



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit

# SCHRIFTENREIHE REAKTORSICHERHEIT UND STRAHLENSCHUTZ

**UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER BIOTURBATION VON  
ABDECKUNG UND KONTAMINIERTEN MATERIALIEN AUF  
RADONDÄMMWIRKUNG MITTELS BLEISPRUMETHODE**

**BMU - 2004-643**



WIR STEUERN UM AUF ERNEUERBARE ENERGIEN.

**BMU – 2004-643**

**„Untersuchung des Einflusses der Bioturbation von  
Abdeckungen und kontaminierten Materialien auf  
Radondämmwirkung mittels Bleispurmethode“**

**IAF Radioökologie GmbH**

Karpartenstraße 20

01326 Dresden

und

**Wismuth GmbH**

Jagdschänkenstraße 29

09117 Chemnitz

Dr.rer.nat.habil. H. Schulz (IAF)

Prof. L. Funke (IAF)

Dipl.-Ingin. Astrid Schellenberger (IAF)

Dr. W. Löbner (Wismut)

B. Leichsenring (Wismut)

J. Regner (Wismut)

## **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, Karpantenstraße 20, 01326 Dresden und der Wismuth GmbH, Jagdschänkenstraße 29, 09117 Chemnitz, erstellt.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der Auftragnehmer 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

ISSN 1612-6386

Erscheinungsjahr: 2004

# IAF - Radioökologie GmbH Dresden

Karpatenstraße 20  
01326 Dresden

Telefon: (0351) 26330-0  
(0351) 26330-12  
Fax: (0351) 26330-22  
E-mail: info@iaf-dresden.de

## Abschlussbericht

**Vorhaben:** StSch4312  
**Untersuchung des Einflusses der Bioturbation von Abdeckungen und kontaminierten Materialien auf die Radondämmwirkung mittels Bleispurmethode**

**Auftraggeber:** Bundesamt für Strahlenschutz  
Postfach 10 01 49  
38201 Salzgitter

**Auftragnehmer:** IAF - Radioökologie GmbH Dresden  
Karpatenstraße 20  
01326 Dresden

**Unterauftragnehmer:** Wismut GmbH  
Jagdschänkenstraße 29  
09117 Chemnitz

**Bearbeiter:** Dr. rer. nat. habil. H. Schulz (IAF),  
Prof. L. Funke (IAF),  
Dipl.-Ing. Astrid Schellenberger (IAF),  
Dr. W. Löbner (Wismut)  
B. Leichsenring (Wismut)  
J. Regner (Wismut)

Dresden, den 15.12.2003

Geschäftsführer:  
Prof. Dr. Lothar Funke

Bankverbindung: HypoVereinsbank Dresden  
BLZ 85020086  
Konto-Nr.: 5360179429

Handelsregister:  
HRB 9185  
Amtsgericht Dresden

---

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Zusammenfassung .....	18
2 Einleitung .....	25
2.1 Problemstellung .....	25
2.2 Strahlenschutzrechtliche Rahmenbedingungen .....	26
2.3 Abdecksysteme für Bergbauobjekte .....	27
2.3.1 Realisierung in der Vergangenheit .....	27
2.3.2 Aktuelle Realisierung .....	27
2.3.3 Aktuelle Problemstellungen .....	29
3 Aufgabenstellung des Vorhabens .....	30
4 Einführung zu Grundbegriffen .....	32
4.1 Bioturbation .....	32
4.2 Radonmigration .....	36
4.3 Radondämmwirkung .....	38
4.4 Bleispurmethode .....	38
5 Gegenwärtiger Wissensstand zum Einfluss der Bioturbation auf Abdecksysteme .....	40
5.1 Kenntnisstand der Wismut GmbH .....	40
5.2 Erkenntnisse aus Vorhaben StSch4215 .....	43
5.3 Ergebnisse weiterer Untersuchungen .....	45
6 Arbeitshypothesen für die Untersuchungsmethodiken .....	48
6.1 Aufschlussarbeiten und begleitende Messungen .....	49
6.1.1 Allgemeine Vorgehensweise .....	49
6.1.2 Eingesetzte experimentelle Verfahren .....	50
6.1.2.1 Bestimmung der Emanationskoeffizienten .....	50
6.1.2.2 Bestimmung der Radonkonzentration in der Bodenluft .....	51
6.1.2.3 Bestimmung der Radonexhalation .....	52
6.1.2.4 Charakterisierung der Bodeneigenschaften .....	54
6.1.2.4.1 Bodenfeuchte .....	54
6.1.2.4.2 Bodentemperatur .....	54
6.1.2.4.3 Lagerungsdichte .....	54
6.1.2.4.4 Gaspermeabilität .....	55
6.1.2.4.4.1 Bestimmung mittels Schlagsonde .....	55
6.1.2.4.4.2 Bestimmung mittels Lanzensonde .....	57
6.1.2.4.4.3 Bestimmung mittels Stechzylinderproben im Labor .....	58
6.1.2.4.5 Saugspannung .....	58
6.1.2.4.6 Körnungsanalyse .....	59

---

6.1.3	Bioturbation.....	59
6.2	Gammaskopmetrische Analyse - Bestimmung der Bleispur.....	60
6.3	Versickerungsversuche mit Tracerflüssigkeit .....	61
6.4	Tracergasversuche .....	63
6.5	Kornfraktionsexperimente .....	64
6.6	Pflanzcontainerexperiment .....	65
7	Umfang der erbrachten Leistungen .....	67
7.1	Aufschlussarbeiten und begleitende Messungen .....	67
7.2	Gammaskopmetrische Analyse und Bestimmung der Bleispur .....	69
7.3	Versickerungsversuche mit Tracerflüssigkeit .....	70
7.4	Tracergasversuche .....	71
7.5	Kornfraktionsexperiment.....	72
7.6	Pflanzcontainerexperiment .....	74
8	Kurzcharakteristik der Untersuchungsobjekte.....	75
9	Untersuchungsergebnisse .....	81
9.1	Diskussion typischer Bleispuren .....	81
9.1.1	Theoretische Vorbetrachtung.....	81
9.1.2	Halde Schacht 72, Schneeberg.....	86
9.1.3	Halde Schacht 19, Annaberg .....	94
9.1.4	Halde Schacht 52 und 227, Johanngeorgenstadt.....	101
9.1.5	Halde Haldenaufbereitung Johanngeorgenstadt .....	108
9.1.6	IAA Lengenfeld .....	113
9.1.7	Nordhalde Lengenfeld.....	120
9.1.8	IAA Dänkritz.....	129
9.1.9	Halde Beerwalde .....	140
9.1.10	Halde Tagebau Ronneburg.....	145
9.1.11	Zusammenfassende Betrachtung aller untersuchten Aufschlüsse .....	150
9.2	Versickerungsversuche mit Tracerflüssigkeit .....	155
9.3	Durchführung von Versuchen mit Tracergas zur Quantifizierung der Konvektionsgeschwindigkeit in Halden und der Gaspermeabilität.....	171
9.3.1	Grundlagen der Beschreibung des Radontransports.....	171
9.3.2	Ergebnisse des Versuchs mit Tracergas an Halde 124 in Johanngeorgenstadt .....	188
9.3.3	Tracergasversuch zur Bestimmung der Gaspermeabilität größerer Bereiche .....	196
9.3.3.1	Zielstellung der Tracergasversuche.....	196
9.3.3.2	Ausgangsinformationen.....	197

---

9.3.3.3	Versuchsanordnung .....	198
9.3.3.4	Ergebnisse der Tracergasversuche .....	199
9.3.3.4.1	Versuchsablauf am Messort I (02.07.03).....	199
9.3.3.4.2	Versuchsablauf am Messort II (03.07.03).....	203
9.3.4	Schlußfolgerung aus den Tracergasversuchen .....	207
9.4	Untersuchung von Kornfraktionen aus ausgewählten Schürfen .....	214
9.4.1	Vorbemerkung .....	214
9.4.2	Auswertung der Kornfraktionen.....	215
9.4.2.1	Zentralschachthalde Johanngeorgenstadt.....	218
9.4.2.2	Halde am Schindlerschacht Schneeberg.....	223
9.4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Kornfraktionsuntersuchungen .....	227
9.5	Pflanzcontainerexperiment .....	229
10	Modellierung der Radonmigration anhand ausgewählter Schürfe .....	236
10.1	Theoretische Grundlagen der Bleispurmethode.....	236
10.1.1	Zeitliche Entwicklung der Pb-210-Aktivität im Porenraum .....	236
10.1.2	Einführung des Begriffs "Bleispur" .....	240
10.1.3	Diskussion einfacher Fallbeispiele .....	242
10.2	Ergebnisse für ausgewählte Schürfe .....	249
10.2.1	Vorbemerkung zur Radonfreisetzung aus Halden.....	249
10.2.2	Einführung zum Modell .....	252
10.2.3	Auswertung einzelner Schürfe .....	255
10.2.3.1	Schurf 1, Plateau der Halde am Schindlerschacht (Schneeberg) .....	255
10.2.3.2	Schurf 20, IAA Lengfeld.....	258
10.2.3.3	Schurf 24, Nordhalde Lengenfeld .....	260
10.2.3.4	Schurf 27, IAA Dänkriz .....	262
10.2.3.5	Zusammenfassung der Modellierungsergebnisse.....	264
11	Radondämmwirkung und Bioturbation .....	265
12	Empfehlung für die Dimensionierung von Abdeckungen.....	274
13	Empfehlungen für Bewertungsmethoden.....	278

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Abbildung 1: Wasserhaushalt in einem Laubwald und auf Ackerland /18/ .....	35
Abbildung 2: Abhängigkeit der Radonexhalationsrate von der Lufttemperatur im Zeitraum von 10 Tagen. Der Messrhythmus betrug 4 Stunden (Die gestrichelten senkrechten Linien entsprechen immer 12 Uhr mittags. Der Messpunkt befindet sich auf dem Betriebsgelände von IAF - Radioökologie GmbH) /10/ .....	37
Abbildung 3: Schematische Darstellung des Diffusions- und Umwälzmessverfahrens .....	53
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Herangehensweise für die Messung der Permeabilität des Bodens und der Radonkonzentration in der Bodenluft mit Hilfe einer speziellen Schlagsonde.....	55
Abbildung 5: Bodenpermeabilität als Funktion der Saugzeit /32/ .....	56
Abbildung 6: Maximal mögliche und tatsächliche Bleispur im Aufschluss Sch2 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	83
Abbildung 7: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch1/Sch1a in Abhängigkeit von der Tiefe.....	87
Abbildung 8: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch5 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	87
Abbildung 9: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch1/Sch1a in Abhängigkeit von der Tiefe.....	89
Abbildung 10: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch5 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	89
Abbildung 11: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch2 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	90
Abbildung 12: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch3 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	90
Abbildung 13: Messwerte der Radonkonzentration und zu erwartender Referenzwert $\bar{C}_{Rn}$ in der Bodenluft der Halde im Aufschluss Sch1/Sch1a (Haldenplateau) in Abhängigkeit von der Tiefe, Messung morgens, die ebenfalls morgens gemessene Radonexhalationsrate beträgt 2,1 Bq/m <sup>2</sup> s und liegt damit deutlich (etwa Faktor 30) oberhalb des Referenzwertes für den diffusiven Radontransport $\bar{J}$ von 0,06 Bq/m <sup>2</sup> s.....	91
Abbildung 14: Messwerte der Radonkonzentration und zu erwartender Referenzwert $\bar{C}_{Rn}$ in der Bodenluft der Halde im Aufschluss Sch3 (Haldenfuß) in Abhängigkeit von der Tiefe, die gemessene Radonexhalationsrate beträgt 1,1 Bq/m <sup>2</sup> s (sowohl bei 8°C als auch bei 17°C) und liegt damit oberhalb des Referenzwertes für den diffusiven Radontransport $\bar{J}$ .....	92
Abbildung 15: Emanationskoeffizient und Wurzelzahl im Aufschluss Sch1/Sch1a in Abhängigkeit von der Tiefe .....	93

Abbildung 16:	Emanationskoeffizient und Wurzelzahl im Aufschluss Sch5 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	93
Abbildung 17:	Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch6 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	95
Abbildung 18:	Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch7 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	96
Abbildung 19:	Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch8 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	96
Abbildung 20:	Bleispur im Aufschluss Sch6 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	97
Abbildung 21:	Bleispur im Aufschluss Sch7 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	98
Abbildung 22:	Bleispur im Aufschluss Sch8 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	98
Abbildung 23:	Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde und Referenzwert $\bar{C}_{Rn}$ im Bereich des Aufschlusses Sch6 (Oberhang, Messung morgens) in Abhängigkeit von der Tiefe, die parallel dazu gemessene Radonexhalationsrate beträgt 0,01 Bq/m <sup>2</sup> s und entspricht dem Referenzwert für diffusiven Radontransport $\bar{J}$ von 0,015 Bq/m <sup>2</sup> s. ....	99
Abbildung 24:	Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde und Referenzwert $\bar{C}_{Rn}$ im Bereich des Aufschlusses Sch7 (Mittelhang, Lufttemperatur 13°C) in Abhängigkeit von der Tiefe, die parallel dazu gemessene Radonexhalationsrate beträgt 0,03 Bq/m <sup>2</sup> s und entspricht in etwa dem Referenzwert für diffusiven Radontransport $\bar{J}$ von 0,015 Bq/m <sup>2</sup> s. ....	100
Abbildung 25:	Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde und Referenzwert $\bar{C}_{Rn}$ im Bereich des Aufschlusses Sch8 (Haldenfuß, mittags bei 13°C) in Abhängigkeit von der Tiefe, die parallel dazu gemessene Radonexhalationsrate beträgt 0,05 Bq/m <sup>2</sup> s.....	100
Abbildung 26:	Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch12 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	102
Abbildung 27:	Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch13 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	102
Abbildung 28:	Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch14 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	103
Abbildung 29:	Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch12 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	104
Abbildung 30:	Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch14 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	104
Abbildung 31:	Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch15 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	105
Abbildung 32:	Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde und Referenzwert $\bar{C}_{Rn}$ im Bereich des Aufschlusses Sch13 (Haldenplateau) in Abhängigkeit von der Tiefe, die am selben Standort gemessene	

	Radonexhalationsrate betrug im Sommer bei 14°C Lufttemperatur 0,03 Bq/m <sup>2</sup> s und im Winter bei 0°C Lufttemperatur 0,21 Bq/m <sup>2</sup> s - die Messwerte zeigen deutlich das für Haldenplateaus typische Wechselspiel von Radonexhalation und Lufttemperatur/Tages-, Jahreszeit. ....	106
Abbildung 33:	Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde und Referenzwert $\bar{C}_{Rn}$ im Bereich des Aufschlusses Sch14 (Haldenplateau) in Abhängigkeit von der Tiefe, die am selben Standort gemessene Radonexhalationsrate betrug im Sommer bei 15°C Lufttemperatur 0,04 Bq/m <sup>2</sup> s. ....	107
Abbildung 34:	Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch16 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	108
Abbildung 35:	Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch17 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	109
Abbildung 36:	Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch16 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	110
Abbildung 37:	Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch17 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	110
Abbildung 38:	Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft und Referenzwert $\bar{C}_{Rn}$ im Bereich des Aufschlusses Sch 16 (Haldenfuß), die parallel dazu ermittelte Radonexhalationsrate betrug 1,4 Bq/m <sup>2</sup> s und liegt damit deutlich oberhalb des Referenzwertes für diffusiven Radontransport $\bar{J}$ .....	111
Abbildung 39:	Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft und Referenzwert $\bar{C}_{Rn}$ im Bereich des Aufschlusses Sch 17 (Haldenfuß), die parallel dazu ermittelte Radonexhalationsrate betrug 2,7 Bq/m <sup>2</sup> s und liegt damit deutlich oberhalb des Referenzwertes für diffusiven Radontransport $\bar{J}$ .....	112
Abbildung 40:	Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Abdeckmaterial des Aufschlusses Sch20 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	113
Abbildung 41:	Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 in den Tailings des Aufschlusses Sch20 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	114
Abbildung 42:	Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 in den Tailings des Aufschlusses Sch21 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	114
Abbildung 43:	Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Abdeckmaterial des Aufschlusses Sch20 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	115
Abbildung 44:	Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur in den Tailings des Aufschlusses Sch20 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	116
Abbildung 45:	Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Abdeckmaterial des Aufschlusses Sch21 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	116
Abbildung 46:	Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur in den Tailings des Aufschlusses Sch21 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	117

Abbildung 47: Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft und Referenzwert $\bar{C}_{Rn}$ in der Ablagerung im Bereich des Aufschlusses Sch21 in Abhängigkeit von der Tiefe, die parallel dazu gemessene Radonexhalationsrate betrug 2 Bq/m <sup>2</sup> s (19°C Lufttemperatur) und wurde zu einem späteren Zeitpunkt zu 1,2 Bq/m <sup>2</sup> s (14°C Lufttemperatur) bestimmt, sie liegt damit deutlich oberhalb des Referenzwertes für diffusiven Radontransport $\bar{J}$ .....	118
Abbildung 48: Gaspermeabilität im Bereich des Aufschlusses Sch21 in Abhängigkeit von der Tiefe.....	119
Abbildung 49: Messwerte der Lagerungsdichte im Aufschluss Sch20 in Abhängigkeit von der Tiefe.....	119
Abbildung 50: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 in der Abdeckung des Aufschlusses Sch23 in Abhängigkeit von der Tiefe.....	121
Abbildung 51: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 in der Abdeckung des Aufschlusses Sch24 in Abhängigkeit von der Tiefe.....	121
Abbildung 52: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch23 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	122
Abbildung 53: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch24 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	122
Abbildung 54: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch22 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	123
Abbildung 55: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch23 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	124
Abbildung 56: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch24 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	124
Abbildung 57: Bleispur in der Abdeckung des Aufschlusses Sch23 in Abhängigkeit von der Tiefe.....	125
Abbildung 58: Bleispur in der Abdeckung des Aufschlusses Sch24 in Abhängigkeit von der Tiefe.....	125
Abbildung 59: Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde im Bereich des Aufschlusses Sch22 (Haldenplateau) und Referenzwert $\bar{C}_{Rn}$ in Abhängigkeit von der Tiefe, die an zwei Sommertagen am gleichen Standort ermittelte Radonexhalationsrate betrug 5,5 Bq/m <sup>2</sup> s (25 °C Lufttemperatur, vergleichsweise geringe Bodenfeuchte) bzw. 2 Bq/m <sup>2</sup> s (14°C Lufttemperatur, vergleichsweise hohe Bodenfeuchte) und liegt damit oberhalb des Referenzwertes $\bar{J}$ .....	126
Abbildung 60: Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde im Bereich des Aufschlusses Sch23 (Haldenplateau) und Referenzwert $\bar{C}_{Rn}$ in Abhängigkeit von der Tiefe, die an zwei Sommertagen am gleichen Standort ermittelte Radonexhalationsrate betrug 3,1 Bq/m <sup>2</sup> s (20 °C Lufttemperatur) bzw. 1,5 Bq/m <sup>2</sup> s (14°C Lufttemperatur, erhöhte Bodenfeuchte) und liegt damit oberhalb des Referenzwertes $\bar{J}$ .....	127

Abbildung 61:	Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde im Bereich des Aufschlusses Sch24 (Haldenplateau) und Referenzwert $\bar{C}_{Rn}$ in Abhängigkeit von der Tiefe, die an zwei Sommertagen am gleichen Standort ermittelte Radonexhalationsrate betrug 0,51 Bq/m <sup>2</sup> s (23 °C Lufttemperatur) bzw. 2,5 Bq/m <sup>2</sup> s (14 °C Lufttemperatur) und liegt damit oberhalb des Referenzwertes $\bar{J}$ .	127
Abbildung 62:	Fließmuster der Tracerflüssigkeit im zu den Aufschlüssen Sch23 und Sch24 benachbarten Aufschluss V9	128
Abbildung 63:	Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Abdeckmaterial des Aufschlusses Sch26 in Abhängigkeit von der Tiefe	130
Abbildung 64:	Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Abdeckmaterial des Aufschlusses Sch27 in Abhängigkeit von der Tiefe	130
Abbildung 65:	Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch26 in Abhängigkeit von der Tiefe	131
Abbildung 66:	Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch27 in Abhängigkeit von der Tiefe	131
Abbildung 67:	Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch26 in Abhängigkeit von der Tiefe	132
Abbildung 68:	Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch28 in Abhängigkeit von der Tiefe	133
Abbildung 69:	Bleispur im Abdeckmaterial des Aufschlusses Sch26 in Abhängigkeit von der Tiefe	134
Abbildung 70:	Bleispur im Abdeckmaterial des Aufschlusses Sch27 in Abhängigkeit von der Tiefe	134
Abbildung 71:	Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft des Abdeckmaterials im Bereich des Aufschlusses Sch25 und Referenzwert $\bar{C}_{Rn}$ in Abhängigkeit von der Tiefe, der Vergleich der Messwerte mit dem Referenzwert zeigt, dass eine starke Nachlieferung von Radon aus tieferen Schichten zu verzeichnen ist.	135
Abbildung 72:	Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft des Abdeckmaterials im Bereich des Aufschlusses Sch26 und Referenzwert $\bar{C}_{Rn}$ in Abhängigkeit von der Tiefe, der Vergleich der Messwerte mit dem Referenzwert zeigt, dass eine starke Nachlieferung von Radon aus tieferen Schichten zu verzeichnen ist	136
Abbildung 73:	Exhalationsrate und Lufttemperatur in den Aufschlüssen des Dammbereiches der IAA Dänkriz	137
Abbildung 74:	Fließbild der Tracerflüssigkeit des Versickerungsversuches V2 in der Nachbarschaft zu den Aufschlüssen Sch25 - Sch28	138
Abbildung 75:	Emanationskoeffizient und Wurzelzahl im Aufschluss Sch26 in Abhängigkeit von der Tiefe, der Emanationskoeffizient ist im vergleichsweise stark durchwurzelten Bereich bis in 0,8 m Tiefe vergleichsweise konstant und beträgt im Mittel 0,35, in den obersten	

	0,20 m der Tailings sinkt der Emanationskoeffizient auf Werte von ca. 0,2 - hier ist auch eine deutliche Abnahme der Durchwurzelung zu verzeichnen. ....	139
Abbildung 76:	Emanationskoeffizient und Wurzelzahl im Aufschluss Sch27 in Abhängigkeit von der Tiefe, der Emanationskoeffizient der Abdeckschicht beträgt im Mittel 0,35 zeigt jedoch in den obersten Schichten eine mit sinkender Durchwurzelungsintensität abnehmende Tendenz.....	139
Abbildung 77:	Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Abdeckmaterial des Aufschlusses Sch29 in Abhängigkeit von der Tiefe.....	140
Abbildung 78:	Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Abdeckmaterial des Aufschlusses Sch30 in Abhängigkeit von der Tiefe.....	141
Abbildung 79:	Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch29 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	141
Abbildung 80:	Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch30 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	142
Abbildung 81:	Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch29 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	142
Abbildung 82:	Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch30 in Abhängigkeit von der Tiefe. ....	143
Abbildung 83:	Messwerte der Radonkonzentration in der Halde im Bereich des Aufschlusses Sch30 und Referenzwert $\bar{C}_{Rn}$ in Abhängigkeit von der Tiefe .....	144
Abbildung 84:	Schrumpfrisse im Aufschluss Sch29 .....	145
Abbildung 85:	Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch31 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	146
Abbildung 86:	Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch32 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	146
Abbildung 87:	Bleispur im Aufschluss Sch31 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	147
Abbildung 88:	Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch32 in Abhängigkeit von der Tiefe .....	148
Abbildung 89:	Radonkonzentration in der Bodenluft im Bereich des Aufschlusses Sch31 in Abhängigkeit von der Tiefe.....	149
Abbildung 90:	Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde im Bereich des Aufschlusses Sch32 in Abhängigkeit von der Tiefe.....	149
Abbildung 91:	Aufschluss V2/A3 auf der IAA Dänkriz, deutlich erkennbare präferentielle Fließwege, maximaler Sickerweg in 24 h > 1 m.....	155
Abbildung 92:	Aufschluss V1 auf der Wiese in Rochwitz, deutlich erkennbare präferentielle Fließwege, maximaler Sickerweg in 2,5 h ca. 0,5 m .....	156
Abbildung 93:	Aufschluss V5/A3 auf dem Collmberg, deutlich erkennbare präferentielle Fließwege, maximaler Sickerweg in 22 h ca. 1 m.....	156

---

Abbildung 94:	Aufschluss V2/A1 auf der IAA Dänkritz, deutlich erkennbare Färbung des Abdeckmaterials durch Tracerflüssigkeit im Bereich von Wurzeln.....	157
Abbildung 95:	Aufschluss V2/A2 auf der IAA Dänkritz, deutlich erkennbare Färbung des Abdeckmaterials durch Tracerflüssigkeit im Bereich von Wurzeln, die Tracerflüssigkeit ist entlang von Wurzeln innerhalb von 24 h durch das Abdeckmaterial (ca. 1 m mächtig) bis in die Tailings versickert.....	157
Abbildung 96:	Aufschluss V2/A4 auf der IAA Dänkritz, deutlich erkennbare präferentielle Sickerwege in der Abdeckung, maximaler Sickerweg > 1 m .....	158
Abbildung 97:	Detailansicht aus Aufschluss V2/A4 auf der IAA Dänkritz, deutlich erkennbare Färbung des Abdeckmaterials durch Tracerflüssigkeit im Bereich von Wurzeln, die Tracerflüssigkeit ist entlang von Wurzeln innerhalb von 24 h durch das Abdeckmaterial (ca. 1 m mächtig) bis in die Tailings versickert. ....	158
Abbildung 98:	Detailansicht aus Aufschluss V4/A3 auf dem Collmberg, deutlich erkennbare Färbung des Abdeckmaterials durch Tracerflüssigkeit im Bereich von Wurzeln.....	159
Abbildung 99:	Detailansicht aus Aufschluss V5/A2 auf dem Collmberg, Färbung des Bodens mit Tracerflüssigkeit im Bereich von Regenwurmgingen in ca. 0,5 m Tiefe.....	159
Abbildung 100:	Aufschluss V6/A4 auf der Halde B, Färbung des Bodens mit Tracerflüssigkeit im Bereich von Einlagerungen von Steinen in das Abdeckmaterial, es zeigt sich deutlich, dass die Tracerflüssigkeit entlang der Grenzflächen Stein/feinkörniges Abdeckmaterial versickert ist	160
Abbildung 101:	Aufschluss V6/A2 auf der Halde B, gleichmäßige Versickerung bis in 0,05 m Tiefe, vereinzelt bis in max. 0,15 m Tiefe entlang von Kleewurzeln und Einlagerungen von Steinen, Sickerzeit 24 h.....	161
Abbildung 102:	Aufschluss V7/A2 auf der Halde B, gleichmäßige Versickerung bis in 0,05 m Tiefe, vereinzelt bis in max. 0,20 m Tiefe vor allem entlang von Wurzeln, Sickerzeit 26 h .....	161
Abbildung 103:	Aufschluss V2/A2 auf der IAA Dänkritz, deutlich erkennbare präferentielle Sickerwege in der Abdeckung, max. Sickerweg > 1 m, Sickerzeit 24 h .....	162
Abbildung 104:	Aufschluss V9/A2 auf der Nordhalde Lengenfeld, maximaler Sickerweg ca. 0,7 m, Sickerzeit 27 h, vergleichsweise gleichmäßige Versickerung der Tracerflüssigkeit im stark durchwurzelten Bereich der Abdeckung und entlang von Wurzeln bis in das Tailingsmaterial.....	162
Abbildung 105:	Aufschluss V11/A1 auf dem Collmberg, deutlich erkennbare präferentielle Sickerwege in der Abdeckung, max. Sickerweg > 0,8 m, Sickerzeit 26 h .....	163
Abbildung 106:	Aufschluss V10/A1 auf dem Collmberg, maximale Versickerungstiefe der Tracerflüssigkeit 0,40 m, deutlich erkennbar ist das vergleichsweise einheitliche Vordringen der Versickerungsfront und ihr Ende im Bereich	

des Schichtwechsels zwischen locker gelagerten Abdeckschichten und dicht gelagerter Abdeckschicht (Feinsand) .....	164
Abbildung 107: Detailansicht des Aufschlusses V10/A2 auf dem Collmberg, Färbung des dicht gelagerten Abdeckmaterials in ca. 0,45 m Tiefe im Wurzelbereich.....	164
Abbildung 108: Detailansicht des Aufschlusses V11/A3 auf dem Collmberg, deutlich erkennbar die Grenze der Sickerfront der Tracerflüssigkeit am Schichtwechsel zwischen vergleichsweise locker und vergleichsweise dicht gelagerten Schichten.....	165
Abbildung 109: Detailansicht des Aufschlusses V11/A3 auf dem Collmberg, deutlich erkennbare Färbung des dicht gelagerten Abdeckmaterials nur im Wurzelbereich.....	165
Abbildung 110: Draufsicht auf die Versickerungsfläche mit freigelegtem Aufschluss V8/A1 auf der Nordhalde, am gegenüberliegenden Stoß wurde außerhalb der ursprünglichen Versickerungsfläche eine Färbung des Bodens durch Tracerflüssigkeit im Bereich einer Starkwurzel erkundet .....	166
Abbildung 111: Detailansicht gemäß Abbildung 110, erkundete Färbung des Bodens durch Tracerflüssigkeit im Bereich einer Starkwurzel außerhalb der Versickerungsfläche.....	166
Abbildung 112: Aufschlusses V8/A4 auf der Nordhalde, maximale Versickerungstiefe der Tracerflüssigkeit 0,70 m, vor allem im stärker durchwurzeltten Bereich bis 0,20 m Tiefe eine vergleichsweise gleichmäßige Versickerung der Tracerflüssigkeit erkennbar, in 0,40 m Tiefe Erkundung einer vergleichsweise locker gelagerten mittelsandigen Schicht in der sich die Tracerflüssigkeit horizontal verteilt hat.....	167
Abbildung 113: Schematische Darstellung einer Halde mit einer Stromlinie .....	171
Abbildung 114: Exhalationsrate J als Funktion der Konvektionsgeschwindigkeit $v'=v/n$ bei vorgegebener Diffusionskonstante $D'$ . Die asymptotische Radonkonzentration in der Bodenluft beträgt $50 \text{ kBq/m}^3$ , die Porosität ist $n=0,3$ .....	175
Abbildung 115: Radonkonzentrationsprofile in einer Bodenschicht unendlicher Mächtigkeit für verschiedene Konvektionsgeschwindigkeiten $v'$ . Der Übergang zur Atmosphäre ist bei der Tiefe 0. Die gewählte Diffusionskonstante ist $D' = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Die asymptotische Radonkonzentration in der Bodenschicht beträgt $50 \text{ kBq/m}^3$ , die Porosität ist $n=0,3$ .....	176
Abbildung 116: Exhalationsraten in Abhängigkeit von der Konvektionsgeschwindigkeit und ihrer Richtung. Die anderen Parameter in den Gleichungen (19) bzw. (22) sind beispielhaft $D'=5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , $n=0,3$ und $C_0=50 \text{ kBq/m}^3$ gewählt. ....	177
Abbildung 117: Schematische Darstellung einer 1-dimensionalen Halde mit unterschiedlichen Randbedingungen .....	179
Abbildung 118: Radonkonzentrationsprofile einer Halde für unterschiedliche Randbedingungen bei ausschließlich diffusivem Radontransport. (Höhe $H = 25 \text{ m}$ , Porosität $n = 0,3$ , mittlere Diffusionslänge des	

Haldenmaterials 1 m, Radonkonzentration in der Bodenluft, $C_0 = Q_0/\lambda = 100 \text{ kBq/m}^3$ .....	180
Abbildung 119: Exhalationsrate $J(z)$ einer Halde für unterschiedliche Randbedingungen. Die Konvektionsgeschwindigkeit beträgt am Haldenfuß $v' = 10^{-5} \text{ m/s}$ , .....	181
Abbildung 120: Radonkonzentrationsprofile in einer Halde für unterschiedliche Randbedingungen. Die Konvektionsgeschwindigkeit ist $v' = 1E-5 \text{ m/s}$ (am Haldenfuß einströmend). .....	182
Abbildung 121: Radonkonzentrationsprofile einer Halde für unterschiedliche Randbedingungen. Die Außenluft dringt in die Halde am Plateau ein, entsprechend einer Konvektionsgeschwindigkeit von $v' = -10^{-5} \text{ m/s}$ , .....	183
Abbildung 122: Radonkonzentrationsprofile in einer Halde für unterschiedliche Randbedingungen. Die Konvektionsgeschwindigkeit ist $v' = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ (unten einströmend).....	184
Abbildung 123: Exhalationsrate $J(z)$ einer Halde für unterschiedliche Randbedingungen. Die Konvektionsgeschwindigkeit ist $v' = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ (unten einströmend).....	184
Abbildung 124: Exhalationsrate $J(z)$ und $J_0(z)$ einer Halde für unterschiedliche Konvektionsgeschwindigkeiten $v'$ (Am Haldenfuß einströmend).....	186
Abbildung 125: Tracergasausbreitung von der Injektionsstelle am Haldenfuß bis zur Messstelle am Haldenplateau der Halde 124.....	189
Abbildung 126: Zeitliche Entwicklung der Radonkonzentration in der Halde gemäß (31) mit $C_A=0$ . Die entsprechenden asymptotischen Werte ergeben sich aus Gl. (32).....	193
Abbildung 127: Zeitabhängige Entwicklung der Radonkonzentration bei unterschiedlichen Konvektionsgeschwindigkeiten (Ventilationsverhältnissen).....	195
Abbildung 128: Schematische Darstellung des Tracergasversuchs.....	199
Abbildung 129: Tracergasausbreitung von der Injektionsstelle bis zur Messstelle in den Tailings in 0,5 m Abstand.....	200
Abbildung 130: Tracergasausbreitung bis zur Messstelle 2 in 0,75 m Tiefe in der Abdeckung.....	201
Abbildung 131: Tracergasausbreitung bis zur Messstelle 3 in der Abdeckung in 0,5 m Tiefe .....	202
Abbildung 132: Zeitabhängigkeit der Tracergaskonzentration in der Box auf der Abdeckung.....	203
Abbildung 133: Zeitliche Veränderung der Tracergaskonzentration an den verschiedenen Messstellen nach der Tracergasaufgabe .....	205
Abbildung 134: Zeitabhängigkeit der Rn-Konzentration bei einer Rn-Exhalationsmessung mittels Boxmethode vor und nach Anlegen eines Unterdruckes .....	207

---

Abbildung 135: Kritische Konvektionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Haldenhöhe .....	208
Abbildung 136: Thermogramm von Radonaustrittsstellen der radonhaltigen Luft am Haldenfuß der Zentralschachthalde in Johanngeorgenstadt. ....	211
Abbildung 137: Thermogramm von Radonaustrittsstellen der radonhaltigen Luft am Haldenfuß der Halde 124 in Johanngeorgenstadt. ....	212
Abbildung 138: Thermogramm von einer sehr lokalen Radonaustrittsstelle der radonhaltigen Luft am Haldenfuß der Halde 124 in Johanngeorgenstadt. ....	213
Abbildung 139: Ergebnisse der Siebkornanalyse für die Proben aus den Schürfen 14_6 (obere 4 Abbildungen) und 14_7 (untere 4 Abbildungen) vom Haldenplateau der Zentralschachthalde Johanngeorgenstadt.....	219
Abbildung 140: Wie Abbildung 139, jedoch für den Schurf 15-6 .....	220
Abbildung 141: Ergebnisse der Siebkornanalyse für die Proben aus den Schürfen 3_6 (obere 4 Abbildungen) und 2_5 (untere 4 Abbildungen) vom Haldenfuß und Mittelhang der Halde am Schindlerschacht in Schneeberg .....	224
Abbildung 142: Wie Abbildung 141, jedoch für das Haldenplateau. Obere 4 Abbildungen für die Probe 1_7 untere für die Probe 1_6.....	225
Abbildung 143: Wurzeln aus C8 .....	230
Abbildung 144: Wurzeln aus C10 .....	230
Abbildung 145: Anstieg der Radonkonzentration $c(t)$ während der Exhalationsmessung am Kübel C2 im März 2002.....	231
Abbildung 146: Je Pflanzcontainer gemessene Exhalationsraten in $Bq/(m^2 s)$ .....	231
Abbildung 147: Exhalationsraten der Pflanzcontainer mit Sonnenblumen - gutes Pflanzenwachstum.....	232
Abbildung 148: Monatliche Mittelwerte der Exhalationsraten aller Pflanzcontainer gleicher Bepflanzung .....	233
Abbildung 149: Relative Änderung der Bodenfeuchte in den Pflanzcontainern.....	234
Abbildung 150: Zeitliche Entwicklung der Pb-210-Aktivität im Porenraum .....	239
Abbildung 151: Spezifische Aktivität der Bleispur Pb(z) in Abhängigkeit von der Tiefe für ein ideales Modellsystem einer 10 m mächtigen Tailingschicht mit einer 1 m mächtigen Abdeckung. Die Bleispuren sind für unterschiedliche Zeiträume nach der Aufbringung der Abdeckung berechnet worden. ....	243
Abbildung 152: Wie Abbildung 151, jedoch für eine um den Faktor 10 größere Diffusionskonstante für die Abdeckschicht. ....	244
Abbildung 153: Summe der spezifischen Aktivität der Bleispur, $A_{Pb-210} - A_{Ra-226}$ , ober- und unterhalb der Trennlinie zwischen Abdeckung und den Tailings (IAA Dänkriz). Die Mittelungsbreiten betragen 10 cm und 15 cm. ....	245
Abbildung 154: Summe der spezifischen Aktivität der Bleispur, $A_{Pb-210} - A_{Ra-226}$ , ober- und unterhalb der Trennlinie zwischen einer 2 m, 1 m und 0,5 m mächtigen Abdeckung und den Tailings in Abhängigkeit von der	

---

Diffusionskonstante der Abdeckschicht. Die Mittelungsbreite beträgt jeweils 10 cm.....	247
Abbildung 155: Schematische Darstellung der auf der Halde auftretenden charakteristischen Exhalationsmuster.....	250
Abbildung 156: Skizzierung der Schichtenfolge eines Aufschlusses. Die Summe der Mächtigkeiten der einzelnen Schichten ist $\Delta z_1 + \Delta z_2 + \Delta z_3 + \dots \Delta z_N = H_N$ . ...	252
Abbildung 157: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 (oberes Bild) sowie Bleispur und maximal mögliche negative Bleispur -E·A(Ra-226) (unteres Bild) als Funktion der Tiefe .....	255
Abbildung 158: Experimentell gemessene Bleispur ist mit den Ergebnissen unterschiedlicher Modellannahmen für die Diffusionskonstante und die Konvektionsgeschwindigkeit verglichen. ....	257
Abbildung 159: Berechnete und experimentelle Bleispur für den Aufschluss Sch20 in Abhängigkeit von der Tiefe (oberes Bild für den gesamten Schurf, unteres Bild nur für den Bereich der Abdeckung).....	259
Abbildung 160: Berechnete und experimentelle Bleispur für den Aufschluss Sch24 in Abhängigkeit von der Tiefe (oberes Bild für den gesamten Schurf, unteres Bild nur für den Bereich der Abdeckung).....	261
Abbildung 161: Berechnete und experimentelle Bleispur für den Aufschluss Sch27 in Abhängigkeit von der Tiefe (oberes Bild für den gesamten Schurf, unteres Bild nur für den Bereich der Abdeckung).....	263

## Tabellenverzeichnis

Seite

Tabelle 1: Übersicht über die durchgeführten Feldarbeiten .....	68
Tabelle 2: Übersicht über die Versickerungsversuche .....	70
Tabelle 3: Übersicht über die entnommenen Proben für Kornfraktionen .....	73
Tabelle 4: Charakteristik der Untersuchungsobjekte.....	77
Tabelle 5: Überblick über die durchgeführten Aufschlüsse .....	151
Tabelle 6: Sickerwege und -geschwindigkeiten der einzelnen Versickerungsversuche .....	168
Tabelle 7: Wurzelfeuchtmasse, -volumen und -dichte je Pflanzcontainer .....	229

## Anlagenverzeichnis

Anlage 1:	Lage der Aufschlüsse
Anlage 2:	Charakteristik der Aufschlüsse/Untersuchungsergebnisse
Anlage 3:	Schichtenverzeichnisse der Aufschlüsse

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.

## 1 Zusammenfassung

Im Zusammenhang mit der Sanierung bergbaulicher Hinterlassenschaften wie Halden und Absetzanlagen ist die Auswahl und Dimensionierung des Abdecksystems zur Reduzierung möglicher Strahlenexpositionen der allgemeinen Bevölkerung auf ein akzeptables Niveau eine bedeutsame Aufgabe, die signifikante Konsequenzen für die Langzeitwirksamkeit und Nachhaltigkeit der Sanierungslösung nach sich zieht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Abdecksysteme für bergbauliche Objekte mit erhöhter Umweltradioaktivität vielfältige Funktionalitäten (Strahlenschutz, Wasserhaushalt, Erosionsschutz, Standsicherheit, Begrünbarkeit, Nachnutzung) über lange Zeiträume erfüllen müssen. Zur Erzielung einer erforderlichen Akzeptanz der Sanierungslösung müssen sich die sanierten Objekte in die beabsichtigte regionale Entwicklung und in das vorherrschende Landschaftsbild einpassen.

Aus der Sicht des Strahlenschutzes ist die Wirksamkeit von Abdecksystemen für Objekte, die eine erhöhte Strahlenexposition infolge der Freisetzung von Radon/Radonzerfallsprodukten hervorrufen, insbesondere auch daran zu messen, wie die Radonfreisetzung ausreichend und langfristig reduziert wird. Relativ hohe Radonexhalationen sind vorrangig auf konvektive Transportprozesse im Inneren des Objektes zurückzuführen.

Bisher bestehen noch große Unsicherheiten und ein erheblicher Datenmangel zur Charakterisierung der Wechselwirkung von Bioturbation und Radon-Dämmwirkung. Das durchgeführte Forschungsvorhaben hatte zum Ziel, mit neuartigen experimentellen Methoden existierende Altdeckungen auf Bergbauobjekten wie Halden und Absetzanlagen zu untersuchen. Damit soll ein Beitrag zur Verbesserung des Systemverständnisses und zur Quantifizierung verschiedener Einflüsse auf das Radon-Dämmverhalten und seines Langzeitverhaltens geleistet werden.

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Untersuchungen zum Einfluß der Bioturbation auf die Radondämmeigenschaften von Abdecksystemen erforderten ein hohes Maß an interdisziplinärem Denken. Die auf dem Gebiet der Bodenkunde und Forstwissenschaften gesammelten grundlegenden Erkenntnisse waren bei der Anwendung spezieller physikalisch angelegter Untersuchungen (Bleispurmethode) zur

Radonmigration in porösen bzw. heterogenen Stoffen angemessen zu berücksichtigen.

Die Vegetationsschicht und die sich etablierende Fauna sind funktionaler Bestandteil eines mineralischen Abdecksystems, die grundsätzlich nicht zu vermeiden sind und den langfristigen Zustand in seinen Veränderungen wesentlich prägen.

Es wurden komplexe Untersuchungen an Halden und Absetzanlagen durchgeführt, die über eine Altdeckung verfügen und bei den sich Flora und Fauna voll etabliert haben. Im Mittelpunkt stand dabei die Anwendung der Bleispurmethode. Ergänzende Untersuchungen zur Erfassung des konvektiven Transportverhaltens der Bodenluft im Bioturbationsbereich (insbesondere im Wurzelbereich der Bäume) mit verschiedenen Tracertechnologien (Tracergas und Tracerflüssigkeit) haben sich dabei als zweckdienlich erwiesen und weitere Einsicht in den komplexen Radonfreisetzungsmechanismus geliefert.

Die teils unter dem Aspekt der Sanierung der Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaus ein Novum darstellenden experimentellen Untersuchungen an bereits seit mehreren Jahren existierenden Altdeckungen haben ergeben, dass im Optimierungsprozess für die nachhaltigste Sanierungslösung bestimmte Aspekte und Bewertungsmethoden zur Rolle der Bioturbation zukünftig verstärkt in der Bewertung Berücksichtigung finden sollten, um die gegenwärtig noch existierende Bewertungsunsicherheit zum Langzeitverhalten der konzipierten Abdecksysteme zu verringern.

Die durchgeführten Arbeiten im Rahmen dieses Forschungsprojektes bekräftigen folgende Aussagen:

- Für die Dimensionierung von Abdecksystemen mit Radondämmeigenschaften sind ein genaues Prozessverständnis in einer Halde oder Tailingsaufschüttung und die Identifikation der wesentlichen Einflussparameter unabdingbar. Eine ausschließliche Abbildung der Prozesse durch generalisierte Modellannahmen wird als nicht hinreichend eingeschätzt. Die objektspezifischen Besonderheiten, die für die Dimensionierung der Abdeckung wesentlich sein können, sind nur durch zielgerichtete experimentelle Objektuntersuchungen erfassbar.

- Der konvektive Radontransport ist in den überwiegenden Fällen für erhöhte Radonfreisetzungsraten verantwortlich. Damit ist die realistische Bestimmung der Gaspermeabilität als Materialeigenschaft und objektspezifische Eigenschaft als auch die Konvektionsgeschwindigkeit unter bestimmten Bedingungen (Temperatur in der Halde und in der Atmosphäre) für das Systemverhalten wesentlich.
- Die Untersuchungen zur Korngrößenabhängigkeit der Bleispur und zum Verhalten des Emanationskoeffizienten ergaben, daß Pflanzenwurzeln den Boden weiter aufschließen können und das Radonfreisetzungsverhalten der Kornfraktionen beeinflussen. Für die Bewertung des Radonpotentials eines Haldenmaterials sollte der Feinkornanteil bei der Datengewinnung entsprechende Beachtung finden. Es existiert eine starke Abhängigkeit der Radonquellstärke von der Korngröße. In den untersuchten Fällen trugen die prozentual geringen Feinkornanteile bis zu 80% der Radongesamtquellstärke bei.
- Die Methode des flächenhaften Screenings mit Radondetektoren in geringer Höhe auf der Oberfläche des unabgedeckten Objektes ermöglicht die Lokalisierung und Visualisierung bevorzugter Radon-Freisetzungsbereiche und deren jahreszeitlichen Veränderungen. Die Haldenoberfläche ist für die Dimensionierung eines Abdecksystems nicht notwendigerweise als einheitlich zu behandeln.
- Die Untersuchung des konvektiven Lufttransportes im Inneren einer Halde mittels Tracergastechnologie ermöglicht die Quantifizierung und Verifizierung der Konvektionsprozesse und die Abschätzung der objektspezifischen Konvektionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen (insbesondere den Temperaturbedingungen). Es ist eine effektive Methode der experimentellen Voruntersuchung am konkreten Objekt. Insbesondere ist dabei hervorzuheben, daß im Ergebnis der ersten Untersuchungen die bisherigen Vorstellungen über die Radonkonvektion in Halden zu überprüfen ist. Bei den gemessenen hohen Konvektionsgeschwindigkeiten ist der Anteil der nahezu radonfreien Außenluft an der Gesamtradonexhalations-

bilanz nicht zu vernachlässigen. Es existiert eine maximale Exhalationsrate von Halden, die unabhängig von der Konvektionsgeschwindigkeit ist.

- Sollte sich zur Unterbindung des konvektiven Radontransportes die Aufbringung hochwertigerer Abdeckungen in bestimmten Teilbereichen des Objektes als sinnvoll erweisen, so kann kurzfristig nach Herstellung dieser Abdeckung mittels Tracergastechnologie die Wirksamkeit überprüft werden. Es könnte z.B. auch zweckdienlich sein, die Abdeckung abschnittsweise herzustellen und so dem Systemverhalten anzupassen.
- Für den konvektiven Radontransport in der Halde, aber auch ggf. in der Abdeckung ist die Kenntnis der Gaspermeabilität als wesentlicher Transportparameter erforderlich. Die Gaspermeabilität eines mineralischen Abdecksystems mit Feinporen und Grobporen (auch durch Bioturbation bedingt) ist skalenabhängig. Der Gastransport in Grobporensystemen, Rissen oder Heterogenitäten kann allein durch laborative Materialuntersuchungen nicht erfasst werden. Hierzu sind Versuche zur „großräumigen“ Gaspermeabilität an Bodensubstraten oder Altdeckungen mit normal ausgebildeter Bioturbation erforderlich. Dies kann ebenfalls unter Zuhilfenahme von Tracergas oder Gasbrunnen erfolgen. Die Versuchsmethodik ist nicht im erforderlichen Maße verfügbar und bedarf einer zielgerichteten, problemangepassten Entwicklung. Im Rahmen des Projektes konnte nur die Machbarkeit aufgezeigt werden.
- Die Bleispur-Methode eröffnet die Möglichkeit, den realen Zustand der Radonfreisetzung über längere Zeiträume integrierend zu erfassen. Die entsprechende Untersuchung der Bleispur an charakteristischen Radonaustrittsbereichen trägt zur Identifikation von objektspezifischen Problemstellen erhöhter Radonfreisetzung bei. Die maximal mögliche negative Bleispur in einer ungedeckten Objektoberfläche bis in größere Tiefen ist eine effiziente Nachweismethode für Bereiche mit hoher konvektiver Radonfreisetzung.
- Die Untersuchungen im Rahmen des Projektes haben ergeben, dass nach wie vor auch die klassischen Methoden zur Charakterisierung der Radonfreisetzung (Messung der Rn-Exhalationsrate, des Bodenradonprofils, der Gasper-

meabilität, ergänzt durch begleitende Messungen der Bodenfeuchte und der Saugspannung) weiterhin für die Charakterisierung des Ausgangszustandes unabdingbar sind.

Unter Beachtung der Tatsache, dass das Betreiben von umfangreichen Monitoring-systemen, die kontinuierlich arbeiten oder in relativ kurzen Zeitabständen unter vergleichbaren Bedingungen ständig die Beprobung wiederholen, über lange Zeiträume nach Abschluß der technischen Sanierungsmaßnahmen sehr kosten- und personalintensiv sein kann, wird empfohlen, diese Vorstellungen auf den Prüfstand zu stellen. Die experimentellen Methoden, die im Rahmen des Forschungsprojektes zum Einsatz kamen, stellen zum Teil neue Möglichkeiten der objektiven, messtechnischen Kontrolle für die sich vollziehenden Änderungen in der Funktionalität einer mineralischen Abdeckung hinsichtlich des Radontransports dar. Dabei ist es möglicherweise ausreichend, komplexe Untersuchungen exemplarisch an ausgewählten Objekten in größeren Zeitabständen durchzuführen. Zum späteren Vergleich sollte mit diesen Meßmethoden bei gleicher Vorgehensweise der Zustand nach Fertigstellung der Abdeckung und der Erstbegrünung zur Erosionssicherung charakterisiert werden.

- Bei Aufgrabungen zur Charakterisierung der Veränderungen im Inneren des Abdecksystems liefert die Anwendung der Bleispurmethode im Tiefenprofil den direkten Nachweis der über den gesamten Zeitraum integrierten Dämmwirkung. Es wird nicht der Momentanzustand der Dämmwirkung abgebildet. Es gibt keine vergleichbare Untersuchungsmethode, die dies ebenfalls zu leisten vermag. Der Einfluß der Bioturbation ist prinzipiell erfassbar. Der Momentanzustand der Dämmwirkung kann durch Exhalationsmessungen zusätzlich bestimmt werden.
- Die Versickerung eines Farbtracers vor der Aufgrabung ermöglicht die Visualisierung der Fließwege für Wasser und Luft in den Abdecksystemen. Inhomogenitäten werden vor Ort auf einfache Weise sichtbar gemacht.
- Die Installation von Tracergasaufgabestellen unter der Abdeckung und die Messung der Transportgeschwindigkeit eines Tracergases durch die Abde-

ckung im großflächigem Maßstab zu bestimmten Kontrollterminen ermöglicht die zerstörungsfreie Überprüfung und Quantifizierung der Wegsamkeiten für einen konvektiven Radontransport durch das Abdecksystem. Mit dieser Technologie können lokale Schwachstellen erhöhter Gasdurchlässigkeit identifiziert und ggf. ausgebessert werden. Hinsichtlich der problemangepaßten zerstörungsfreien Kontrolle der Gasdurchlässigkeit/Permeabilität ist noch methodische Entwicklungsarbeit zu leisten.

- Die flächenhafte Installation von Radondetektoren in geringer Höhe über der Abdeckung in ausgewählten Kontrollzeiträumen ermöglicht eine schnelle, kostengünstige und effiziente Situationseinschätzung. Da Messzeiten von etwa einer Woche bereits ausreichen können, kann bei Bedarf der Momentanzustand durch ein Kontrollorgan bestimmt werden oder über ein ausgewähltes Jahr die Dynamik infolge der Wasserhaushaltsschwankungen abgebildet werden.
- Es wird für wesentlich eingeschätzt, in bestimmten Abständen, den Wasserhaushalt (Wassergehalt in der ungesättigten Abdeckschicht), der auch für die Radon-Dammwirkung bedeutsam ist, zu erfassen. Hierfür können moderne Feldmeßmethoden (TDR-Sonden, Mikrowellenabsorptionssonden, Tensiometer) eingesetzt werden.
- Zum Nachweis von ablaufenden Alterungsprozessen im Inneren des Abdecksystems (Auflockerung, Rissbildung) reichen visuelle Beobachtungen an der Oberfläche nicht aus. Hierfür sind zerstörungsfreie Meßmethoden erforderlich, die räumliche Materialvariabilitäten von tatsächlich stattfindenden Veränderungen unterscheiden können. Hierzu sind entsprechende methodische Entwicklungsarbeiten erforderlich, die z.B. auf der Nutzbarmachung der Tracer-gastechnologie beruhen könnten.
- Für begleitende Messungen zu den Wartungs- und Pflegearbeiten haben klassische Messungen zur Bestimmung der lokalen Radonfreisetzung (Exhalationsmessungen) weiterhin ihre Berechtigung.

Insgesamt wird eingeschätzt, dass geeignete und leistungsfähige Messverfahren zur Kontrolle der Wechselwirkung von Bioturbation, Alterung, Rissbildung und Quantifizierung der Radondämmwirkung vorzuhalten sind. Des Weiteren ist zu empfehlen, das mögliche Risiko beim teilweisen Versagen einer Abdeckschicht exemplarisch zu untersuchen.

## **2 Einleitung**

### **2.1 Problemstellung**

Aufgrund der geologischen Gegebenheiten wurden in Sachsen und Thüringen im Zuge unterschiedlicher Bergbautätigkeiten fast immer auch radioaktive Gesteine zu Tage gefördert. Die dabei entstandenen Hinterlassenschaften in Form von Halden, industriellen Absetzanlagen (IAA), Betriebsflächen, Grubenbauen führten/führen z.T. zu einer erheblichen Belastung für die Umwelt und die Bevölkerung.

Gemäß dem derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik stellt für zahlreiche dieser bergbauliche Hinterlassenschaften die Verwahrung vor Ort mit einer Abdeckung (ggf. komplettiert durch eine Sickerwasserfassung und -behandlung) die optimale Sanierungslösung dar. Damit soll gesichert werden, dass die von den bergbaulichen Hinterlassenschaften ausgehenden Umweltbeeinträchtigungen langzeitwirksam auf ein vertretbares Maß reduziert werden und die betroffenen Flächen mit vergleichsweise geringem Nachsorgeaufwand einer dem jeweiligen Standort entsprechenden geeigneten Nachnutzung zugeführt werden können.

