiefen betrachtet werden. Für unterschiedliche Bodenarten ist in Abbildung 2 das so definierte Profil der Radonkonzentration in der Bodenluft als Funktion der Tiefe dargestellt.

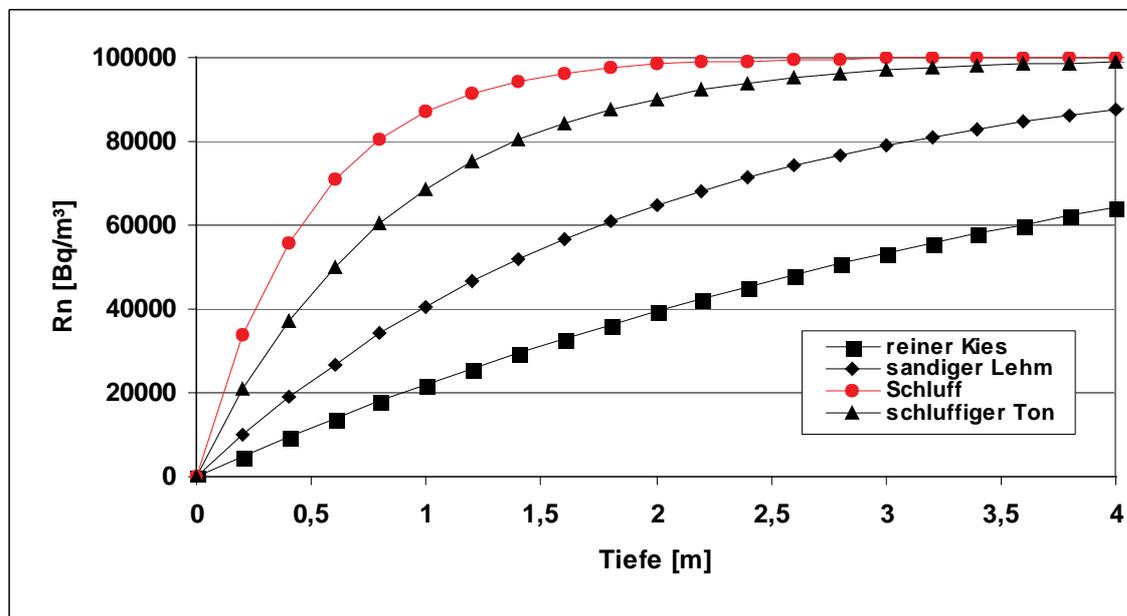


Abbildung 2: Radonkonzentration in Abhängigkeit von der Tiefe für 4 unterschiedliche Bodentypen, wobei der asymptotische Wert der Radonkonzentration in der Bodenluft 100 kBq/m^3 beträgt.

Es ist zu sehen, daß Schluff und schluffiger Ton eine nahezu ideale Sperrschicht für die Diffusion des Radons aus tieferen Schichten bilden. Die entsprechenden Diffusionslängen $L_D = \sqrt{D/(\lambda)}$ liegen bei 50 cm bzw. 30 cm. Kiesige Böden sind für Radon vergleichsweise durchlässig. Die entsprechenden Diffusionslängen liegen bei reinem Kies bei 4 m und bei sandigem Lehm bei 1,9 m.

2.3 Berechnung der Exhalationsrate

Aufgrund des Konzentrationsunterschiedes von Radon an der Erdoberfläche und in der Atmosphäre bzw. in Häusern erfolgt ein stetiger Transport von Radon aus tieferen Bodenschichten in die Atmosphäre. Dieser Radontransport wird als Exhalation bezeichnet und ist gemäß dem 1. Fick'schen Gesetz dem Konzentrationsgradienten proportional. Bezogen auf die Untersuchungsfläche ergibt sich die Exhalationsrate zu

$$J = -n \cdot D' \left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (6)$$

Bei Wahl der Randbedingung $C(z \rightarrow \infty) = C_0$ gilt $J = n \cdot D' \left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=0}$, so daß sich mit der Lösung (5) die Exhalationsrate zu

$$J = n \cdot C_0 \sqrt{\lambda D'} = E \cdot A_{Ra} \cdot \rho_d \sqrt{\lambda D'} \quad (7)$$

ergibt. Für reinen Kies und eine beispielhaft angenommene Aktivitätskonzentration von $C_0^{Rn} = 50 \text{ kBq/m}^3$ würde sich eine Exhalationsrate von $0,09 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^2 \text{s}}$ ergeben, während feuchter Ton eine etwa um den Faktor 10 geringere Exhalationsrate aufweisen würde. An dieser Stelle sei bemerkt, daß die mittlere Exhalationsrate in Deutschland etwa $0,015 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^2 \text{s}}$ beträgt, wobei lokal sehr große Unterschiede von mehr als 2 Größenordnungen auftreten können.

Im Fall der Berücksichtigung der Konvektion berechnet sich der Fluß, bezogen auf die Meßfläche, gemäß dem Fick'schen Gesetz nach

$$J = n \left[v \cdot C - D' \frac{\partial C}{\partial z} \right], \quad (8)$$

wobei v die Konvektionsgeschwindigkeit ist.

Ursachen für das Auftreten von nicht zu vernachlässigenden konvektiven Strömungen können z.B. Temperatur- oder Druckunterschiede am Übergang Erdoberfläche-Atmosphäre sein. Nach dem Gesetz von Darcy ist die Konvektionsgeschwindigkeit dem Druckunterschied proportional:

$$v' = \frac{v}{n} = -\frac{k}{n\eta} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (9)$$

Hier ist k die Permeabilität des Bodens und $\eta = 1,8 \times 10^{-5} \text{ Pa s}$ steht für die dynamische Viskosität der Luft. Für feinsandige Böden ist die Permeabilität etwa 10^{-12} m^2 , so daß sich bei einem Druckunterschied von $\Delta P = 5 \text{ Pa/m}$ und einer Porosität $n = 0,4$ eine konvektive Geschwindigkeit von $v = 7 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ergeben würde. Definiert man eine effektive Diffusionsgeschwindigkeit mit

$$v_D = \sqrt{\lambda D'} \quad (10)$$

so würde die obige konvektive Geschwindigkeit mit einer Diffusionskonstante von ca. $D' = 2,5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ zu vergleichen sein.

Betrachten wir beispielhaft eine Schicht unendlicher Mächtigkeit, dann folgt aus (1) mit den Randbedingungen

$$C(z = 0) = 0 \quad (11)$$

$$C(z \rightarrow \infty) = C_0 \quad (12)$$

die Lösung

$$C(z) = C_0 \left(1 - e^{-\left(\frac{v'}{2D'} + \sqrt{\frac{v'^2}{4D'^2} + \frac{\lambda}{D'}} \right) z} \right) \quad (13)$$

Der Fluß an der Oberfläche ist

$$J = n \cdot C_0 \left(\frac{v'}{2} + \sqrt{\frac{v'^2}{4} + \lambda D'} \right) \quad (14)$$

und für die beiden Grenzfälle verschwindender Konvektion bzw. Diffusion ergibt sich

$$J = C_0 v \quad (D' \rightarrow 0) \quad (15)$$

und

$$J = C_0 \sqrt{\lambda D'} \quad (v' \rightarrow 0). \quad (16)$$

In der Abbildung 3 ist illustriert, daß bei vorgegebener Diffusionskonstante D' die Exhalationsrate durch Konvektionsprozesse dominiert wird, wenn die Konvektionsgeschwindigkeit $v' \geq 10^{-5}$ m/s ist.

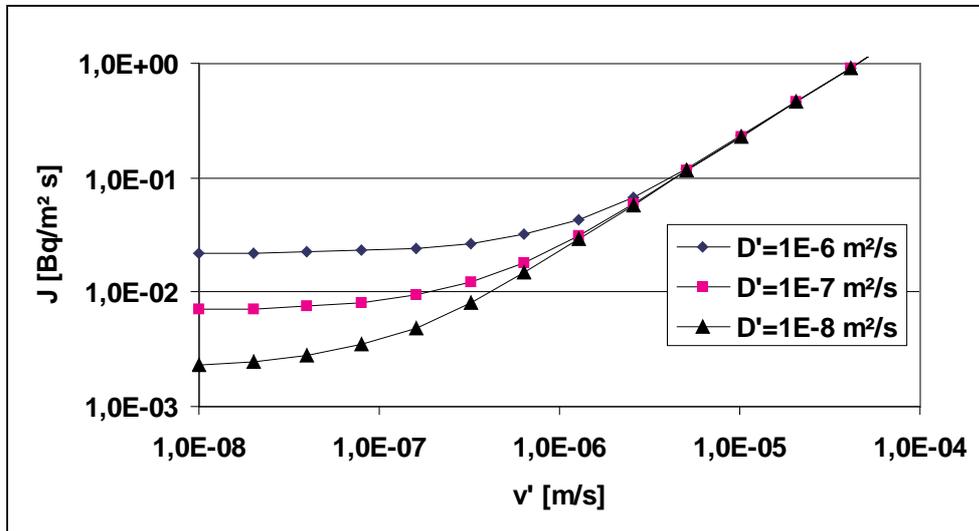


Abbildung 3: Exhalationsrate J als Funktion der Konvektionsgeschwindigkeit v' bei vorgegebener Diffusionskonstante D' . Die Radonkonzentration im Boden beträgt 50 kBq/m^3 .

Die Modifizierung der Radonbodenprofile in Abhängigkeit von der Größe der Konvektionsgeschwindigkeit ist in der Abbildung 4 illustriert.

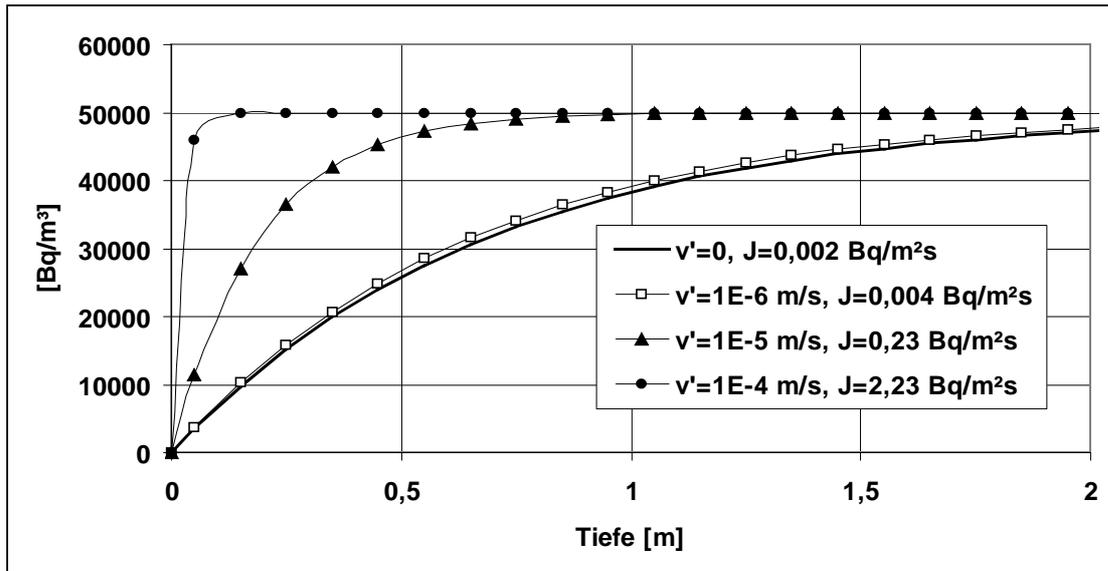


Abbildung 4: Radonkonzentrationsprofile in einer Bodenschicht unendlicher Mächtigkeit für verschiedene Konvektionsgeschwindigkeiten v' . Der Übergang zur Atmosphäre ist bei der Tiefe 0. Die fixierte Diffusionskonstante ist $D' = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Die asymptotische Radonkonzentration in der Bodenschicht beträgt 50 kBq/m^3 .

Es ist deutlich zu erkennen, daß bei Konvektionsgeschwindigkeiten im Bereich von $v' > 0,00001 \text{ m/s}$ die Radonkonzentration in der Bodenluft für Tiefen unterhalb 0,3 - 0,5 m bereits konstant bleibt und das Profil in eine fast rechteckige Form übergeht. Zu bemerken ist, daß Formel (14) nur anwendbar ist, wenn die Konvektion in Richtung der Diffusionsbewegung wirkt. Im entgegengesetzten Fall gilt

$$J = n \cdot C_0 \left(-\frac{v'}{2} + \sqrt{\frac{v'^2}{4} + \lambda D'} \right), \quad (17)$$

so daß im Bereich der Konvektionsgeschwindigkeiten von $v = 10^{-5} \text{ m/s}$ Unterschiede in den Exhalationsraten von ca. 2 Größenordnungen in Abhängigkeit von der Richtung von v auftreten können. Dieser Sachverhalt ist beispielhaft in Abbildung 5 illustriert.

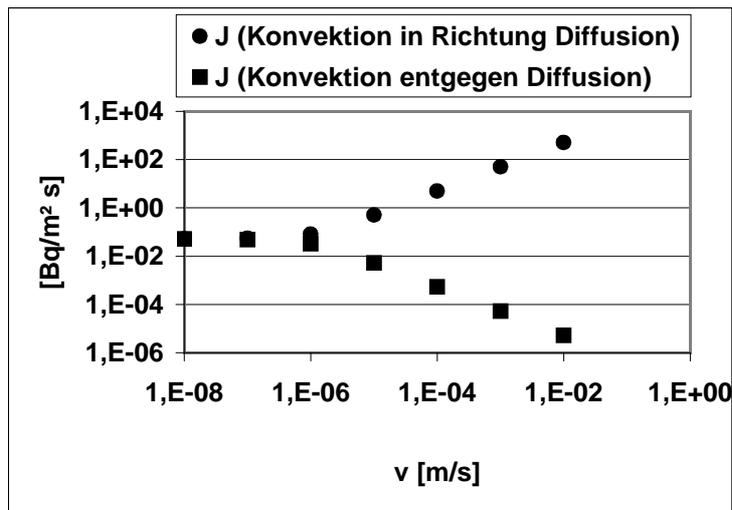


Abbildung 5: Exhalationsraten in Abhängigkeit von der Konvektionsgeschwindigkeit und ihrer Richtung. Die anderen Parameter in den Gleichungen (14) bzw. (17) sind: $D'=5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $n=0,3$ und $C_0=125 \text{ kBq}/\text{m}^3$.

Zu bemerken ist, daß die oben abgeleiteten Beziehungen nur für ein unendlich ausgedehntes System gelten. Insbesondere ist bei endlichen Systemen im Fall einer starken Konvektion zu berücksichtigen, daß z.B. in Halden die Strömungslänge vergleichbar mit der Haldenhöhe ist. In dem Fall ist die einfache Beziehung (14) nur noch bedingt anwendbar [5].

3 Messung der Radonexhalation

3.1 Statische Methode

Zur Messung der Radonexhalationsrate von Halden oder Betriebsflächen sowie Baugrundstücken wird üblicherweise nachfolgend beschriebenes Meßverfahren angewendet. Eine Anreicherungsbox, d.h. ein zylindrisches Gefäß mit einem Durchmesser von 40 - 50 cm und einer Höhe von 15 - 50 cm, wird auf die zu untersuchende Fläche aufgesetzt, ohne dabei die natürliche Struktur des Untergrundes zu verändern. Mit Boden oder Lehm wird die Box von außen abgedichtet. Die Umwälzung der Luft von der Anreicherungsbox in die Meßkammer wird durch eine Pumpe realisiert. Eine schematische Darstellung dieser Meßanordnung, die abgekürzt als Umwälzverfahren bezeichnet wird, ist der Abbildung 6 zu entnehmen. Als Radon-Monitor wird bei IAF - Radioökologie das Meßgerät AlphaGUARD von Genitron benutzt.

Zur Anwendung kommt auch ein Verfahren, das in vielen Fällen einfacher zu handhaben ist. In dem Fall befindet sich das AlphaGUARD innerhalb der Anreicherungsbox, wobei das ^{222}Rn auf diffusivem Wege über ein großflächiges Glasfaserfilter, das die Radonfolgeprodukte zurückhält, in die Ionisationskammer gelangt (s. Abbildung 6).

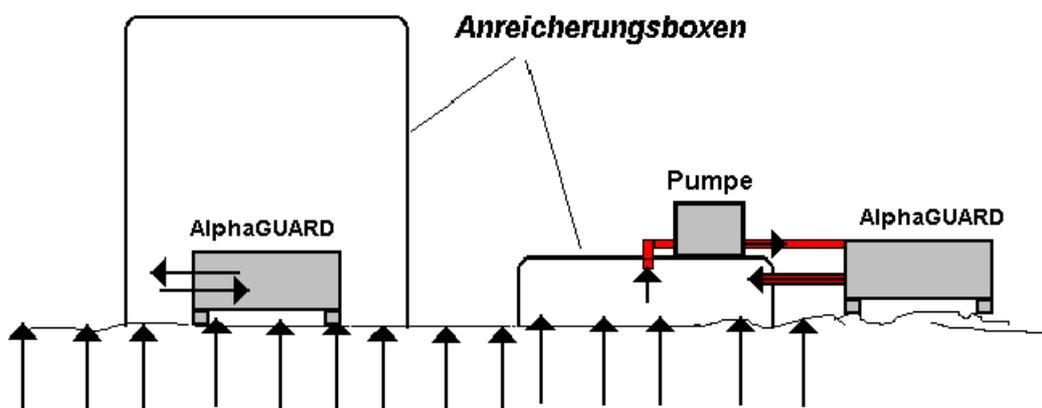


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Diffusions- und Umwälzmeßverfahrens

Die zeitliche Entwicklung der Radonkonzentration $c(t)$ in der Anreicherungsbox ergibt sich aus der Lösung von

$$\frac{d}{dt}c(t) = J\frac{F}{V} - \lambda c(t), \quad (18)$$

wobei der erste Term die Exhalationsrate [Bq/m²·s] der Fläche F [m²] beschreibt und der zweite Term den Zerfall des Radons in der Box mit einem Volumen V [m³] berücksichtigt. Ist anfänglich die Radonkonzentration in der Box gleich null, ergibt sich die Lösung in der Form

$$c(t) = J\frac{F}{V\lambda}(1 - e^{-\lambda t}), \quad (19)$$

die für typische Anreicherungszeiten von 1 Stunde, d.h. $t \ll 1/\lambda$, durch den einfachen Ausdruck

$$c(t) \approx J\frac{F}{V}t \quad (20)$$

approximiert werden kann.

Für zylindrische Gefäße ist $V = F \cdot H$, so daß sich die Exhalationsrate J aus dem Produkt von Zylinderhöhe H und Anstiegskoeffizient a ,

$$J = H \cdot a, \quad (21)$$

ergibt^a. Die einfache Beziehung (21) gilt bei rein diffusiven Exhalationsprozessen nur, wenn die sich in der Box entwickelnde Radonkonzentration gegenüber der im Porenraum herrschenden asymptotischen Radonkonzentration C_0 (4) zu vernachlässigen ist. Bei konvektiv dominierten Exhalationsprozessen gilt diese Einschränkung nicht. Es sind jedoch mögliche Rückdiffusionsprozesse bei hohen Radonkonzentrationen möglicherweise zu berücksichtigen.

3.2 Quasikontinuierliches Meßregime

Ein generelles Problem der oben beschriebenen und bis dato angewandten Boxmethode besteht darin, daß sie nur einen momentanen Überblick über die Radonexhalation liefert, d.h. über eine Meßzeit von ca. 1 Stunde. Damit ist diese Methode zur Langzeitüberwachung der Radonexhalation nicht geeignet. Es ist, wie oben erläutert, nicht sinnvoll, die Messung auf mehrere Stunden auszudehnen, da dann Rückdiffu-

^aFalls keine zylindrischen Anreicherungsgefäße benutzt werden, ist die effektive Höhe zu betrachten.

sionsprozesse unterhalb der Abdeckglocke mit ins Kalkül zu ziehen sind und die tageszeitlichen Effekte nicht erfaßt werden.

Um während der Messung die Einflüsse von Niederschlägen (Regen, Schnee) und anderen wichtigen Einflußgrößen (Wind, Temperaturgradienten, Tag/Nacht-Unterschiede) in entsprechender Weise mit einschließen zu können, sind im Rahmen des Forschungsvorhabens zwei Meßvorrichtungen (Prototypen) gebaut worden, mit denen die Radonexhalation in einem quasikontinuierlichen Regime bestimmt werden kann.

Die Meßvorrichtungen ähneln im prinzipiellen Aufbau der Box in Abbildung 6. Der Unterschied ist, daß der Deckel der Box in Abhängigkeit von der Zeitvorwahl für eine bestimmte Zeit geöffnet und geschlossen ist. Wichtig ist, daß der Verschlußmechanismus so eingerichtet ist, daß eine Radondichtheit erreicht wird. Die Boxen haben eine Aufsatzfläche von je 0,4 m² und ein Fassungsvermögen von 184 l und 102 l. Während der gesamten Meßperiode wird der Radonmonitor nicht abgeschaltet, so daß neben der Messung des Radonkonzentrationsanstiegs bei geschlossenem Deckel auch das Abklingen der Radonkonzentration auf den Umgebungspegel kontrolliert werden kann.

Des weiteren erfolgt durch den AlphaGUARD die kontinuierliche Messung der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und des Luftdrucks. Die Bodentemperatur wird durch eine separate Sonde in ca. 20 cm Tiefe im Stundenrhythmus gemessen. Fotos dieser Meßeinrichtungen sind im Abschnitt 4.2.3 gegeben.

Bei der Box 1 öffnet sich der Deckel nur etwa soweit, daß während der Öffnungsphase kein Regenwasser bzw. auch Schnee (Winterbetrieb) ins Innere gelangen kann. Durch Vergleich mit den Ergebnissen der parallel arbeitenden Box 2, bei der sich der Deckel vollständig öffnet, kann somit eine Information über das Absinken der Exhalation infolge der Durchfeuchtung der oberen Bodenschicht und des allmählichen Angleichens der Exhalationsraten nach Verdunstung des Wassers gewonnen werden.

Im Verlauf der Untersuchungen hat sich folgendes zu bevorzugendes Meßregime herausgestellt: "Sammlung" von Radon in der Box über einen Zeitraum von 3 Stunden, gefolgt von einer Phase von 1 Stunde, in der die Box geöffnet ist. In diesem Regime werden täglich 6 Exhalationsraten bestimmt.

Beispielhaft sind in der Abbildung 7 die Ergebnisse einer quasikontinuierlichen Exhalationsmessung auf einer Wiese dargestellt. Es ist klar zu erkennen, daß deutlich ausgeprägte Tagesgänge auftreten. Gegen Mitternacht, wenn die Lufttemperatur einen Minimalwert erreicht, ist die Exhalationsrate am größten, während sie zur Mittagszeit am niedrigsten ist. Die mittlere Radonexhalationsrate liegt bei $J=0,035 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ und ist somit etwa doppelt so hoch wie der Mittelwert für Deutschland, wobei verschiedene geologische Regionen mit eingeschlossen sind. Qualitativ ähneln diese Ergebnisse denen von einer Halde (s. Abbildung 1), doch sind die Unterschiede im Exhalationsverhalten nicht so deutlich ausgeprägt. Im Abschnitt 4.4 wird auf diese Ergebnisse und das Wechselspiel zwischen Exhalationsrate und Temperaturänderungen detaillierter eingegangen.

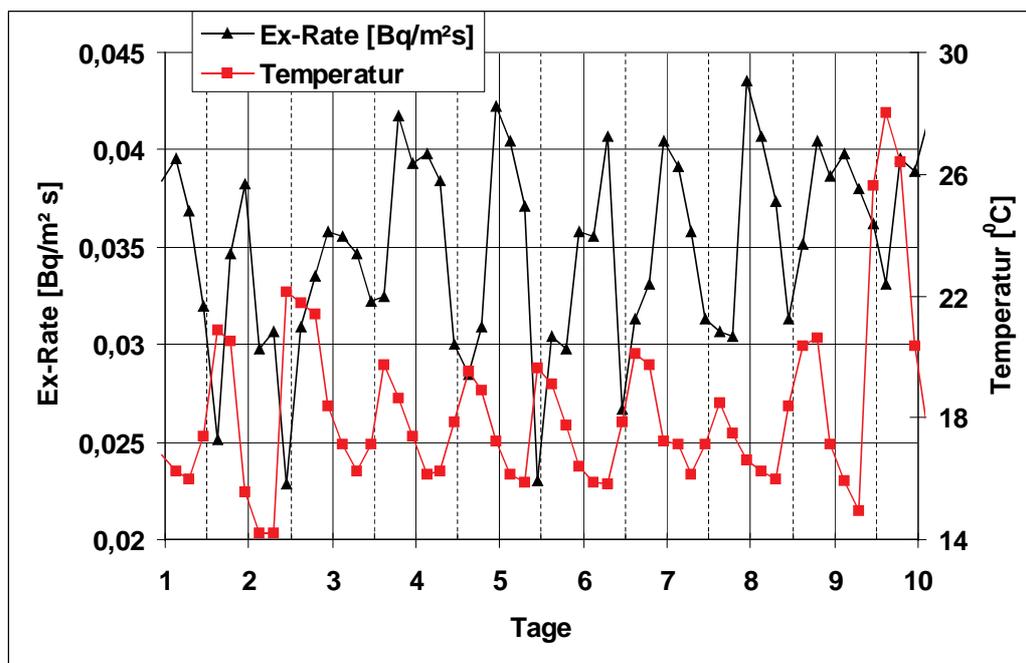


Abbildung 7: Abhängigkeit der Radonexhalationsrate von der Lufttemperatur im Zeitraum von 10 Tagen. Der Meßrhythmus beträgt 4 Stunden. Die gestrichelten senkrechten Linien entsprechen immer 12 Uhr mittags. Der Meßpunkt befindet sich auf dem Betriebsgelände von IAF - Radioökologie GmbH Dresden.

Es gilt hier festzuhalten, daß die Ergebnisse in der Abbildung 7 veranschaulichen, daß selbst auf anthropogen unbeeinflussten Flächen eine Schwankung der Exhalationsrate um den Faktor 2 - 3 in Rechnung zu stellen ist, wobei die niedrigsten Raten im Zeitraum von ca. 10 - 14 Uhr gemessen werden. Solche Abhängigkeiten sind u.E.

in dieser Form noch nicht publiziert worden. Ähnliche Abhängigkeiten der Radonexhalation vom Temperaturunterschied zwischen Boden und Atmosphäre wurden auch in speziell aufgebauten Versuchssäulen (Höhe 2 m, Querschnitt 1 m²), gefüllt mit Sand und Tailings, erhalten [6].

Dieses Beispiel zeigt, daß eine Einzelmessung der Exhalationsrate nur eine begrenzte Aussagekraft über die Radonexhalation liefert. Die in der Abbildung 7 dargestellten Effekte der Variation der Exhalation in Abhängigkeit der Tageszeit und der Umgebungstemperatur hätten ohne eine quasikontinuierliche Messung nicht extrahiert werden können.

4 Messung der Radonkonzentration in der bodennahen Luft in Höhen von 5 cm bis 1,5 m

4.1 Vorbemerkung zur Herangehensweise und Zielstellung

Erste Messungen in diesem Kontext, d.h. in geringen Höhen von ca. 5 - 50 cm sind durch IAF - Radioökologie bei der Untersuchung des Exhalationsverhaltens der Halde 366 in Schlema (1994) [7] und der Halde B in Dresden-Coschütz (1997) [8] durchgeführt worden. Des weiteren wurden bei IAF - Radioökologie Versuche durchgeführt, die Abnahme der Radonkonzentration in der bodennahen Atmosphäre experimentell zu untersuchen [9].

Diese ersten Messungen waren nicht ausgelegt worden, um rasterartig die Radonkonzentration in geringen Höhen und über einen längeren Zeitraum zu bestimmen. Dies wurde erst durch das BfS an einer Halde bei Johannegeorgenstadt in Kenntnis der bisher erhaltenen Resultate und im Zuge der fachlichen Betreuung zu dem in diesem Bericht beschriebenen Forschungsthema durchgeführt. Auf diese Untersuchungen wird im Abschnitt 4.2 eingegangen.

Eine weitere rasterartige Messung der Radonkonzentration in geringen Höhen wurde auf der Halde B in Dresden-Coschütz unternommen. Die Ergebnisse der Auswertung dieser Messung wird im Abschnitt 6 dargestellt. Sie kann als Prototyp einer Auswertung von Feldmessungen dienen.

Es zeigte sich, daß auch gewöhnliche, nichthaldenartige Flächen ausgeprägte Tagesgänge der Radonexhalation aufweisen. Diese werden im Abschnitt 4.4 näher untersucht und mit entsprechenden Messungen der Radonkonzentration in geringen Höhen in Beziehung gesetzt.

4.2 Messung des BfS in Johannegeorgenstadt (Trockendamhalde Steigerdorf)

4.2.1 Radon-Freiluftkonzentration in 1,5 m Höhe

Das Bundesamt für Strahlenschutz betreibt seit Beginn der 90er Jahre in den durch intensiven Alt- und Uranbergbau gekennzeichneten Regionen von Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen Meßnetze zur Ermittlung von Langzeit-Radonkonzentrationen in der freien Atmosphäre. Ziel dieser Untersuchungen ist die Bestimmung der durch die Radonfreisetzung aus bergbaulichen Hinterlassenschaften, wie z.B. Halden, Absetzanlagen, Abwetterschächte u.ä. bedingten Strahlenexposition.

Im Rahmen dieser Untersuchungen sind z.B. in der Region Johannegeorgenstadt (Erzgebirge) erhöhte Radonkonzentrationswerte gemessen worden. Die Messungen wurden in 1,5 m Höhe mit Festkörperspurdetektoren durchgeführt [10].

Beispielhaft sind in der Abbildung 8 die Meßergebnisse für einen Meßpunkt dargestellt, der sich auf einem bebauten Grundstück am Fuß der Trockendammschalde im Ort Steigerdorf bei Johannegeorgenstadt befindet.

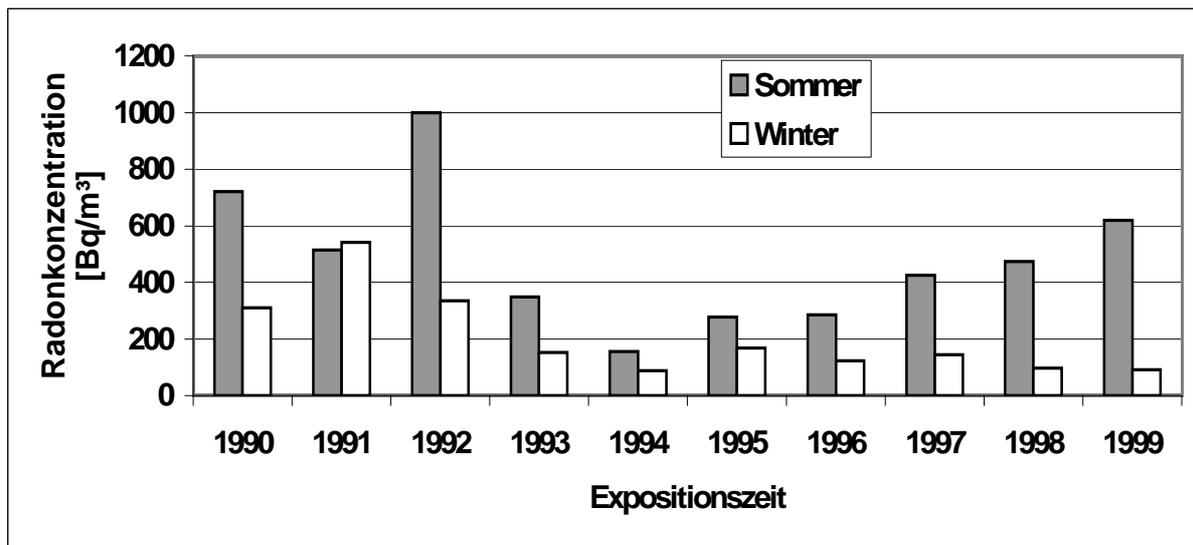


Abbildung 8: Radon-Freiluftkonzentration in 1,5 m Höhe über dem Boden am Fuß der Trockendammschalde für die jeweiligen Winter- (1. und 4. Quartal) und Sommerhalbjahre (2. und 3. Quartal)

Diese ca. 60 m hohe Halde ist Teil eines Damms einer industriellen Absetzanlage, die an das locker bebaute Siedlungsgebiet des Steigerdorfes angrenzt. Die ausgewählten Ergebnisse zeigen, daß mit einer Ausnahme für das Jahr 1991 die im Sommerhalbjahr gemessenen Radonkonzentrationen signifikant höher liegen, als die der Wintermonate. Dieser Sachverhalt weist darauf hin, daß am Haldenfuß durch die jahreszeitlichen Temperaturunterschiede zwischen Haldenkörper und Umgebungstemperatur konvektive Prozesse getriggert werden, die zu einer erhöhten Radonexhalation führen.

Die zwischenzeitliche Abnahme der Radonkonzentration in den Jahren 1994/95 ist auf Sanierungsarbeiten hinsichtlich der Bergsicherung zurückzuführen. Dabei wurde die Haldenböschung um mehrere Meter zurückgesetzt, begradigt und mit 10 bis 15 cm mächtigem lehmhaltigen, kulturfähigen Material abgedeckt. Die Ergebnisse

der Abbildung 8 zeigen jedoch, daß bereits 1 Jahr nach dieser Sicherungsmaßnahme ein stetiger Anstieg der Radonkonzentrationswerte in den Sommerhalbjahren festzustellen ist. Um die Ursachen dieses Anstiegs der Radonkonzentration zu ermitteln wurde das Meßnetz ausgebaut und zusätzlich die Radonkonzentration in 15 cm Höhe über der Haldenoberfläche bestimmt.

Dieser Meßnetzerweiterung lag als Grundgedanke zum parallel durchgeführten Förderprojekt zugrunde, daß mit den derzeit bekannten Verfahren keine Aussagen zum Verhalten der Radonexhalation auf großen Flächen über längere Zeiträume gewonnen werden. In dem zu untersuchenden Bereich wurde deshalb mit einer einfach zu realisierenden Alternative, die auf der Langzeitmessung der Radonkonzentration in ca. 15 cm Höhe über der Oberfläche basiert, versucht, die erforderlichen Informationen über die Radonaustrittspfade zu gewinnen.

Im Ergebnis der Untersuchungen zeigte sich, daß es mit diesem Verfahren möglich ist, ein räumlich und zeitlich differenziertes Abbild der Radonquellstärkeverteilung über den gesamten Bereich zu gewinnen und die Radonexhalation einzelner Gebiete zumindest ausreichend genau zu klassifizieren.

Im Einzelnen wurden Festkörperspurdetektoren in drei Profilen im Böschungsbereich der Halde jeweils vom Haldenfuß bis zum -plateau installiert (insgesamt 21 Detektoren). Der Wechsel der Detektoren (Makrofol) erfolgte in einem Rhythmus von ca. 6 Wochen. Die Auswertung der Spuren wurde im BfS vorgenommen.

In der Abbildung 9 ist die Lage des Meßprofils auf der Trockendammhalde im Steigerdorf skizziert. Die Abbildung 10 liefert eine schematische Darstellung des Aufbaus der Halde.



Abbildung 9: Skizzierung des Messprofils auf der Trockendammhalde im Steigerdorf

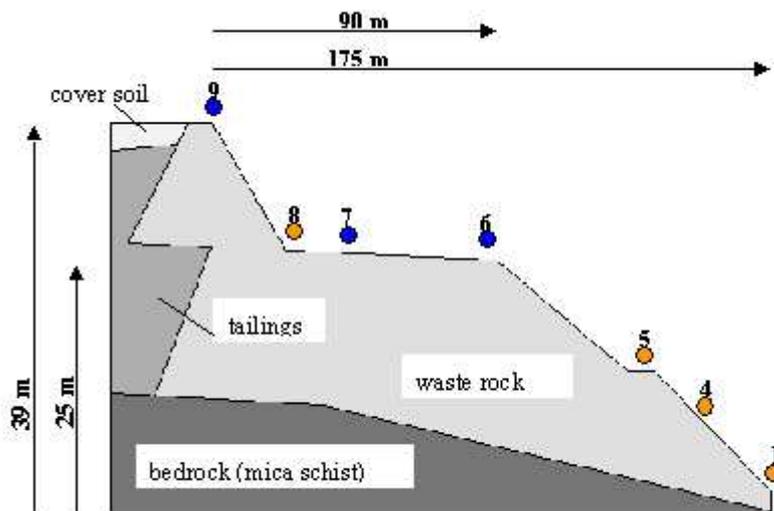


Abbildung 10: Skizzierung des Aufbaus der Trockendammhalde im Steigerdorf

Zusätzlich wurden mit aktiven Meßsystemen (AlphaGUARD) an mehreren Tagen Kurzzeitmessungen der Radonkonzentration in Bodennähe durchgeführt. Diese

dienten sowohl zur Erkundung der flächenhaften Verteilung der Radonfreisetzung als auch zur Ermittlung von Tagesgängen. Diese Messungen wurden durch quasikontinuierliche (4-Stundenrhythmus) Messungen der Radonexhalation am Haldenfuß und auf dem -plateau über einen Zeitraum von einer Woche ergänzt. Letztere dienten vor allem zur Interpretation der gemessenen Langzeit-Radonkonzentrationen in Bodennähe. Auf diese Untersuchungen wird im Abschnitt 4.2.3 ausführlich eingegangen.

4.2.2 Warum Messung der Radonkonzentration in geringen Höhen?

In der Abbildung 11 ist eine schematische Darstellung der Meßpunkte des mittleren der 3 Meßprofile vom Haldenfuß bis zum Haldenplateau der Trockendammhalde in Johannegeorgenstadt (Erzgebirge) gegeben. An den gekennzeichneten Meßpunkten wurde die Radonkonzentration in der bodennahen Luft in 10 cm und 1,5 m Höhe gemessen. Der Abstand von einem Meßpunkt zum anderen betrug ca. 20 m, während der Abstand der parallel angelegten Profile ebenfalls etwa 20 m betrug.

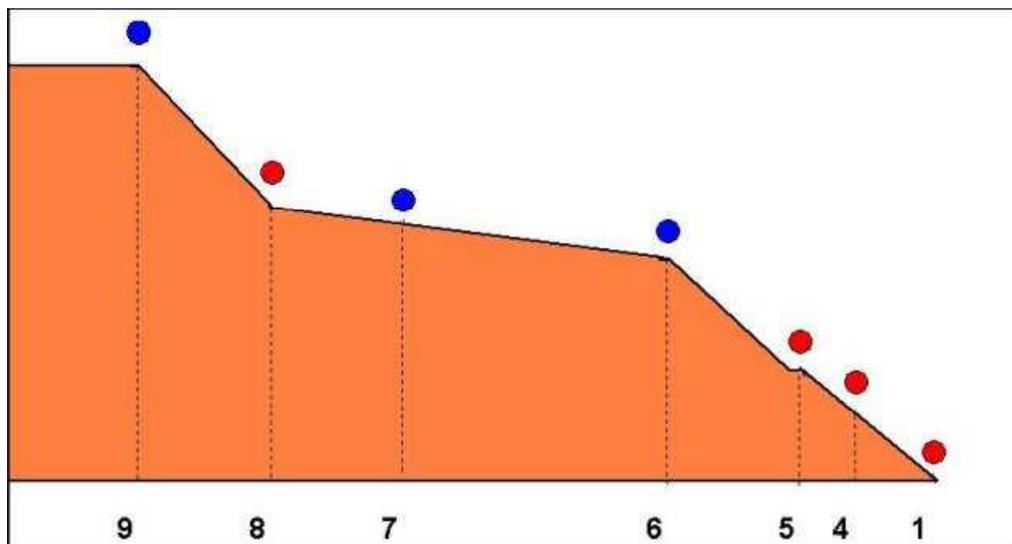


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Meßpunkte des mittleren der 3 Meßprofile vom Haldenfuß bis zum Haldenplateau der Trockendammhalde in Johannegeorgenstadt (Erzgebirge).

Die Ergebnisse der Radonkonzentrationsmessung sind in der Abbildung 12 dargestellt. Sie zeigen zwei sehr interessante Aspekte. Am Haldenfuß ist die Radonkonzentration in den Sommermonaten in 10 cm Höhe über **eine Größenordnung höher** als die in 1,5 m gemessene Radonkonzentration. Des weiteren ist zu beobachten,

daß in den Wintermonaten die Radonkonzentrationen in beiden Höhen in etwa übereinstimmen und etwa eine Größenordnung geringer sind als die in 10 cm Höhe während der Sommermonate.