An die zu konzipierenden und zu realisierenden Abdecksysteme sind dabei hohe Anforderungen hinsichtlich der langzeitwirksamen Funktionalität gestellt, da Bergbauobjekte, wie z.B. Halden und IAA's, den an ihrem Standort typischen Umwelteinflüssen unterliegen und somit hinsichtlich ihrer Eigenschaften zeitlichen Veränderungen unterliegen. Für die technische Dimensionierung der Abdecksysteme sind grundlegende Kenntnisse zum Schadstofffreisetzungverhalten von zentraler Bedeutung. Hierbei nimmt das Radon (Rn-222), dessen Zerfallsprodukte nicht unwesentlich zur Strahlenexposition des Menschen beitragen können, z.T. eine Schlüsselstellung ein. Dies belegen z.B. die Untersuchungen zum Altlastenkataster /1/ und die Untersuchungen der Wismut GmbH für den Standort Schlema-Alberoda /2/. Abdeckungen von Bergbauobjekten mit erhöhter Rn-Freisetzung sind deshalb in einigen Fällen so zu dimensionieren, dass sie die Funktion der Radondämmung ausüben. Des Weiteren sind geeignete Methoden zur Kontrolle der Funktionstüchtigkeit solcher Abdeckungen erforderlich.

## 2.2 Strahlenschutzrechtliche Rahmenbedingungen

Die strahlenschutzrechtlich einzuhaltenden Randbedingungen sind gemäß des § 118 Abs. 1 der aus den §§ 11 und 12 Atomgesetz (AtG) folgenden Strahlenschutzverordnung (StrlSchV vom 20.07.2001) in der

- Verordnung über die Gewährleistung von Atomsicherheit und Strahlenschutz vom 11.10.1984 (VOAS) (GBl. I Nr. 30 S. 341) nebst Durchführungsbestimmungen zur Verordnung über die Gewährleistung von Atomsicherheit und Strahlenschutz vom 11.10.1984 (DB VOAS) (GBl. I Nr. 30, S 348; Ber. GBl. I 1987 Nr. 18 S. 196) und
- Anordnung zur Gewährleistung des Strahlenschutzes bei Halden und industriellen Absetzanlagen und bei der Verwendung darin abgelagerter Materialien (HaldAO) vom 17.11.1980 (GBl. I Nr. 34, S. 347)

gegeben. Diese besagen entsprechend § 3 der HaldAO /3/, dass an Halden und Absetzanlagen Strahlenschutzmaßnahmen durchzuführen sind und dies Wiederurbarmachungs- und Rekultivierungsarbeiten mit beinhaltet. Die Dimensionierung der Abdeckung ist gemäß HaldAO jedoch Gegenstand des Genehmigungsverfahrens und entspricht damit einer objektspezifischen Einzelfallentscheidung der zuständigen Behörde. Diese basiert auf dem Genehmigungsantrag, der alle zur Einschätzung der Strahlenschutzsituation relevanten Angaben, wie z.B. Angaben zur mittleren spezifischen Aktivität der relevanten Radionuklide sowie Angaben zur voraussichtlichen Folgenutzung, enthalten muss (vgl. § 6 HaldAO). Als Entscheidungshilfen im Genehmigungsverfahren stehen der zuständigen Behörde die vom Bundesminister für Umwelt veröffentlichten Empfehlungen der Strahlenschutzkommission (SSK) „Strahlenschutzgrundsätze für die Verwahrung, Nutzung oder Freigabe von kontaminierten Materialien, Gebäuden, Flächen und Halden aus dem Uranerzbergbau“ /4/ für die Bewertung der bergbaulichen Hinterlassenschaften und für die Ableitung der notwendigen Maßnahmen zur Verfügung. In diesen Empfehlungen ist formuliert, dass für die Nutzung von Halden des Uranerzbergbaus ein primärer Richtwert der effektiven Dosis von 1 mSv/a eingehalten werden soll.

## **2.3 Abdecksysteme für Bergbauobjekte**

### **2.3.1 Realisierung in der Vergangenheit**

Bergbauobjekte, vor allem Halden, die bereits vor 1990 aus der Trägerschaft der SAG/SDAG Wismut entlassen wurden, besitzen zum Großteil keine oder nur eine geringmächtige mineralische Abdeckung von überwiegend  $< 0,5$  m, die vor allem die Staubemission der Objekte mindern und als Bodensubstrat für die z.T. realisierte Begrünung oder Aufforstung dienen sollte. Die Auswahl der mineralischen Substrate erfolgte dabei überwiegend gemäß ihrer Verfügbarkeit und weniger nach geotechnischen Erfordernissen.

### **2.3.2 Aktuelle Realisierung**

Gemäß dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik sollen Abdeckungen von Bergbauobjekten mit erhöhtem Radionuklidinventar vor allem die folgenden Funktionen erfüllen:

- Reduzierung der Radonexhalation,
- Minimierung der Direktstrahlung,
- Beseitigung der Möglichkeit der Ingestion von kontaminiertem Material,
- Verringerung der Niederschlagsinfiltration und Verringerung des Sickerwasseranfalls, geotechnische Stabilität und Erosionssicherheit
- Begrünbarkeit,
- Langzeitstabilität und geringer Nachsorgeaufwand /5/.

Es wird angestrebt, die Maßnahmen für die Verwahrung von Bergbauobjekten so zu realisieren, dass die vorgenannten Funktionen für lange Zeiträume gewährleistet bleiben. Dies erfordert eine entsprechende Konzipierung der Abdeckungen/Abdecksysteme z.B. hinsichtlich der einzusetzenden Materialien, ihrer Mächtigkeit und der Einbaubedingungen /6/.

Die WISMUT GmbH hat in ihrer Sanierungskonzeption für Halden ein Zweischicht-Abdeckkonzept mit einer Mächtigkeit von 1 m begründet. Entsprechend den natur-

räumlichen Gegebenheiten, der Standortcharakteristik und wirtschaftlichen Aspekten sind dabei vor allem folgende Nutzungsszenarien relevant /3/:

- Landwirtschaftliche Nutzung (Anbau Industriepflanzen, Grünlandnutzung),
- Forstwirtschaftliche Nutzung (Aufforstung oder geförderte natürliche Sukzession hin zu stabilen Waldökosystemen).

Favorisiert wird gegenwärtig, auch unter dem Gesichtspunkt der Minimierung des Nachsorgeaufwandes und ökologischer Aspekte, die Etablierung einer standorttypischen Flora und Fauna. Diese entspricht in Mitteleuropa der Vegetationsform Wald. Sie kann einerseits durch eine gezielte Aufforstung (Nutzwald) oder andererseits durch eine geförderte natürliche Sukzession auf den Bergbauobjekten etabliert werden. Dabei ist zu beachten, dass die Ausbildung des Klimaxstadiums Wald als Endstadium der natürlichen Sukzession (Pionierphase - Verdichtungsphase - Strauchphase - Waldphase) einen längerfristigen Prozess darstellt, bei dem am Ende das Ökosystem im Gleichgewicht mit dem Klima und den Standortbedingungen steht. Untersuchungen zur natürlichen Besiedelung von Halden des Uranerzbergbaus /7/ haben gezeigt, dass ohne menschliches Zutun bereits nach 20 Jahren von Birken dominierte Vorwaldstadien erreicht werden, die im Laufe der weiteren Entwicklung zunehmend zurückgedrängt und durch die der natürlichen Vegetation entsprechenden bodensauren Birken-Eichenwälder ersetzt werden.

Die Änderungen im Pflanzenbesatz (bei natürlicher Sukzession) bzw. die Pflanzenentwicklung (Wachstum des Nutzwaldes) implizieren, dass der bei Abschluss der Sanierungsmaßnahmen von Bergbauobjekten hergestellte Zustand sowohl hinsichtlich der Eigenschaften der mineralischen Abdeckung als auch des angepflanzten Bewuchses ohne zielgerichtete Nachsorge durch den Menschen Veränderungen unterliegt. Selbst im Falle der Nachnutzung von Bergbauobjekten in Form von Grünland bei gezielter Pflege bildet sich in den ersten Jahren eine der Grünlandgesellschaft entsprechende Durchwurzelung des mineralischen Abdeckmaterials und der Besatz mit Bodenorganismen heraus, d.h. die Einbaubedingungen des Abdeckmaterials wie z.B. die Lagerungsdichte werden modifiziert und Prozesse der Bodenbildung in Gang gesetzt.

Bereits bei der Projektierung und anschließenden Realisierung von Abdeckungen von Bergbauobjekten ist somit die Abschätzung des Einflusses des Bewuchses und der Besiedelung der mineralischen Schichten sowie deren Wirkung auf die Funktionalität der Abdeckungen im Hinblick auf das Langzeitverhalten zu berücksichtigen. Ebenso sind geeignete Methoden erforderlich, um die Funktionalität der hergestellten Abdeckungen zu überprüfen.

### **2.3.3 Aktuelle Problemstellungen**

Der aktuelle Wissensstand hinsichtlich der Alterungsprozesse von Abdeckungen beruht bisher vorwiegend auf Untersuchungen mit den Schwerpunkten Wasserhaushalt, geomechanische Stabilität, Nährstoffhaushalt und Pflanzenwachstum (vgl. Abschnitt 5.1 und Abschnitt 5.3). Insbesondere wurde bisher in Hinblick auf die Radonmigration der Durchwurzelung bei der Dimensionierung von Abdeckungen vergleichsweise wenig Beachtung geschenkt. Untersuchungen zum Einfluss von Bewuchs und Bodenfauna auf die Eigenschaften von Abdeckmaterialien beschränken sich überwiegend auf qualitative Aussagen hinsichtlich des Pflanzenwachstums bzw. der Aktivität von Bodenorganismen und Tieren. Konkrete Untersuchungen zum Wechselspiel von Bioturbation und Radontransport/Gasaustausch liegen derzeit in Ansätzen mit den Untersuchungen zu /8/ vor (vgl. Abschnitt 5.2).

### 3 Aufgabenstellung des Vorhabens

Erste Untersuchungen zur Entwicklung alternativer Herangehensweisen zur Erfassung und Beurteilung der Radonmigration in Böden und Abdeckungen von Bergbauobjekten erfolgten im Rahmen der durch das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) geförderten Forschungsprojekte

- "Methode zur parameterfreien Bestimmung der Radonexhalation und Dimensionierung von Abdeckschichten bei der Sanierung bergbaulicher Altlasten" /8/ /9/ und
- "Entwicklung einer Messmethodik zur Bestimmung der Radonquellstärke großer Flächen und Bewertung der Radondämmwirkung von Abdeckschichten" /10/.

Im Ergebnis des Projektes /8/ ist mit der Bleispurmethode eine Verfahrensweise zur Ermittlung des Transportverhaltens von Radon über Zeiträume von mehr als 30 Jahren bereit gestellt worden. Ebenso wurden erste Erkenntnisse zur Beeinflussung der Radonmigration durch Bioturbation gewonnen. Diese qualitativ und quantitativ zu untersetzen sowie die durch Bioturbation zu erwartenden Langzeiteffekte in Bezug auf das Migrationsverhalten von Radon zu charakterisieren, war auch Gegenstand des vorliegenden Forschungsprojektes.

Die Bearbeitung erfolgte gemäß dem Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) vom 18.12.2001 durch die IAF – Radioökologie GmbH Dresden und deren Unterauftragnehmer WISMUT GmbH in Form des Vorhabens StSch4312 mit dem Thema: „Untersuchung des Einflusses der Bioturbation von Abdeckungen und kontaminierten Materialien auf die Radondämmwirkung mittels Bleispurmethode“.

Das Arbeitskonzept umfasste 4 Module mit den folgenden Schwerpunkten:

- Modul 1: Festlegung der Herangehensweise, Auswahl geeigneter Objekte und Probenahmestellen,
- Modul 2: Experimentelle Untersuchungen vor Ort,
- Modul 3: Laborexperimente,
- Modul 4: Auswertung, Bewertung, Schlussfolgerungen.

Ziel war es, aufbauend auf der Interpretation der durch Kombination von Feldmessungen, Analytik und Laborexperimenten gewonnenen Daten, Aussagen hinsichtlich der anzunehmenden Veränderungen der Radondämmwirkung im Vergleich zum Einbauzustand von Abdecksystemen und weiterführend Kriterien für die Dimensionierung von Abdeckungen abzuleiten. Dies schließt auch Empfehlungen für geeignete Bewertungsmethoden von mineralischen Abdeckungen mit ein.

Im vorliegenden Schlussbericht werden basierend auf der Definition der relevanten Grundbegriffe und einer kurzen Zusammenfassung des relevanten Basiswissens tangierender Fachgebiete (vgl. Abschnitt 4) sowie dem gegenwärtigen Kenntnis- und Wissensstandes (vgl. Abschnitt 5) die durchgeführten Untersuchungen (vgl. Abschnitte 6, 7) sowie die dazugehörigen Ergebnisse dargestellt und gemäß der Zielsetzung des Projektes ausgewertet (vgl. Abschnitt 9). Die Darstellung stützt sich dabei auf die bereits vorliegenden Zwischenberichte zu den einzelnen Modulen (vgl. /11/, /12/, /13/, /14/ und /15/) und den Zwischenbericht zu den zusätzlich in das Untersuchungsprogramm aufgenommenen Versickerungsversuchen mittels Tracerflüssigkeit (vgl. /16/). Die Modellierung der Untersuchungsergebnisse und die entsprechenden Schlussfolgerungen bezüglich der Erfordernisse für die Dimensionierung von Abdeckungen und die Empfehlungen von Bewertungsmethoden werden in den Abschnitten 10 bis 13 des Berichts diskutiert.

## 4 Einführung zu Grundbegriffen

Die im Rahmen dieser Studie vorgesehenen Untersuchungen zum Einfluss der Bioturbation auf die Radon-Dämmeigenschaften von Abdecksystemen erfordern, besonders unter der Zielstellung der Ableitung allgemeingültiger Bemessungs- und Bewertungsmethoden, ein hohes Maß an interdisziplinärem Denken. Wesentlicher Bestandteil des Projektes ist somit die Integration grundlegender Erkenntnisse relevanter Fachgebiete, wie z.B. aus der Bodenkunde und der Ökologie, bei der Auswahl und Festlegung der Untersuchungsmethodik sowie der Auswertung der gewonnenen Daten. Im folgenden werden einige zentrale Grundbegriffe, die im Projekt Verwendung finden, definiert und das entsprechend relevante Basiswissen dargestellt.

### 4.1 Bioturbation

Boden bzw. mineralische Schichten unterliegen als offene Systeme vielfältigen standortspezifischen geogenen und biogenen Faktoren. Sie durchlaufen dadurch einen Prozess ständiger Veränderung bzw. Entwicklung. Als biogene Faktoren im Rahmen der vorliegenden Untersuchung von Bedeutung sind die Einwirkungen von Tieren und Pflanzen, für die der Boden als Lebensraum bzw. Nahrungsquelle dient.

Mit dem Begriff **Bioturbation** wird im Rahmen dieses Projektes **die Wirkung/Aktivität von Wurzeln, Tieren und Organismen im Boden bzw. in mineralischen Schichten** charakterisiert.

Im Rahmen des Projektes relevante Funktionen/Wirkungen von Bioturbation in Bezug auf Abdeckmaterialien sind vor allem:

- die Beeinflussung der Gefügebildung/-entwicklung,
- die Beeinflussung des (Boden-)Wasserhaushaltes,
- und der geomechanischen Stabilität.

Bioturbation (vor allem der Einfluss von Pflanzenwachstum und damit verbunden Wurzelwachstum) und Gefügebildung/-entwicklung bewirkt im allgemeinen eine Störung des Bodengefüges (z.B. Auflockerung), die mit der Tiefe abnimmt, da die Aktivi-

täten sowohl der Tiere als auch der Pflanzen von der Bodenoberfläche ausgehen. Der Grad der Auflockerung ist dabei wiederum von unterschiedlichen Randbedingungen abhängig, wie z.B. von der Art der Pflanzen. Es ist bekannt, dass die Lockerungswirkungen von Gehölzen ausgeprägter sind als die anderer Pflanzen (Baumwurf wird dabei als Extremereignis in die Betrachtung einbezogen). Ebenso ist bekannt, dass die Bioturbation in Waldböden wirksamer ist als bei Graslandböden. Eine Folge der Durchwurzelung ist die Herausbildung eines erhöhten Porenvolumens nahe der Bodenoberfläche /17/.

Die Wirkung der Pflanzen erstreckt sich in erster Linie auf den Bereich des Oberbodens, der i.d.R. die größte Durchwurzelung aufweist. Sie beruht auf den unterschiedlichen Arten der Wurzelbildung und der Dichte der Vegetationsdecke.

Böden mit stabilem Krümelgefüge (z.B. Grünland ohne Weidebetrieb) entstehen aufgrund des Zusammenwirkens der Faktoren dichte Vegetationsdecke, intensive Durchwurzelung (0 - 7 cm), laufender Anfall von Wurzelrückständen (Förderung der Mikroorganismenaktivität) und fehlende Bodenbearbeitung. Die dichte Durchwurzelung verursacht eine Erhöhung der Häufigkeit der Rissbildung und damit die Entstehung kleinerer Aggregate. Die Wurzeln wachsen dabei vorwiegend entlang der sich bildenden Klüfte oder in Bereichen geringerer Dichte. Der intensivste Kontakt mit der Feinmasse wird durch die Wurzelhaare hergestellt. Böden mit Kohärentgefüge (z.B. auf Intensivweiden) entstehen durch Verdichtung von Krümelgefüge z.B. bei nassen Wetterlagen /17/.

Die im Boden vorliegende Gefügeform ist stark abhängig vom Bewuchs. Z.B. auf Flächen mit Getreide bildet sich vorwiegend Krümelgefüge, da sich die Durchwurzelung auf einen größeren Raum verteilt (20 - 32 cm) und somit der Anteil der Wurzelrückstände im Oberboden vergleichsweise geringer ist, dafür ist der Unterboden stärker durchwurzelt. Die Gefügebildung bei Hackfruchtpflanzungen ist vergleichsweise schlechter, da eine große Standweite vorherrscht, die schlämmende Wirkung der Regentropfen voll wirksam wird und die Wurzelrückstände weit verteilt im Boden anfallen /17/.

Bei den Bodentieren ist vor allem der Regenwurm von nicht zu vernachlässigender Bedeutung. Seine äußerst stabilen Kotaggregate bilden eine Art Stützgerüst für den Boden. Die von Regenwürmern gegrabenen Gänge sind sehr dauerhaft und werden auch bevorzugt durchwurzelt. Ihr Volumen kann bei Grünland und Waldböden bis zu 50 % der gesamten Grobporen ausmachen /17/.

Die ausgeprägte Gefügeform im Boden/Abdeckmaterial bestimmt wiederum aufgrund des jeweiligen etablierten Porenraumes physikalische Eigenschaften, wie Wasser- und Gashaushalt, am Standort. Sie ist jedoch nicht konstant, sondern unterliegt aufgrund biotischer und abiotischer Faktoren zyklischen und azyklischen Veränderungen (z.B. Quellen und Schrumpfen bindiger Böden). Die relevanten Transportmechanismen für Gase und Wasser, d.h. Konvektion und Diffusion, werden unter anderem stark von den Gegebenheiten des im Ergebnis der Gefügebildung/-umbildung ausgebildeten Porenraumes beeinflusst, so bieten z.B. klüftige und rissige Böden vergleichsweise gute Voraussetzungen für den Gas- und Wassertransport, wohingegen sehr dicht gelagerte bindige Böden (oder auch Abdeckmaterialien) diese Voraussetzungen nur bedingt erfüllen.

Bioturbation und Bewuchs haben einerseits mittelbar, z.B. durch die Beeinflussung der Gefügeform und damit die Ausbildung des Porenraumes, sowie unmittelbar, z.B. durch Wasserentzug über die Wurzeln, Einfluss auf den Bodenwasserhaushalt am Standort. Die Art und Weise dessen ist jedoch z.T. stark abhängig von den etablierten Pflanzengesellschaften. Dies illustriert beispielhaft Abbildung 1 (s.a. /18/). Eine ausführlichere Darstellung der Prozesse der Wasserbewegung im System Boden-Pflanze-Atmosphäre enthält /17/. Ein im Rahmen des vorliegenden Projektes relevanter Effekt ist z.B. die Erhöhung des für den Gastransport zu Verfügung stehenden Porenraumes durch Wasserentzug der Wurzeln in der Vegetationsperiode.

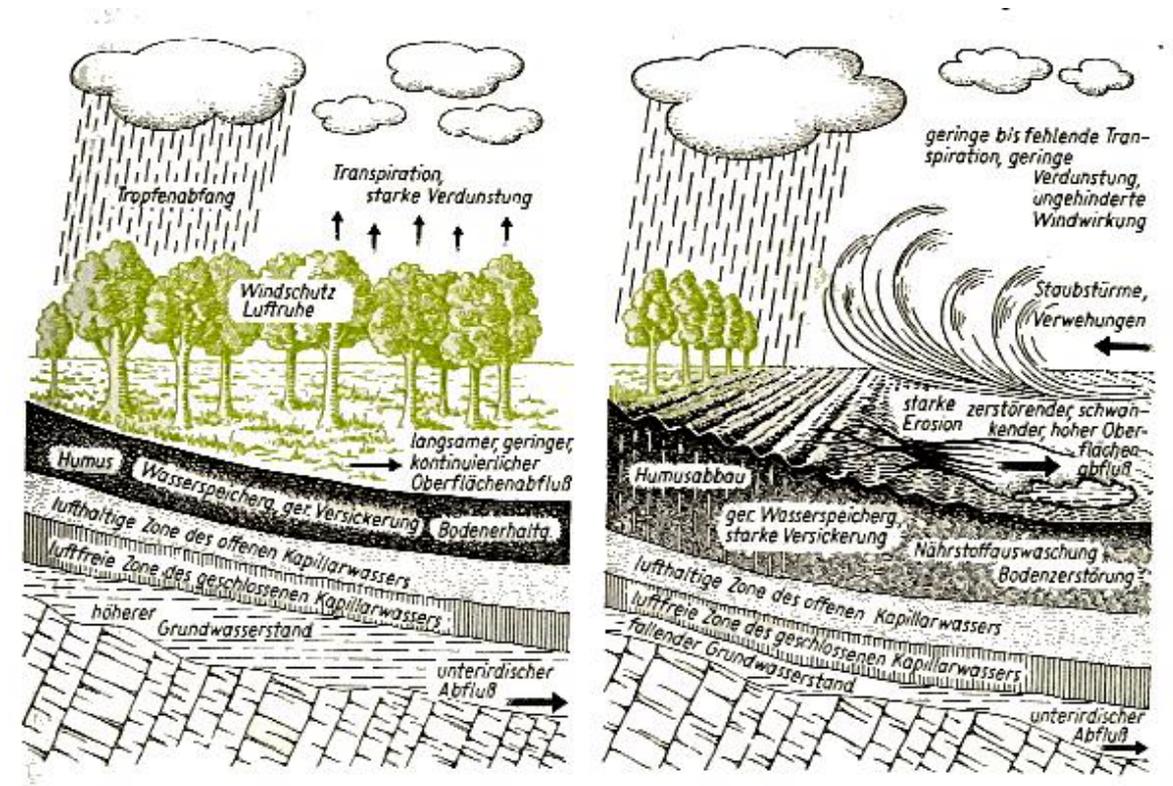


Abbildung 1: Wasserhaushalt in einem Laubwald und auf Ackerland /18/

Im Hinblick auf die geomechanische Beständigkeit von Abdecksystemen ist auf die positive Wirkung von Bewuchs hinsichtlich des Erosionsschutzes hinzuweisen. Bewuchs/Wurzeln stabilisieren Böden/Abdeckungen dahingehend, dass sie dem Materialtransport durch Wind und Wasser, vor allem dem Abtrag von Boden, einen im Vergleich zu Brachflächen hohen Widerstand entgegensetzen. Auch in diesem Fall ist die Effektivität dieses Schutzes u.a. von der Art der etablierten Pflanzengesellschaft abhängig.

## 4.2 Radonmigration

Radon (Rn-222) entsteht in der natürlichen Zerfallsreihe aus Radium (Ra-226) bzw. dessen langlebigen Mutternukliden Uran (U-238) und Thorium (Th-230), die in Böden und Gesteinen in variabler Konzentration als primordiale Elemente vorhanden sind. Als einziges gasförmiges Element in dieser Zerfallsreihe kann sich Radon<sup>1</sup> von seinem Bildungsort im Boden oder in Gesteinen entfernen und aus der Feststoffphase der Minerale und Gesteine in die Bodenluft sowie in Poren- und Kluftwässer gelangen und schließlich über eine Migration im Boden die Atmosphäre erreichen /8/.

Die Migration im Boden umfasst die folgenden Prozesse. Die mineralischen Materialien produzieren entsprechend ihrem Radiumgehalt Radon, das nur zu einem bestimmten Prozentsatz das Mineralgerüst des Gesteins verlassen kann und das als Emanierungsvermögen bezeichnet wird (siehe auch Abschnitt 6.1.2.1). Die Abgabe von Radon in den Kluft- und Porenraum der Gesteine sowie in die Böden wird außerdem durch die Porosität und die Dichte des Bodens nachhaltig bestimmt. Die Dichte und die Porosität können je nach Boden- und Gesteinstyp erheblich variieren.

Die Radonkonzentration in einem bestimmten Volumenelement der Bodenluft setzt sich aus zwei Komponenten zusammen:

- aus dem diffusiven Anteil, der durch Diffusion aus der unmittelbaren Umgebung zum Messpunkt gelangt und durch die spezifische Ra-226-Aktivität des Materials selbst bestimmt ist, sowie aus
- dem aus größerer Entfernung durch Bodenluftströmungen verursachten konvektiven Anteil.

Die Parameter Radonkonzentration in der Bodenluft und Rn-Exhalation werden durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst, so dass es sich nicht um konstante Größen, sondern durch charakteristische Schwankungsbereiche gekennzeichnete

---

<sup>1</sup> Mit Radon wird in der Regel das radioaktive Isotop Rn-222 aus der U-238-Zerfallsreihe bezeichnet. In einigen Fällen kann auch das aus der Thorium-Zerfallsreihe stammende Thoron (Rn-220) mit einer Halbwertszeit von ca. 58 s von Bedeutung sein.

Parameter handelt, die überdies standortabhängig sind. Sie werden im Wesentlichen beeinflusst von:

- der Bodenbeschaffenheit (Feuchtigkeit, Korngrößenverteilung, Permeabilität, Porosität),
- der Beschaffenheit des radonproduzierenden Mediums (Tailings, Haldenmaterial, geomechanische und geochemische Beschaffenheit, Mächtigkeit des Mediums, hydrogeologische Eigenschaften),
- den jahreszeitlichen und täglichen meteorologischen Bedingungen (Luftdruck, Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchte, Regen, Sonnenschein, Hitze- und Frostperioden, Schneebedeckung etc.) (vgl. beispielhaft Abbildung 2 und /10/),

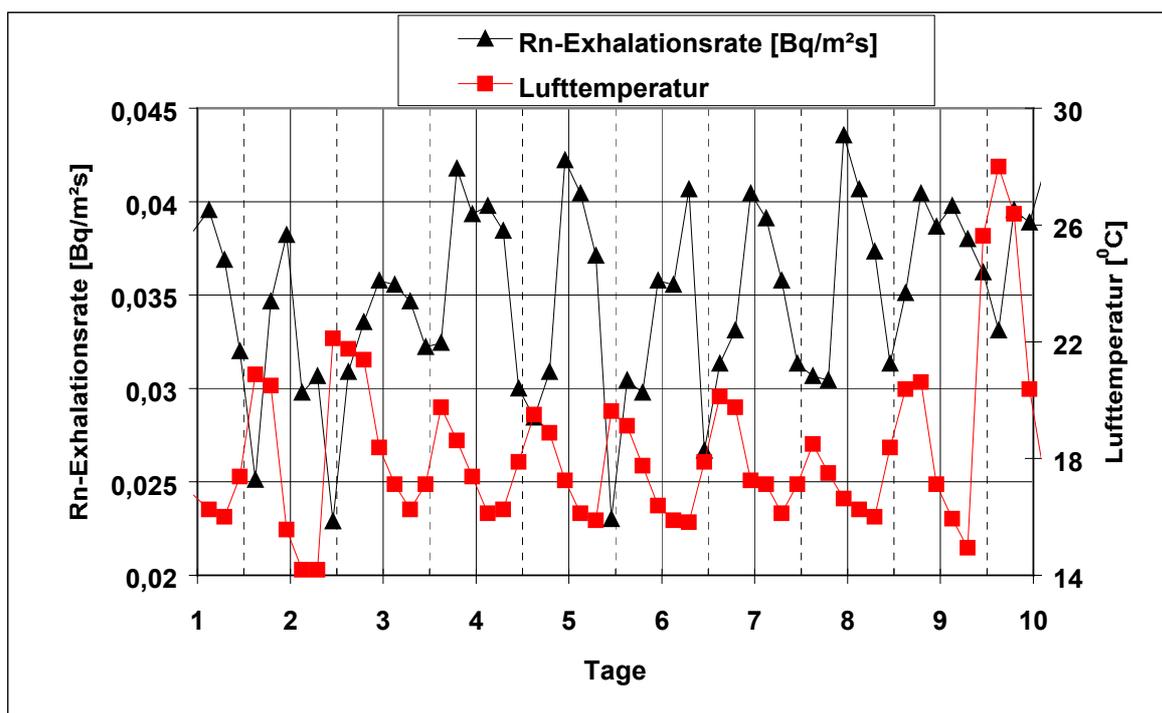


Abbildung 2: Abhängigkeit der Radonexhalationsrate von der Lufttemperatur im Zeitraum von 10 Tagen. Der Messrhythmus betrug 4 Stunden (Die gestrichelten senkrechten Linien entsprechen immer 12 Uhr mittags. Der Messpunkt befindet sich auf dem Betriebsgelände von IAF - Radioökologie GmbH) /10/

Es ist somit erforderlich, dass es für die effiziente und zielführende Planung und Realisierung von Sanierungsmaßnahmen unter dem Gesichtspunkt der Minimierung der Strahlenexposition der Bevölkerung durch Radon unabdingbar ist, die komplexen Radontransportprozesse in Abdeckungen sowohl qualitativ als auch quantitativ erfassen und bewerten zu können. Dies impliziert das Vorhandensein von geeigneten Methoden zur Ermittlung der entsprechenden, standortspezifischen Randbedingungen der relevanten Parameter und ihrer Schwankungsbereiche.

### 4.3 Radondämmwirkung

Wie bereits im vorstehenden Kapitel angeführt, sind Radontransportprozesse im Boden von vielfältigen Einflussfaktoren abhängig. Zu diesen zählen unter anderem Bodeneigenschaften, wie z.B. Feuchtigkeit, Porosität, Permeabilität. So wird der Radontransport in einem grobporigen, klüftigen, trockenen Boden deutlich gegenüber einem feinporigen, feuchten Boden begünstigt. Die Tatsache, dass Böden bzw. mineralische Schichten aufgrund ihrer Eigenschaften die Radonmigration einschränken und die Radonexhalation reduzieren können, wird im Rahmen dieses Projektes als Radondämmwirkung bezeichnet. Für sie wird im Rahmen dieses Projektes der Parameter RD eingeführt, der das Verhältnis der Exhalationsraten in unabgedeckten Zustand zum abgedeckten Zustand einer Halde bestimmt

$$RD = \frac{J_0^{\text{unabgedeckt}}}{J_0^{\text{abgedeckt}}} \quad (1)$$

### 4.4 Bleispurmethode

Im Rahmen des Forschungsprojektes zu /8/ wurde eine alternative Methode zur Beurteilung der Radontransportprozesse in Böden entwickelt. Dabei stand nicht die Bestimmung der Konzentration von Rn-222, sondern die des langlebigen Radonzerfallsproduktes Pb-210 im Vordergrund. Mit einer Halbwertszeit von 22,3 Jahren ist das Radionuklid Pb-210 geeignet, Langzeiteffekte des Radontransportes über Messung seiner spezifischen Aktivität in Bodenproben zu extrahieren. Insbesondere die

Messung des tiefenabhängigen Pb-210-Konzentrationsprofils in Abdeckungen liefert Informationen über die stattgefundenen Exhalation von Radon, die das Transportverhalten über Zeiträume von mehr als 30 Jahren reflektieren. Durch die Betrachtung dieser vergleichsweise langen Zeiträume kann davon ausgegangen werden, dass viele der beeinflussenden Faktoren, wie z.B. das Wechselspiel von Diffusion und Konvektion, die Zeitabhängigkeit der Transportprozesse und ihre Korrelation mit den verschiedenen meteorologischen und bodenphysikalischen Parametern etc. integral im Pb-210-Konzentrationsprofil erfaßt werden. Als **Bleispur** wird die **Differenz der spezifischen Aktivität von Pb-210 und Ra-226 definiert** /8/.

Im Fall einer radondämmenden Abdeckung zerfällt das in die Abdeckschicht eingedrungene Radon zum größten Teil in den ersten 1 - 5 cm in Pb-210, so dass die Summe der spezifischen Aktivitäten der Bleispur unmittelbar oberhalb und unterhalb der Abdeckungsgrenze einen deutlich positiven Wert aufweist. Bei einer Abdeckschicht mit geringer Radondämmwirkung ist die Situation gerade entgegengesetzt, d.h. es akkumuliert sich nur ein geringer Teil des Pb-210 in der Abdeckschicht, während die Radonquelle eine stark ausgeprägte negative Bleispur aufweist. Die Summe der spezifischen Aktivitäten der Bleispuren oberhalb und unterhalb der Abdeckungsgrenze ist somit insgesamt negativ.

Für die Modellierung der Bleispur anhand der im Feld gewonnenen Daten wurde im Rahmen von /8/ von der IAF - Radioökologie GmbH ein Rechenprogramm entwickelt. Dieses wurde für Interpretation der gewonnenen Daten z.T. erweitert (vgl. Abschnitt 10).

## **5 Gegenwärtiger Wissensstand zum Einfluss der Bioturbation auf Abdecksysteme**

### **5.1 Kenntnisstand der Wismut GmbH**

In der WISMUT GmbH wurden in den letzten Jahren in Vorbereitung der technischen Sanierungskonzepte und der Dimensionierung von Abdecksystemen umfangreiche Untersuchungen zu den relevanten Problemstellungen bearbeitet. Dies beinhaltete im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auch durch Auftragnehmer der WISMUT GmbH die Durchführung von experimentellen Untersuchungen zum Einfluss der Bioturbation an bestehenden Bergbauobjekten. Da die vorgenannten Untersuchungen speziell jedoch nicht im Zusammenhang mit den Fragen der Radondämmwirkung von Abdecksystemen durchgeführt wurden, überwiegen Informationen und Erkenntnisse, die nur mittelbar im Zusammenhang mit dem speziellen Bearbeitungskonzept dieses Projektes stehen. Sie sind nachfolgend kurz zusammengefasst dargestellt (vgl. ausführlichere Erläuterungen in /11/).

#### 1. Projekt "Untersuchungen zur qualitativen und quantitativen Beeinflussung von Abdecksystemen durch Bioturbation" /19/

Der wesentliche Untersuchungsgegenstand war die Erfassung der Wechselwirkung zwischen Fauna und Boden. Dazu wurden sowohl eine Literaturrecherche als auch Felduntersuchungen und Konsultationen von Fachleuten durchgeführt. Inhalt der Felduntersuchungen war insbesondere die Abschätzung der Aktivität der Bodentiere (Regenwürmer, Ameisen, Mäuse) auf bereits abgedeckten Halden. Sie zeigten, dass die ermittelte Individuenzahl von Regenwürmern in den Abdeckungen im Rahmen des für mitteleuropäische Böden typischen Wertebereichs von 80 - 500 Individuen/m<sup>2</sup> liegt und der erkundete Gangdurchmesser der tiefgrabenden Arten 3 - 10 mm betrug. Des Weiteren wird eingeschätzt, dass Ameisen in natürlich gewachsenem und landwirtschaftlich genutztem Boden durchschnittlich etwa (10 - 37) g/m<sup>2</sup> Boden pro Jahr zu Tage fördern. Aktivitäten von Mäusen wurden überwiegend in einer Tiefe von (5 - 30) cm erkundet, wobei die durchschnittliche Ganglänge der Schermaus etwa 25 m betrug.

Die Studie extrahiert keine Zusammenhänge zwischen physikalischen Parametern (wie Bodendichte oder Gaspermeabilität) und der Bioturbation. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen besitzen einen überwiegend beschreibenden Charakter.

2. Projekt "Untersuchungen zur Langzeitstabilität von Abdecksystemen unter dem Einfluss der möglichen Bioturbation" /20/:

Im Rahmen des Projektes wurde anhand umfangreicher Feldarbeiten das Durchwurzelungsverhalten unterschiedlicher Arten erfasst. Dies beinhaltete die Untersuchung der Wurzeldichte in Abhängigkeit von der Bodentiefe, vom Abstand vom Stock und von den Bodenparametern. Im Ergebnis wurden für die zukünftigen Rekultivierungsmaßnahmen geeignete Pflanzenarten vorgeschlagen. Die erkundeten maximalen Durchwurzelungstiefen reichten von 1,1 - 2,5 m. Es hat sich gezeigt, dass sich bodenchemische Unterschiede der Böden nicht signifikant auf die Durchwurzelung auswirken. Sie ist hingegen vom Substrat und dessen Schichtung abhängig, wobei massive Gesteinslagen und sehr dichte Ton- und Lehmschichten als Hindernis für das Eindringen von Wurzeln fungieren. Weitere Wurzelhindernisse sind Stauwasser und Sauerstoffmangel.

3. Projekt "Untersuchungen zur Alterung von Haldenabdeckungen - Sanierungsbetrieb Königstein und Umgebung" /21/:

Der Schwerpunkt des Projektes lag auf bodenmechanischen und wasserhaushaltlichen Untersuchungen. Diese beinhalteten die experimentelle Bestimmung substratspezifischer Eigenschaften des Bodens im Rahmen von Aufschlussarbeiten auf Abdeckungen mit einer Liegezeit von < 4 Jahren, Abdeckungen mit einer Liegezeit von ca. 10 Jahren und im natürlich gewachsenen Boden. Untersuchungen zum Radontransport wurden nicht durchgeführt. Die Messwerte wurden dokumentiert, die Auswertung hat jedoch nur beschreibenden Charakter. Da die Einbauparameter der Abdeckmaterialien nicht bekannt sind, waren Aussagen hinsichtlich der zeitlichen Veränderungen bzw. der Alterung des Bodens nicht ableitbar.

4. Projekt "Bewuchsspezifische Untersuchungen zu verschiedenen Abdeckvarianten der WISMUT GmbH in der Bodenmodellanlage Jena des VAFB Thüringen/Jena" /22/:

Ziel des Vorhabens war es, Aussagen zur Funktion unterschiedlicher standortspezifischer Abdeckungen von Halden des Uranerzbergbaus zu treffen. Dabei standen die Auswirkungen der Abdeckvarianten auf das Wurzelwachstum, die Bodenfeuchte und den Sickerwasseranfall im Mittelpunkt der Untersuchungen. Eine Betrachtung des Gasaustauschs oder des Radontransportes erfolgte nicht. Die gewonnenen Informationen entsprechen vorwiegend qualitativen Aussagen. Wurzeln im Ton wurden nur in Spalten und Rissen erkundet, eine Verdichtungsschicht aus Schlufflehm stellte für Sträucher kein wesentliches Hindernis im Tiefenwachstum dar, eine lockere Lagerung des Substrates begünstigt das Wurzeltiefenwachstum, beim Rückbau der Versuchsanordnung war keine auflockernde Wirkung durch das Wurzelsystem erkennbar.

5. Projekt "Einrichtung, fachliche Begleitung und Auswertung von Feldversuchen im Rahmen der Abdeckung der Böschungen unterhalb der Bermen 19 und 23 auf der Halde 371/II unter Verwendung des im SB Aue hergestellten Abdeckmaterials" /23/:

Gegenstand des Projektes war es, anhand von Versuchsfeldern die Auswirkungen auf Wasserhaushalt, Nähr- und Schadstoffaustrag, Pflanzenwachstum, geomechanische Stabilität und Erosionsgefährdung des Abdecksystems zu untersuchen. Gastransportuntersuchungen zur Radondämmwirkung wurden in diesem Zusammenhang nicht durchgeführt.

Da das Projekt noch nicht abgeschlossen ist, liegen bisher nur Zwischenergebnisse vor. Diese betreffen vor allem die Dynamik der Bodenfeuchte und der Saugspannung in verschiedenen Tiefen der Abdeckschicht. Es zeigte sich, dass in den Wintermonaten eine relativ hohe Wassersättigung vorliegt der Wassergehalt in der Vegetationsperiode jedoch in Abhängigkeit von der Evapotranspiration des Bewuchses und der Niederschlagsintensität in den obers-

ten 0,8 m variiert. Unterhalb von 0,8 m stellt sich hingegen mehr oder weniger ein Gleichgewichtszustand ein. Ebenso ändert sich die Saugspannung mit Beginn der Vegetationsperiode sehr stark. Hinsichtlich der mittleren Bodentemperatur wurde der über das Jahr bekannte periodische Verlauf festgestellt. Die Untersuchungen zeigen, dass die Parameter Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Saugspannung im Zusammenhang mit der Vegetationsentwicklung von Relevanz sind.

6. Projekt "Fortschritte der Optimierung von Abdeckungen für Halden und Absetzanlagen des Uranerzbergbaus" /24/:

Die Studie greift in wesentlichen Teilen auf die Arbeiten der WISMUT GmbH und die Untersuchungen der Auftragnehmer der WISMUT GmbH zurück. Sie zeigt, dass bei der technischen Dimensionierung mineralischer Abdecksysteme die Bioturbation bisher kaum berücksichtigt wurde (s.a. /25/).

## **5.2 Erkenntnisse aus Vorhaben StSch4215**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens StSch4215 /8/ zur Entwicklung der Bleispurmethode wurden unter anderem Untersuchungen an der Halde Stolzenberg und der Nordhalde Lengenfeld durchgeführt. Die Ergebnisse der Modellierung der gewonnenen Daten für die Aufschlüsse dieser Objekte ließ erkennen, dass die Bioturbation einen Einfluss auf die Radondämmwirkung von Abdeckschichten ausüben kann. Diese Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden.

- Der Vergleich der Bleispuren der Aufschlüsse A84 und A85 auf der Halde Stolzenberg zeigt, dass sich im Falle einer etwa 80 cm mächtigen Abdeckung (A84) eine positive Bleispur entwickelt hat und eine Reduzierung der Radonexhalation erreicht wurde, hingegen im Falle einer etwa 40 cm mächtigen Abdeckung (A85) keine positive Bleispur ausgebildet war und das im darunter lagernden Haldenmaterial generierte Radon in die Atmosphäre exhalieren konnte. Die Modellierung der Untersuchungsergebnisse ergab für die Abdeckung im Aufschluss A84 eine um fast um Faktor 2 geringere Diffusionslänge als im Aufschluss A85. Die beiden Standorte der Aufschlüsse unterscheiden

sich im Wesentlichen durch die Ausbildung der Durchwurzelung. Das Abdeckmaterial ist im Aufschluss A85 vollständig und im Aufschluss A84 nur in den obersten 30 cm durchwurzelt. Es wurde geschlußfolgert, dass die geringere Diffusionslänge im Aufschluss A84 eine Folge der geringeren Durchwurzelung ist.

- Die Untersuchungsergebnisse des Aufschlusses A78 (Tailings stehen direkt an der Oberfläche an) auf der Nordhalde in Lengenfeld zeigen, dass bis zu einer Tiefe von 0,5 m Radon gleichmäßig stark aus den Tailings migrieren kann (deutlich negative Bleispur), während unterhalb von 0,5 m die negative Bleispur nicht so deutlich ausgeprägt ist. Als mögliche Ursache könnte die Durchwurzelung der obersten Tailingschichten angesehen werden. Die Wurzeln erstreckten sich bis zu einer Tiefe von 0,5 m. Der Pflanzenwuchs bewirkt eine Erhöhung des Emanationsvermögens, da durch die Wurzeln Körner aufgeschlossen werden und somit die insgesamt für die Emanation wichtige Oberfläche vergrößert wird. Dies wird durch die in Abhängigkeit von der Tiefe ermittelten Emanationskoeffizienten bestätigt, die im Aufschluss mit Abnahme der Aufschlusstiefe zunahm. Der für den Schurf A78 festgestellte Tatbestand einer erhöhten Radondurchlässigkeit von durchwurzelttem Tailingsmaterial wurde auch für die Aufschlüsse A77 und A79 festgestellt.

Aus den Ergebnissen wurde geschlußfolgert, dass die Durchwurzelung die Radonmigration signifikant beeinflusst. Durch die Wurzelkanäle werden möglicherweise zusätzliche Wegsamkeiten für den Radontransport gebildet. Des weiteren deuten experimentelle Ergebnisse darauf hin, dass durch die Pflanzen Körner aufgeschlossen werden, so dass in der Konsequenz auch das Emanationsvermögen des abgelagerten Materials erhöht wird.

### 5.3 Ergebnisse weiterer Untersuchungen

Untersuchungen zu Alterungsprozessen an Abdeckschichten von Deponien wurden u.a. in /26/ und /27/ durchgeführt, wobei z.B. eine zweischichtige Abdeckung aus 0,1 m - 0,2 m rekultivierbarem Oberboden über 0,8 m - 0,9 m mineralischer Abdeckschicht betrachtet wurde. Es wurde festgestellt, dass aufgrund der äußeren Einflüsse (Witterung, Pflanzen, Tiere) in der Abdeckung Prozesse der Gefügebildung aktiviert werden, die innerhalb weniger Jahre die Erhöhung der Permeabilität der Abdeckschicht um bis zu 3 Zehnerpotenzen bewirken. In diesem Zusammenhang vermindert sich die Stauwasserbildung und der Wassereintrag in die Halde kann ansteigen.

Als Fazit der Untersuchungen in /24/ wird formuliert, dass mittel- und langfristig bei den Haldenabdeckungen im Winterhalbjahr und nach Starkregen mit erheblichem Wassereintrag in die Halde zu rechnen ist, hingegen in Trockenperioden die Wassersättigung der Abdeckschicht sinkt, so dass erhebliche diffusive und konvektive Radonausträge, insbesondere entlang der Schrumpfrisse, ebenfalls erwartet werden können.

Im Rahmen von /28/ standen Untersuchungen der unterschiedlichen Einflussfaktoren auf das Bodenradonpotential, welches hier als die qualitative Abschätzung von Radonemanation, -migration und -exhalation am Standort definiert wurde. Dabei bildete der Vergleich von natürlichen und städtischen Standorten den Schwerpunkt der Untersuchungen, die auf der Bestimmung der Radonkonzentration, der Bodenfeuchte, der Gaspermeabilität und der spezifischen Aktivität von Ra-226 im Boden bzw. anhand von Bodenproben basierten. Es wurde festgestellt, dass das Bodenradonpotential vor allem von der Lithologie am Standort abhängt, wobei die topographische Situation, die sich in der Ausbildung unterschiedlicher Bodentypen manifestiert, besonders auf natürlichen Standorten von großer Bedeutung ist.

Ebenso zeigte sich, dass anthropogene Einflüsse das Bodenradonpotential deutlich modifizieren. Des Weiteren wurden die indirekten Einflüsse der Vegetation auf die Radonkonzentration im Boden über meteorologische und bodenphysikalische Parameter diskutiert. Sie basierten auf der Bestimmung der Radonkonzentration im Boden im Bereich von einzelnen freistehenden Bäumen. Es zeigte sich, dass die Ra-

donkonzentration mit zunehmender Entfernung vom Baum ansteigt und in ca. 10 - 12 m die für den Standort typischen Hintergrundwerte erreichte. Dabei wurde festgestellt, dass der Einflussbereich des Baumes deutlich größer als der Kronenradius ist.

Parallel dazu wurde festgestellt, dass die Bodenfeuchte mit abnehmender Entfernung vom Baum sinkt und die Gaspermeabilität ansteigt. Es wurde gezeigt, dass die Gaspermeabilität in Wäldern am höchsten ist und dort mit einer niedrigen Radonkonzentration im Boden korrespondiert. Der Einfluss der Vegetation auf das Radonpotential des Bodens anhand der vorbeschriebenen Untersuchungsmethodik wird in /29/ ausführlicher diskutiert wobei qualitativ gleiche Untersuchungsergebnisse dargestellt werden.

Am Beispiel der Burrell, Pennsylvania, Deponie (disposal cell) für mit Tailings der Uranerzaufbereitung kontaminierten Boden wurden Untersuchungen zur Bestimmung der gegenwärtigen und zukünftigen Langzeiteffekte des Eindringens von Pflanzenwurzeln und der Pflanzenentwicklung auf die Abdeckschicht und den Ablagerungskörper durchgeführt /30, 31/. Die Untersuchungen basieren dabei auf Feldmessungen von Parametern zur Beurteilung der Radondiffusion und der Wasserinfiltration die auf Standorten mit und ohne Bewuchs auf der Deponie und einer Vergleichsfläche realisiert wurden.

Wesentliche für das vorliegende Projekt relevante allgemeine Aussagen der Studien sind:

- Pflanzenwachstum, Wurzelwachstum und Bodenentwicklung in der Abdeckschicht sind unvermeidbar. Oberflächenabdeckungen aus Steinen reduzieren die Evaporation, Erhöhen den Bodenwassergehalt und bilden die Basis für tiefwurzelnende Pflanzen. Pflanzenbewuchs und Wurzelwachstum kann nur durch aktive Unterbindung der natürlichen Sukzession kontrolliert werden.
- Die Radonexhalationsraten werden im Laufe der Zeit mit durch die Pflanzensukzession bedingter Verminderung der Bodenfeuchte und Erhöhung der Gaspermeabilität ansteigen. Die Effektivität der Radonbarriere wird wesentlich dadurch bestimmt, dass sie aus verdichtetem Material besteht. Die Prozesse der Bodenbildung werden zu einer Auflockerung führen, so dass die

der Bodenbildung werden zu einer Auflockerung führen, so dass die Radonbarriere radon-durchlässiger wird. Für die Burrell, Pennsylvania, Deponie mit einer Radonbarriere von 0,9 m Mächtigkeit wurde ermittelt, dass unter der Maßgabe gleichbleibender klimatischer Bedingungen, die Radonexhalationsrate über einen Zeitraum von 200 - 1000 Jahren den Bemessungswert von 20 pCi/m<sup>2</sup>s nicht übersteigen wird /30, 31/.

- Die Bildung von Makroporen in der Radonbarriere ist der unerwünschteste Effekt des Wurzelwachstums. Pflanzenwurzeln, Regenwurmgänge und Bodengefügeentwicklung kreieren präferentielle Fließwege in der Radonbarriere und verursachen damit eine deutliche Erhöhung der Durchlässigkeit.

## 6 Arbeitshypothesen für die Untersuchungsmethodiken

Aus der durchgeführten Literaturrecherche und den eigenen experimentellen Untersuchungen von IAF - Radioökologie GmbH und der WISMUT GmbH wurden für die zu konzipierenden experimentellen Arbeiten folgende Arbeitshypothesen formuliert:

- Wurzelkanäle in mineralischen Abdeckungen bieten möglicherweise zusätzliche Wegsamkeiten für den Radontransport,
- Wurzeln verändern das Bodengefüge durch Aufschluss von Bodenpartikeln, führen zur Auflockerung des Bodens und bewirken damit eine Erhöhung des Emanationsvermögens von Boden bzw. der abgelagerten Materialien,
- Wurzeln beeinflussen den Bodenwasserhaushalt und die Wassersättigung des Porenraumes und damit auch den für den Radontransport bedeutsamen effektiven Diffusionskoeffizienten,
- die Tätigkeit der Bodenorganismen trägt zur Gefügeveränderung bei und beeinflusst so indirekt den Radontransport im Boden.
- Die Etablierung von Fauna in Abdecksystemen führt zur Bildung von Grobporensystemen und erhöht die Variabilität der Radontransporteigenschaften der Abdecksysteme.

Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes war es, die vorgenannten Arbeitshypothesen zu prüfen und somit Rückschlüsse auf den Einfluss der Bioturbation auf den Radontransport in Böden bzw. Abdeckungen zu ziehen. Angestrebt war dabei sowohl eine qualitative als auch quantitative Betrachtung der Problematik, um Aussagen hinsichtlich der Dimensionierung von Abdeckungen treffen zu können.

## **6.1 Aufschlussarbeiten und begleitende Messungen**

Den Schwerpunkt der Untersuchungen bildete die Anwendung der Bleispurmethode an Abdecksystemen, die ein Alter von mindestens 10 Jahren aufweisen.

### **6.1.1 Allgemeine Vorgehensweise**

Untersuchungen der Bleispur bedingen die Entnahme von ungestörten Bodenproben und deren gammaspektrometrische Analyse im Labor vor allem hinsichtlich der Radionuklide Ra-226 und Pb-210.

Die dazu erforderlichen Aufschlussarbeiten wurden in Form von manuellen Schürfen durchgeführt. Die Untersuchungsobjekte wurden im Rahmen der Bearbeitung des Moduls 1 ausgewählt (s.a. Abschnitt 8). Die genauere Festlegung der Aufschlussansatzpunkte erfolgte z.T. durch eine Vorsondierung mit Handsonden bzw. durch Radonmessungen in der Bodenluft und Messungen der Radonexhalation. Die jeweilige Aufschlusstiefe ergab sich aus den örtlichen Gegebenheiten und der Maßgabe, dass maximal 0,30 m des radongenerierenden Mediums (Haldenmaterial oder Tailings) beprobt werden sollten. Die Beprobung der Aufschlüsse wurde in der Regel in Intervallen von 0,05 m vorgenommen.

Die Aufschlüsse wurden mittels GPS eingemessen und fotografisch dokumentiert. Ebenso wurden Schichtenverzeichnisse in Anlehnung an DIN 4312 erstellt sowie das Wurzelbild der Aufschlüsse erfasst. Die Probenahme wurde durch folgende Standarduntersuchungen begleitet:

1. Zur Erfassung der Radongeneration und des -transports
  - spezifische Aktivität relevanter Radionuklide (Ra-226, Pb-210, U-238, Th-232) durch gammaspektrometrische Analyse von Bodenproben,
  - Emanationskoeffizient durch Laboruntersuchungen von Bodenproben,
  - Radonkonzentration in der Bodenluft (Tiefenprofile),
  - Radonexhalation mittels Boxmethode.

## 2. zur Charakterisierung der Bodeneigenschaften

- Bodenfeuchte,
- Bodentemperatur,
- Lagerungsdichte,
- Gaspermeabilität,
- Saugspannung (stichprobenartig),
- Körnungsanalyse.

## 3. Zur Charakterisierung der Bioturbation

- Wurzelbild,
- Bodenprofile im Schurf.

Die Untersuchungen erfolgten entsprechend eines Stufenprogramms, wobei im Rahmen einer ersten Mess- und Probenahmekampagne ein reduziertes Untersuchungsprogramm durchgeführt wurde und erst nach der gammaspektrometrischen Analyse der gewonnenen Feststoffproben bei interpretierbaren Ergebnissen eine zweite, umfassendere Mess- und Probenahmekampagne am entsprechenden Standort erfolgte.

### 6.1.2 Eingesetzte experimentelle Verfahren

#### 6.1.2.1 Bestimmung der Emanationskoeffizienten

Der Emanationskoeffizient  $E$  gibt an, welcher Anteil des Rn-222 aus dem Zerfall des Ra-226 in den offenen Porenraum gelangt und zur Migration zur Verfügung steht. Bezüglich der Bestimmung des Emanationskoeffizienten durch gammaspektrometrische Analyse von Proben wird auf die Methodik und die Erläuterungen in /8/ verwiesen. Der Emanationskoeffizient wird mit Hilfe der Beziehung

$$E = \frac{Z_e - Z_d}{Z_e} \quad (2)$$

ermittelt. Hier ist  $Z_e$  die Zählrate der 351,9 keV  $\gamma$ -Linie, die sich nach einer Anklingzeit von ca. 30 Tagen ergibt. Die Zählrate  $Z_d$  wird bestimmt, nachdem die Probe bei etwa 107° C über einen Zeitraum von 24 Stunden getrocknet wurde, um den größten Teil des emanieren Rn-222 aus der Probe auszutreiben. Alternativ kann der Emanationskoeffizient mittels

$$E = \frac{A_{\text{Ra}} - A_{\text{Rn}}^d}{A_{\text{Ra}}} \quad (3)$$

bestimmt werden, wobei  $A_{\text{Ra}}$  die spezifische Aktivität von Ra-226 und  $A_{\text{Rn}}^d$  die spezifische Rn-222-Aktivität der getrockneten Probe darstellen.

Wie die Untersuchungen in /8/ zeigten, reicht es unter Umständen nicht aus, den Emanationskoeffizienten nur einmal zu bestimmen, da bei gleichem Substrat systematische Veränderungen auftreten können. Aus diesem Grund wurden von allen Proben eines Tiefenprofils die Emanationskoeffizienten nach oben genanntem Verfahren bestimmt.

#### 6.1.2.2 Bestimmung der Radonkonzentration in der Bodenluft

Für die Bestimmung der Radonkonzentration in der Bodenluft wurde ein Messgerät vom Typ MARKUS-10 verwendet. Es besteht aus einer Schlagsonde, die in den Boden eingeschlagen wird bis die Öffnung in unteren Bereich der Sonde die gewünschte Tiefe der Bodenluftentnahme erreicht hat. Das batteriebetriebene Messgerät wird über eine Kupplung an die Sonde angeschlossen und pumpt nach dem Start des Gerätes ein bestimmtes Luftvolumen aus dem Boden. Die Pumpkapazität des Gerätes beträgt 1,8 l/min. Die effektive Pumpzeit beträgt etwa 30 s, so dass 0,9 l Bodenluft beprobt werden. Daraus ergibt sich, dass es sich um eine relativ lokale Messung der Radonkonzentration in der Bodenluft handelt. Mit einem Drucksensor wird während des Pumpvorganges intern der Unterdruck gemessen. Die untere Grenze beträgt 0,95 atm (96 kPa). In einem Boden mit geringer Gaspermeabilität oder hoher Wassersättigung des Porenraumes ist keine Messung möglich.

Die Bestimmung der Radonkonzentration erfolgt durch Messung des kurzlebigen Radon-Tochternuklids Po-218 mittels Halbleiterdetektor im Einkanalbetrieb (5,5 bis 6,5 MeV). Das Messgerät zeigt die Radonkonzentration in der Bodenluft in kBq/m<sup>3</sup> an. Die Messzeit nach der Probenahme beträgt 10 min. Die Messunsicherheit wird vom Hersteller mit etwa 10 % bei 50 kBq/m<sup>3</sup> angegeben.

Das Tiefenprofil der Radonkonzentration wurde ermittelt, indem die Sonde systematisch immer tiefer in definierten Abständen in den Boden eingeschlagen wurde. Zur effektiven Gestaltung des Messablaufes kamen mehrere Geräte vom Typ MARKUS-10 zum Einsatz. Um den Einfluss systematischer Geräteabweichungen auf das Tiefenprofil zu reduzieren, erfolgte eine spezielle Vergleichskalibrierung der eingesetzten Geräte unter definierten Bedingungen. Der Anzeigewert des jeweiligen Gerätes wurde mit dem gerätespezifischen Kalibrierfaktor korrigiert.

Da das Messverfahren zur Bestimmung der Bodenradonkonzentration in der Regel nur den Momentanzustand (vgl. auch Abschnitt 4.2) widerspiegelt, sind die Messwerte im Zusammenhang mit der Bleispurmethode, die über sehr lange Zeiträume integriert, als Zusatzinformation anzusehen.

### 6.1.2.3 Bestimmung der Radonexhalation

Zur Messung der Radonexhalationsrate wurde an den jeweiligen Messpunkten Anreicherungsboxen 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. Als Radon-Monitor diente das Messgerät AlphaGUARD, wobei 2 unterschiedliche Messverfahren zum Einsatz kamen:

- das Umwälzverfahren, bei dem sich das Messgerät außerhalb der Anreicherungsbox befindet und die Umwälzung der Luft von der Anreicherungsbox in die Messkammer durch eine Pumpe realisiert wird,
- das Diffusionsverfahren, bei dem sich das Messgerät innerhalb der Anreicherungsbox befindet und das <sup>222</sup>Rn auf diffusivem Wege über ein großflächiges Glasfaserfilter, das die Radonfolgeprodukte zurückhält, in die Ionisations-

kammer gelangt. Zu bemerken ist, dass auch in diesem Fall wahlweise eine Pumpe eingesetzt wird. Dies ist vor allen erforderlich, wenn die Radonkonzentration in der Box in wenigen Minuten stark ansteigt (z.B. infolge von Konvektion).

Eine schematische Darstellung der beiden Messanordnungen zeigt Abbildung 3.

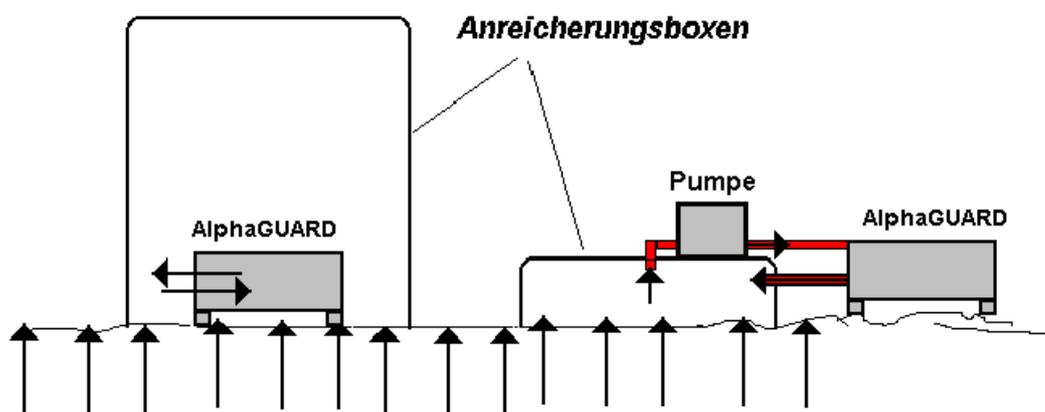


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Diffusions- und Umwälzmessverfahrens

Das Verfahren zur Bestimmung der Radonexhalation ist als komplexer Vorgang zu betrachten, der durch Messungen der ODL, der Boden- und Lufttemperatur, der Radonkonzentration im Boden, des Luftdrucks, der Luftfeuchte, usw. ergänzt wird. Ohne die genannten Zusatzinformationen bleiben die Messergebnisse schwer interpretierbar. Generell spiegeln Messwerte der Radonexhalation nach diesem Standardverfahren in der Regel nur den Momentanzustand (vgl. auch Abschnitt 4.2) wider und sind ebenso wie die Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft im Zusammenhang mit der Bleispurmethode, die über sehr lange Zeiträume integriert, als Zusatzinformation anzusehen.

#### **6.1.2.4 Charakterisierung der Bodeneigenschaften**

Die nachfolgend aufgeführten Parameter dienen der Beurteilung des Zustandes des Bodens bzw. der mineralischen Schichten zum Zeitpunkt der Untersuchung. Sie charakterisieren z.T. Momentanzustände (z.B. Bodenfeuchte, Bodentemperatur) sowie auch mittelfristige als auch langfristige Zustände (z.B. Lagerungsdichte).

##### **6.1.2.4.1 Bodenfeuchte**

Die Bestimmung der Bodenfeuchte erfolgte gemäß DIN ISO 11465 im Labor und parallel mit einer TDR (time domain reflectometry) - Sonde in Verbindung mit dem Messgerät PL-300 im Feld. Das Messprinzip der Feldmessung beruht auf der Absorption elektromagnetischer Wellen von der Feuchte eines porösen Körpers (Boden). Die verwendete TDR-Sonde wird am Messgerät PL-300 angeschlossen. Für genauere Messungen muss eine spezielle Kalibrierung für unterschiedliche Bodenzusammensetzungen erfolgen. Eine solche Kalibrierung erfolgte im Rahmen dieses Messprogramms nicht, so dass systematische Abweichungen zur Laborbestimmung des volumetrischen Wassergehaltes an entnommenen Proben auftreten können. Die Messung der Bodenfeuchte erfolgte an der Oberfläche der Abdeckung (begleitend zur Exhalationsmessung) und in einem Bohrloch in verschiedenen Tiefen.

##### **6.1.2.4.2 Bodentemperatur**

Die Bodentemperatur wurde vor Ort mit einem Bodenthermometer (Einstechthermometer mit Thermoelement-Messfühler) ermittelt. Die Messunsicherheit beträgt 0,1 °C. Dabei wurden Tiefenprofile in Intervallen von überwiegend 0,1 m aufgenommen, da sich in Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen und der Tageszeit ein bestimmtes Temperaturprofil einstellt. Dieses Temperaturprofil ist auch von der Wärmeleitfähigkeit der Bodenschicht (Humusschicht) abhängig.

##### **6.1.2.4.3 Lagerungsdichte**

Zur Bestimmung der Lagerungsdichte wurde die Ausstechzylinder-Methode gemäß DIN 18125-2, sofern aufgrund der standortspezifischen Gegebenheiten möglich, eingesetzt.

#### 6.1.2.4.4 Gaspermeabilität

##### 6.1.2.4.4.1 Bestimmung mittels Schlagsonde

Für die Bestimmung der Gaspermeabilität wurde ein Verfahren eingesetzt, dass in Abbildung 4 schematisch dargestellt ist. Eine Schlagsonde mit aufgesetzter Spitze wird zunächst in den zu untersuchenden Boden eingeschlagen. Die Spitze, die im Erdboden verbleibt, wird anschließend mittels eines in das Sondenrohr eingebrachten Stabes noch etwa  $L = 5$  cm weiter in den Boden getrieben, so dass ein aktives Volumen  $V_a = L \cdot \pi \cdot d^2 / 4$  zur Bodenluftentnahme entsteht.

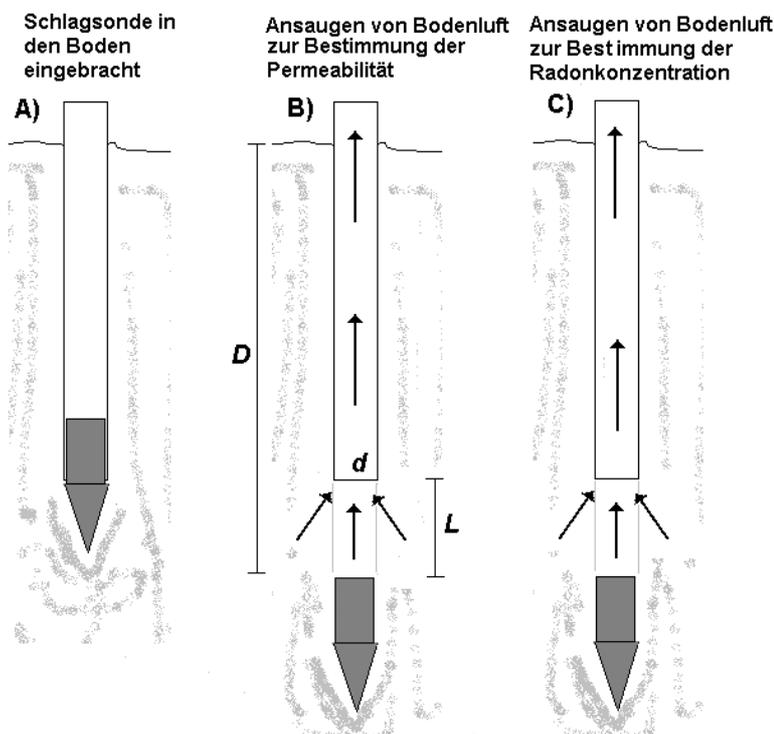


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Herangehensweise für die Messung der Permeabilität des Bodens und der Radonkonzentration in der Bodenluft mit Hilfe einer speziellen Schlagsonde

Die Bodenluft wird bei konstantem Unterdruck angesaugt und aus der Zeit, die notwendig ist, ein bestimmtes Volumen Bodenluft zu sammeln, die Permeabilität  $k$  bestimmt [32]. Bei diesem Verfahren wird ein relativ großer Unterdruck ( $> 100$  Pa) er-

zeugt, so daß in der ungesättigten Bodenzone im Porenraum Wasserbewegungen induziert werden können, die letztlich eine geringere Gaspermeabilität vortäuschen könnten.

Der Zusammenhang zwischen Permeabilität und Saugzeit ist in Abbildung 5 dargestellt, wobei sich die Permeabilität näherungsweise aus  $k \approx 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s/t}$  ergibt, wenn die Zeit t in Sekunden angegeben wird. Für gering permeable Böden, wie z.B. schluffiger Ton, dauert die Saugzeit bis etwa 30 Stunden.

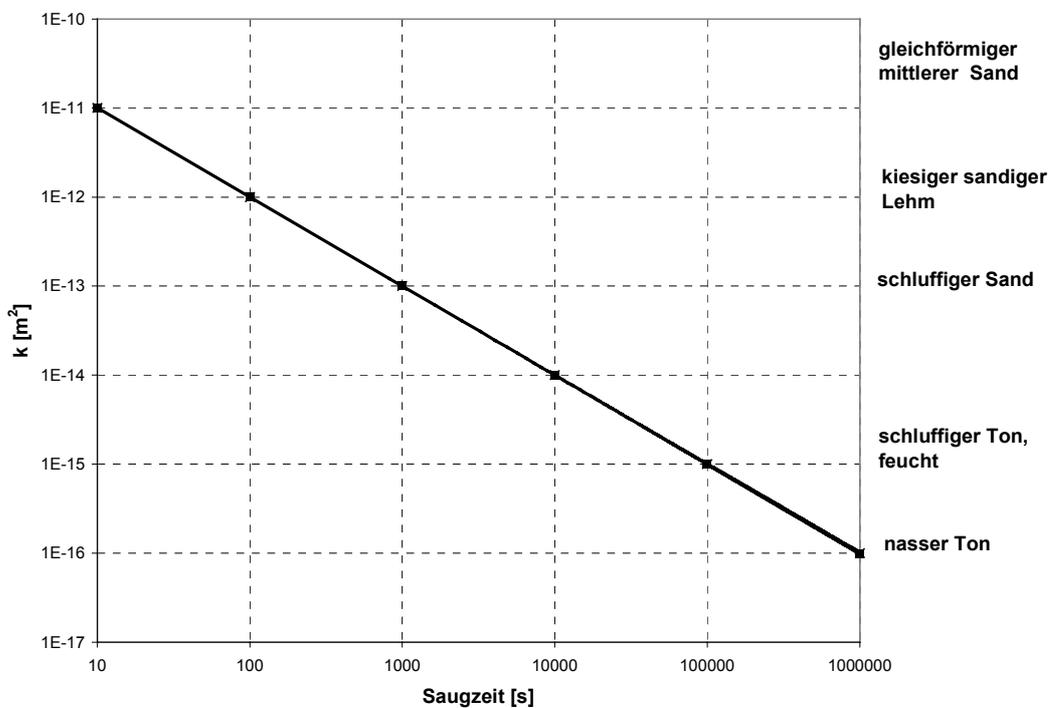


Abbildung 5: Bodenpermeabilität als Funktion der Saugzeit /32/

#### **6.1.2.4.4.2 Bestimmung mittels Lanzensonde**

Zur Bestimmung der Gaspermeabilität des Bodens wurde alternativ ein Feldmessgerät zur Bestimmung der pneumatischen Leitfähigkeit vom Typ PL-300 eingesetzt. Das Messprinzip beruht auf der Darcy-Gleichung, d.h. der Proportionalität zwischen der Fließgeschwindigkeit der Luft im porösen Körper (Boden) und dem Druckgradienten über die Fließstrecke.

Das PL-Messgerät realisiert entsprechende Strömungsformen in dem zu untersuchenden Boden mit unterschiedlichen Messsonden:

- Kammersonde für den Einsatz an Bodenoberflächen,
- Lanzensonde für Messungen in verschiedenen Bodentiefen.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes kam die Lanzensonde zum Einsatz. Sie wird in einer speziell vorbereiteten Bohrung in der gewünschten Tiefe installiert und mit einem Packer abgedichtet. Der Sondendurchmesser beträgt 20 mm und der Radius der Drucksondierung ebenfalls 20 mm. Das an die installierte Lanzensonde angeschlossene Messgerät ermöglicht die Einstellung eines bestimmten Volumenstroms, der über eine Druckmessdrossel (Druckdifferenz über einer kalibrierten Strömungsdrossel) ermittelt wird. Der Volumenstrom wird so lange geregelt bis sich ein konstanter Messdruck entsprechend der Gaspermeabilität des Bodens eingestellt hat. Der Messdruck ist konstant und beträgt etwa 1 hPa. Der Messdruck im durchströmten Bodenvolumen erreicht damit nur einige mmWs. Die Einstellzeit beträgt etwa 2 s. Das Gerät ist so konstruiert, dass bei den eingebauten Drucksensoren nur ein bestimmter Messbereich erfasst werden kann. Dieses Messprinzip ermöglicht die Bestimmung einer „lokalen“ Gaspermeabilität. Durch systematische Erhöhung der Bohrungstiefe und Nachinstallation der Lanzensonde konnte das Tiefenprofil der Gaspermeabilität in der Abdeckschicht ermittelt werden.

#### **6.1.2.4.4.3 Bestimmung mittels Stechzylinderproben im Labor**

An ausgewählten Proben erfolgte eine Ermittlung der Gaspermeabilität an Stechzylinderproben (Außendurchmesser 100 mm), die im senkrechten Profil eines Schurfs entnommen wurden. Die Messungen der Gaspermeabilität erfolgten im feuchten Zustand (Entnahmezustand der Probe). Zur Identifikation von Trocknungsprozessen im Verlauf der Laboruntersuchungen wurden die Proben im Anlieferungszustand und vor der Durchströmung gewogen. Zur Bestimmung der Gaspermeabilität wurden die Proben in den Probenahmezylindern in eine Durchströmungsapparatur zwischen zwei gasdichten Anschlussstücken eingebaut und mit trockener Luft durchströmt. Die Druckdifferenz über der Probe wurde mit einem Nadelventil eingestellt. Für jede Druckstufe wurde die Volumenstrommessung wiederholt. Die Durchflussmenge wurde mittels Seifenblasenmessgerät bestimmt. Um den Einfluß des Strömungsdrucks auf die Gaspermeabilität gering zu halten, wurde der Strömungsdruck im Bereich von 100 Pa bis 4300 Pa (Größenordnung von Luftdruckschwankungen) in 5 Druckstufen untersucht. Aus der Ermittlung der Gaspermeabilität für unterschiedliche Druckgradienten ist die Identifikation des Einflusses von Turbulenzeffekten (Turbulenzkorrektur) und von Gleiteffekten des Strömungsmediums an den Porenwänden (Klinkenberg-Korrektur) möglich.

Die Gaspermeabilität der untersuchten Proben wird durch den wassergefüllten Anteil des Porenraumes geprägt. Die so ermittelte Gaspermeabilität charakterisiert somit den Zustand unter den momentanen Bedingungen (Bodenfeuchte) bei der Probenentnahme im Feld.

#### **6.1.2.4.5 Saugspannung**

Die Saugspannung (Tension) des Bodens wurde mit einem elektronischen Tensiometer gemessen. Es handelt sich um eine Stabsonde, die aus einem Keramik-Hohlzylinder, einem wassergefüllten Standrohr und einem Drucksensor besteht. Die Keramik wurde so in den Boden installiert, dass sie mit dem Boden einen allseitig guten Kontakt hatte. Im ungesättigten Zustand des Bodens diffundiert Wasser aus der Sonde in den Boden bis entsprechend der Saugspannung ein Gleichgewichtszu-

stand erreicht ist. Mit einem elektrischen Drucksensor wurde der Unterdruck in kPa gemessen (Anschluss des verwendeten Tensiometers an das Meßgerät PL-300).

Für jede Bodenart (Lehm, Ton, Sand, u.a.) bzw. Porosität besteht ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen der Saugspannung und dem volumetrischen Wassergehalt, der als pF-Kurve oder Saugspannungs-Sättigungskurve bezeichnet wird.

Die Saugspannung (Matrixkraft) eines Bodens, die der Schwerkraft des Wassers entspricht wird als Feldkapazität (80 hPa = pF 1,8) bezeichnet. Die Saugspannung, die dem permanenten Welkepunkt (1,5 MPa = pF 4,2) entspricht, gibt an, welches Wasser die Pflanzen nicht mehr entnehmen können. Die Differenz zwischen Feldkapazität und permanentem Welkepunkt ist das Wasser, daß den Pflanzen zur Verfügung steht.

#### **6.1.2.4.6 Körnungsanalyse**

Die Körnungsanalyse wurde gemäß DIN 18123 für ausgewählte Proben durchgeführt.

#### **6.1.3 Bioturbation**

Generell wurde bei allen Aufschlüssen die am Standort angetroffene Vegetationsform bestimmt und die im Feld erkennbaren Aktivitäten der Bodenlebewelt dokumentiert. Besondere Aufmerksamkeit wurde der Erfassung des Wurzelbildes gewidmet, da aufgrund der Untersuchungen zu /8/ (vgl. Abschnitt 5.2) vermutet wird, dass die Radonexhalation bzw. der Radontransport im Boden mit steigender Durchwurzelungsintensität zunimmt.

Die Aufnahme des Wurzelbildes erfolgte gemäß Profilwandmethode (Auszählen der im Aufschluss vorhanden Wurzeln am Stoß, vgl. /33/) im Raster von 0,1 x 0,1 m.

Die Wurzeln wurden dabei in Anlehnung an /34/ in Abhängigkeit ihres Durchmessers in folgende Kategorien eingeteilt:

- Feinstwurzeln < 1 mm,
- Feinwurzeln 1 - 2 mm,
- Schwachwurzeln 2 - 5 mm,
- Grobwurzeln 5 - 20 mm,
- Derbwurzeln 20 - 50 mm,
- Starkwurzeln > 50 mm.

Die vor Ort gewonnenen Daten wurden in Häufigkeitsdiagrammen dargestellt.

## 6.2 Gammasspektrometrische Analyse - Bestimmung der Bleispur

Voraussetzung für die Gewinnung von Untersuchungsergebnissen ist die möglichst genaue Bestimmung des Pb-210-Überschusses oder -Defizits in den gewonnenen Proben, d.h. die möglichst genaue Bestimmung der Aktivitätsdifferenz  $\Delta A$ :

$$\Delta A = A(\text{Pb} - 210) - A(\text{Ra} - 226) \quad (4)$$

Dies erfolgte mit Hilfe der Kompletten Gammasspektrometrie bei gleichzeitiger Bestimmung von Pb-210 und Ra-226, Radonzerfallsprodukten, U-238 und weiterer Nuklide. Die Messunsicherheiten lagen in der Regel bei  $\leq \pm 5\%$ , wobei u.a. Matrixeffekte/Selbstabsorption sowie die Füllhöhe des Probengefäßes bei der Beurteilung der Messergebnisse zu beachten waren.

Für jede  $\gamma$ -Linie des Spektrums gilt [35, 36]

$$A \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right] = \frac{N}{\varepsilon \cdot p \cdot T \cdot M \cdot k_n} \text{TF} \quad , \quad (5)$$

mit

N: Peakinhalt,

T: Messzeit in sec,

$\epsilon$ : Detektoreffektivität,

p: branching (Anteil des  $\gamma$ -Übergangs),

M: Masse der Probe,

TF: Trockenfaktor (Frischmasse zu Trockenmasse),

$k_n$ : Korrekturfaktoren für Summationseffekte, Selbstabsorption, Füllhöhe.

Aufgrund langjähriger Erfahrungen auf dem Gebiet der Gammaskpektrometrie wurden weiterhin folgende Parameter für die Messungen festgelegt:

- Messzeit/Probe: > 3 Std.,
- Matching im Spektrum (Linienpaare) bei der Auswertung der Analyseergebnisse,
- Berücksichtigung der Selbstabsorption (Dichte und mittlere Kernladungszahl),
- Berücksichtigung der Füllhöhe der Marinelli-Becher,
- Wiederholungsmessungen an unterschiedlichen Messplätzen.

### **6.3 Versickerungsversuche mit Tracerflüssigkeit**

Versickerungsversuche mit Tracerflüssigkeit bieten die Möglichkeit der Visualisierung der Sickerwege und im Zusammenhang damit der Einstufung dieser entsprechend ihres Ursprungs (z.B. Versickerung entlang von Schichtgrenzen, Wurzelkanälen, Tierkanälen). Damit ist es möglich, auch einen Beweis dahingehend anzutreten, ob Wurzelkanäle und Tiergänge präferentielle Fließwege für Radon darstellen. Aus diesem Grund wurden Versickerungsversuche mit Tracerflüssigkeit nachträglich in das Untersuchungsprogramm aufgenommen.

Die Versickerungsversuche wurden gemäß folgender 5-stufiger Vorgehensweise realisiert:

1. Entfernen der oberirdischen Pflanzenteile,
2. Aufsetzen und Eindrücken eines "Führungsringes" für die Tracerflüssigkeit, Grundfläche ca. 0,5 m<sup>2</sup>,
3. Aufgabe der Tracerflüssigkeit in den "Führungsring",
4. Anlegen eines Bodenprofils am Rand des Versickerungsbereiches der Tracerflüssigkeit nach einer in Abhängigkeit vom jeweiligen Standort festgelegten Wartezeit und fotografische Dokumentation des Fließmusters,
5. horizontales bzw. vertikales Abtragen des Bodens im Versickerungsbereich in Abständen von (10 - 20) cm ausgehend von dem gemäß Punkt 4 angelegten Bodenprofil und fotografische Dokumentation des Fließmusters.

Als Tracer wurde Vitasyn Blau AE 85 der Fa. Clariant GmbH Frankfurt/Main eingesetzt, wobei die Konzentration des Tracers 3 - 4 g/l betrug. Bei diesen Konzentrationen ist eine Gefährdung von Flora oder Fauna ausgeschlossen, die gute Wahrnehmbarkeit der Tracerflüssigkeit im Abdeckmaterial/Boden jedoch garantiert (vgl. /37/ und /38/). Ausgehend von einem mittleren Porenvolumen von beispielhaft 300 l in 1 m<sup>3</sup> Boden/Abdeckmaterial wurden pro Versuch (30 - 40) l Tracerflüssigkeit eingesetzt. Dies entspricht etwa 10% des Hohlraumvolumens.

Die Wartezeit zwischen Aufgabe der Tracerflüssigkeit und Freilegen der Aufschlüsse wurde im Bereich von 2 - 30 h gewählt. Mit dieser Wahl der Sickerzeit war gegeben, dass vorhandene präferentielle Sickerwege im Boden durch die Tracerflüssigkeit markiert wurden, ein weites Fortschreiten der durch die Porosität des Bodens/der Abdeckung bedingten Sickerfront jedoch eher unwahrscheinlich war. Erhöht man die Sickerzeiten für derartige Versuche ist damit zu rechnen, dass je nach Zeitdauer, eine einheitliche Färbung des aufgeschlossenen Bodens durch die Tracerflüssigkeit erreicht wird.

#### 6.4 Tracergasversuche

Im Rahmen dieser Studie wurden erste orientierende Untersuchungen mit dem Tracergas SF<sub>6</sub> durchgeführt. Die Untersuchungen dienten zum einen dazu, direkte Informationen über die Konvektionsgeschwindigkeit zu erhalten und zum anderen die Gasdurchlässigkeit von Abdeckschichten insgesamt zu quantifizieren.

Hinsichtlich der Messung der Konvektionsgeschwindigkeit standen bisher nur indirekte Methoden zur Verfügung, die entweder auf der Messung der zeitabhängigen Radonexhalationsrate beruhten oder aus dem Anstieg der Radonkonzentration in der Sammelbox die Konvektionsgeschwindigkeit extrahierten. Mit der Aufgabe von Tracergas an einem bestimmten Punkt, z.B. am Haldenfuß, kann aus der Zeit, die das Tracergas bis zum Haldenplateau benötigt, die Konvektionsgeschwindigkeit sehr genau abgeschätzt werden. Diese Methode eignet sich insbesondere, wenn die Konvektionsgeschwindigkeit hoch ist, d.h. die Halde in wenigen Stunden durchströmt wird.

Die oben beschriebenen Methoden der Bestimmung von Gaspermeabilitäten können trotz wiederholter Messungen nur einen lokalen Überblick über die Gesamtpermeabilität geben. Es ist von großem Vorteil, in diesem Fall ebenfalls Tracergas einzusetzen, um damit die Gasdurchlässigkeit von Abdeckschichten im globaleren Maßstab zu testen und damit auch eine Vergleichsgröße zu haben, die Einzelmessungen einschätzen zu können.

Die Tracergasversuche wurden mit technischer Unterstützung (Tracergas-Gerätetechnik) des BfS Berlin durchgeführt.

Zunächst erfolgten entsprechende Machbarkeitsuntersuchungen in Berlin auf dem Gelände des BfS in einem Sandboden. Durch diese Untersuchungen konnte gezeigt werden (siehe Zwischenbericht), dass die Methode prinzipiell geeignet ist, den Transportprozess der Bodenluft näher zu charakterisieren. Die Untersuchungsergebnisse der Ausbreitung von SF<sub>6</sub> im Sandboden bei erzwungener Bodenluftströmung durch Luftinjektion in einen Gasbrunnen entsprachen einem konvektiven Gastransport. Zur Optimierung der Tracergasaufgabe erfolgten Untersuchungen an Sandsäu-

len. Hierbei zeigte es sich, dass zur Vermeidung von Sättigungs- und Absorptionseffekten nur mit geringen Tracergaskonzentrationen gearbeitet werden sollte.

Ein komplexes Tracergasexperiment zum Nachweis konvektiver Bodengasströmungen in Grobporensystemen in einer Abdeckschicht erfolgte auf der Altdeckung der IAA Dänkritz. Die entsprechenden Versuche wurden im Wurzelbereich von Bäumen durchgeführt. Die Injektion erfolgte dabei in die sandigen Tailings unterhalb der Abdeckung. Die Bodenluftentnahme erfolgte in verschiedenen Abständen von der Gasaufgabestelle in unterschiedlichen Tiefen in der Abdeckung.

Die Versuche wurden an zwei benachbarten Stellen am 2.07.2003 und 03.07.2003 durchgeführt. Es herrschten infolge einer relativ langen Trockenheit (geringe Bodenfeuchte) gute Versuchsbedingungen für die Demonstration eines konvektiven Bodenlufttransports. Die Tracergasversuche wurden durch Rn-Exhalationsmessungen und Permeabilitätsmessungen begleitet.

Ein weiteres Tracergasexperiment wurde an der Halde 124 durchgeführt.

## 6.5 Kornfraktionsexperimente

Die Hauptuntersuchungsmethode bezieht sich in der vorliegenden Studie auf die Bestimmung der teufenabhängigen Bleispur, um die relevanten Informationen über die Radonmigration extrahieren zu können. Für einzelne Bodenhorizonte werden Kornfraktionen mit dem Ziel untersucht, zusätzliche Informationen über den Radontransport und die Radongeneration bzw. Quellstärke einer Halde gewinnen zu können. Ausgehend von bereits vorliegenden ersten Untersuchungsergebnissen der Studie /8/ ist davon auszugehen, dass die Radonquellstärke einer Halde nicht durch die mittlere spezifische Ra-226-Aktivität, sondern eher durch den Feinkornanteil bestimmt wird. Es ist zu erwarten, dass bei Radonfreisetzungen durch Konvektion in Halden die Bleispur der Kornfraktionen charakteristische Merkmale aufweisen werden, die zeigen, ob das in den Porenraum emanierte Radon in der Nähe des Emanationsorts zerfällt oder durch konvektive Prozesse in das Kluftsystem der Halde transportiert wird und letztlich in die Atmosphäre gelangt. Es wird erwartet, dass die Kornfraktionen und ihre spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 die Tatsache wider-

spiegeln, dass der Haldenboden nach einer Lagerungszeit von wenigen Jahrzehnten noch nicht konsolidiert ist.

## 6.6 Pflanzcontainerexperiment

Das Pflanzcontainerexperiment war Gegenstand der Bearbeitung des Moduls 3 (vgl. /14/). Ziel war es, den Zusammenhang von Durchwurzelung und Radonexhalation im Labormaßstab zu simulieren. Eine ausführliche Darstellung der Methodik enthält der entsprechende Zwischenbericht /14/. An dieser Stelle wird die Vorgehensweise nur kurz dargelegt:

1. Versuchsaufbau: Mineralboden wurde über radongenerierendem Material in Pflanzcontainer (Fassungsvermögen von ca. 17 Litern) eingebaut. Als radongenerierendes Material fungierten Tailings (5 l je Pflanzcontainer). Zwischen Mineralboden und Tailingsmaterial wurde ein radondurchlässiges Fließ aufgebracht, um eine Durchwurzelung der Tailings und eine Vermischung von Tailings und Mineralboden zu verhindern. Es kamen je Pflanztopf ca. 12 Liter Mineralboden (handelsübliche Gartenerde mit einem vergleichsweise hohen Anteil organischer Substanz) zum Einsatz. Insgesamt wurden entsprechend der vorgenannten Verfahrensweise 10 Pflanzcontainer (C1 - C10) für den Versuch vorbereitet.
2. Ermittlung der Eingangsparameter:
  - Masse der Tailings und des Mineralbodens sowie die Gesamtmasse je Pflanzcontainer,
  - die Trockenfaktoren der Tailings und des Mineralbodens je Pflanzcontainer,
  - die spezifische Aktivität der Tailings.
3. Bepflanzung: In die Pflanzcontainer wurden Samen von 3 unterschiedlichen Pflanzenarten (Kapuzinerkresse, Dahlien, Sonnenblumen) eingesät. Es erfolgte eine regelmäßig dosierte Befeuchtung der Pflanzcontainer. Die Entwicklung der Pflanzen wurde beobachtet und Störeinflüsse auf den Verlauf

des Experimentes (Unwetter, Schädlingsbefall) umgehend beseitigt. Die Entwicklung der Pflanzen sowie aufgetretene Störungen des Experimentes wurden photographisch dokumentiert.

4. Messprogramm während des Versuches:

- Bodentemperatur (mittels Temperaturfühler in 2 repräsentativen Pflanzcontainern),
- Masse der Pflanzcontainer (mittels Wägung),
- Messung der Exhalationsrate.

5. Laboruntersuchungen/Messprogramm nach Abschluss des Versuches:

- Entfernung der oberirdischen Pflanzenteile von den Pflanzcontainern,
- Separation von Tailings und Mineralboden, wobei von dem Material aus den untersten 5 cm über dem Flies je Pflanzcontainer 2 Proben zur gammaspektrometrischen Analyse entnommen wurden,
- Bestimmung der Trockenfaktoren von Tailings und Mineralboden,
- Separation der Wurzeln aus dem Mineralboden und photographische Dokumentation,
- Bestimmung der Wurzelmasse, des Wurzelvolumens und der Wurzelichte.

## **7 Umfang der erbrachten Leistungen**

### **7.1 Aufschlussarbeiten und begleitende Messungen**

Die Aufschlussarbeiten und begleitenden Messungen erfolgten im Rahmen der Bearbeitung der Module 2.1 (Sommerperiode) und 2.2 (Herbstperiode). Insgesamt wurden 35 Bodenprofile in 32 Aufschlüssen auf 9 Untersuchungsobjekten angelegt und beprobt.

In Tabelle 1 sind die auf den jeweiligen Untersuchungsobjekten abgeteuften Aufschlüsse, ihre Gesamttiefe und die erkundete Abdeckmächtigkeit zusammenfassend dargestellt. Die Dokumentation der Aufschlüsse erfolgt in Anlage 1, Anlage 2 und Anlage 3. Aus Anlage 1 ist die Lage der Aufschlüsse auf den jeweiligen Untersuchungsobjekten ersichtlich. In Anlage 2 sind allgemeine Daten zum Aufschluss, die Fotodokumentation, das Wurzelbild und die Ergebnisse der gammaspektrometrischen Analyse (Bleispur) zusammengestellt. Anlage 3 enthält die Schichtenverzeichnisse der Aufschlüsse.

Tabelle 1: Übersicht über die durchgeführten Feldarbeiten

Objekt	Aufschluss Nr.	Gesamttiefe [m]	Abdeckmächtigkeit [m]
Schindlerschachthalde Schneeberg	Sch1	0,5	0,2
	Sch1a	0,85	0,2
	Sch2	0,35	0,2
	Sch3	0,35	0,2
	Sch4	0,3	0,1
	Sch5	0,5	0,3
Zeppelinschachthalde Annaberg	Sch6	0,5	0,45
	Sch7	0,5	0,45
	Sch8	0,45	0,2
	Sch9a	0,4	0,2
	Sch9b	0,45	0,35
	Sch10	0,6	0,05
Zentralschachthalde Johanngeorgenstadt	Sch11	0,45	0,35
	Sch12	0,4	0,1
	Sch13	0,35	0,25
	Sch14	0,35	0,25
	Sch15	0,35	0,2
Halde Haldenaufberei- tung Johanngeorgenstadt	Sch16a	0,9	0,05
	Sch16b	0,45	0,05
	Sch17	1	0,05
IAA Lengenfeld	Sch18	1,5	1,4
	Sch19	1,3	1,1
	Sch20	1	0,75
	Sch21	0,95	0,7
Nordhalde Lengenfeld	Sch22	1,1	0
	Sch23	1,3	0,25
	Sch24	1,55	0,5
IAA Dänkriz	Sch25	1,15	0,8
	Sch26	1	0,65
	Sch27	1,3	1
	Sch28	1,3	0,9
Halde Beerwalde	Sch29	1,85	1,65
	Sch30	1,7	1,5
Halde Tagebau Ronne- burg	Sch31	0,75	0,65
	Sch32	0,9	0,75

Die Beprobung der Aufschlüsse erfolgte in Intervallen von 0,05 m, wobei eine Beprobung über das gesamte Tiefenprofil vorgenommen wurde und dem entsprechend somit 553 Feststoffproben für die weitere Bearbeitung im Rahmen des Projektes zur Verfügung standen.

Aufschlussbegleitend wurden für Aufschlüsse

- das Tiefenprofil der Radonkonzentration in der Bodenluft,
- die Radonexhalation,
- die ODL,
- das Tiefenprofil der Bodenfeuchte, der Saugspannung und der Bodentemperatur

bestimmt. Die Gaspermeabilität des Abdeckmaterials wurde für die Aufschlüsse auf der IAA Dänkriz, der Halde Beerwalde und die Halde Tagebau Ronneburg bestimmt, die Lagerungsdichte für die Aufschlüsse auf der IAA Lengenfeld, der Nordhalde Lengenfeld und z.T. der IAA Dänkriz ermittelt.

Die Ergebnisse der aufschlussbegleitenden Messungen sind wesentlicher Bestandteil der Interpretation der Bleispuren und der Modellierung der Radontransportprozesse auf den jeweiligen Standorten. Auf sie wird in den folgenden Abschnitten noch besonders eingegangen.

## **7.2 Gammasspektrometrische Analyse und Bestimmung der Bleispur**

Von den im Rahmen der Aufschlussarbeiten gemäß Abschnitt 6.1 gewonnenen 553 Bodenproben wurden 506 mit dem Ziel der Ermittlung der Bleispur gammasspektrometrisch untersucht. Des Weiteren wurde die Bleispur an 26 im Rahmen der Versickerungsversuche gewonnenen Feststoffproben, an 86 im Rahmen des Kornfraktionsexperimentes gewonnenen Feststoffproben und an 10 Feststoffproben aus dem Pflanzcontainerexperiment bestimmt.

### 7.3 Versickerungsversuche mit Tracerflüssigkeit

Insgesamt wurden im Rahmen des vorliegenden Projektes 12 Versickerungsversuche (V1 - V12) durchgeführt. Einen Überblick über die den jeweiligen Standorten zuzuordnenden Versuche und den Zeitpunkt der Versuchsdurchführung gibt Tabelle 2. Die Versickerungsversuche wurden an ausgewählten Standorten (Versuche V8 - V11) noch durch eine tiefenabhängige Feststoffprobenahme zur Bestimmung der Bleispur im Abdeckmaterial ergänzt.

Tabelle 2: Übersicht über die Versickerungsversuche

Versuch Nr.	Standort	Realisierung am
V1	Wiese IAF	16.4.03
V2	Damm IAA Dänkritz	4.12./5.12.02
V3	Wiese IAF	17.04.03
V4	Collmberg	1.5./2.5.03
V5	Collmberg	1.5./2.5.03
V6	Halde B	15.5./16.5.03
V7	Halde B	15.5./16.5.03
V8	Nordhalde	26.5./27.5.03
V9	Nordhalde	26.5./27.5.03
V10	Collmberg	29.5./30.5.03
V11	Collmberg	29.5./30.5.03
V12	Collmberg	29.5./30.5.03

#### 7.4 Tracergasversuche

Die oben beschriebenen Verfahren zur Bestimmung der Gaspermeabilität charakterisieren die Hohlräume des Bodens (Poren) nur in einem sehr begrenzten Volumen, das durch die Untersuchungsmethode bedingt ist. Die so ermittelte Permeabilität wird in der Regel durch die Fein- und Mittelporen im Boden bzw. den nicht wassergefüllten Anteil des Porensystems bestimmt. Durch Experimente wurde jedoch nachgewiesen, dass die experimentell ermittelte Gaspermeabilität eines Bodens skalenabhängig ist. Es ist bekannt, dass sich im ungesättigten Zustand neben den Feinporen und Mittelporen auch Grobporensysteme im Boden ausbilden können, in denen ein bevorzugter Transport der Bodenluft über größere Entfernungen stattfindet. Die Bioturbation (Wurzeln, Regenwurmkanäle, Auflockerung des Bodens durch Tiergrabungen) verursacht insbesondere Grobporensysteme.

Mit einem Tracergas, das über eine Sonde (Injektionsbrunnen) für eine kurze Zeitdauer (Impuls) in den Boden injiziert wird, kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Tracers bis zu Bodengasentnahmesonden in Entfernungen von einigen Metern ermittelt werden. Dieses Tracergasverfahren eröffnet die Möglichkeit, unter Feldbedingungen die Permeabilität des Bodens im Wurzelbereich der Vegetation oder andere Einwirkungen der Bioturbation quasi zerstörungsfrei zu ermitteln. Hierzu wurde im Rahmen des Projektes eine spezielle Untersuchungsmethodik entwickelt.

Das Ziel bestand vor allem darin, den Nachweis zu erbringen, dass ein konvektiver Transport der Bodenluft (und damit des Radons) in relativ kurzen Zeiten (Stunden) über größere Entfernungen (einige m) im beeinflussten Boden (durch Bioturbation und Heterogenitäten im Substrat) stattfinden kann.

Als Tracergas wurde Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) verwendet. Um stationäre Strömungsverhältnisse zu erreichen, wurde das Tracergas einem konstanten Volumenstrom an Luft kurzzeitig zugemischt. Die Bodenluftentnahme erfolgte in verschiedenen Abständen vom Injektionsbrunnen. Unter Beachtung des zu erwartenden Strömungsprofils in einem homogenen porösen Medium von der Gasaufgabe in einer bestimmten Tiefe zur Bodenoberfläche, wurde die Entnahmetiefe mit zunehmendem Abstand verringert. Zur Erfassung der Tracergasfreisetzung aus der Bodenoberflä-

che wurde zusätzlich eine Anreicherungsbox (etwa 1 m<sup>2</sup> Grundfläche) in einem definierten Abstand von der Injektionsstelle auf den Boden aufgesetzt und beprobt.

Der Nachweis des Tracergases erfolgte mit einem Tracergasmessgerät der Firma Innova (akustischer Sensor) mit einer Nachweisgrenze von etwa 0,2 mg/m<sup>3</sup>. Ein Multiplexer ermöglichte die automatische, aufeinanderfolgende Beprobung der verschiedenen Messstellen, die über dünne Schläuche angeschlossen waren. Das Beprobungsintervall lag in der Größenordnung von einer Minute (abhängig von der größten Schlauchlänge).

Es wird bei diesem Verfahren die Zeitabhängigkeit der Tracergaskonzentration ermittelt und daraus die Laufzeit des Tracergas-Impulses bestimmt.

Insgesamt wurden folgende Versuche mit Tracergas durchgeführt:

- Prinzipienversuche am BfS zum Test der Untersuchungsmethodik, die auch Untersuchungen an Sandsäulen einschloss.
- Ein Feldversuch an der Halde 124 zur Bestimmung der Konvektionsgeschwindigkeit.
- Zwei Feldversuche am Damm der IAA Dänkritz zur Bestimmung der Gaspermeabilität der gesamten Abdeckschicht.

## 7.5 Kornfraktionsexperiment

Insgesamt wurden 7 Proben in unterschiedlichen Teufen der Zentralschachthalde Johannegeorgenstadt und der Halde am Schindlerschacht in Schneeberg entnommen, um Kornfraktionsbestimmungen durchzuführen. Diese Halden wurden deshalb ausgewählt, weil durch andere flankierende Untersuchungen, die im Rahmen dieses Projekts durchgeführt wurden, relativ belastbare Ergebnisse über die Radonfreisetzung vorlagen. Die Siebkornanalyse wurde für die Proben aus den Schürfen 3\_6 und 2\_5 vom Haldenfuß und Mittelhang der Halde am Schindlerschacht in Schneeberg entnommen. Die Beprobungstiefe betrug 30 bzw. 25 cm. Des Weiteren wurden Proben vom Haldenplateau (Probe 1\_7 und Probe 1\_6) in einer Beprobungstiefe von 35

bzw. 30 cm entnommen, d.h. die Proben stammen aus übereinanderliegenden Schichten.

Die anderen Proben wurden für die Schürfe 14 und 15 vom Plateau der Zentralschachthalde in 30 cm Tiefe (14\_6, 15\_6) und 35 cm Tiefe (14\_7) entnommen. Für den Schurf 14 sind Proben aus übereinanderliegenden Horizonten untersucht worden, um den Einfluss der sprunghaften Änderung der spezifischen Ra-226-Aktivität besser quantifizieren zu können. Einen Überblick über die entnommenen Proben gibt Tabelle 3.

Tabelle 3: Übersicht über die entnommenen Proben für Kornfraktionen

Objekt	Aufschluss Nr.	Gesamttiefe [m]	Abdeckmächtigkeit [m]	Entnahmetiefe der Kornfraktion [m]
Halde am Schindlerschacht, Schneeberg	Sch1a	0,85	0,2	0,3 und 0,35
	Sch2	0,35	0,2	0,25
	Sch3	0,35	0,2	0,3
Zentralschachthalde Johanngeorgenstadt	Sch14	0,35	0,25	0,3
	Sch15	0,35	0,2	0,3 und 0,35

## 7.6 Pflanzcontainerexperiment

Insgesamt wurden entsprechend der in Abschnitt 6.6 dargestellten Verfahrensweise 10 Pflanzcontainer (C1 - C10) für den Versuch vorbereitet. Die zu Beginn und nach Beendigung des Versuches ermittelten Parameter sind in Abschnitt 9.5 aufgeführt. Während des Versuches wurden periodisch die folgenden Parameter bestimmt:

- Bodentemperatur,
- Masse der Pflanzcontainer,
- Exhalationsrate.

## 8 Kurzcharakteristik der Untersuchungsobjekte

Die Vorbereitung der Auswahl geeigneter Objekte, die bereits vor mehr als 20 Jahren mit einer Bodenschicht abgedeckt wurden, erfolgte nach dem Studium der Unterlagen zum Altlastenkataster und Unterlagen von Wismut. Neben der Befahrbarkeit und der Begehbarkeit der zu untersuchenden Objekte waren vor allem folgende Aspekte für die Auswahl bedeutsam:

- die spezifische Ra-226-Aktivität der Radonquelle (unter Radonquelle wird hier das hauptsächlich radongenerierende Medium im Aufschluss verstanden) sollte möglichst deutlich höher als die der Abdeckung sein,
- möglichst geringe spezifische Ra-226-Aktivität (geogenes Niveau) der Abdeckung der Radonquelle,
- möglichst homogene Schichten,
- klare Schichtgrenzen,
- ungestörte Lagerung der Schichten seit ca. 30 Jahren.

Die beiden erstgenannten Aspekte ergeben sich aus der erforderlichen hohen Messgenauigkeit bei der Gammaskpektrometrie, um die Messzeiten für die einzelnen Feststoffproben in vertretbaren Grenzen zu halten. Die beiden nachgenannten Aspekte ermöglichen eine exakte Probenahme für die Bleispuranalyse und vermindern das Risiko von Fremdmaterial in den Proben.

Hinsichtlich der Mächtigkeit der Abdeckung wurde folgende Kategorisierung vorgenommen:

1. keine Abdeckung,
2. Abdeckung < 0,5 m mächtig,
3. Abdeckung 0,5 - 1 m mächtig,
4. Abdeckung > 1 m mächtig.

Wenn möglich sollten auf den einzelnen Objekten unterschiedliche Bewuchsformen untersucht werden, wie z.B. Grünland, Grünland mit Einzelbäumen, Laubwald, Nadelwald.

Die im Ergebnis einer umfangreichen Datenrecherche sowie einer Objektbefahrung ausgewählten und tatsächlich im Rahmen des Projektes untersuchten Objekte sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Charakteristik der Untersuchungsobjekte

Variante	Objekt	Standort	GRS-Nr.	Fläche [ha]	mittlere Ra-226-Aktivität, [Bq/g]	Liegezeit Ablage- rung/ Abde- ckung [a]	Mächtigkeit der Abdeckung [m]	Bewuchs	Bemerkung
1	Halde Halden- aufbereitung	Johanngeorgenstadt	3654	3,2	1,3	46	-	Nadelwald	Aufforstung vor etwas 30 Jahren
2	Halde Schacht 52 und 227	Johanngeorgenstadt	6161	15,8	0,4	44/30	0,2	Gras, Lupi- ne, Nadel- bäume	Abdeckung nur im Pla- teaubereich vorhanden
	Halde Schacht 72	Schneeberg	3980	2,7	0,4	47/30	0,2	Gras, ein- zeln Bäu- me und Büsche	Abdeckung nur im Ost- teil der Halde vorhan- den (Wismutschüttung), Altbergschüttungen im übrigen Haldenbe- reich haben keine Ab- deckung
	Halde Schacht 19	Annaberg	3714	1,4	0,3	48/22	0,1 - 0,4	Gras, ein- zeln Bäu- me und Büsche	Abdeckung nur im Ost- teil der Halde vorhan- den (Wismutschüttung), Altbergschüttungen im übrigen Haldenbe- reich haben keine Ab- deckung
	Nordhalde	Lengenfeld	502	5	4	ca. 30	0,2	Aufforstung mit Lärchen und Fichten	Abdeckung mit ca. 0,20 m Granitverwite- rungsboden, z.T. aber auch noch unabgedeck- te Bereich vorhanden

Fortsetzung Tabelle 4

Variante	Objekt	Standort	GRS-Nr.	Fläche [ha]	mittlere Ra-226-Aktivität, [Bq/g]	Liegezeit Ablage-rung/ Abde-ckung [a]	Mächtigkeit der Abdeckung [m]	Bewuchs	Bemerkung
3	IAA Dänkritz I	Crossen/Oberrothenbach	Wismut-Objekt	27,1	4,9	44/>15	0,5 - 1 (auf der Böschung des Norddammes)	Gras, Bäume	Rn-Exhalation am abgedeckten Außendamm 0,30 Bq/m <sup>2</sup> s, Außendamm nicht abgedeckt 1,8 Bq/m <sup>2</sup> s
	Halde Beerwalde	Beerwalde/Ronneburg	Wismut-Objekt	1,6 (SW-Flanke)	0,62	20/20	1 - 1,5	Lärchen, Eichen	Rn-Exhalationsrate 0,1 Bq/m <sup>2</sup> s
4	IAA Lengenfeld	Lengenfeld/Waldkirchen	495	18,8	5	41/12-33	1 - 6,5	Lokal Gras und einzelne Büsche	Tailings überdeckt durch Quarzsande der Fluß- und Schwerspat-aufbereitung
	Halde Tagebau Ronneburg	Ronneburg	346	0,31	0,3	49/34	1-2	Pappel-, Birkenwald	Keine belastbaren Daten zur Ra-226-Aktivität

Die Versickerungsversuche mit Tracerflüssigkeit wurden z.T. auf anderen als den in Tabelle 4 ausgewählten Objekten durchgeführt. Dies ergab sich aus den folgenden, für die Auswahl der Versuchsstandorte für die Tracerversuche maßgebenden, Kriterien:

1. Vorhandensein von für Haldenrenaturierungen typischen Pflanzenarten (unter Beachtung der natürlichen Sukzession),
2. Vorhandensein von Abdeckschichten unterschiedlicher Mächtigkeit und unterschiedlicher Lagerungsverhältnisse (sowohl homogene als auch inhomogene Materialien sollten untersucht werden),
3. Liegezeit der Abdeckschichten (es sollten sowohl möglichst junge als auch vergleichsweise alte Abdeckungen untersucht werden),
4. Minimierung des Anfahrtsweges zur Kostenersparnis innerhalb des Projektes.

Als Untersuchungsobjekte für die Versickerungsversuche mittels Tracerflüssigkeit fungierten:

- Wiese auf dem Firmengelände der IAF - Radioökologie GmbH Dresden, da hier vergleichsweise homogene Lagerungsverhältnisse des Bodens anzutreffen sind.
- Collmberg in Dresden, da hier eine z.T. mehrere Meter mächtige mineralische Abdeckung vorhanden ist, die in natürlicher Sukzession z.B. mit Birken und Sanddorn bewachsen ist und mehr als 10 Jahre Liegezeit aufweist.
- Halde B des Ökologischen Großprojektes Dresden-Coschütz/Gittersee, da die Abdeckung vergleichsweise jung ist (Herstellung 1998), mit definierten Parametern z.B. hinsichtlich des Durchlässigkeitsbeiwertes eingebaut und anschließend mittels Raseneinsatz begrünt wurde.
- Nordhalde in Lengenfeld, da hier in einem Teilbereich eine Aufforstung mit Fichte erfolgte und in einem anderen Teilbereich eine Abdeckung mit mittlerer Mächtigkeit (ca. 0,5 m) und guter Durchwurzelung (z.B. Birke) vorhanden ist.