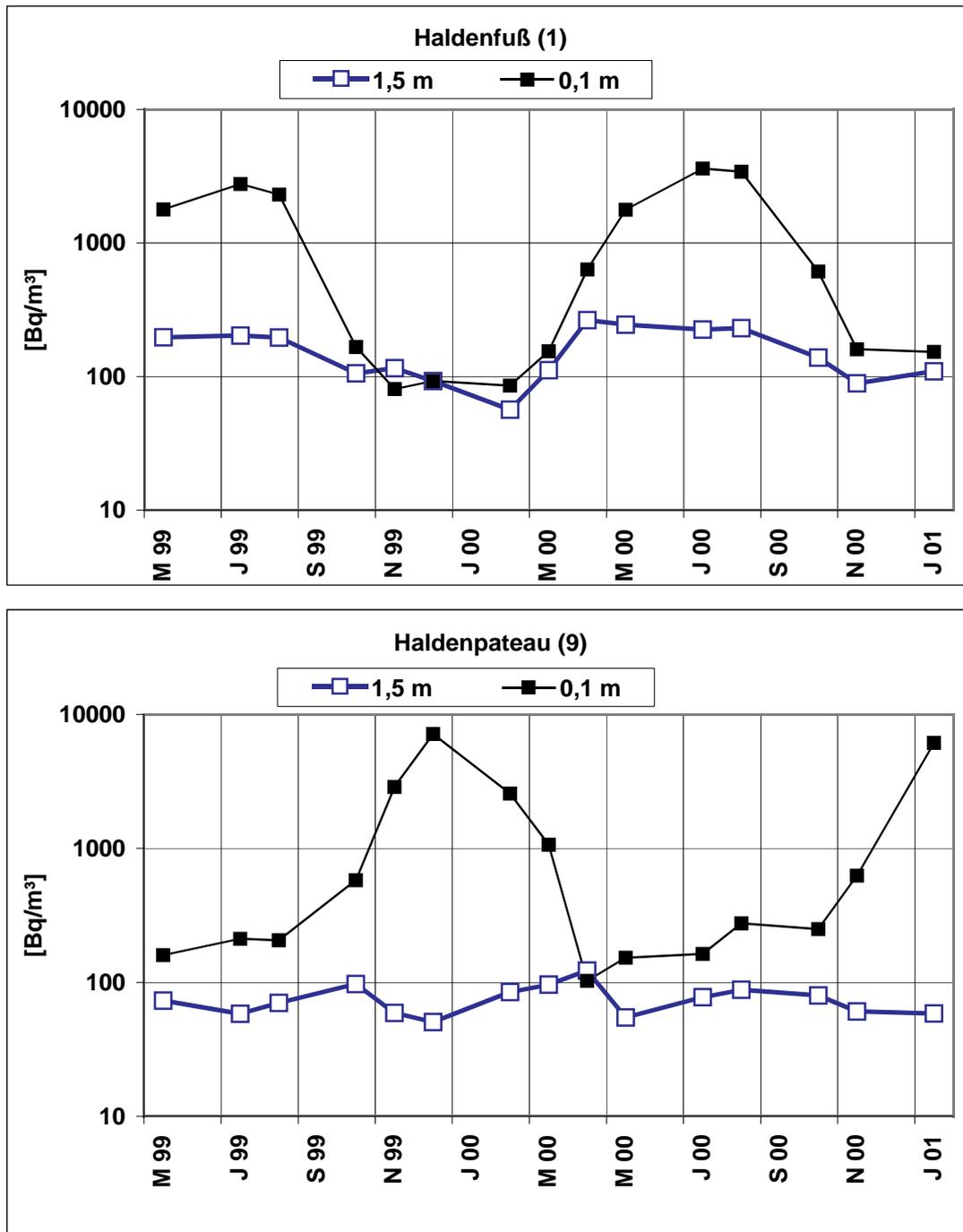


Abbildung 12: Radonkonzentrationen in 10 cm und 1,5 m Höhe über der Haldenoberfläche im Bereich des Haldenfußes und des Haldenplateaus von Mai 1999 bis Januar 2001

Auf dem Haldenplateau stellt sich die Situation ähnlich dar, doch werden dort die höchsten Radonkonzentrationen im Winter in 10 cm Höhe über der Haldenoberfläche gemessen. Gegenüber den Sommermonaten beträgt die **Erhöhung der Radonkonzentration fast zwei Größenordnungen**, d.h. der Sommer-Winter-Effekt ist etwas stärker ausgeprägt als der am Haldenfuß.

Vergleicht man die Radonkonzentrationen in 1,5 m Höhe mit denen in 10 cm Höhe, so ist deutlich zu erkennen, daß die in 1,5 m Höhe gemessenen Werte auf niedrigem Niveau weit weniger variieren als die in 10 cm Höhe gemessenen Werte. In anderen Worten, die in 10 cm Höhe gemessenen Radonkonzentration reflektieren zu einem bestimmten Grad das Exhalationsverhalten der Halde wesentlich nachhaltiger als Messungen in 1,5 m Höhe, die aufgrund der Verdünnungseffekte die lokalen Eigenschaften hinsichtlich der Radonexhalation nur sehr begrenzt abbilden.

Das Abbilden der lokalen Exhalationssituation wird noch sichtbarer verdeutlicht, wenn die Ergebnisse der Radonkonzentrationsmessung in 10 cm Höhe an den anderen Punkten der Halde gegenübergestellt werden. In der Abbildung 13 sind die Meßpunkte des mittleren Profils zusammengefaßt, die in ihrem Exhalationsverhalten denen am Haldenfuß ähneln. Es ist klar zu erkennen, daß sich die in 10 cm Höhe gemessenen Radonkonzentrationen nahezu synchron verhalten, obwohl sie bis mehr als 100 m auseinanderliegen. Dies trifft in gleicher Weise auch auf die Meßpunkte des rechten und linken Profils zu, die hier nicht dargestellt sind. Diese Meßpunkte weisen als hervorstechende Charakteristik auf, daß im Sommer die Radonkonzentration um mehr als eine Größenordnung (Faktor 20 - 30) gegenüber der Wintermonate erhöht ist.

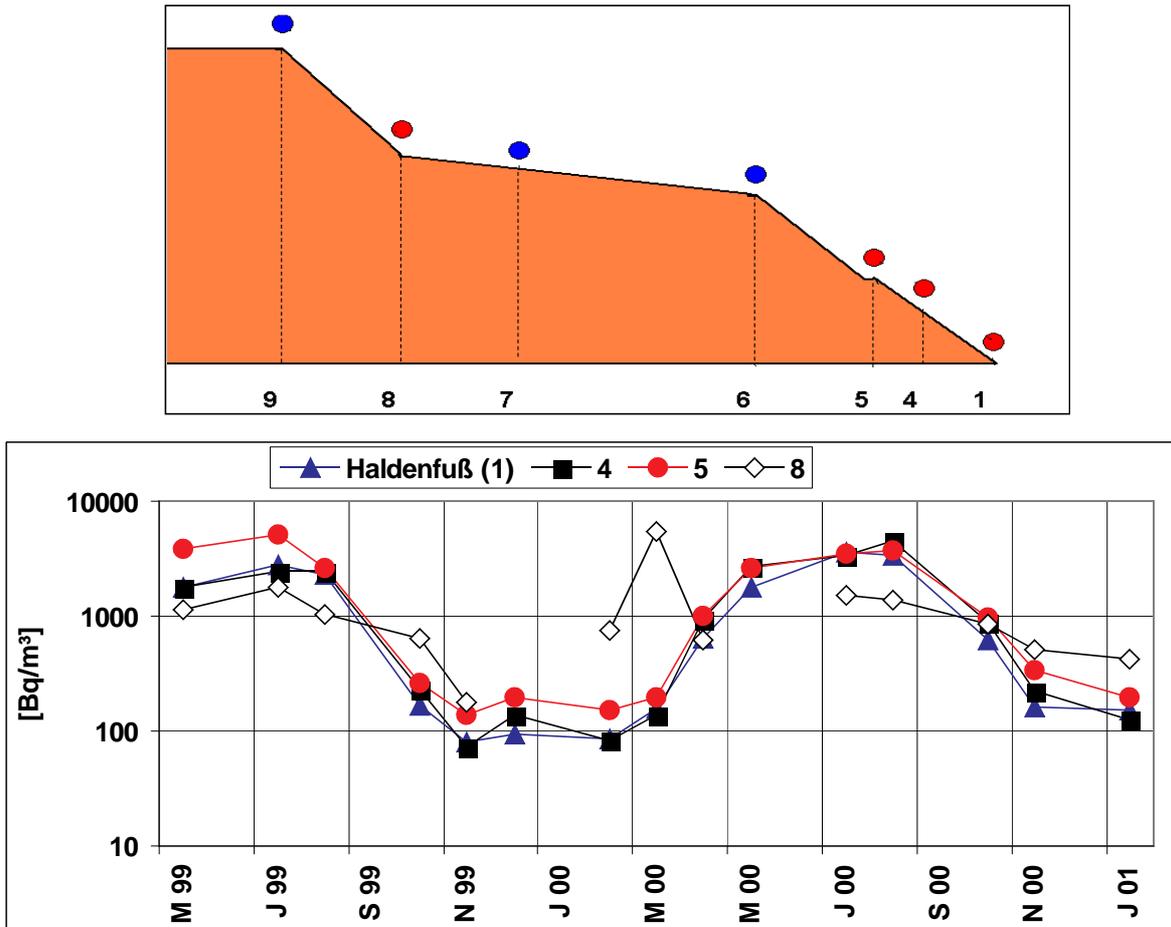


Abbildung 13: Zusammenstellung der Meßergebnisse der Radonkonzentration in 10 cm Höhe für Meßpunkte, deren zeitlicher Verlauf dem am Haldenfuß ähnelt.

Die Situation stellt sich in Abbildung 14 ähnlich für die Meßpunkte dar, die als plateauähnlich bezeichnet werden können. Der Unterschied zu Abbildung 13 besteht darin, daß die Konzentrationsmaxima etwa um ein halbes Jahr verschoben sind, d.h. sie treten in den Wintermonaten auf, wobei die Unterschiede zwischen Maximalwerten im Winter und Minimalwerten im Sommer bis zu 2 Größenordnungen betragen. Würde man Tagesmessungen miteinander vergleichen, wäre der Unterschied zwischen Sommer und Winter noch viel größer, da, wie im Abschnitt 4.3 näher erläutert, in den kühlen Sommernächten, vergleichsweise wie im Winter, die Radonexhalation stark erhöht sein kann und so der damit verknüpfte Anstieg der Radonkonzentration durch die 6-wöchigen Sommermessungen mit Hilfe der Kernspurdetektoren mit erfaßt wird.

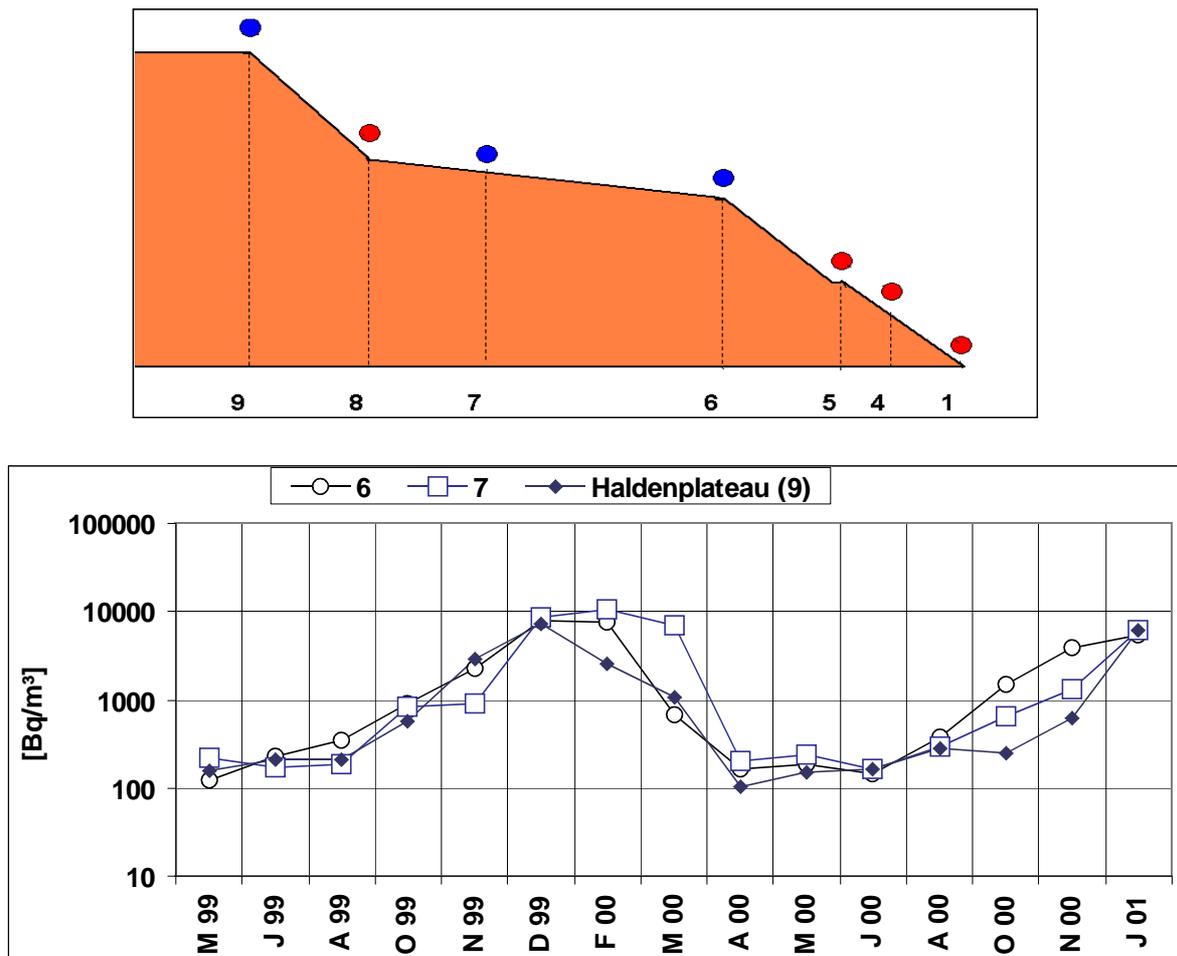


Abbildung 14: Zusammenstellung der Meßergebnisse der Radonkonzentration in 10 cm Höhe für Meßpunkte, deren zeitlicher Verlauf dem am Haldenplateau ähnelt.

Die Ergebnisse für die plateau- und haldenfußähnlichen Meßpunkte des mittleren Profils sind in der Abbildung 15 zusammenfassend dargestellt. Diese Darstellung verdeutlicht den qualitativen Unterschied bzw. die qualitative Übereinstimmung der Radonexhalation an den unterschiedlichen Meßpunkten der Halde.

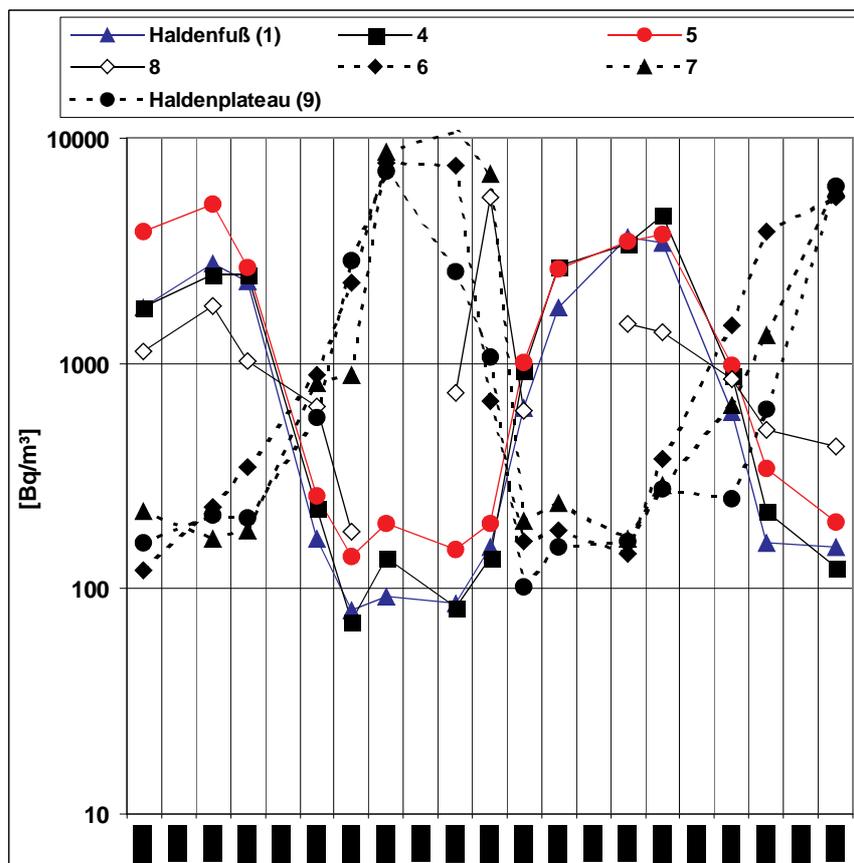
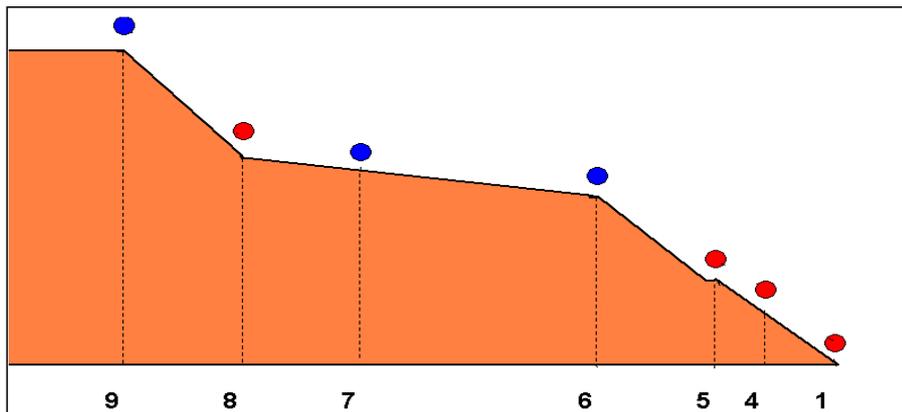


Abbildung 15: Zusammenstellung der Meßergebnisse der Radonkonzentration in 10 cm Höhe für alle Meßpunkte des mittleren Profils.

Als Fazit der Messung der Radonkonzentrationen in 10 cm Höhe können folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:

- (1) Die Radonkonzentrationsmessungen in niedrigen Höhen widerspiegeln das qualitativ unterschiedliche Exhalationsverhalten der Halde im Sommer- und Winterhalbjahr.
- (2) Die Radonkonzentrationsmessungen in niedrigen Höhen reflektieren zu einem gewissen Grad den Haldenaufbau bzw. deren Schüttung (Plateaubereiche, Haldenfußbereiche, s. Abbildung 11).
- (3) Rastermessungen in 10 cm Höhe liefern ein differenziertes Abbild des zeitlichen und örtlichen Exhalationsverhaltens von Halden.
- (4) Punktuelle Messungen der Exhalation ohne Kenntnis der auf der Halde ablaufenden komplizierten Radonmigrationsprozesse hätten das in der Abbildung 15 zusammengefaßte Bild nur bedingt erfassen können. Dies ist der Tatsache geschuldet, daß eine zeitliche und örtliche Auflösung in der Form üblicher Exhalationsmessungen nur mit einem sehr hohen Kostenaufwand möglich wäre. Das trifft im gleichen Maße auch auf das Erfassen der komplizierten und die Exhalation stark beeinflussenden Witterungseinflüsse zu. Hier sei nur erwähnt, daß z.B. während und nach einer längeren Regenperiode die Exhalationsrate wegen der Sättigung des Porenraums stark reduziert sein kann.
- (5) Die Radonkonzentrationsmessungen mittels Kernspurdetektoren in niedrigen Höhen integrieren per se über alle während der Meßperiode herrschenden Witterungserscheinungen, d.h. vor allem die Einflüsse von Niederschlag, Wind, Temperaturunterschieden, Vegetation etc. Mit allen anderen bisher angewandten Feldmethoden kann ein solcher integraler Zusammenhang zwischen Radonexhalation und meteorologischen Parametern nicht erreicht werden.

4.2.3 Quasikontinuierliche Messung der Radonexhalation

Um die Messung der Radonkonzentration in 10 cm Höhe in Verbindung mit der Radonexhalation setzen zu können, wurden während einer Hochdruckperiode im Sommer 2001 quasikontinuierliche Exhalationsmessungen mit den in Abschnitt 3.2 beschriebenen Meßboxen durchgeführt. In der Abbildung 16 ist die Position der Meßboxen am Haldenfuß und -plateau skizziert. Die Abbildungen 17 und 18 zeigen

Fotografien der Meßboxen während des Einsatzes. Es ist zu erkennen, daß in den Sommermonaten der Bewuchs auf der Halde sehr üppig ist.

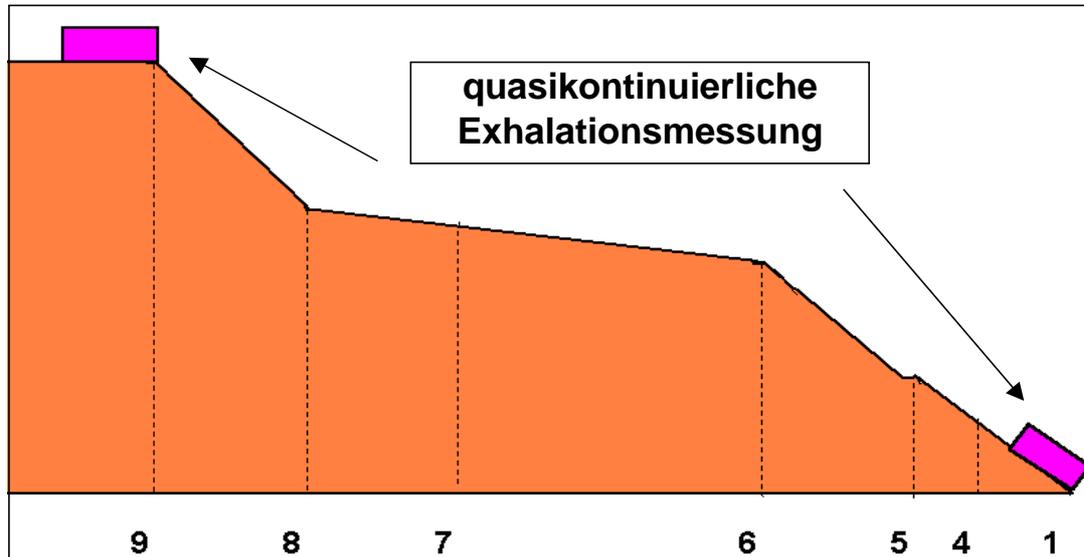


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Meßpunkte für die quasikontinuierliche Messung der Radonexhalation auf der Trockendammhalde.



Abbildung 17: Exhalationsmessung auf dem Haldenplateau. Zu erkennen ist auch die Meßeinrichtung des BfS zur Bestimmung der Radonkonzentration in 10 cm und 1,5 m Höhe.



Abbildung 18: Exhalationsmessung am Haldenfuß

Die Exhalationsrate wurde gemäß Formel (21) berechnet, wobei der Radonkonzentrationsanstieg in der geschlossenen Box durch einen linearen Fit angepaßt wurde. In der Abbildung 19 ist beispielhaft der Konzentrationsanstieg in der Box für den 3. Juli 2001 nachmittags und den 4. Juli nach Mitternacht angegeben. Es ist deutlich zu erkennen, daß nach Mitternacht die Konzentration auf Werte angestiegen ist, die etwa um den Faktor 6 höher liegen als die Konzentrationswerte am Tage vorher gegen die Mittagszeit. Aus diesem Vergleich folgt, daß auch die Exhalationsrate um diesen Faktor höher ist. Des weiteren ist aus dem unteren Teil der Abbildung 19 ersichtlich, daß bereits die Anfangskonzentration des Radons in der bodennahen Luft etwa 1000 Bq/m^3 beträgt. Dies weist auf eine deutlich erhöhte Exhalation auf dem Haldenplateau nach Mitternacht hin. Dieser Anstieg stimmt auch mit den Ergebnissen der Langzeitmessungen in 10 cm Höhe (s. Abschnitt 4.2.2) überein.

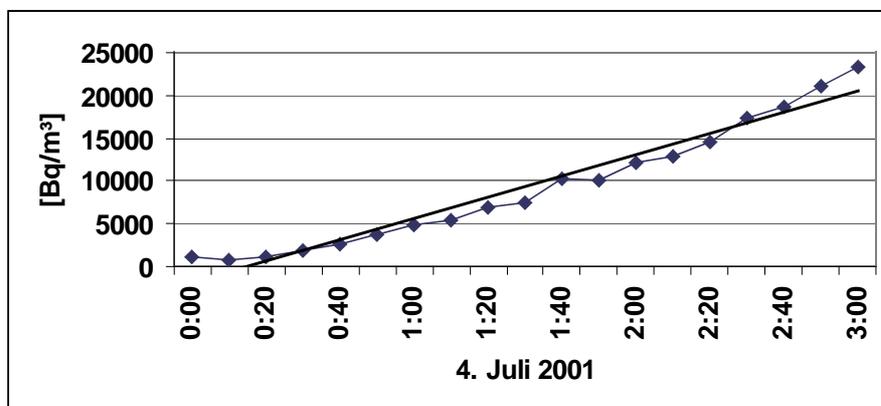
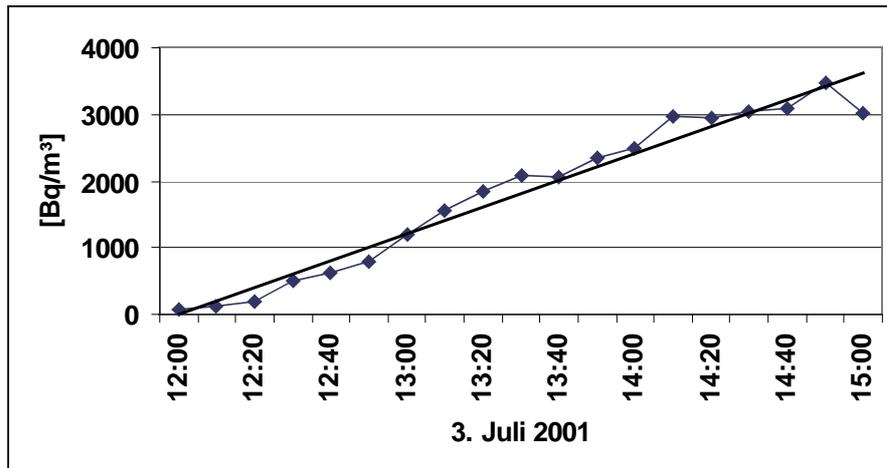


Abbildung 19: Radonkonzentrationsanstieg in der Sammelbox auf dem Plateau für zwei unterschiedliche Meßzeiten (oberes Bild nachmittags, unteres Bild nach Mitternacht).

Der große Unterschied zwischen der Radonexhalation kurz nach 12 Uhr Mittag und nach Mitternacht ist ursächlich dadurch bedingt, daß die Außentemperatur stark abgenommen hat, während sich der Luftdruck kaum änderte. Dies ist in der Abbildung 20 dargestellt. Der Unterschied der Außentemperatur zwischen Mittag und Mitternacht betrug hier maximal $18,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (max. $26,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, min. $7,4\text{ }^{\circ}\text{C}$). Der Unterschied im Luftdruck erreichte lediglich etwa 3 mbar, wobei sich der Luftdruck während des Meßzeitraums kaum änderte.

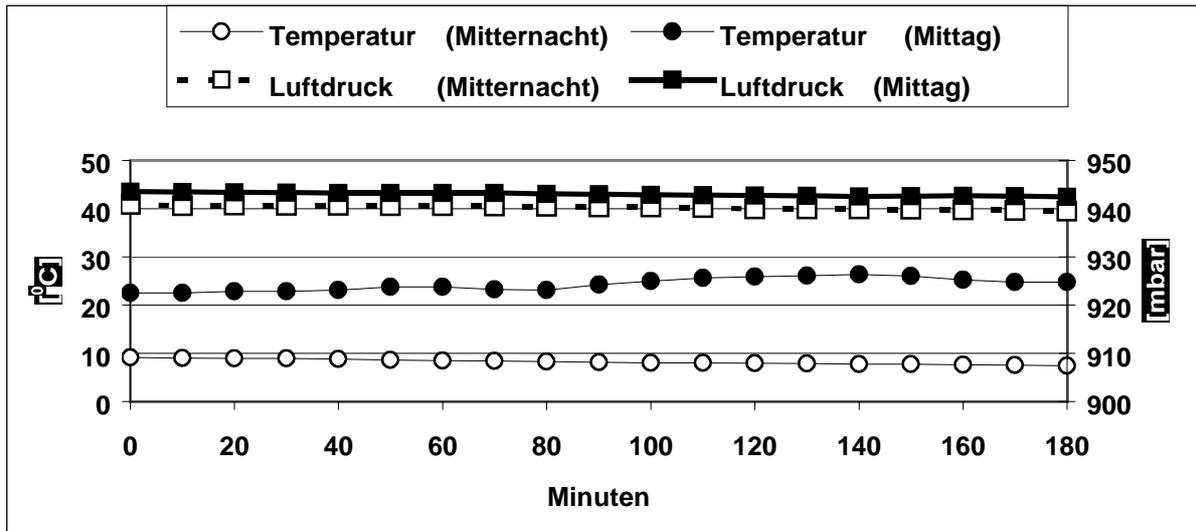


Abbildung 20: Zeitlicher Verlauf der Lufttemperatur und des Luftdrucks für die in Abbildung 19 angegebenen Tageszeiten im Rhythmus von 10 Minuten.

Die Ergebnisse der Bodentemperaturmessungen zeigen, daß diese für den oben diskutierten Meßzeitraum nur etwa 2 °C variierte. Aus der Abbildung 21 ist deutlich zu erkennen, daß die Bodentemperatur ihren Minimalwert erst kurz vor Sonnenaufgang annimmt, während der Maximalwert in den Abendstunden erreicht wird.

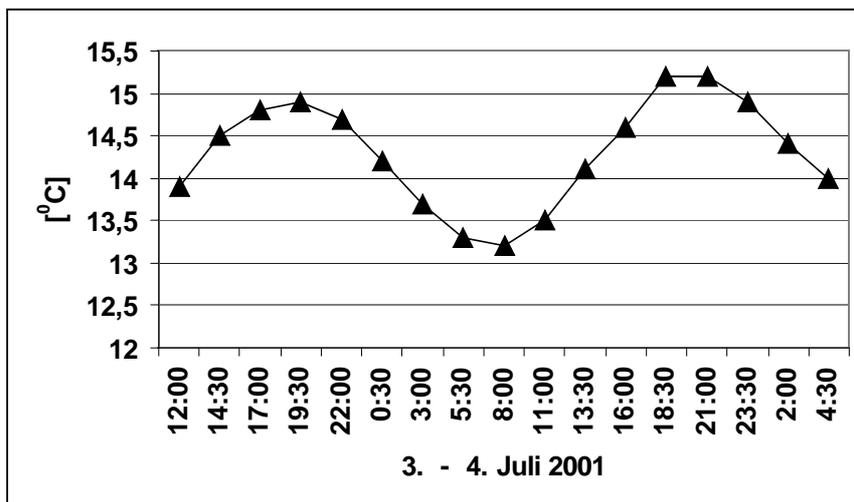


Abbildung 21: Zeitlicher Verlauf der Bodentemperatur für die in Abbildung 19 angegebenen Tageszeiten im Rhythmus von 90 Minuten.

Dieses "Nachlaufen" der Bodentemperatur, verglichen zur Lufttemperatur, ist auf die Wärmeleitung im Boden zurückzuführen. Die gemessene Nachlaufzeit von ca. 3 Stunden ist mit der Lösung der Wärmeleitgleichung nachvollziehbar.

In der Abbildung 22 sind die Ergebnisse der Exhalationsmessung auf dem Haldenplateau für 5 aufeinanderfolgende Tage zusammengestellt. Die Messungen wurden in einem Rhythmus von 4 Stunden durchgeführt, wobei die Sammelbox 3 Stunden geschlossen und 1 Stunde geöffnet war. Es ist deutlich zu erkennen, daß die höchsten Exhalationsraten nach Mitternacht bzw. in den frühen Morgenstunden erhalten werden, wobei der Tag/Nacht-Unterschied der Raten fast zwei Größenordnungen erreicht.

Des weiteren ist sehr auffällig, daß sich die Exhalationsrate gegenläufig zur Außen- und Bodentemperatur ändert. Hohe Exhalationsraten werden gemessen, wenn die Außentemperatur und damit verknüpft auch die Bodentemperatur minimale Werte erreicht. Die Variation der Bodentemperatur in 20 cm Tiefe übersteigt an allen 5 Tagen 3°C nicht, wobei, wie aus Abbildung 22 ersichtlich, die Außentemperatur in den frühen Morgenstunden nur geringfügig tiefer als die Bodentemperatur ist.

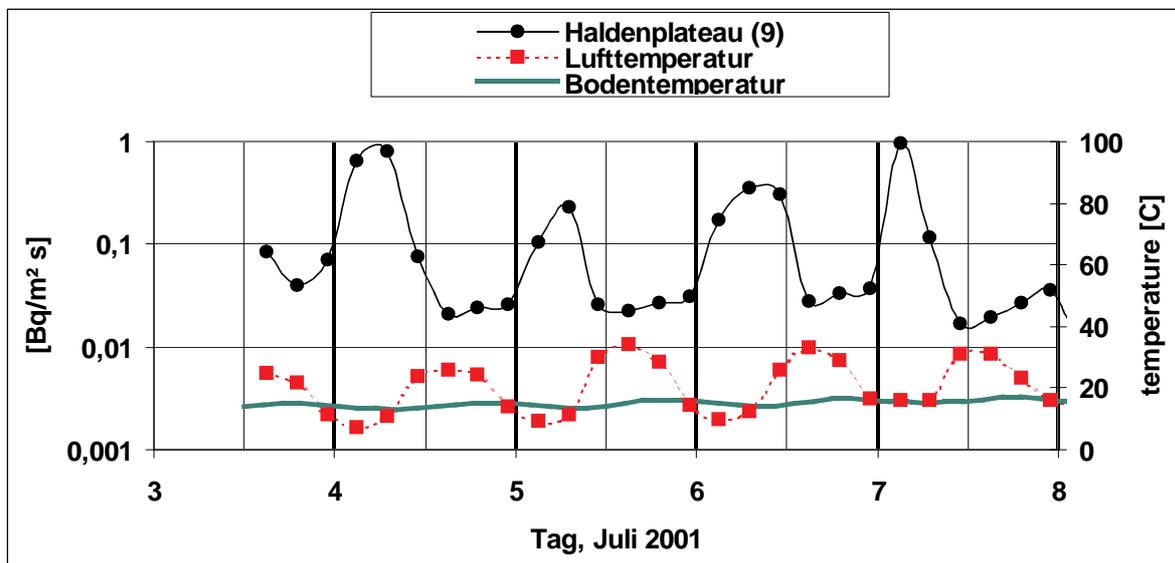


Abbildung 22: Ergebnisse der Exhalationsmessung auf dem Haldenplateau zusammen mit den Werten der Bodentemperatur und der Lufttemperatur.

In der Abbildung 23 ist die zeitliche Abfolge der Exhalationsrate am Haldenfuß (Meßpunkt 1) für die 5 Tage im Juli zusammengestellt. Gegenüber den Ergebnissen

für das Haldenplateau treten zwei qualitativ unterschiedliche Charakteristika im Exhalationsverhalten deutlich hervor. Dies ist in Abbildung 24 anhand des dargestellten Vergleichs der Exhalationsraten illustriert.

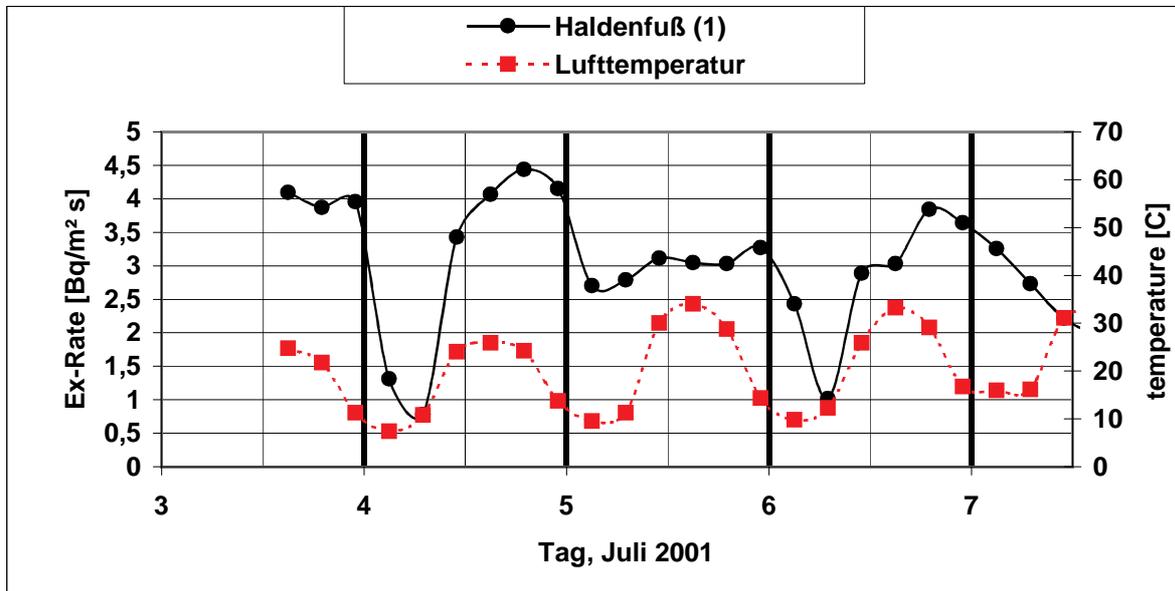


Abbildung 23: Ergebnisse der Exhalationsmessung am Haldenfuß zusammen mit den Werten der Lufttemperatur.

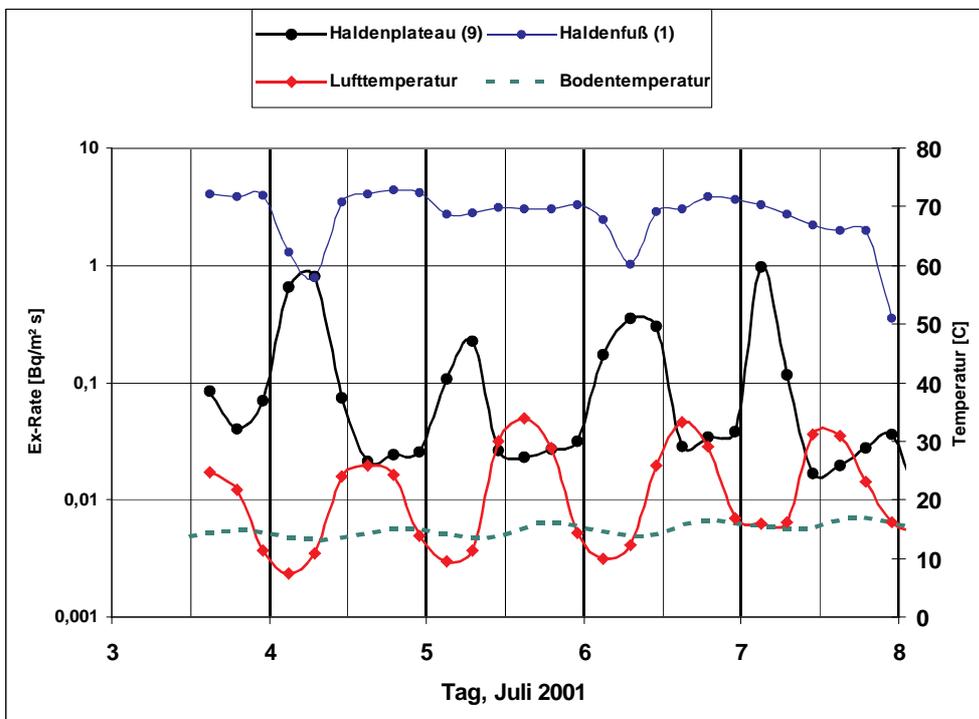


Abbildung 24: Ergebnisse der Exhalationsmessung auf dem Haldenplateau zusammen mit den Werten der Bodentemperatur und der Lufttemperatur.

Am Haldenfuß treten Exhalationsmaxima dann auf, wenn die Außentemperatur am höchsten ist, d.h. in den Nachmittagsstunden. Zu dieser Zeit erreicht die Exhalation auf dem Haldenplateau ihren Minimalwert. Des weiteren ist auffällig, daß die Exhalationsraten auf hohem Niveau, d.h. bei Exhalationsraten $> 1 \text{ Bq}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ variieren. Aus diesem Grund ist in der gewählten logarithmischen Darstellung die Änderung der Exhalation in Abhängigkeit von der Tageszeit nicht so ausgeprägt wie auf dem Haldenplateau.

Des weiteren ist klar ersichtlich, daß die Exhalationsmaxima am Haldenfuß und die Exhalationsminima auf dem Haldenplateau nur bedingt in einem einfachen Zusammenhang stehen werden. Dies bedeutet, daß ein Exhalationsmaximum am Haldenfuß nicht dadurch bedingt ist, daß z.B. am Haldenfuß kalte radonreiche Luft aus der Halde austritt und am Haldenplateau Luft einzieht, wie man es in einem einfachen Strömungsmodell (Stromfaden) erwarten würde. Das Exhalationsverhalten der Halde ist sehr komplex und lokal stark unterschiedlich geprägt. Dies ist durch die integrierenden Messungen nachgewiesen worden.

Bemerkenswert ist, daß im Maximum Exhalationsraten von etwa $5 \text{ Bq}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ festgestellt wurden, wobei die mittlere Radonkonzentration in 10 cm Höhe etwa $10 - 15 \text{ kBq}/\text{m}^3$ beträgt (maximal $30 \text{ kBq}/\text{m}^3$) und in der Box Konzentrationen von bis zu $200 \text{ kBq}/\text{m}^3$ erreicht wurden. Dies ist beispielhaft für die Messung am 4. Juli 2001 in Abbildung 25 gezeigt.