- Dammbereich der IAA Dänkritz, da hier eine vergleichsweise heterogene Abdeckung mit einer Liegezeit von mehr als 15 Jahren und einer vergleichsweise guten Durchwurzelung vorhanden ist und von diesem Objekt im Rahmen dieses Vorhabens bereits umfangreiche Ergebnisse vorlagen.

Angaben zur Historie der ausgewählten Objekte sind z.B. in /16/ enthalten.

## 9 Untersuchungsergebnisse

### 9.1 Diskussion typischer Bleispuren

Die Auswertung der Daten der Feldmessungen und Laboranalysen ist in ausführlicher Form für jeden Aufschluss in /15/ enthalten. Im vorliegenden Endbericht wird ein Gesamtüberblick für das jeweilige Untersuchungsgebiet gegeben und beispielhaft mit den wesentlichen Untersuchungsergebnissen belegt.

#### 9.1.1 Theoretische Vorbetrachtung

Die Grundlage für die Beurteilung der jeweiligen Standorte hinsichtlich ihrer Radondämmwirkung bildet die Ermittlung der Bleispur. Diese wurde in /8/ als Differenz der spezifischen Aktivität von Pb-210 und Ra-226 definiert (vgl. Abschnitt 4.4). Im Rahmen des vorliegenden Berichtes wird dabei unterschieden zwischen "tatsächlicher Bleispur" und "maximal möglicher Bleispur". Die "tatsächliche Bleispur",  $Pb(z)$ , entspricht der anhand der Ergebnisse der gammaspektrometrischen Analyse ermittelten Bleispur von den Aufschlüssen gewonnenen Feststoffproben. Die Bleispur ergibt sich tiefenabhängig zu:

$$Pb(z) = A_{Pb-210}(z) - A_{Ra-226}(z), \quad (6)$$

wobei

$A_{Pb-210}$ : spezifische Aktivität von Pb-210

$A_{Ra-226}$ : spezifische Aktivität von Ra-226

sind.

Der Wert der "maximal möglichen negativen Bleispur",  $Pb(z)_{\max}$ , wird im Rahmen des vorliegenden Projektes als Produkt der spezifischen Aktivität von Ra-226 und dem Emanationskoeffizienten einer Feststoffprobe definiert:

$$Pb(z)_{\max} = -E \cdot A_{Ra-226}(z). \quad (7)$$

Diese Größe stellt für die weiteren Diskussionen einen Referenzwert für eine hypothetische Situation dar, dass das gesamte in den Porenraum emanierte Radon vom Emanationsort "abtransportiert" wurde.

Anhand des Vergleiches von tatsächlicher und maximal möglicher Bleispur kann abgeschätzt werden, ob am jeweiligen Standort für die Radonemanation bzw. den Radontransport günstige Bedingungen vorliegen. Ist die Differenz

$$Pb(z)_{\text{Diff}} = -Pb(z)_{\text{max}} - Pb(z) \quad (8)$$

zwischen der maximal möglichen und der tatsächlichen Bleispur für eine Probe/eine Schicht oder den gesamten Aufschluss vergleichsweise gering, so ist dies ein sicheres Indiz dafür, dass ein Großteil des emanierten Radons diese Probe/Schicht bzw. den Aufschluss "verlassen" hat.

Beispielhaft ist dies in Abbildung 6 illustriert. Sie zeigt, dass die Differenz zwischen tatsächlicher und maximal möglicher Bleispur in Tiefen von 0,2 - 0,35 m vergleichsweise gering ist und dies darauf hinweist, dass nahezu das gesamte emanierte Radon das in diesen Tiefen gelagerte Material verlassen hat.

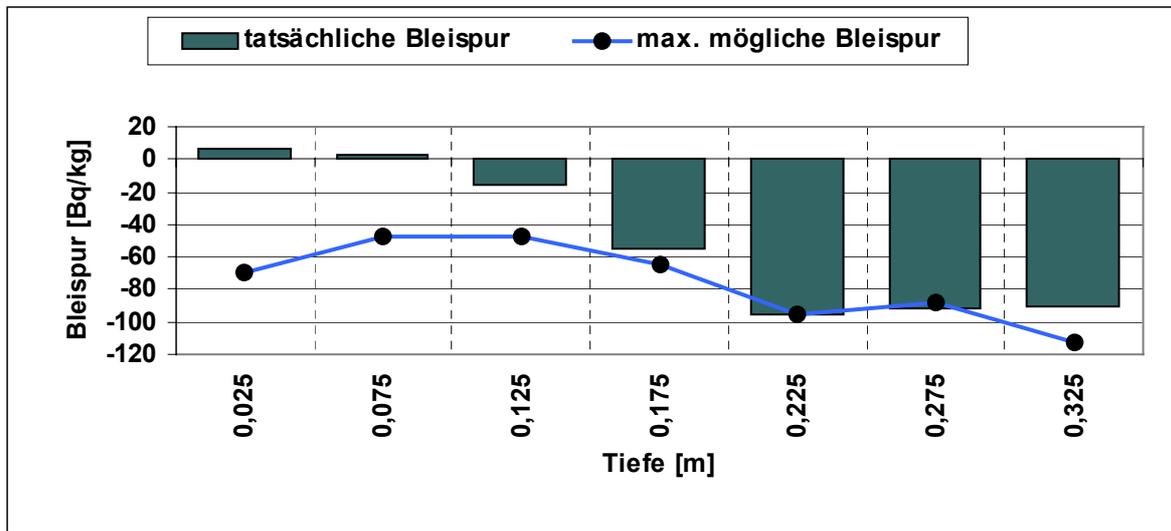


Abbildung 6: Maximal mögliche und tatsächliche Bleispur im Aufschluss Sch2 in Abhängigkeit von der Tiefe

Die zusätzlich gemessenen Vor-Ort-Parameter, wie Radonkonzentration in der Bodenluft und/oder Radonexhalation, müssten entsprechend des vorherrschenden Transportmechanismus für Radon im jeweils untersuchten Objekt dazu korrelierende Ergebnisse liefern.

Bei überwiegend durch Diffusion geprägten Transportprozessen sind Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft zu erwarten, die den Zusammenhang zwischen spezifischer Ra-226-Aktivität, Emanationskoeffizient und Bodenluftvolumen für die untersuchten Schichten im Rahmen der jeweiligen Messgenauigkeiten widerspiegeln. Das heißt in erster Näherung kann die zu erwartende Radonkonzentration,  $\bar{C}_{Rn}$ , in der Bodenluft für die abgelagerten mineralischen Substrate unter Annahme einer unendlich mächtigen Schicht über folgende Beziehung abgeschätzt werden (asymptotischer Wert):

$$\bar{C}_{Rn} = \frac{A_{Ra-226} \cdot E \cdot \rho}{n} \quad [\text{kBq/m}^3], \quad (9)$$

wobei

$\bar{C}_{Rn}$ : zu erwartende Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde/Ablagerung,

$A_{Ra-226}$ : spezifische Aktivität von Ra-226 im untersuchten Material,

M: Masse des Materials <sup>2</sup>,

E: Emanationskoeffizient des Materials,

n: Porosität des Materials <sup>3</sup>,

sind.

Die so berechnete Radonkonzentration in der Bodenluft  $\bar{C}_{Rn}$  wird zu Vergleichszwecken herangezogen, um eine qualitative Diskussion über die Dominanz von konvektiven oder diffusiven Radontransportprozessen führen zu können. Ist z.B. eine deutlich negative Bleispur im Haldenmaterial/Tailings ausgeprägt und liegen die gemessenen Radonkonzentrationen in der Bodenluft deutlich unter dem Referenzwert  $\bar{C}_{Rn}$  bzw. zeigen keine Tiefenabhängigkeit, ist dies in der Regel ein klarer Hinweis auf die Dominanz von konvektiven Radontransportprozessen. Das bedeutet, dass das emanierte Radon über präferentielle Wegsamkeiten vergleichsweise schnell aus den untersuchten Schichten abtransportiert wird. Dies konnte dann in der Regel durch erhöhte Radonexhalationsraten belegt werden.

Zu Vergleichszwecken wird deshalb im Rahmen des vorliegenden Berichtes die bei Annahme diffusiver Radontransportprozesse zu erwartende Radonexhalationsrate

$$\bar{J} = n \sqrt{\lambda D} C_{Rn} \quad (10)$$

als Referenzgröße eingeführt. dabei sind

---

<sup>2</sup> Bei der Berechnung der Feststoffmasse im definierten Bodenvolumen wird für die Referenzgröße  $\bar{C}_{Rn}$  eine mittlere Korndichte von 2,65 g/cm<sup>3</sup> zugrund gelegt.

<sup>3</sup> Es wird eine mittleren Porosität von 0,3 benutzt.

n: Porosität des Materials<sup>3</sup>,

D: Diffusionskonstante<sup>4</sup>,

$C_{Rn}$ : Radonkonzentration in der Bodenluft der Ablagerung,

$\lambda$ : Radonzerfallskonstante,  $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ .

Ist die gemessene Exhalationsrate deutlich größer als die Referenzgröße  $\bar{J}$  ist davon auszugehen, dass konvektive Prozesse die Exhalation dominieren. Bei der Beurteilung der Radonmigration in Halden/Ablagerungen ist jedoch zu beachten, dass konvektive Radontransportprozesse typische Tages- und Jahresgänge aufweisen (vgl. /10/). Aufgrund der Komplexität der ablaufenden Prozesse ist für generelle Aussagen hinsichtlich der die Radonmigration dominierenden Prozesse und die Radondämmwirkung der Abdeckung die jeweilige Halde als Gesamtobjekt zu betrachten.

Zu Vergleichszwecken wird die tiefenabhängige Radonkonzentration in der Bodenluft in folgender Form angegeben

$$\bar{C}_{Rn}(z) = \bar{C}_{Rn} \left[ 1 - \exp \left[ -\frac{D}{\lambda} z \right] \right], \quad (11)$$

wobei die asymptotische Radonkonzentration in der Bodenluft  $\bar{C}_{Rn}$  gemäß (9) bestimmt wird. In den entsprechenden Abbildungen wird das so berechnete Radonkonzentrationsprofil als zu "erwartende Radonkonzentration" bezeichnet.

Der Einfluss der Durchwurzelung auf die Radontransportprozesse kann unterschiedlicher Art sein, z.B.:

- können Wurzeln/Wurzelkanäle zusätzliche, präferentielle Fließwege für Bodenluft und Wasser darstellen (vgl. dazu /16/) oder

---

<sup>4</sup> Bei der Berechnung der Referenzgröße  $\bar{J}$  wird für die Diffusionskonstante der für vergleichsweise durchlässige Böden charakteristische Wert von  $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  zugrunde gelegt (entsprechend einer Diffusionslänge von 1 m).

- zur Intensivierung der Verwitterung im abgelagerten Material beitragen, was aufgrund der Zerkleinerung des Materials zur Erhöhung des Emanationskoeffizienten führt oder
- durch die Beeinflussung des Wasserhaushaltes im abgelagerten Material die Bedingungen für die Radonemanation und den -transport ändern.

Im Rahmen dieses ersten Auswertekomplexes wurde geprüft, ob offensichtliche Einflüsse der Durchwurzelung auf die Bleispur und damit auf den Radontransport bereits anhand der Grobauswertung der Daten nachweisbar sind.

### 9.1.2 Halde Schacht 72, Schneeberg

Auf der Halde Schacht 72 (Schindlerschachthalde) in Schneeberg wurden insgesamt 5 Aufschlüsse (Sch1 - Sch5) abgeteuft: Sch 1 bis Sch3 im Profil vom Oberhang bis zum Unterhang im vorwiegend durch Grasgesellschaften bewachsenen Bereich, Sch4 und Sch5 im Bereich des Fichtenbewuchses. Die Aufschlüsse zeigen folgende Charakteristik:

- Die Abdeckmächtigkeit beträgt im Mittel 0,20 m. Das Abdeckmaterial entspricht einem Schluff mit einem vergleichsweise hohen Anteil an tonigen, sandigen und kiesigen Beimengungen. Es handelt sich um ein heterogenes Bodensubstrat.
- Die spezifische Ra-226-Aktivität des Haldenmaterials variiert im Bereich der Aufschlüsse 1/1a - Sch3 im Mittel von (300 - 450) Bq/kg, im Bereich der Aufschlüsse Sch4 und Sch5 im Mittel von (600 - 1400) Bq/kg (vgl. Anlage 2 und beispielhaft Abbildung 7 für den Aufschluss Sch1/Sch1a und Abbildung 8 für den Aufschluss Sch5).
- Die spezifische Ra-226-Aktivität des Abdeckmaterials beträgt für die Aufschlüsse Sch1/1a - Sch4 im Mittel (100 - 150) Bq/kg, für den Aufschluss Sch5 aufgrund der besonderen Standortverhältnisse (Ameisenhaufen) im Mittel (270 - 315) Bq/kg (vgl. Anlage 2 und beispielhaft Abbildung 7 für den Aufschluss Sch1/Sch1a und Abbildung 8 für den Aufschluss Sch5).

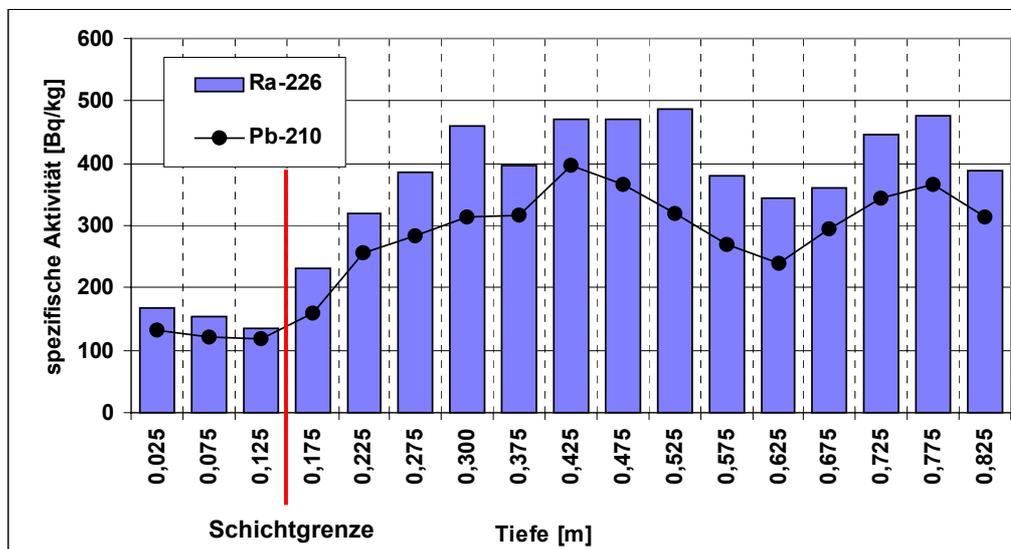


Abbildung 7: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch1/Sch1a in Abhängigkeit von der Tiefe

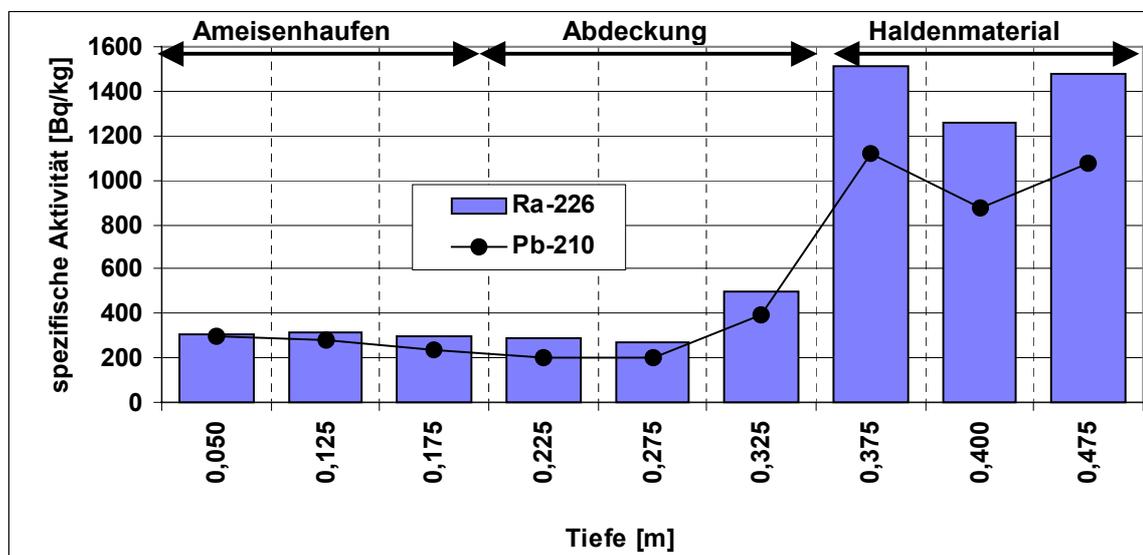


Abbildung 8: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch5 in Abhängigkeit von der Tiefe

- Die gemessene Ortsdosisleistung der Gammastrahlung (ODL) lag im Bereich der Aufschlüsse zwischen 180 - 190 nSv/h. Sie korreliert gut mit den ermittelten spezifischen Aktivitäten der obersten Schicht.

- In allen Aufschlüssen liegt die spezifische Pb-210 Aktivität im Haldenmaterial deutlich unterhalb der spezifischen Aktivität von Ra-226. Die tatsächliche Bleispur ist deutlich negativ und stimmt im Rahmen der Messgenauigkeit mit der maximal möglichen Bleispur gut überein. Dies ist ein Indiz dafür, dass nahezu das gesamte in den Porenraum generierte Radon "abtransportiert" wurde (vgl. Abbildung 9 bis Abbildung 12). Zu berücksichtigen ist jedoch bei dieser qualitativen Diskussion, daß die Halde mehrere Jahre nach ihrer Entstehung erst abgedeckt wurde.
- In allen Aufschlüssen ist keine positive Bleispur im Abdeckmaterial ausgebildet.
- In Aufschluss Sch1/1a und 5 ist die tatsächliche Bleispur im Abdeckmaterial deutlich negativ und stimmt im Rahmen der Messgenauigkeit gut mit der maximal möglichen Bleispur überein. Dies zeigt, dass das aus tieferen Schichten abtransportierte Radon nicht in der Abdeckung angelagert wurde (vgl. Abbildung 9 und Abbildung 10).
- Die relativ geringmächtige Abdeckschicht besitzt über den langen Zeitraum keine Radondämmwirkung.

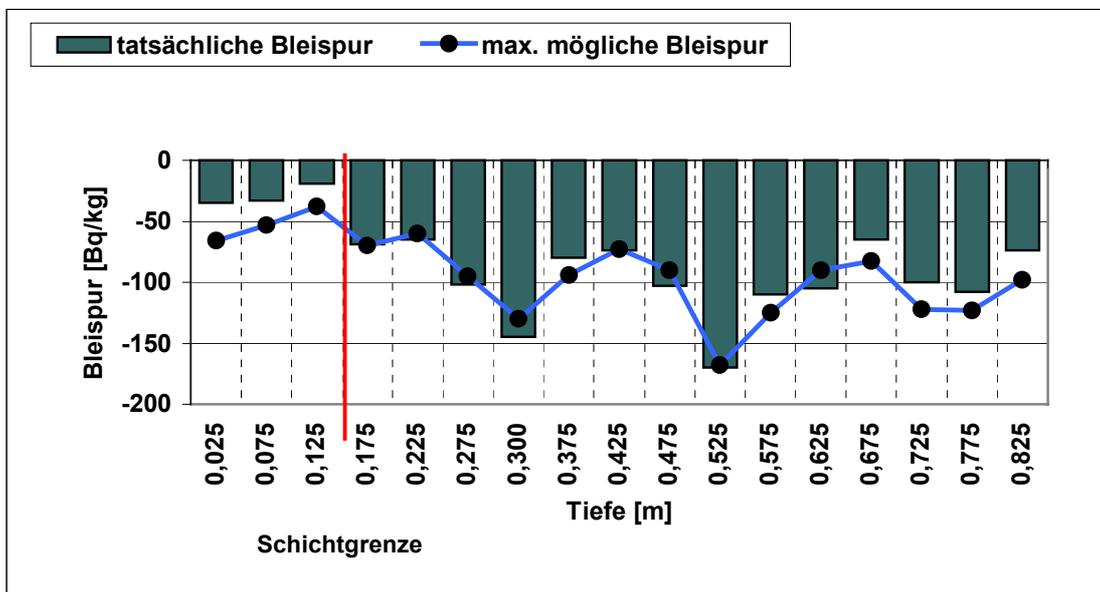


Abbildung 9: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch1/Sch1a in Abhängigkeit von der Tiefe

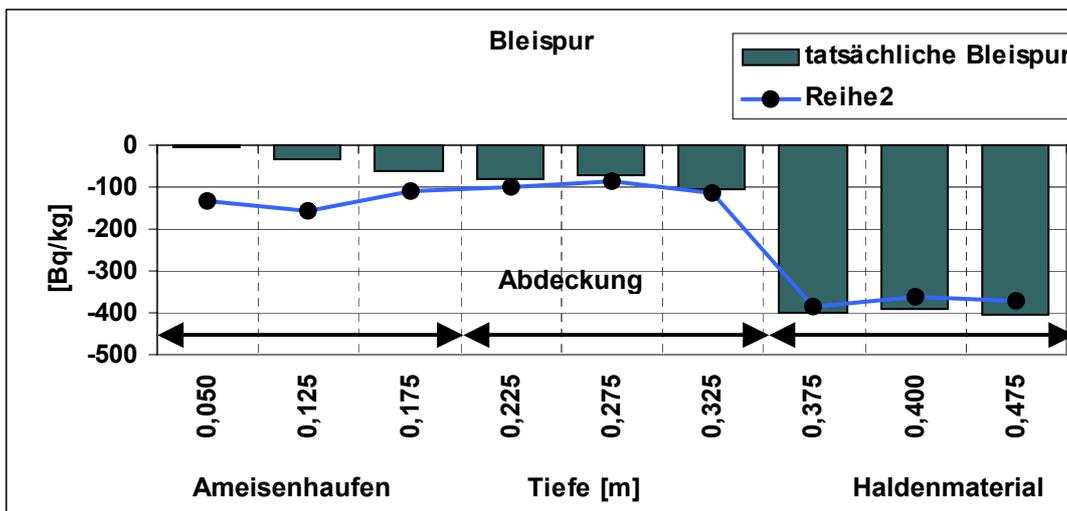


Abbildung 10: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch5 in Abhängigkeit von der Tiefe

- Im Abdeckmaterial des Aufschlusses Sch2 sowie in den aus dem Abdeckmaterial analysierten Proben des Aufschlusses Sch3 ist die tatsächliche Bleispur kleiner als die maximal mögliche Bleispur. Unter den gegebenen Randbedingungen kann davon ausgegangen werden, dass hier ein Teil des aus tieferen Schichten migrierten Radons angelagert wurde und das Pb-210 Defizit aufgrund der Eigenemanation des Abdeckmaterials z.T. aufgefüllt hat (vgl. Abbildung 11 und Abbildung 12).

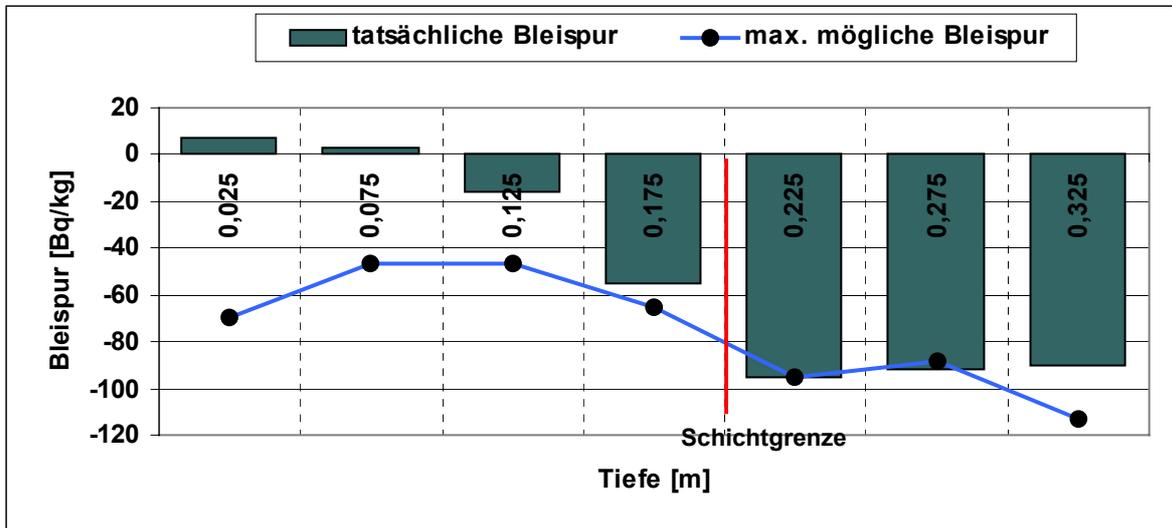


Abbildung 11: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch2 in Abhängigkeit von der Tiefe

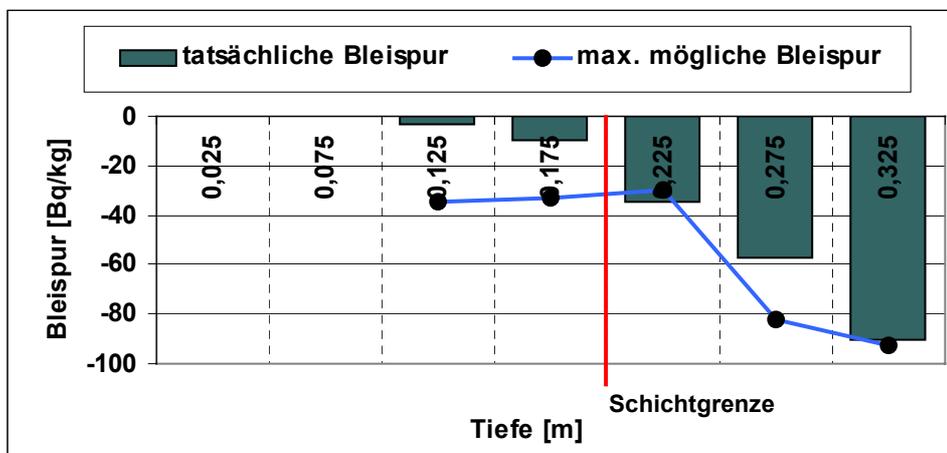


Abbildung 12: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch3 in Abhängigkeit von der Tiefe

- Die Vor-Ort gemessenen Parameter Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde und Radonexhalationsrate im Bereich der Schürfe deuten in Verbindung mit den ermittelten Bleispuren darauf hin, dass der Radontransport am vorliegenden Standort durch konvektive Prozesse dominiert wird (vgl. Abbildung 13 und Abbildung 14). Die komplexe Betrachtung aller Aufschlüsse auf der Halde zeigt, dass sie die in /10, 39/ postulierten Exhalationsmuster aufweist, da erhöhte Radonexhalationsraten im Bereich des Plateaus/Oberhanges in den kühlen Morgenstunden und im Bereich des Haldenfuß an warmen Sommertagen gemessen wurden.

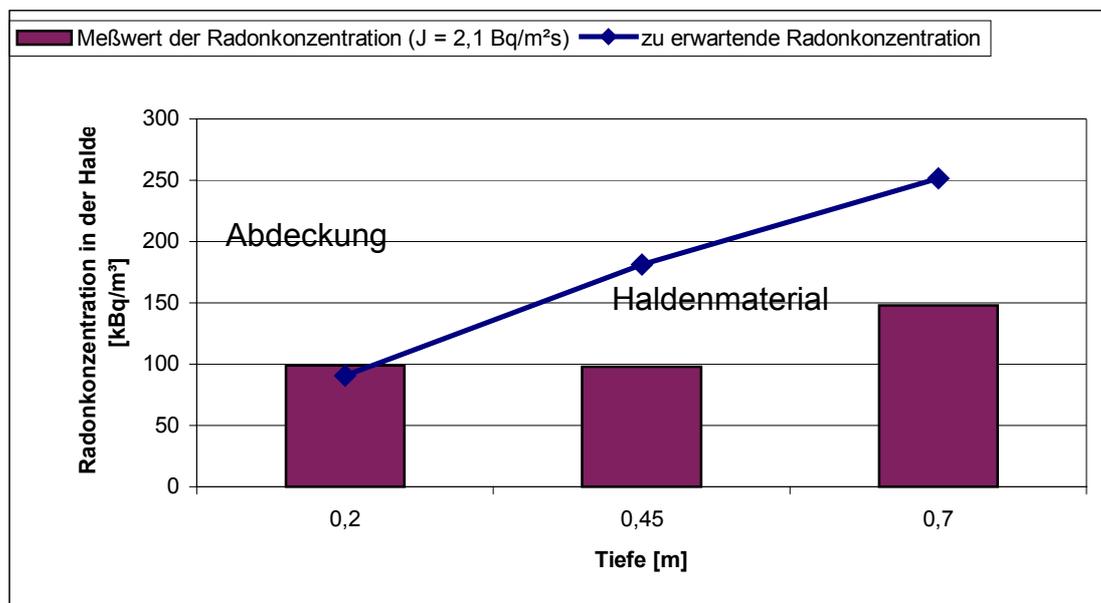


Abbildung 13: Messwerte der Radonkonzentration und zu erwartender Referenzwert  $\bar{C}_{Rn}$  in der Bodenluft der Halde im Aufschluss Sch1/Sch1a (Haldenplateau) in Abhängigkeit von der Tiefe, Messung morgens, die ebenfalls morgens gemessene Radonexhalationsrate beträgt 2,1 Bq/m<sup>2</sup>s und liegt damit deutlich (etwa Faktor 30) oberhalb des Referenzwertes für den diffusiven Radontransport  $\bar{J}$  von 0,06 Bq/m<sup>2</sup>s.

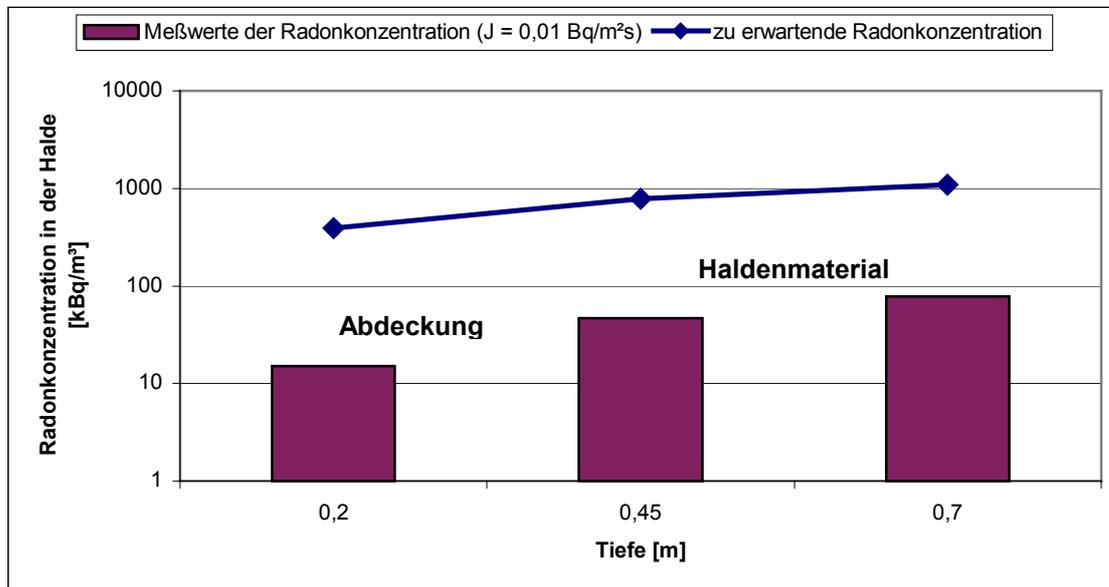


Abbildung 14: Messwerte der Radonkonzentration und zu erwartender Referenzwert  $\bar{C}_{Rn}$  in der Bodenluft der Halde im Aufschluss Sch3 (Haldenfuß) in Abhängigkeit von der Tiefe, die gemessene Radonexhalationsrate beträgt  $1,1 \text{ Bq/m}^2\text{s}$  (sowohl bei  $8^\circ\text{C}$  als auch bei  $17^\circ\text{C}$ ) und liegt damit oberhalb des Referenzwertes für den diffusiven Radontransport  $\bar{J}$

- In der Mehrzahl der Aufschlüsse ist mit zunehmender Tiefe und abnehmender Wurzelzahl im abgelagerten Material ein deutlich sinkender Emanationskoeffizient zu verzeichnen (vgl. beispielhaft Abbildung 15 und Abbildung 16). Ob dies auf eine durch die Wurzeleinwirkung zurückzuführende Zerkleinerung des Materials zurückzuführen ist, konnte im Rahmen dieses Projektes nicht geklärt werden.

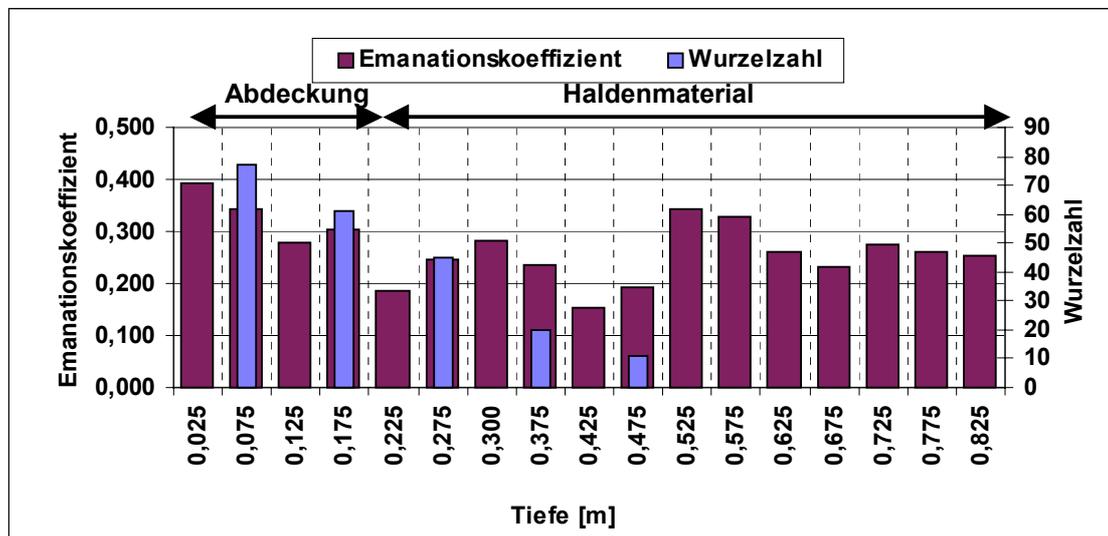


Abbildung 15: Emanationskoeffizient und Wurzelzahl im Aufschluss Sch1/Sch1a in Abhängigkeit von der Tiefe

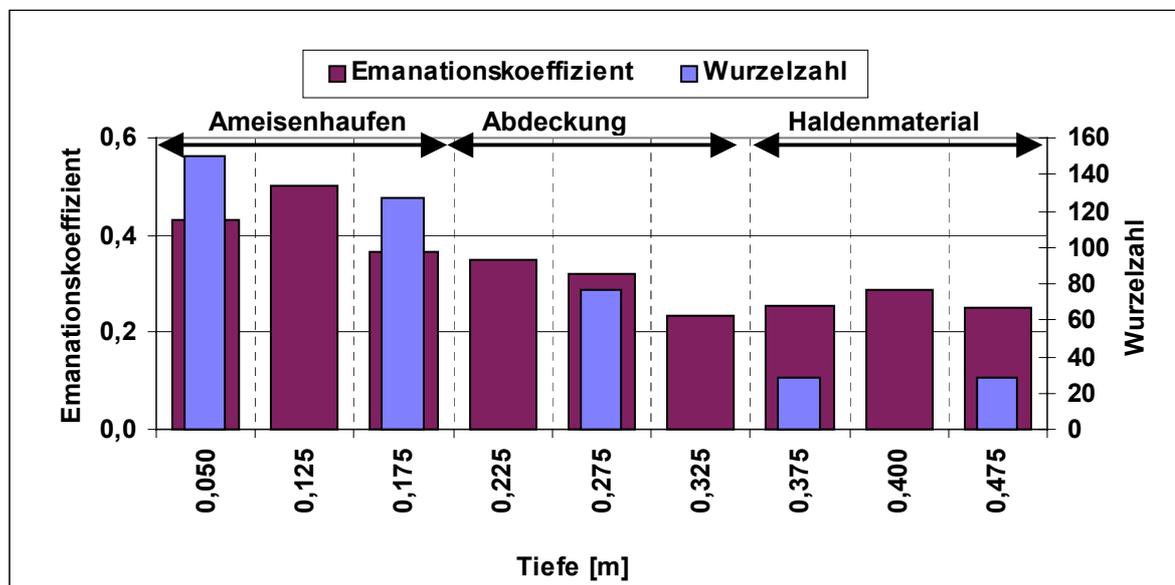


Abbildung 16: Emanationskoeffizient und Wurzelzahl im Aufschluss Sch5 in Abhängigkeit von der Tiefe

- Die Vor-Ort im Bereich des Aufschlusses Sch1/Sch1a gemessenen Permeabilitäten im Haldenmaterial betragen in 0,3 m Tiefe  $1,1 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup> und in 0,6 m Tiefe  $2,3 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup>. Sie bestätigen, dass es sich am untersuchten Standort um vergleichsweise lockere Lagerungsverhältnisse handelt. Es ist des weiteren aufgrund der Historie der Entstehung der Ablagerung (Schüttung) und der im Rahmen der Aufschlussarbeiten festgestellten mit zunehmender Tiefe lockeren Lagerung des Materials zu erwarten, dass Messungen der Permeabilität in noch größerer Tiefe noch höhere Werte liefern.
- Ein offensichtlicher Zusammenhang von Durchwurzelung und Bleispur kann in den untersuchten Aufschlüssen nicht mit Sicherheit nachgewiesen werden, da die vorherrschenden Radontransportprozesse überwiegend durch konvektive Prozesse dominiert werden, die aufgrund des bei der Entstehung der Halde als Schüttung gebildeten Grobporensystems begünstigt werden.

### 9.1.3 Halde Schacht 19, Annaberg

Auf der Halde Schacht 19 (Zeppelinschachthalde) in Annaberg wurden 5 Aufschlüsse abgeteuft (Sch6 - Sch10), wobei die Aufschlüsse Sch6 - Sch9 im Bereich der Wismutschüttung und der Aufschluss Sch10 im Bereich der Altbergbauschüttung niedergebracht wurden. Den Bewuchs der Wismutschüttung bilden Grasgesellschaften, die Altbergbauschüttung ist mit Birken bewachsen. Die Aufschlüsse zeigen folgende Charakteristik:

- Die Abdeckmächtigkeit der Aufschlüsse Sch6 - Sch9 variiert zwischen 0,35 m und 0,4 m. Das Abdeckmaterial entspricht einem Schluff - Sand.
- Im Bereich des Aufschlusses Sch10 steht das Haldenmaterial direkt an der Oberfläche an.
- Die spezifische Ra-226-Aktivität des Haldenmaterials variiert von ca. (100 - 420) Bq/kg. Dabei lag die spezifische Ra-226-Aktivität des Haldenmaterials in den Aufschlüssen Sch6 und Sch7 bei 120/140 Bq/kg und im Aufschluss Sch8 mit im Mittel 360 Bq/kg ca. um Faktor 3 höher (vgl. Abbildung 17 bis

Abbildung 19). Da die Aufschlüsse entlang eines Profils vom Oberhang zum Unterhang abgeteuft wurden, ist dies ein Indiz dafür, dass auch im Bereich der Aufschlüsse Sch6 und Sch7 in größeren Tiefen Haldenmaterial mit höheren spezifischen Aktivitäten abgelagert ist.

- Die spezifische Ra-226-Aktivität des Abdeckmaterials der erkundeten Aufschlüsse liegt im Mittel zwischen 54 - 91 Bq/kg (vgl. Abbildung 17 bis Abbildung 19).

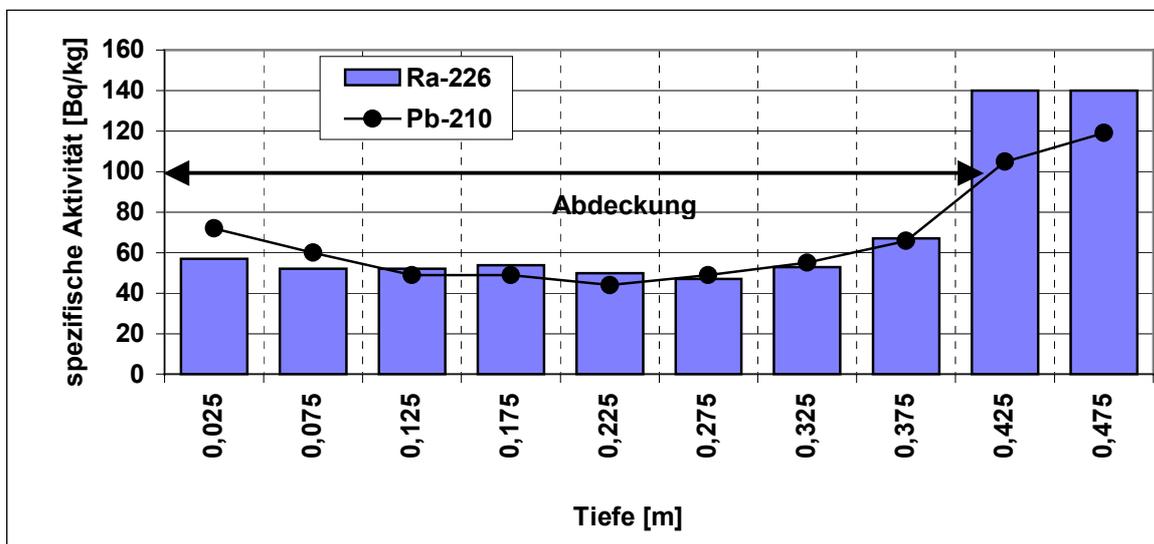


Abbildung 17: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch6 in Abhängigkeit von der Tiefe

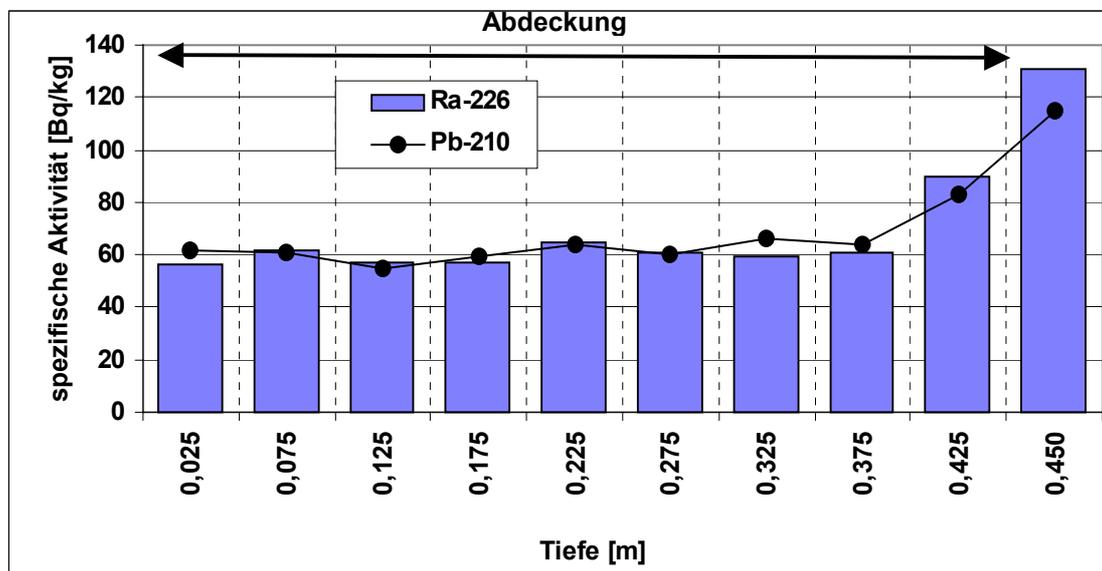


Abbildung 18: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch7 in Abhängigkeit von der Tiefe

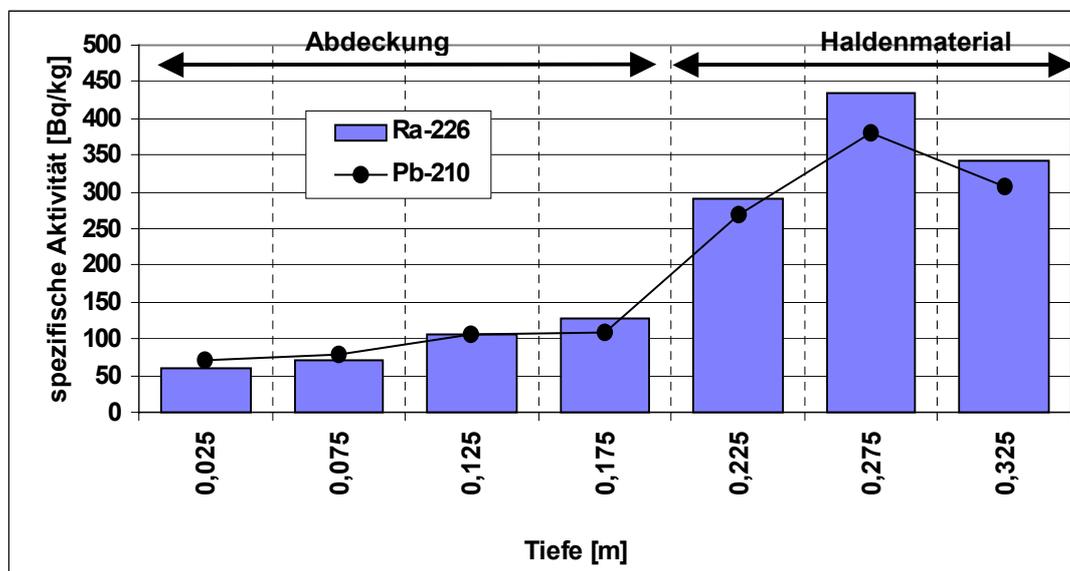


Abbildung 19: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch8 in Abhängigkeit von der Tiefe

- Die gemessene Ortsdosisleistung der Gammastrahlung (ODL) lag im Bereich der Aufschlüsse zwischen 120 - 140 nSv/h.
- In allen Aufschlüssen liegt die spezifische Pb-210 Aktivität im Haldenmaterial unterhalb der spezifischen Aktivität von Ra-226, die Bleispur ist negativ (vgl. Abbildung 20 bis Abbildung 22).
- In allen Aufschlüssen ist mit Ausnahme der obersten Abdeckschicht keine (Sch6, Sch8, Sch9) bzw. nur eine sehr geringe (Sch7) positive Bleispur im Abdeckmaterial ausgebildet. Der Pb-210-Überschuß in der obersten Abdeckschicht ist auf den Pb-210-Fallout der Atmosphäre zurückzuführen (vgl. Abbildung 20 bis Abbildung 22).
- In allen Aufschlüssen kann im Bereich der Abdeckschicht im Rahmen der Messgenauigkeit von Gleichgewicht zwischen Pb-210 und Ra-226 ausgegangen werden (vgl. Abbildung 20 bis Abbildung 22).

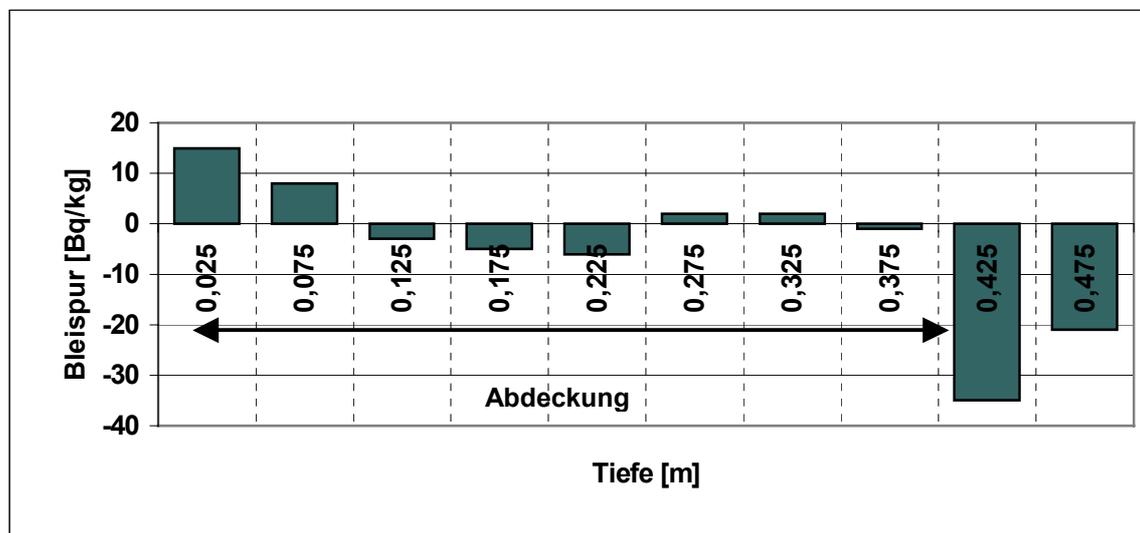


Abbildung 20: Bleispur im Aufschluss Sch6 in Abhängigkeit von der Tiefe

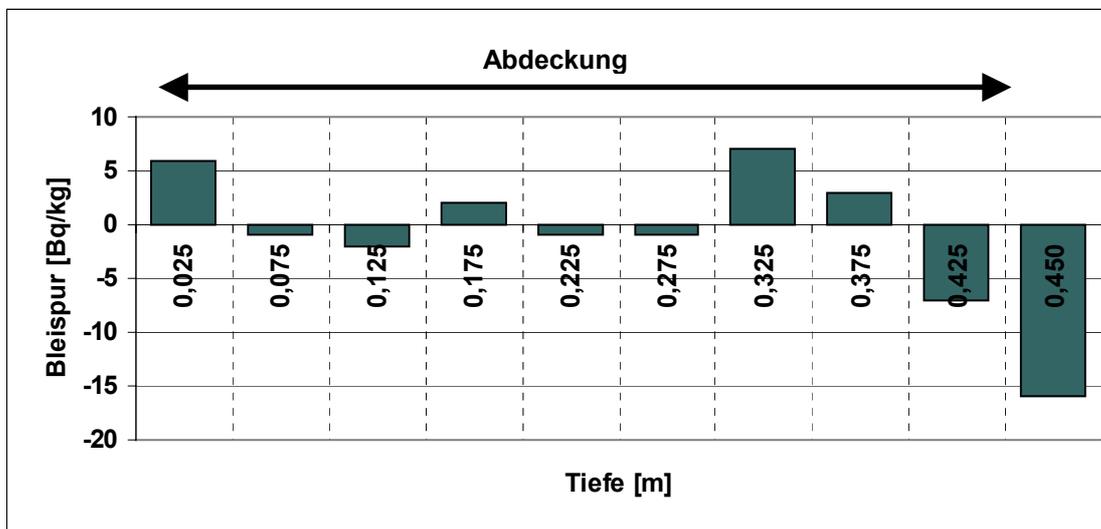


Abbildung 21: Bleispur im Aufschluss Sch7 in Abhängigkeit von der Tiefe

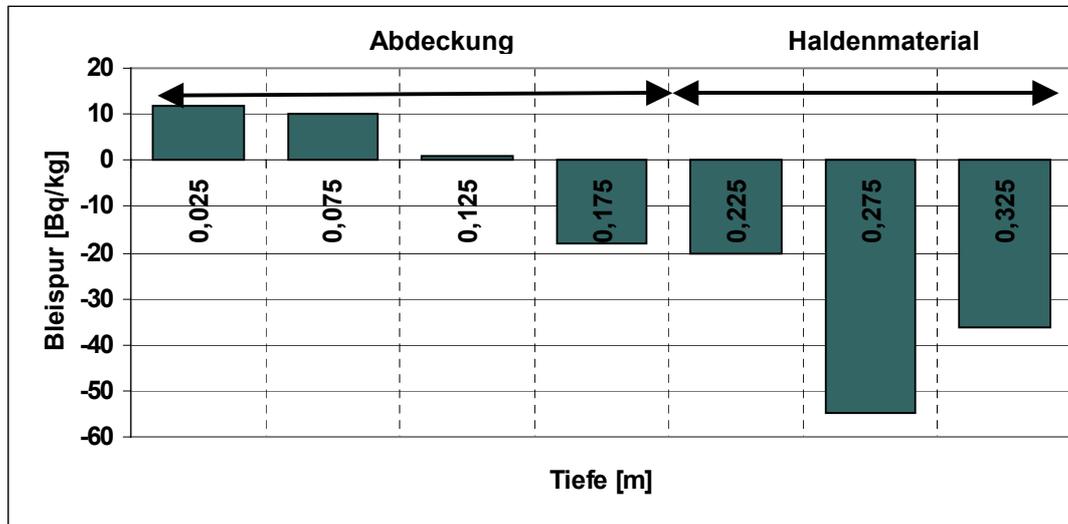


Abbildung 22: Bleispur im Aufschluss Sch8 in Abhängigkeit von der Tiefe

- Die Vor-Ort-Messwerte der Radonkonzentration und der Radonexhalation zeigen im Vergleich mit den ermittelten Bleispuren Werte, die darauf hinweisen, dass Radon konvektiv in die Atmosphäre migriert und die Radondämmwirkung der Abdeckung relativ gering ist. Besonders die Gesamtbetrachtung

der Aufschlüsse Sch6 - Sch8, die im Profil vom Oberhang zum Unterhang über die Halde abgeteuft wurden, bestätigt dies (vgl. Abbildung 23 bis Abbildung 25). Sie zeigt auch, dass die Radonmigration in der Halde durch konvektive Prozesse, die Tages-/Jahresgänge aufweisen, geprägt sind. Dies wird insbesondere am Vergleich der Radonexhalationsraten der Aufschlüsse, die am Haldenfuß geringer sind als am Haldenplateau deutlich (typische Situation für kühlen Sommermorgen, vgl. /10/, /39/).