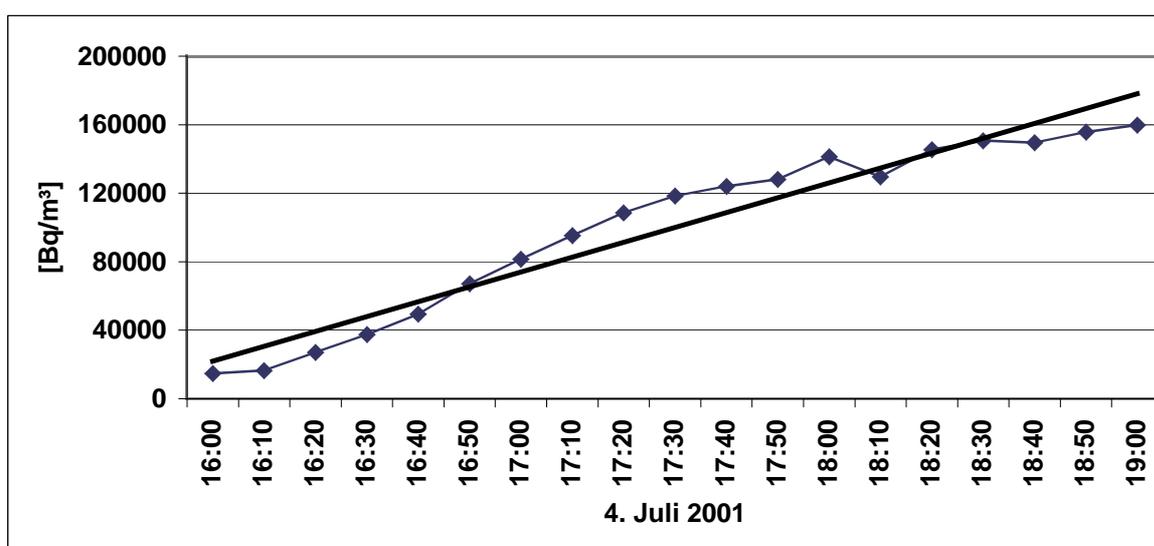


Abbildung 25: Radonkonzentrationsanstieg in der Sammelbox am Haldenfuß in Abhängigkeit von der Zeit.

Solch hohe Radonkonzentrationen von ca. 10 - 15 kBq/m³ wurden auch durch stichpunktartige Messungen mit dem AlphaGUARD in 10 cm Höhe am Haldenfuß nachgewiesen. Integrierende Messungen im Sommerhalbjahr führten zu mittleren Radonkonzentrationen von 5 kBq/m³ (s. Abschnitt 4.2.2) in 10 cm Höhe, die aufgrund der Tatsache, daß diese Werte eine Mittelung über die während der 6 Wochen herrschenden meteorologischen Verhältnisse automatisch mitenthalten, plausibel erscheinen läßt. Bei den Exhalationsmessungen wurden bei geöffneter Box Radonkonzentrationen in 10 cm Höhe gemessen, die im Bereich von bis zu 10 - 15 kBq/m³ liegen. Ausgehend von diesen Werten und den Tag/Nacht-Variationen kann davon ausgegangen werden, daß bei günstigen Bedingungen, d.h. bei hohen Außenlufttemperaturen, Radonkonzentrationen in 10 cm Höhe auftreten werden, die im Bereich von 30 - 60 kBq/m³ liegen werden.

4.2.4 Zusammenfassung des Radonexhalationsverhaltens der Trockendammhalde (Steigerdorf)

Hinsichtlich der Radonexhalation, die sich in den stark erhöhten Radonkonzentrationswerten, gemessen in geringen Höhen, manifestiert und der an zwei Punkten durchgeführten quasikontinuierlichen Exhalationsmessung, kann das folgende Fazit gezogen werden:

- Die Messungen der Radonkonzentration in 10 cm Höhe reflektieren die Schüttung bzw. den Haldenaufbau,
- über die Halde sind mehrere Exhalationsminima und -maxima verteilt,
- die saisonalen Effekte sind stark ausgeprägt und
- die Gesamtkomplexität des Radonaustritts ist als sehr kompliziert zu bezeichnen.

Als besonders wichtiges Resultat ist zu konstatieren, daß die Rastermessungen in 10 cm Höhe ein belastbares Abbild (Visualisierung) der Radonquellstärkeverteilung liefern.

Die auf der Halde auftretenden charakteristischen Exhalationsmuster erhöhter Radonexhalation sind in der Abbildung 26 schematisch dargestellt. Auf den plateauartigen Flächen werden generell erhöhte Radonexhalationen in den kühlen Sommer Nächten und während des gesamten Winters erwartet, während die Exhalation am Haldenfuß nur während der heißen Sommertage besonders ausgeprägt ist. Daraus ergibt sich eine gewisse Unsymmetrie, die dadurch bedingt ist, daß **Bewohner am**

Haldenfuß nur in den Sommermonaten und dann hauptsächlich am Tage mit einer erhöhten Radonexhalation rechnen müssen, während Bewohner in der Nähe des Haldenplateaus sowohl über den ganzen Winter als auch in den kühlen Sommernächten einer verstärkten Radonexhalation ausgesetzt sind.

Phasen erhöhter Radonexhalation

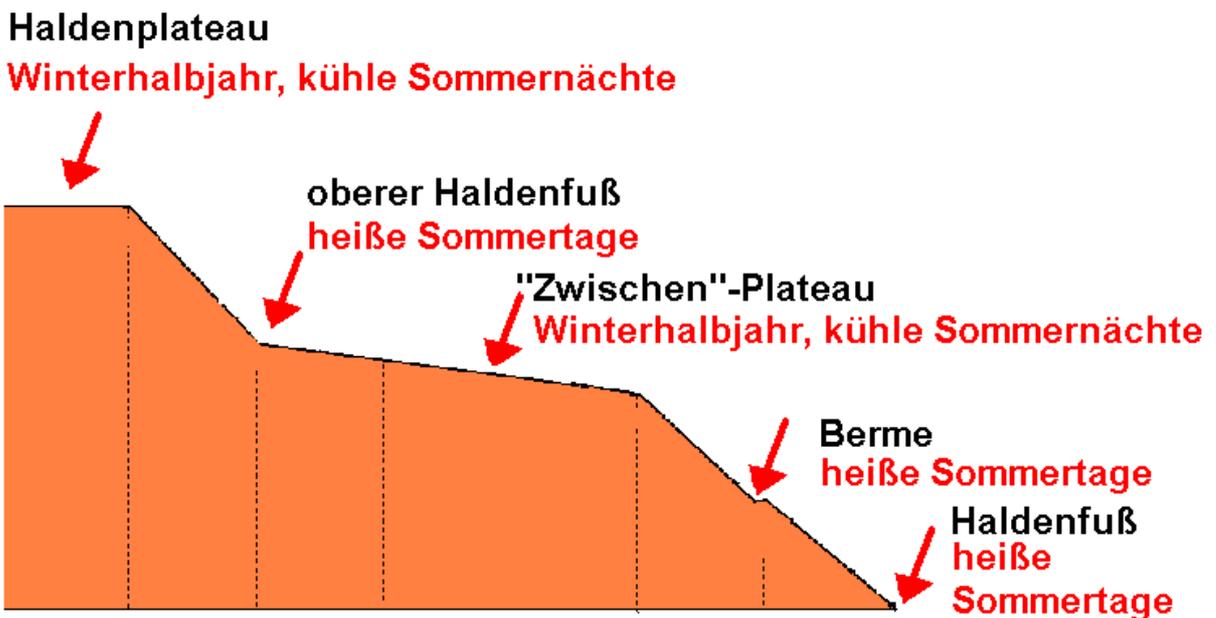


Abbildung 26: Schematische Darstellung der auf der Halde auftretenden charakteristischen Exhalationsmuster.

In der Abbildung 27 ist beispielhaft die mittlere Radonexhalationsrate, gemessen auf dem Haldenplateau, in Abhängigkeit von der Tageszeit dargestellt. Die Mittelung wurde für die entsprechenden Tageszeiten während der betrachteten 5 Tage durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, daß im Mittel abhängig von der Tageszeit, Unterschiede in der Exhalationsrate von mehr als einer Größenordnung auftreten. Für das Haldenplateau ist typisch, daß die Exhalationsmaxima in den frühen Morgenstunden beobachtet werden.

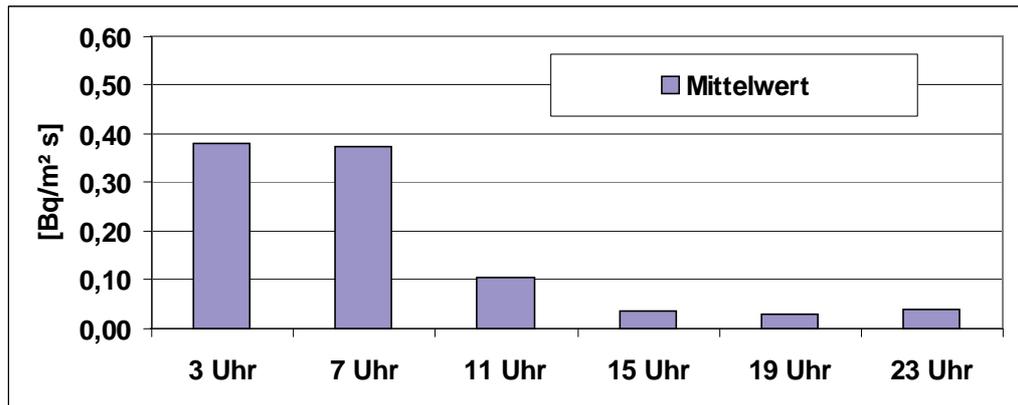


Abbildung 27: Mittlere Radonexhalationsrate, gemessen auf dem Haldenplateau, in Abhängigkeit von der Tageszeit

4.3 Qualitative Interpretation der beobachteten Exhalationsmuster

4.3.1 Vorbemerkung zum Sachstand

Ausgehend von den bei IAF - Radioökologie GmbH vorliegenden Erfahrungen ist davon auszugehen, daß das für die Trockendammhalde beobachtete Exhalationsmuster, welches in Abhängigkeit von der Haldenschüttung sowie der Tages- und Jahreszeit ausgeprägte Gebiete erhöhter Radonexhalation liefert, auch für andere Halden charakteristisch ist. In diesem Abschnitt wird eine qualitative Diskussion dieser Ergebnisse geliefert (s.a. [11]), wie sie für das Verständnis und die Interpretation der in 10 cm Höhe gemessenen Radonkonzentrationswerte erforderlich ist.

Die Exhalationsmessungen haben gezeigt, daß der entscheidende Parameter für das Verständnis der Exhalationsmaxima und -minima die mit dem Tagesgang wechselnde Lufttemperatur ist. Alle anderen erfaßten meteorologischen Parameter konnten während der Meßperiode als konstant angenommen werden. Exhalationsmessungen bei Regen zeigen z.B., daß nach der Durchfeuchtung der oberen Bodenschicht die Exhalation drastisch reduziert wird. Sie steigt dann wieder an, wenn sich die Feuchtigkeit der oberen Bodenschicht den der Jahreszeit entsprechenden "normalen" Werten annähert. Wichtig für das Verständnis der Tagesgänge auf der Halde ist auch die Tatsache, daß in sehr warmen Sommernächten die Exhalation auf dem Haldenplateau völlig unbedeutend ist, während sie am Haldenfuß sowohl am Tage als auch in der Nacht bei hohen Werten liegt.

Daß sich die Lufttemperatur als eine entscheidende Größe herauskristallisiert, liegt darin begründet, daß die Haldentemperatur in erster Näherung als konstant betrach-

tet werden kann, d.h. unabhängig von der Außentemperatur und der Jahreszeit. Messungen der Bodentemperatur in 20 cm Tiefe zeigen, daß die Bodentemperatur an typischen Sommertagen in den Grenzen zwischen 12°C und 15°C variierte. Im Winterhalbjahr wird die Bodentemperatur erst in größeren Tiefen diesen Wert erreichen. Die auf einer Halde auftretenden Phasen erhöhter Radonexhalation sind in der Abbildung 28 illustriert.

Perioden erhöhter Radonexhalation

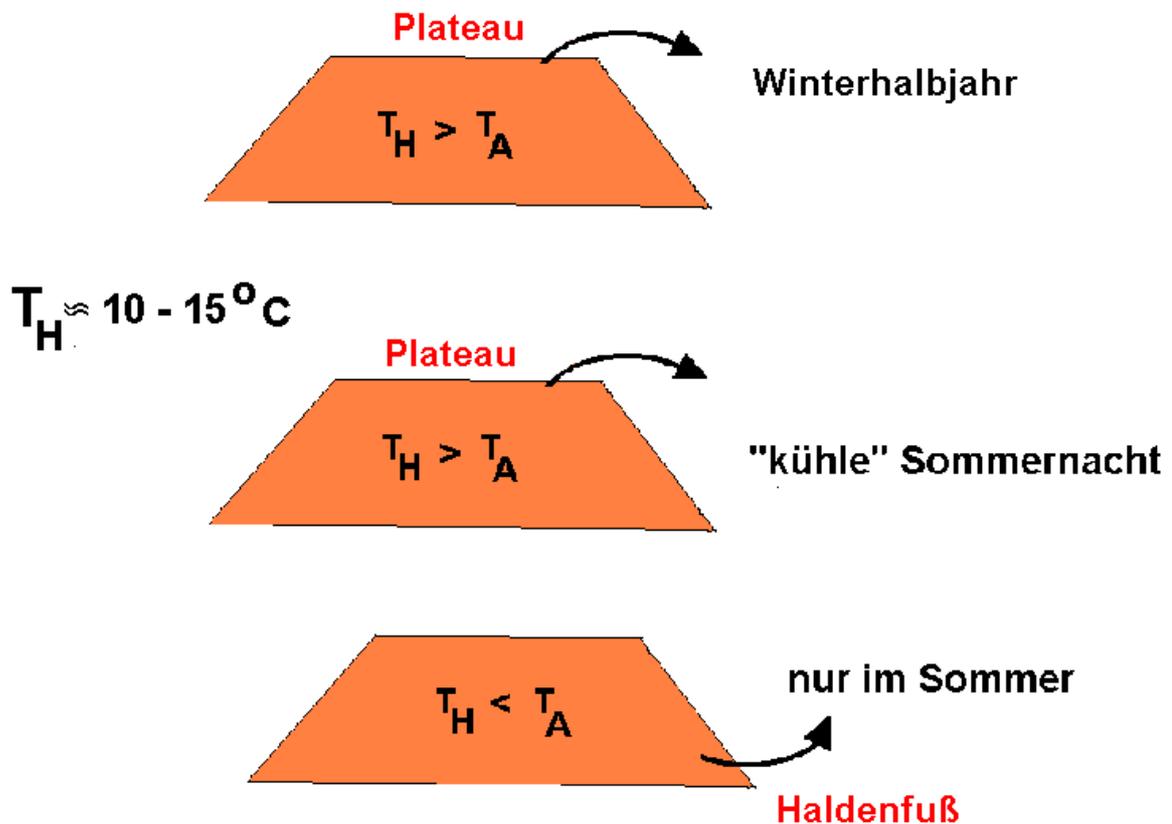


Abbildung 28: Schematische Darstellung der bei Halden auftretenden Phasen erhöhter Radonexhalation.

Zu vernachlässigen ist auch nicht, daß eine aus Bergematerial bestehende Halde aufgrund der vielfältigen geochemischen Prozesse selbst Wärme produziert. Letztere kann einen nicht zu unterschätzenden Beitrag zum Gesamtwärmehaushalt einer Halde liefern und konvektive Prozesse triggern. Hier wird auf solche Prozesse nicht eingegangen und nur ein sehr einfaches Bild der Exhalationsmuster entwickelt.

4.3.2 Einfaches Haldenmodell (2-Kompartimentdarstellung)

In der Abbildung 29 ist ein einfaches Modell einer Halde dargestellt. Die Temperatur im Außenraum (Atmosphäre) T_A sei höher als die des Haldeninnenraums (T_H), der im weiteren nicht näher spezifiziert wird. Aufgrund der Temperaturunterschiede resultieren Druckunterschiede in den zwei Unterräumen (Kompartiments), die von der Höhe abhängig sind.

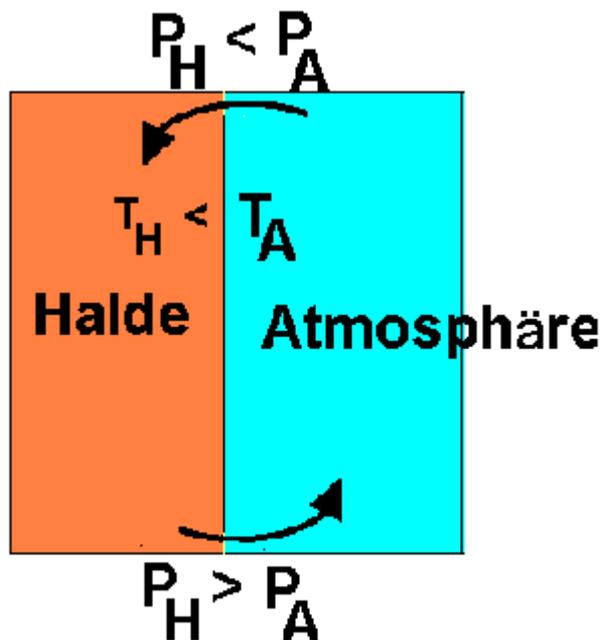


Abbildung 29: Schematische 2-Kompartimentdarstellung von Halde und umgebender Atmosphäre.

Nimmt man der Einfachheit wegen an, daß für den Druck der Atmosphäre P_A (verallgemeinerte barometrische Höhenformel)

$$P_A = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{\beta}{T_A} h\right) \quad (22)$$

gilt, wobei angenommen wird, daß P_0 der Atmosphärendruck bei $h=0$, d.h. am Haldenfuß, ist. Die Konstante ergibt sich aus

$$\beta = \frac{m \cdot g}{R \cdot T_A} \quad (23)$$

Mit $m=29$ g/mol für Luft, $g=9,81$ m/s² und $R=8,31$ J/mol K ergibt sich

$$\beta = 0,034 \frac{\text{K}}{\text{m}} \quad (24)$$

In der Abbildung 30 ist der Druckunterschied zwischen den zwei Kompartiments in Abhängigkeit von der Höhe für zwei unterschiedliche Tageszeiten dargestellt, wobei der Druckunterschied zwischen Halde und Außenraum in Abhängigkeit von der Höhe angegeben ist. Bei der Berechnung des Druckunterschieds wurde angenommen, daß die Temperatur der Halde 10 °C (283 K) und die Außentemperatur zur Mittagszeit 30 °C betragen.

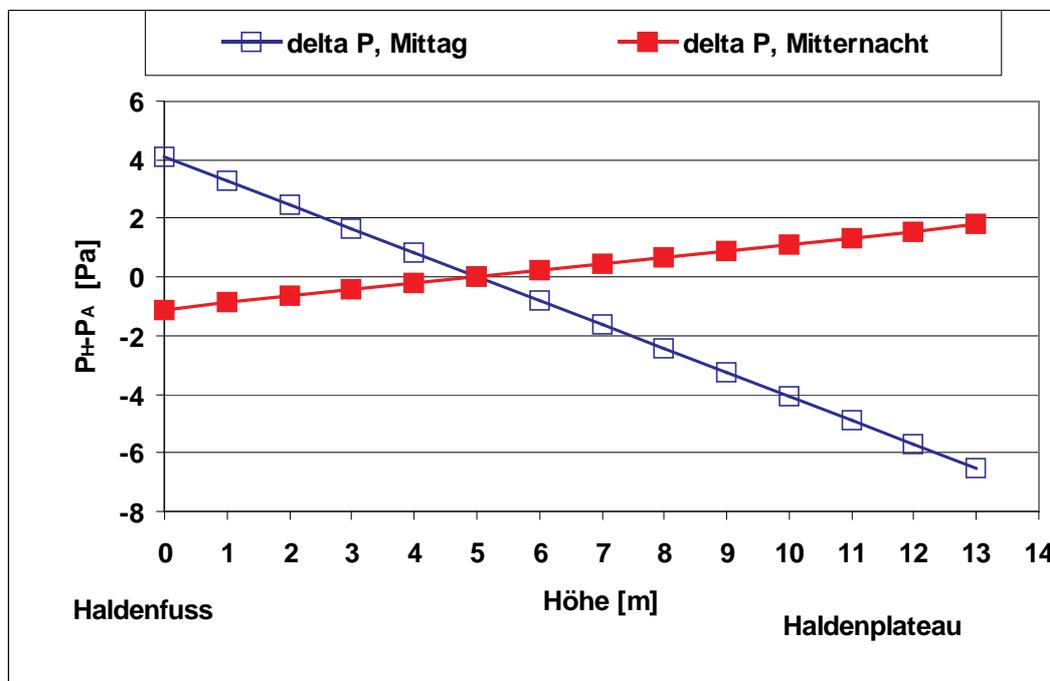


Abbildung 30: Druckunterschied zwischen Halde und Außenraum in Abhängigkeit von der Höhe.

Für Mitternacht wurde angenommen, daß sich nur die Außentemperatur auf 5 °C erniedrigt hat. Der Druck am Haldenfuß beträgt 101 kPa. Des weiteren wurde vereinfachend angenommen, daß in einer Höhe von 5 m $P_H=P_A$ gelten soll. Die Abbildung veranschaulicht, daß sich die Druckdifferenz lediglich im Bereich von einigen Pa ändert. In dieser Näherung ist der Druckunterschied zwischen den zwei Kompartiments eine lineare Funktion der Höhe,

$$\Delta P(h) \approx P_0 \frac{\delta}{T_H T_A} \cdot (h - h_0) \cdot \Delta T, \quad (25)$$

wobei $\Delta T = P_A - P_H$. Aufgrund der hohen Außentemperatur von 30 °C befinden sich am Haldenfuß ($h=0$) zur Mittagszeit weniger Luftmoleküle im vergleichbaren Volumenelement im Außenraum als im "kühleren" Kompartiment Halde. Daraus resultiert eine von der Halde in die umgebende Atmosphäre gerichtete Luftströmung, die unabhängig davon ist, ob z.B. am Haldenplateau Luft nachströmen kann oder nicht. Damit erklärt sich der Anstieg der Exhalation am Haldenfuß an den besonders heißen Tagen.

Gegen Mitternacht wird eine entgegengesetzte Situation angetroffen. Jetzt ist die Außentemperatur am Haldenfuß geringer als die der Halde. Infolgedessen wird die Exhalation stark reduziert.

Die mit der Druckänderung verknüpfte Änderung der Konvektionsgeschwindigkeit kann nach der Darcy-Gleichung (9) abgeschätzt werden. In der Abbildung 31 sind beispielhaft die entsprechenden Konvektionsgeschwindigkeiten angegeben, wobei von einer Permeabilität von etwa 10^{-11} m^2 ausgegangen wurde.

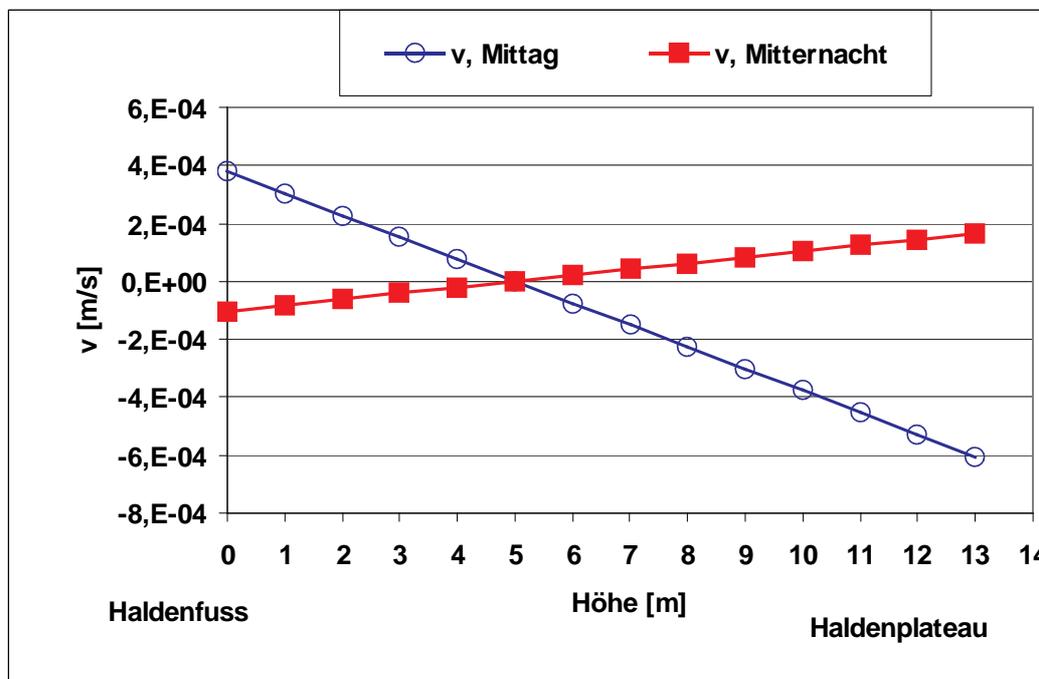


Abbildung 31: Berechnete Konvektionsgeschwindigkeiten für das Modellbeispiel einer Halde (s.a. Abbildung 30).

Nach Formel (14) errechnet sich die Exhalationsrate zu

$$J = n \cdot C_0 \left(\pm \frac{v'}{2} + \sqrt{\frac{v'^2}{4} + \lambda D'} \right), \quad (26)$$

so daß im Bereich der Konvektionsgeschwindigkeiten von $v = 10^{-5}$ m/s Unterschiede in den Exhalationsraten von ca. 2 Größenordnungen in Abhängigkeit von der Richtung von v auftreten können (vgl. Ergebnisse in Abbildung 5).

Wendet man das 2-Kompartiment-Modell auf die auf dem Haldenplateau gemessene Radonexhalation an, so ergibt sich die in Abbildung 32 dargestellte Abhängigkeit der Radonexhalation auf dem Haldenplateau von der Tageszeit. Für die Anpassung gemäß Formel (14) wurde eine Porosität von $n=0,3$ und eine Radonkonzentration in der Bodenluft von 100 kBq/m^3 benutzt (s. Diskussion im Abschnitt 4.3.3). Die Diffusionskonstante wurde mit $D=3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, entsprechend einer Diffusionslänge von 1,2 m, festgelegt.

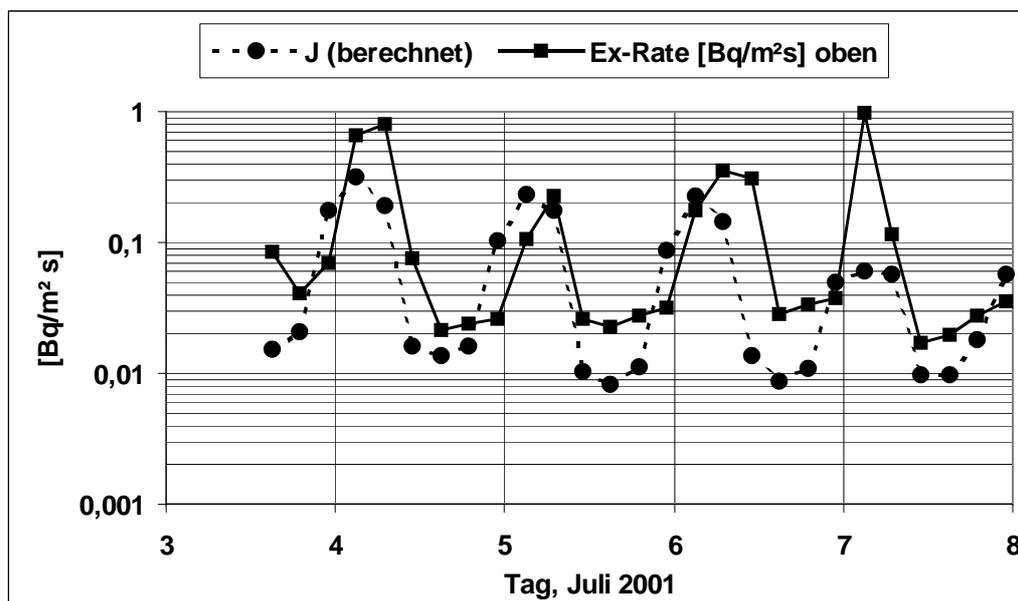


Abbildung 32: Berechnete und gemessene Exhalationsraten in Abhängigkeit von der Tageszeit auf dem Haldenplateau.

Bei der Berechnung der Druckunterschiede wurde von den kontinuierlich gemessenen Temperaturen der Atmosphäre und des Bodens in 20 cm Tiefe ausgegangen (s. Abbildung 22). Die Abbildung zeigt, daß die Tagesgänge der Exhalationsrate durch

dieses einfache Modell gut reproduziert werden. Nach unserem Kenntnisstand ist dies die erste Rechnung die komplexe Exhalationsvorgänge quantitativ über einen längeren Zeitraum reproduziert. Dies trifft z.B. auch auf die nachfolgenden Tage zu. Aus dem Vergleich von Theorie und Experiment ist auch zu erkennen, daß das berechnete Maximum der Exhalationsrate ca. 2 - 4 Stunden früher als das der experimentell gemessenen Exhalationsrate erreicht wird. Dies ist ein Artefakt der Näherung, die nicht, wie oben diskutiert, die Dauer der Wärmeleitung im Boden berücksichtigt. Dieses Vorlaufen der berechneten Exhalationsmaxima kann auch dahingehend interpretiert werden, daß sich eine deutlich erhöhte Radonexhalation erst dann ergibt, wenn die Temperatur der obersten Bodenschicht unterhalb eines bestimmten Werts gesunken ist.

4.3.3 Quantitative Abschätzung der Konvektionsgeschwindigkeit

Die in den Sammelboxen registrierte Erhöhung der Radonkonzentration während der Phase, daß die Exhalation allein durch konvektive Prozesse dominiert wird, kann dahingehend benutzt werden, die **Konvektionsgeschwindigkeit experimentell parameterfrei zu bestimmen**.

Die sich in der Box aufbauende Radonkonzentration kann modellmäßig erfaßt werden, wenn man annimmt, daß die zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ gemessene Radonkonzentration als Mischung der zum Zeitpunkt t herrschenden Konzentration und des aus der Erdoberfläche während des Zeitraums Δt hinzuströmenden Bodengases mit der Radonkonzentration C_0 beschrieben wird. Der Zeitpunkt Δt beträgt typischerweise 10 Minuten (Integrationszeit vom AlphaGUARD). Summiert man die resultierende geometrische Reihe für den Konzentrationsanstieg auf, erhält man die einfache Beziehung

$$C(t) = C_0 \cdot [1 - \exp(-\eta \cdot t)], \quad (27)$$

wobei der gesuchte Parameter

$$\eta = \frac{1}{\Delta t} \cdot \ln \left[1 - \frac{V_x}{V_0} \right] \quad (28)$$

vom Verhältnis des während des Zeitraums Δt einströmenden Bodengasvolumens V_x zu dem der Box abhängt. Als Näherung für diesen Ansatz gilt, daß während der Meßzeit die konvektive Strömung annähernd kontinuierlich ist und sich gleichzeitig die Radonkonzentration der Bodenluft nicht ändert. Letztere Annahme kann als erfüllt angesehen werden. Die Konstanz der Strömung äußert sich u.a. in den vergleichsweise "glatten" Anstiegskurven.

Durch die Anpassung des gemessenen Konzentrationsverlaufs an die Funktion (27) können somit C_0 und η bestimmt werden und aus (28) das unbekannte Volumen V_x . Es ist offensichtlich, daß bei rein konvektiven Prozessen die Radonkonzentration in der Sammelbox C_0 nicht höher als der Wert der Radonkonzentration in der herantransportierten Bodenluft werden kann, d.h. es wird eine entsprechende Sättigungskurve erhalten. Zu bemerken ist, daß infolge diffusiver Prozesse die Radonkonzentration in der Box die der Bodenluft während des Sammelzeitraums bei weitem über treffen kann.

In der Abbildung 33 sind beispielhaft Experiment und Theorie gegenübergestellt. Betrachtet wurde die Exhalationsmessung am Haldenfuß zwischen 16 und 19 Uhr an zwei aufeinander folgenden Tagen (3. und 4. Juli 2001, s.a. Abschnitt 4.2.3).

Aus den sehr guten Fits leiten sich Radonkonzentrationen in der Bodenluft von $C_0=184$ bzw. 180 kBq/m^3 ab. Die Volumina V_x sind unterschiedlich. Für den 3.7. 2001 wurden 7 l aus dem Fit bestimmt, d.h. während der Integrationszeit von 10 Minuten sind in der Sammelbox 7 l Bodenluft ausgetauscht worden.

Daraus errechnet sich eine Konvektionsgeschwindigkeit von $v=2,9 \times 10^{-5} \text{ m/s}$. Einen Tag später betrug, wie zu erwarten, die Radonkonzentration in der Bodenluft wiederum etwa 180 kBq/m^3 , jedoch das aus dem Fit bestimmte Volumen, das während der Integrationszeit von 10 Minuten ausgetauscht wurde, war mit 9,2 l deutlich größer. Daraus errechnet sich eine höhere Konvektionsgeschwindigkeit von $v=3,8 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ und damit auch eine höhere Exhalationsrate.

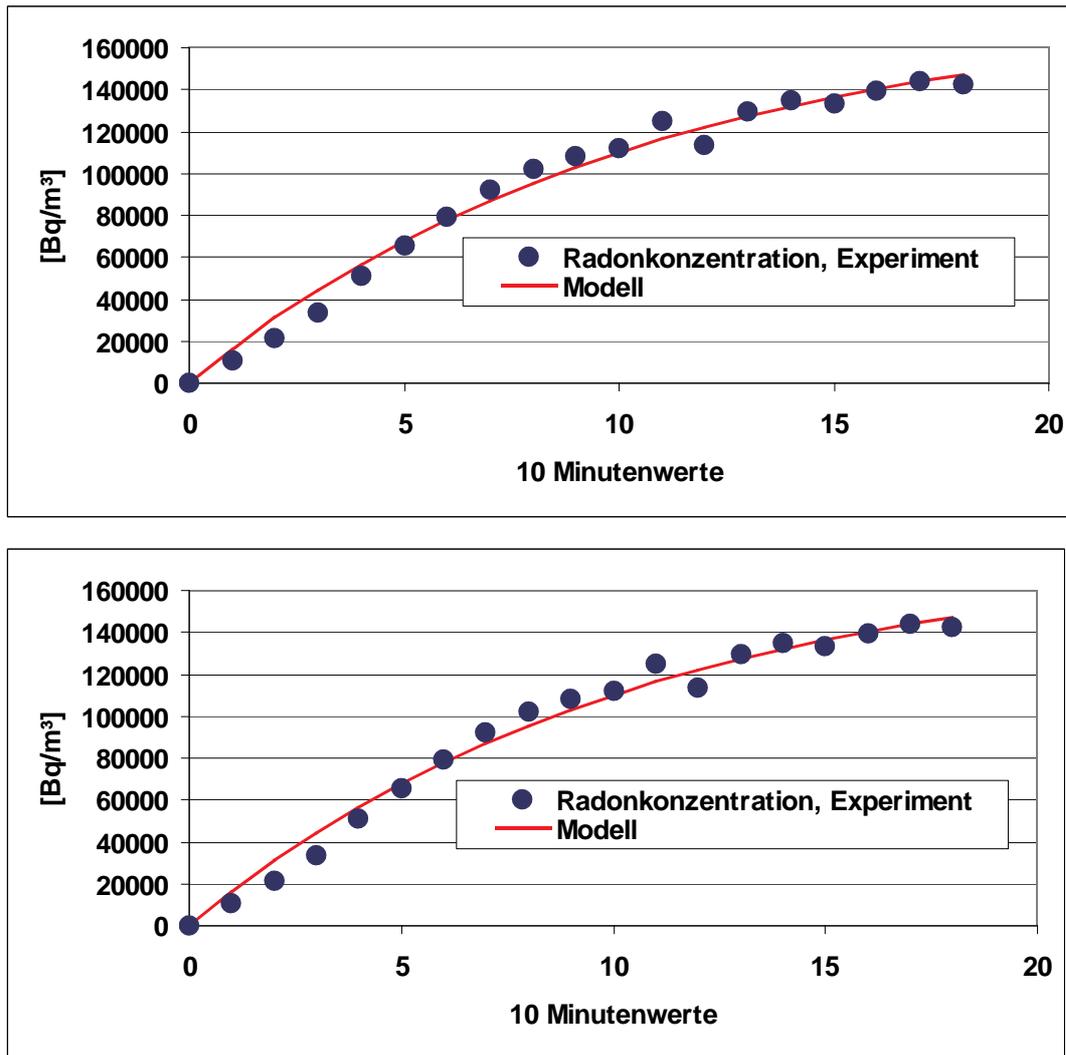


Abbildung 33: Anstieg der Radonkonzentration in der Sammelbox am Haldenfuß (zwischen 16 und 19 Uhr am 3. (oberes Bild) und 4. Juli 2001.

Zu sehen ist, daß der Anstieg der Radonkonzentration in der Box aufgrund des Sättigungsverhaltens nicht linear ist. Bei rein konvektiven Prozessen wird dies gemäß (27) erwartet. Bei diffusiven Exhalationsprozessen würde die Radonkonzentration in der Box solange linear ansteigen, bis Rückdiffusionsprozesse einsetzen.

In der Abbildung 34 sind beispielhaft die Ergebnisse für das Haldenplateau am 4.7.2001 dargestellt. In beiden Fällen beträgt die aus dem Fit bestimmte Radonkonzentration der Bodenluft 100 kBq/m^3 , während das im Zeitraum von 10 Minuten ausgetauschte Luftvolumen V_x nach Mitternacht $2,4 \text{ l}$ und in den frühen Morgenstunden $3,0 \text{ l}$ beträgt.

Verglichen zu den Messungen am Haldenfuß, sind die ausgetauschten Luftvolumina signifikant geringer. Dies schlägt sich in geringeren Exhalationsraten und Konvek-

tionsgeschwindigkeiten von $v=1,0 \times 10^{-5}$ m/s bzw. $1,2 \times 10^{-5}$ m/s nieder. Aufgrund der geringeren Menge an gesammelter Bodenluft ist auch der Konzentrationsanstieg während des gesamten Meßzeitraums weitestgehend linear.

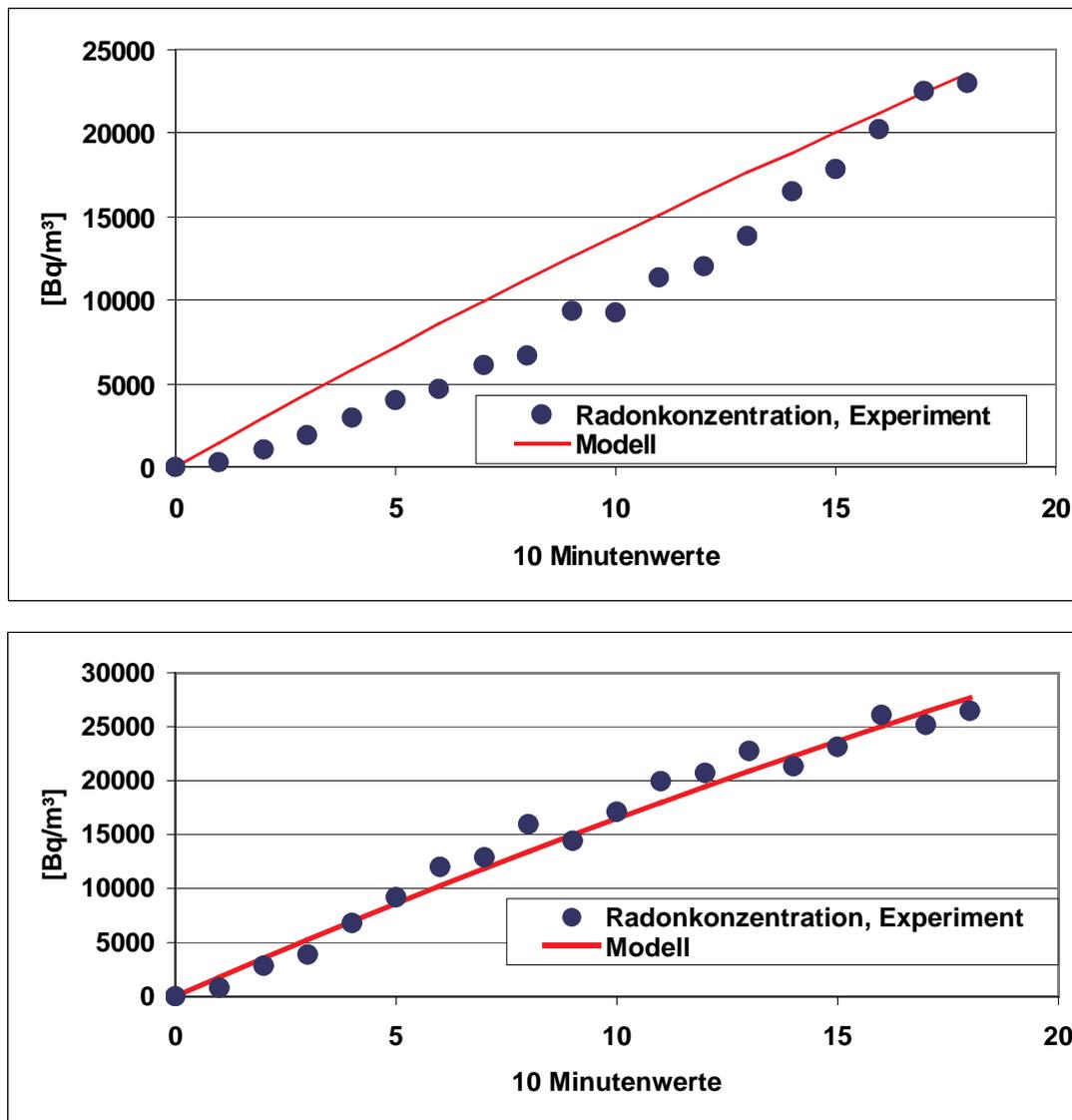


Abbildung 34: Anstieg der Radonkonzentration in der Sammelbox am Haldenplateau am 4. Juli 2001 zwischen 0 und 3 Uhr (oberes Bild) sowie zwischen 4 und 7 Uhr.