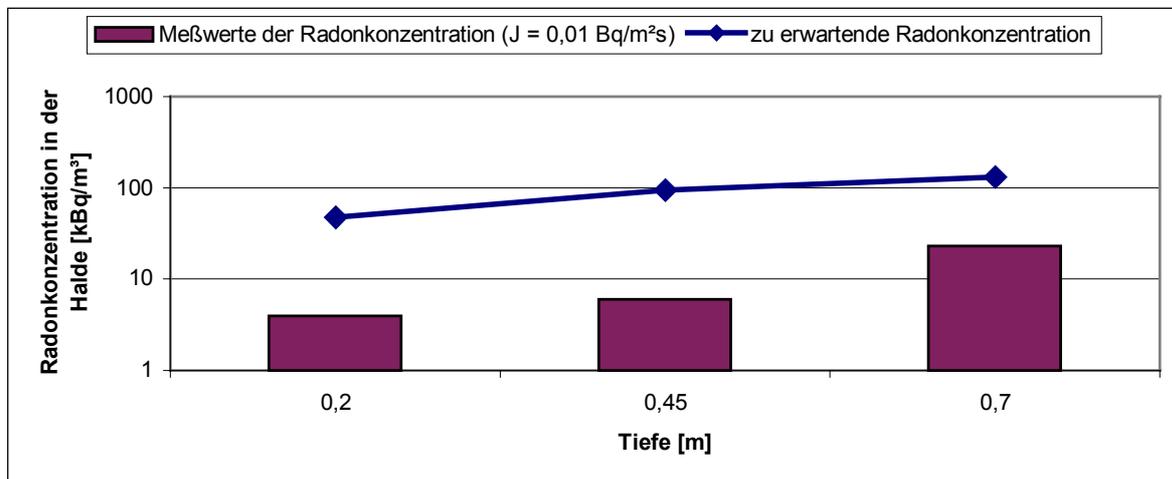


Abbildung 23: Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde und Referenzwert  $\bar{C}_{Rn}$  im Bereich des Aufschlusses Sch6 (Oberhang, Messung morgens) in Abhängigkeit von der Tiefe, die parallel dazu gemessene Radonexhalationsrate beträgt  $0,01 \text{ Bq/m}^2\text{s}$  und entspricht dem Referenzwert für diffusiven Radontransport  $\bar{J}$  von  $0,015 \text{ Bq/m}^2\text{s}$ .

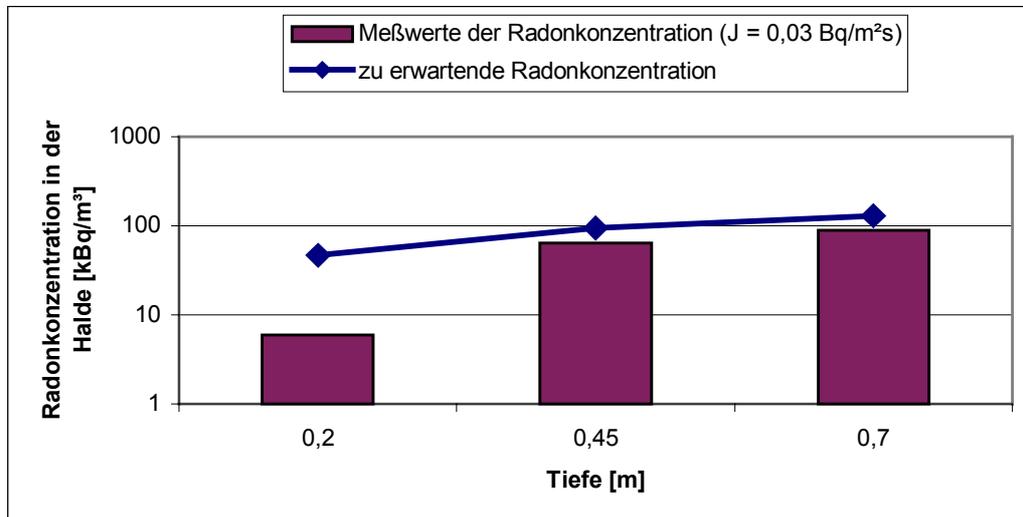


Abbildung 24: Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde und Referenzwert  $\bar{C}_{Rn}$  im Bereich des Aufschlusses Sch7 (Mittelhang, Lufttemperatur 13°C) in Abhängigkeit von der Tiefe, die parallel dazu gemessene Radonexhalationsrate beträgt 0,03 Bq/m²s und entspricht in etwa dem Referenzwert für diffusiven Radontransport  $\bar{J}$  von 0,015 Bq/m²s.

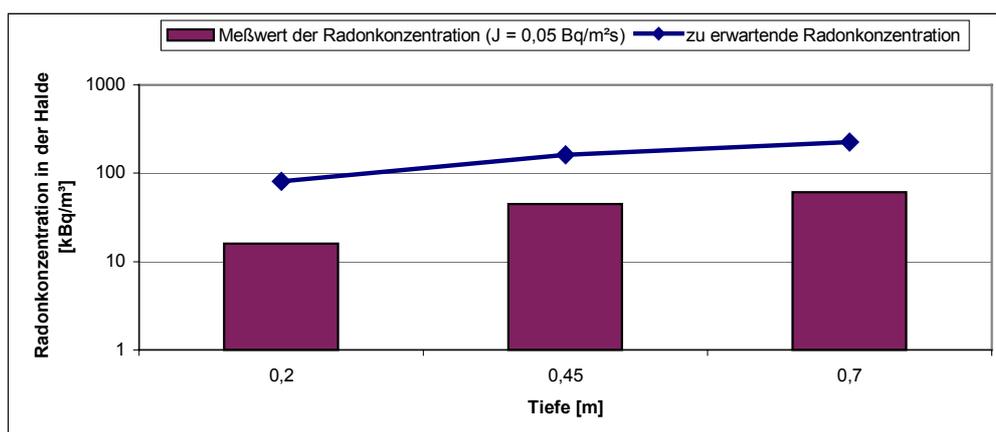


Abbildung 25: Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde und Referenzwert  $\bar{C}_{Rn}$  im Bereich des Aufschlusses Sch8 (Haldenfuß, mittags bei 13°C) in Abhängigkeit von der Tiefe, die parallel dazu gemessene Radonexhalationsrate beträgt 0,05 Bq/m²s

- Im Fall der Halde Schacht 19 treten durchweg relativ niedrige Radonexhalationsraten auf, die im Bereich der für den diffusiven Radontransport zu erwartenden Raten

#### **9.1.4 Halde Schacht 52 und 227, Johannegeorgenstadt**

Auf der Halde Schacht 52 und 227 (Zentralschachthalde) in Johannegeorgenstadt wurden 5 Aufschlüsse (Sch11 - Sch15) auf dem Haldenplateau abgeteuft. Den Bewuchs im Bereich der Aufschlüsse bilden Grasgesellschaften mit einem vergleichsweise hohen Anteil an Lupine und Nadelbäumen. Die Aufschlüsse zeigen folgende Charakteristik:

- Die erkundete Abdeckmächtigkeit variiert im Bereich von 0,1 - 0,35 m und liegt im Mittel bei 0,20 m. Das Abdeckmaterial ist ein Schluff mit z.T. vergleichsweise hohen Anteil an sandigen, kiesigen und steinigen Beimengungen.
- Die spezifische Ra-226-Aktivität des Abdeckmaterials der erkundeten Aufschlüsse liegt im Mittel bei 70 Bq/kg, die des Haldenmaterials variiert im Mittel von (160 - 280) Bq/kg (vgl. Abbildung 26 bis Abbildung 28).

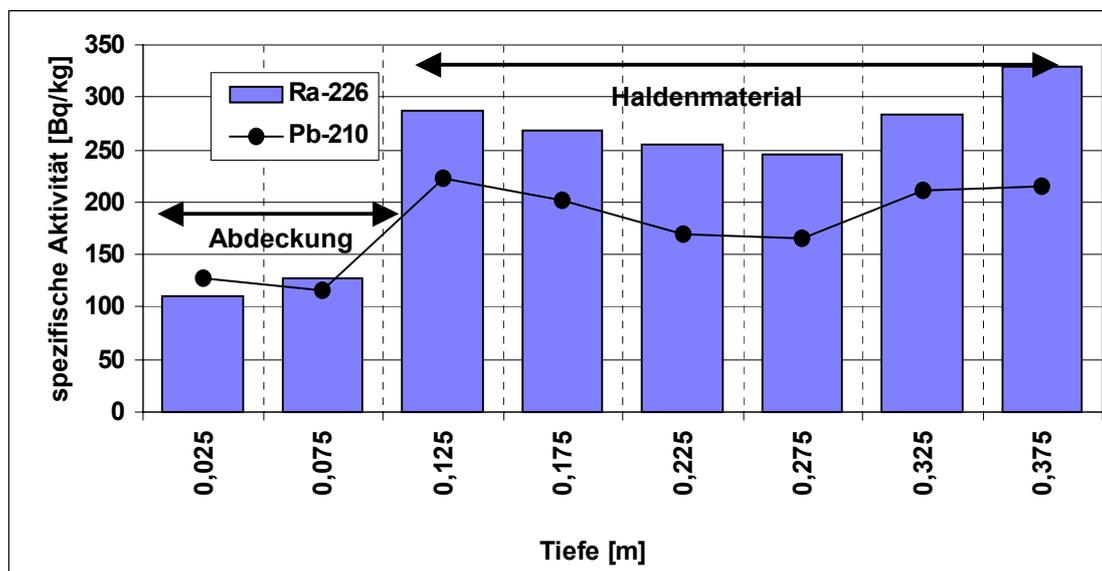


Abbildung 26: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch12 in Abhängigkeit von der Tiefe

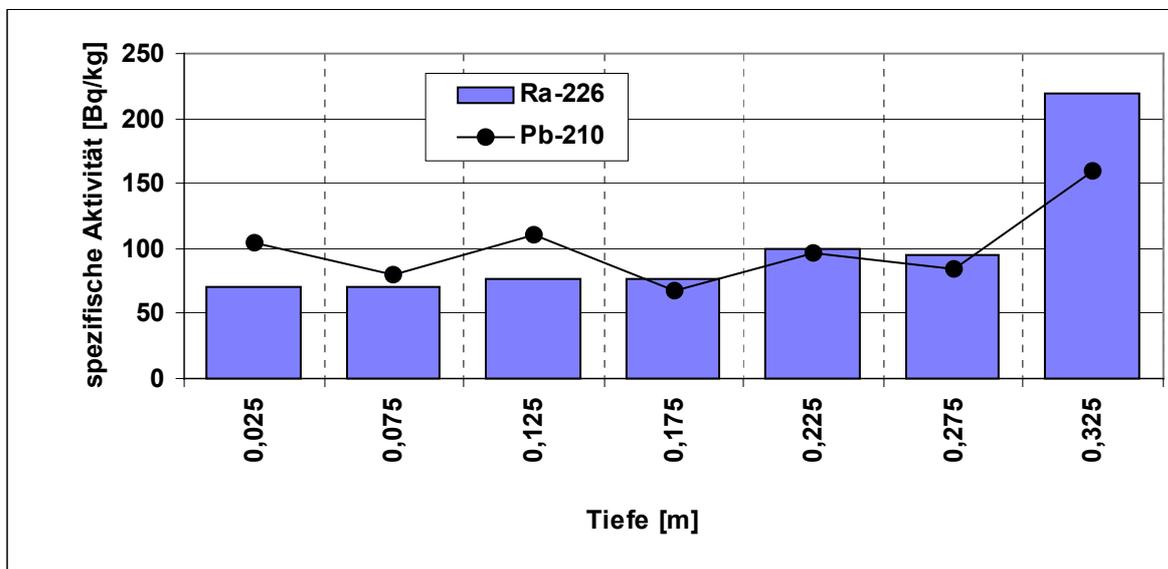


Abbildung 27: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch13 in Abhängigkeit von der Tiefe

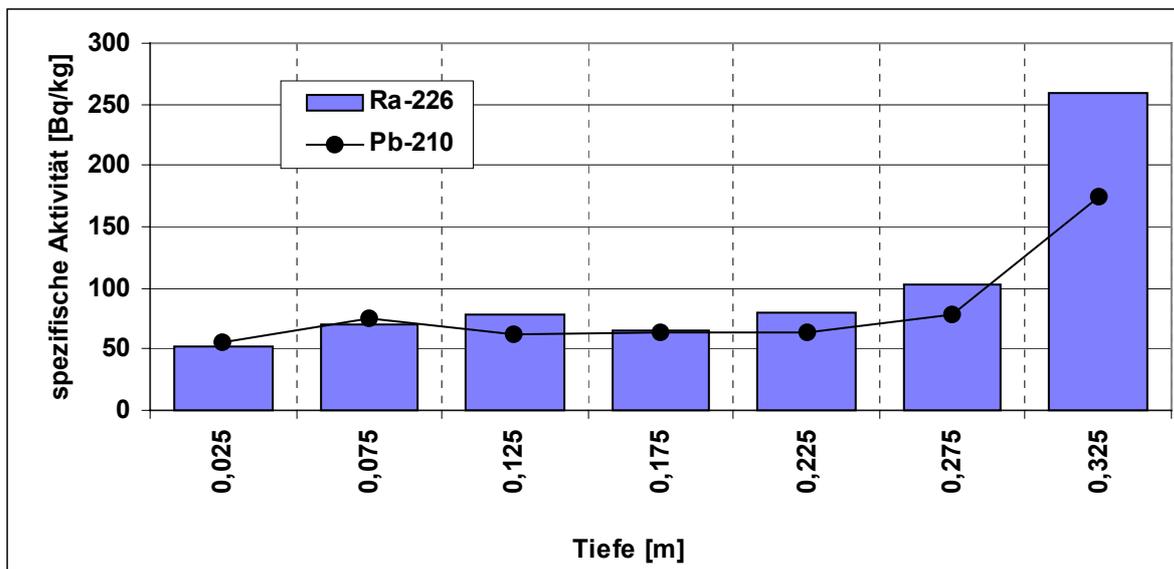


Abbildung 28: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch14 in Abhängigkeit von der Tiefe

- Die gemessene Ortsdosisleistung der Gammastrahlung (ODL) lag im Bereich der Aufschlüsse zwischen 150 - 170 nSv/h.
- Im Haldenmaterial ist eine deutlich negative Bleispur ausgeprägt, die im Rahmen der Messgenauigkeit gut mit der maximal möglichen Bleispur übereinstimmt. Dies zeigt, dass nahezu das gesamte in den Porenraum generierte Radon "abtransportiert" wurde (vgl. Abbildung 29 bis Abbildung 31).

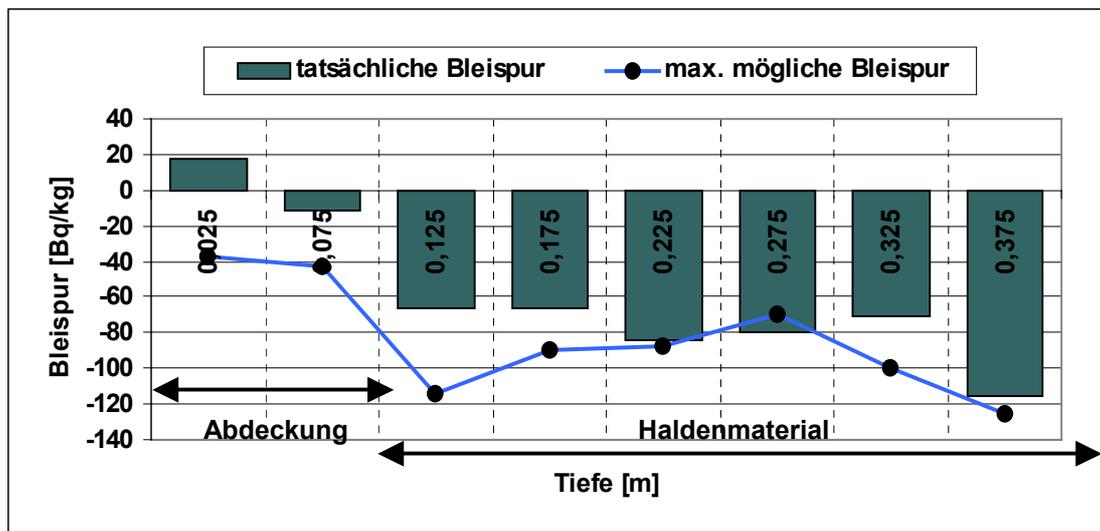


Abbildung 29: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch12 in Abhängigkeit von der Tiefe

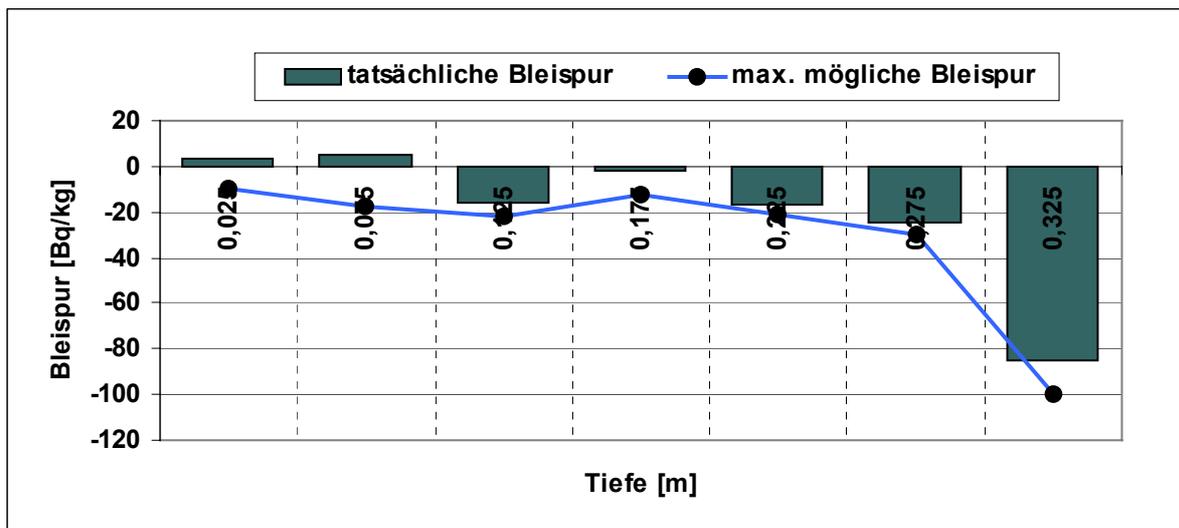


Abbildung 30: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch14 in Abhängigkeit von der Tiefe

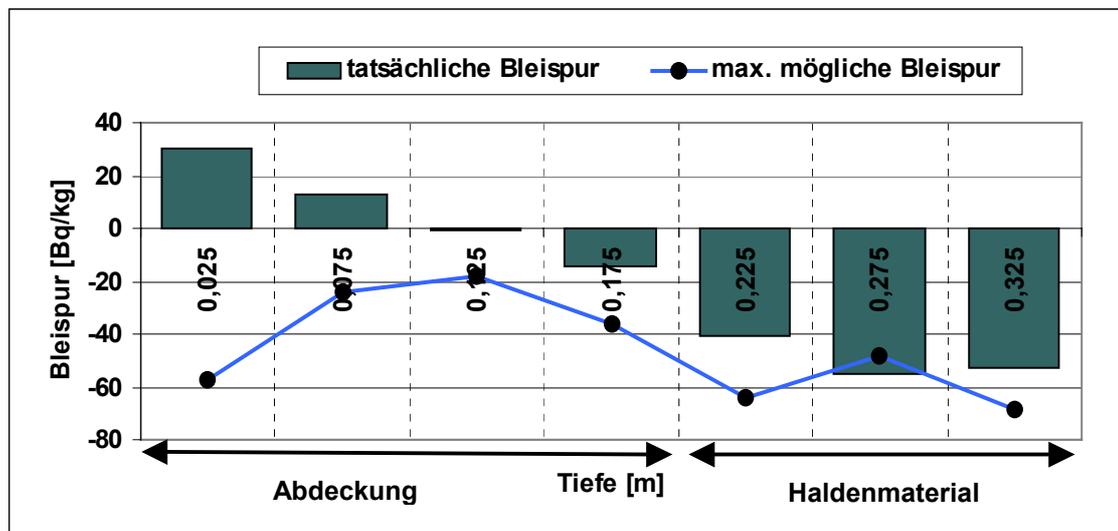


Abbildung 31: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch15 in Abhängigkeit von der Tiefe

- Im Abdeckmaterial liegt im Rahmen der Messgenauigkeit weitestgehend Gleichgewicht zwischen Pb-210 und Ra-226 vor. Unter Beachtung aller anderen ermittelten Parameter zeigt sich, dass hier aus tieferen Schichten herant transportiertes Radon in Pb-210 zerfällt und das aufgrund der Eigenemanation gebildete Pb-210-Defizit aufgefüllt hat. Andernfalls wäre im Abdeckmaterial ebenfalls eine negative Bleispur ausgeprägt (vgl. Abbildung 29 bis Abbildung 31).
- Die positive Bleispur in den Aufschlüssen Sch12 - Sch15 in oberster Probe des Abdeckmaterials illustriert den Pb-210-Fallout der Atmosphäre (vgl. Abbildung 29 bis Abbildung 31).
- Die Messwerte der Radonkonzentrationen liegen sowohl im Abdeckmaterial als auch im Haldenmaterial deutlich unterhalb von  $\bar{C}_{Rn}$  für diffusiven Radontransport. Die Messung der Exhalationsrate bestätigt die in /10/ und /39/ dargestellten Daten und zeigt, dass die Radonmigration und damit auch die Radonexhalation der Zentralschachthalde in Johannegeorgenstadt ausgeprägte Exhalationsmuster aufweist, die nur unter Einbeziehung konvektiver Prozesse erklärt werden können (vgl. Abbildung 32 und Abbildung 33). Vergleichsmes-

sungen an Messpunkten am Haldenfuß werden eine komplementäre Verhaltensweise zeigen. Die relativ dünne Abdeckschicht auf dem Plateau der Halde besitzt kaum eine Rn-Dämmwirkung.

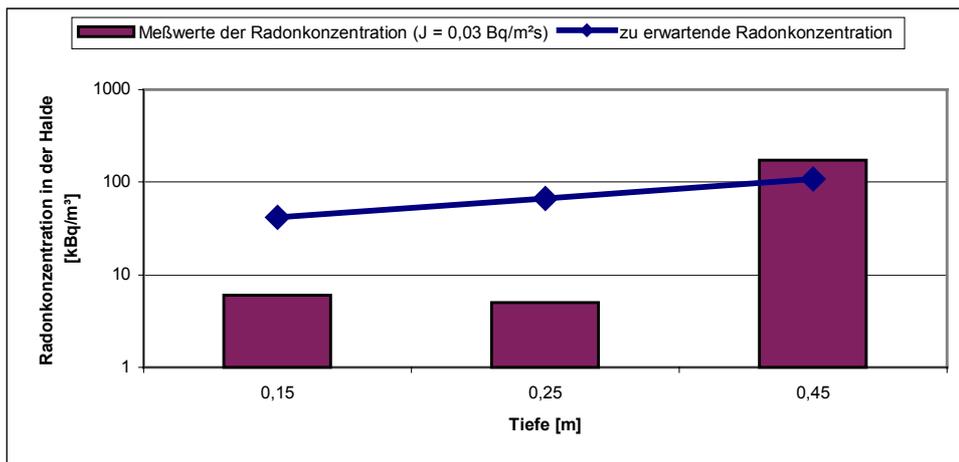


Abbildung 32: Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde und Referenzwert  $\bar{C}_{Rn}$  im Bereich des Aufschlusses Sch13 (Haldenplateau) in Abhängigkeit von der Tiefe, die am selben Standort gemessene Radonexhalationsrate betrug im Sommer bei 14°C Lufttemperatur 0,03 Bq/m<sup>2</sup>s und im Winter bei 0°C Lufttemperatur 0,21 Bq/m<sup>2</sup>s - die Messwerte zeigen deutlich das für Haldenplateaus typische Wechselspiel von Radonexhalation und Lufttemperatur/Tages-, Jahreszeit.

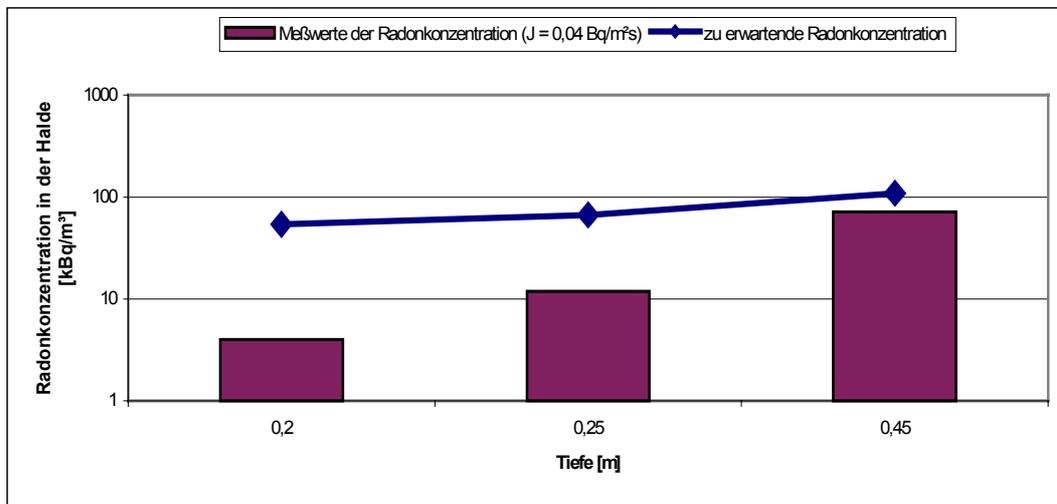


Abbildung 33: Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde und Referenzwert  $\bar{C}_{Rn}$  im Bereich des Aufschlusses Sch14 (Haldenplateau) in Abhängigkeit von der Tiefe, die am selben Standort gemessene Radonexhalationsrate betrug im Sommer bei 15°C Lufttemperatur 0,04 Bq/m<sup>2</sup>s.

### 9.1.5 Halde Haldenaufbereitung Johanngeorgenstadt

Auf der Halde Haldenaufbereitung in Johanngeorgenstadt wurden 2 Aufschlüsse am Haldenfuß abgeteuft (Sch16, Sch17). Die Halde ist mit Fichten bewachsen. Die Aufschlüsse zeigen folgende Charakteristik:

- Das Haldenmaterial steht oberflächennah an. Es wird lediglich durch eine Streuauflage von ca. 0,05 m Mächtigkeit bedeckt. Eine mineralische Abdeckung ist nicht vorhanden.
- Die spezifische Ra-226-Aktivität des Haldenmaterials liegt im Mittel bei 700 - 800 Bq/kg, wobei auch Hot Spots mit spezifischen Ra-226-Aktivitäten von bis zu 2500 Bq/kg erkundet wurden (vgl. Abbildung 34 und Abbildung 35).

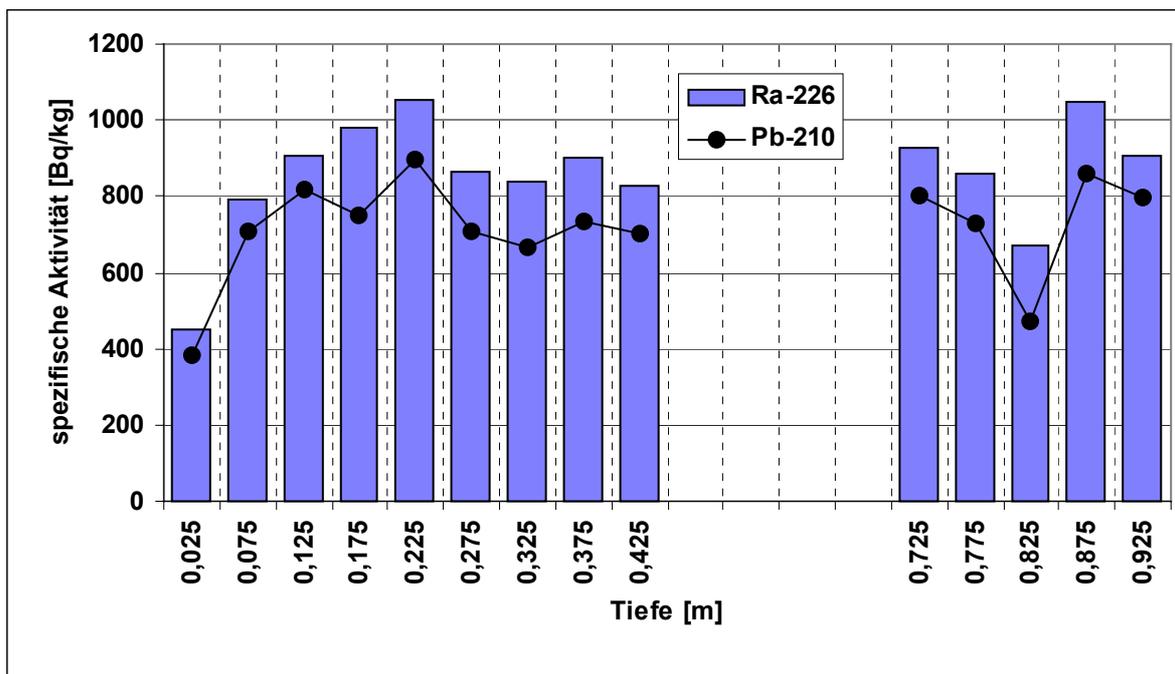


Abbildung 34: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch16 in Abhängigkeit von der Tiefe

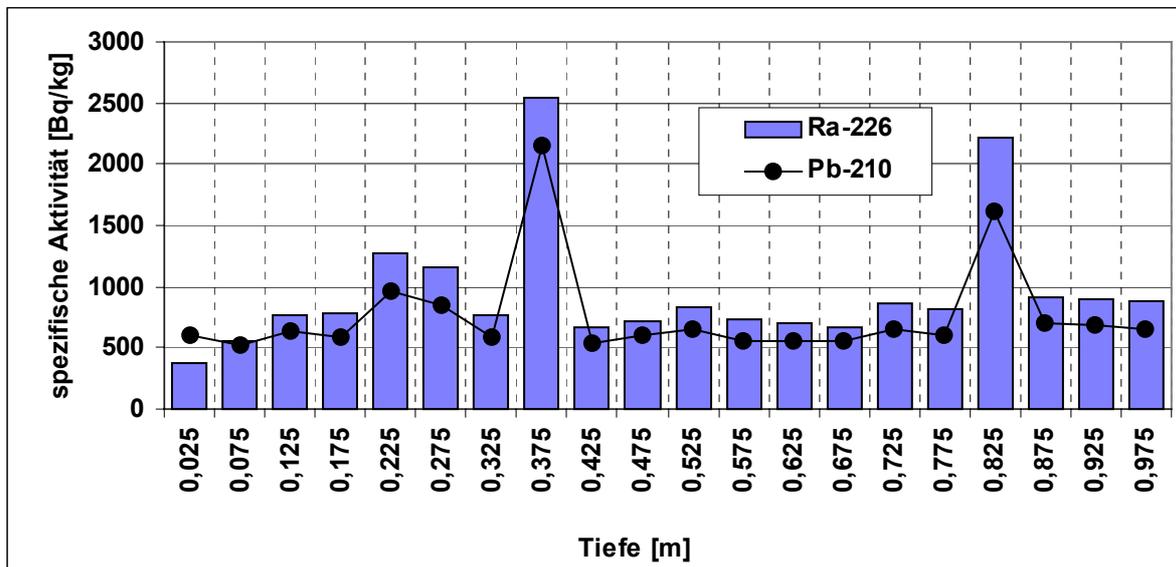


Abbildung 35: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch17 in Abhängigkeit von der Tiefe

- Die tatsächliche Bleispur ist über die gesamte Tiefe der Aufschlüsse, d.h. bis in 1,0 m Tiefe, negativ und erreicht dabei in der Mehrzahl der untersuchten Proben die maximal mögliche Bleispur (vgl. Abbildung 36 und Abbildung 37). Es liegen somit Diffusionslängen von > 1 m vor.

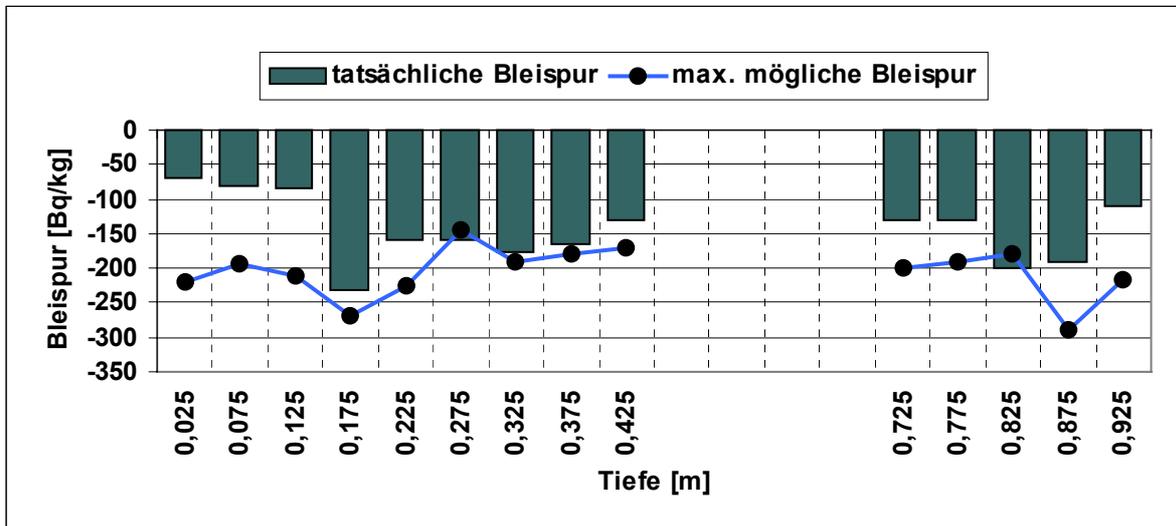


Abbildung 36: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch16 in Abhängigkeit von der Tiefe

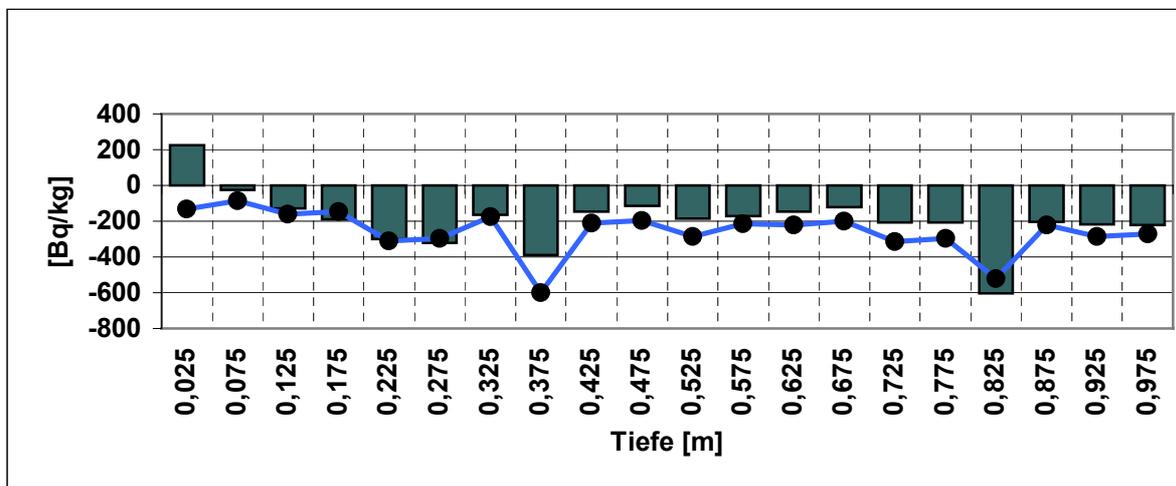


Abbildung 37: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch17 in Abhängigkeit von der Tiefe

- Die Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde erreichen Werte bis zu  $275 \text{ kBq/m}^3$  und liegen damit unterhalb von  $\bar{C}_{\text{Rn}}$ . Das Tiefenprofil weist auf einen konvektiven Rn-Transport hin. Die Radonexhalationsrate betrug an einem Sommermorgen bis zu  $2,7 \text{ Bq/m}^2\text{s}$  und lag damit oberhalb des Wertes von  $\bar{J}$  für diffusiven Radontransport (vgl. Abbildung 38 und Abbildung 39).

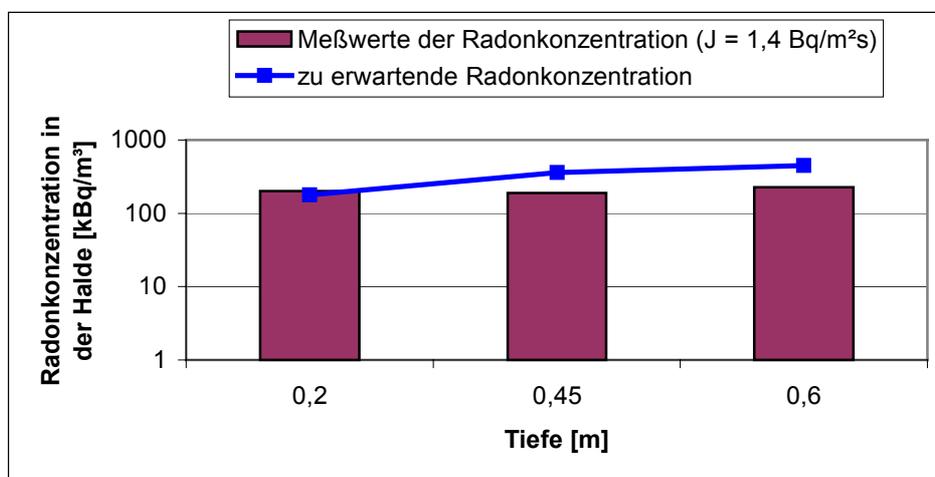


Abbildung 38: Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft und Referenzwert  $\bar{C}_{\text{Rn}}$  im Bereich des Aufschlusses Sch 16 (Haldenfuß), die parallel dazu ermittelte Radonexhalationsrate betrug  $1,4 \text{ Bq/m}^2\text{s}$  und liegt damit deutlich oberhalb des Referenzwertes für diffusiven Radontransport  $\bar{J}$

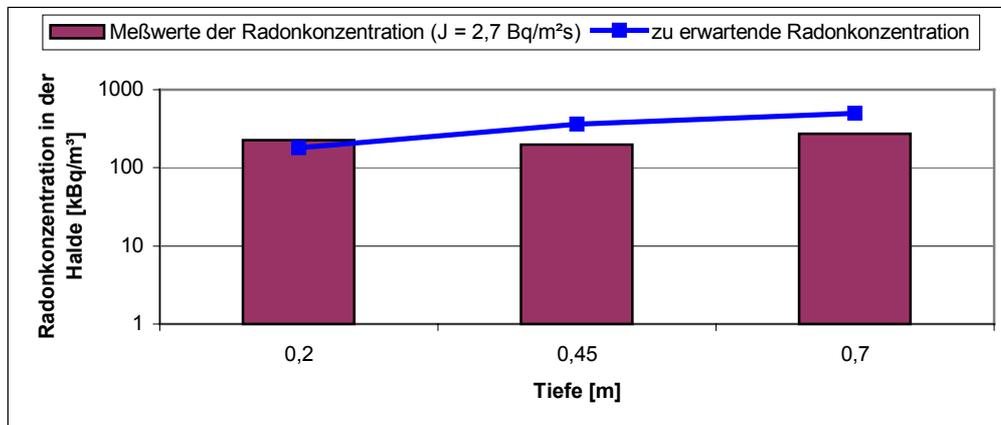


Abbildung 39: Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft und Referenzwert  $\bar{C}_{Rn}$  im Bereich des Aufschlusses Sch 17 (Haldenfuß), die parallel dazu ermittelte Radonexhalationsrate betrug  $2,7 \text{ Bq/m}^2\text{s}$  und liegt damit deutlich oberhalb des Referenzwertes für diffusiven Radontransport  $\bar{J}$

- Die komplexe Auswertung der Messwerte der Vor-Ort-Parameter und der Bleispur unter Beachtung der lockeren Lagerung des Haldenmaterials zeigt, dass die Radonmigration am untersuchten Standort durch konvektive Prozesse dominiert wird und die in /10/ und /39/ dargestellten Exhalationsmuster zu erwarten sind.
- Ein offensichtlicher Zusammenhang zwischen Emanationskoeffizienten und Wurzelzahl liegt in den untersuchten Aufschlüssen nicht vor. Aufgrund der bereits visuell erkennbaren lockeren Lagerung des Haldenmaterials ist davon auszugehen, dass sich bereits bei der Schüttung der Halde ein gut ausgeprägtes Grobporen- und Kluftsystem gebildet hat was dem Radontransport gute Wegsamkeiten bietet und durch Wurzeln genutzt wird.

### 9.1.6 IAA Lengsfeld

Auf der IAA Lengsfeld wurden 4 Aufschlüsse (Sch18 - Sch21) abgeteuft. Der Bewuchs im Bereich der Aufschlüsse besteht vorwiegend aus Jungpflanzen von Birke, Fichte, Kiefer und z.T. Buche, Ahorn. Die Aufschlüsse zeigen folgende Charakteristik:

- Die Abdeckung wird von Prozessrückständen der Fluss- und Schwerspataufbereitung gebildet. Ihre Mächtigkeit variiert in den untersuchten Aufschlüssen zwischen (0,65 - 1,10) m. Sie sind pedrographisch als homogene Sande zu charakterisieren.
- Die spezifische Ra-226-Aktivität der Abdeckung variiert im Mittel zwischen (90 - 175) Bq/kg (vgl. beispielhaft Abbildung 40).

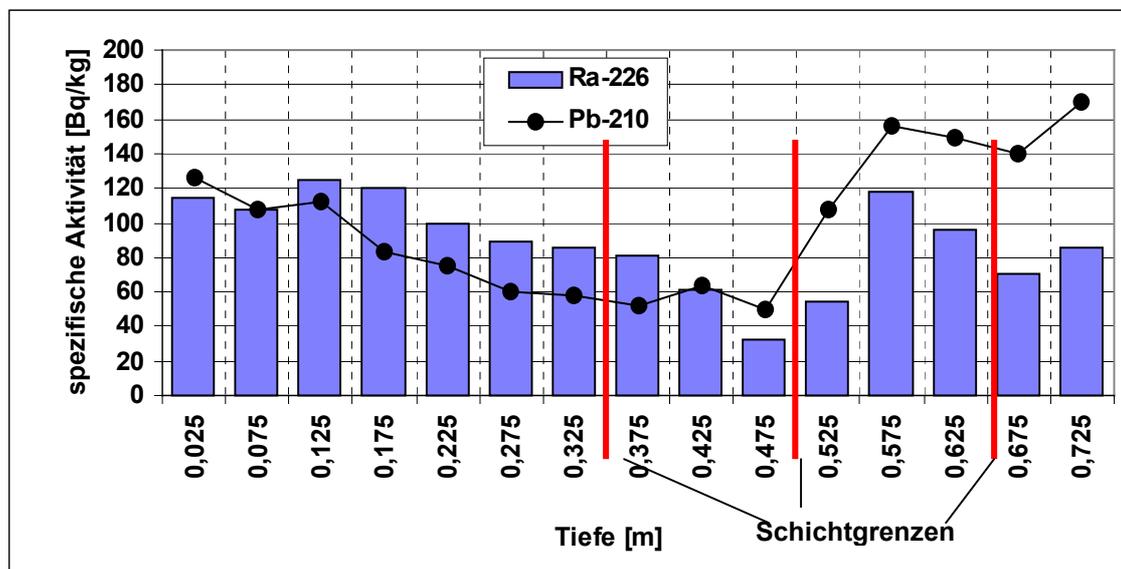


Abbildung 40: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Abdeckmaterial des Aufschlusses Sch20 in Abhängigkeit von der Tiefe

- Die spezifische Ra-226-Aktivität der Tailings liegt im Mittel bei 3600 - 5920 Bq/kg (vgl. Abbildung 41 und Abbildung 42).

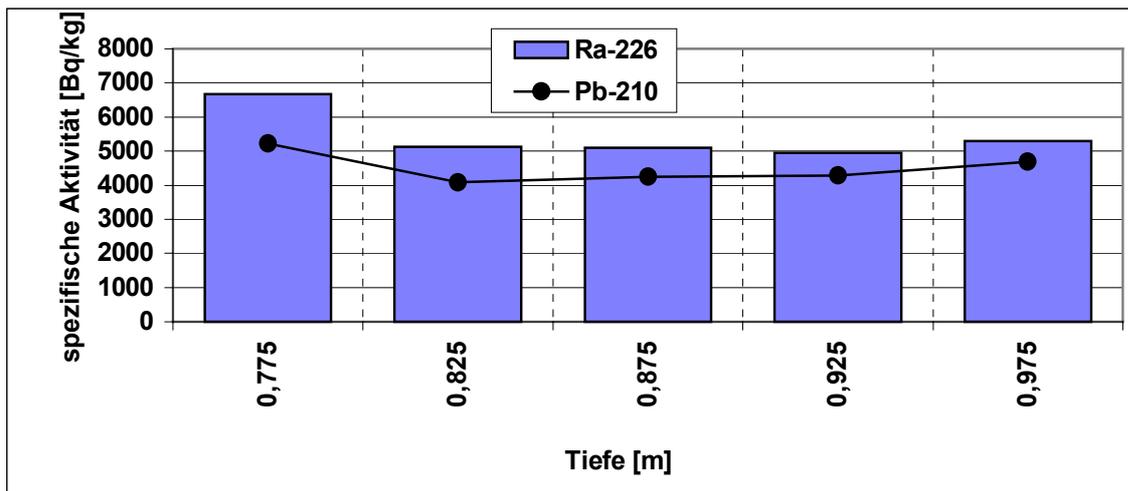


Abbildung 41: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 in den Tailings des Aufschlusses Sch20 in Abhängigkeit von der Tiefe

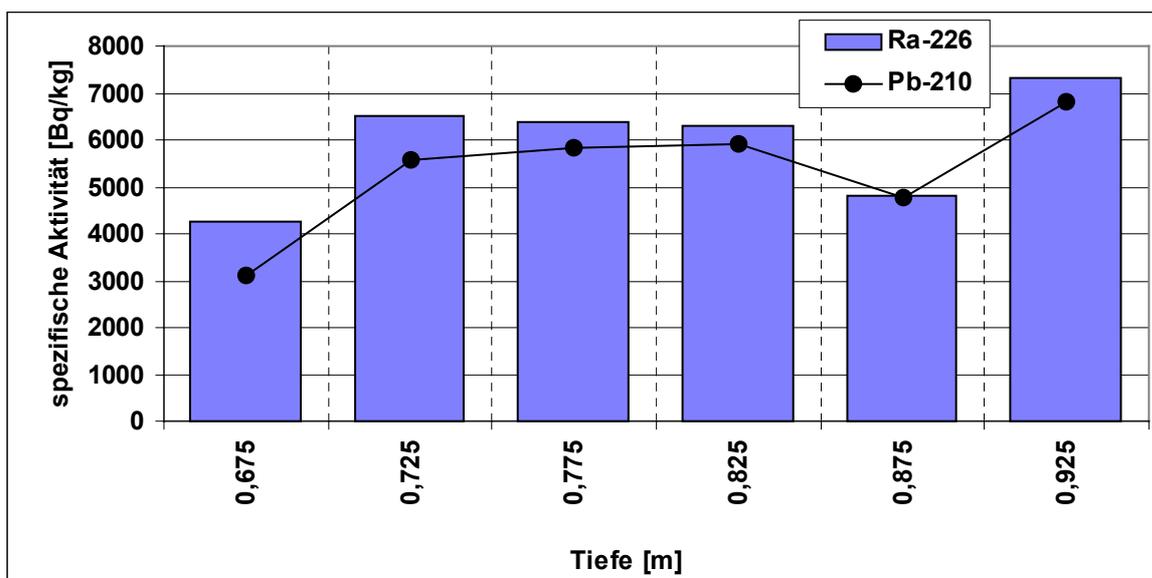


Abbildung 42: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 in den Tailings des Aufschlusses Sch21 in Abhängigkeit von der Tiefe

- Die gemessene Ortsdosisleistung der Gammastrahlung (ODL) lag im Bereich der Aufschlüsse zwischen 170 - 380 nSv/h.
- In den Tailings ist eine deutlich negative (vgl. Abbildung 44 und Abbildung 46), im Abdeckmaterial z.T. eine positive Bleispur ausgeprägt (vgl. Abbildung 43 und Abbildung 45). Das Integral über die gesamte Bleispur ist für alle Aufschlüsse jedoch negativ. Dies zeigt, dass es sich um eine vergleichsweise durchlässige Abdeckung handelt und die Diffusionslänge im Bereich von > 1 m liegt.

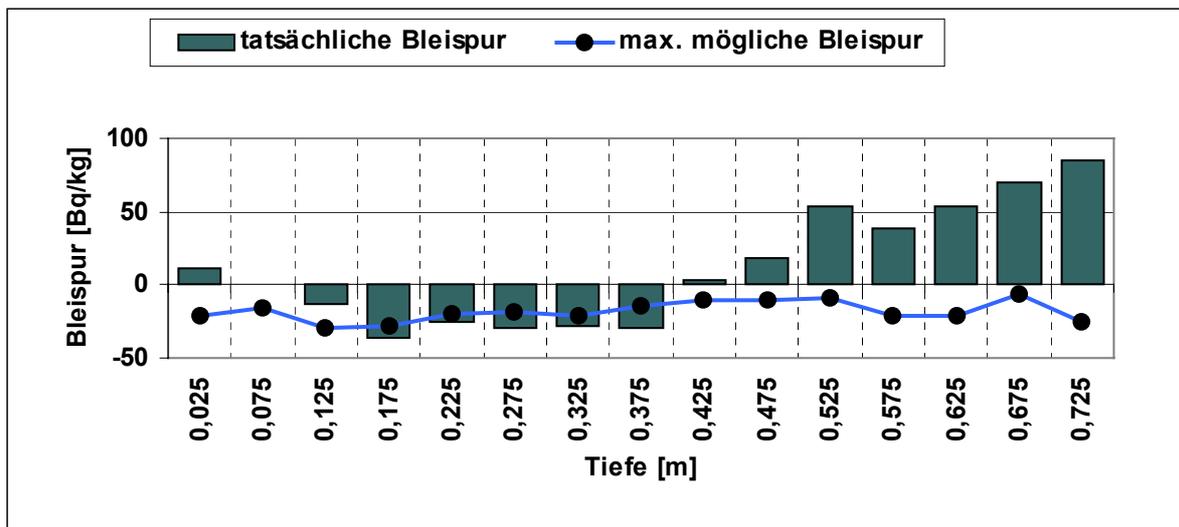


Abbildung 43: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Abdeckmaterial des Aufschlusses Sch20 in Abhängigkeit von der Tiefe

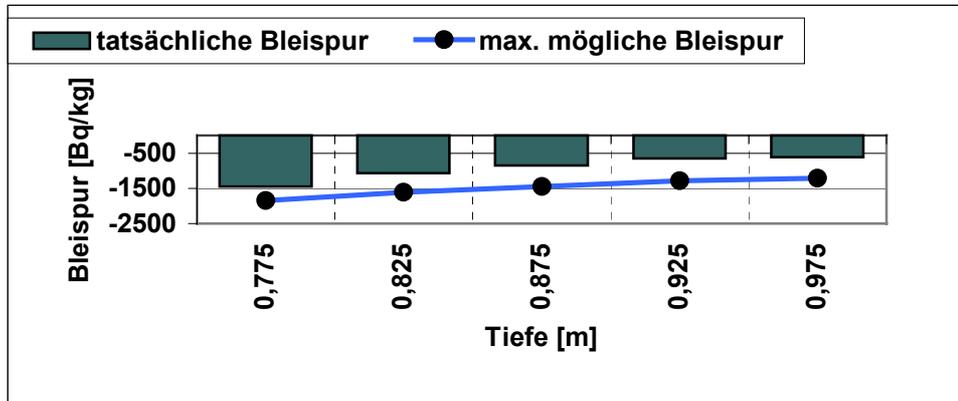


Abbildung 44: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur in den Tailings des Aufschlusses Sch20 in Abhängigkeit von der Tiefe

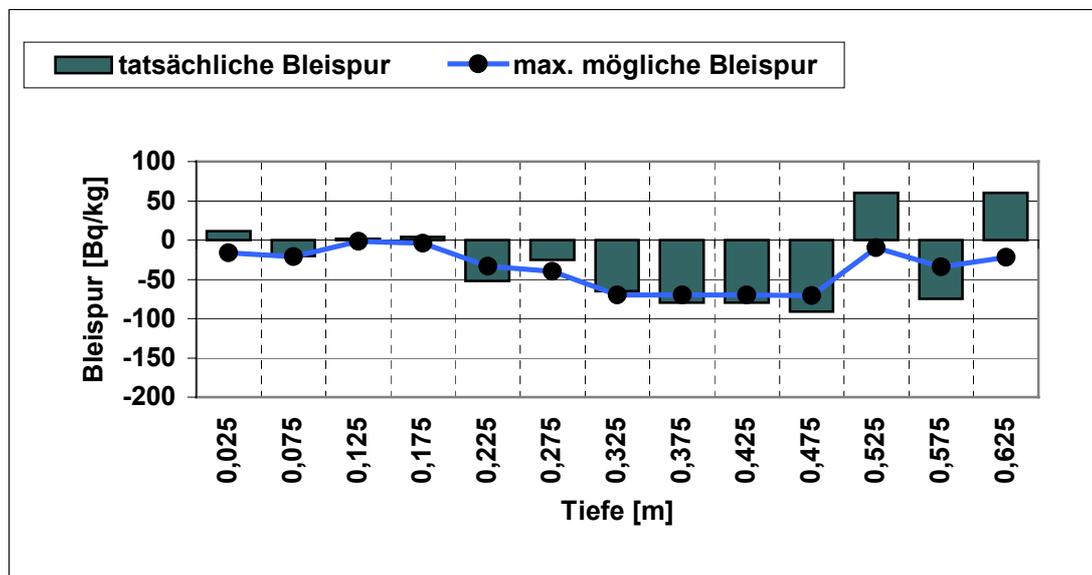


Abbildung 45: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Abdeckmaterial des Aufschlusses Sch21 in Abhängigkeit von der Tiefe

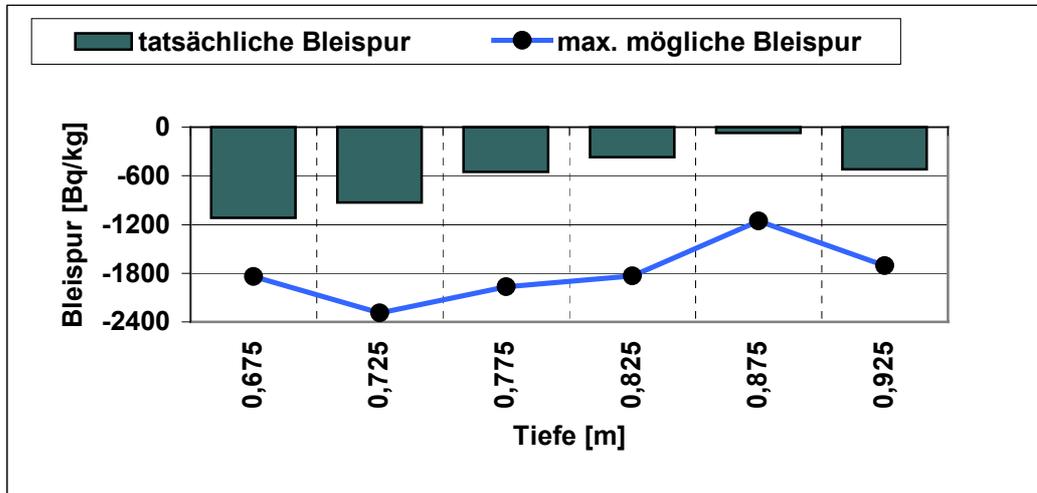


Abbildung 46: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur in den Tailings des Aufschlusses Sch21 in Abhängigkeit von der Tiefe

- Sowohl die Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft der Ablagerung als auch der Radonexhalationsrate zeigen, dass Radon aus den Tailings in die Atmosphäre migriert und dass diese Prozesse sowohl tages- und jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen als auch ortsabhängig (Haldenfuß, Haldenplateau) ein gegenläufiges Verhalten zeigen (vgl. beispielhaft Abbildung 47).