Aus den hier dargestellten Resultaten folgt, daß es sich bei den in den Boxen auf dem Haldenplateau und am Haldenfuß wechselseitig ablaufenden "Einströmungsvorgängen" nicht um direkt gekoppelte Strömungsprozesse handelt. Im Meßzeitraum von 3 Stunden betrug die senkrecht zur Aufstandsfläche in der Halde durchströmte Distanz am Haldenfuß 1,3 m und am Haldenplateau lediglich 0,4 m.

Die auf dem Plateau und am Haldenfuß ablaufenden Exhalationsprozesse sind unter dem Blickwinkel der Strömung entkoppelt, d.h. für die verstärkte Exhalation am Haldenfuß ist nicht von Bedeutung, ob gleichzeitig auf dem Haldenplateau Luft einströmt. Global gesehen sind natürlich die Exhalationsvorgänge am Haldenfuß und auf dem Haldenplateau über Temperaturunterschiede zwischen dem Haldenkörper und der Atmosphäre gekoppelt.

Abschließend sei zu diesen direkten Messungen der Konvektionsgeschwindigkeit bemerkt, daß die Interpretation des Anstiegs der Radonkonzentration in der Sammelbox allein auf der Annahme konvektiver Exhalationsprozesse beruht. Im Fall der Messungen am Haldenfuß bedeutet dies, daß während des Meßzeitraums von 3 Stunden zwischen 150 und 200 l radonhaltige Bodenluft ausströmen, während am Haldenplateau die ausströmende Luftmenge 32 l bzw. 39 l betrug.

Bei der Ableitung der für das Verständnis der Migrationsprozesse einer Halde wichtigen Konvektionsgeschwindigkeit wurde Radon als Tracer benutzt, um die Volumenströme definieren zu können. In diesem Zusammenhang und zur weiteren Abklärung der Gesamtsituation hinsichtlich der komplexen Migrationsprozesse wäre es zweckdienlich, solche Experimente mit Tracerversuchen (z.B. Einsatz von SF₆) direkt zu flankieren.

4.4 Messung der Radonexhalation auf nicht haldenartigen Flächen

4.4.1 Vorbemerkung zur Zielstellung

Durch die Schüttung und den Aufbau stellt eine Halde ein besonderes Objekt hinsichtlich der Radonfreisetzung dar, wobei im Abschnitt 4.3 gezeigt wurde, daß der Temperaturunterschied zwischen dem Inneren der Halde und der umgebenden Atmosphäre eine entscheidende Rolle spielt, die letztlich über die induzierten konvektiven Prozesse zu den Tagesgängen und saisonalen Abhängigkeiten der Radonfreisetzung führt. Entsprechende Temperaturunterschiede zwischen Atmosphäre und Boden treten auch auf beliebigen anderen Flächen auf und sollten die Radonfreisetzung ebenfalls mehr oder weniger stark beeinflussen. Um diese Effekte quantifizieren zu können, wurde ein spezielles Meßprogramm gestartet, im Zuge dessen über längere Zeiträume die Radonexhalation auf einer anthropogen nicht beeinflussten Wiese gemessen wurde. In der Fachliteratur konnten bis dato keine Hinweise auf die Existenz ausgeprägter Tagesgänge der Radonexhalation auf solchen Flächen erhalten werden. Um eine mögliche Beziehung zu der Situation bei Halden ableiten zu

können, wurden entsprechende Messungen im Sommer und im Winter durchgeführt. Ein Teil dieser Ergebnisse wird im nächsten Abschnitt diskutiert.

4.4.2 Messung der Radonexhalation auf einer Wiese

Die Messungen wurden auf einer anthropogen nicht beeinflussten Wiese in Dresden-Rochwitz durchgeführt. In der Abbildung 35 sind die Ergebnisse der Radionuklidanalyse für den Schurf A19 (Hanglehm und Feinsand über Hangschutt) dargestellt, der im Rahmen des Förderprojekts [1] untersucht wurde und für die Wiese typisch ist. Details der organoleptischen Ansprache und das Schichtenverzeichnis sind in der zitierten Arbeit zusammengestellt.

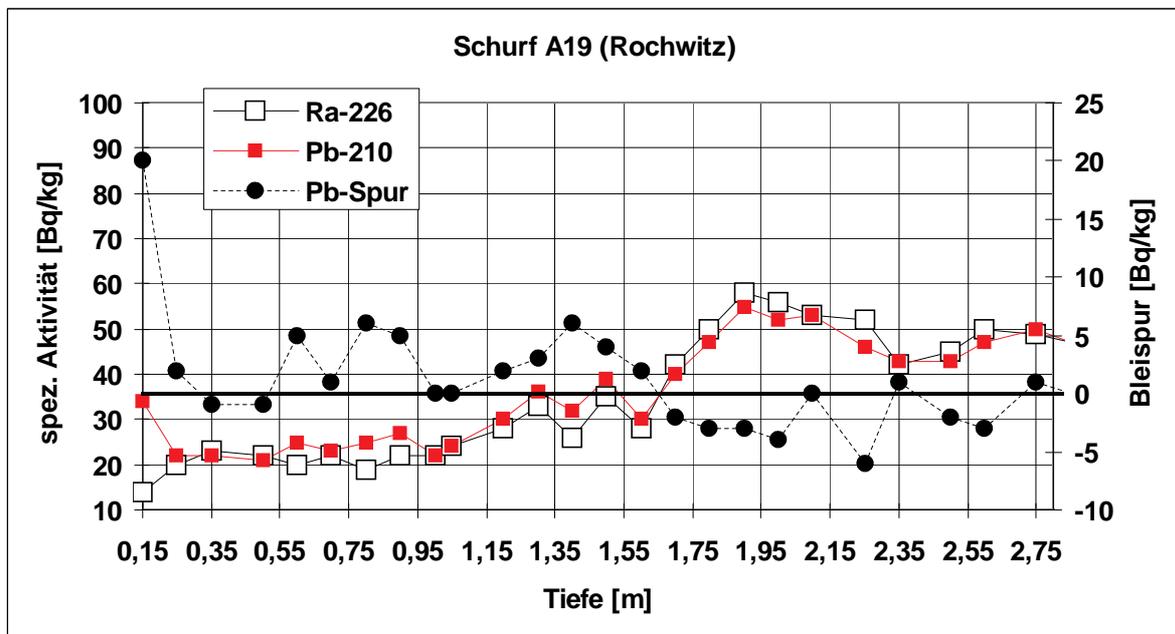


Abbildung 35: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 sowie der Bleispur (rechte Ordinate), $A_{Pb-210} - A_{Ra-226}$, in Abhängigkeit von der Tiefe.

Es ist zu sehen, daß die spezifischen Aktivitäten von Ra-226 und Pb-210 auf niedrigem Niveau, d.h. maximal bei 60 Bq/kg liegen. Die Bleispur, d.h. die spezifische Aktivität der Differenz $A_{Pb-210} - A_{Ra-226}$ in Abhängigkeit von der Tiefe, liegt, ausgenommen die obersten 2 Schichten, im Bereich von $\pm 5 - 10$ Bq/kg. Dieser Schwankungsbereich stellt in etwa die Grenze der Genauigkeit dar, mit der die Bleispur aus der Differenz der Pb-210- und Ra-226-Aktivitäten mit einem vertretbaren Aufwand gemessen werden kann. Das bedeutet, daß insgesamt von

messen werden kann. Das bedeutet, daß insgesamt von einem Meßfehler von 5 - 10 % bei der Bleispur auszugehen ist.

Aus den in der Abbildung 35 dargestellten Ergebnissen ist erkennbar, daß in der obersten Schicht die spezifische Pb-210-Aktivität deutlich größer als die von Ra-226 ist. Diese beträgt in dem konkreten Fall 20 Bq/kg und ist durch den Fallout der Radonfolgeprodukte bedingt, der sich in den obersten Schichten akkumuliert. Ein Pb-210-Überschuß von 20 - 50 Bq/kg spiegelt eine mittlere Radonexhalationsrate von ca. 0,01 - 0,03 Bq/(m² · s), die für Deutschland typisch ist, wider.

4.4.2.1 Sommermeßperiode

In der Abbildung 36 sind die Ergebnisse für die Radonexhalationsrate und die Lufttemperatur einer 3-wöchigen Meßkampagne für den Sommer dargestellt. Der Meßzeitraum war Juli - August 2000.

Die Meßpunkte sind, wie bei der Exhalationsuntersuchung bei der Halde, im Abstand von 4 Stunden angegeben. Die gestrichelten senkrechten Linien markieren 12 Uhr mittags, während die fetten Striche den Tageswechsel um Mitternacht markieren.

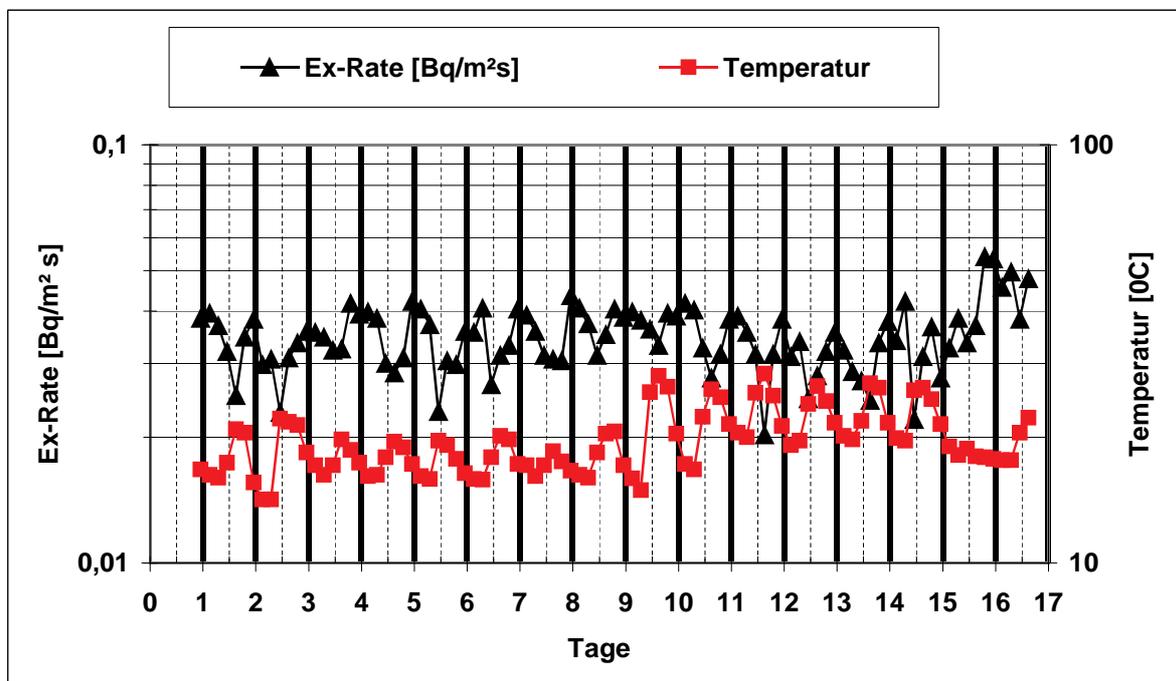


Abbildung 36: Exhalationsrate und Lufttemperatur in Abhängigkeit von der Tageszeit für einen 3-wöchigen Meßzyklus im Juli, August 2000.

Es ist deutlich zu erkennen, daß für die Exhalationsrate ausgeprägte Tagesgänge existieren. Die höchsten Exhalationsraten wurden gegen Mitternacht, die niedrigsten

kurz nach Mittag gemessen. Trotz dieser offensichtlichen Abhängigkeit der Radonexhalation von der Lufttemperatur bestehen Unterschiede zu den auf dem Haldenplateau gemessenen Werten, die im Abschnitt 4.2.3 diskutiert wurden.

Auf einer Halde wurden die höchsten Exhalationsraten in den frühen Morgenstunden erreicht, während auf der Wiese die größten Werte ziemlich genau um Mitternacht gemessen wurden. Zu diesem Zeitpunkt hatte die Lufttemperatur jedoch noch nicht ihren Minimalwert erreicht. Dieser Sachverhalt ist in der Abbildung 37 illustriert, wobei die auf der Halde und der Wiese gemessenen Exhalationsraten zusammen dargestellt sind.

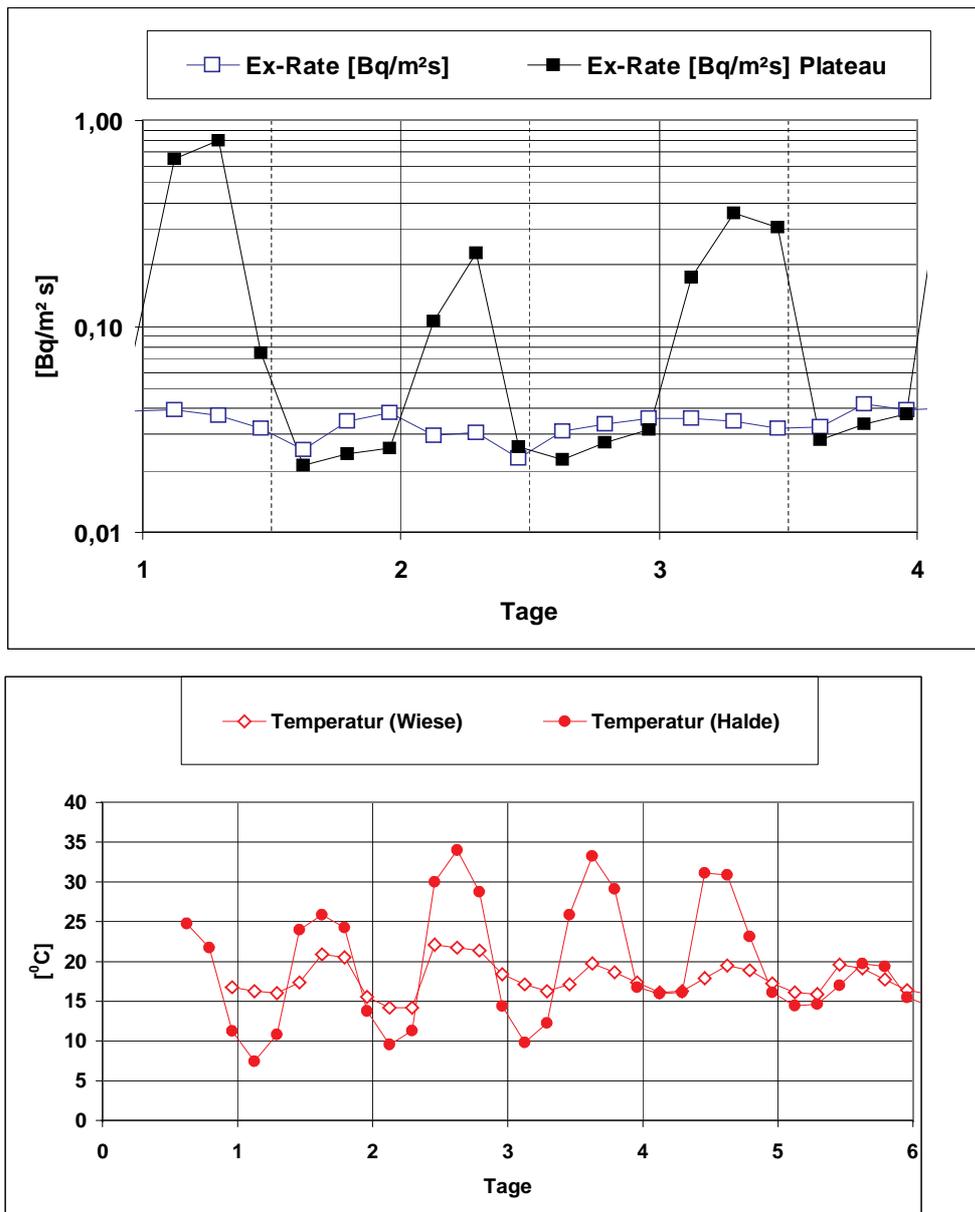


Abbildung 37: oberes Bild: Vergleich der Exhalationsraten einer Halde (Haldenplateau) mit denen einer Wiese (geogene Fläche)
unteres Bild: Verlauf der Lufttemperaturen auf der Halde und der Wiese

Ausgehend von diesen Resultaten stellt sich der Exhalationsmechanismus komplizierter als der auf der Halde dar, zumal sich die Lufttemperaturen auf der Halde und der Wiese während des betrachteten Meßzeitraums (Anfang Juli) annähernd synchron in Abhängigkeit von der Tageszeit änderten. Dies ist im unteren Teil der Abbildung 37 illustriert.

Die Abbildung 38 zeigt Mittelwert, Maximum und Minimum der Exhalationsraten in Abhängigkeit von der Tageszeit. Es ist zu erkennen, daß jede der 3 Größen ihren

Minimalwert zwischen 11 und 15 Uhr einnimmt. Dies ist ein eindeutiger Hinweis auf die aus der Abbildung 36 folgenden Tagesgänge der Exhalationsrate.

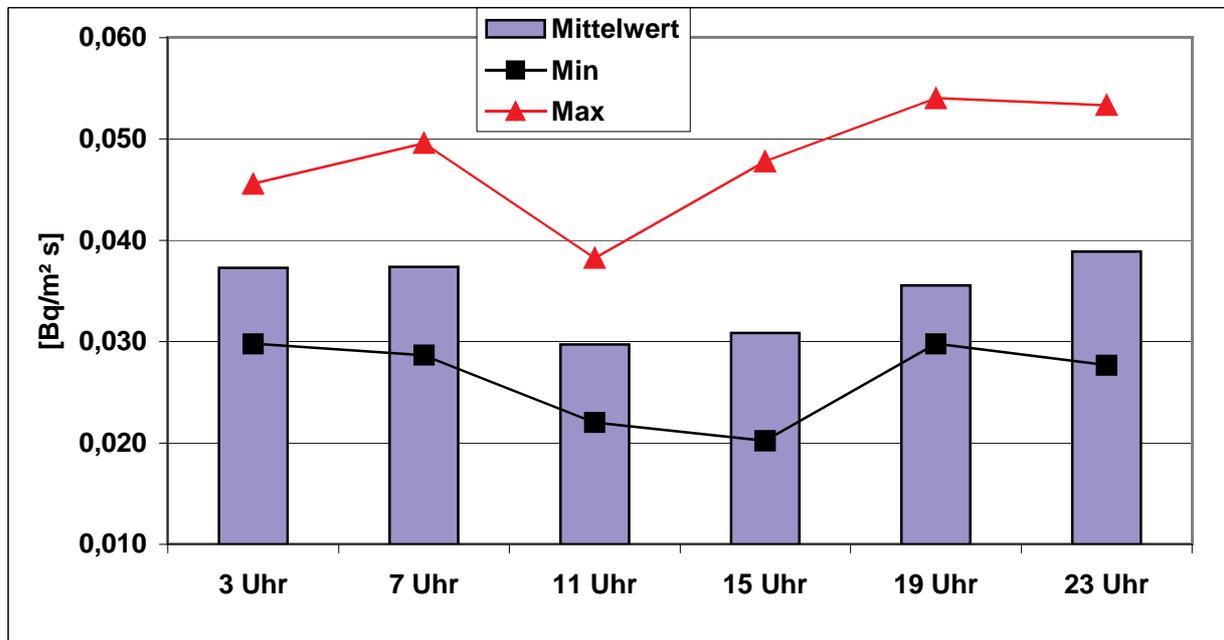


Abbildung 38: Mittelwert, Maximum und Minimum der Exhalationsraten in Abhängigkeit von der Tageszeit (Wiese, Sommerzeit).

Obwohl das Exhalationsmuster auf der Wiese dem auf dem Haldenplateau in gewisser Weise ähnelt, gibt es noch weitere qualitative Unterschiede. Auf der Halde sind, wie zu erwarten, die Tag-Nacht-Schwankungen weit größer als die auf der Wiese. Die Periode geringer Radonexhalation umfaßt auf der Halde einen Zeitraum von ca. 12 Stunden, der signifikant länger als der für die Wiese ist. Dabei sind während der Periode geringer Exhalation auf der Halde die Exhalationsraten vergleichbar und teilweise niedriger als die auf der Wiese, d.h. sie sind vergleichbar mit den geogenen Hintergrundwerten. Dies ist ein erstaunliches Resultat und nur dadurch zu erklären, daß auf dem Haldenplateau über einen längeren Zeitraum von ca. 12 Stunden, der mit dem Temperaturunterschied Halde-Atmosphäre (Sonnenscheindauer) gekoppelt ist, konvektive Strömungen den diffusiven Radontransportmechanismen entgegenwirken.

Auf der Wiese treten ebenfalls Tagesgänge auf, doch die Temperaturunterschiede zwischen Boden und Atmosphäre können aufgrund der Tatsache, daß die Wiese praktisch eine unendlich mächtige Bodenschicht darstellt, nicht zu ausgeprägten

konvektiven Strömungen führen, wie dies bei einer Halde wegen ihres arttypischen Aufbaus möglich ist.

In diesem Zusammenhang ist zu bemerken, daß bei den Messungen auf der Halde die Mittagstemperaturen generell höher und die Temperaturen am frühen Morgen niedriger als auf der Wiese waren (s. Abbildung 37), so daß der Tag-Nacht-Temperaturunterschied maximal 25 °C erreicht. Bei den oben diskutierten Messungen auf der Wiese waren die Tag-Nacht-Temperaturunterschiede geringer. Dies ist auch ein Grund dafür, daß die entsprechenden Unterschiede in den Exhalationsraten geringer sind.

Punktuelle Messungen an heißen Sommertagen und kühlen Sommernächten auf der Wiese zeigen, daß sich die in Abbildung 36 dargestellten Amplituden der Tagesgänge etwas verstärken. Es wird jedoch kein qualitativ unterschiedliches Exhalationsmuster beobachtet. Dieser Trend kann der Abbildung 39 entnommen werden. Sie zeigt die Exhalationsrate in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz $T - T_{\min}$, wobei die minimale Temperatur T_{\min} für den 3-wöchigen Meßzyklus im Juli 14,9 °C betrug.

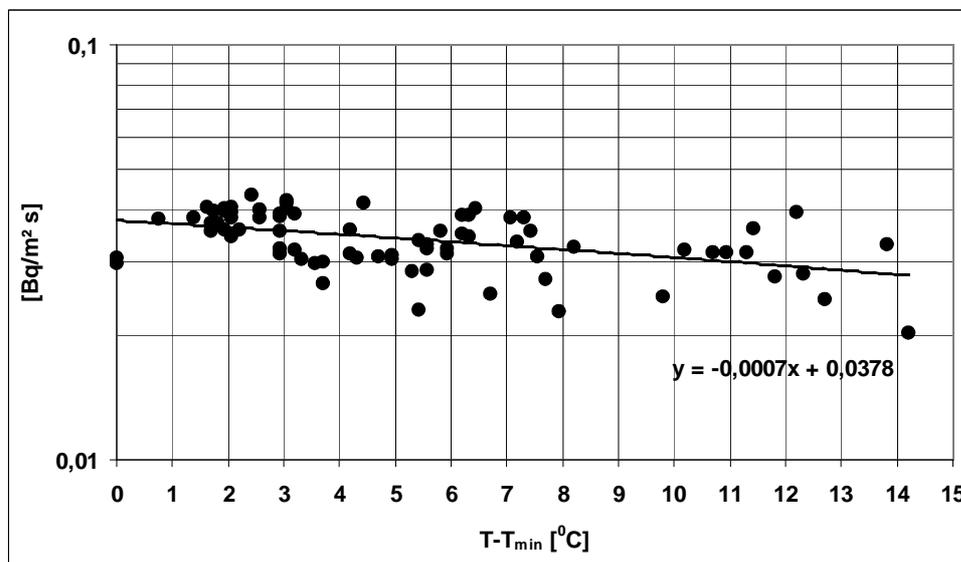


Abbildung 39: Exhalationsrate in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz $T - T_{\min}$, wobei die minimale Temperatur T_{\min} für den 3-wöchigen Meßzyklus im Juli 14,9 °C betrug.

Die Ergebnisse der Abbildung vermitteln, daß mit steigender Temperaturdifferenz, d.h. hauptsächlich am frühen Nachmittag, die Exhalationsrate abnimmt, da ein Wärmetransport von der Atmosphäre in die Wiesenoberfläche stattfindet und somit den diffusiven Radontransport merklich reduziert. Ein solches Verhalten wurde auch an einer speziell aufgebauten Bodensäule (1 m² Querschnittsfläche, 2 m Höhe)

einer speziell aufgebauten Bodensäule (1 m² Querschnittsfläche, 2 m Höhe) gefunden und ausführlicher untersucht, wobei Bodentemperatur- und Bodenfeuchtigkeitsprofile in Abhängigkeit von der Tageszeit gemessen wurden [6].

In der Abbildung 40 ist die für den 3-wöchigen Meßzyklus im Juli 2000 kontinuierlich gemessene Exhalationsrate (4-Stundenrhythmus) zusammen mit dem Mittelwert dargestellt, um den Schwankungsbereich der Exhalationsrate verdeutlichen zu können.

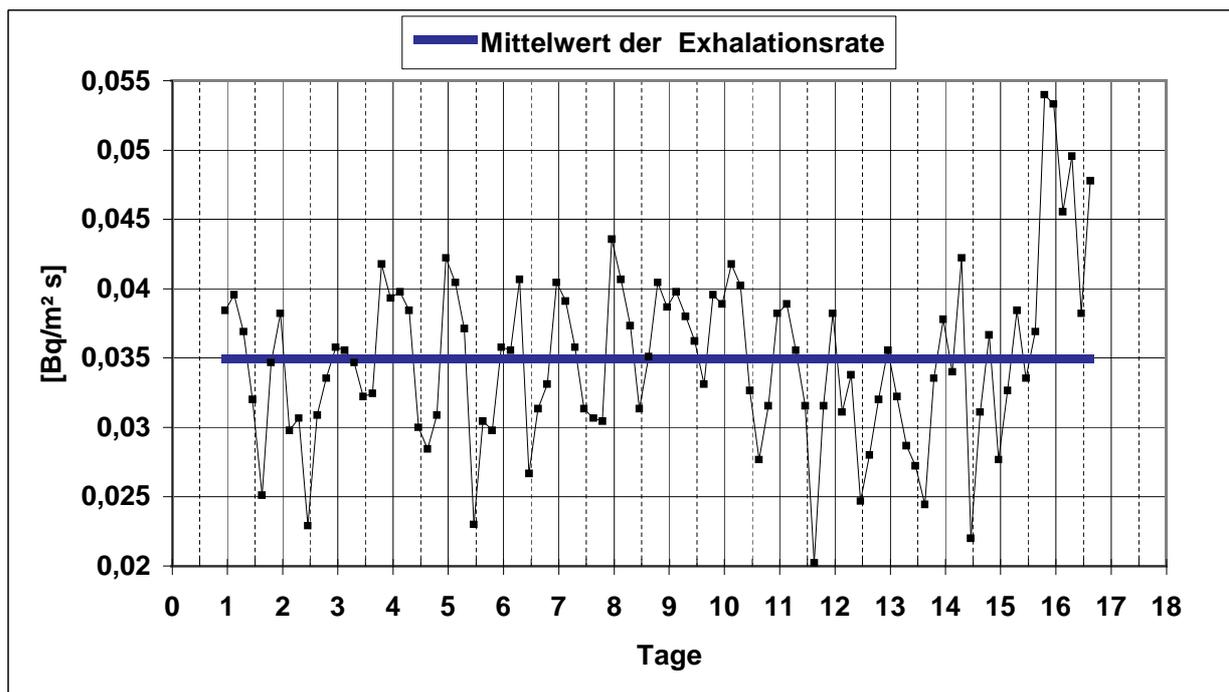


Abbildung 40: Exhalationsrate in Abhängigkeit von der Tageszeit für einen 3-wöchigen Meßzyklus im Juli 2000 zusammen mit dem Mittelwert.

In der Tabelle 3 sind die statistischen Informationen zu diesem Meßzyklus zusammengefaßt. Die relative Schwankung der Exhalationsrate lag bei 20% und ist für die Sommerhochdruckperiode signifikant kleiner als der bei der Halde erhaltene Wert. Würde man im Meßzeitraum z.B. die Regenperioden mit berücksichtigen, erhöht sich die relative Schwankungsbreite deutlich, da während und nach dem Regen die Radonexhalation wegen der Wassersättigung im Porenraum nahezu vernachlässigbar ist.

Tabelle 3: Statistische Angaben zur Exhalationsrate für den 3-wöchigen Meßzyklus im Juli 2000 zusammen mit dem Mittelwert.

Min Exhalationsrate	0,020 Bq/m ² ·s
Max Exhalationsrate	0,054 Bq/m ² ·s
Mittelwert der Exhalationsrate	0,035 Bq/m ² ·s
Median	0,035 Bq/m ² ·s
Standardabweichung	0,005 Bq/m ² ·s
relative Schwankungsbreite des Mittelwerts	20%

Daß während der gesamten Meßperiode sommerliches Hochdruckwetter herrschte, ist in der Abbildung 41 illustriert.

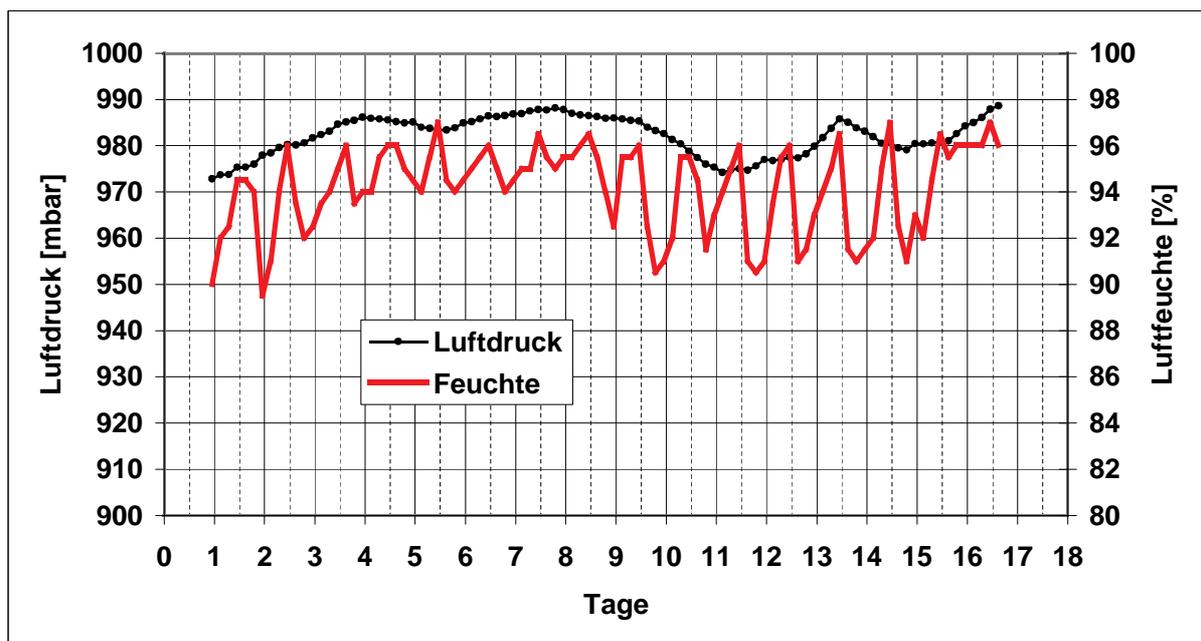


Abbildung 41: Entwicklung des Luftdrucks und der Luftfeuchte für den 3-wöchigen Meßzyklus im Juli 2000

Die dargestellten Tagesgänge der Luftfeuchte sind eine Konsequenz der Temperaturänderung, d.h. die Luftfeuchte ist am größten, wenn die Temperatur ihr Tagesmaximum erreicht (vgl. Abbildung 42). Dies bedeutet nicht, daß die Radonexhalationsrate eine direkte Funktion der Luftfeuchte ist, obwohl der Feuchtigkeitsgehalt von Luft und Boden den Radontransport merklich beeinflussen kann.

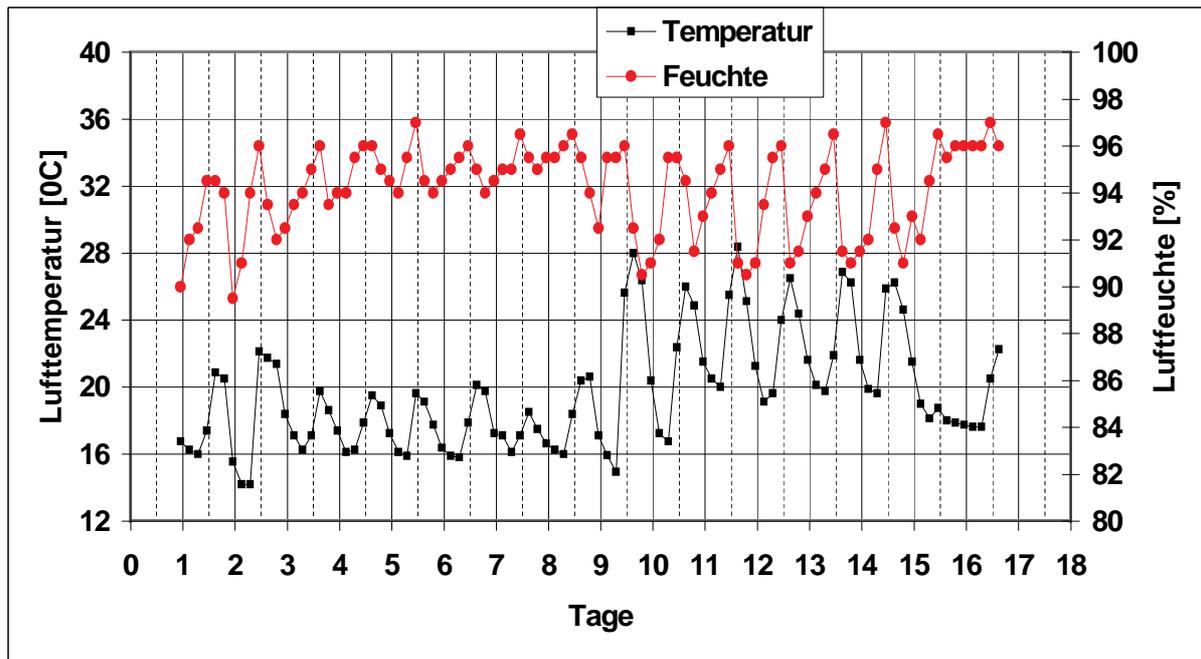


Abbildung 42: Entwicklung der Lufttemperatur und der Luftfeuchte für den 3-wöchigen Meßzyklus im Juli 2000.

4.4.2.2 Wintermeßperiode

In der Abbildung 43 sind die Ergebnisse der Radonexhalation der Meßperiode im Januar 2001 dargestellt. Diese Messungen beziehen sich auf einen Zeitraum von 7 Tagen. Bei Frosteintritt treten Probleme mit dem Schließsystem der Sammelbox auf. Sie sind dadurch bedingt, daß aufgrund der niedrigen Außentemperaturen die sich am Deckel niederschlagende Feuchtigkeit gefriert und letztlich dazu führt, daß der Deckel nicht mehr automatisch geöffnet werden kann.

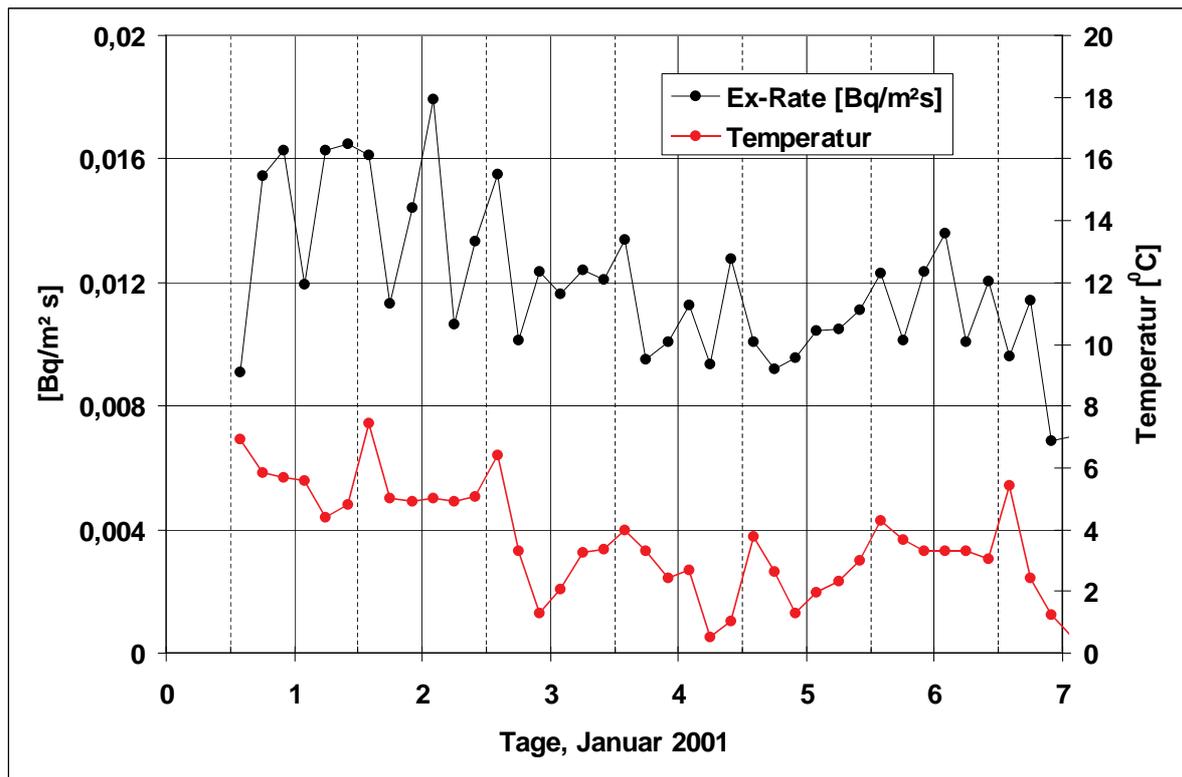


Abbildung 43: Exhalationsrate und Lufttemperatur in Abhängigkeit von der Tageszeit für einen 7-tägigen Meßzyklus im Januar 2001.

Verglichen zu den Meßergebnissen der Sommerperiode treten qualitative Unterschiede im tageszeitlichen Verhalten der Exhalationsrate auf. Als wichtigstes Resultat ist zu vermerken, daß keine ausgeprägten Tagesgänge wie im Sommer existieren.

Dies war im Lichte der bisher diskutierten Ergebnisse zu erwarten, da die Temperaturänderungen während eines Tages nur etwa 2 - 3 °C betragen. Exhalationsmaxima treten sowohl nachts als auch am Tage auf. Die Exhalationsrate ist somit im Winter weitestgehend unabhängig von der Tageszeit. Dieser Sachverhalt ist in der Abbildung 44 illustriert, die die mittleren Exhalationsraten für ausgewählte Tageszeiten zeigt. Verglichen zu den Ergebnissen in Abbildung 38 vermittelt diese Abbildung, daß Tagesgänge der Exhalationsrate nicht existieren.

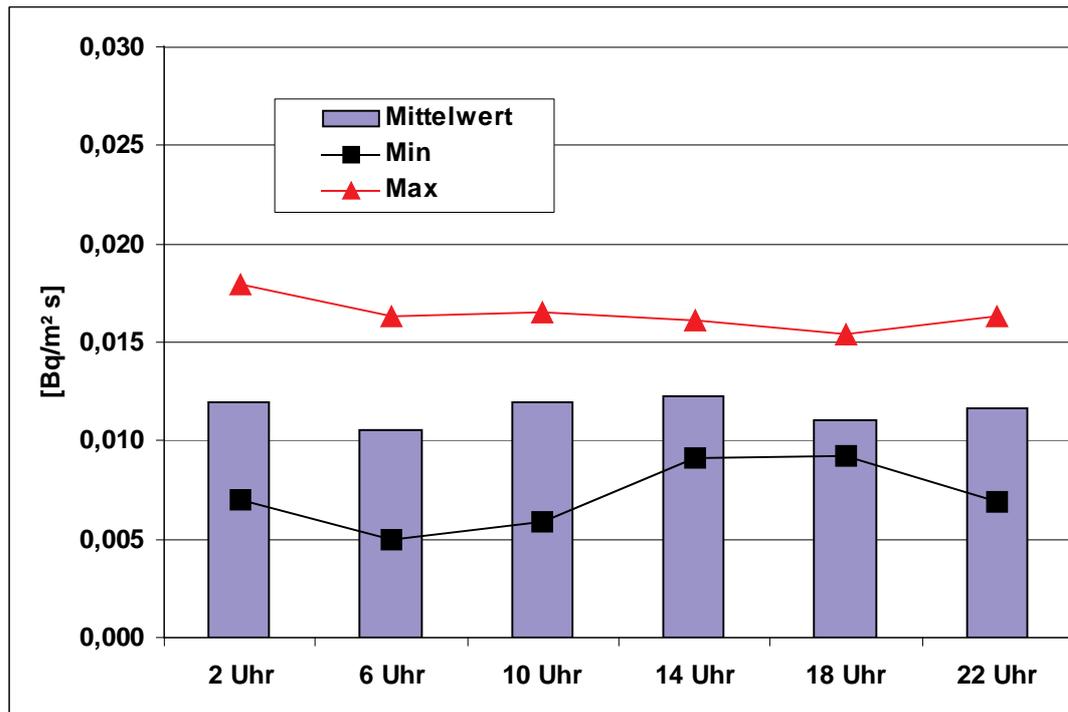


Abbildung 44: Mittelwert, Maximum und Minimum der Exhalationsraten in Abhängigkeit von der Tageszeit (Wiese Winterzeit).

Des weiteren ist zu beachten, daß die mittleren Exhalationsraten für die betrachtete Winterzeit deutlich niedriger als die für die Sommerzeit sind. Sie liegen mit $0,012 \text{ Bq}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ um den Faktor 3 niedriger als die der Sommermessung. Dies ist nicht so bei einer Halde, da dort aufgrund der Haldenstruktur verstärkte Exhalationen bei Lufttemperaturen beobachtet werden, die geringer als die im Haldeninneren sind (vgl. Diskussionen im Abschnitt 4.2.3).

Die hier diskutierten Ergebnisse können als typisch für Außentemperaturen, die wenige Grad über dem Gefrierpunkt liegen, bezeichnet werden. Dies haben weitere Vergleichsmessungen bei Temperaturen wenig oberhalb des Gefrierpunkts gezeigt, auf die hier nicht näher eingegangen wird.

4.4.3 Schlußfolgerungen aus den Ergebnissen der Exhalationsmessungen auf der Wiese

Die auf der anthropogen nicht beeinflussten Wiese durchgeführten Exhalationsmessungen lassen folgende Schlußfolgerungen zu:

- Im Sommer werden ausgeprägte Tagesgänge, die denen auf einer Halde ähnlich sind, beobachtet.
- Im Winter bleiben aufgrund der geringen Temperaturschwankungen solche Tagesgänge der Exhalationsrate aus.
- Die Mechanismen der Kopplung der Exhalationsrate an die Außentemperatur stellen sich trotz gewisser Übereinstimmungen anders als auf einer Halde dar. Erste Untersuchungen und theoretische Ableitungen zu diesem Problemkreis, die nicht Bestandteil dieses Förderprojekts sind, wurden durchgeführt. Es gibt Hinweise, daß Thermodiffusion sowie atmosphärisches Pumpen zu berücksichtigende Prozesse sind, die näher zu untersuchen sind [12].
- Da Tagesgänge der Radonexhalation unzweifelhaft existieren, hängt die Bewertung der Quellstärke einer nicht haldenartigen Fläche auch davon ab, zu welchem Zeitpunkt bzw. zu welcher Jahreszeit die punktuellen Exhalationsmessungen durchgeführt wurden.
- Aus diesem Grund werden integrierende rasterartige Messungen, wie sie auf der Halde durchgeführt wurden, ein zuverlässiges Abbild der Radonquellstärkeverteilung über die gesamte zu bewertende Fläche liefern.
- Die Messungen auf der Wiese prüften den Schwankungsbereich des geogenen Radonexhalationsniveaus in Abhängigkeit von der Tageszeit, der wegen des vergleichsweise geringen Radonpotentials auch nicht sehr groß ist. Gegen Mitternacht ist die Exhalationsrate etwa 30% höher als zur Mittagszeit. Es ist zu erwarten, daß auf radioaktiv kontaminierten Flächen dieser Schwankungsbereich bedeutend größer sein wird, so daß punktuelle Messungen der Radonexhalation nur eine begrenzte Information über die Gesamtquellstärke der Fläche liefern werden.

5 Aufbau und Auswahl von Meßfeldern

5.1 Vorbemerkung zur Vorgehensweise

Um den Zusammenhang zwischen der in der bodennahen Luftschicht gemessenen Radonkonzentration in Höhen von 5 bis 10 cm über der Erdoberfläche und der damit verknüpften Exhalationsrate herausarbeiten zu können, wurde in verschiedene Richtungen vorgegangen. Diese umfaßten die nachfolgend aufgeführten Untersuchungen.

- (a) Zum einen wurden spezielle Testfelder von 1 m² errichtet, deren Exhalationsrate über die gesamte Fläche annähernd konstant und deutlich höher als die geogener Flächen ist. Die Radonkonzentration über diesen Testflächen wurde über längere Zeiträume unter verschiedenen Randbedingungen, wie z.B. Ausschluß der Windadvektion, in 5 und 10 cm Höhe über der Oberfläche gemessen. Zusammen mit den Testfeldern wurde eine Wetterstation betrieben.
- (b) Des weiteren wurden auf geogen nahezu unbelasteten Flächen die Exhalationsraten quasikontinuierlich gemessen und die Radonkonzentration wiederum in 5 und 10 cm Höhe über der Oberfläche gemessen.
- (c) Die laborartigen Versuche wurden auf Feldversuche ausgedehnt, wobei auch die vom BfS gemessenen Radonkonzentrationen in 10 cm Höhe auf dem der Trockendammhalde in Johanngeorgenstadt (s. [10]) den Ergebnissen einer quasikontinuierlichen Messung der Radonexhalation gegenübergestellt wurden. Die flächenhafte Messung der Radonkonzentration in geringen Höhen liefert ein belastbares Abbild der Radonaustrittsgebiete. Insbesondere zeigt ein solches Verteilungsmuster starke Abhängigkeiten von der Haldenschüttung, dem Haldenaufbau und der jahreszeitlichen Variation der Exhalationsrate.
- (d) Die Aussagekraft solcher Untersuchungen wurde auch auf der Halde B in Dresden-Coschütz getestet, wobei die Radonkonzentration großflächig im Raster 20 m x 20 m bestimmt wurde.

Bei den Messungen wurden Kernspurdetektoren der Firma ALTRAC eingesetzt.

5.2 Beschreibung und Aufbau von Testfeldern

Auf dem Betriebsgelände von IAF - Radioökologie wurde eine Reihe von Testfeldern künstlich auf einer anthropogen nahezu nicht beeinflussten Fläche (Wiese) angelegt. Die die Testfelder umgebende Wiesenfläche wurde ebenfalls als Testfeld betrachtet. Des weiteren wurde ein zusätzliches Areal von ca. 25 m² auf einer mehrere Hektar großen Wiese in Dresden Rochwitz, die als anthropogen unbeeinflusstes Gebiet gilt, eingezäunt und als Testfeld betrieben. Die Testfelder werden nachfolgend genauer beschrieben.

5.2.1 Künstlich angelegte Testfelder

Es wurden insgesamt 9 Testfelder von 1 m x 1 m Fläche mit definierter Exhalationsrate angelegt, um vor allem die folgenden Fragestellungen zu beantworten:

- (a) Wie lokal wird gemessen?
- (b) Welchen Einfluß hat der Wind auf die Meßergebnisse?
- (c) Wie zuverlässig sind Messungen mit einem Kernspurdetektor bei geringen Konzentrationen?

In der Abbildung 45 ist der Grundriß und die Seitensicht eines Testfelds schematisch dargestellt. Jedes der 1 m x 1 m großen Testfelder besteht aus einem oben offenen Holzkasten mit einer Höhe von 20 cm. Als Radon generierendes Material werden Tailings benutzt, die durch eine 10 cm mächtige Kiesschicht abgedeckt sind. Die Abbildung 46 zeigt Fotos der Testfelder in unterschiedlichen Entwicklungsstadien.

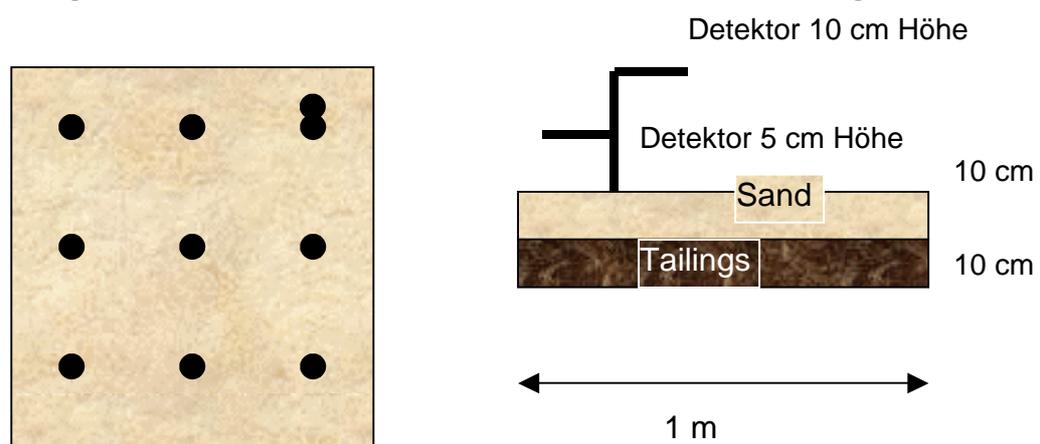


Abbildung 45: Schematische Darstellung eines Testfelds



Abbildung 46: Oben: Testfelder zum Einbau vorbereitet, mittig: auf der Wiese eingebaute Testfelder, unten: Testfelder mit jeweils 9 Kernspurdetektoren bestückt, das Netz im Vordergrund ist zum Abweisen von Vögeln

Die Testfelder sind in der Erdoberfläche eingelassen worden, so daß sie mit der umgebenden Wiese auf einer Höhe liegen. Die Fotografie in Abbildung 47 veranschaulicht den Einbau der Testfelder von insgesamt 4 m², wobei mittig Kernspurdetektoren in Höhen von 5, 10 und 25 cm angeordnet sind.



Abbildung 47: Ensemble von 4 Testfeldern in einer umgebenden Wiese. In der Mitte der Felder befinden sich Kernspurdetektoren in Höhen von 5, 10 und 25 cm.

Um den Einfluß von Niederschlag (Regen und Schnee) auszuschließen, sind die Testfelder überdacht worden. In der Abbildung 48 ist dies dokumentiert. Sie illustriert auch verschiedene Meßmethodiken zur Bestimmung der Radonexhalation unter Anwendung von Ringzylindern verschiedener Höhe, um den Einfluß der Windadvektion auf die Bestimmung der Exhalationsraten abschätzen zu können.



Abbildung 48: Überdachte Testfelder. Die Advektion des Windes auf den Radontransport ist durch unterschiedlich hohe Kunststoffringe eingeschränkt worden.

5.2.2 Testfeld Wiese

5.2.2.1 Testfeld Wiese 1

Die Abbildung 49 zeigt eine Aufnahme des eingezäunten Testfelds 1 aus dem Frühjahr 2001. Das Feld ist ca. 5 m x 5 m groß und auf einer mehrere Hektar großen Wiese angelegt. Das Untersuchungsgebiet liegt im Stadtteil Dresden-Rochwitz, der sich am Nordosthang des Elbtales von Dresden befindet. Dieses Gebiet wurde bereits im Rahmen des Förderprojekts [1] untersucht. Von Interesse war dabei die Tatsache, daß trotz relativ geringer mittlerer spezifischer Ra-226-Aktivitäten im Boden von etwa 60 Bq/kg eine Radonkonzentration in der Bodenluft von bis zu 457 kBq/m³ in ca. 1,7 m Tiefe gemessen wurde.



Abbildung 49: Testfeld 1 von 5 m x 5 m auf einer Wiese

Die Auswertung zeigte, daß bei der Interpretation der Radonkonzentrationen in der Bodenluft sehr differenziert vorgegangen werden muß. Die Indikation einer hohen Radonkonzentration in der Bodenluft bedeutet nicht zwangsweise, daß auch ein hohes Radonrisiko bzw. -potential vorhanden ist.

Geologisch ist das Untersuchungsgebiet durch seine Lage im Südteil der Lausitzer Antiklinalzone charakterisiert. Hier stehen präkambrische Bildungen von Granodiorit (Anatexit), die Urangehalte von 1 - 5,5 mg/kg (Mittelwert 2,5 mg/kg) aufweisen an. Im Hangenden wird der Granodiorit von Hanglehm und Hangschutt überlagert.

Die spezifische Ra-226-Aktivität in Mutterboden und Hanglehm liegt im Mittel bei 33 Bq/kg und im Hangschutt bei 44 Bq/kg.

Die in unterschiedlichen Tiefen durchgeführten Messungen der Radonkonzentration in der Bodenluft zeigten folgende Meßergebnisse:

- 131 kBq/m³ in 1 m Tiefe,
- 457 kBq/m³ in 1,7 m Tiefe,
- 294 kBq/m³ in 2,3 m Tiefe.

Für eine Abschätzung der aus diesen Ausgangsdaten zu veranschlagenden Radonkonzentration in der Bodenluft sollte sich nach Formel

$$C_{Rn}^P \left[\frac{Bq}{m^3} \right] = E \frac{M_d \cdot A_{Ra}}{V_p} = E \frac{\rho_d \cdot A_{Ra}}{n} \quad (29)$$

eine Radonkonzentration im Porenraum von 44 kBq/m³ ergeben, die aber etwa eine Größenordnung unterhalb des Meßwerts liegt, der für die angesaugte Bodenluft in 1,7 m Tiefe bestimmt wurde. Um diesen offensichtlichen Widerspruch aufzuklären, wurde ein Untersuchungsprogramm durchgeführt, in dem alle in Gl. (29) enthaltenen Einflußgrößen bestimmt wurden. Die Ergebnisse für die Dichte und die Porosität sind in der Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Ergebnisse für Lagerungsdichte und Porosität

Tiefe	Porosität n	Lagerungsdichte ρ_d [g/cm ³]
0 - 10 cm	0,44	1,75
30 - 40 cm	0,35	1,9
40 - 60 cm	0,34	1,95

In der Abbildung 50 sind die Ergebnisse der Radionuklidanalyse für den im Bereich des Testfelds liegenden Schurf A97 bis 1,25 m Tiefe dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, daß sich mit der Schichtenfolge die spezifischen Ra-226- und Pb-210-Aktivitäten etwa ab 1 m Tiefe verdoppeln. Im Bereich unterhalb 1 m ist auch eine negative Bleispur erkennbar. Das dort auftretende Defizit an Pb-210 wird durch die positiven Werte in den höher gelegenen Schichten kompensiert. Die Summe über die Bleispur ist geringfügig negativ, woraus sich gemäß der in [1] entwickelten Modellvorstellungen eine mittlere Exhalationsrate von $J = 0,01 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ errechnet, die sehr gut mit entsprechenden Direktmessungen mittels der Boxmethode übereinstimmt.

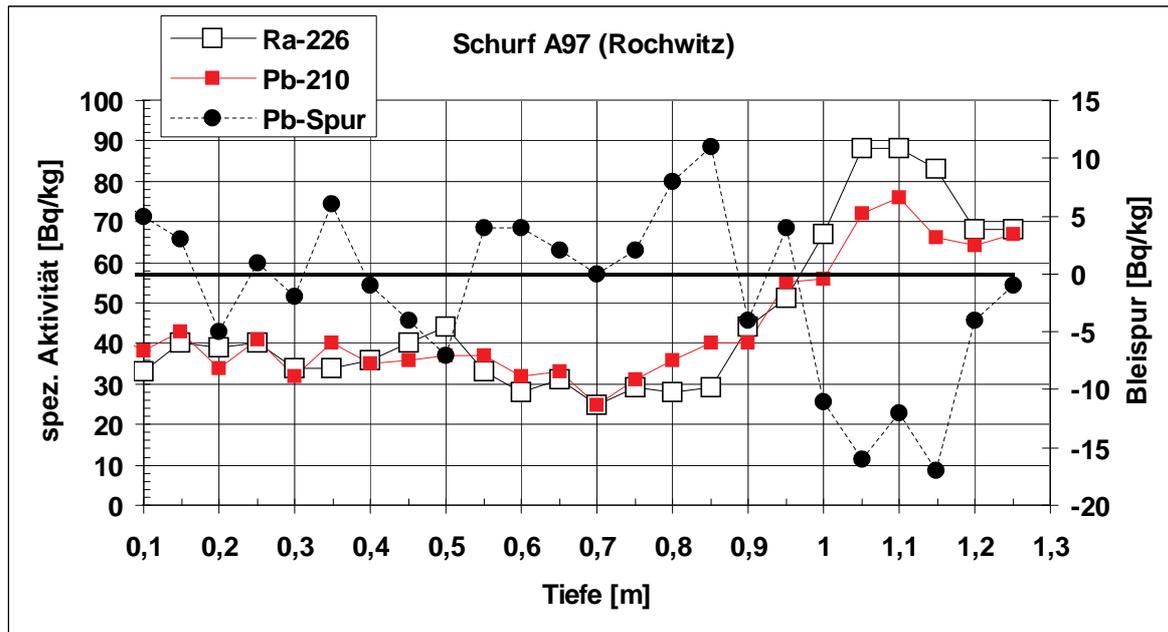


Abbildung 50: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 sowie der Bleispur (rechte Ordinate), $A_{\text{Pb-210}} - A_{\text{Ra-226}}$, in Abhängigkeit von der Tiefe für den Schurf A97 (Dresden-Rochwitz, Ergebnisse aus [1]).

In Auswertung der experimentellen Untersuchungen wurde festgestellt, daß die gemessenen erhöhten Radonkonzentrationen durch das Zusammenwirken von zwei Haupteffekten bedingt sind. Zum einen ist die spezifische Ra-226-Aktivität der Feinfraktion im Boden etwa um den Faktor 3 - 4 höher als die der Fraktion > 1 mm. Zum anderen ist aufgrund der Lagerungsverhältnisse (ca. 70% Steine mit einem Durchmesser größer als 1 mm) der für die Entwicklung der Radonkonzentration zur Verfügung stehende Porenraum stark eingeschränkt. Dort, wo mit der Sonde in den teils sehr feinkörnigen Zersatz eingedrungen werden kann, ist die effektive Porosität etwa um den Faktor 3 - 4 niedriger als in "normalen" Böden. Beide Faktoren wirken in die gleiche Richtung und würden zusammengenommen eine Erhöhung der Radonkonzentration um den Faktor 9 - 16 ergeben.

Ein wichtiges Argument zur Stützung dieser These stellen die Untersuchung der Bleispur und der spezifischen Pb-210-Aktivität dar. Würde nämlich die in der Bodenluft gemessene hohe Radonkonzentration auf dem "Herantransport" von Radon aus tieferen Schichten, z.B. über Klüfte, zurückzuführen sein, müßte sich im Verlauf der Zeit ein Überschuß an Pb-210 zumindest in der kleinsten Kornfraktion herausgebildet haben. Bei all den vorliegenden Untersuchungsergebnissen konnte jedoch eine

positive Bleispur nicht verifiziert werden. Dies ist aber nur erklärbar, wenn die hohen Radonkonzentrationen in der Bodenluft lokal bedingt sind.

5.2.2.2 Testfeld Wiese 2

Das Testfeld Wiese 2 befindet sich in unmittelbarer Umgebung der künstlich angelegten Testfelder (s. Abbildungen 47 und 48). Der Hauptgrund für diese Wahl bestand darin, den möglichen Einfluß der benachbarten künstlich angelegten Felder mit deutlich höherer Radonexhalation auf die in geringen Höhen herrschenden Radonkonzentrationen zu untersuchen.

Da dieses Testfeld nur etwa 300 m vom Testfeld Wiese 1 entfernt ist, muß auch von den für Testfeld Wiese 1 dargestellten geologischen Verhältnissen ausgegangen werden. Dies wurde u.a. anhand von 8 Schürfs nachgewiesen. Die Ergebnisse der Radionuklidanalyse sind in der Abbildung 51 dargestellt. Die mittlere Ra-226-Aktivität liegt bei 33 Bq/g. Die Bleispur und die Emanationskoeffizienten sind in der Abbildung 52 in Abhängigkeit von der Tiefe dargestellt. Letztere liegen im Mittel bei $E=0,23$. Sie zeigen jedoch, daß der Boden der Wiese durch eine verhältnismäßig große Variationsbreite hinsichtlich der Emanation charakterisiert ist. Eine deutlich ausgeprägte Bleispur konnte in den obersten 0,5 m nicht beobachtet werden. Dieser Sachverhalt ist typisch für geogene Flächen und schlägt sich auch in einer mittleren Exhalationsrate von $0,012 \text{ Bq/m}^2\cdot\text{s}$ nieder. Darauf wird im Abschnitt 5.4.3 noch detailliert eingegangen. Des weiteren ist zu erkennen, daß wegen des Fallouts der Radonfolgeprodukte in 6 der 8 Schürfe die Bleispur in der oberen Bodenschicht positiv ist.

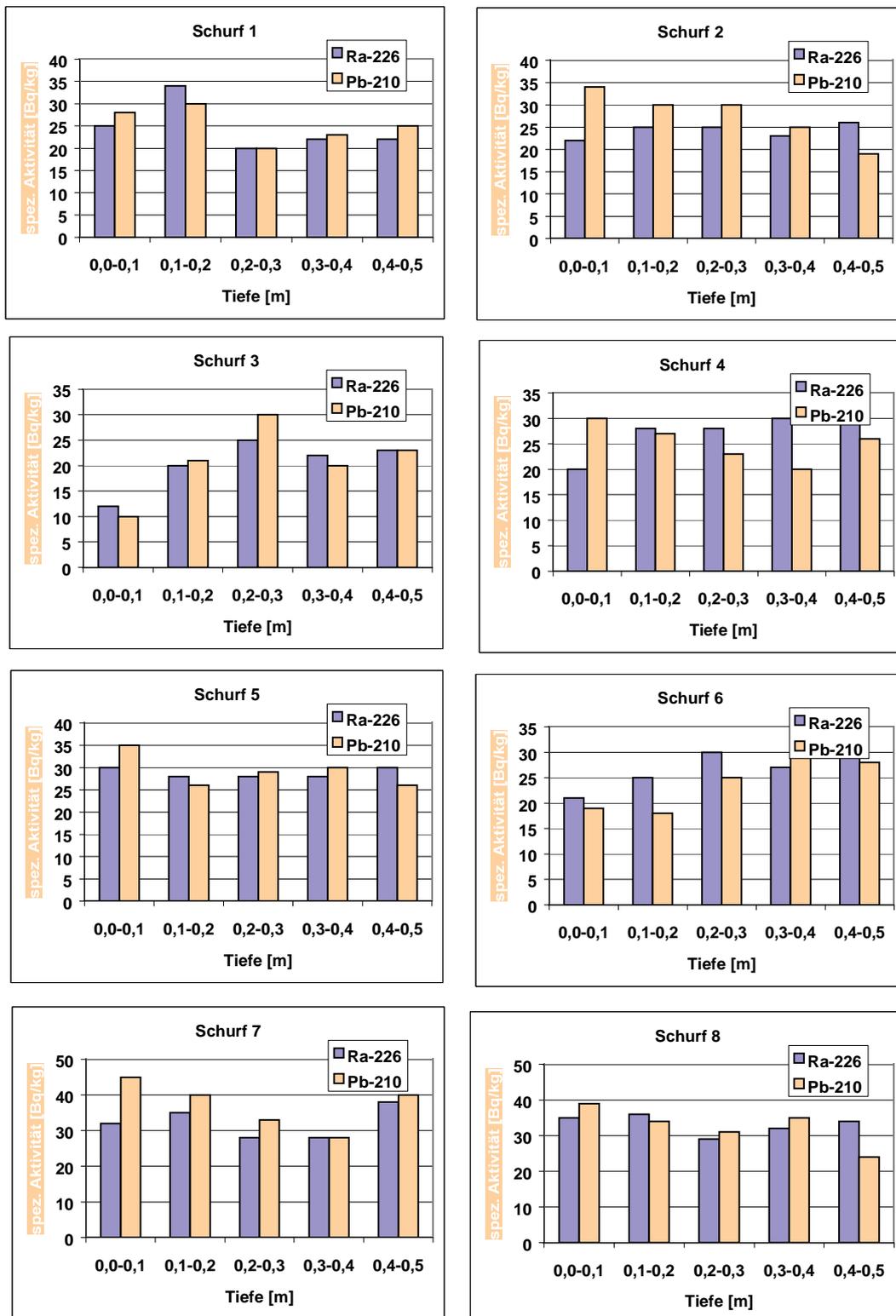


Abbildung 51: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 in Abhängigkeit von der Tiefe für Schürfe auf dem Testfeld Wiese (Dresden-Rochwitz).

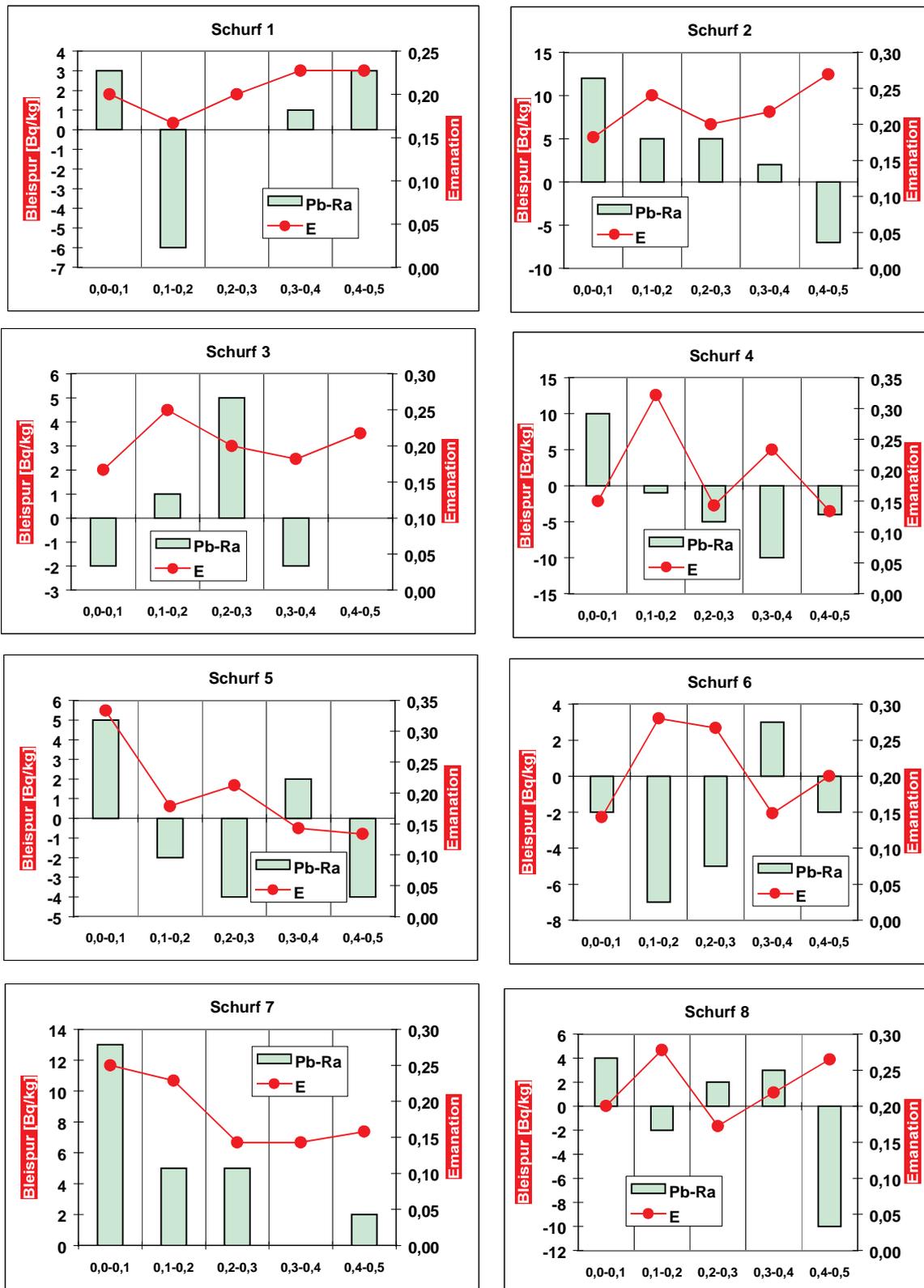


Abbildung 52: Bleispur (linke Ordinate), $A_{\text{Pb-210}} - A_{\text{Ra-226}}$ und Emanationskoeffizient in Abhängigkeit von der Tiefe für die Schürfe auf dem Testfeld Wiese (Dresden-Rochwitz).

Zusätzlich wurde im Bereich des Testfelds die Radonkonzentration und die Gaspermeabilität in Tiefen von 0,2, 0,5 und 0,7 m gemessen. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 5 zusammengestellt. Sie stellen Mittelwerte dar, die für jede Teufe aus etwa 12 Einzelwerten gebildet wurden.

Tabelle 5: Im Bereich des Testfelds Wiese 2 gemessene Radonkonzentrationen in der Bodenluft und Gaspermeabilitäten

Tiefe	Radonkonzentration [kBq/m³]	Permeabilität [m²]
0,3 m	17	4,0E-12
0,6 m	41	5,8E-13
0,9 m	78	< E-13

5.3 Messung der Radonexhalation auf den Testfeldern

5.3.1 Boxmethode und E-Perm-Monitore

Zur Bestimmung der Radonexhalation auf den Testfeldern wurden zwei Methoden angewendet. Zum einen wurde vorrangig die bereits im Abschnitt 3 beschriebene Boxmethode benutzt, wobei sowohl ein statisches Meßregime (Meßzeitraum von ca. 90 Minuten) als auch quasikontinuierliche Messungen durchgeführt wurden. Zum Vergleich wurde eine weitere Methode geprüft, die auf der E-Perm-Technik beruht. Dabei wird eine Kammer mit einem verhältnismäßig kleinen Diffusionsfenster von 180 cm² auf die zu untersuchende Fläche aufgesetzt. Die Methode ist in [13] beschrieben. Die Abbildung 53 gibt eine schematische Darstellung der E-Perm-Monitore.

Die Radonexhalationsrate wird über den Spannungsabfall in den Elektreten berechnet, wobei in der Regel jeweils zwei Messungen durchzuführen sind. In der 1. Messung wird das Fenster der Diffusionskammer mit einer radondichten Folie (z.B. Aluminium, s. Abbildung 53, unten) verschlossen, so daß nur der Spannungsabfall infolge der Gammastrahlung gemessen wird. Bei der 2. Messung wird der zusätzliche Spannungsabfall in dem Elektret infolge der sich in der Box aufbauenden Radonkonzentration gemessen. Dabei wird die Alu-Folie durch radondurchlässiges Filterpapier ersetzt (s. Abbildung 53, oben).

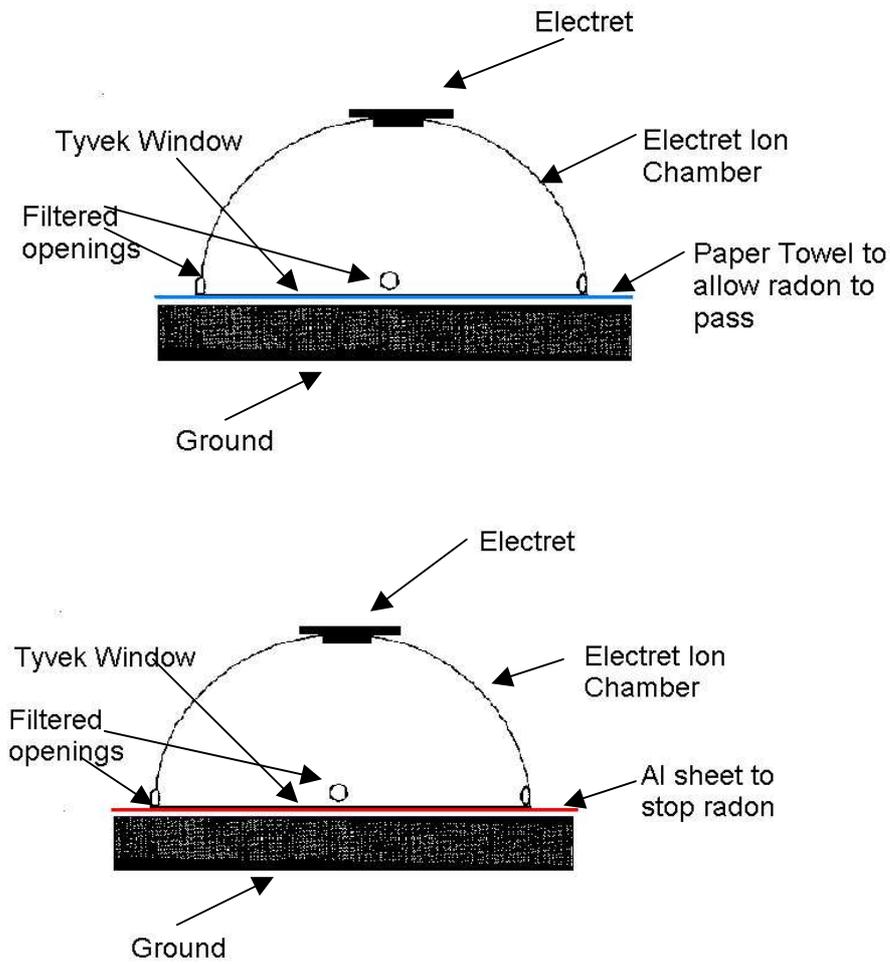


Abbildung 53: Schematische Darstellung eines Radon-Flux-Monitors nach [13]

In der Abbildung 54 sind beispielhaft die mit der Box-Methode und der E-Perm-Technik bestimmten Exhalationsraten auf 6 unterschiedlichen Meßfeldern angegeben.

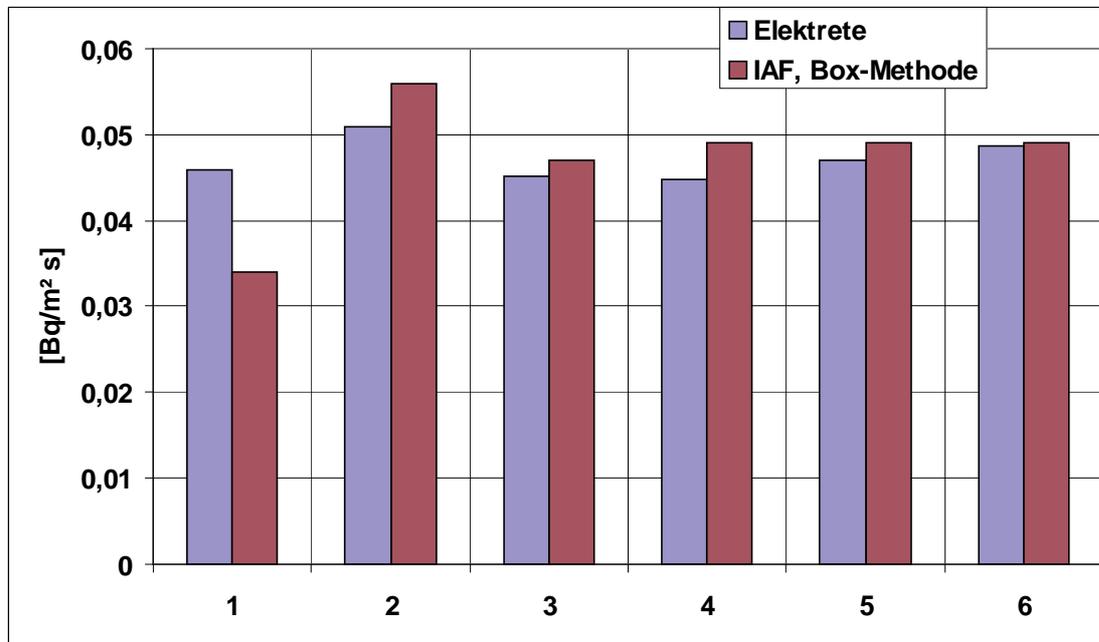


Abbildung 54: Vergleich der mit der Box-Methode und der E-Perm-Technik bestimmten Exhalationsraten auf 6 unterschiedlichen Meßfeldern

Die Ergebnisse zeigen, daß eine gute Übereinstimmung der Exhalationsraten erhalten wurde. Dies ist nicht zufällig, da die exhalierten Flächen nicht bewachsen waren, und sie insgesamt so aufgebaut wurden, daß die Exhalationsrate über die gesamte Fläche annähernd konstant ist. Diese Konstanz der Exhalationsrate äußert sich u.a. darin, daß die mit einem verhältnismäßig kleinen Fenster von 180 cm² ausgestatteten E-Perm-Monitore das gleiche Resultat wie die Meßboxen lieferten, die eine um den Faktor 22 größere Fläche von ca. 0,4 m² bedecken.

Insgesamt ist einzuschätzen, daß die E-Perm-Monitore nur für sehr ebene und unbewachsene Flächen einzusetzen sind, wie z.B. Fußböden oder Wände in Häusern. Für Feldmessungen sind sie nur bedingt geeignet. Zum einen ist die Fensterfläche sehr klein, so daß die Repräsentanz der Messung zu hinterfragen ist. Zum anderen können die E-Perm-Monitore nicht auf bewachsenen und etwas unebenen Flächen, die fast immer anzutreffen sind, so aufgesetzt werden, daß sich das exhalierte Radon vollständig in der Meßkammer sammelt.

5.3.2 Kernspur-Radonflux-Monitor

Die E-Perm-Monitore sind für Langzeitmessungen im Feld (Halden, kontaminierte Flächen) nur bedingt geeignet, da sie oben geschlossen sind und somit die direkten Einflüsse von Niederschlag (Regen, Schnee) auf die Radonexhalation nicht untersucht werden können. Wichtig ist jedoch zu konstatieren, daß die E-Perm-Monitore an der Seite Löcher zum Luftaustausch besitzen, d.h. es wird sich innerhalb der Sammelglocke (s. Abbildung 53) eine Radonkonzentration einstellen, die durch diesen Luftaustausch beeinflusst wird. Dabei spielen auch die Tagesgänge eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Die Radonkonzentration wird nach dem Aufsetzen des E-Perm-Monitors in der Sammelglocke zunächst ansteigen und sich dann in Abhängigkeit von der Exhalationsrate und dem mittleren Luftaustausch einem bestimmten Plateauwert nähern, der die Grundlage für die Kalibrierung des in den Elektreten gemessenen Spannungsabfalls ist. In anderen Worten, die Größe der Löcher bestimmt den Plateauwert und somit die Umrechnung der gemessenen Radonkonzentration in die Exhalationsrate.

Die in der Abbildung 48 dargestellten Meßeinrichtungen, bei denen ein Kernspurdetektor von einem ca. 30 cm hohen Ring umgeben ist, ähneln im Aufbau dem E-Perm-Monitor. Wird der Ring oben geschlossen und werden nur seitliche Löcher zum Austausch mit der umgebenden Atmosphäre zugelassen, ist diese Art von Meßeinrichtung, die im weiteren Kernspur-Radonflux-Monitor (KRF-Monitor) genannt wird, mit dem E-Perm-Monitor vergleichbar. Fotografien der KRF-Box enthält die Abbildung 55. Die seitlichen Öffnungen haben einen Querschnitt von ca. 20 cm².



Abbildung 55: Fotografien der KRF-Box.

Der Hauptunterschied zum E-Perm-Monitor besteht darin, daß die Aufsatzfläche um den Faktor 20 größer und die Sammelbox so robust ist, daß sie sich für Feldeinsätze eignet. Des weiteren entfällt die sogenannte Nullmessung, um die Entladung der Elektrete infolge der Gammastrahlung bestimmen zu können.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß diese Methode sehr gut geeignet ist, um Langzeitüberwachungen der Radonexhalation durchführen zu können. Ein Hauptgrund dafür ist, daß sich z.B. auf geogenen Flächen eine Radonkonzentration in der Sammelbox einstellt, die im Bereich von 100 - 150 Bq/m³ liegt und somit ausreichend genau mit Kernspurdetektoren für entsprechende Meßzeiten nachgewiesen werden kann. Ein gewisser Nachteil der KRF-Box besteht darin, daß der direkte Einfluß von Niederschlägen auf die Exhalationsrate nicht erfaßt wird. Auch die bodennahe Feuchtigkeit spielt eine weit aus geringere Rolle, da die Kernspurdetektoren in ca. 25 cm Höhe positioniert werden.

5.4 Messungen der Radonkonzentration in niedrigen Höhen auf den Testfeldern

5.4.1 Vorbemerkung zu den Messungen

Zu den Messungen der Radonkonzentration über den aufgebauten Testfeldern sei vorab bemerkt, daß diese nicht so zielführend waren, wie ursprünglich geplant und nicht die Qualität der Aussagekraft erreicht wurde, wie sie aus den vom BfS in Johannegeorgenstadt erzielten Resultaten und anderen Messungen, die nicht im Rahmen des Förderprojekts durchgeführt wurden, zu erwarten war. Die Ursachen konnten bis dato nicht vollständig geklärt werden, da sich eine Meßperiode über einen Zeitraum von etwa 3 Monaten erstreckte und im Lichte dieser langen Meßzeiten das für das Forschungsvorhaben zur Verfügung stehende Zeitvolumen nicht ausreichend war. Für die Kalibrierung der Radonkonzentrationsmessungen in geringen Höhen zur Bestimmung der Exhalationsrate wird deshalb hauptsächlich auf die Feldmessungen zurückgegriffen, die u.E. einen belastbaren Datenpool lieferten. Auf diese Untersuchungen wird im Abschnitt 6 eingegangen.

Die Abbildung 56 skizziert die Meßfelder, um die nachfolgende Diskussion der Daten zu vereinfachen.