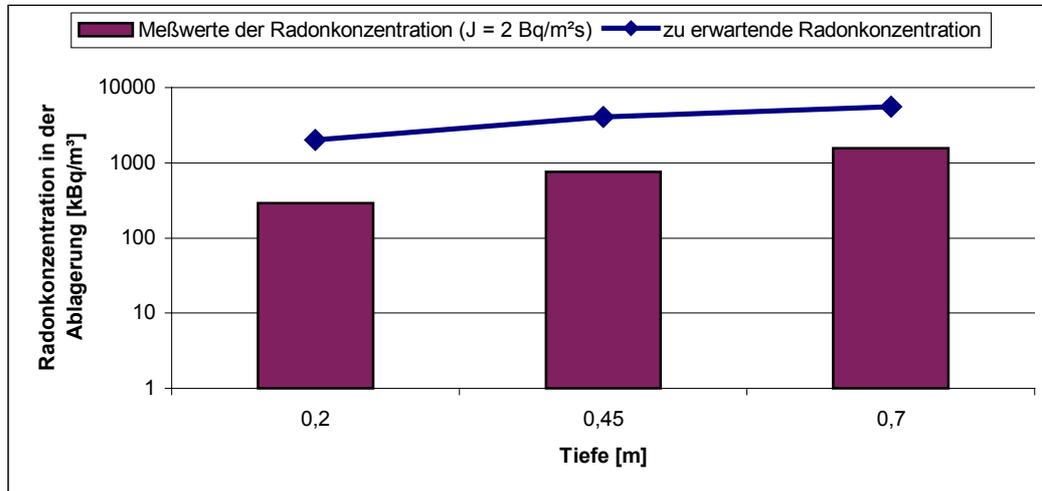


Abbildung 47: Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft und Referenzwert  $\bar{C}_{Rn}$  in der Ablagerung im Bereich des Aufschlusses Sch21 in Abhängigkeit von der Tiefe, die parallel dazu gemessene Radonexhalationsrate betrug  $2 \text{ Bq/m}^2\text{s}$  ( $19^\circ\text{C}$  Lufttemperatur) und wurde zu einem späteren Zeitpunkt zu  $1,2 \text{ Bq/m}^2\text{s}$  ( $14^\circ\text{C}$  Lufttemperatur) bestimmt, sie liegt damit deutlich oberhalb des Referenzwertes für diffusiven Radontransport  $\bar{J}$ .

- Die z.T. in unterschiedlichen Tiefen gemessenen Gaspermeabilitäten sind mit  $10^{-11} \text{ m}^2$  charakteristisch für die aufgeschlossenen Sande und belegen, dass es sich um ein vergleichsweise homogenes, jedoch gasdurchlässiges Material handelt (vgl. beispielhaft Abbildung 48).

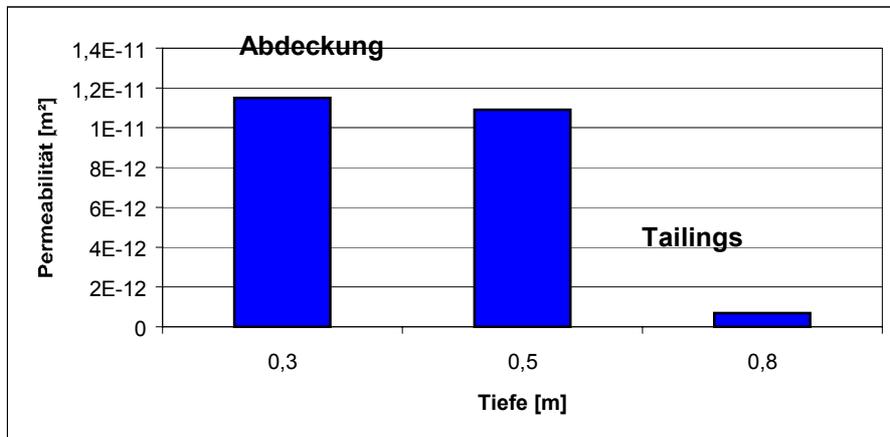


Abbildung 48: Gaspermeabilität im Bereich des Aufschlusses Sch21 in Abhängigkeit von der Tiefe

- Die in unterschiedlichen Tiefen ermittelte Lagerungsdichte weist auf eine vergleichsweise lockere Lagerung hin (vgl. beispielhaft Abbildung 49).

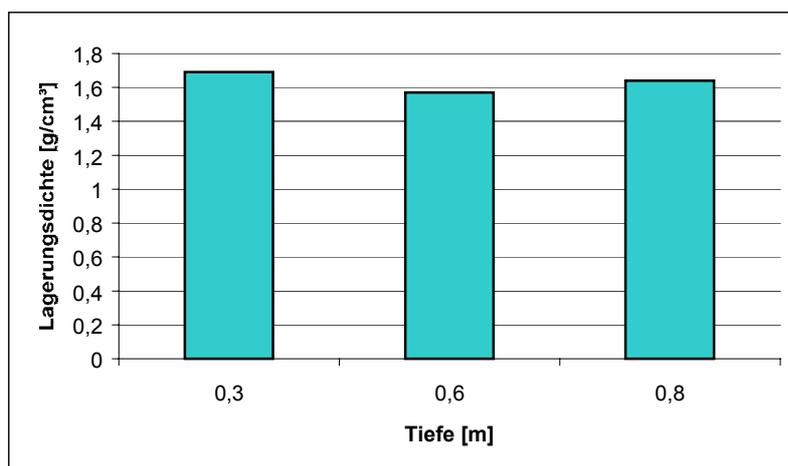


Abbildung 49: Messwerte der Lagerungsdichte im Aufschluss Sch20 in Abhängigkeit von der Tiefe

- Ein offensichtlicher Zusammenhang zwischen Wurzelzahl und Emanationskoeffizient konnte nicht nachgewiesen werden. Es ist jedoch anzunehmen, dass das bereits bei der Entstehung der Ablagerung eingelagerte vergleichsweise feinkörnige, mineralische Material von den Wurzeln nicht bzw. nur geringfügig weiter aufgeschlossen wird.
- Aufgrund der z.T. sehr guten Durchwurzelung des abgelagerten Materials die teilweise bis in die Tailings hineinreicht, ist wahrscheinlich, dass am Standort präferentielle Fließwege entlang von Wurzeln/Wurzelkanälen bestehen und begünstigend auf den Radontransport wirken. Dies könnte anhand von Versickerungsversuchen mit Tracerflüssigkeit visualisiert werden.

### 9.1.7 Nordhalde Lengenfeld

Auf der Nordhalde in Lengenfeld wurden 3 Aufschlüsse (Sch22 - Sch24) abgeteufelt. Den Bewuchs des Standortes bilden Grasgesellschaften mit Einzelbäumen wie z.B. Birken, Fichten. Die Aufschlüsse zeigen folgende Charakteristik:

- Die Mächtigkeit der Abdeckung betrug bei den Aufschlüssen Sch23, Sch24 0,35 m bzw. 0,5 m. Das Abdeckmaterial ist petrographisch als z.T. stark schluffiger Sand - Kies einzustufen.
- Im Bereich des Aufschlusses Sch22 war keine Abdeckschicht vorhanden.
- Die spezifische Ra-226-Aktivität des Abdeckmaterials betrug im Mittel 100 Bq/kg (vgl. Abbildung 50 und Abbildung 51).

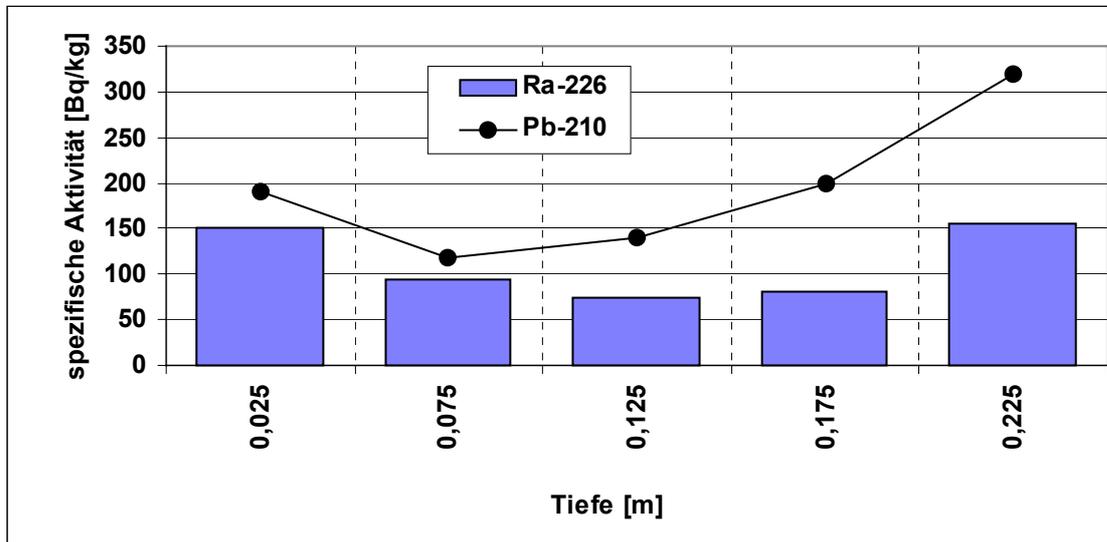


Abbildung 50: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 in der Abdeckung des Aufschlusses Sch23 in Abhängigkeit von der Tiefe

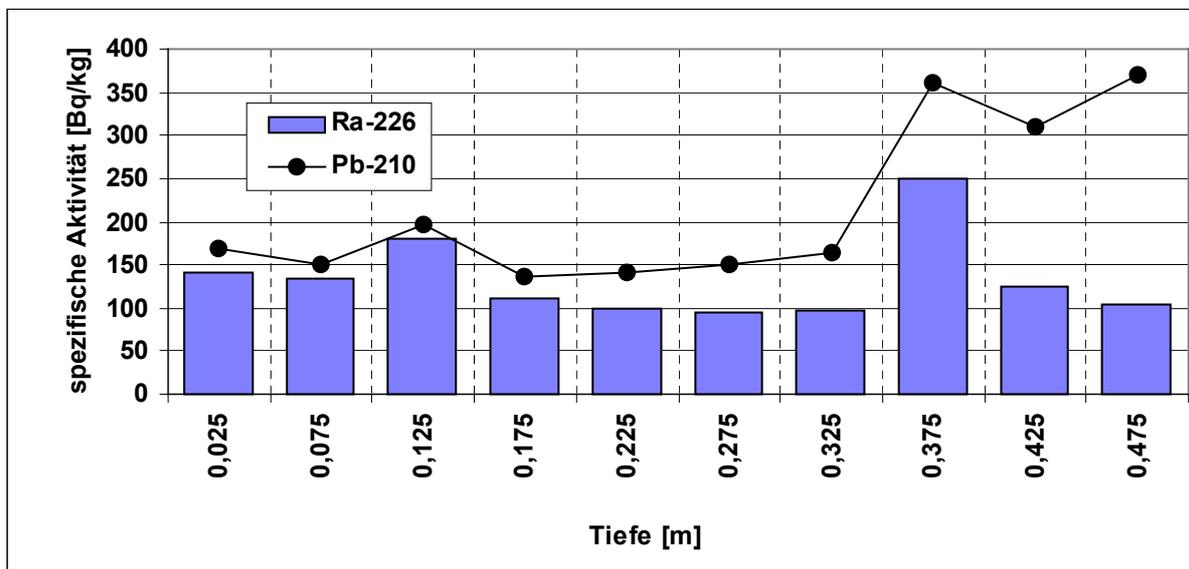


Abbildung 51: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 in der Abdeckung des Aufschlusses Sch24 in Abhängigkeit von der Tiefe

- Die spezifische Ra-226-Aktivität der Tailings variiert im Bereich von 3700 - 5210 Bq/kg und beträgt im Mittel 4500 Bq/kg (vgl. Abbildung 52 und Abbildung 53).

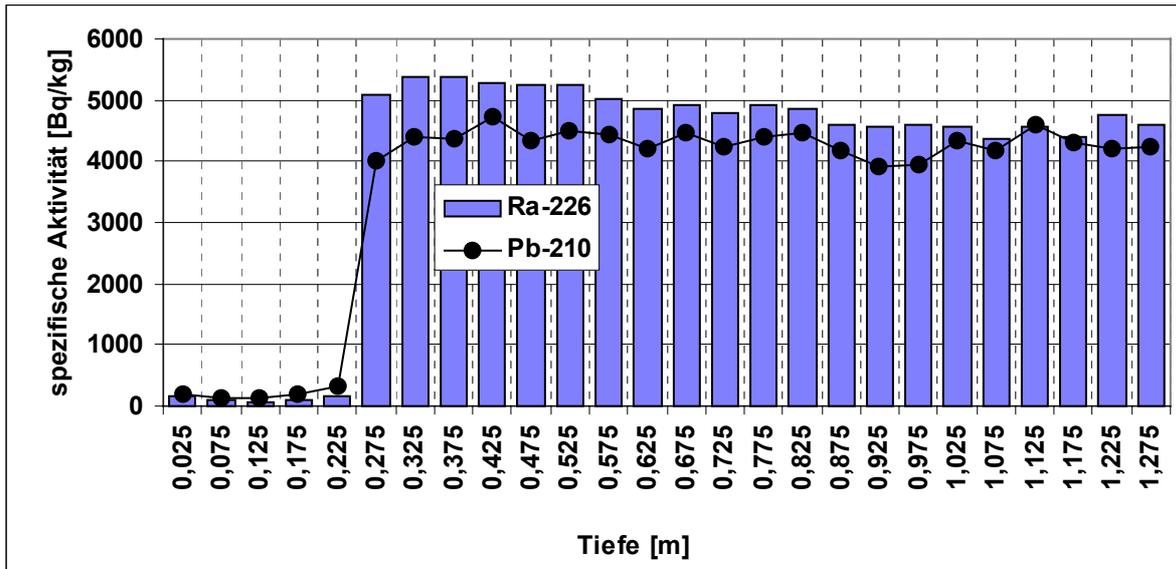


Abbildung 52: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch23 in Abhängigkeit von der Tiefe

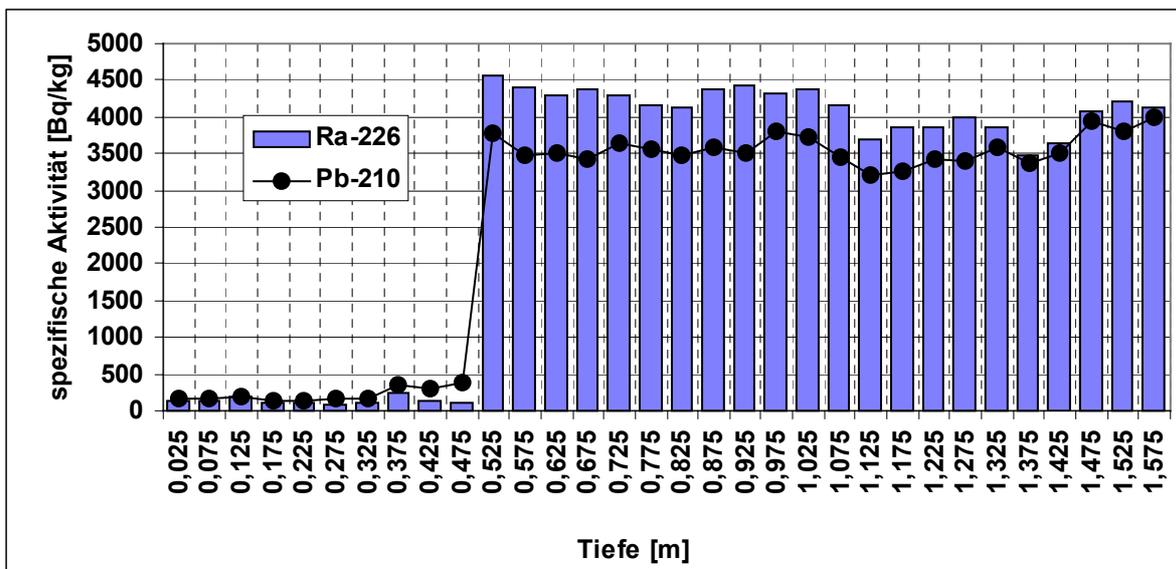


Abbildung 53: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch24 in Abhängigkeit von der Tiefe

- In allen Aufschlüssen ist in den Tailings eine negative Bleispur ausgeprägt, deren Betrag mit zunehmender Tiefe sinkt. Sie erreicht dabei im Falle des Vorhandenseins einer Abdeckschicht (Sch23, Sch24) Maximalwerte bis -1000 Bq/kg (vgl. Abbildung 55 und Abbildung 56) und bei Fehlen einer Abdeckschicht (Sch22) Maximalwerte bis -1500 Bq/kg (vgl. Abbildung 54). Dies lässt eine gewisse Dämmwirkung des Abdeckmaterials bezüglich des Radontransportes erkennen.

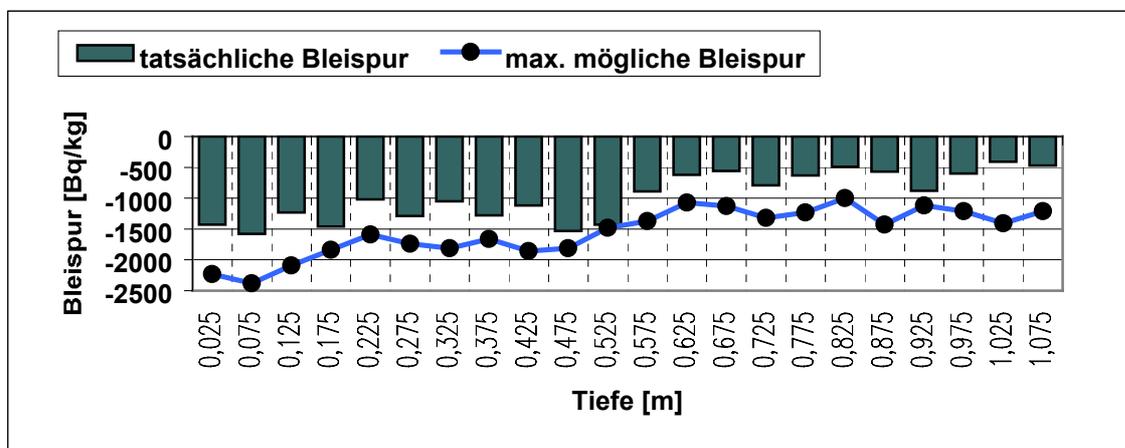


Abbildung 54: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch22 in Abhängigkeit von der Tiefe

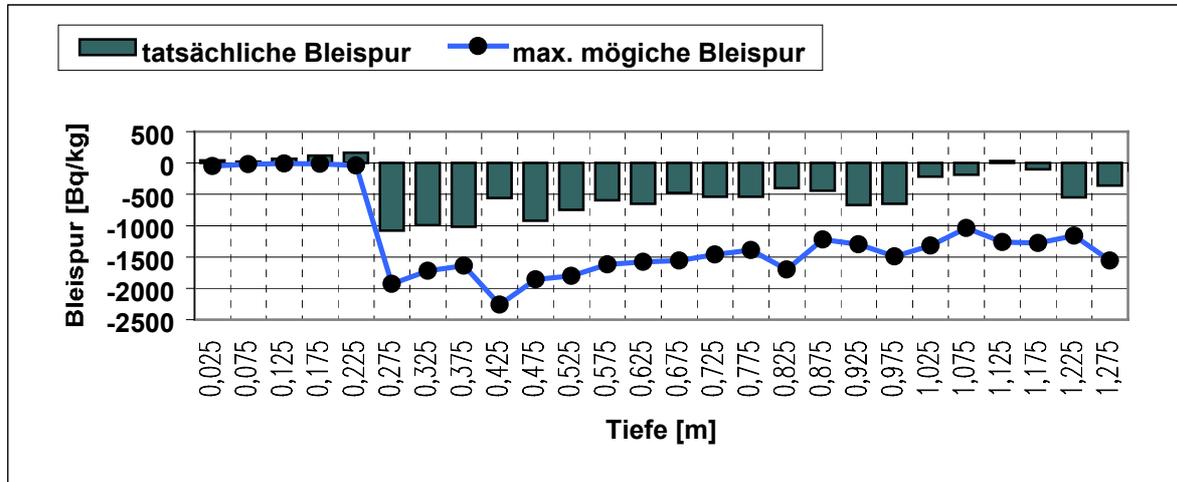


Abbildung 55: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch23 in Abhängigkeit von der Tiefe

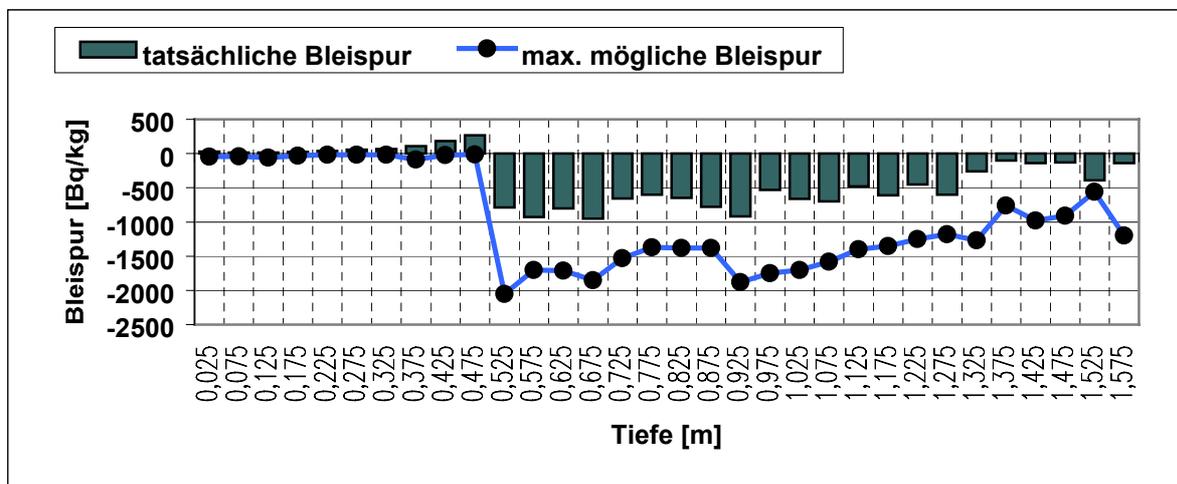


Abbildung 56: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch24 in Abhängigkeit von der Tiefe

- Das aufgeschlossene Abdeckmaterial weist eine deutlich positive Bleispur auf, deren Betrag mit zunehmender Tiefe ebenfalls ansteigt und bis maximal 250 Bq/kg erreicht (vgl. Abbildung 57 und Abbildung 58).

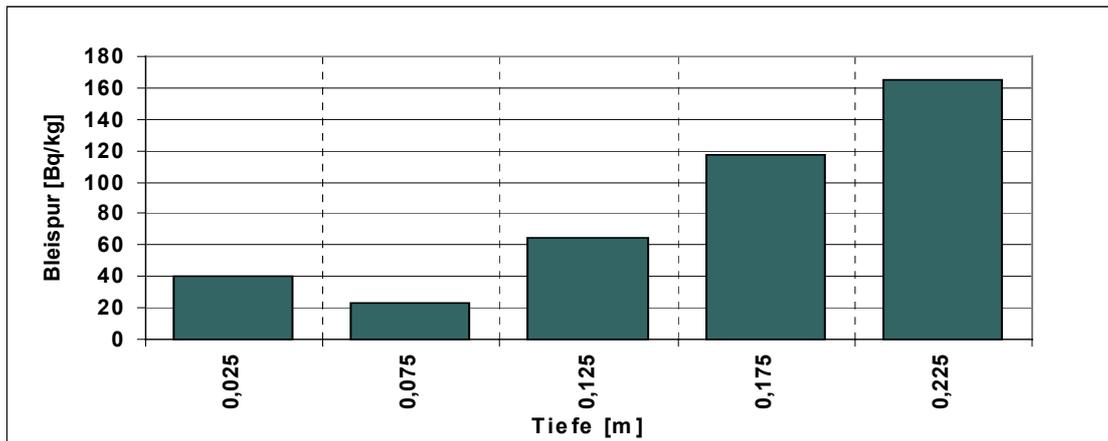


Abbildung 57: Bleispur in der Abdeckung des Aufschlusses Sch23 in Abhängigkeit von der Tiefe

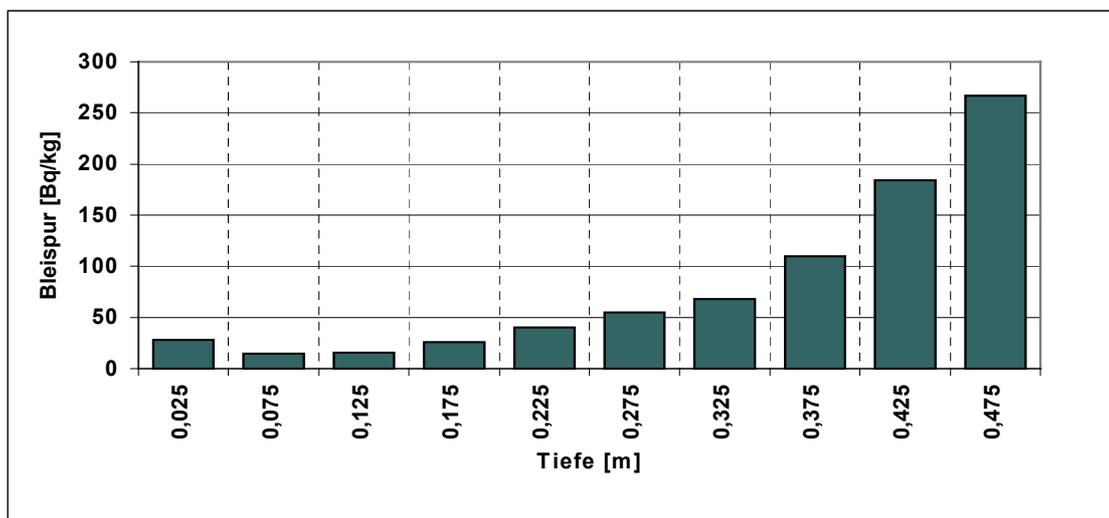


Abbildung 58: Bleispur in der Abdeckung des Aufschlusses Sch24 in Abhängigkeit von der Tiefe

- Das Integral über die Bleispur ist für alle Aufschlüsse deutlich negativ. Das heißt, die vorhandene Abdeckung ist relativ durchlässig für Radon. Dies belegen auch die Messwerte der Vor-Ort-Parameter Radonexhalationsrate und Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde (vgl. Abbildung 59 bis Abbildung 61). Die Messwerte der Radonexhalationsrate variieren in Abhängigkeit von der Lufttemperatur. Es ist offensichtlich, dass auf dem untersuchten Standort die in /10/ und /39/ dargestellten Radonexhalationsmuster zu verzeichnen sind und die Radonmigration in nicht zu vernachlässigender Größenordnung durch konvektive Prozesse bestimmt wird.

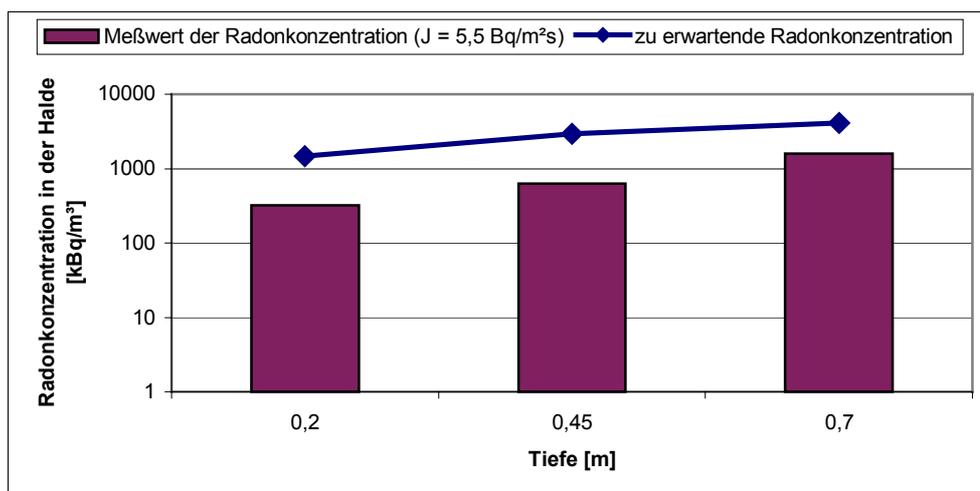


Abbildung 59: Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde im Bereich des Aufschlusses Sch22 (Haldenplateau) und Referenzwert  $\bar{C}_{Rn}$  in Abhängigkeit von der Tiefe, die an zwei Sommertagen am gleichen Standort ermittelte Radonexhalationsrate betrug 5,5 Bq/m<sup>2</sup>s (25 °C Lufttemperatur, vergleichsweise geringe Bodenfeuchte) bzw. 2 Bq/m<sup>2</sup>s (14 °C Lufttemperatur, vergleichsweise hohe Bodenfeuchte) und liegt damit oberhalb des Referenzwertes  $\bar{J}$ .

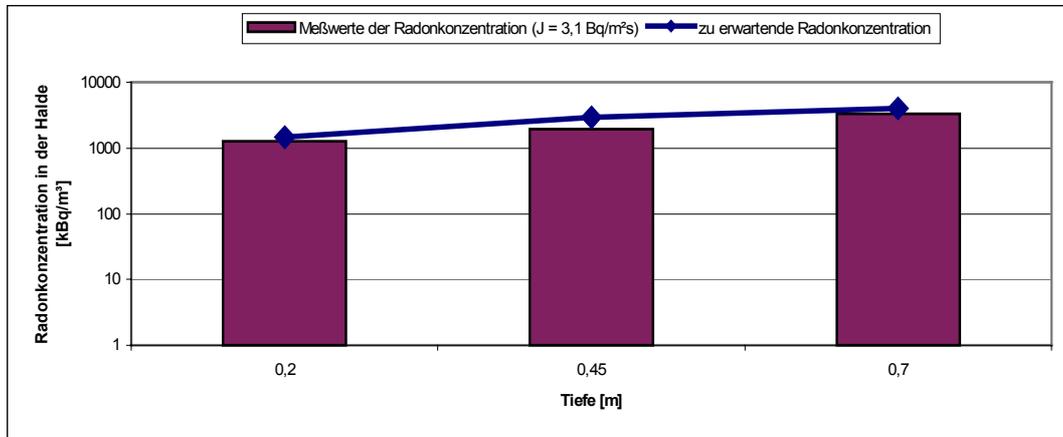


Abbildung 60: Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde im Bereich des Aufschlusses Sch23 (Haldenplateau) und Referenzwert  $\bar{C}_{Rn}$  in Abhängigkeit von der Tiefe, die an zwei Sommertagen am gleichen Standort ermittelte Radonexhalationsrate betrug 3,1 Bq/m<sup>2</sup>s (20 °C Lufttemperatur) bzw. 1,5 Bq/m<sup>2</sup>s (14°C Lufttemperatur, erhöhte Bodenfeuchte) und liegt damit oberhalb des Referenzwertes  $\bar{J}$ .

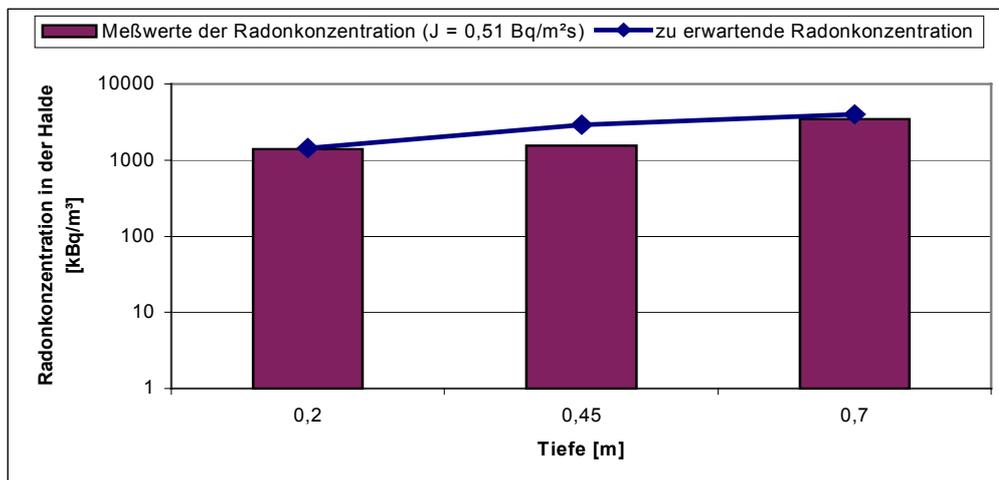


Abbildung 61: Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde im Bereich des Aufschlusses Sch24 (Haldenplateau) und Referenzwert  $\bar{C}_{Rn}$  in Abhängigkeit von der Tiefe, die an zwei Sommertagen am gleichen Standort ermittelte Radonexhalationsrate betrug 0,51 Bq/m<sup>2</sup>s (23 °C Lufttemperatur) bzw. 2,5 Bq/m<sup>2</sup>s (14°C Lufttemperatur) und liegt damit oberhalb des Referenzwertes  $\bar{J}$ .

- Die in Abhängigkeit von der Tiefe bestimmte Lagerungsdichte in den Aufschlüssen liegt im Bereich von 1,5 - 1,75 g/cm<sup>3</sup>. Sie ist einerseits ein Indiz für eine vergleichsweise gute Durchlässigkeit des abgelagerten Materials, andererseits zeigt sich, dass sich Abdeckmaterial und Tailings hinsichtlich ihrer Lagerungsdichte kaum voneinander unterscheiden. Das Abdeckmaterial stellt somit keinen Stauer für Gas- und Wassertransportprozesse dar.
- Einen weiteren Beleg für die Durchlässigkeit der Abdeckung liefern die durchgeführten Versickerungsversuche mit Tracerflüssigkeit (vgl. /16/ bzw. Abschnitt 9.2), auf die hier nur beispielhaft mit Abbildung 62 verwiesen werden soll und die gezeigt haben, dass im Abdeckmaterial gute Wegsamkeiten bestehen, die überwiegend entlang von Wurzelkanälen bis ins Tailingsmaterial hineinreichen.



Abbildung 62: Fließmuster der Tracerflüssigkeit im zu den Aufschlüssen Sch23 und Sch24 benachbarten Aufschluss V9

### 9.1.8 IAA Dänkritz

Auf der IAA Dänkritz wurden 4 Aufschlüsse (Sch25 - Sch28) abgeteuft. Der Bewuchs im Bereich der Aufschlüsse besteht überwiegend aus Grasgesellschaften mit Birken, jungen Eichen, Himbeere und Kiefer. Die Aufschlüsse zeigen folgende Charakteristik:

- Die erkundete Abdeckmächtigkeit variiert zwischen 0,65 - 0,9 m. Das Abdeckmaterial weist vergleichsweise heterogene Lagerungsverhältnisse auf und ist pedrographisch als Feinsand - Schluff mit vergleichsweise hohem Anteil an kiesigen und steinigen Beimengungen einzuordnen.
  - Die Abdeckung besteht aus einem vergleichsweise heterogenen Material das pedrographisch als kiesiger, z.T. stark schluffiger, schwach steiniger Sand einzustufen ist.
  - Die gemessene Ortsdosisleistung der Gammastrahlung (ODL) lag im Bereich der Aufschlüsse zwischen 120 - 150 nSv/h.
  - Die spezifische Ra-226-Aktivität des Abdeckmaterials variiert zwischen 50 - 100 Bq/kg, wobei sie in den obersten Abdeckschichten z.T. bis zu 200 Bq/kg aufweist (vgl. z.B. Abbildung 63 und Abbildung 64).
  - Die spezifische Ra-226-Aktivität der Tailings liegt im Mittel bei 3200 - 3500 Bq/kg. Nur in Aufschluss Sch27 wurden Maximalwerte von bis zu 8000 Bq/kg erkundet (vgl. z.B. Abbildung 65 und Abbildung 66).

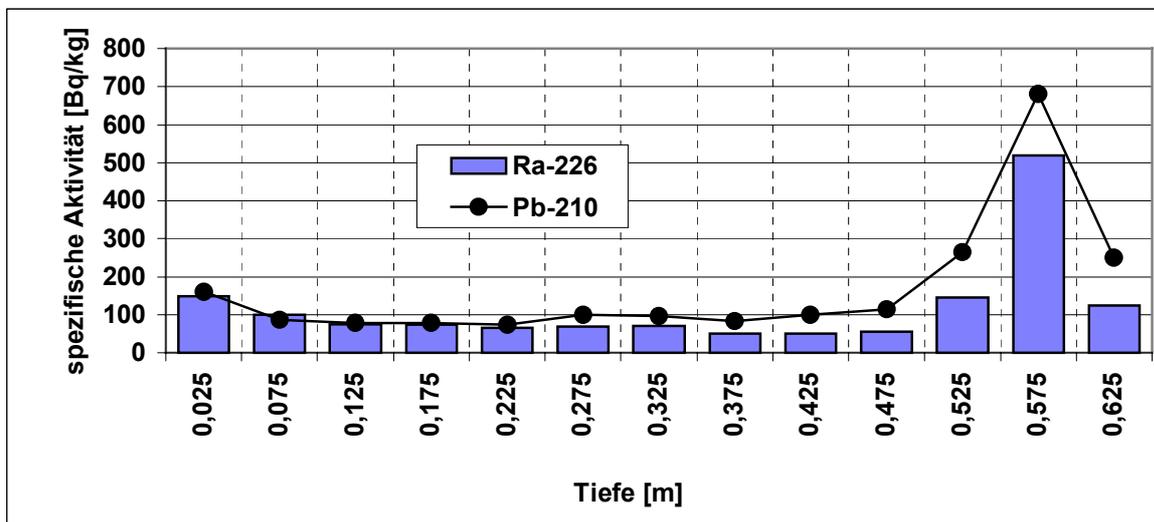


Abbildung 63: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Abdeckmaterial des Aufschlusses Sch26 in Abhängigkeit von der Tiefe

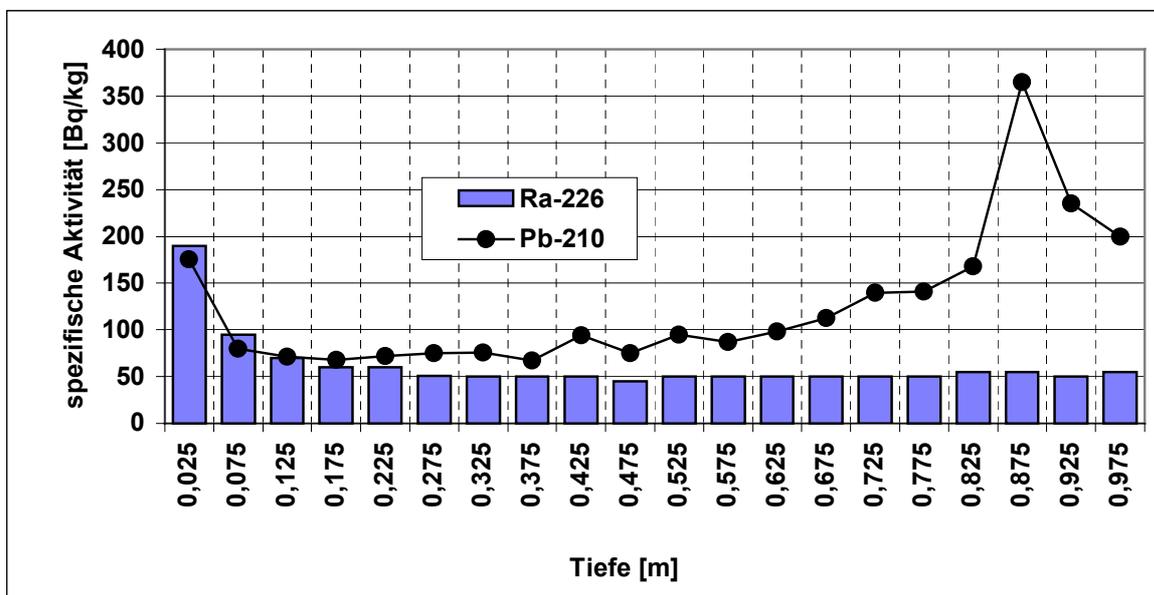


Abbildung 64: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Abdeckmaterial des Aufschlusses Sch27 in Abhängigkeit von der Tiefe

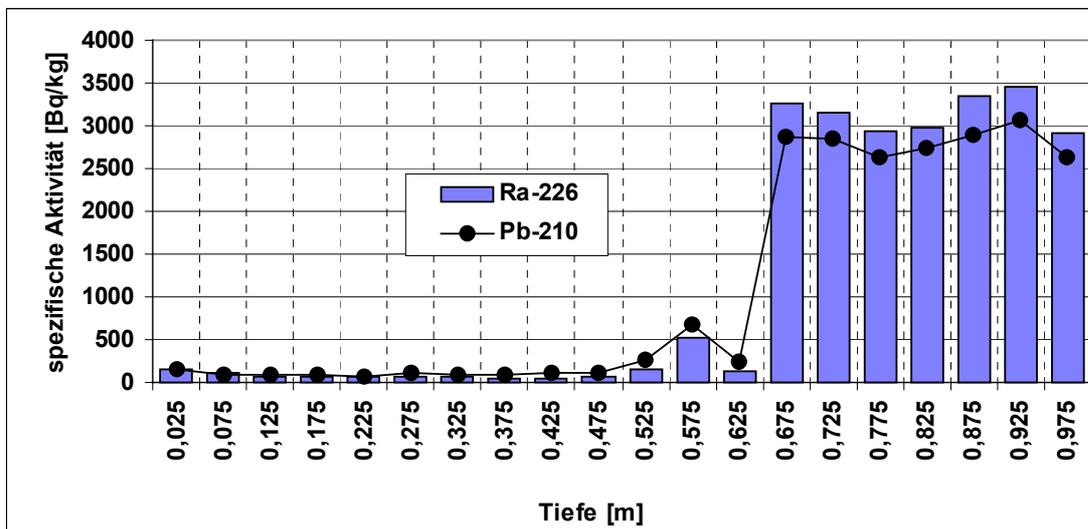


Abbildung 65: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch26 in Abhängigkeit von der Tiefe

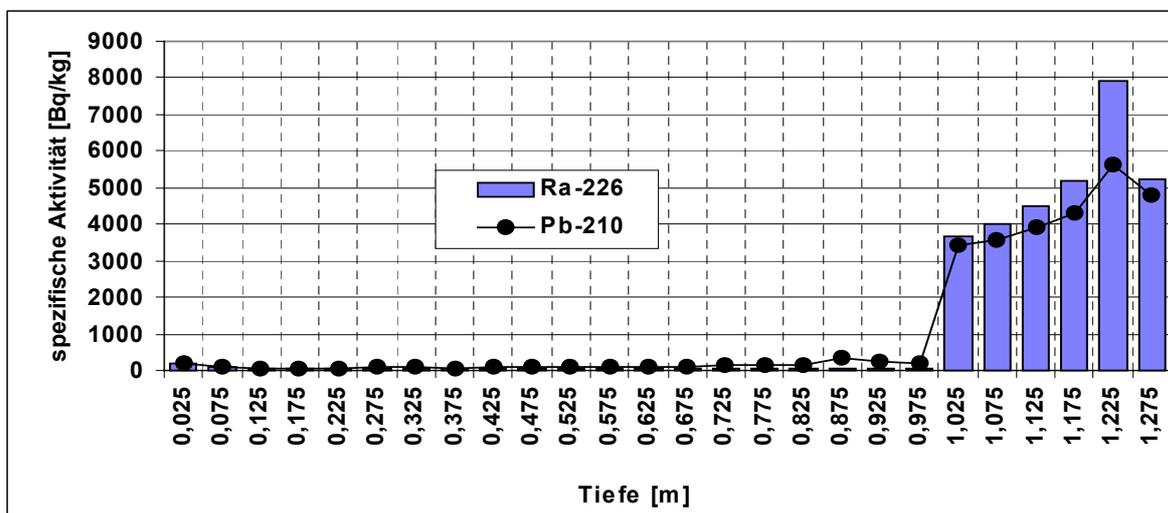


Abbildung 66: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch27 in Abhängigkeit von der Tiefe

- Die Bleispur in den Tailings ist in allen Aufschlüssen deutlich negativ und erreicht Beträge von bis zu -500 Bq/kg. Eine mit der Tiefe abnehmende Tendenz der negativen Bleispur in den Tailings ist nur für die Aufschlüsse Sch27 und Sch28 zu verzeichnen. Im Fall des Aufschlusses Sch28 ist der Betrag der negativen Bleispur mit maximal -400 Bq/kg deutlich geringer als der in den anderen Aufschlüssen (vgl. z.B. Abbildung 67 und Abbildung 68).

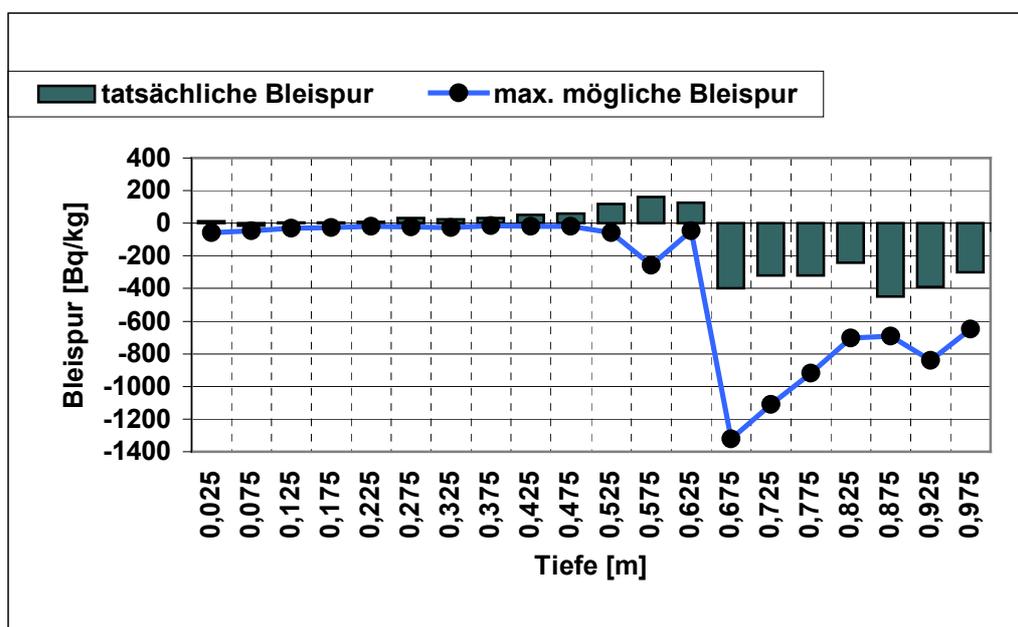


Abbildung 67: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch26 in Abhängigkeit von der Tiefe

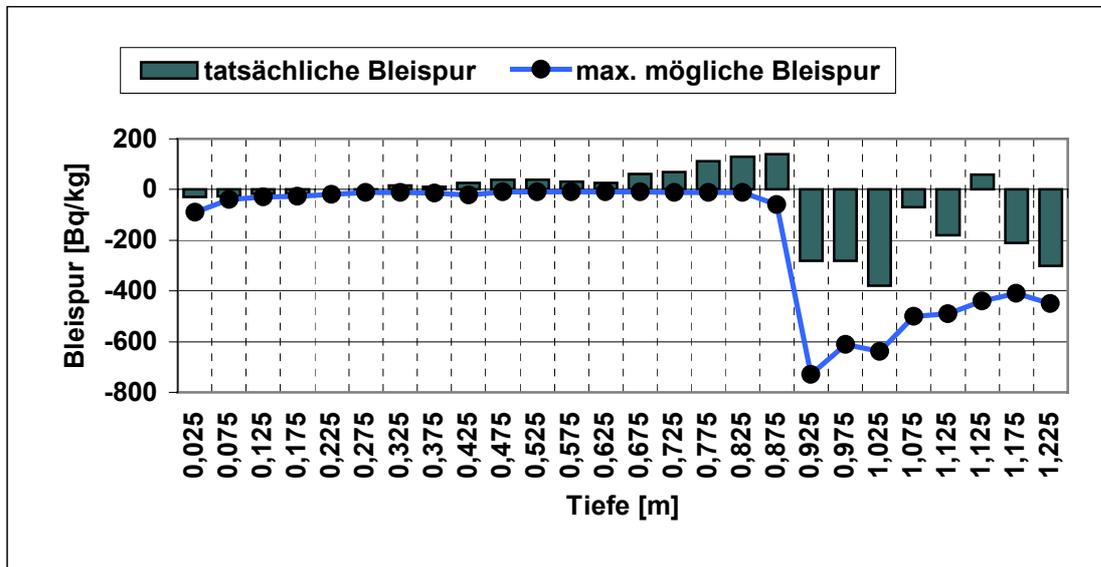


Abbildung 68: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch28 in Abhängigkeit von der Tiefe

- Im Abdeckmaterial hat sich in allen Aufschlüssen ab einer Tiefe von im Mittel 0,3 m eine positive Bleispur ausgeprägt, deren Betrag mit zunehmender Tiefe bis zur Schichtgrenze zu den Tailings ansteigt und Werte von bis zu 150 (Sch26 und Sch28) bzw. 300 Bq/kg (Sch25 und Sch27) erreicht (vgl. z.B. Abbildung 69 und Abbildung 70).

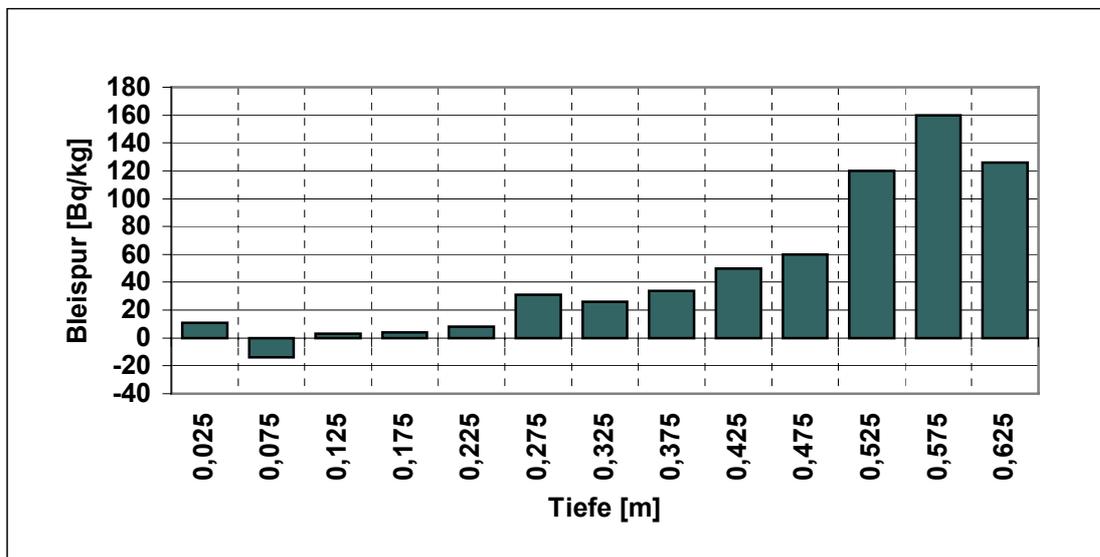


Abbildung 69: Bleispur im Abdeckmaterial des Aufschlusses Sch26 in Abhängigkeit von der Tiefe

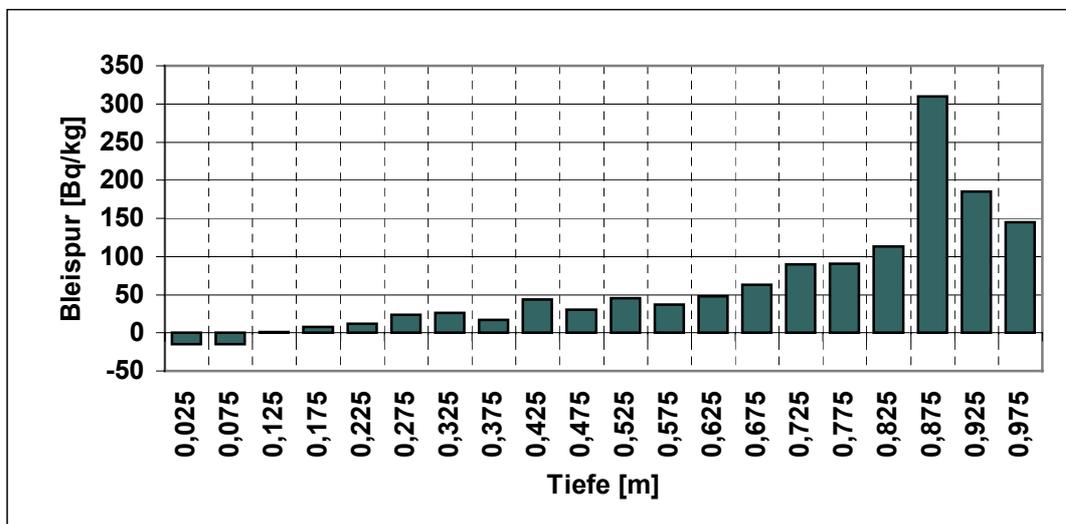


Abbildung 70: Bleispur im Abdeckmaterial des Aufschlusses Sch27 in Abhängigkeit von der Tiefe

- In den oberflächennahen Schichten des Abdeckmaterials liegt mit Ausnahme des Aufschlusses Sch28 Gleichgewicht zwischen Pb-210 und Ra-226 vor (vgl. z.B. Abbildung 69 und Abbildung 70). Im Aufschluss Sch28 ist in diesem Bereich eine negative Bleispur ausgeprägt.
- Das Integral über die gesamte Bleispur ist in allen Aufschlüssen negativ. Dies ist ein Indiz dafür dass Radon aus dem abgelagerten Material in darüber liegende Schichten transportiert wird. Dies bestätigen auch die Messwerte der Vor-Ort-Parameter Radonexhalationsrate und Radonkonzentration in der Bodenluft der Abdeckung (vgl. z.B. Abbildung 71 und Abbildung 72).

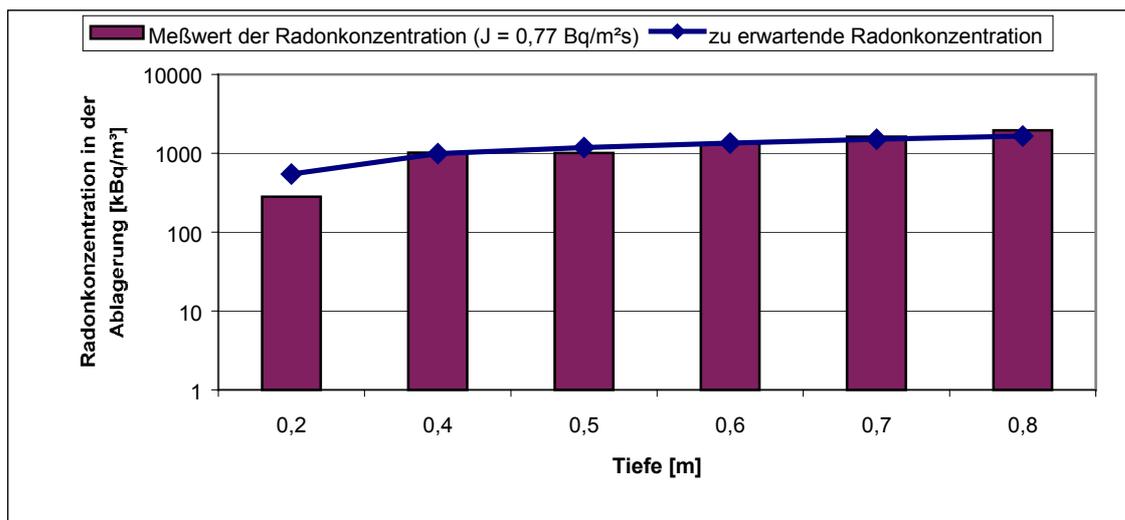


Abbildung 71: Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft des Abdeckmaterials im Bereich des Aufschlusses Sch25 und Referenzwert  $\bar{C}_{Rn}$  in Abhängigkeit von der Tiefe, der Vergleich der Messwerte mit dem Referenzwert zeigt, dass eine starke Nachlieferung von Radon aus tieferen Schichten zu verzeichnen ist.

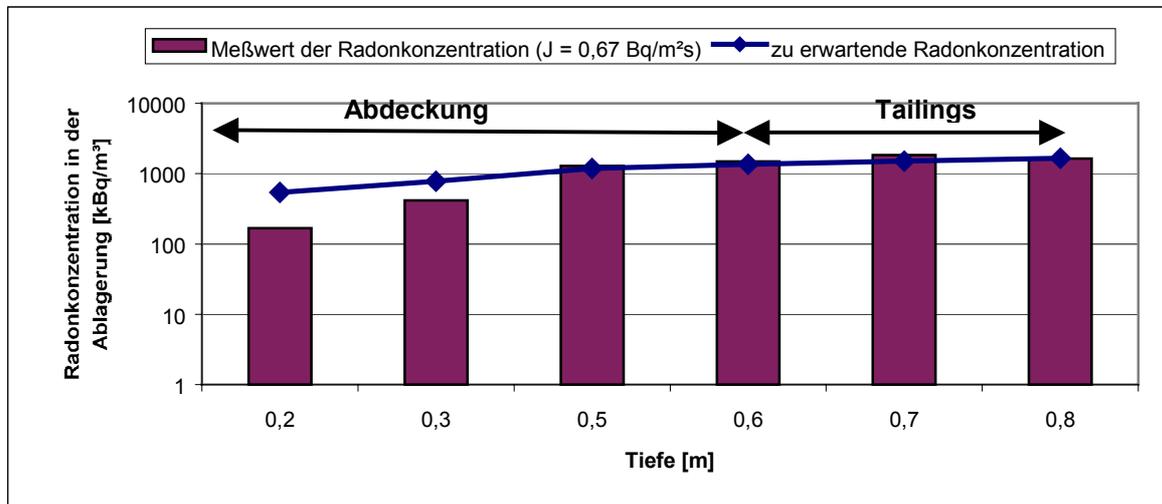


Abbildung 72: Messwerte der Radonkonzentration in der Bodenluft des Abdeckmaterials im Bereich des Aufschlusses Sch26 und Referenzwert  $\bar{C}_{Rn}$  in Abhängigkeit von der Tiefe, der Vergleich der Messwerte mit dem Referenzwert zeigt, dass eine starke Nachlieferung von Radon aus tieferen Schichten zu verzeichnen ist

- Alle Aufschlüsse wurden am Oberhang des Dammes nahezu auf einer Linie abgeteuft. Ein Vergleich der zu unterschiedlichen Tageszeiten ermittelten Radonexhalationsraten ist in der Abbildung 73 gegeben. Sie zeigen, daß sich die Exhalationsraten für diese Meßkampagne etwa um Faktor 2 unterschieden.

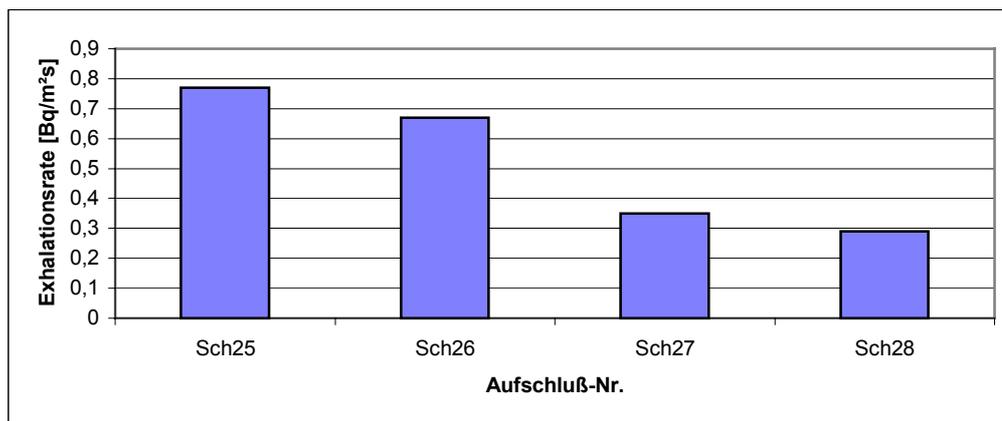


Abbildung 73: Exhalationsrate und Lufttemperatur in den Aufschlüssen des Dammbereiches der IAA Dänkriz

- Das Abdeckmaterial ist aufgrund seiner Heterogenität, der vorhandenen Durchwurzelung und der Bewertung der Bleispur sowie der Vor-Ort-Parameter als durchlässig einzuschätzen. Dies bestätigen auch die parallel zu den Aufschlussarbeiten durchgeführten Messungen der Gaspermeabilität des Abdeckmaterial, die lokal deutlich variieren und vorwiegend in der Größenordnung von  $10^{-11}$  m<sup>2</sup> liegen und die mittels Stechzylinder bestimmte Lagerungsdichte, die im Bereich von 1,5 - 2 g/cm<sup>3</sup> variiert.
- Einen weiteren Beleg für das Vorhandensein vergleichsweise guter Wasser- und Gaswegsamkeiten im abgelagerten Material liefert der in der Nachbarschaft zu den untersuchten Aufschlüssen durchgeführte Versickerungsversuch mit Tracerflüssigkeit (vgl. /16/ und Abschnitt 9.2), der hier nur anhand Abbildung 74 illustriert werden soll. Er zeigt, dass die Tracerflüssigkeit innerhalb von 24 Stunden bis in Tiefen von 1,10 m vorgedrungen ist und innerhalb der Abdeckung präferen-

tielle Fließwege vorhanden sind, die z.T. an Wurzeln und Wurzelkanäle gekoppelt sind.

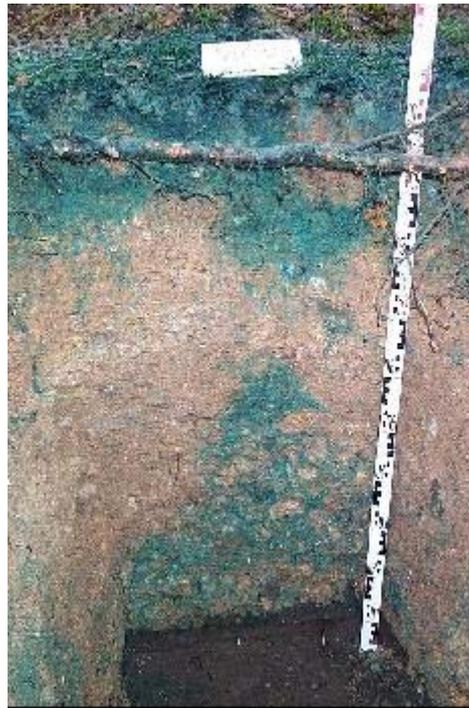


Abbildung 74: Fließbild der Tracerflüssigkeit des Versickerungsversuches V2 in der Nachbarschaft zu den Aufschlüssen Sch25 - Sch28

- Die ermittelten Emanationskoeffizienten der gewonnenen Feststoffproben zeigen z.T. in Abhängigkeit von der Aufschlusstiefe ein ähnliches Verhalten wie die erkundete Wurzelzahl. Es wird vermutet, dass die Wurzeln aufgrund physikalischer Verwitterungsprozesse die Kornverteilung des abgelagerten Materials in Richtung geringerer Korndurchmesser verschieben.

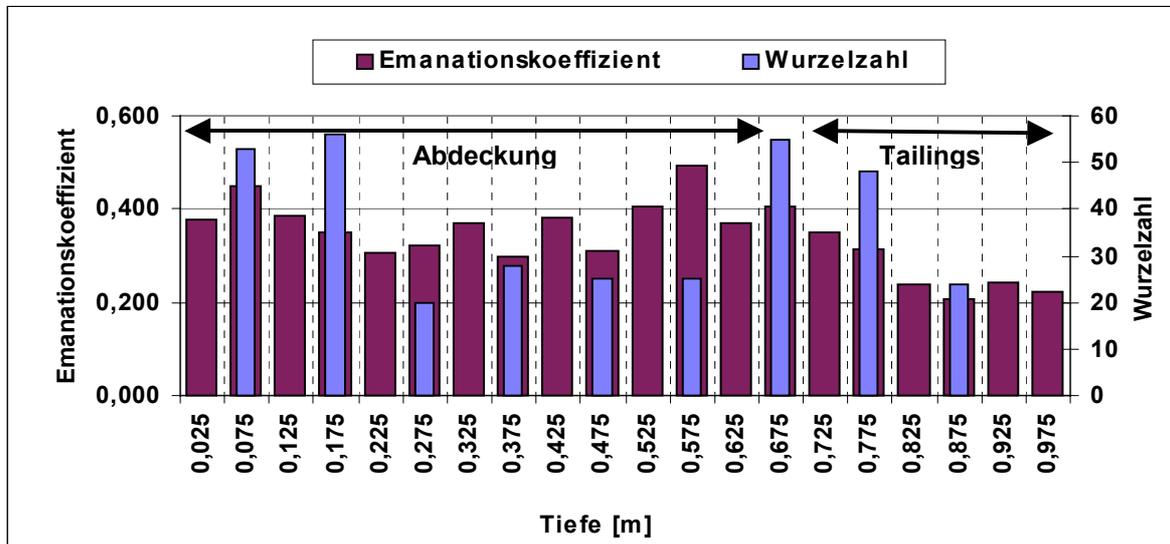


Abbildung 75: Emanationskoeffizient und Wurzelzahl im Aufschluss Sch26 in Abhängigkeit von der Tiefe, der Emanationskoeffizient ist im vergleichsweise stark durchwurzelten Bereich bis in 0,8 m Tiefe vergleichsweise konstant und beträgt im Mittel 0,35, in den obersten 0,20 m der Tailings sinkt der Emanationskoeffizient auf Werte von ca. 0,2 - hier ist auch eine deutliche Abnahme der Durchwurzelung zu verzeichnen.

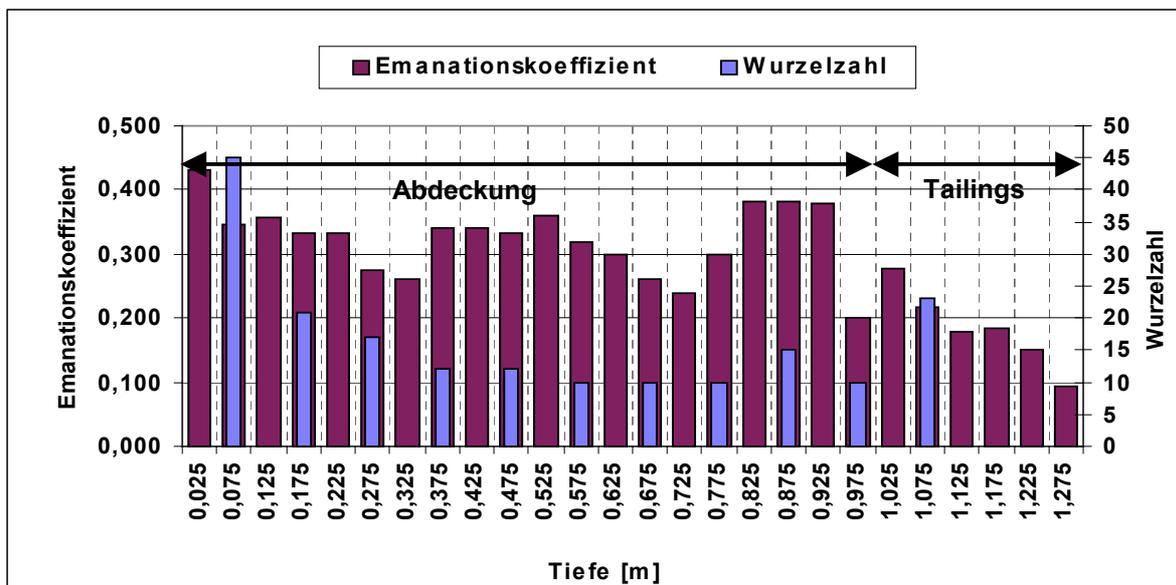


Abbildung 76: Emanationskoeffizient und Wurzelzahl im Aufschluss Sch27 in Abhängigkeit von der Tiefe, der Emanationskoeffizient der Abdeckschicht beträgt im Mittel 0,35 zeigt jedoch in den obersten Schichten eine mit sinkender Durchwurzelungsintensität abnehmende Tendenz.

- Es wurde festgestellt, dass an der Grenzschicht Abdeckung/Tailings eine verstärkte Durchwurzelung vorhanden ist. Es wird vermutet, dass das auf ein vergleichsweise gutes Wasserangebot in den Tailings (Wirkung der Tailings als Wasserstauer) zurückzuführen ist.

### 9.1.9 Halde Beerwalde

Auf der Halde Beerwalde wurden 2 Aufschlüsse (Sch29, Sch30) abgeteuft. Den Bewuchs in der näheren Umgebung der Aufschlüsse bilden Eichen und Lärchen. Die Aufschlüsse zeigen folgende Charakteristik:

- Die Abdeckmächtigkeit beträgt 1,5 bzw. 1,65 m. Das Abdeckmaterial, Schluff-Ton, ist sehr dicht gelagert und weist z.T. Schrumpfrisse auf.
- Die spezifische Ra-226-Aktivität des Abdeckmaterials variiert zwischen (40 - 60) Bq/kg (vgl. Abbildung 77 und Abbildung 78).
- Die spezifische Ra-226-Aktivität des Haldenmaterials beträgt im Mittel (500 - 600) Bq/kg (vgl. Abbildung 79 und Abbildung 80).

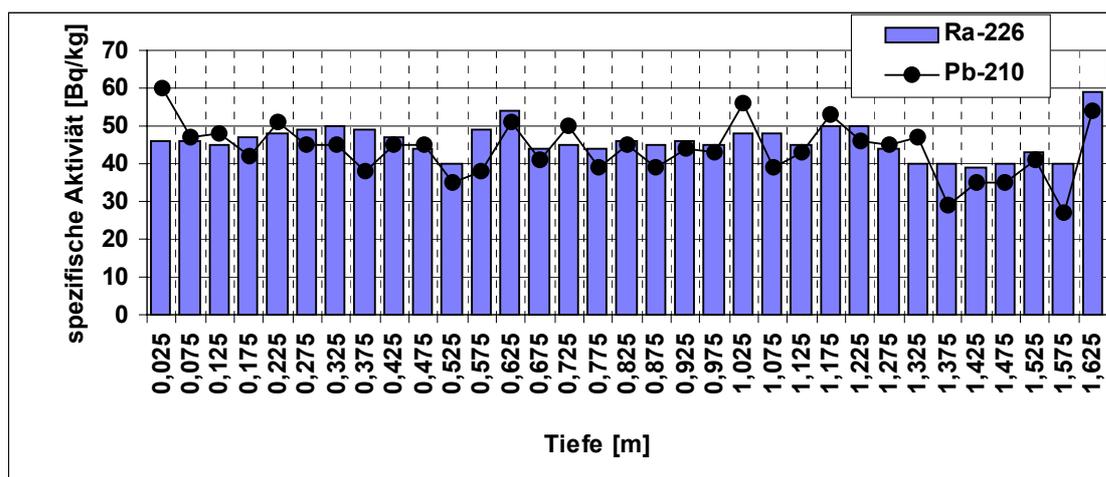


Abbildung 77: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Abdeckmaterial des Aufschlusses Sch29 in Abhängigkeit von der Tiefe

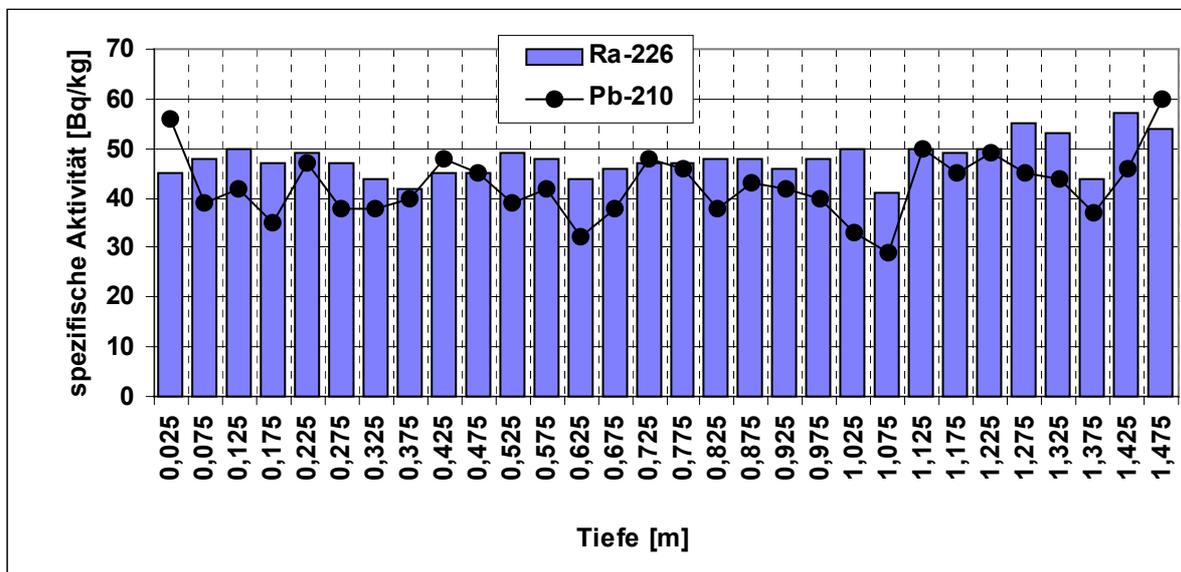


Abbildung 78: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Abdeckmaterial des Aufschlusses Sch30 in Abhängigkeit von der Tiefe

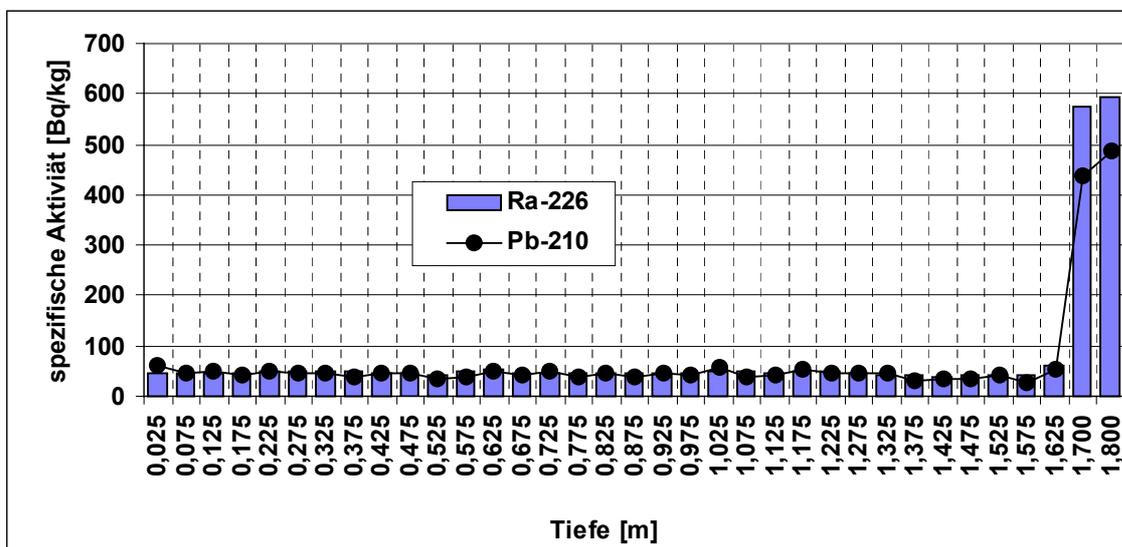


Abbildung 79: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch29 in Abhängigkeit von der Tiefe

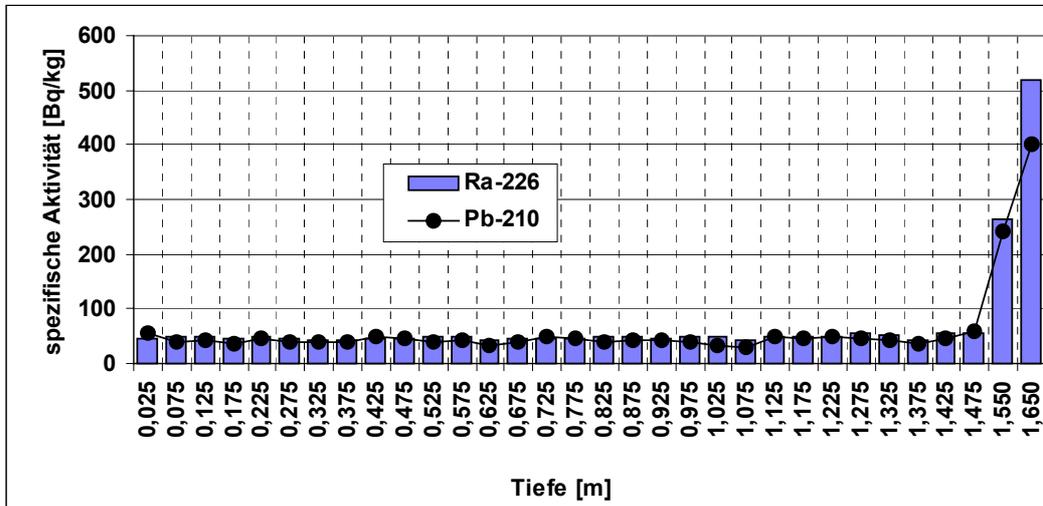


Abbildung 80: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch30 in Abhängigkeit von der Tiefe

- Im Haldenmaterial ist mit -110 bis -120 Bq/kg eine deutlich negative Bleispur ausgebildet, wobei diese mit der maximal möglichen Bleispur übereinstimmt (vgl. Abbildung 81 und Abbildung 82).

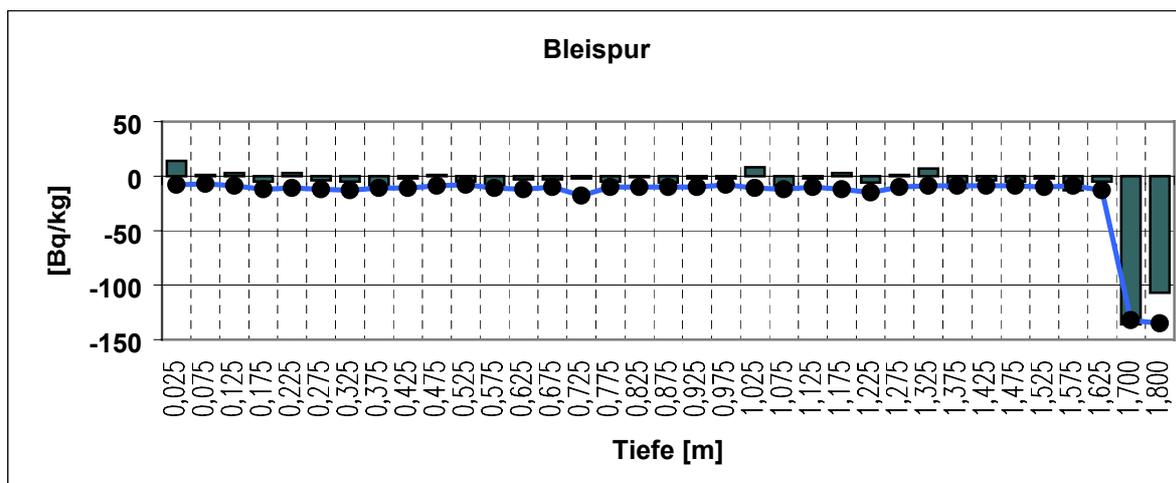


Abbildung 81: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch29 in Abhängigkeit von der Tiefe

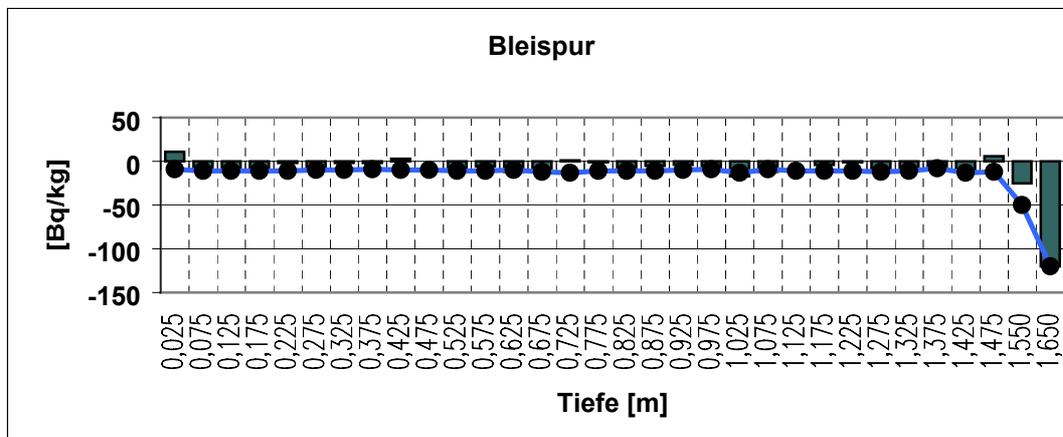


Abbildung 82: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch30 in Abhängigkeit von der Tiefe.

- Die Bleispur im Abdeckmaterial zeigt mit Ausnahme der obersten Probe ebenfalls die Tendenz eines Pb-210-Defizites (vgl. Abbildung 81 und Abbildung 82).
- Die oberste Probe illustriert mit einer positiven Bleispur von 10 - 15 Bq/kg den Pb-210-Fallout der Atmosphäre (vgl. Abbildung 81 und Abbildung 82).
- Die an je 3 Messstellen im Bereich der Aufschlüsse bestimmten Radonexhalationsraten variieren deutlich und repräsentieren damit einerseits die vorhandenen Heterogenitäten in der Qualität der Abdeckung. Andererseits überschreiten sie erheblich die zu erwartenden Werte von  $\bar{J}$  für diffusiven Radontransport. Dies wird flankiert von den an den gleichen Messpunkten in Tiefenprofilen bestimmten Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde, die im Bereich der Schichtgrenze zwischen Abdeckung und Haldenmaterial z.T. im Vergleich zu den zu erwartenden Werten von  $\bar{C}_{Rn}$  bis zum Faktor 4 erhöhte Radonkonzentrationen in der Bodenluft liefert (vgl. z.B. Abbildung 83).
- Die im Haldenmaterial festgestellte negative Bleispur könnte in folgender Weise interpretiert werden. Bevor die Halde abgedeckt wurde, konnte Radon aus dem Haldenmaterial ungehindert entweichen, so dass in der obersten

Schicht die maximal mögliche Bleispur erreicht wurde. Nach erfolgter Abdeckung wächst die Pb-210-Aktivität im Haldenmaterial nach Gl. (45) wieder an. Dieser Effekt wird bei der Modellierung berücksichtigt. Eine ausführlichere Diskussion dieser wichtigen Fragestellung ist im Abschnitt 10.1 gegeben.

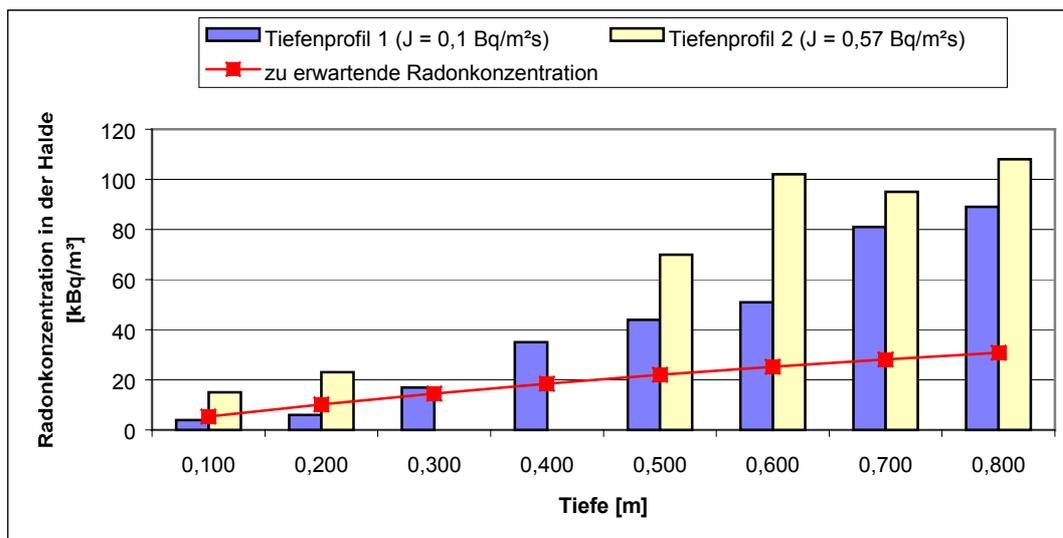


Abbildung 83: Messwerte der Radonkonzentration in der Halde im Bereich des Aufschlusses Sch30 und Referenzwert  $\bar{C}_{Rn}$  in Abhängigkeit von der Tiefe

- Anhand der vorgefundenen Standortbedingungen, wie die gute Durchwurzelung der Abdeckung bis in das Haldenmaterial und das durch die Materialeigenschaften der Abdeckung (bindiges Substrat) bedingte Vorhandensein von Schrumpfrissen (vgl. Abbildung 84), der ermittelten Bleispur und vor allem der Messwerte der Rn-Exhalation und der Radonkonzentration in der Bodenluft ist nicht auszuschließen, dass die Radonmigration am Standort unter Nutzung der präferentiellen Wegsamkeiten durch konvektive Prozesse dominiert wird.



Abbildung 84: Schruppfrisse im Aufschluss Sch29

#### 9.1.10 Halde Tagebau Ronneburg

Auf der Halde Tagebau Ronneburg in Ronneburg wurden 2 Aufschlüsse (Sch31, Sch32) abgeteuft. Den Bewuchs in der näheren Umgebung der Aufschlüsse bilden überwiegend Pappeln und Birken sowie Grasgesellschaften. Die Aufschlüsse zeigen folgende Charakteristik:

- Die Mächtigkeit des aufgeschlossenen Abdeckmaterials beträgt 0,65 bzw. 0,8 m. Es ist petrographisch als stark toniger, sandiger Schluff einzustufen und vergleichsweise sehr dicht gelagert.
- Die spezifische Ra-226-Aktivität des Abdeckmaterials variiert im Mittel zwischen (100 - 150) Bq/kg. Die spezifische Ra-226-Aktivität des Haldenmaterials wurde zu 450 885 Bq/kg bzw. 885 Bq/kg bestimmt (vgl. Abbildung 85 und Abbildung 86).

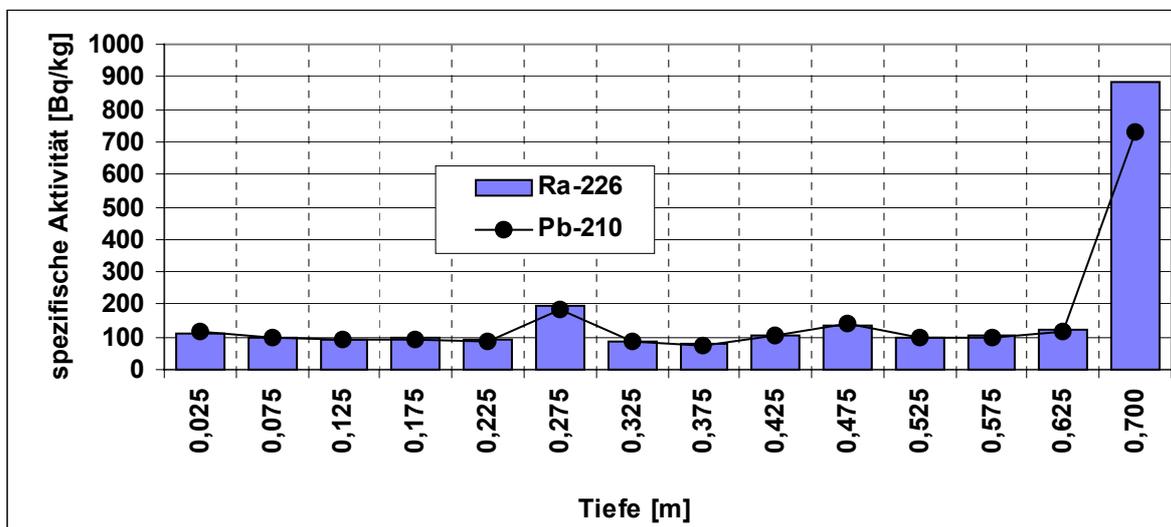


Abbildung 85: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch31 in Abhängigkeit von der Tiefe

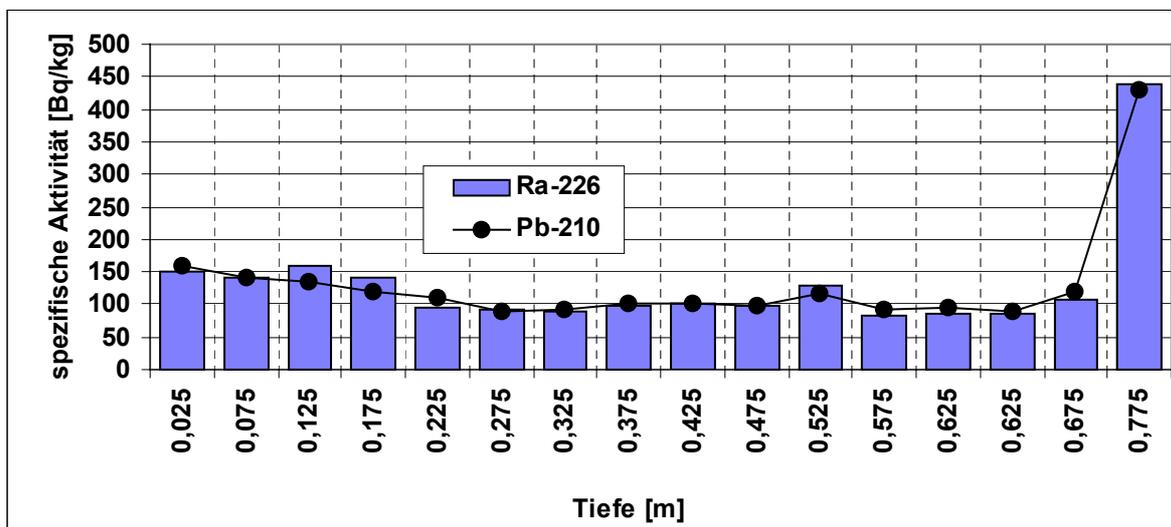


Abbildung 86: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 im Aufschluss Sch32 in Abhängigkeit von der Tiefe

- In der obersten Schicht des Abdeckmaterials ist im Aufschluss Sch32 eine positive Bleispur von etwa 10 Bq/kg ausgeprägt. Sie spiegelt den Pb-210-Fallout der Atmosphäre am Standort wider. Im übrigen Bereich der Abdeckung liegt im Rahmen der Messgenauigkeit Gleichgewicht zwischen Pb-210 und Ra-226 vor. In Aufschluss Sch31 wurde im Haldenmaterial eine deutlich negative Bleispur nachgewiesen. Diese ist bei einer weiteren Vertiefung auch im Aufschluss Sch32 zu erwarten (vgl. Abbildung 87 und Abbildung 88).

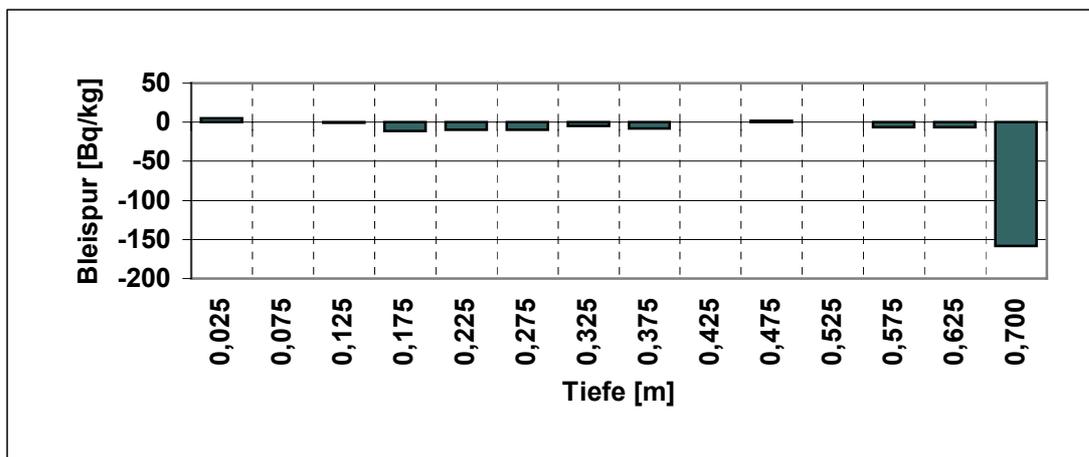


Abbildung 87: Bleispur im Aufschluss Sch31 in Abhängigkeit von der Tiefe

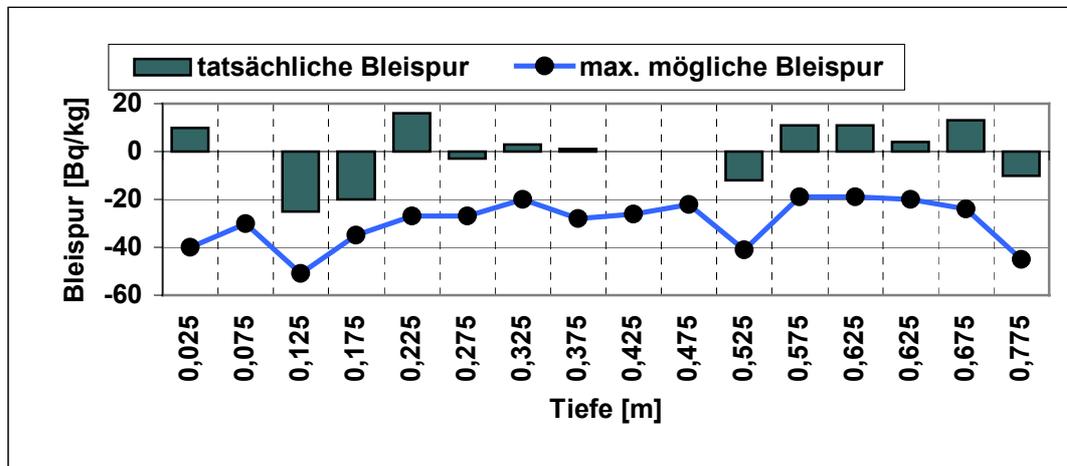


Abbildung 88: Tatsächliche und maximal mögliche Bleispur im Aufschluss Sch32 in Abhängigkeit von der Tiefe

- Die aufschlussbegleitenden Messungen der Radonexhalationsrate und der Radonkonzentration in der Bodenluft in Verbindung mit den ermittelten Bleisuren zeigen, dass Radon aus dem Haldenmaterial in die Atmosphäre migriert ist und dabei konvektive Transportprozesse nicht auszuschließen sind (vgl. Abbildung 89 und Abbildung 90). Die Exhalationsrate von  $0,2 \text{ Bq/m}^2 \text{ s}$  liegt bis zu einem Faktor 10 oberhalb des geogenen Hintergrundwerts von Deutschland für gleiche mit vergleichbarer spezifischer Ra-226-Aktivität. Die vorgefundene Standortsituation - gute Durchwurzelung, bindiges Substrat mit Neigung zum Quellen/Schrumpfen ist ein weiteres Indiz dafür.

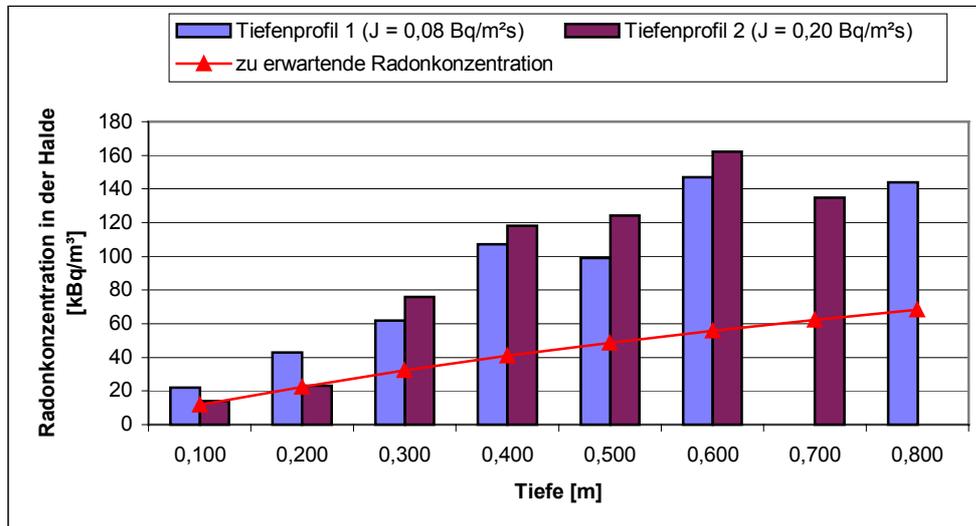


Abbildung 89: Radonkonzentration in der Bodenluft im Bereich des Aufschlusses Sch31 in Abhängigkeit von der Tiefe

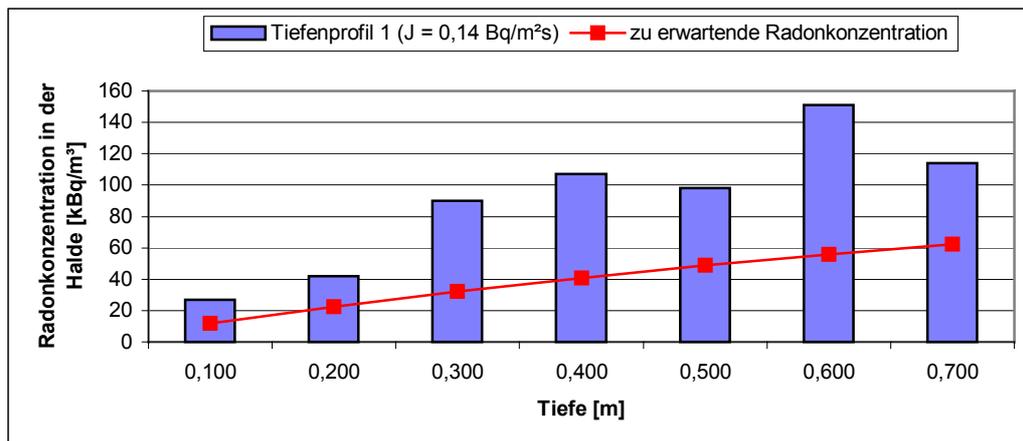


Abbildung 90: Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde im Bereich des Aufschlusses Sch32 in Abhängigkeit von der Tiefe

### **9.1.11 Zusammenfassende Betrachtung aller untersuchten Aufschlüsse**

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden Abdeckungen unterschiedlicher Substrate und unterschiedlicher Mächtigkeit auf 9 Bergbauobjekten mit z.T. unterschiedlichem Bewuchs untersucht. Dies reichte von unabgedeckten Bergematerial bis hin zu Abdeckmächtigkeiten von > 1 m. Die ausgewählten Bergbauobjekte können des weiteren hinsichtlich des abgelagerten Materials in 2 Kategorien eingeteilt werden. Einerseits handelt es sich um Halden, auf denen Bergematerial aufgeschüttet wurde und andererseits um Halden bzw. Industrielle Absetzanlagen (IAA's) auf denen Tailings eingespült bzw. abgesetzt wurden. Einen Überblick liefert Tabelle 5.

Tabelle 5: Überblick über die durchgeführten Aufschlüsse

Objektart	Abdeckmächtigkeit [m]	Objekt	Aufschlüsse
Bergehalde	0	Zeppelin-schachthalde	Sch10
		Halde Haldenaufbereitung	Sch16, Sch17
	< 0,5	Schindlerschachthalde	Sch1 - Sch5
		Zeppelin-schachthalde	Sch6 - Sch9
		Zentralschachthalde	Sch11 - Sch15
	0,5 - 1	Halde Tagebau Ronneburg	Sch31, Sch32
	> 1	Halde Beerwalde	Sch29, Sch30
IAA, Halde mit Tailings	0	Nordhalde Lengenfeld	Sch22
	< 0,5	Nordhalde Lengenfeld	Sch23, Sch24
	0,5 - 1	IAA Lengenfeld	Sch20, Sch21
		IAA Dänkritz	Sch25 - Sch28
	> 1	IAA Lengenfeld	Sch18, Sch19

Bereits anhand dieser Kategorisierung zeigt sich, dass das als "Hauptradonlieferant" fungierende Haldenmaterial bzw. die Tailings hinsichtlich Petrographie und Lagerung sich deutlich voneinander unterscheiden. Bei dem Haldenmaterial handelt es sich um weitgestufte Substrate mit einem vergleichsweise hohen Anteil an Steinen und Blöcken, die aufgrund der Einlagerung in Form einer Schüttung eine lockere Lagerung mit einem gut ausgeprägten Grobporen- bzw. Kluftsystem aufweisen. Dies war in den Aufschlüssen auf den Bergehalten bereits in vergleichsweise oberflächennahen Schichten visuell gut zu erkennen (vgl. z.B. Sch1 und Sch10). Die Tailings als Aufbereitungsrückstände entsprechen hingegen einem enggestuften Substrat, das vergleichsweise homogene Lagerungsverhältnisse aufweist. Im Gegensatz zu dem abgelagerten Bergematerial sind Grobporen und Klüfte aufgrund der einheitlichen Korngröße nicht vorhanden. Auch dies war im Rahmen der Aufschlussarbeiten bereits am Schurf gut sichtbar.

Das aufgeschlossene Abdeckmaterial war mit Ausnahme der IAA Lengenfeld, auf der Aufbereitungsrückstände der Fluss- und Schwerspataufbereitung die Abdeckung bilden, meist ebenfalls ein eher weitgestuftes Substrat z.T. mit Steinanteil.

Unabhängig vom abgelagerten Material und der Abdeckung waren alle Aufschlüsse infolge des vorhandenen Bewuchs gut durchwurzelt. Die Wurzeln reichten in fast allen Fällen bis in das Bergematerial bzw. die Tailings hinein und erreichten dabei Tiefen von bis zu 1,70 m (vgl. Aufschluss Sch30). Auf dem abgedeckten Damm der IAA Dänkritz wurde eine verstärkte Durchwurzlung im Bereich der Schichtgrenze zwischen Abdeckung und Tailings festgestellt, die vermutlich auf das gute Wasserdargebot der Tailings, die als Wasserstauer fungieren, zurückzuführen ist.

Als Voraussetzung für die Beurteilung der Radondämmwirkung des jeweiligen Abdeckmaterials wurden aus den Aufschlüssen in Tiefenintervallen von überwiegend 0,05 m lückenlos Feststoffproben entnommen, gammaspektrometrisch analysiert und die tatsächliche Bleispur,  $Pb(z)$ , bestimmt. In die Auswertung wurden des Weiteren die Messergebnisse der Radonexhalationsrate, der Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde/Ablagerung und an ausgewählten Aufschlüssen die Gaspermeabilität und die Lagerungsdichte einbezogen. Als Vergleichsparameter dienten dabei die ermittelte maximal mögliche Bleispur,  $Pb(z)_{max}$ , sowie die bei einem rein diffusiven Radontransport abgeschätzten Referenzwerte der Radonexhalation  $\bar{J}$  und der Radonkonzentration in der Bodenluft  $\bar{C}_{Rn}$  als Funktion der Tiefe (vgl. Abschnitt 9.1.1).

Von Bedeutung war wegen der konvektiven Radontransportprozesse die Lage des jeweiligen Aufschlusses (Haldenfuß oder Haldenplateau).

Die entsprechende Diskussion der Untersuchungsergebnisse aller Aufschlüsse (vgl. /15/ und Abschnitte 9.1.2 bis 9.1.10) zeigte:

1. In allen Aufschlüssen auf Bergehalden ist unabhängig von der Abdeckmächtigkeit eine deutlich negative Bleispur im Haldenmaterial ausgeprägt, die mit der maximal möglichen Bleispur in der Mehrzahl der Fälle gut übereinstimmt. Das heißt, nahezu das gesamte in den Porenraum generierte Radon ist "abtransportiert" worden.

2. Im ursprünglich unabgedeckten Haldenmaterial ist für die obersten Schichten zu erwarten, dass die Bleispur der maximal möglichen entspricht. Nach erfolgter Abdeckung sollte jedoch die Pb-210-Aktivität anwachsen, so dass in der Endkonsequenz die Bleispur nicht so ausgeprägt ist. Dieser Effekt ist aber nicht beobachtet worden, so dass davon auszugehen ist, dass die meisten untersuchten Abdeckungen das Radon nicht zurückhalten.
3. In der Mehrzahl der Aufschlüsse auf Bergehalden ist die spezifische Aktivität von Pb-210 und Ra-226 im Abdeckmaterial vergleichbar. Z.T. ist wie z.B. in Aufschluss Sch1 und Sch5 im Abdeckmaterial eine negative Bleispur ausgeprägt. Dies zeigt, dass in ersterem Fall, Radon aus dem Haldenmaterial in die Abdeckung migriert, dort in Pb-210 zerfallen ist und das aufgrund der Eigenemanation und Radontransportes innerhalb der Abdeckung bestehende Bleidefizit "aufgefüllt" hat. Im zweiten Fall ist das aus dem Haldenmaterial nachgelieferte Radon und das in der Abdeckung generierte Radon direkt in die Atmosphäre migriert.
4. Die auf einigen Objekten in der obersten Probe der Abdeckung vorhandene positive Bleispur ist auf den Pb-210-Fallout der Atmosphäre zurückzuführen.
5. Aus Punkt 1 und 2 wird deutlich, dass das Abdeckmaterial nur eine geringe bzw. vernachlässigbare Radondämmwirkung aufweist. Dies zeigen auch die Messwerte der Vor-Ort-Parameter Radonexhalationsrate und Radonkonzentration in der Bodenluft der Halde, die deutlich von den Referenzwerten  $\bar{J}$  und  $\bar{C}_{Rn}$  für diffusiven Radontransport abweichen. Unter Beachtung der Lage der Aufschlüsse und der Witterungsbedingungen während der Messung der Vor-Ort-Parameter wird deutlich, dass die Radonexhalationsraten Tages- und Jahressgänge aufweisen, die am Haldenfuß und am Haldenplateau ein gegenläufiges Verhalten zeigen (vgl. dazu vor allem die Aufschlüsse Sch1 - Sch3 und Sch6 - Sch8, die im Profil vom Haldenplateau bis zum Haldenfuß angelegt wurden). Dies entspricht den in /10/ und /39/ dargestellten Untersuchungsergebnissen und belegt, dass die Radonmigration auf den betrachteten Objekten nur unter Einbeziehung konvektiver Prozesse erklärt werden kann.

6. Auf den IAA's und der Nordhalde Lengenfeld ist in den Tailings in allen Aufschlüssen eine negative Bleispur z.T. bis in Tiefen von 1,3 m ausgeprägt. Das heißt, die Migrationslänge erreicht Werte von  $> 1$  m.
7. Auf den IAA's und der Nordhalde Lengenfeld weist das Abdeckmaterial z.T. eine positive Bleispur auf. Dies ist ein Indiz für die Nachlieferung von Radon aus den Tailings und dessen Anlagerung in Form von Pb-210 in den untersten Abdeckschichten. Sie verdeutlicht somit eine Radondämmwirkung der Abdeckung, die jedoch als gering einzuschätzen ist.
8. Auf den IAA's und der Nordhalde Lengenfeld ist das Integral über die Bleispur in allen Aufschlüssen negativ. Das heißt, Radon ist aus den abgelagerten Schichten in die Atmosphäre migriert, das Abdeckmaterial hat nur einen Teil des Radons zurückgehalten. Insbesondere ist erwähnenswert, daß auch in den vergleichsweise feinkörnigen Tailingsablagerungen das Auftreten von konvektiven Radontransportprozessen nicht auszuschließen ist.
9. Die Messergebnisse der Vor-Ort-Parameter auf den IAA's und der Nordhalde Lengenfeld belegen die Aussage von Pkt. 7 und zeigen ebenfalls das für unterschiedliche Lufttemperatur und Lage der Aufschlüsse charakteristische Verhalten (vgl. /10/, /39/ und Pkt. 4).
10. Der Vergleich des für alle Proben ermittelten Emanationskoeffizienten mit der in Tiefenintervallen von 0,10 m ermittelten Wurzelzahl zeigte vor allem in den Aufschlüssen auf der Schindlerschachthalde einen mit abnehmender Wurzelzahl sinkenden Emanationskoeffizienten. Es wird vermutet, dass die Wurzeln aufgrund physikalischer Verwitterungsprozesse die Kornverteilung des abgelagerten Materials in Richtung geringerer Korndurchmesser verschieben und damit das Emanationsvermögen tendenziell erhöhen.
11. Aufgrund der guten Durchwurzelung aller Aufschlüsse bis in die Tailings bzw. das Bergematerial hinein, ist davon auszugehen, dass über die Wurzeln/Wurzelkanäle präferentielle Wegsamkeiten für den Radontransport bestehen bzw. geschaffen werden und der konvektive Radontransport somit ermöglicht wird. Ähnliche Effekte begünstigen z.B. Schrumpfrisse, wie sie auf der Halde

Beerwalde erkundet wurden. Im Ergebnis von Sickerversuchen mit Tracerflüssigkeit wurden die Existenz von unterschiedlichen Grobporen in der Abdeckung sichtbar gemacht (vgl. Abschnitt 9.2).