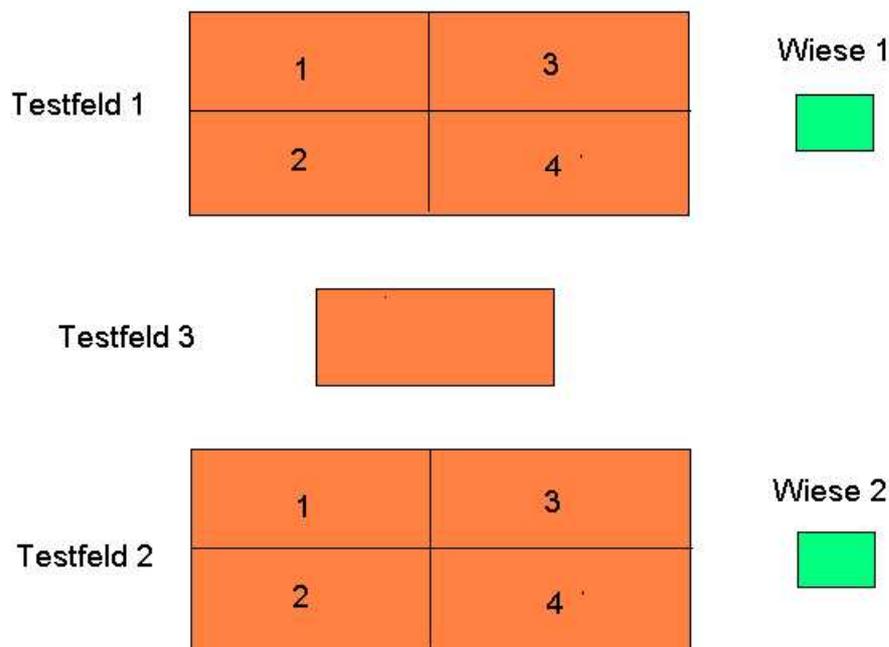


Abbildung 56: Schematische Darstellung der Testfelder

5.4.2 Meßergebnisse für die Radonkonzentration in 5 und 10 cm Höhe über den Meßfeldern 1 und 2

In der Abbildung 57 sind die mittleren Radonkonzentrationen über den Meßfeldern 1 und 2 in Abhängigkeit von der Höhe für unterschiedliche Expositionszeiträume von September 2000 bis November 2002 dargestellt. Die Meßergebnisse sind fortlaufend nach den Unterfeldern (s. Abbildung 56) geordnet und stellen z.T. eine Mittelung von maximal 9 Meßwerten je Meßhöhe auf einem Quadratmeter dar.

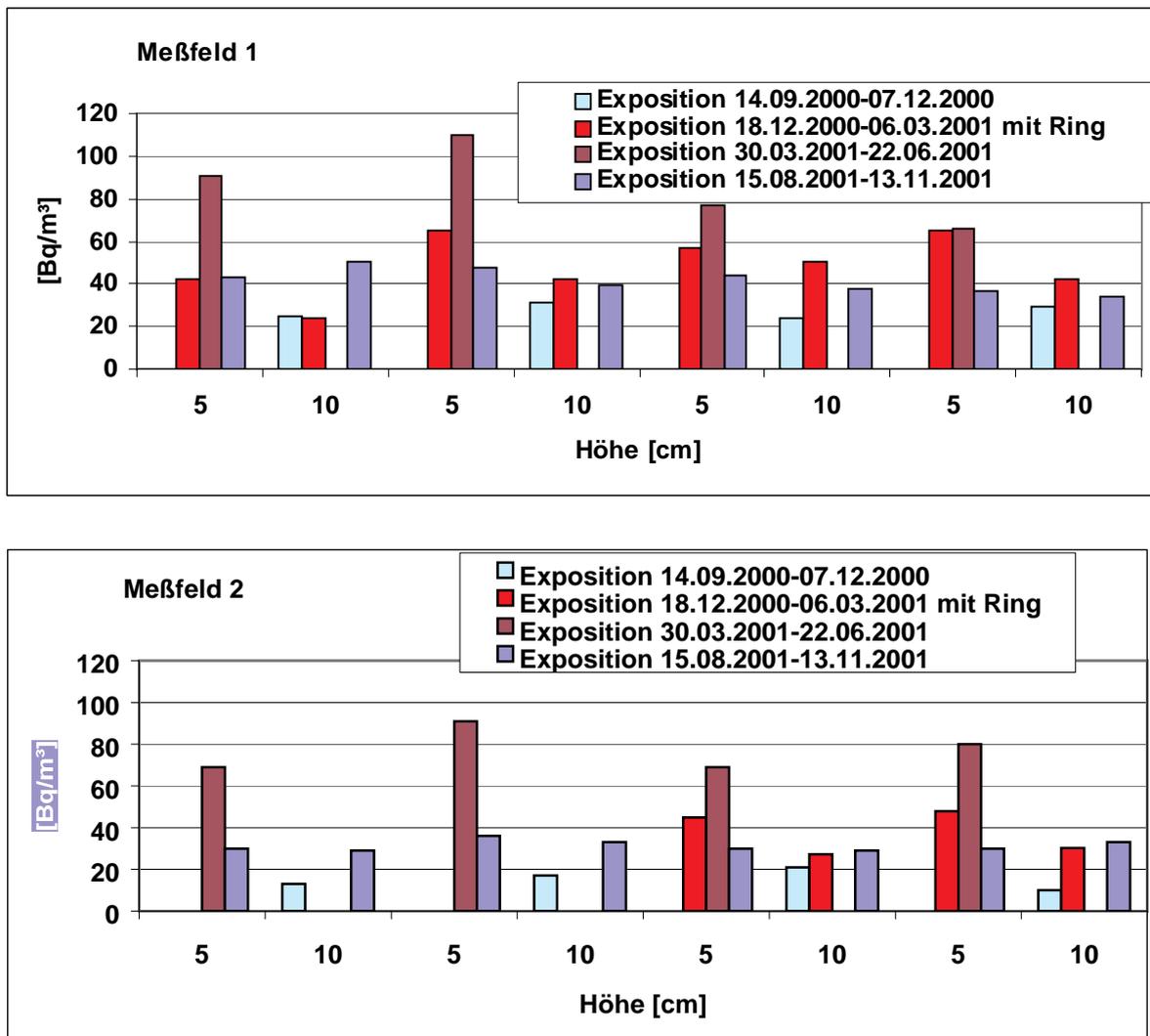


Abbildung 57: Mittlere Radonkonzentrationen über den Meßfeldern 1 und 2 in Abhängigkeit von der Höhe für unterschiedliche Expositionszeiträume. Die Ergebnisse sind in der Reihenfolge der Unterfelder gemäß Abbildung 56 geordnet.

Zu Beginn des Untersuchungsprogramms wurde eine 3-monatige Messung der Radonkonzentration in 10 cm Höhe über den Meßfeldern 1 und 2 durchgeführt (Meßpe-

riode 14.09 - 07.12.00, Abbildung 57). Entgegen der Erwartung lag die Radonkonzentration im Mittel unterhalb von $\leq 35 \text{ Bq/m}^3$ und somit bei Werten, die z.T. niedriger waren als die über der umgebenden Wiese. Letztere ist jedoch durch eine um eine Größenordnung niedrigere Exhalationsrate charakterisiert. Vergleichsmessungen mit dem AlphaGUARD wiesen darauf hin, daß Radonkonzentrationen im Bereich von 100 Bq/m^3 zu erwarten sind.

Es wurde anschließend eine weitere 3-monatige Meßperiode vom 18.12.00 - 06.03.01 durchgeführt. Dabei wurden die Detektoren zusätzlich mit einem Ring umgeben und auch Messungen in 5 cm Höhe durchgeführt. Der Ring diente dazu, den Einfluß des Windes möglichst gering zu halten. Ein Foto des Versuchsaufbaus gibt die Abbildung 58. Wie aus der Abbildung 57 zu entnehmen ist, wurden mit dieser Versuchsanordnung etwas höhere Radonkonzentrationen gemessen, doch aufgrund der Jahreszeit (Winter) lagen die Radonkonzentrationen auf einem sehr niedrigen Niveau.

In einer sich daran anschließenden 3-monatigen Meßperiode vom 30.03.01 - 22.06.01 (Frühjahr 2001) wurde nur in einer Höhe von 5 cm gemessen. Während dieser Meßperiode wurden generell deutlich höhere Werte als in den bis dato durchgeführten Untersuchungen erhalten. Die Radonkonzentrationen stimmten auch mit den stichpunktartig durchgeführten aktiven Messungen mit dem AlphaGUARD überein.

Die nachfolgende 3-monatige Meßperiode vom 15.08.01 - 13.11.01 (Sommer/Herbst) lieferte wiederum deutlich geringere Radonkonzentrationen, wobei auffallend ist, daß entgegen den früheren Messungen kaum noch ein Unterschied zwischen den Radonkonzentrationen in 5 und 10 cm Höhe auftrat und zudem noch bei einzelnen Unterfeldern die in 10 cm Höhe gemessenen Radonkonzentrationen höher als die in 5 cm Höhe waren.

Eine Erklärung für die sehr niedrigen Radonkonzentrationen konnte nicht gefunden werden. Um die Einflüsse des Winds auf die in niedrigen Höhen sich entwickelnde Radonkonzentration zu studieren, sind die Detektoren mit Ringen verschiedener Höhe (bis 30 cm) umgeben worden. Die Abbildung 58 zeigt eine Aufnahme dieser Versuchsanordnung für das Meßfeld 1 und den angrenzenden Meßpunkt auf der Wiese. Die schematische Skizzierung der Meßfelder ist in Abbildung 56 gegeben worden.



Abbildung 58: Aufnahme des Testfelds 1 mit Meßpunkt auf der Wiese

In der Abbildung 59 sind die Ergebnisse für die Radonkonzentrationen, gemessen in 5 und 10 cm Höhe, für den Zeitraum 06.05.02 bis 25.06.02 und 13.11.01 bis 04.02.02 (Winter) dargestellt.

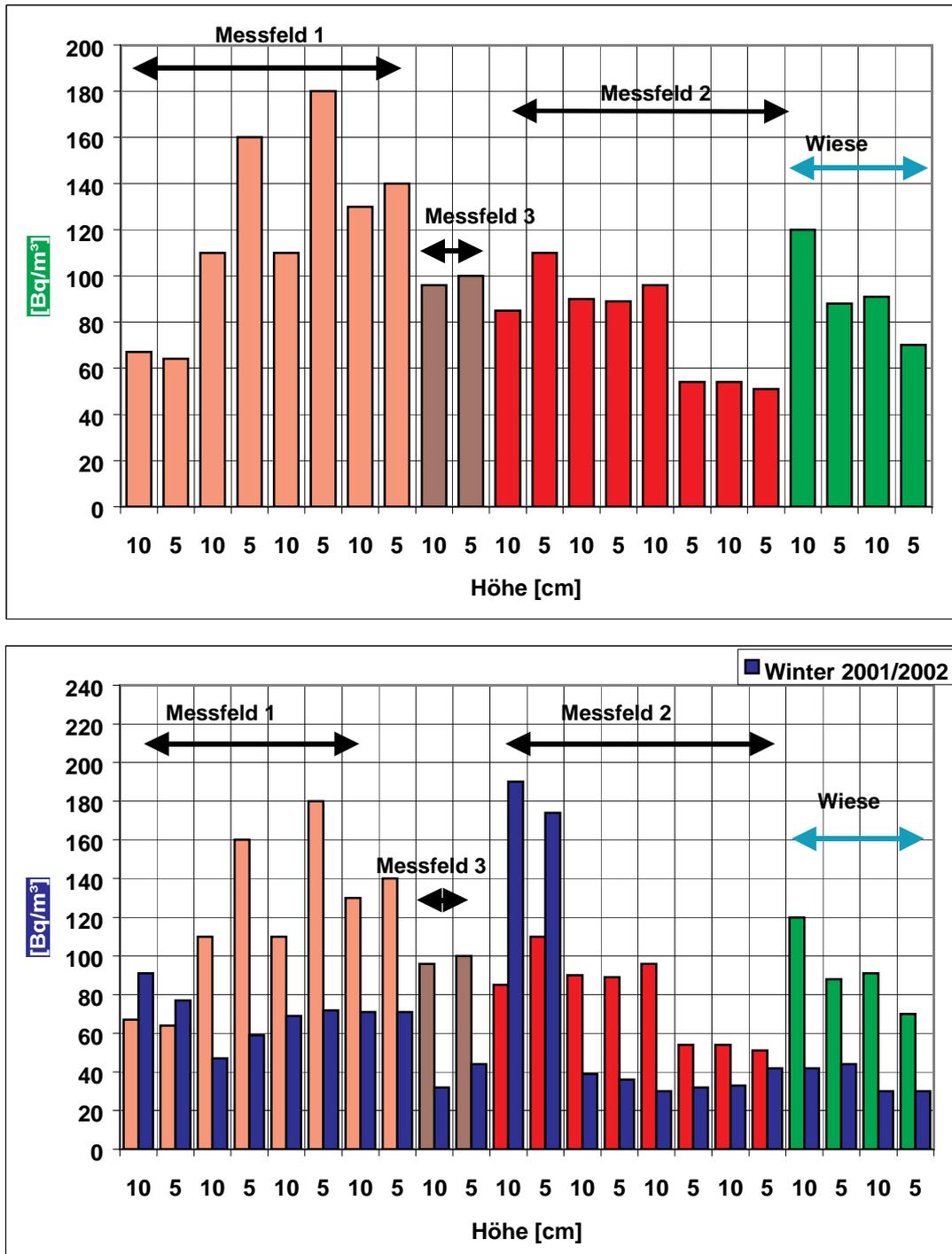


Abbildung 59: Ergebnisse der Messungen der Radonkonzentration in 5 und 10 cm Höhe für den Zeitraum 06.05.02 bis 25.06.02 und 13.11.01 bis 04.02.02 (Winter). Die untere Abbildung zeigt die Ergebnisse für beide Meßperioden.

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung für die Testfelder 1 - 3 und die Wiese sind in der Tabelle 6 zusammengestellt.

Tabelle 6: Statistische Auswertung der Messungen der Radonkonzentration in 5 und 10 cm Höhe über den Testfeldern für den Zeitraum 06.05.02 bis 25.06.02 und 13.11.01 bis 04.02.02 (Winter)

Testfelder 1 - 3			
Zeitraum	Mittelwert [Bq/m³]	Mittelwert 10 cm [Bq/m³]	Mittelwert 5 cm [Bq/m³]
06.05.02 bis 25.06.02	98	95	101
13.11.01 bis 04.02.02	62	61	62
Wiese			
Zeitraum	Mittelwert [Bq/m³]	Mittelwert 10 cm [Bq/m³]	Mittelwert 5 cm [Bq/m³]
06.05.02 bis 25.06.02	92	106	79
13.11.01 bis 04.02.02	37	36	37

Diese Meßergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Bis auf eine Ausnahme ist im Winter die Radonkonzentration etwa nur halb so hoch wie im Sommerzeitraum. Dies ist in Übereinstimmung mit den im Winter und Sommer durchgeführten Exhalationsmessungen. Sie zeigten, daß die Exhalationsraten im Winter etwa um den Faktor 2 niedriger als die im Sommerhalbjahr sind. Dieser Sachverhalt wird durch die im Sommer bzw. Winter gemessene mittlere Radonkonzentration ziemlich genau reflektiert.
- Die speziell in der Winterperiode die in 5 und 10 cm Höhe gemessenen Radonkonzentrationen stimmen teilweise gut überein, d.h. die etwa 20 bis 30 cm hohen Ringe reichen aus, die Advektion des Windes nachhaltig einzuschränken. Auch bei den Messungen der Sommerperiode trifft dies annähernd zu.

Ausgehend von den teils nicht nachvollziehbaren Ergebnissen, die mit den Kernspurdetektoren erhalten wurden, sind in der Folgezeit weitere Untersuchungen mit Detektoren anderer Anbieter durchgeführt worden. Diese Vergleiche sind nicht abgeschlossen. Sie scheinen jedoch darauf hinzuweisen, daß möglicherweise deutliche Unterschiede in der Meßgenauigkeit auftreten, wenn sich die lokale Expositionssituation (hohe Feuchtigkeitsschwankungen, starke Änderung der Temperatur) deutlich von der in den Kalibrierkammern unterscheidet.

5.4.3 Messung der Radonexhalation auf dem Meßfeld Wiese 2

Auf dem Meßfeld Wiese 2 wurde zunächst die Radonexhalation nahezu flächen-deckend bestimmt. Zu diesem Zweck wurden sowohl Exhalationsmessungen mit den automatischen Boxen als auch gewöhnliche Boxmessungen durchgeführt. Insgesamt wurde die Exhalationsrate an 39 Punkten bestimmt, wobei an einzelnen Punkten Wiederholungsmessungen über mehrere Tage ausgeführt wurden, um die Effekte der Tagesgänge mit zu erfassen. Bei der Mehrheit der Meßpunkte wurden die Exhalationsmessungen während der gleichzeitigen Messung der Radonkonzentration in 10 cm Höhe durchgeführt, d.h. für einen kurzen Zeitraum von ca. 1 h wurde die Meßbox auf der Fläche so aufgesetzt, daß der Kernspurdetektor innerhalb der Meßbox war. Diese Herangehensweise führt jedoch wegen der Kürze der Zeit zu keiner zusätzlich zu berücksichtigenden Exposition der Kernspurdetektoren. Es hat jedoch den Vorteil, daß für die Ableitung der Korrelation zwischen Radonkonzentration und Radonexhalation von Exhalationsraten ausgegangen werden kann, die für den untersuchten Zeitraum als repräsentativ angenommen werden können. Bei einer Exhalationsmessung von 40 Minuten und einer Exhalationsrate von 0,012 Bq/m²·s beträgt die Radonkonzentration innerhalb der Box 100 Bq/m³. Diese kurzzeitige Erhöhung ist gegenüber einer Meßzeit von mindestens einem Monat und einer durchschnittlichen Radonkonzentration von ca. 25 Bq/m³ in Bodennähe vollständig vernachlässigbar. Die Ergebnisse der statistischen Auswertung der Messungen sind in der Tabelle 7 zusammengefaßt. Es ist zu erkennen, daß auf dieser Wiesenfläche die Fluktuationen der Exhalationsrate in Abhängigkeit vom Meßort beträchtlich sind. Abbildung 60 illustriert, daß die Verteilung der Exhalationsraten annähernd einer logarithmischen Normalverteilung entspricht. Dieses Untersuchungsergebnis ist u.E. als Faktum zu konstatieren. Es weist darauf hin, daß selbst bei äußerlich kaum wahrnehmbaren Unterschieden in der Wiesenoberfläche die Radonexhalationsrate benachbarter Orte beträchtlich variieren kann.

Tabelle 7: Statistische Angaben zu den Messungen der Exhalationsrate auf dem Meßfeld Wiese 2

Mittelwert	0,012 [Bq/m ² ·s]
STD	0,005 [Bq/m ² ·s]
Min	0,003 [Bq/m ² ·s]
Max	0,023 [Bq/m ² ·s]
Median	0,011 [Bq/m ² ·s]

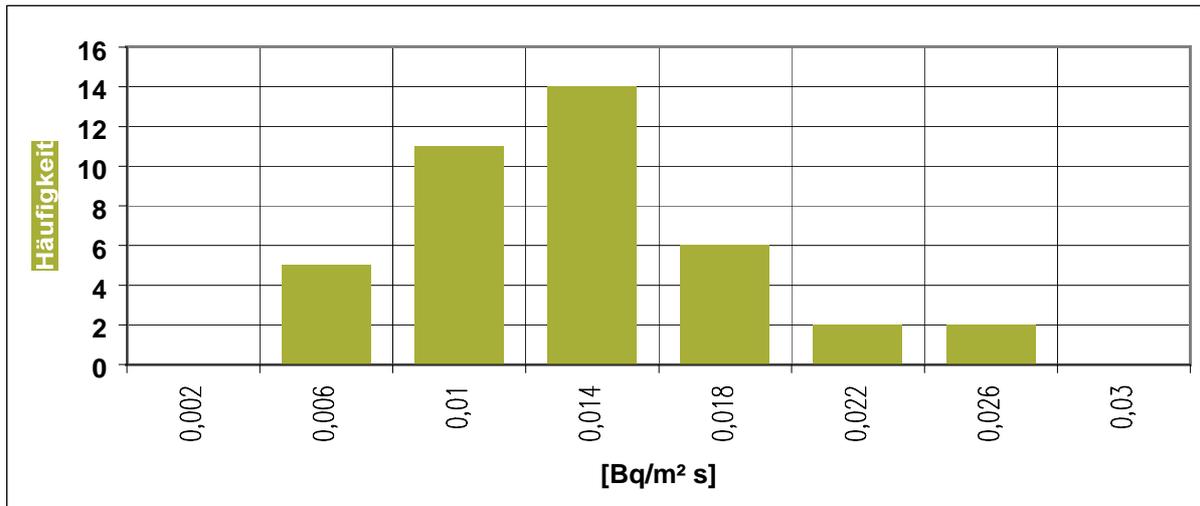


Abbildung 60: Häufigkeitsverteilung der Exhalationsraten auf dem Meßfeld Wiese 2

Die mittlere Radonexhalationsrate von 0,012 Bq/m²·s findet ihre Entsprechung in einer über die Wiesenoberfläche gemittelten Radonkonzentration von 22,8 Bq/m³. Bei der Berechnung der statistischen Angaben der Tabelle 8 sind die Meßwerte der Radonkonzentration mit <10 Bq/m³ durch 10 Bq/m³ ersetzt worden. Dies gilt auch für einige Konzentrationen von <20 Bq/m³, die durch 20 Bq/m³ ersetzt wurden.

Tabelle 8: Statistische Angaben zu den in 10 cm Höhe gemessenen Radonkonzentrationen auf dem Meßfeld Wiese (insgesamt 39 Meßwerte)

Mittelwert	22,8 [Bq/m ³]
STD	8,85 [Bq/m ³]
Min	10 [Bq/m ³]
Max	39 [Bq/m ³]
Median	22 [Bq/m ³]

Inwieweit dieser mittlere Konzentrationswert im Lichte der oben geführten Diskussionen als belastbar einzuschätzen ist, kann nicht beantwortet werden. Als Argument für eine annähernde Belastbarkeit der Daten können zwei Tatsachen aufgeführt werden. Zum einen korrespondieren die Radonkonzentrationswerte mit punktuell durchgeführten aktiven Messungen der Radonkonzentration, die z.B. auch die Exhalationsmessungen begleiteten. Zum anderen zeigt die Auswertung, daß eine plausible Korrelation zwischen den gemessenen Radonkonzentrationen in 10 cm Höhe und den gemessenen Exhalationsraten besteht.

Nimmt man den in Tabelle 8 angegebenen Mittelwert der Radonkonzentration von 22,8 Bq/m³ als Vergleichsgröße, folgt aus der Definitionsgleichung

$$J \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right] = k_{\text{Rn}} \cdot C_{\text{Rn}} \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right] \quad (30)$$

ein Kalibrierfaktor k_{Rn} von $5,2 \times 10^{-4}$ m/s, der die Dimension einer Geschwindigkeit hat. Eine genauere Bestimmung des Kalibrierfaktors k_{Rn} ergibt sich, wenn die einzelnen Exhalationsraten den Radonkonzentrationen gegenübergestellt werden. Diese Korrelation ist in der Abbildung 61 dargestellt und veranschaulicht, daß die Exhalationsrate linear mit der in 10 cm Höhe gemessenen Radonkonzentration ansteigt. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden ist mit $R^2=0,67$ nicht sehr hoch. Für die Feldanwendung ist jedoch bedeutsam, daß die in 10 cm Höhe gemessenen Radonkonzentrationen die lokalen Änderungen der Exhalationsraten verhältnismäßig gut reflektieren. Im Abschnitt 6.7 wird anhand eines einfachen Modells die Größenordnung des abgeleiteten Kalibrierfaktors diskutiert.

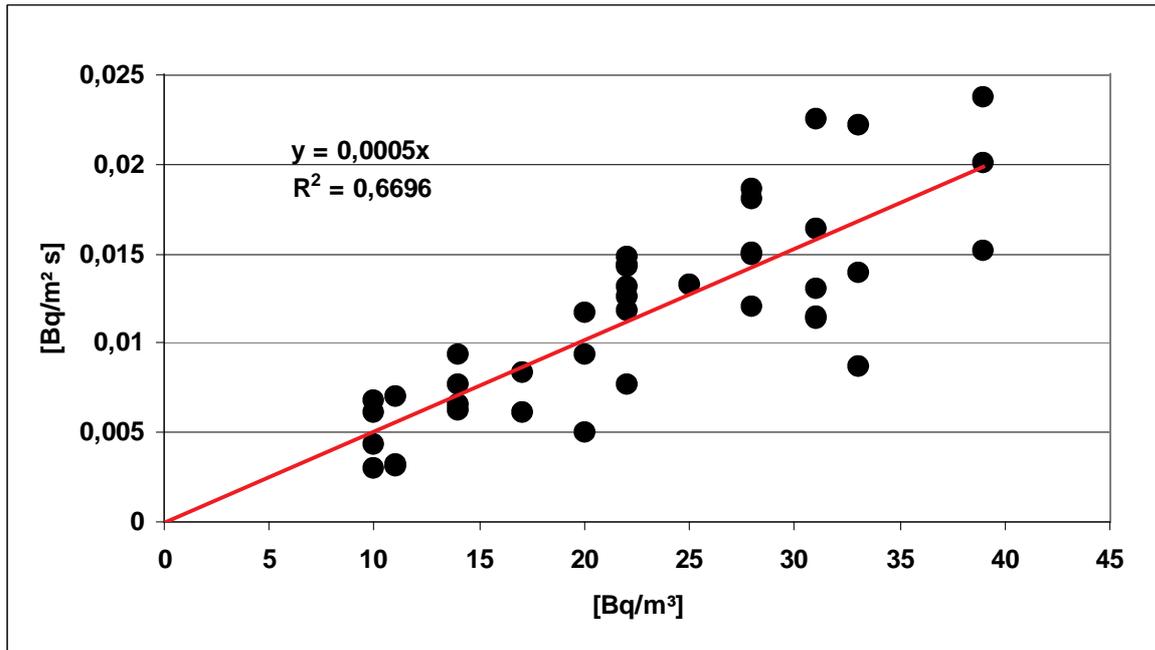


Abbildung 61: Ableitung des Kalibrierfaktors k_{Rn} für die Messungen in 10 cm Höhe auf dem Meßfeld Wiese 2

Der für die Messungen auf dem Meßfeld Wiese abgeleitete Kalibrierfaktor k_{Rn} korrespondiert sehr gut mit den Werten, die auch bei der Auswertung entsprechender Messungen für die Halde B in Dresden-Coschütz und die Trockendammhalde erhalten wurden. Auf diesen Feldversuch wird im Abschnitt 6 ausführlich eingegangen.

6 Durchführung eines Feldversuchs zur Bestimmung der Radonquellstärke

6.1 Vorbemerkung

Ein detaillierter Feldversuch zur Bestimmung der Radonquellstärke einer Halde wurde am Beispiel der ca. 11 ha großen Halde B unternommen, die sich in Dresden-Coschütz befindet. Im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen des Ökologischen Großprojekts der Stadt Dresden [14] wurden Kassetten mit schluffigen und sandigen Tailings, Gemischen von sandigen und schluffigen Tailings sowie Rotschlamm eingelagert und mit einer Zwischenabdeckung versehen. Die Arbeiten wurden im Jahre 2001 abgeschlossen. Mit Abdeckung der 4. Kassettenlage und dem Einbau von 23.730 m³ kontaminierter Asche des Großschurfes 1/98 aus der Halde D wurde die Oberfläche der Halde B bis auf eine Einbaureserve im Südwesten der Halde für die Zwischenabdeckung ausgeformt. Die Zwischenabdeckung erfolgte durch Einbau von 0,5 m Mineralboden. Die wesentlichen Qualitätsvorgaben für die Zwischenabdeckungen beinhalteten einen Verdichtungsgrad D_{Pr} von 95 % und einen Durchlässigkeitsbeiwert k_f von $\leq 10^{-7}$ m/s.

Die Abbildungen 62 und 63 zeigen Fotos der Halde B und des Dammbereichs im gegenwärtigen Zustand, während die Abbildung 64 eine vereinfachte Skizze zur Darstellung der hydraulischen Verhältnisse gibt.



Abbildung 62: Halde B von der Stuttgarter Straße aus gesehen



Abbildung 63: Dammbereich der Halde B

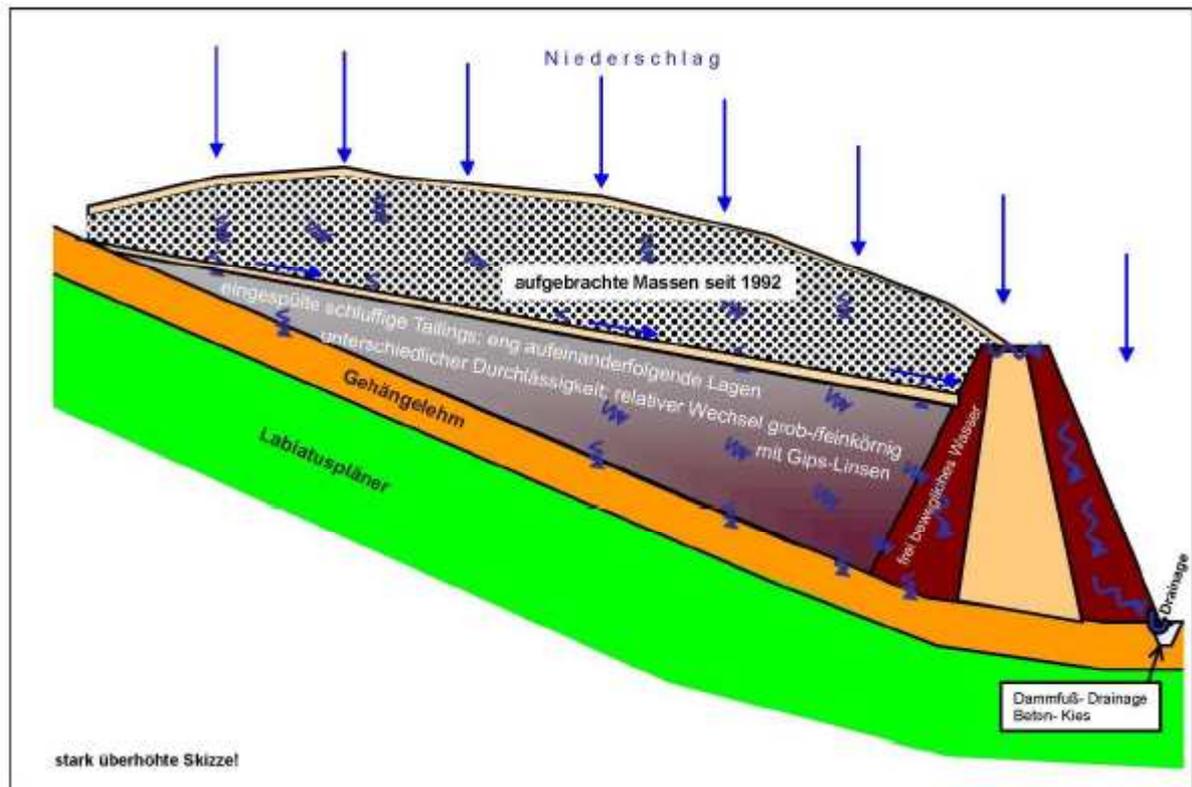


Abbildung 64: Vereinfachte Skizze zur Darstellung der hydraulischen Verhältnisse in der Halde B einschließlich Damm.

Für das Genehmigungsverfahren zur Endverwertung der Halde B stellt u.a. auch die Reduktion der Radonexhalation durch entsprechende Abdeckungsmaßnahmen einen besonders wichtigen Detailkomplex dar. Dabei sind vorrangig Kenntnisse der Radonquellstärke sowie Informationen über ihre Verteilung über die Haldenoberfläche notwendig. Auf Grundlage dieser Ergebnisse kann für ausgewählte Referenzorte die durch Radon und seine Folgeprodukte bedingte Exposition prognostiziert und daraus wichtige Schlüsse über die Dimensionierung der Abdeckung abgeleitet werden.

Insgesamt wurde bei der Bestimmung der Quellstärke der Halde B das dem Forschungsvorhaben unterliegende Grundkonzept einem Test unterzogen. Das Konzept beruht auf der Prämisse, dass die Rastermessungen der Radonkonzentration in niedriger Höhe ein belastbares Abbild der Radonquellstärkeverteilung über die untersuchte Fläche liefern, wobei meteorologische Effekte, Bewuchs etc. mit eingeschlossen sind. Um die gemessenen Radonkonzentrationen mit der Radonexhalationsrate in Beziehung zu setzen, genügt es u.E., an wenigen ausgewählten Punkten

eine direkte Exhalationsmessung durchzuführen, um die entsprechende Kalibrierung für die Umrechnung der Radonkonzentration in eine Rate zu erhalten.

Daraus ergeben sich dann direkte, durch Meßwerte untersetzte, Schlußfolgerungen über die Dimensionierung der Abdeckung sowie über Maßnahmen zur Minimierung der Kosten. Z.B. kann die Abdeckung von Gebieten geringer bzw. vernachlässigbarer Radonquellstärke nur noch unter dem Blickwinkel einer möglichst kostengünstigen Renaturierung dimensioniert werden, ohne dabei die radiologischen Probleme zu tangieren.

Des weiteren ermöglicht diese Vorgehensweise, die Struktur der Haldenschüttung mit den lokalen Radonquellstärken zu korrelieren und daraus wichtige Anhaltspunkte für die Wirksamkeit der gegenwärtig vorhandenen Abdeckung zu erhalten. In Fällen, wo z.B. eine signifikante Reduzierung der Exhalation beobachtet wird, kann mit Hilfe von zusätzlichen Erkundungen, z.B. Bohrungen oder Schürfen, ergründet werden, warum eine bestimmte Haldenschüttung hinsichtlich der Reduzierung der Exhalation besonders effektiv ist. Damit können zusätzliche Kenntnisse für eine kostengünstige Dimensionierung der Abdeckung der Halde B gewonnen werden.

Ein Teil der in den folgenden Abschnitten zu diskutierenden Ergebnisse wurde im Rahmen einer Untersuchung der Radonquellstärke der Halde B durchgeführt [15]. Diese Ergebnisse und die weiterführenden Untersuchungen, die im Rahmen des Förderprojekts durchgeführt wurden, bildeten die Grundlage zur Verifizierung der Anwendbarkeit einer Feldmethode zur Bestimmung der Radonquellstärke großer Flächen. Zur Interpretation der in geringen Höhen gemessenen Radonkonzentrationen wurde eine Vielzahl von Raster-Messungen der Radonexhalation über mehrere Tage ausgedehnt, um die Effekte der Tagesgänge, auf die im Abschnitt 4.2.3 bereits ausführlich eingegangen wurde, quantifizieren zu können. Des weiteren wurden zusätzliche Raster-Messungen der Radonkonzentration über der Haldenfläche sowie aktive Messungen der Radonkonzentration an ausgewählten Punkten durchgeführt. Letztere dienen dazu, die bei den Rastermessungen der Radonkonzentration in niedrigen Höhen erhaltenen Resultate besser einordnen zu können.

6.2 Rastermessung der Radonkonzentration

Zur Quantifizierung der Radonquellstärke der Halde B wurden gemäß dem Untersuchungskonzept großflächig Messungen der Radonkonzentration in einem Raster von 20 m x 20 m in unterschiedlichen Höhen über der Haldenoberfläche durchgeführt, wobei für die einzelnen Rasterpunkte die Hoch- und Rechtswerte bestimmt wurden. Dadurch ist für Wiederholungsmessungen im Abstand von einigen Jahren ein genauer Bezugspunkt gegeben. Solche Wiederholungsmessungen sind u.E. erforderlich, um z.B. mögliche Veränderungen infolge des Bewuchses oder allgemein der sich entwickelnden Bioturbation studieren zu können.

Bei der Auswertung der Messungen wurden die Bereiche des Damms im Westen und die flächenhafte Abdeckung des Haldenkörpers separat betrachtet.

Insgesamt wurden 4 Meßperioden durchgeführt, die sich über ca. 3 Monate erstreckten. In der 1. Meßperiode wurde die Radonkonzentration in 20 cm Höhe gemessen. In den darauf folgenden Messungen wurden dann generell die Detektoren in 10 cm Höhe über der Haldenoberfläche positioniert.

Die Ergebnisse der 2. Rastermessung der Radonkonzentration sind beispielhaft in der Abbildung 65 dargestellt. Die obere Abbildung enthält neben den Haldenumrissen (s.a. Fotos in den Abbildungen 62 und 63) die den Hoch- und Rechtswerten zugeordneten Radonkonzentrationswerte sowie eine Isoliniendarstellung der Radonkonzentrationen. Die Abbildung 66 liefert einen 3D-Plot der Meßergebnisse.

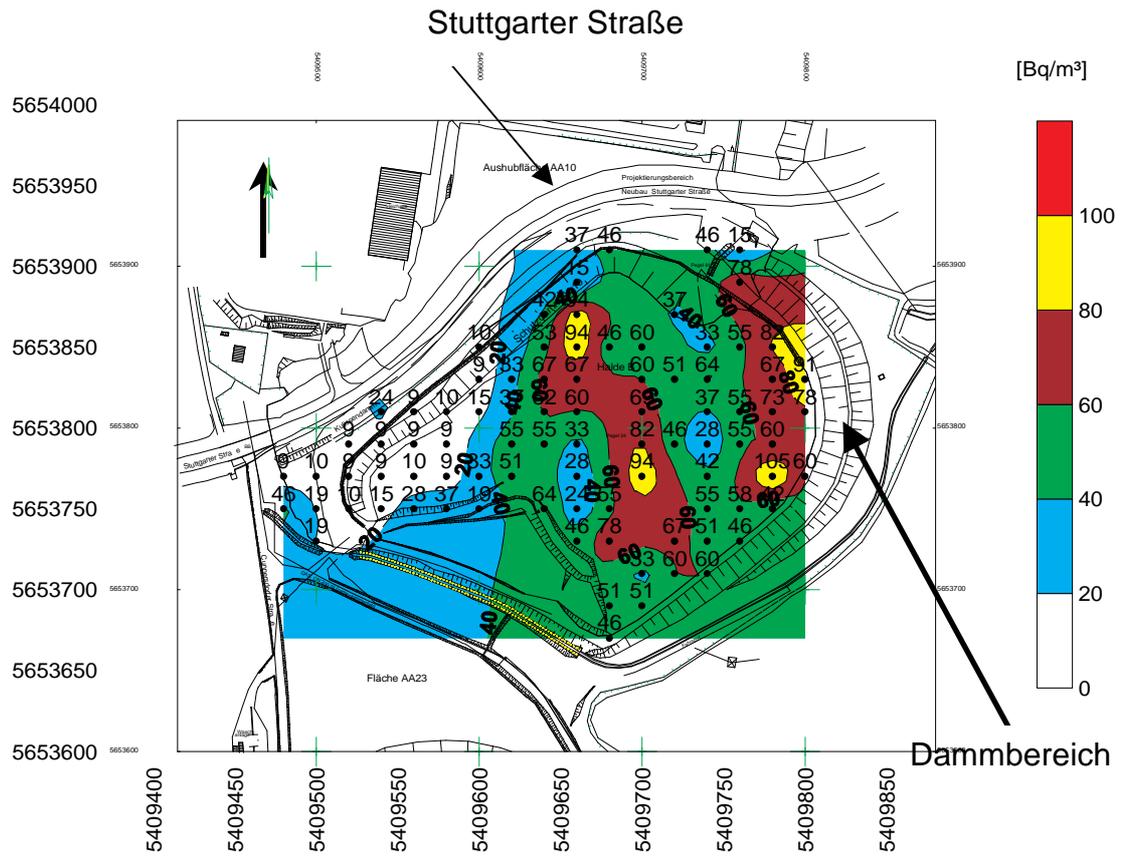


Abbildung 65: Contour der Halde B, Angabe der Meßpunkte und -werte sowie Isoli- niendarstellung der Radonkonzentration

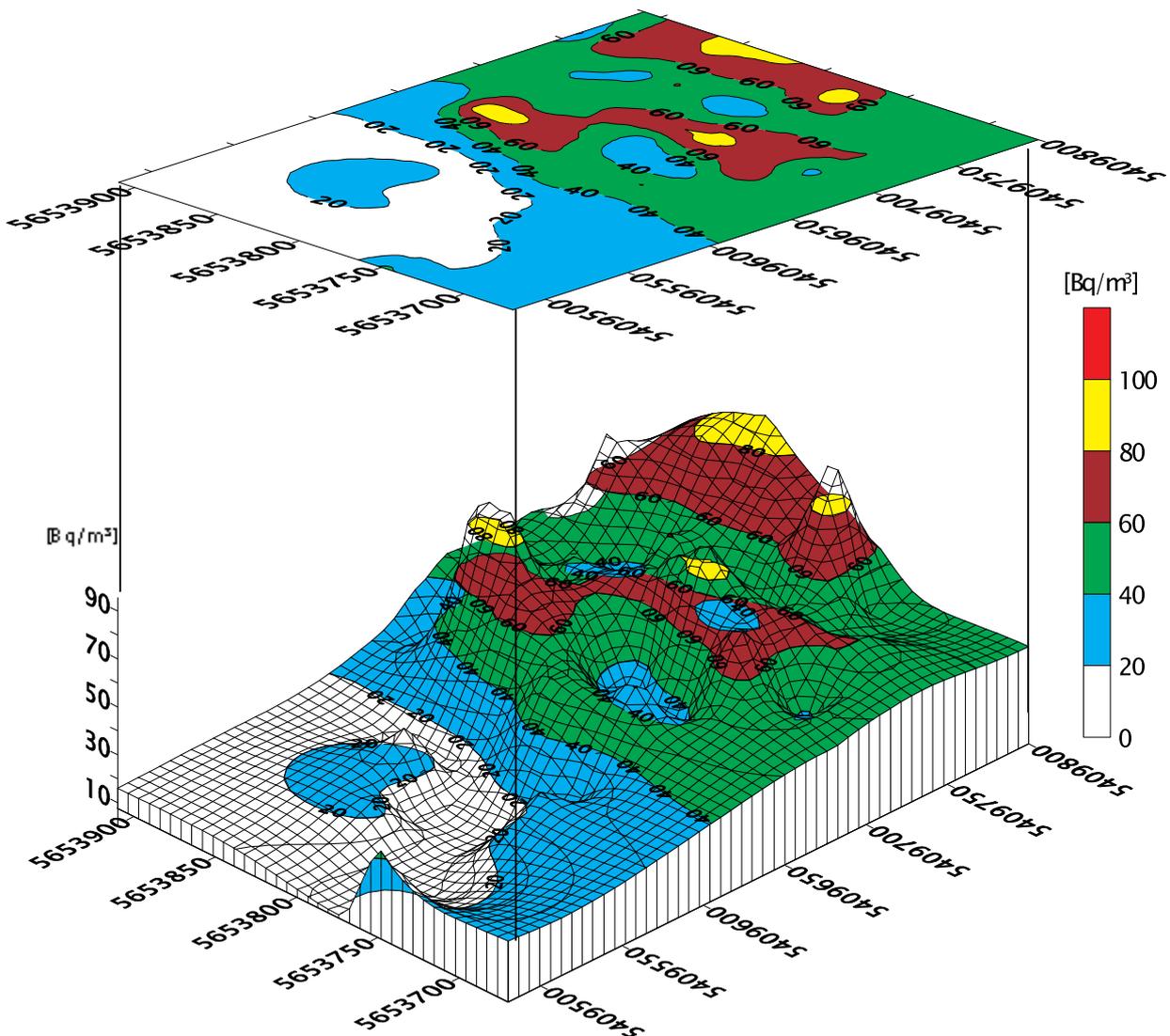


Abbildung 66: 3D-Plot der Radonkonzentration, gemessen in 10 cm Höhe über der Halde B

Die in den Abbildungen 65 und 66 dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, daß bei der 2. Meßperiode (September - Dezember) ein differenziertes Bild hinsichtlich der Verteilung der Radonkonzentration über die Haldenoberfläche erhalten wurde. An einzelnen Stellen wurden die Radonkonzentrationswerte auch durch aktive Messungen mit dem AlphaGUARD im Zeitraum von mehreren Stunden bzw. Tagen bestätigt. Die Ergebnisse veranschaulichen, daß speziell im Übergangsbereich zum Damm (Westseite) sowie im Mittelbereich der Halde, in dem vorwiegend die Kassetten eingelagert wurden, erhöhte Radonkonzentrationswerte gemessen worden sind. In

gelagert wurden, erhöhte Radonkonzentrationswerte gemessen worden sind. In den Darstellungen der Abbildungen 65 und 66 sind die Meßwerte aus dem Dammbereich, der nur geringfügig (bis 15 cm) abgedeckt ist, nicht eingeschlossen. Diese Ergebnisse werden im Abschnitt 6.5 separat diskutiert. Es ist zu erkennen, daß die Radonkonzentrationen in Westrichtung, d.h. in Richtung Damm ansteigen. Dort wurden auch die höchsten Konzentrationen gemessen. Die Häufigkeitsverteilung der Meßwerte ist in der Abbildung 67 dargestellt. Weitere statistische Angaben enthält die Tabelle 9.

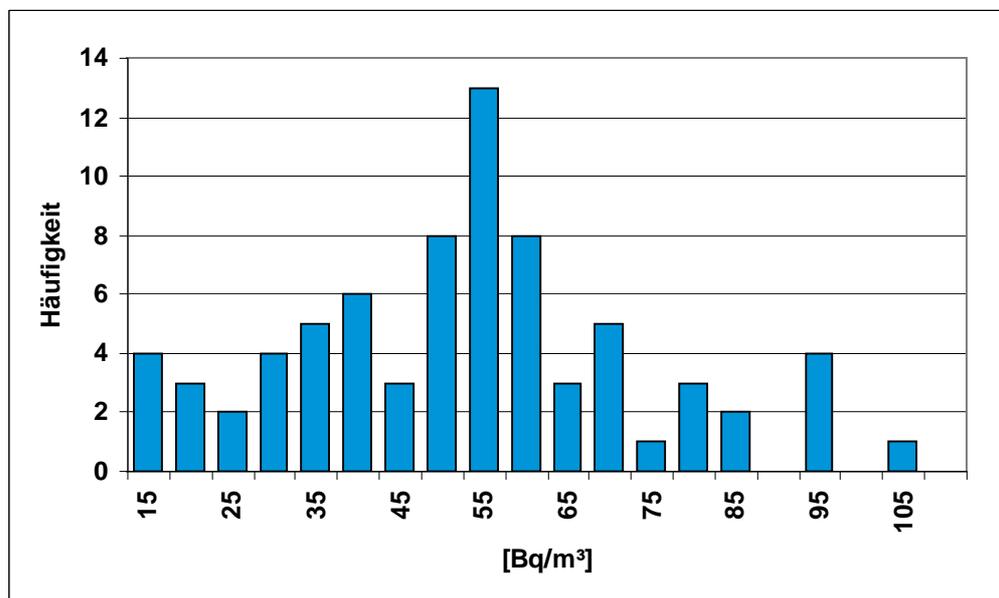


Abbildung 67: Häufigkeitsverteilung der Meßwerte der Radonkonzentrationen im Bereich der Halde B ohne den Dammbereich.

Tabelle 9: Mittelwerte und Standardabweichungen der Radonkonzentrationen für die einzelnen Meßkampagnen im Bereich der Halde B ohne den Dammbereich.

	Mittelwert [Bq/m ³]
Mittelwert	43,8
Standardabweichung	24,6
Maximum	105
Median	46

Die mittlere Radonkonzentration beträgt $43,8 \text{ Bq/m}^3$ und ist somit etwa um den Faktor 2 - 3 höher als die mittlere Radonkonzentration in der weiteren Umgebung der Halde, gemessen in 1 - 1,5 m Höhe [10].

Eine nochmalig durchgeführte 4. Meßperiode über 3 Monate führte zu keinen auswertbaren Resultaten, da der weitaus größte Teil der Detektoren entweder entwendet oder umgestoßen worden war. Somit lieferten diese über einen Zeitraum von 3 Jahren durchgeführten Rastermessungen kein in der Qualität vergleichbares Bild, wie es die vom BfS im Raum Johanngeorgenstadt durchgeführten Messungen der Radonkonzentration zeigten. Messungen der Radonkonzentration in geringen Höhen, die zur Beurteilung von anderen Flächen durchgeführt wurden und nicht in den Untersuchungsrahmen des Förderprojekts fallen, offenbarten dagegen ein konsistentes Bild.

6.3 Messung der Radonexhalation

Zur Messung der Radonexhalationsraten wurden an mehreren Stellen gleichzeitig Anreicherungsboxen (s. Abschnitt 3.1) auf die zu untersuchende Fläche aufgesetzt, ohne dabei die natürliche Struktur des Untergrundes zu verändern. Die Boxen wurden von außen mit Sand abgedichtet. Als Radon-Monitore dienten die Meßgeräte AlphaGUARD und ATMOS. Ziel dieser Untersuchungen war, die Exhalationsraten den am selben Ort gemessenen Radonkonzentrationen gegenüberzustellen, um Informationen über die Kalibrierung der in 10 cm Höhe gemessenen Radonkonzentrationen in Hinblick auf Aussagen über die Radonexhalation erhalten zu können. Die Abbildung 68 zeigt ein Photo von den Feldmessungen.

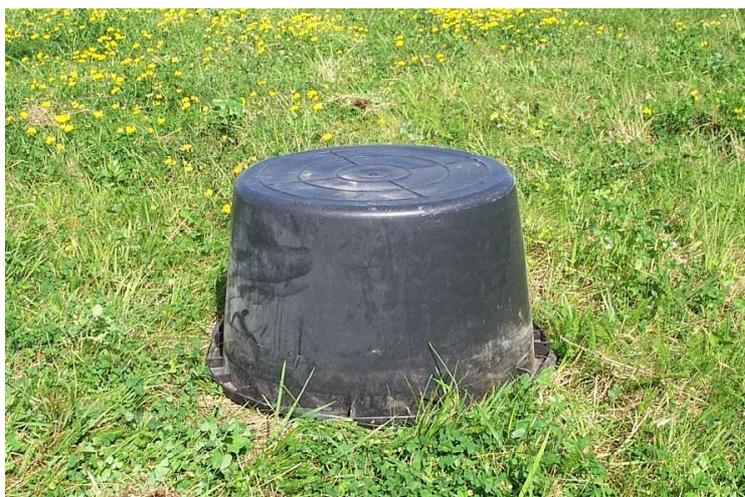


Abbildung 68: In verschiedenen Höhen positionierte Kernspurdetektoren auf der Halde B und Anreicherungsbox zur Bestimmung der Radonexhalation.

Die automatisch arbeitenden Meßboxen (s. Abschnitte 3.2 und 4.2.3), wurden nicht eingesetzt, da das Risiko eines Verlusts zu groß war. Die Messungen zur Bestimmung der Radonexhalation wurden im Mai und Juni 1999 und 2001 durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt hatte sich die Vegetation auf der Halde bereits voll entfaltet, so daß die Messungen auf teilweise stark mit Gras bewachsenem Boden durchgeführt wurden. Zur Abdichtung der aufgesetzten Box war es deshalb teilweise erforderlich, eine verhältnismäßig große Menge Sand anzuschütten. Die Orte dieser Messungen sind in der Abbildung 69 dargestellt. Sie überstreichen die Gebiete der Halde, die im 3D-Plot (s.a. Abbildung 66) erhöhte Radonkonzentrationen aufwiesen.



Abbildung 69: Lage der Meßpunkte auf der Halde B an denen Exhalationsmessungen vorgenommen wurden.

Die Messungen wurden in der Regel über einen Zeitraum von 90 Minuten ausgedehnt. Aus dem Anstieg der Radonkonzentration in der Box wurde gemäß Formel (21) (s. Seite 20) die Exhalationsrate bestimmt. An einer ganzen Reihe von Punkten wurden die Messungen zu unterschiedlichen Zeiten durchgeführt, um die bereits in den Abschnitten 4.2.3 und 4.4.2 diskutierten Effekte der Tagesgänge mit zu erfassen.

sen. An einzelnen Punkten wurden Wiederholungsmessungen nach 1 - 2 Jahren durchgeführt bzw. auch erstmalig Messungen durchgeführt.

Faßt man alle Exhalationswerte zusammen, wobei über Tagesmessungen gemittelt wird, ergibt sich für die Halde B eine mittlere Exhalationsrate von 0,017 Bq/m²·s. Weitere statistische Angaben enthält die Tabelle 10. Die Häufigkeitsverteilung der Meßwerte gibt die Abbildung 70.

Tabelle 10: Statistische Angaben zur Radonexhalation im Bereich der Halde B ohne den Dammbereich.

	Exhalationsrate	
Mittelwert	0,017	[Bq/m ² ·s]
STD	0,007	[Bq/m ² ·s]
Max	0,035	[Bq/m ² ·s]
Min	0,007	[Bq/m ² ·s]
Median	0,016	[Bq/m ² ·s]

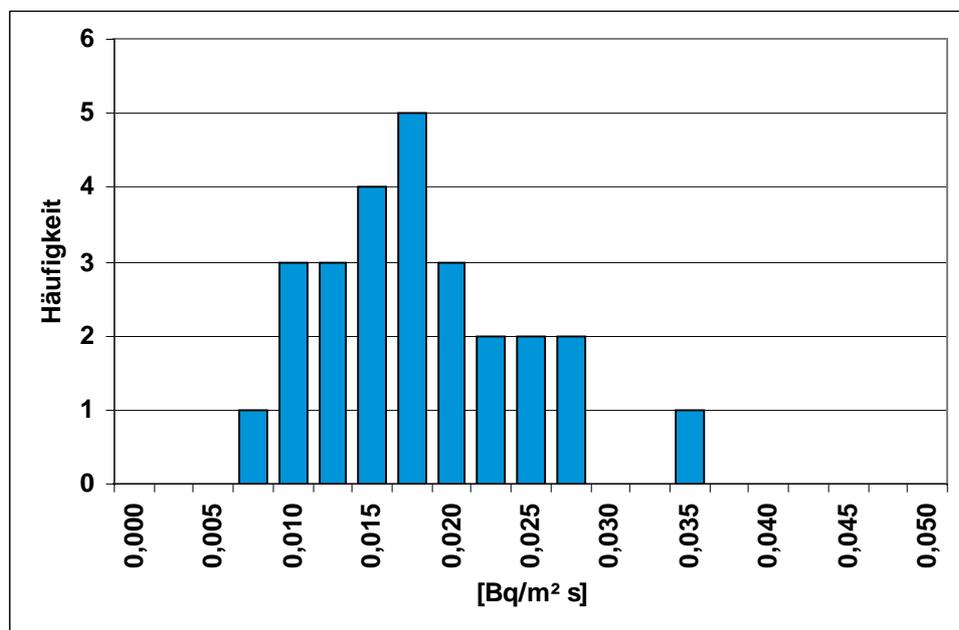


Abbildung 70: Häufigkeitsverteilung der auf der Haldenoberfläche gemessenen Exhalationsraten.

Die aus den Einzelwerten berechnete mittlere Exhalationsrate kann als eine konservative Näherung betrachtet werden, da bei den Messungen verstärkt Punkte beprobt wurden, die durch eine relativ hohe Radonkonzentration in 10 cm Höhe über

wurden, die durch eine relativ hohe Radonkonzentration in 10 cm Höhe über dem Erdboden charakterisiert sind. Der Mittelwert von 0,017 Bq/m²·s liegt nur etwa um den Faktor 2 - 3 höher als der Hintergrundwert für geogene Gebiete in Deutschland. Es ist nicht auszuschließen, daß möglicherweise der Hauptbeitrag zur gesamten Radonquellstärke der Halde B durch das aufgetragene Material, das durch eine mittlere Ortsdosisleistung von etwa 130 nSv/h charakterisiert ist, bedingt ist. Auf diesen Sachverhalt wird im Abschnitt 6.4 eingegangen.

Die mittlere Radonexhalationsrate von 0,017 Bq/m²·s findet ihre Entsprechung in einer über die Haldenoberfläche gemittelten Radonkonzentration, die abhängig vom Zeitpunkt der Messung (Jahreszeit und Jahr) ist. Nimmt man den in Tabelle 9 angegebenen Mittelwert der Radonkonzentration von 44 Bq/m³ als Vergleichsgröße, folgt aus der Definitionsgleichung

$$J \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right] = k_{\text{Rn}} \cdot C_{\text{Rn}} \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right] \quad (31)$$

ein Kalibrierfaktor k_{Rn} von 4×10^{-4} m/s. Dieser Wert stimmt gut mit dem für das Meßfeld Wiese 2 erhaltenen Kalibrierfaktor von 5×10^{-4} m/s überein. Dies ist auch so erwartet worden, da die Exhalationsraten der abgedeckten Halde bei einem Wert liegt, der mit dem des Meßfelds Wiese 2 vergleichbar ist.

Ein kleinerer Wert von 3×10^{-4} m/s ergibt sich für den Kalibrierfaktor, wenn die einzelnen Exhalationsraten den Radonkonzentrationen, gemessen in 10 cm Höhe, gegenübergestellt werden. Diese Korrelation ist in der Abbildung 71 dargestellt und veranschaulicht, daß die Exhalationsrate linear mit der in 10 cm Höhe gemessenen Radonkonzentration ansteigt. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden ist nicht sehr hoch, doch in Hinblick auf die Datenlage als ausreichend instruktiv zu bezeichnen.

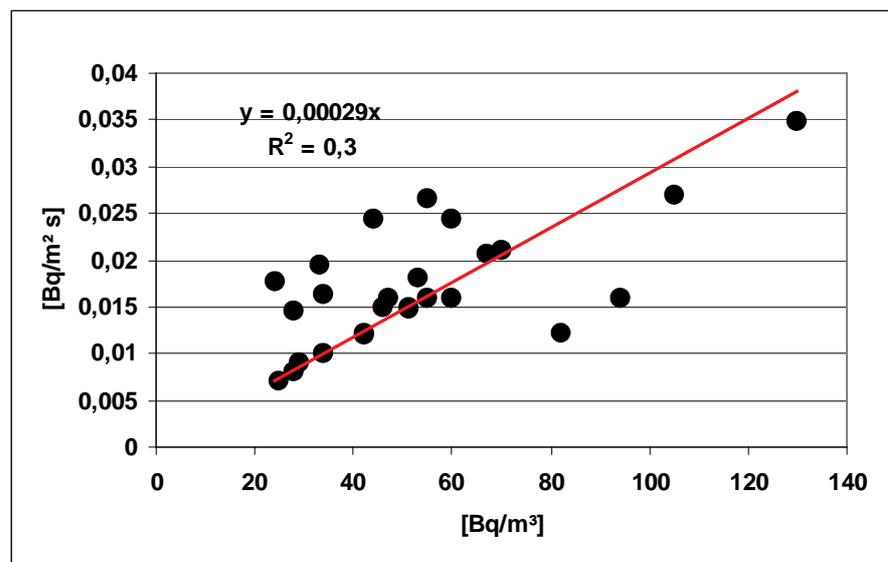


Abbildung 71: Abhängigkeit der gemessenen Exhalationsrate von der in 10 cm Höhe über der Haldenoberfläche gemessenen Radonkonzentration

Eine Ursache für das relativ geringe Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden in Abbildung 71 liegt möglicherweise darin, daß für eine Reihe von Radonkonzentrationen nur eine obere Grenze angegeben wurde, so daß z.B. keine Werte unterhalb von 20 Bq/m³ auftreten. Zieht man jedoch die Ergebnisse für den Dammbereich der Halde, die im Abschnitt 6.5 diskutiert werden, und die für die Trockendamthalde in Johannegeorgenstadt (s. Abschnitt 4.2) mit ins Kalkül, relativiert sich das Bild. Dies ist aus den Ergebnissen der Abbildung 72 klar erkenntlich, wobei ein doppeltlogarithmischer Plot gewählt wurde, um den großen Wertebereich überstreichen zu können. In diesem Fall liegt der Kalibrierfaktor bei 4×10^{-4} m/s, wobei das Bestimmtheitsmaß deutlich besser ist.

Als Fazit bleibt somit festzuhalten, daß die mittleren Exhalationsraten aus den Langzeitmessungen der Radonkonzentration gemäß Gleichung (31) abgeschätzt werden können, wenn ein Kalibrierfaktor k_{Rn} von ca. $(3 - 6) \times 10^{-4}$ m/s ins Kalkül gezogen wird. Es ist offensichtlich, daß die Genauigkeit der Abschätzung der Exhalationsrate mit der am Meßort herrschenden mittleren Radonkonzentration ansteigt. Dieser Sachverhalt wird im Abschnitt 6.7 anhand eines einfachen quantitativen Modells untersucht und eine Beziehung zu den Perioden geringer Windbewegung, während der sich die Radonkonzentration in der Umgebung der Kernspurdetektoren zu höheren Werten entwickeln kann, abgeleitet.

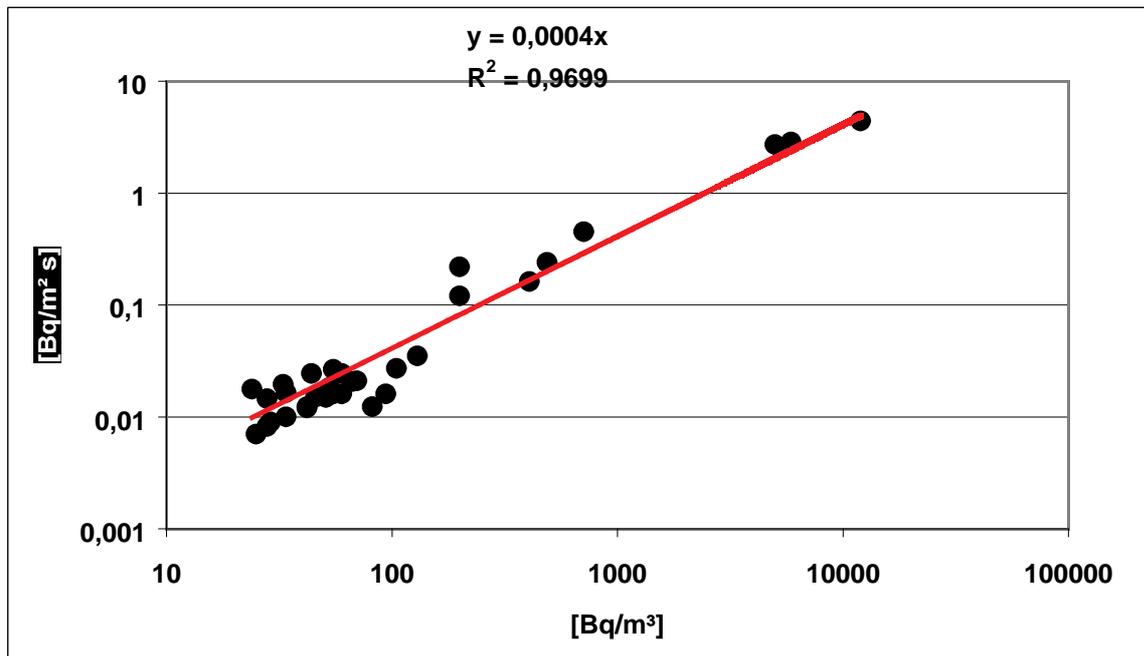


Abbildung 72: Abhängigkeit der gemessenen Exhalationsrate von der in 10 cm Höhe über der Haldenoberfläche gemessenen Radonkonzentration der Halde B, des Damms der Halde und der Trockendammhalde in Johannegeorgenstadt.

6.4 Untersuchungen zur Mächtigkeit der Abdeckung

Um die gemessenen Radonkonzentrationen sowie auch die Exhalationsraten qualitativ besser beurteilen zu können, sind die Einlagerungsverhältnisse auf der Halde B näher untersucht worden. In Abbildung 73 ist beispielhaft ein Querprofil dargestellt, aus dem die Lage (Hoch- und Rechtswerte) der abgedeckten Kassetten sowie die Contour der Abdeckung zu entnehmen ist. Die einzelnen Kassetten enthalten schluffige Tailings, sandige Tailings, ein Gemisch von sandigen und schluffigen Tailings sowie Rotschlamm. Aus den Untersuchungen folgte, daß, abgesehen von einigen wenigen Randbereichen, die Abdeckung im Mittel größer als 1 m ist, wobei die Zwischenabdeckung aus Mineralboden und der Rest aus kontaminierter Asche aus dem Großschurf besteht. Der arithmetische Mittelwert des Abstands zwischen der jeweils obersten Füllschicht der Kassette und der Haldenoberfläche beträgt für die zwei Längs- und Querprofile sogar 2,1 m.

Aufgrund dieser verhältnismäßig großen Mächtigkeit der Abdeckung konnten keine signifikanten Korrelationen zwischen der beobachteten Radonfreisetzung und den

abgedeckten Tailings beobachtet werden. An besonderen Stellen (Randbereiche der Kassetteneinlagerung) ist jedoch nicht ausgeschlossen, daß lokal erhöhte Freisetzungsraten existieren werden. Eine diesbezüglich zielgerichtete Beprobung ist nicht erfolgt.

Ausgehend von dem gegenwärtigen Kenntnisstand kann somit geschlußfolgert werden, daß die oben diskutierten Meßergebnisse hinsichtlich der Radonfreisetzung eine Situation reflektieren, die durch die Mächtigkeit der Abdeckung und deren radiologische Eigenschaften und nicht durch die verwahrten Tailings geprägt ist. Die Radionuklidzusammensetzung des Abdeckmaterials und seine Verteilung über die Haldenoberfläche sind nicht erkundet worden. Ausgehend von den Rastermessungen der Ortsdosisleistung, die einen mittleren Wert von 134 nSv/h für die Haldenoberfläche ohne Dammbereich lieferten, leitet sich eine mittlere spezifische Ra-226-Aktivität von 60 - 80 Bq/kg ab. Diese Aktivitätskonzentration ist nach den vorliegenden Erfahrungen ausreichend, die mittlere Exhalationsrate von ca. 0,02 Bq/m²·s zu reproduzieren, die etwa um den Faktor 2 höher als der geogene Hintergrundwert in Deutschland ist. Wichtig ist jedoch die Feststellung, daß die gegenwärtig auf der Halde (außer Dammbereich) beobachtete Radonfreisetzung nahezu ausschließlich durch die Abdeckung und nicht die abgedeckten Tailings geprägt wird.

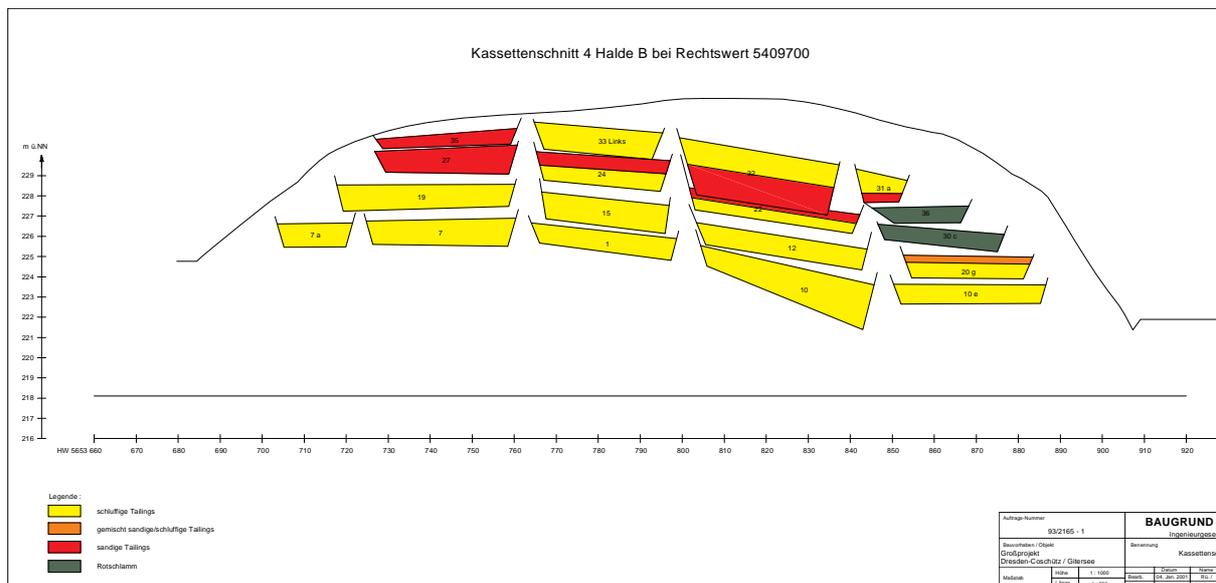


Abbildung 73: Lage der Kassetten unterhalb der Haldenabdeckung für den Schnitt beim Hochwert 5653850 sowie Angabe der Höhe [m]

Zur Untermauerung dieser These wird beispielhaft eine 1 bzw. 2 m mächtige Abdeckung mit einer spezifischen Ra-226-Aktivität von 70 Bq/kg betrachtet, die auf Tailingsmaterial mit einer Mächtigkeit von 4 m und einer spezifischen Ra-226-Aktivität von 4000 Bq/kg aufgetragen ist (2-Schicht-Modell, s.a. Abschnitt 2). Die Exhalationsrate wird unter Zugrundelegung rein diffusiver Radontransportprozesse berechnet. Die zur Berechnung der Exhalationsrate erforderlichen zusätzlichen Parameter sind in der Tabelle 11 angegeben. Sie stellen Erfahrungswerte dar, die bei Untersuchungen im Rahmen eines Förderprojekts für das Gebiet Coschütz/Gittersee gesammelt wurden [1]. Die Diffusionslänge für die Abdeckung von $L_D=0,35$ m lässt sich aus der gemessenen Exhalationsrate und bei Annahme diffusiver Radontransportprozesse relativ sicher abschätzen.

Die in Tabelle 11 zusammengestellten Ergebnisse vermitteln folgenden Trend. Bei einer 2 m mächtigen Abdeckung, die etwa der der gegenwärtig aufgetragenen Abdeckung entspricht, wird die Exhalationsrate durch die Radongeneration in der Abdeckung bestimmt. Die berechnete Exhalationsrate stimmt sehr gut mit der aus den Messungen ermittelten mittleren Exhalationsrate überein. Die 4 m mächtige Tailingschicht erhöht die Exhalationsrate lediglich von 0,018 auf 0,02 Bq/m².s.

Tabelle 11: Exhalationsrate J in Abhängigkeit von der Mächtigkeit der Abdeckung und der Tailings. Die anderen Parameter sind in folgender Weise gewählt worden: Dichte von Abdeckung und Tailings jeweils 1,8 g/cm³, Porosität n=0,3, Emanationskoeffizient E=0,2.

J [Bq/m ² ·s]	Abdeckung Mächtigkeit [m]	Tailings Mächtigkeit [m]	L _{D, Abdeckung} [m]	L _{D, Tailings} [m]
0,02	2	4	0,35	0,2
0,018	2	0	0,35	0,2
0,06	1	4	0,35	0,2
0,018	1	0	0,35	0,2
0,021	2	4	0,35	0,35
0,073	1	4	0,35	0,35
0,04	1	4	0,35	0,10
0,03	1	4	0,35	0,05
0,02	1	4	0,35	0,015

Bei einer geringeren Mächtigkeit der Abdeckung von 1 m würde sich die Exhalationsrate auf 0,06 Bq/m²·s erhöhen. Dieser Wert entspricht etwa der höchsten Exhalationsrate, die im Rahmen der Untersuchungen gemessen wurde. Dieser Vergleich zeigt, daß eine Abdeckung von ca. 1 m nicht ausreicht, die Radonfreisetzung so stark zu reduzieren, daß sie mit der natürlicher Böden vergleichbar wäre.

Wird für die Radondiffusionslänge in den Tailings ein Wert gewählt, der mit dem der Abdeckung vergleichbar ist, vergrößert sich die Exhalationsrate um etwa 20% bei einer 1 m mächtigen Abdeckung. Um den Einfluß der Tailings auf die Exhalationsrate bei einer 1 m mächtigen Abdeckung vernachlässigen zu können, müßte die Radondiffusionslänge in den Tailings bei extrem geringen Werten von ca. 1,5 cm, entsprechend einer Diffusionskonstante von ca. 10⁻¹⁰ m²/s, liegen. Solche Werte wären nur in stark verdichteten und nahezu wassergesättigten Böden möglich [16], [17].

6.5 Meßergebnisse der Radonkonzentration für den Dammbereich

Im Dammbereich der Halde (s.a. Abbildung 63) wurden Messungen der Radonkonzentration in 3 verschiedenen Höhen durchgeführt, um die Abnahme der Radonkonzentration mit der Höhe studieren zu können. Solche Untersuchungen wurden auch auf der Halde durchgeführt, doch wegen der geringen Exhalationsraten konnte kein auswertbarer Konzentrationsgradient der Radonkonzentration in Abhängigkeit von der Meßhöhe ermittelt werden.

Die Ergebnisse für eine 3-monatige Messung im Dammbereich sind in der Abbildung 74 dargestellt. Hinsichtlich der Höhenabhängigkeit der Radonkonzentrationen ähneln sie den Ergebnissen des BfS, die im Abschnitt 4.2 am Beispiel der Trockendammhalde (Johanngeorgenstadt) diskutiert wurden. Wie dort, werden auch hier in 10 cm Höhe teils drastische Anstiege der Radonkonzentrationen beobachtet, während die in 0,9 m Höhe gemessenen Radonkonzentrationen bereits vergleichbare Werte von etwa 50 Bq/m³ annehmen. Die Abdeckungsmächtigkeit im Dammbereich beträgt teilweise nur 15 cm.

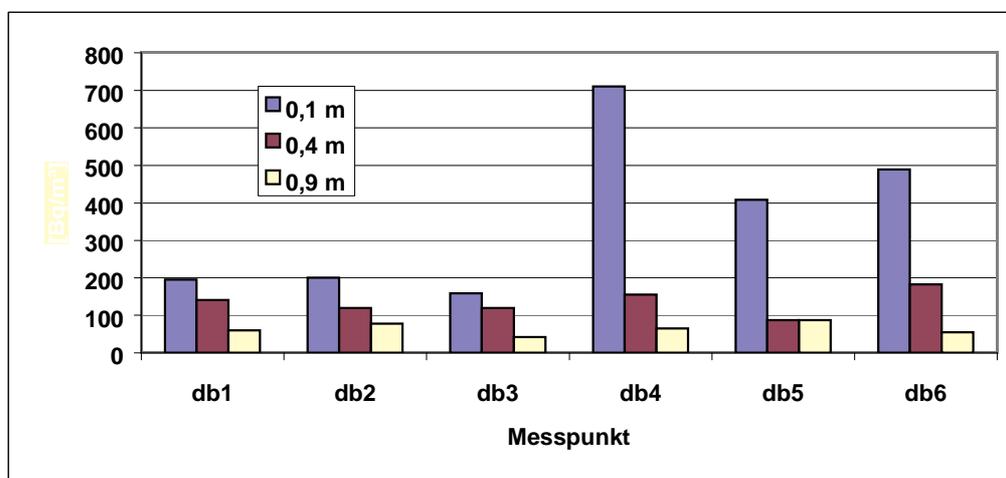


Abbildung 74: Meßwerte der Radonkonzentration in 3 verschiedenen Höhen des Dammbereichs

Verglichen mit den Ergebnissen für die Halde fällt auf, daß die Radonkonzentrationen in 10 cm Höhe mit bis zu ca. 700 Bq/m³ deutlich über den Werten der Halde liegen. Daraus folgt, daß auch die Radonexhalation in entsprechender Weise um mindestens eine Größenordnung erhöht ist. Dies wurde auch durch direkte Messungen der Radonexhalation bestätigt. Die Exhalationsraten lagen im Bereich von 0,2 bzw. 0,5 Bq/m²·s und sind so etwa um den Faktor 10 - 25 höher als die mittlere Exhalationsrate der Halde. Sie korrespondieren mit den in 10 cm Höhe gemessenen Radonkonzentrationen. Dieser Sachverhalt ist in der Abbildung 75 dargestellt. Der aus diesen Messungen abgeleitete Kalibrierfaktor k_{Rn} liegt bei 6×10^{-4} m/s und ist etwa doppelt so groß wie der aus den Messungen über die Haldenoberfläche abgeleitete Wert (s. Abbildung 71).

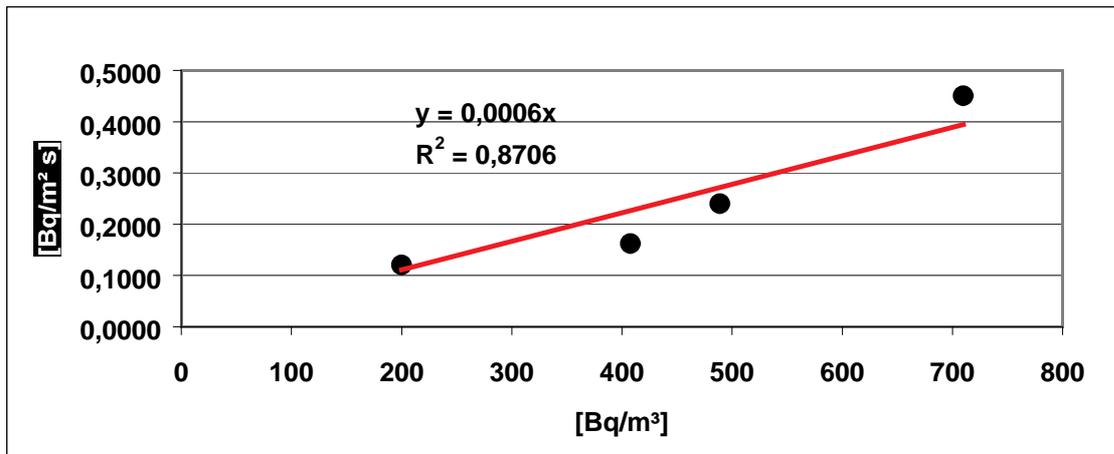


Abbildung 75; Abhängigkeit der gemessenen Exhalationsrate von der in 10 cm über der Dammoberfläche gemessenen Radonkonzentration der Halde B.

Der durchgeführte Vergleich verdeutlicht, daß im Dammbereich aus der Messung der Radonkonzentration in geringen Höhen Aussagen über die Exhalation und ihre lokale Variation gewonnen werden können. Eine bessere Kalibrierung, d.h. die Feststellung bzw. Festsetzung der Korrelation zwischen der Radonkonzentration in geringer Höhe und der Exhalationsrate, ist wegen der geometrischen Einflüsse (extremer Steilhang) nicht möglich gewesen. Ein Fit der Konzentrationsprofile mittels einer einfachen Exponentialfunktion

$$C(x) = \bar{C}_0 \exp \left[-\frac{x}{\beta} \right] \quad (32)$$

liefert für den Parameter β , der als effektive Radondiffusionslänge von Radon in der die Halde umgebenden Atmosphäre interpretiert werden kann, die in der Abbildung 76 angegebenen Werte.

Der Mittelwert von β liegt bei 0,57 m und ist somit etwa um den Faktor 4 kleiner als die Radondiffusionslänge in der Luft von 2,3 m, die sich aus der Diffusionskonstante $D_L = 1,1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ berechnet. Obwohl die Anpassung (32) willkürlich erscheint, ist sie korrekt für die Radonmigration in einem unendlich ausgedehnten Medium, das durch eine Diffusionskonstante D_L charakterisiert ist.

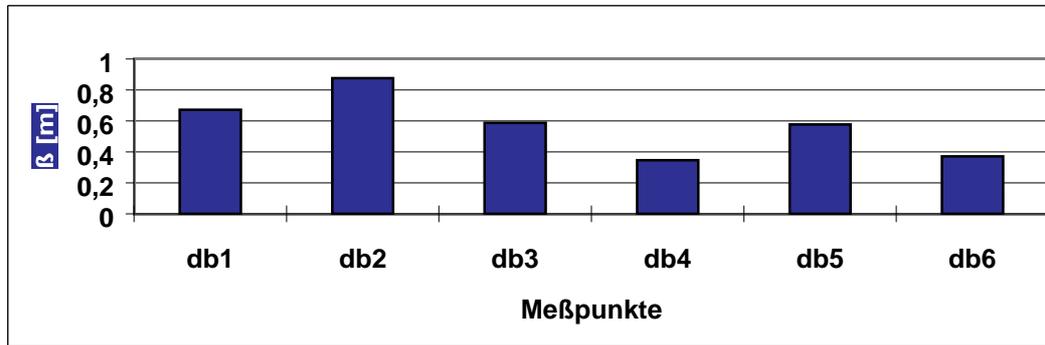


Abbildung 76; Fit-Parameter β für die höhenabhängigen Radonkonzentrationen gemäß Formel (32).

Stellt man die am Damm und auf der Halde erhaltenen Werte für die Radonkonzentration und die Exhalationsrate gegenüber, ergibt sich die in Abbildung 77 dargestellte Regressionsgerade. Der aus dieser Korrelation abgeleitete Kalibrierfaktor k_{Rn} liegt bei 5×10^{-4} m/s. Es ist deutlich zu erkennen, daß die relativen Unsicherheiten bei geringen Exhalationsraten deutlich zunehmen.

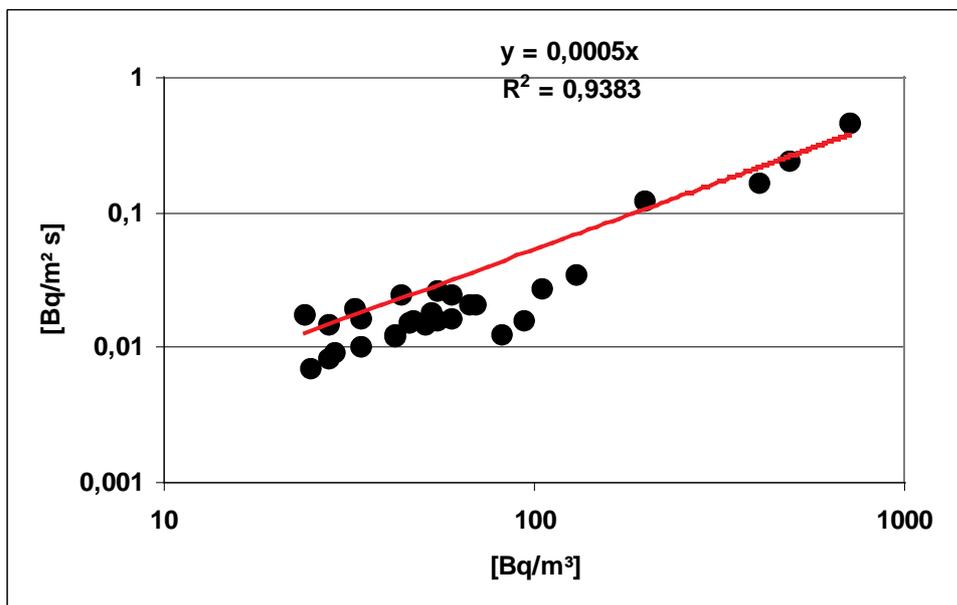


Abbildung 77: Abhängigkeit der gemessenen Exhalationsrate von der in 10 cm Höhe über der Haldenoberfläche und dem Damm gemessenen Radonkonzentration der Halde B.

In Hinblick auf die Prognose der Quellstärke einer Fläche sind sie jedoch von untergeordneter Bedeutung. Wichtiger ist, daß bei hohen, in 10 cm Höhe gemessenen Radonkonzentrationen eine Vorhersage der zu erwartenden Radonexhalationsrate mit größerer Genauigkeit getroffen werden kann.

6.6 Berechnung der Radonquellstärke und Zusammenfassung der Ergebnisse

Durch die Messungen der Radonexhalation bzw. der Radonkonzentration in 10 cm Höhe über der Haldenoberfläche kann von einer mittleren Exhalationsrate der Halde ohne Dammbereich von ca. 0,02 Bq/m²·s ausgegangen werden (s. Tabelle 10). Diese relativ geringe Exhalationsrate ist dadurch bedingt, daß die mittlere Mächtigkeit der gegenwärtigen Abdeckung bei ca. 2 m liegt. Die Mächtigkeit der Abdeckung wurde aus dem vorliegenden Schichtenverzeichnis für jeweils zwei Längs- und Querprofile berechnet. Aufgrund dieser Sachlage ist davon auszugehen, daß die Radonfreisetzung der Halde ohne Dammbereich hauptsächlich durch die Radongeneration im Abdeckmaterial dominiert wird.

Mit der Haldenfläche (ohne Damm) von 8,2 ha errechnet sich aus der mittleren Exhalationsrate von 0,02 Bq/m²·s eine Radonquellstärke von $Q_{\text{Plateau}}=1615$ Bq/s.

Für den Dammbereich mit einer Fläche von 1,9 ha und einer extrapolierten mittleren Exhalationsrate von ca. 0,25 Bq/m²·s ergibt sich eine Quellstärke von $Q_{\text{Damm}}=4750$ Bq/s, die etwa um den Faktor 3 über der des Plateaubereichs liegt. Ausgehend von diesen Ergebnissen kann der Beitrag der etwa 8 ha großen Plateaufläche zur Gesamtquellstärke gegenüber der des Damms nahezu vernachlässigt werden.

Man hätte andererseits die Radonquellstärke von Damm und Plateaufläche aus der in 10 cm Höhe gemessenen Radonkonzentration und bei Annahme eines mittleren Kalibrierfaktors von $k_{\text{Rn}} \approx 5 \times 10^{-4}$ m/s, gemäß

$$Q = k_{\text{Rn}} [C_{\text{Halde}} \cdot F_{\text{Halde}} + C_{\text{Damm}} \cdot F_{\text{Damm}}] \quad (33)$$

abschätzen können, wobei C_i die mittleren, in 10 cm Höhe gemessenen Radonkonzentrationen und F_i die entsprechenden Flächen von Halde und Plateau sind. Da Langzeitmessungen der Radonkonzentrationen in niedrigen Höhen flächendeckend durchgeführt werden können und die sich ergebenden Meßwerte eine Integration über die meteorologischen Einflüsse etc. automatisch mit einschließen, sind die auf

dieser Grundlage berechneten Radonquellstärken als belastbarer einzuschätzen als Abschätzungen, die auf stichpunktartigen Messungen der Radonexhalation beruhen und durch Tages- und Jahregänge sowie weitere meteorologische Effekte stark geprägt sind. Bei einer rasterartigen Messung der Radonkonzentration in niedrigen Höhen werden die lokalen Besonderheiten der Radonfreisetzung in einfacher Weise erfaßt. Die größte Unsicherheit liegt im Ansatz für die zu wählende Kalibrierkonstante k_{Rn} . Die im Rahmen der Untersuchungen durchgeführten Vergleiche weisen auf einen Faktor im Bereich von $k_{Rn} \approx (3 - 6) \times 10^{-4}$ m/s hin.

In der Abbildung 77 sind die am Damm und auf der Halde erhaltenen Werte für die Radonkonzentration und die Exhalationsrate gegenübergestellt worden. Aus dieser Korrelation leitet sich ein Kalibrierfaktor k_{Rn} von 5×10^{-4} m/s ab. Werden die Messungen von Damm und Halde separat betrachtet, wird für die Kalibrierfaktoren 6×10^{-4} m/s (s. Abbildung 75) bzw. 3×10^{-4} m/s (s. Abbildung 71) erhalten. Bei diesen Korrelationen betrug die höchste Radonkonzentration in 10 cm Höhe 710 Bq/m^3 . Etwa um eine Größenordnung höhere Radonkonzentrationen wurden bei Messungen des BfS Berlin in Johannegeorgenstadt (Trockendammhalde) gemessen. Schließt man diese Ergebnisse mit ein, ergibt sich die in Abbildung 78 dargestellte Regressionsgerade, die einen Radonkonzentrationsbereich von 3 Größenordnungen überstreicht.

Inwieweit diese empirisch gewonnene Kalibrierung als belastbar bezeichnet werden kann, ist durch entsprechende Messungen weiter zu untersetzen. Als Tendenz ist aber abzuschätzen, daß die bei Radonkonzentrationen, gemessen in 10 cm Höhe, von über 200 Bq/m^3 die zuzuordnende Exhalationsrate mit weit größerer Sicherheit erfolgen kann als bei relativ niedrigen Radonkonzentrationen von $\leq 50 \text{ Bq/m}^3$.

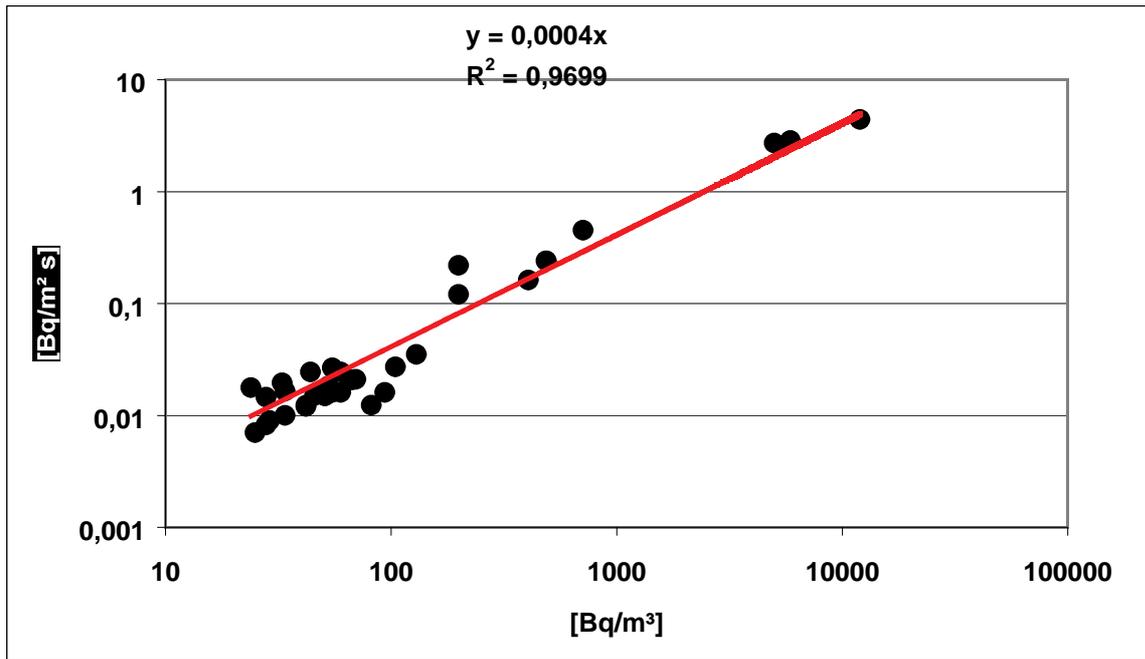


Abbildung 78: Abhängigkeit der gemessenen Exhalationsrate von der in 10 cm Höhe über der Haldenoberfläche gemessenen Radonkonzentration der Halde B, des Damms der Halde und der Trockendammhalde in Johannegeorgenstadt.

6.7 Vereinfachte quantitative Modellierung der in geringen Höhen gemessenen Radonkonzentration

Die vereinfachte quantitative Modellierung der in geringen Höhen gemessenen Radonkonzentration basiert auf einer idealisierten Expositionssituation, in der ein Kernspurdetektor 10 cm über der Exhalationsfläche positioniert wurde (s. Abbildung 79) und für einen gewissen Zeitraum t_1 mit einer Exhalationsbox umgeben werden kann, um die Advektion des Windes vollständig auszuschalten.

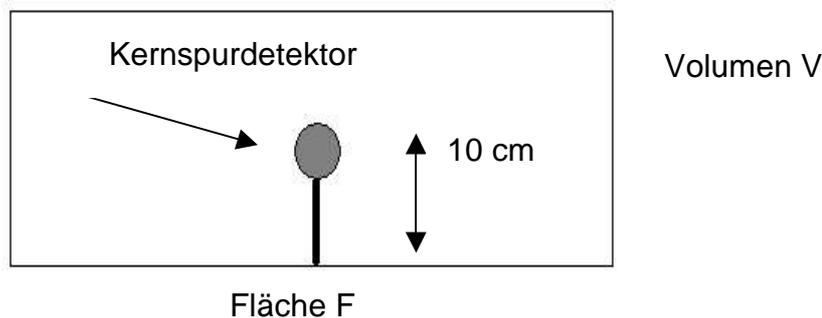


Abbildung 79: Schematische Darstellung eines Kernspurdetektors über einer exhalierenden Oberfläche.

Während des Zeitraums t_1 steigt die Radonkonzentration in der Box gemäß Formel (20) linear mit der Zeit an

$$C_1 = C_0 + J \frac{F}{V} t_1. \quad (34)$$

Hier ist C_0 die Anfangskonzentration in der Detektorumgebung vor dem Aufsetzen der Box, F ist die Exhalationsfläche und V das Volumen der Box. Nach dem Zeitpunkt t_1 wird die Box entfernt, so daß ein Konzentrationsaustausch mit der Radonkonzentration der Umgebung stattfinden kann. Die sich einstellende Radonkonzentration in der Umgebung des Detektors ist durch

$$C_2 = x_1 \cdot C_1 + (1 - x_1) \cdot C_{BG} \quad (35)$$

gegeben, wobei C_{BG} die Radonkonzentration in der weiteren Umgebung des Detektors ist. Die Mischungsverhältnisse sind durch die Größe x_1 bestimmt. Wird die sich ursprünglich in der Box einstellende Radonkonzentration durch die der Umgebung vollständig ersetzt, ist $x_1=0$ und $C_2=C_{BG}$. Im entgegengesetzten Fall, d.h. es findet kein Austausch mit der Umgebung statt, ist $C_2=C_1$. Wird nach der Phase des Konzentrationsausgleichs wiederum die Box aufgesetzt, entwickelt sich die Radonkonzentration wiederum nach (34) in der Form

$$C_3 = C_2 + J \frac{F}{V} t_2, \quad (36)$$

wobei die Dauer des Konzentrationsanstiegs durch t_2 und die Anfangskonzentration jetzt durch C_2 gegeben sind. Nach dem Zeitschritt t_2 erfolgt ein erneuter Konzentrationsausgleich mit der Umgebung gemäß (35) zu

$$C_4 = x_2 \cdot C_3 + (1 - x_2) \cdot C_{BG} \quad (37)$$

Dabei wird das Mischungsverhältnis x_2 unterschiedlich zu x_1 sein.

Dieses sehr schematische Modell wird die tatsächlichen Verhältnisse reflektieren, wenn man voraussetzt, daß nach einer Phase der Windstille oder geringen Winds die sich im Bereich des Detektors aufbauende Radonkonzentration durch Windadvektion plötzlich wieder verändert wird. Diesen Vorgang kann man simulieren, indem den Mischungsverhältnissen x_i Zufallszahlen im Intervall $\{0, 1\}$ zugeordnet werden. Desgleichen können auch die Phasen des Radonkonzentrationsaufbaus in Detektornähe durch Zufallszahlen für die Anstiegszeit t_i modellhaft nachgebildet werden. Auch die Radonkonzentration der Umgebung C_{BG} ist als eine Größe zu betrachten, die in einem vorzugebenen Intervall schwanken kann, wobei die Größe der Umgebungskonzentration nicht unabhängig von der mittleren Exhalationsrate der den Detektor umgebenden Fläche ist. Bei anthropogen unbeeinflussten Flächen ist der Mittelwert von C_{BG} mit den geogenen Hintergrundwerten gleichzusetzen. Bei Messun-

gen auf kontaminierten Flächen oder Halden ist die Größe C_{BG} entsprechend höher zu wählen.

In der Abbildung 80 ist beispielhaft die nach dem oben beschriebenen Schema berechnete Radonkonzentration in 10 cm Höhe mit Meßwerten verglichen, die am 22.06.02 kurz nach Mitternacht (01:20 - 03:20 Uhr) auf der in Abschnitt 4.4.2 beschriebenen Wiese erhalten wurden.

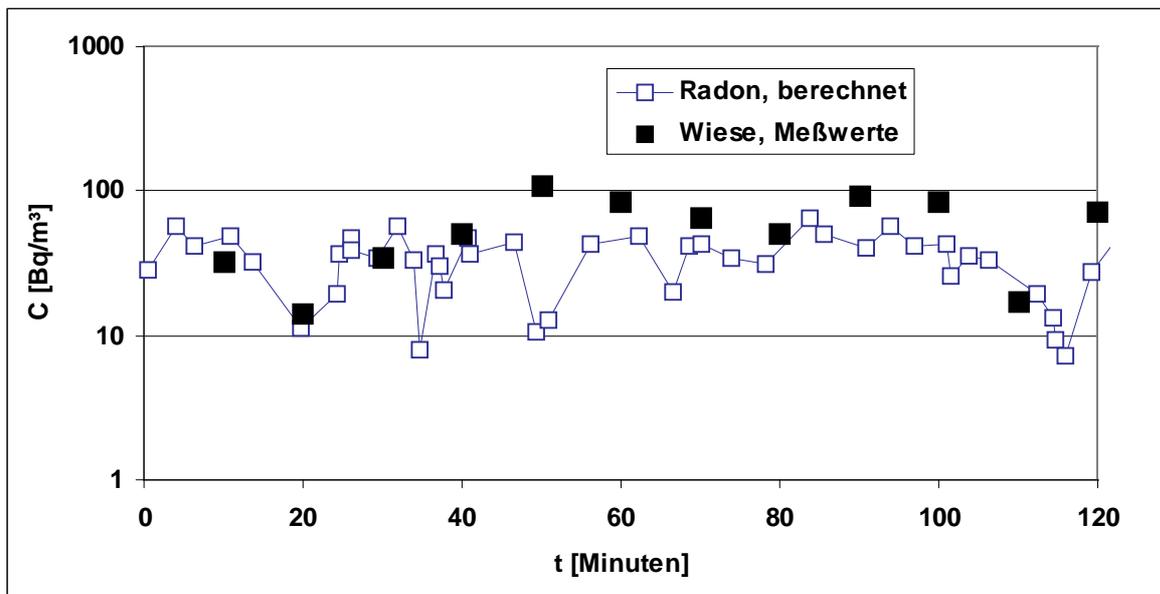


Abbildung 80: Vergleich der mit dem schematischen Modell berechneten Radonkonzentration in 10 cm Höhe mit Meßwerten vom 22.06.02 (01:20 - 03:20).

Als Parameter des schematischen Modells wurde die auf der Wiese gemessene Exhalationsrate von $J=0,015 \text{ Bq/m}^2\cdot\text{s}$ sowie eine mittlere Umgebungskonzentration von $C_{BG}=20 \text{ Bq/m}^3$ gewählt. Des weiteren wurde für die Phase des linearen Konzentrationsaufbaus in Detektornähe eine mittlere Anstiegszeit von $\langle t \rangle \approx 200 \text{ s}$ angenommen. Über die Auswertung der Wetterdaten und die Windgeschwindigkeitsänderung mit der Höhe wird im Folgenden noch kurz eingegangen.

Würde man die Modelldaten als Grundlage für die Ableitung des Kalibrierfaktors k_{Rn} benutzen, ergibt sich ein Wert von $3,6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, der mit dem im Abschnitt (6.6) abgeleiteten Wert aus den experimentellen Daten gut korrespondiert. Diese Übereinstimmung könnte als zufällig betrachtet werden. Andererseits zeigt dieser Vergleich, wie auf einfache Weise der komplizierte Zusammenhang zwischen in niedrigen Hö-

hen gemessenen Radonkonzentrationen und der Exhalationsrate quantitativ erfaßt werden kann.

Erhöht man die Exhalationsrate, erhöht sich in entsprechender Weise auch die in 10 cm Höhe berechnete Radonkonzentration. Dies ist beispielhaft für Exhalationsraten von $J = 1 \text{ Bq/m}^2 \cdot \text{s}$ und $J = 5 \text{ Bq/m}^2 \cdot \text{s}$ in der Abbildung 81 für einen Zeitraum von 2 Stunden illustriert.

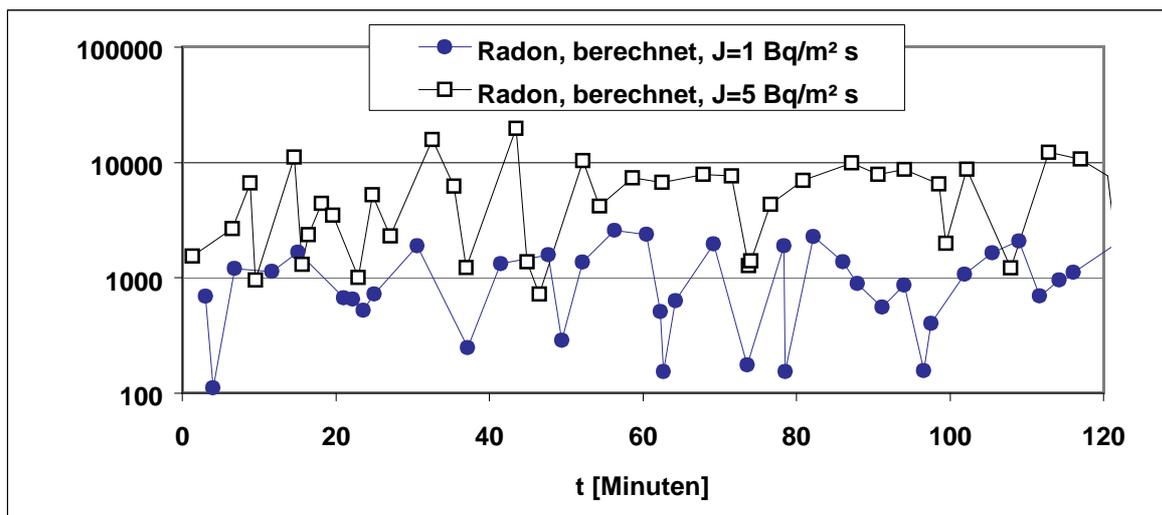


Abbildung 81: Berechnete Radonkonzentrationen in 10 cm Höhe für Exhalationsraten von 1 und 5 $\text{Bq/m}^2 \cdot \text{s}$

Die über einen Zeitraum von einem Tag berechneten Mittelwerte der Radonkonzentration liegen bei 1890 bzw. 7622 Bq/m^3 und sind somit vergleichbar mit den Werten, die auf der Trockendammhalde in Johannegeorgenstadt über einen Zeitraum von mehreren Wochen durch das BfS gemessen wurden (s. Abschnitt 4.2).

Der relativ kleine Kalibrierfaktor von 10^{-3} bis 10^{-4} m/s , der die Dimension einer Geschwindigkeit hat, bedeutet nicht, daß die mittlere Advektionsgeschwindigkeit in diesem Bereich liegt, denn nur in Phasen geringer Luftbewegung können die höheren Radonkonzentrationen in Detektornähe entstehen und registriert werden.

In erster Näherung ist der Kalibrierfaktor k_{Rn} durch

$$k_{Rn} = \frac{H}{\langle t \rangle} \quad (38)$$

gegeben, wobei H die Positionshöhe des Detektors ist und $\langle t \rangle$ für die mittlere Anstiegszeit der Radonkonzentration steht. Mit $k_{Rn} = 5 \times 10^{-4}$ m/s und $H = 0,1$ m errechnet sich eine mittlere Anstiegszeit von $\langle t \rangle \approx 200$ s.

Wird der Detektor in größere Höhen positioniert, muß ein entsprechend größerer Kalibrierfaktor gewählt werden, da die Radonkonzentration mit der Höhe abnimmt. In dem einfachen Modell erfolgt die Abnahme der Radonkonzentration linear mit der Höhe, so daß der für eine bestimmte Höhe zu wählende Kalibrierfaktor in entsprechender Weise linear ansteigen wird. Daß dies annähernd zutrifft, zeigt der Vergleich der Radonkonzentrationen, die über längere Zeiträume in 0,1 bzw. 1 m Höhe gemessen wurden und sich etwa um eine Größenordnung unterscheiden (s.a. Diskussion im Abschnitt 4.2). Würden die Meßwerte in den unterschiedlichen Höhen herangezogen werden, um den Kalibrierfaktor zu bestimmen, müßte für die in 1 m Höhe gemessenen Radonkonzentrationen ein vergleichsweise größerer Kalibrierfaktor gewählt werden, um aus den Radonkonzentrationswerten Rückschlüsse auf die Exhalationsrate ziehen zu können. In der Abbildung 82 ist dieser Sachverhalt beispielhaft für eine Radonexhalationsrate von $J = 0,2$ Bq/m²·s dargestellt, die die erwartete lineare Abhängigkeit der berechneten Radonkonzentration von der mittleren Anstiegszeit $\langle t \rangle$ illustriert.

Würde die Exhalationsrate erhöht, ändert sich in entsprechender Weise der Anstieg der Regressionsgeraden. Es ist jedoch zu erkennen, daß sich der berechnete Kalibrierfaktor für Anstiegszeiten kleiner als 2 Minuten stärker ändert als für Zeiten größer als 2 Minuten. Letzteres bedeutet, daß sich in diesem Fall die aus den experimentellen Daten berechneten Kalibrierfaktoren durch geringere Unsicherheiten auszeichnen als solche, bei denen die mittlere Anstiegszeit $\langle t \rangle$ groß genug ist, den Einfluß der exhalierten Fläche über den der Hintergrundwerte zu erfassen. Im extremen Fall, daß ständig Wind vorherrscht, wird auch der in 10 cm Höhe positionierte Kernspurdetektor nur die durch den Wind herangeführte Radonkonzentration reflektieren und der Einfluß der Exhalation der Fläche auf die in 10 cm Höhe gemessene Radonkonzentration vernachlässigbar sein. In einer solchen Situation wäre die Methode ungeeignet.

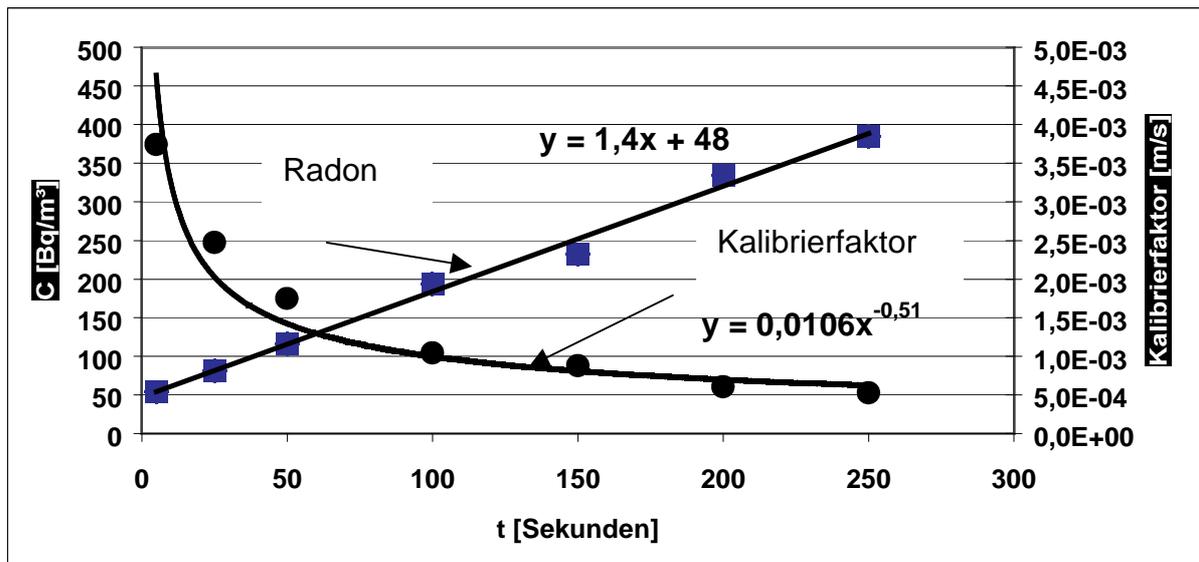


Abbildung 82: Abhängigkeit der für 10 cm Höhe berechneten Radonkonzentrationen sowie des Kalibrierfaktors k_{Rn} in Abhängigkeit von der mittleren Expositionszeit

Messungen der Windstärke in Dresden-Coschütz über einen Zeitraum von einem Jahr zeigten, daß 30% der Windgeschwindigkeiten bis zu 1 m/s betragen. Die Windgeschwindigkeit wurde dabei in 5 m Höhe gemessen. Zusätzliche Messungen im Rahmen des Förderprojekts wurden in 0,7 m Höhe ausgeführt.

Man kann die Aussagen dieses einfachen Modells verbessern, wenn man für das Auftreten bestimmter Windgeschwindigkeiten und auch die mittlere Anstiegszeit der Radonkonzentration lognormale Verteilungen wählt. Aufgrund der vorliegenden Erfahrungen ergibt sich damit zwar eine realistischere Abschätzung, jedoch wird das hier diskutierte Bild einer vereinfachten Erfassung der Radonexhalation qualitativ nicht geändert.

Für das Verständnis der abgeleiteten Kalibrierfaktoren spielt die Höhenabhängigkeit der mittleren Windgeschwindigkeit eine wichtige Rolle. Insbesondere sind dabei die Phasen der annähernden Windstille von Bedeutung. Als mittlere Windgeschwindigkeit wird allgemein die Windgeschwindigkeit im Mittel über 10 Minuten bezeichnet. Es ist bekannt, daß die Windzunahme mit der Höhe von der Bodenrauigkeit und dem Turbulenzgrad der Luftströmung abhängt. Ausgenommen ist dabei eine sehr dünne Schicht direkt über dem Boden. Je rauer der Boden ist, desto stärker wird die Turbulenz, die für eine stärkere Durchmischung der bodennahen Luftschicht und

damit auch für einen stärkeren Impulsfluß aus der Strömung zum Boden hin sorgt. Dies bewirkt, daß die Windgeschwindigkeit mehr oder weniger stark mit der Höhe zunimmt.

Auf den Testfeldern wurde kontinuierlich die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung über einen Zeitraum von 2 Jahren in einer Höhe von 0,7 m über der Oberfläche gemessen. Die Auswertung der Meßergebnisse zeigte, daß in dieser Höhe 46% aller gemessenen Windgeschwindigkeiten unterhalb von 1 m/s lagen. Legt man diese Höhe als Referenzpunkt fest, ist von mittleren Windgeschwindigkeiten in 10 cm Höhe von kleiner als 0,4 m/s auszugehen.

Gerade in diesen Phasen der annähernden Windstille können sich in den untersten Atmosphärenschichten erhöhte Radonkonzentrationen aufbauen. Würde auch in geringen Höhen ständig ein verstärkter Luftaustausch vorherrschen, wäre die in 10 cm Höhe gemessene Radonkonzentration mit den Hintergrundwerten in etwa vergleichbar. Daß dies nicht zutrifft, zeigen die entsprechenden Langzeitmessungen in unterschiedlichen Höhen.

Die in 10 cm Höhe gemessenen Radonkonzentrationen sind somit neben der Exhalationsrate auch proportional zu der Zeitdauer geringen Luftaustauschs. Die Modellierungen zeigen, daß man ca. von 200 - 400 Sekunden pro Stunde von annähernder Windstille auszugehen hat. Dies entspricht etwa 10 - 20% der Gesamtzeit und ist mit den Windmessungen, die in 70 cm Höhe durchgeführt wurde, kompatibel. Für einzelne Meßpunkte wird natürlich auch das Geländeprofil eine entscheidende Rolle spielen.

Zum Vergleich sind in der Tabelle 12 einige der mit dem schematischen Modell berechneten mittleren Radonkonzentrationen in 10 cm Höhe und die daraus abgeleiteten Kalibrierfaktoren angegeben. Bei der Berechnung wurde von einer mittleren Anstiegszeit von $\langle t \rangle = 200$ s ausgegangen, d.h. in dieser Zeit entwickelt sich die Radonkonzentration in Detektornähe ohne Berücksichtigung des Luftaustauschs mit der näheren Umgebung.

Tabelle 12: Mit dem schematischen Modell berechnete mittlere Radonkonzentrationen in 10 cm Höhe und die daraus abgeleiteten Kalibrierfaktoren.

Exhalationsrate J [Bq/m²·s]	mittlere Radonkonzentration [Bq/m³]	Kalibrierfaktor k_{Rn} [m/s]
0,015	42	0,00036
0,2	312	0,00065
1	1890	0,00053
5	7622	0,00066

Es ist zu erkennen, daß der berechnete Kalibrierfaktor k_{Rn} lediglich im Bereich von $(3 - 7)10^{-4}$ m/s variiert, während sich die Radonkonzentration in der bodennahen Luftschicht um bis zu 3 Größenordnungen ändert. Dieser Zusammenhang ist mit den Ergebnissen der Feldmessungen in vernünftig guter Übereinstimmung.

7 Zusammenfassung

Für die Vorbereitung von Entscheidungen zur Sanierung bergbaulicher Altlasten, der Überprüfung der Wirksamkeit von Abdeckungen nach erfolgter Sanierung, der Bewertung von Baustandorten sowie zur Abschätzung der Strahlenexposition bei standortspezifischen Untersuchungen ist die Kenntnis der Höhe der Radonexhalation bzw. der Quellstärke großer Flächen von entscheidender Bedeutung.

Das derzeit verwendete Verfahren zur Bestimmung der Radonexhalation (Boxmethode) liefert nur einen momentanen Überblick über die Radonexhalation, so daß Aussagen über das Langzeitverhalten der Radonexhalation wegen der Abhängigkeit von den meteorologischen und bodenphysikalischen Verhältnissen nur bedingt möglich sind. In diesem Vorhaben soll eine praktisch anwendbare Methode zur Bestimmung der langzeitigen Radonquellstärke großer Flächen entwickelt werden.

7.1 Einzelzielsetzungen

Die Einzelzielsetzungen gliedern sich in die nachfolgenden Punkte:

- Ausarbeitung eines konzeptionellen Modells für die Herangehensweise bei der Entwicklung des Verfahrens zur Bestimmung der Radonexhalation auf großen Flächen über längere Zeiträume;
- Durchführung der Radonmessungen mit integrierenden Meßsystemen an ausgewählten Flächen und Standards sowie Durchführung der für die praxisorientierte Anwendung erforderlichen Kalibrierungen;
- Modellierung und Bewertung der Untersuchungsergebnisse;
- Entwicklung eines praktikablen Verfahrens zur Bestimmung einer Langzeit-Radonexhalation auf großen Flächen.

7.2 Meßmethodik

Das zu entwickelnde Verfahren basiert auf der Messung der Radonkonzentration mittels Festkörperspurdetektoren in geringer Höhe über dem Erdboden. Zur Ableitung des Zusammenhanges zwischen der Radonkonzentration in Bodennähe und der Exhalation werden Messungen und Kalibrierungen auf problemangepaßten Standardflächen sowie auf geeigneten Objekten (z.B. Halden oder Absetzanlagen) durchgeführt. Anschließend erfolgt die Entwicklung eines Modells, mit dem aus den Meßergebnissen der Langzeitüberwachung der Radonkonzentration in verschiede-

nen Höhen die entsprechenden Exhalationsraten (Quellstärken) abgeleitet werden können.

7.3 Durchführung

Zur Realisierung der Aufgabe wurde in folgender Weise vorgegangen:

- Anlegen von insgesamt 10 überdachten Testfeldern (mit Sand überdeckte Tailings) von je 1 m² Fläche sowie Testfeldern im geogenen Bereich (ca. 50 m²),
- Aufbau von zwei Meßeinrichtungen (automatisch arbeitende Radonboxen) zur Bestimmung der Radonkonzentration,
- Bestimmung der Radonexhalation auf den Testfeldern und den geogenen Bereichen in einem teilweise quasikontinuierlichen Rhythmus,
- Bestimmung der Radonkonzentration in verschiedenen Höhen über den Testfeldern und geogenen Bereichen, wobei in einigen Testserien die Advektion des Windes weitestgehend ausgeschlossen wurde,
- Betreiben einer Wetterstation während der gesamten Meßperiode (Wind, Luft- und Bodentemperatur),
- Bestimmung der Radonexhalation in quasi-kontinuierlicher Weise an zwei singulären Orten einer Halde (Dammhalde Johannegeorgenstadt (Haldenfuß, Haldenplateau), Halde B in Dresden-Coschütz/Gittersee),
- Entwicklung von Software zur Auswertung der Experimente,
- Entwicklung von Transportmodellen zur qualitativen Durchdringung der experimentellen Ergebnisse,
- Auswertung von Messungen der Radonkonzentration in geringen Höhen sowie von Exhalationsmessungen am Beispiel der Dammhalde Johannegeorgenstadt und der Halde B in Dresden-Coschütz/Gittersee.

7.4 Ergebnisse

Die Hauptarbeitsergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Quasikontinuierliche Exhalationsmessungen zeigen, daß sowohl für geogene Bereiche und Halden ausgeprägte Tagesgänge existieren.
- Über geogenen Flächen variiert die Radonexhalation in Abhängigkeit von der Tageszeit um den Faktor 2, wobei die höchsten Werte in den kühlen Morgenstunden auftreten.

- Bei Halden tritt neben der starken Abhängigkeit von der Tageszeit eine jahreszeitlich bedingte Abhängigkeit auf. Des weiteren besteht eine starke Abhängigkeit vom Haldenprofil mit dem Ergebnis, daß erhöhte Exhalationen am Haldenfuß nur im Sommer auftreten, während im Winterhalbjahr verstärkte Exhalationen nur auf dem Haldenplateau beobachtet werden.
- Die tages- bzw. jahreszeitlichen Einflüsse führen dazu, daß die Exhalationsrate mehr als eine Größenordnung variieren kann.
- Am Haldenfuß betragen z.B. die Tag-Nacht-Unterschiede in der Exhalationsrate an einem typischen Sommertag Faktor 10 - 20.
- Es wurde in einem einfachen Modell gezeigt, daß sich alle tages- und jahreszeitlichen Schwankungen durch die Temperaturunterschiede zwischen Atmosphäre und Haldenkörper (Boden) erklären lassen.
- Die Messung der Radonkonzentration mit Hilfe von Kernspurdetektoren in geringen Höhen (5 -15 cm) reflektiert das komplexe Exhalationsverhalten einer Halde bzw. einer geogenen Fläche. Im Sommerhalbjahr werden am Haldenfuß, im Winter auf dem Haldenplateau höhere Konzentrationswerte gemessen. Auch über geogenen Flächen werden im Winter höhere Radonkonzentrationswerte festgestellt.
- Konzentrationsmessungen in 1 - 1,5 m Höhe liefern solche Informationen nicht, da aufgrund der vielfältigen Transportprozesse die Radonkonzentration in 1 m Höhe typischerweise zwischen 30 und 300 Bq/m³ schwankt, während sie in 10 cm Höhe Werte von bis zu 50000 Bq/m³ annehmen kann.
- Die flächenhafte Messung der Radonkonzentration in geringen Höhen liefert ein belastbares Abbild der Radonaustrittsgebiete. Insbesondere zeigt ein solches Verteilungsmuster starke Abhängigkeiten von der Haldenschüttung, dem Haldenaufbau und der jahrezeitlichen Variation der Exhalationsrate.
- Der Vorteil der integrierenden Messungen manifestiert sich vor allem darin, daß über viele Einflüsse, wie z.B. Temperaturunterschiede, Wind, Regen, Bewuchs, gemittelt wird.
- Es wurden die Haupteffekte, die bei der Ableitung der Radonexhalationswerte aus den gemessenen Radonkonzentrationen zu berücksichtigen sind, untersucht. Dazu gehören vor allem die optimale Meßhöhe und die Advektion des Windes.

- Ausgehend von dem gegenwärtigen Kenntnisstand ist folgende Herangehensweise zu favorisieren.
 - Messung der Radonkonzentration in geringen Höhen, um das Verteilungsmuster der Radonaustrittsgebiete zu erhalten.
 - Die Unterschiede in den Radonkonzentrationen sind in der Regel durch die unterschiedlichen Exhalationsraten bedingt.
 - Ausgehend von dieser Prämisse genügt es, an wenigen Punkten die Exhalationsrate direkt zu bestimmen, um die an anderen Meßpunkten bestimmten Radonkonzentrationswerte in Exhalationsraten umzurechnen.
 - Nach Akkumulierung empirisch gewonnener Kenntnisse kann auf die zusätzliche Messung der Exhalation weitestgehend verzichtet werden und die Kalibrierung, d.h. Umrechnung der Konzentrationswerte in Exhalationswerte, direkt durchgeführt werden. Nur noch stichpunktartige Messungen der Exhalation sind erforderlich.
 - Von gewissem Vorteil ist auch, einige Kernspurdetektoren mit einem ca. 30 cm hohen Ring zu umgeben, um Informationen über den Einfluß der Windadvektion zu gewinnen. Im Unterschied zu den in der freien Atmosphäre in 10 cm Höhe positionierten Kernspurdetektoren werden diese mit einem ca. 30 cm hohen Ring umgebenen Kernspurdetektoren als Kernspur-Radonflux-Monitor (KRF-Monitor) bezeichnet. Die Bezeichnung erfolgt in Anlehnung an die E-Perm-Monitore, die auf der Basis von Elektreten arbeiten und eine Meßeinrichtung darstellen, die für den Feldeinsatz nur bedingt geeignet ist und die Exhalationsrate einer vergleichsweise geringen Fläche von 180 cm² bestimmt, während die der KRF-Monitore bei 0,4 m² liegt und wegen ihrer Robustheit für Feldeinsätze gut geeignet ist.
- Es ist als das wichtigste Resultat der Untersuchungen zu konstatieren, daß das Verteilungsmuster der Radonkonzentration in geringen Höhen die gewünschte Information über den Gesamtzustand der Exhalation einer Fläche liefert. Die Mitteilung über diese Konzentrationen über die Gesamtfläche oder Teilflächen erlaubt, die entsprechenden mittleren Exhalationsraten zu extrahieren.
- Damit kann eine Klassifizierung von Flächen allein auf der in niedriger Höhe gemessenen Radonkonzentrationen erreicht werden. Die empirisch gewonnenen Ergebnisse liefern dabei den Maßstab.

7.5 Geplante Weiterarbeit

Gegenwärtig wird außerhalb des Programms untersucht, inwieweit die Feuchte (Regen, Tauniederschlag) die Meßergebnisse beeinflussen und welche kommerziell angebotenen Detektoren die für die Feldmessungen zu favorisierenden Eigenschaften besitzen. Die Prototypen von Radonflux-Monitoren (RFM-Monitore) sollten weiterentwickelt und standardisiert werden, um ihre Handhabung in Hinblick auf die Feldeinsätze zu vereinfachen.

8 Quellennachweis

- [1] Förderprojekt des BfS "Methode zur parameterfreien Bestimmung der Radonexhalation und Dimensionierung von Abdeckschichten bei der Sanierung bergbaulicher Altlasten", IAF - Radioökologie GmbH, September 1999 - Oktober 2000; Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU-2002-597
- [2] H. Schulz, L. Funke, A. Schellenberger, Study of Long Term Radon Transport by Measuring the Difference of the 210-Pb and 226-Ra Activity in Soil as a Function of the Depth, Health Physics. Vol. 84, 236, 2003
- [3] H. Schulz, Workshop "Remediation of residues of mining sites", 10. 04.1997, Dresden; organized by the Freistaat Sachsen and the Ministerium für Umwelt und Landesentwicklung; Conference Proceedings; 1997
- [4] Gesammelte Daten zur Radioökologie, IAF - Radioökologie GmbH, Interne Berichte
- [5] H. Schulz, AKURA 1999, Neue Aspekte der Langzeitüberwachung der Radonexhalation von Halden des Uranerzbergbaus
- [6] M. Schubert und H. Schulz, Diurnal radon variations in the upper soil layers and at the soil-air interface related to meteorological parameters, Health Physics, Vol. 83, 91 - 96, 2002
- [7] Bestimmung der Radonexhalation der Halden 382 und 366 und angrenzender Betriebsflächen, erarbeitet durch Bietergemeinschaft B.P.S. Engineering GmbH, C-W-H mbH und IAF - Radioökologie GmbH im Auftrag der Wismut GmbH, 1994
- [8] Bestimmung der Radonexhalation der Halde B, IAF - Radioökologie GmbH Dresden erarbeitet im Auftrag der Stadtverwaltung Dresden, Amt für Umweltschutz, Dezember 2000
- [9] Interne Berichte von IAF - Radioökologie Dresden GmbH zur Höhenabhängigkeit der Radonkonzentration in der Atmosphäre, 1994 - 2001
- [10] C. Dushe und M. Kümmel, Persönliche Mitteilung, Messungen des BfS
- [11] C. Dushe, M. Kümmel, H. Schulz, Investigations of Enhanced Outdoor Radon concentration in Johannegeorgenstadt (Erzgebirge), Health Physics, Vol. 84, 655, 2003
- [12] Interne Berichte von IAF - Radioökologie Dresden GmbH zu Thermoeffusion und Atmosphärisches Pumpen

- [13] L.R. Stieff, P. Kontroppa, J. Bigu, Passive E-Perm Radon Flux Monitors for Measuring Undisturbed Radon Flux from the Ground
- [14] Ökologisches Großprojekt der Stadt Dresden zur Sanierung der ehemaligen Uranfabrik, Endbericht Halde B
- [15] "Bestimmung der Radonexhalation der Halde B", erarbeitet im Auftrag der Stadt Dresden, Amt für Umweltschutz, durch IAF - Radioökologie GmbH Dresden, 29.12. 2000
- [16] Measurement and Calculation of Radon Releases from Uranium Mill Tailings, IAEA-TRS No. 333, Vienna, 1992
- [17] V. C. Rogers, K.K. Nielson, Multiphase Radon Generation and Transport in Porous Materials, Health Phys. 60, 807 - 815, (1991)