12. Das Vorhandensein präferentieller Fließwege entlang von Wurzeln konnte z.B. für die Standorte IAA Dänkriz und Nordhalde Lengenfeld mittels Versickerungsversuchen mit Tracerflüssigkeit nachgewiesen und visualisiert werden (vgl. /16/).

## 9.2 Versickerungsversuche mit Tracerflüssigkeit

Die Versickerungsversuche mit Tracerflüssigkeit sind ausführlich in /16/ dokumentiert. Im folgenden werden die Untersuchungsergebnisse kurz zusammengefasst dargestellt:

- In Böden und Abdeckungen sind deutlich ausgeprägte präferentielle Fließwege vorhanden, die mit der Tracerflüssigkeit visualisiert werden konnten (vgl. z.B. Abbildung 91, Abbildung 92 und Abbildung 93).



Abbildung 91: Aufschluss V2/A3 auf der IAA Dänkriz, deutlich erkennbare präferentielle Fließwege, maximaler Sickerweg in 24 h > 1 m



Abbildung 92: Aufschluss V1 auf der Wiese in Rochwitz, deutlich erkennbare präferentielle Fließwege, maximaler Sickerweg in 2,5 h ca. 0,5 m



Abbildung 93: Aufschluss V5/A3 auf dem Collmberg, deutlich erkennbare präferentielle Fließwege, maximaler Sickerweg in 22 h ca. 1 m

- Die erkundeten präferentiellen Fließwege waren vor allem an Wurzeln/Wurzelkanäle, Tiergänge bzw. Grenzflächen von Einlagerungen in Abdeckschichten/Boden (z.B. Steine) gebunden (vgl. z.B. Abbildung 94 bis Abbildung 100).



Abbildung 94: Aufschluss V2/A1 auf der IAA Dänkritz, deutlich erkennbare Färbung des Abdeckmaterials durch Tracerflüssigkeit im Bereich von Wurzeln



Abbildung 95: Aufschluss V2/A2 auf der IAA Dänkritz, deutlich erkennbare Färbung des Abdeckmaterials durch Tracerflüssigkeit im Bereich von Wurzeln, die Tracerflüssigkeit ist entlang von Wurzeln innerhalb von 24 h durch das Abdeckmaterial (ca. 1 m mächtig) bis in die Tailings versickert



vgl. Detailansicht in Abbildung 97

Abbildung 96: Aufschluss V2/A4 auf der IAA Dänkriz, deutlich erkennbare präferentielle Sickerwege in der Abdeckung, maximaler Sickerweg > 1 m



Abbildung 97: Detailansicht aus Aufschluss V2/A4 auf der IAA Dänkriz, deutlich erkennbare Färbung des Abdeckmaterials durch Tracerflüssigkeit im Bereich von Wurzeln, die Tracerflüssigkeit ist entlang von Wurzeln innerhalb von 24 h durch das Abdeckmaterial (ca. 1 m mächtig) bis in die Tailings versickert.



Abbildung 98: Detailansicht aus Aufschluss V4/A3 auf dem Collmberg, deutlich erkennbare Färbung des Abdeckmaterials durch Tracerflüssigkeit im Bereich von Wurzeln



Abbildung 99: Detailansicht aus Aufschluss V5/A2 auf dem Collmberg, Färbung des Bodens mit Tracerflüssigkeit im Bereich von Regenwurmgingen in ca. 0,5 m Tiefe



Hohlraum nach Entfernen  
eines Steines

Abbildung 100: Aufschluss V6/A4 auf der Halde B, Färbung des Bodens mit Tracerflüssigkeit im Bereich von Einlagerungen von Steinen in das Abdeckmaterial, es zeigt sich deutlich, dass die Tracerflüssigkeit entlang der Grenzflächen Stein/feinkörniges Abdeckmaterial versickert ist

- Ein um so gleichmäßigeres und um so tieferes Eindringen der Tracerflüssigkeit tritt mit zunehmender Durchwurzelung des Bodens/der Abdeckung auf. Dies wird z.B. durch den Vergleich der Ergebnisse der Versickerungsversuche V6 und V7 (vgl. Abbildung 101 und Abbildung 102), die auf einer jungen Abdeckung (Liegezeit ca. 5 Jahre) mit vorwiegend Grasgesellschaft stattfanden, mit den Ergebnissen der Versickerungsversuche V2, V9 und V11 (vgl. Abbildung 103, Abbildung 104 und Abbildung 105), die auf älteren Abdeckungen (Liegezeit > 15 Jahre) mit Bewuchs von z.B. Birken realisiert wurden, deutlich.



Abbildung 101: Aufschluss V6/A2 auf der Halde B, gleichmäßige Versickerung bis in 0,05 m Tiefe, vereinzelt bis in max. 0,15 m Tiefe entlang von Klee-  
wurzeln und Einlagerungen von Steinen, Sickerzeit 24 h



Abbildung 102: Aufschluss V7/A2 auf der Halde B, gleichmäßige Versickerung bis in 0,05 m Tiefe, vereinzelt bis in max. 0,20 m Tiefe vor allem entlang  
von Wurzeln, Sickerzeit 26 h



Abbildung 103: Aufschluss V2/A2 auf der IAA Dänkriz, deutlich erkennbare präferentielle Sickerwege in der Abdeckung, max. Sickerweg > 1 m, Sickerzeit 24 h



Abbildung 104: Aufschluss V9/A2 auf der Nordhalde Lengenfeld, maximaler Sickerweg ca. 0,7 m, Sickerzeit 27 h, vergleichsweise gleichmäßige Versickerung der Tracerflüssigkeit im stark durchwurzelten Bereich der Abdeckung und entlang von Wurzeln bis in das Tailingsmaterial



Abbildung 105: Aufschluss V11/A1 auf dem Collmberg, deutlich erkennbare präferentielle Sickerwege in der Abdeckung, max. Sickerweg > 0,8 m, Sickerzeit 26 h

- Änderungen der geotechnischen Eigenschaften des Abdeckmaterials (locker gelagerte über dichter gelagerten Schichten) beeinflussen die Ausbreitung der Tracerflüssigkeit nachhaltig. Sind in den dichter gelagerten Schichten keine Wegsamkeiten durch Wurzeln oder Tiergänge vorhanden, wird die Sickerfront der Tracerflüssigkeit gebremst. Im Gegensatz dazu, versickert Tracerflüssigkeit auch in dichter gelagerten Schichten, sofern diese die vorgenannten Wegsamkeiten bieten (vgl. z.B. Versickerungsversuche V10 - Abbildung 106 und Abbildung 107 und V11 - Abbildung 108 und Abbildung 109).



Abbildung 106: Aufschluss V10/A1 auf dem Collmberg, maximale Versickerungstiefe der Tracerflüssigkeit 0,40 m, deutlich erkennbar ist das vergleichsweise einheitliche Vordringen der Versickerungsfront und ihr Ende im Bereich des Schichtwechsels zwischen locker gelagerten Abdeckschichten und dicht gelagerter Abdeckschicht (Feinsand)



Abbildung 107: Detailansicht des Aufschlusses V10/A2 auf dem Collmberg, Färbung des dicht gelagerten Abdeckmaterials in ca. 0,45 m Tiefe im Wurzelbereich



Abbildung 108: Detailansicht des Aufschlusses V11/A3 auf dem Collmberg, deutlich erkennbar die Grenze der Sickerfront der Tracerflüssigkeit am Schichtwechsel zwischen vergleichsweise locker und vergleichsweise dicht gelagerten Schichten



Abbildung 109: Detailansicht des Aufschlusses V11/A3 auf dem Collmberg, deutlich erkennbare Färbung des dicht gelagerten Abdeckmaterials nur im Wurzelbereich

- Die Lage der Wurzelsamkeiten beeinflusst die Richtung der Ausbreitung der Tracerflüssigkeit. Diese versickert nicht nur vertikal in Abdeckung/Boden, sondern z.T. auch horizontal entlang von Wurzelkanälen (vgl. Versickerungsversuch V8 - Abbildung 110 bis Abbildung 112).



vgl. Detailansicht in  
Abbildung 111

Abbildung 110: Draufsicht auf die Versickerungsfläche mit freigelegtem Aufschluss V8/A1 auf der Nordhalde, am gegenüberliegenden Stoß wurde außerhalb der ursprünglichen Versickerungsfläche eine Färbung des Bodens durch Tracerflüssigkeit im Bereich einer Starkwurzel erkundet



Abbildung 111: Detailansicht gemäß Abbildung 110, erkundete Färbung des Bodens durch Tracerflüssigkeit im Bereich einer Starkwurzel außerhalb der Versickerungsfläche



Abbildung 112: Aufschluss V8/A4 auf der Nordhalde, maximale Versickerungstiefe der Tracerflüssigkeit 0,70 m, vor allem im stärker durchwurzelten Bereich bis 0,20 m Tiefe eine vergleichsweise gleichmäßige Versickerung der Tracerflüssigkeit erkennbar, in 0,40 m Tiefe Erkundung einer vergleichsweise locker gelagerten mittelsandigen Schicht in der sich die Tracerflüssigkeit horizontal verteilt hat.

Anhand des von der Tracerflüssigkeit in einer bestimmten Sickerzeit zurückgelegten Sickerwegs wurde für alle Versickerungsversuche eine mittlere Sickergeschwindigkeit ermittelt (siehe Tabelle 6). Diese bezieht sich auf die präferentiellen Sickerwege und ist nicht als Mittelwert für die jeweilige Bodenschicht bzw. das Abdeckmaterial zu verstehen. Der mittlere Sickerweg wurde gleich der noch in der größten Tiefe auszumachenden Farbtönung durch die Tracerflüssigkeit gesetzt.

Tabelle 6: Sickerwege und -geschwindigkeiten der einzelnen Versickerungsversuche

Versuch Nr.	Standort	Liegezeit [a]	$t_s$ [h]	max. $s$ <sup>1)</sup> [m]	max. $v_s$ <sup>2)</sup> [m/s]	mittlerer $s$ [m]	mittlere $v_s$ [m/s]
V6	Halde B	5	24	0,15	$1,7 \cdot 10^{-6}$	0,05	$5,0 \cdot 10^{-7}$
V7		5	26	0,25	$2,6 \cdot 10^{-6}$	0,05	$5,0 \cdot 10^{-7}$
V4	Collmberg	> 10	20	> 0,5	$> 6,9 \cdot 10^{-6}$	0,15	$2,0 \cdot 10^{-6}$
V5		> 10	22	1	$1,3 \cdot 10^{-5}$	0,15	$1,8 \cdot 10^{-6}$
V10		> 10	23	0,45	$5,4 \cdot 10^{-6}$	0,45	$5,4 \cdot 10^{-6}$
V11		> 10	26	> 0,8	$> 8,5 \cdot 10^{-6}$	0,20	$2,1 \cdot 10^{-6}$
V12		> 10	28	0,45	$4,4 \cdot 10^{-6}$	0,45	$4,4 \cdot 10^{-6}$
V2		IAA Dänkriz	> 15	24	> 1	$> 10^{-5}$	0,20
V1	Wiese IAF	$\approx 30$	2,5	> 0,5	$> 5,5 \cdot 10^{-5}$	0,35	$3,9 \cdot 10^{-5}$
V3		$\approx 30$	2,5	> 0,5	$> 5,5 \cdot 10^{-5}$	0,20	$2,2 \cdot 10^{-5}$
V8	Nordhalde	$\approx 30$	24	0,7	$8,1 \cdot 10^{-6}$	0,20	$2,3 \cdot 10^{-6}$
V9		$\approx 30$	27	0,8	$8,2 \cdot 10^{-6}$	0,80	$8,2 \cdot 10^{-6}$

$t_s$  Sickerzeit

$s$  Sickerweg

$v_s$  Sickergeschwindigkeit

<sup>1)</sup> aus technischen Gründen wurden die Aufschlüsse nicht in jedem Fall bis in Tiefen vorangetrieben in denen keine Tracerflüssigkeit mehr angetroffen wurde

<sup>2)</sup> die Sickergeschwindigkeit bezieht sich auf die präferentiellen Fließwege des jeweiligen Aufschlusses

Tabelle 6 zeigt, dass die mittlere Sickergeschwindigkeit der Standorte im Bereich von  $10^{-5}$  -  $10^{-7}$  m/s variiert. Standorte, die mittleren Sickergeschwindigkeiten von  $10^{-5}$  m/s aufweisen, sind gegenüber Wasser und Gasen als vergleichsweise durchlässig einzuschätzen. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen handelt es sich dabei um Standorte mit ausgeprägter Durchwurzelung bis in Tiefen von 1 m und mehr. Die Untersuchungsergebnisse lassen den Schluss zu, dass sich in Abhängigkeit vom am Standort etablierten Bewuchs (Art der Pflanzengesellschaft) und der entsprechenden natürlichen Sukzession mit zunehmender Liegezeit der Abdeckung bzw. zunehmen-

dem Alter des Bodens die Durchwurzelungsintensität und ggf. -tiefe, die Aktivität von Bodenorganismen sowie die Bodenart ändert. Bei technisch hergestellten Abdeckungssystemen kann davon ausgegangen werden, dass in den ersten Jahrzehnten mit zunehmender Entwicklung des Bewuchses, wachsender Tätigkeit von Bodenorganismen und durch äußere Einflüsse (z.B. Witterung) ein Zuwachs an sich dadurch bildenden zusätzlichen Wegsamkeiten für den Wasser- und Gastransport im Abdeckmaterial einhergeht. Als Tendenz ergibt sich, dass die Sickergeschwindigkeit in jüngeren Abdeckungen niedriger ist als in älteren Abdeckungen. Dies hängt auch von der Einbautechnologie der Abdeckung ab und ist anhand des Einzelfalls zu prüfen. Insbesondere eignet sich die angewandte Methode, um nachzuvollziehen, wie sich die Eigenschaften einer Abdeckung über längere Zeiträume ändern.

Die an ausgewählten Aufschlüssen parallel zu den Versickerungsversuchen durchgeführte Probenahme mit anschließender gammaspektrometrischer Analyse der Proben hinsichtlich der spezifischen Aktivität von Ra-226 und Pb-210 zur Bestimmung der Bleispur zeigte die folgenden Ergebnisse:

- Die Abdeckungen der Tailings auf den Objekten IAA Dänkritz (V2) und Nordhalde (V9) mit einer Mächtigkeit von ca. 1 m bzw. 0,5 m zeigen eine deutlich positive, die Tailings entsprechend eine deutlich negative Bleispur. Das Integral über die Bleispur ist in für beide Aufschlüsse negativ. Die Quantifizierung ergab, dass an diesen Standorten ca. 50% des Radons aus der Abdeckung/den Tailings in die Umgebungsluft exhaliert sind. Dies wird jeweils durch entsprechende Messwerte der Radonexhalation gestützt. Die Versickerungsversuche illustrieren in diesem Fall auf anschauliche Weise, dass neben präferentiellen Fließwegen, die zum überwiegenden Teil durch Wurzeln/Wurzelkanäle gebildet werden, generell eine gute Durchlässigkeit vorhanden ist. Ob sich diese durch Bioturbation herausgebildet hat kann nur vermutet werden, da die Einbaubedingungen nicht bekannt sind.
- Die Versickerungsversuche verdeutlichen des weiteren, dass in Bereichen hoher Durchwurzelung eine vergleichsweise gute physikalische Verwitterung auftritt und dies zu höheren Emanationskoeffizienten als in wenig bzw. nicht

durchwurzeltten Bereichen führt. Dies bedeutet, dass Böden hoher Emanation auch durch vergleichsweise hohe Durchsickerungsfähigkeit gekennzeichnet sind.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, dass die Versickerungsversuche mit Tracerflüssigkeit eine neue Methode darstellen, die die Beurteilung des Wechselspiels von Radonmigration und Bioturbation qualitativ deutlich verbessert. Die Anwendungsmöglichkeiten sind offensichtlich. Erstmals wurde diese Technologie im Mai 2003 auf der Standfläche einer ehemaligen Wismuthalde (Nordhalde) angewandt.

### 9.3 Durchführung von Versuchen mit Tracergas zur Quantifizierung der Konvektionsgeschwindigkeit in Halden und der Gaspermeabilität

#### 9.3.1 Grundlagen der Beschreibung des Radontransports

Halden sind in der Regel 10 - 100 m hoch. Oftmals sind sie Anschüttungen an einen natürlichen Gebirgshang. In der Abbildung 113 ist eine schematische Darstellung einer solchen angeschütteten Halde gegeben. Die Höhe der Halde ist geringer als die Länge der Stromlinie des konvektiven Radontransports vom Haldenfuß zum Haldenplateau. Halden können aber auch Zwischenplateaus und zahlreiche Bermen aufweisen, die zur Ausbildung von Strömungslinien führen, deren Länge geringer als die Haldenhöhe ist.

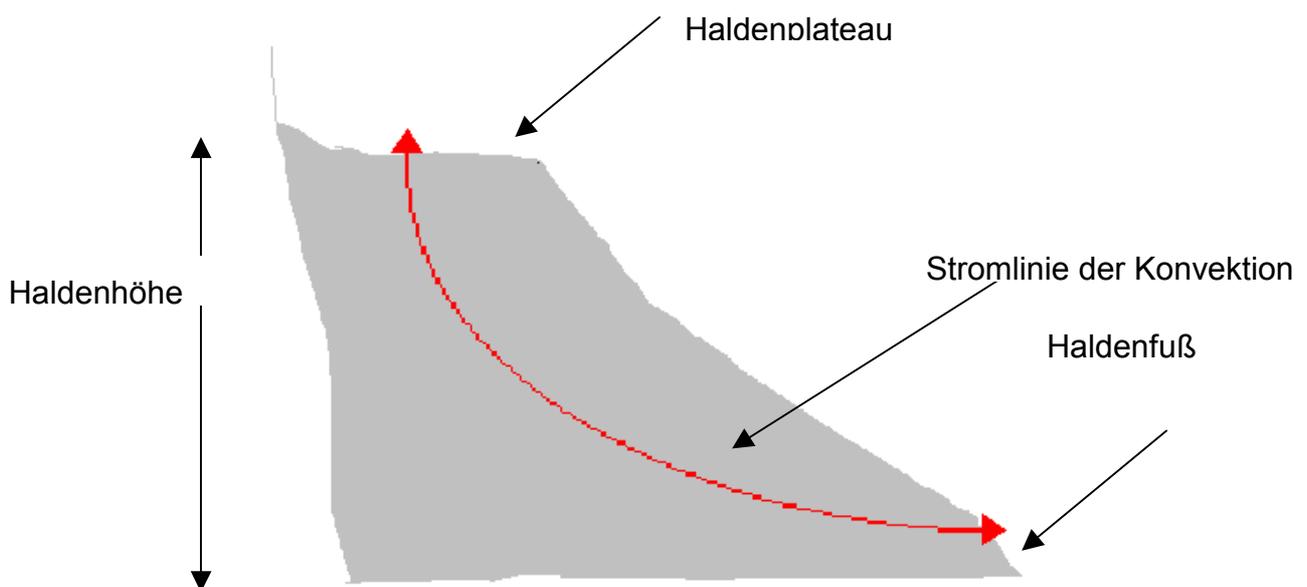


Abbildung 113: Schematische Darstellung einer Halde mit einer Stromlinie

Es wird dabei vereinfachend angenommen, dass der Radontransport in einer solch breiten Stromröhre verläuft, dass Randeffekte vernachlässigt werden können und der konvektive als auch diffusive Radontransport in dieser Stromröhre unabhängig davon erfolgt, ob die Stromröhre senkrecht steht oder geneigt ist. Das bestimmende Ele-

ment ist in diesem Fall die Länge der Stromröhre. Die mathematische Beschreibung des Radontransports kann somit vereinfachend als 1-dimensionales Problem beschrieben werden, um die Haupteffekte des Transports zu erfassen und adäquat zu beschreiben. Betrachtet man ein 1-dimensionales Modell, lautet die entsprechende Transportgleichung

$$\frac{\partial C(t,z)}{\partial t} = D' \frac{\partial^2 C(t,z)}{\partial z^2} - v' \frac{\partial C(t,z)}{\partial z} - \lambda C(t,z) + \lambda C_0. \quad (12)$$

Der erste Term auf der rechten Seite von (12) 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. Die Abhängigkeit der Konvektionsgeschwindigkeit von der Höhe  $z$  bzw. der Zeit ist hier zunächst vernachlässigt worden. Der dritte Term auf der rechten Seite in (12) 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

$$G_{Rn} \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right] = \lambda \cdot c_{Rn}^P = \lambda \cdot E \frac{\rho_d \cdot A_{Ra}}{n} = \lambda \cdot C_0 \quad (13)$$

gegeben ist. Letztere ist der Emanation  $E$ , der Trockendichte des Haldenmaterials bzw. des Bodens  $\rho_d$  und deren spezifischen Ra-226-Aktivität  $A_{Ra}$  proportional.

Im Fall eines unendlichen Systems berechnet sich der Fluß, bezogen auf die Meßfläche, gemäß dem Fick'schen Gesetz nach

$$J = n \left[ v' \cdot C - D' \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \right], \quad (14)$$

wobei  $v = n v'$  die Konvektionsgeschwindigkeit ist. Ursachen für das Auftreten von konvektiven Strömungen können z.B. Temperatur- oder Druckunterschiede am Übergang Erdoberfläche-Atmosphäre sein.

Nach dem Gesetz von Darcy [40] ist die Konvektionsgeschwindigkeit in porösen Medien dem Druckunterschied proportional:

$$v = -\frac{k}{\eta} \frac{\partial P}{\partial z}. \quad (15)$$

Hier ist  $k$  die Permeabilität des Bodens und  $\eta = 1,8 \times 10^{-5}$  Pa s steht für die dynamische Viskosität der Luft.

Bei einer Schicht unendlicher Mächtigkeit folgt aus (12) mit den Randbedingungen

$$C(z = 0) = 0 \quad (16)$$

$$C(z \rightarrow \infty) = C_0, \quad (17)$$

und der Annahme dass in einem solchen System konvektive Strömungen stattfinden, die Lösung

$$C(z) = C_0 \left( 1 - e^{-\left( \frac{v'}{2D'} + \sqrt{\frac{v'^2}{4D'^2} + \frac{\lambda}{D'}} \right) z} \right). \quad (18)$$

Der Fluß an der Oberfläche ist

$$J = n \cdot C_0 \left( \frac{v'}{2} + \sqrt{\frac{v'^2}{4} + \lambda D'} \right) \quad (19)$$

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

$$J = C_0 v \quad (D' \rightarrow 0) \quad (20)$$

und

$$J = C_0 \sqrt{\lambda D'} \quad (v' \rightarrow 0). \quad (21)$$

In der Abbildung 114 ist illustriert, dass bei bestimmten Diffusionskonstanten  $D'$  die Exhalationsrate durch Konvektionsprozesse dominiert wird, wenn die Geschwindigkeit  $v' = v/n \geq 5 \cdot 10^{-6}$  m/s ist. Die Geschwindigkeit von  $5 \cdot 10^{-6}$  m/s ist somit eine charakteristische Größe, die das Systemverhalten wesentlich bestimmt.

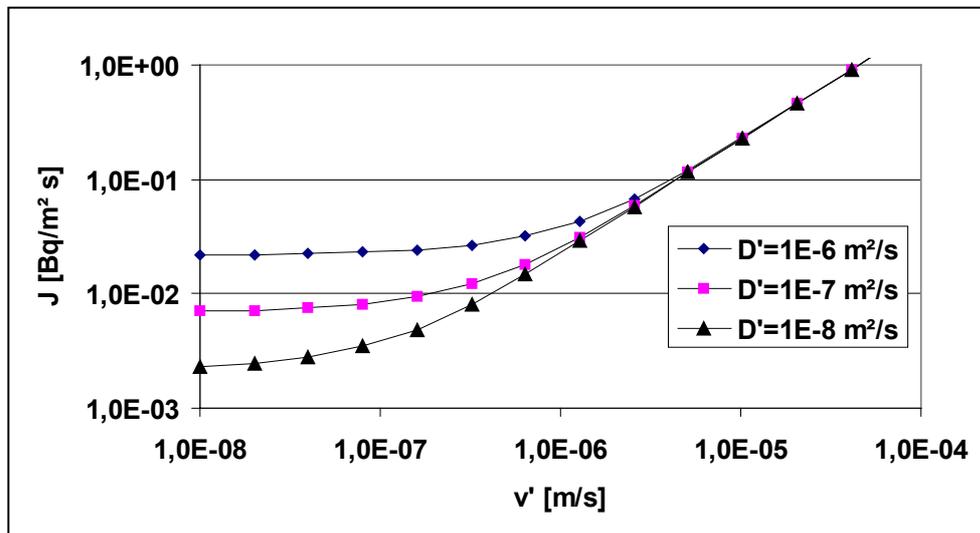


Abbildung 114: Exhalationsrate  $J$  als Funktion der Konvektionsgeschwindigkeit  $v'=v/n$  bei vorgegebener Diffusionskonstante  $D'$ . Die asymptotische Radonkonzentration in der Bodenluft beträgt 50 kBq/m<sup>3</sup>, die Porosität ist  $n=0,3$ .

Bei einer Geschwindigkeit von  $v' = 10^{-5}$  m/s wird im porösen Bodenkörper in einer Stunde eine "Strecke" von lediglich 3,6 cm zurückgelegt, an einem Tag wird somit knapp 1 m erreicht. Die Modifizierung der Radonbodenprofile in Abhängigkeit von der Größe der Konvektionsgeschwindigkeit ist in der Abbildung 115 illustriert, wobei die Konvektionsrichtung positiv gewählt worden ist.

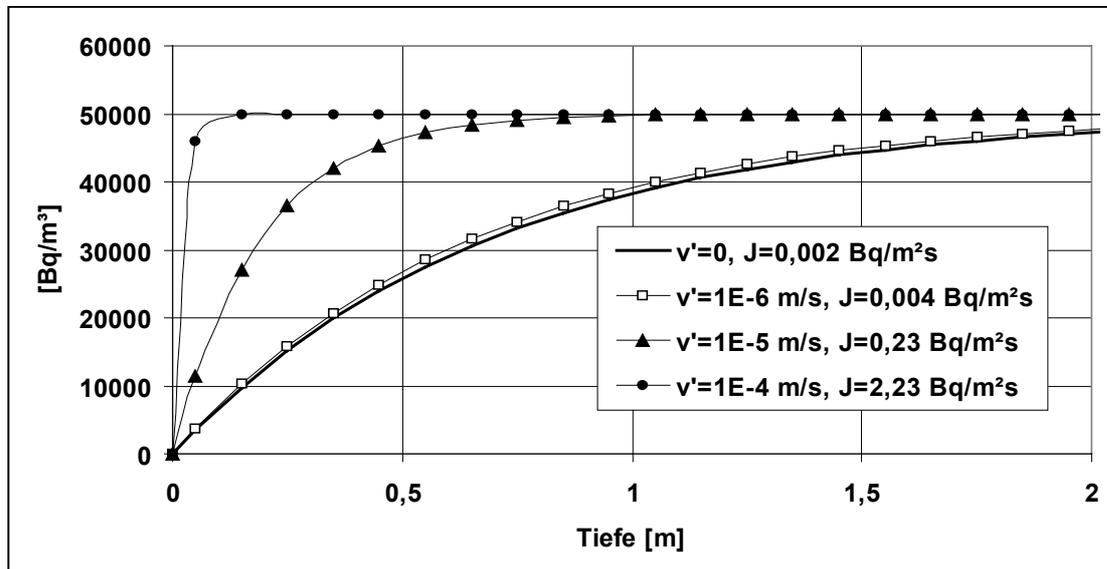


Abbildung 115: Radonkonzentrationsprofile in einer Bodenschicht unendlicher Mächtigkeit für verschiedene Konvektionsgeschwindigkeiten  $v'$ . Der Übergang zur Atmosphäre ist bei der Tiefe 0. Die gewählte Diffusionskonstante ist  $D' = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Die asymptotische Radonkonzentration in der Bodenschicht beträgt  $50 \text{ kBq/m}^3$ , die Porosität ist  $n=0,3$ .

Es ist deutlich zu erkennen, dass bei Konvektionsgeschwindigkeiten im Bereich von  $v' > 10^{-5} \text{ m/s}$  die Radonkonzentration in der Bodenluft für Tiefen unterhalb 0,3 - 0,5 m bereits konstant bleibt. Zu bemerken ist, dass Gl. (19) nur anwendbar ist, wenn die Konvektion in Richtung der Diffusionsbewegung wirkt. Im entgegengesetzten Fall gilt

$$J = n \cdot C_0 \left( -\frac{v'}{2} + \sqrt{\frac{v'^2}{4} + \lambda D'} \right), \quad (22)$$

so dass im Bereich der Konvektionsgeschwindigkeiten von  $v' \approx 10^{-5} \text{ m/s}$  Unterschiede in den Exhalationsraten von ca. 2 Größenordnungen in Abhängigkeit von der Rich-

tung von  $v'$  auftreten können. Dieser Sachverhalt ist beispielhaft in der Abbildung 116 illustriert.

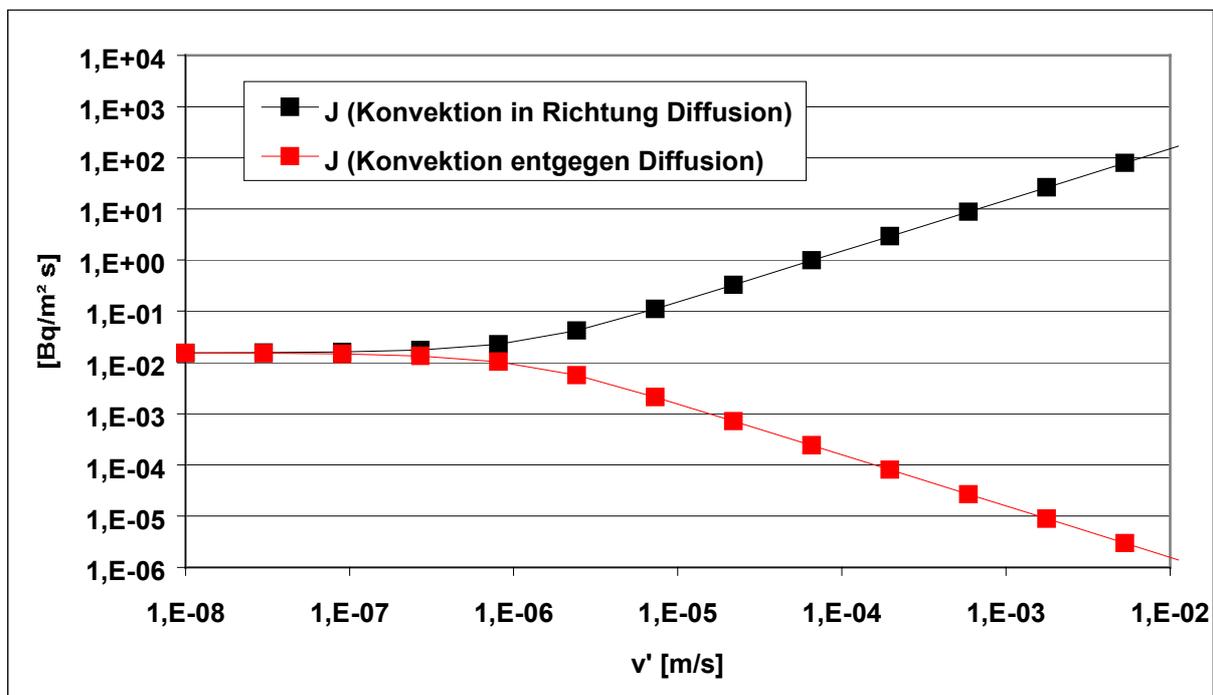


Abbildung 116: Exhalationsraten in Abhängigkeit von der Konvektionsgeschwindigkeit und ihrer Richtung. Die anderen Parameter in den Gleichungen (19) bzw. (22) sind beispielhaft  $D'=5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $n=0,3$  und  $C_0=50 \text{ kBq/m}^3$  gewählt.

Die dargestellten Resultate sind nur für ein unendlich ausgedehntes Medium korrekt. In dem Fall gilt insbesondere, dass bei großen Konvektionsgeschwindigkeiten  $v'$  die Exhalationsrate linear mit  $v'$  anwächst, d.h. eine stetig ansteigende Funktion ist.

Dies ist nicht korrekt für endliche Systeme. In dem Fall existiert immer eine obere Grenze für die Exhalationsrate, die sich aus dem Wechselspiel von Konvektion und Radongeneration ergibt.

Im Fall eines unendlichen System ist  $C(t \rightarrow \infty, z)$  durch die Funktion (18) gegeben.

Im Fall eines endlichen Systems lautet die dazu analoge Lösung

$$C(z) = C_0 \cdot \left[ 1 - \exp(\delta \cdot z) \frac{\sinh(\beta \cdot (H - z))}{\sinh(\beta \cdot H)} \right]. \quad (23)$$

mit

$$\delta = \frac{v'}{2 \cdot D'} \quad (24)$$

und

$$\beta = \sqrt{\left( \frac{v'}{2 \cdot D'} \right)^2 + \frac{\lambda}{D'}}, \quad (25)$$

Die Lösungen (18) für das unendliche und (23) für das endliche System sind jedoch streng genommen in der angegebenen Form für die Erfassung konvektiver Prozesse nur bedingt geeignet. Um die Situation zu verdeutlichen, betrachten wir eine Halde der Höhe  $L$  (s. Abbildung 117).

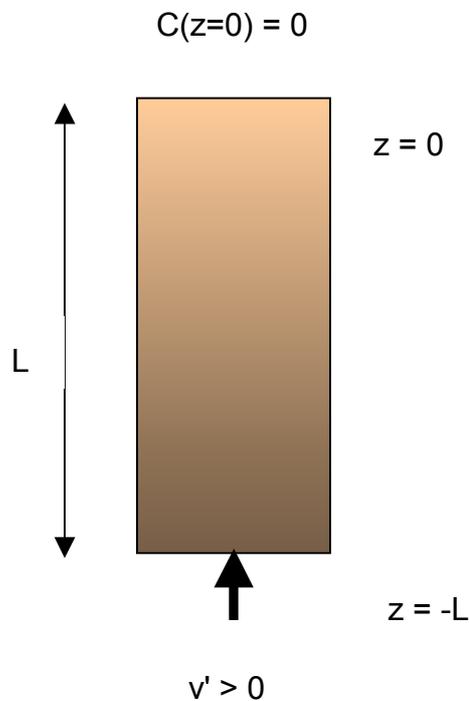


Abbildung 117: Schematische Darstellung einer 1-dimensionalen Halde mit unterschiedlichen Randbedingungen

Es ist offensichtlich, dass im Fall einer konvektiven Strömung die Randbedingung  $C(z = -L) = C_0 = Q_0/\lambda$  nicht anwendbar ist, doch liefert sie für die Berechnung der Exhalationsrate an der Stelle  $z = 0$  meistens eine ausreichend genaue Abschätzung, wenn die Halde hoch genug ist.

Betrachten wir zunächst den Fall  $v' = 0$ . In dem Fall ist die Lösung (23) anwendbar, wenn die Halde unten "radondicht" auf der Aufstandsfläche aufgesetzt ist. Dann gilt  $C(z = -L) = C_0$ . Eine qualitativ andere Lösung wird erhalten, wenn unten  $C(z = -L) = 0$  gilt, d.h. Außenluft kann in die Halde einströmen. Da im Falle eines ausschließlichen diffusiven Radontransports der Radonfluß dem Konzentrationsgradienten proportional ist, kann das in der Halde produzierte Radon sowohl nach "oben" zum Haldenpla-

teu als auch nach "unten" zum Haldenfuß migrieren. Die Lösung kann in analytischer Form angegeben werden und lautet

$$C(z) = C_0 \cdot \left[ 1 - \frac{\exp(\delta \cdot z) \sinh(\beta \cdot [L + z]) + \exp(\delta \cdot [L + z]) \sinh(\beta \cdot z)}{\sinh(\beta \cdot L)} \right]. \quad (26)$$

Das Radonkonzentrationsprofil ist dann im Fall  $v'=0$  symmetrisch anstatt, wie in den oben diskutierten Lösungen von unten nach oben monoton abnehmend. Dieser Sachverhalt ist in der Abbildung 118 illustriert.

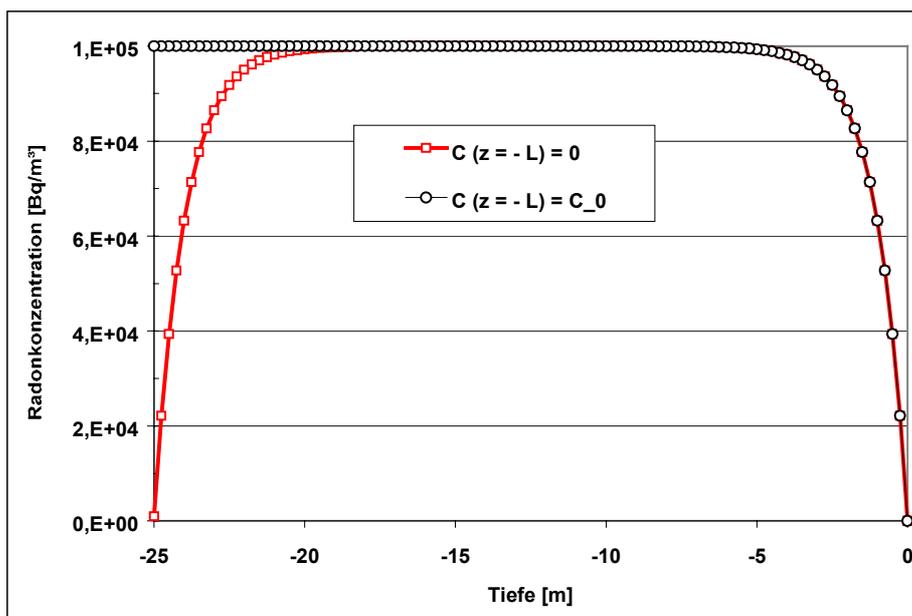


Abbildung 118: Radonkonzentrationsprofile einer Halde für unterschiedliche Randbedingungen bei ausschließlich diffusivem Radontransport. (Höhe  $H = 25$  m, Porosität  $n = 0,3$ , mittlere Diffusionslänge des Haldenmaterials  $1$  m, Radonkonzentration in der Bodenluft,  $C_0 = Q_0/\lambda = 100$  kBq/m<sup>3</sup>)

Trotz dieser unterschiedlichen Profile ist die Exhalationsrate auf dem Haldenplateau, d.h.  $J(z = 0)$ , für beide Randbedingungen praktisch identisch, wenn die Höhe der Halde genügend groß ist. Für Längen unterhalb von  $10$  m, d.h. wenn die Diffusions-

länge nicht mehr gegenüber der Höhe der Halde zu vernachlässigen ist, wird bei rein diffusivem Radontransport der Unterschied in den Exhalationsraten nicht mehr vernachlässigbar. An der Unterseite sind, wie aus der Abbildung 118 erkennbar, die Exhalationsraten mit den verschiedenen Anfangsbedingungen unterschiedlich.

Die Sachlage ändert sich, wenn Konvektion berücksichtigt wird. Im Fall der Randbedingung  $C(z = -L) = C_0$ , die praktisch der Situation entspricht, dass am Haldenfuß Außenluft mit einer Konzentration  $C_0$  einströmt, ist bei Konvektionsgeschwindigkeiten von  $v' > 10^{-6}$  m/s die berechnete Exhalationsrate  $J(z) = n v' C_0$ , d.h. sie steigt linear mit  $v'$  an. Trotz dieser inkonsistenten Randbedingung ist die resultierende Exhalationsrate  $J(z=0)$  am Haldenplateau korrekt, wenn der Strömungsweg lang genug ist.

Dieser Sachverhalt ist in der Abbildung 119 untersetzt. Es ist zu erkennen, dass die Exhalationsraten bei  $z=0$  praktisch übereinstimmen, obwohl, wie aus Abbildung 120 folgt, die Konzentrationsprofile qualitative unterschiedliche Verläufe zeigen.

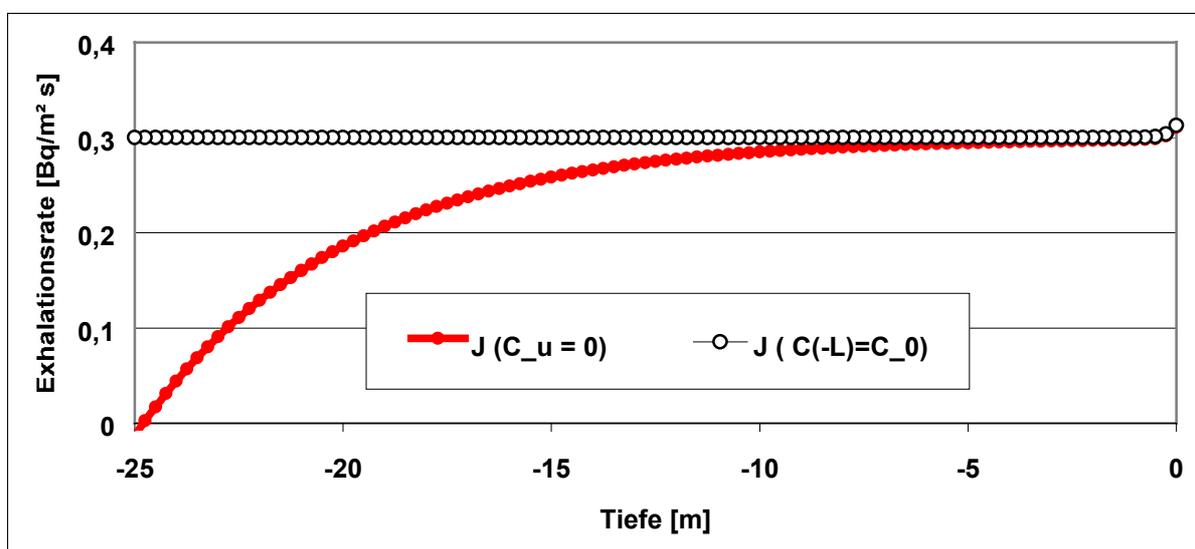


Abbildung 119: Exhalationsrate  $J(z)$  einer Halde für unterschiedliche Randbedingungen. Die Konvektionsgeschwindigkeit beträgt am Haldenfuß  $v' = 10^{-5}$  m/s,

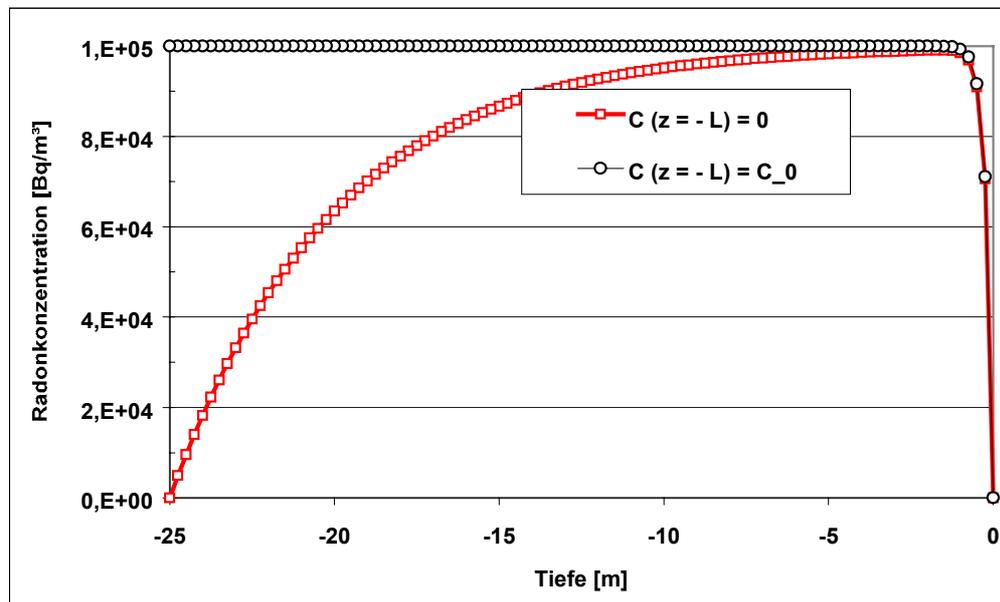


Abbildung 120: Radonkonzentrationsprofile in einer Halde für unterschiedliche Randbedingungen. Die Konvektionsgeschwindigkeit ist  $v' = 1E-5$  m/s (am Haldenfuß einströmend).

Die Ergebnisse der Abbildung 120 verdeutlichen, dass nach einem ausreichend langen Einströmen von Außenluft in eine Halde am Haldenfuß ein Konzentrationsprofil zu erwarten ist, dass vom Eintrittsort der Strömung bis hin zum Austrittsort ansteigt.

Im Fall, dass die Außenluft am Haldenplateau einströmt und am Haldenfuß auströmt, kehren sich die Verhältnisse in symmetrischer Weise um. Dies ist in der Abbildung 121 illustriert. Doch in diesem Fall führt die Aufrechterhaltung der üblichen Randbedingung  $C(z = -L) = C_0$  bereits zu Interpretationsschwierigkeiten, da das Radonkonzentrationsprofil nicht, wie im Fall positiver Konvektionsgeschwindigkeiten, am Übergang zur Außenluft gleich null ist.

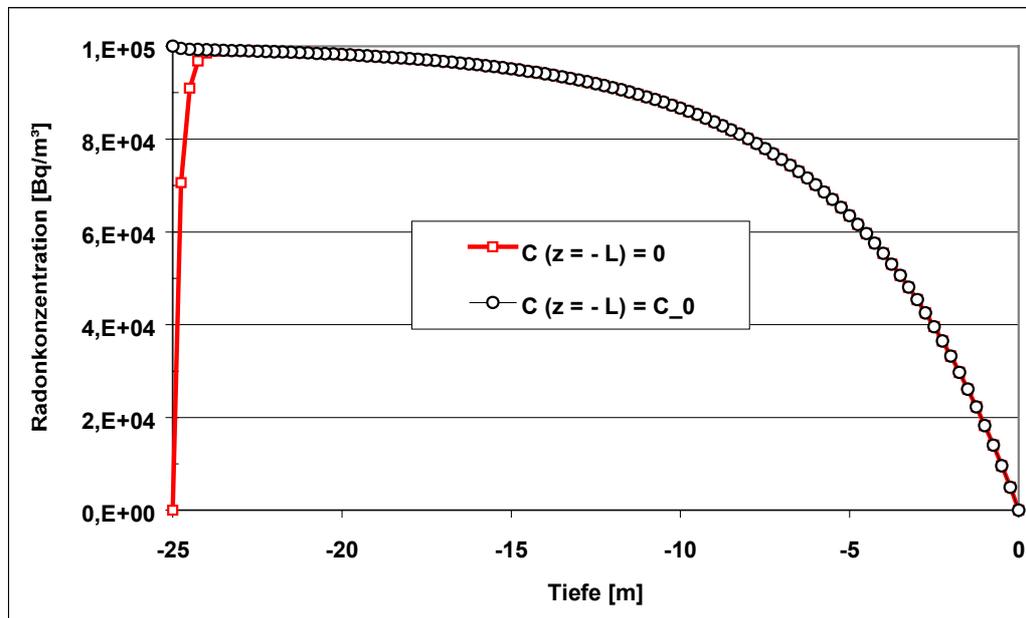


Abbildung 121: Radonkonzentrationsprofile einer Halde für unterschiedliche Randbedingungen. Die Außenluft dringt in die Halde am Plateau ein, entsprechend einer Konvektionsgeschwindigkeit von  $v' = -10^{-5}$  m/s,

Die Situation ändert sich bereits qualitativ, wenn Konvektionsgeschwindigkeiten von  $v' = 5 \cdot 10^{-5}$  m/s betrachtet werden. Dies ist in der Abbildung 122 illustriert. Die Konzentrationsunterschiede sind an Haldenfuß und Plateau deutlich unterschiedlich (etwa Faktor 2). Das bedingt auch deutliche Unterschiede in den Exhalationsraten.

Die Abhängigkeit der Exhalationsrate  $J(z)$  ist in der Abbildung 123 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass im Fall der Randbedingung  $C(z = -L) = C_0$  die Exhalationsrate praktisch unabhängig von  $z$  ist, während sie für das Modell, das der Beschreibung der Konvektion in einer Halde angepaßt ist, vom Haldenfuß zum Plateau ansteigt und an der oberen Öffnung ihren Maximalwert erreicht.

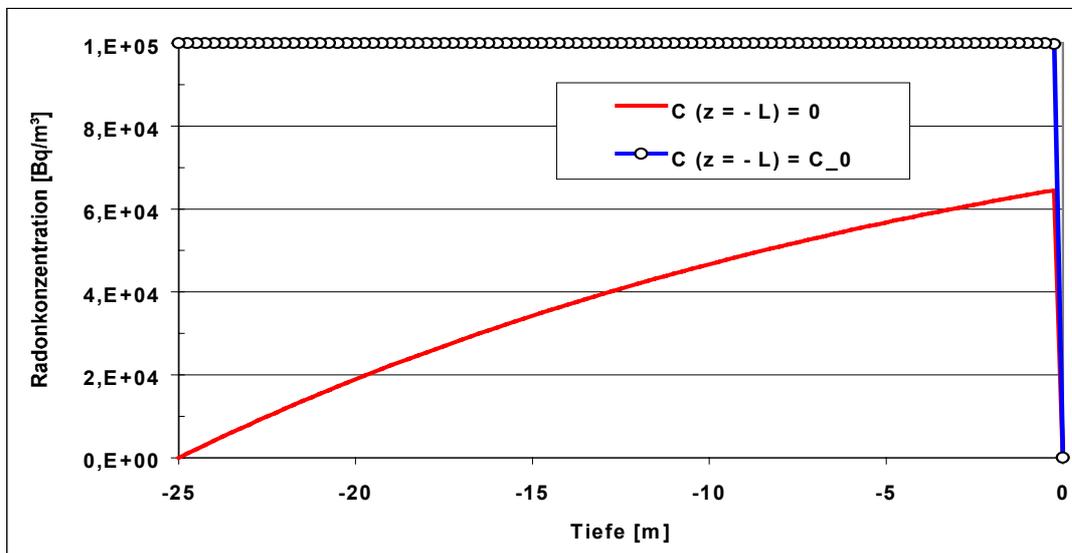


Abbildung 122: Radonkonzentrationsprofile in einer Halde für unterschiedliche Randbedingungen. Die Konvektionsgeschwindigkeit ist  $v' = 5 \cdot 10^{-5}$  m/s (unten einströmend).

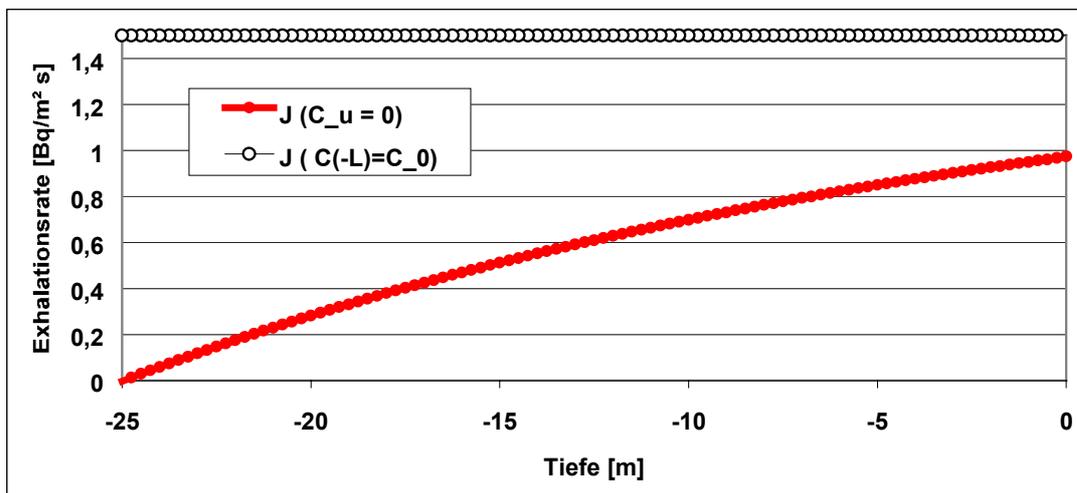


Abbildung 123: Exhalationsrate  $J(z)$  einer Halde für unterschiedliche Randbedingungen. Die Konvektionsgeschwindigkeit ist  $v' = 5 \cdot 10^{-5}$  m/s (unten einströmend).

Die Exhalationsrate  $J(0)$  am Haldenplateau errechnet sich unter der Bedingung, dass am Haldenfuß Luft einströmt gemäß

$$J(0) = nC_0 \cdot \left[ \delta + \frac{\beta \cosh(\beta \cdot L) - \beta \exp(\delta \cdot L)}{\sinh(\beta \cdot L)} \right], \quad (27)$$

während sie für eine Halde mit der Randbedingung  $C(z = -L) = C_0$  durch

$$J_0(0) = nC_0 \cdot \left[ \delta + \frac{\beta \cosh(\beta \cdot L)}{\sinh(\beta \cdot L)} \right] \quad (28)$$

gegeben ist. Letztere führt für große Konvektionsgeschwindigkeiten  $v'^2 > \lambda \cdot D$  zu dem Ergebnis

$$J_0(0) = nC_0 \cdot v', \quad v'^2 > \lambda \cdot D \quad (29)$$

d.h. die Exhalationsrate steigt mit der Konvektionsgeschwindigkeit linear an. Dies ist ein Artefakt der Randbedingung, die implizit bedeutet, dass radonhaltige Luft mit einer Konzentration  $C_0$  in die Halde einströmt. Die korrekte Exhalationsrate zeigt dieses Verhalten für  $v'^2 > \lambda \cdot D$  nicht. Für große  $v'$  wird ein Maximalwert der Exhalationsrate erhalten, der durch

$$J^{\max} = n \cdot C_0 \cdot L \cdot \lambda = n \cdot Q_0 \cdot L \quad (30)$$

gegeben und **unabhängig von der Konvektionsgeschwindigkeit** ist. Auf diesen Sachverhalt wurde u.E. in der Literatur noch nicht hingewiesen. Die maximal erreich-

bare Exhalationsrate ist dem Produkt von Quellstärke und Konvektionsweg  $L$  proportional. Dieses zunächst paradox erscheinende Ergebnis ist dennoch plausibel, da die sich in der Halde einstellende Radonkonzentration vom Zustrom der von außen herangeführten Luft abhängt. Ab einer bestimmten Konvektionsgeschwindigkeit kann nur noch soviel Radon abgeführt werden, wie produziert wird. Die maximal erreichbaren Exhalationsraten von Halden vergleichbarer Quellstärke werden nur noch durch die Konvektionslänge  $L$  bestimmt. Auf diesen Sachverhalt wird auch im Abschnitt 9.3.2 eingegangen, wenn die Ergebnisse des Tracerexperiments an der Halde 124 diskutiert werden.

Wichtig ist für die nachfolgenden Diskussionen und Untersuchungen bei welchen Konvektionsgeschwindigkeiten die exakte Gleichung (27) bereits in den Maximalwert übergeht. Für diesen Zweck sind in der Abbildung 124 die mit den zwei Modellen berechneten Exhalationsraten am Punkt  $z=0$  (Haldenplateau) gegenübergestellt.

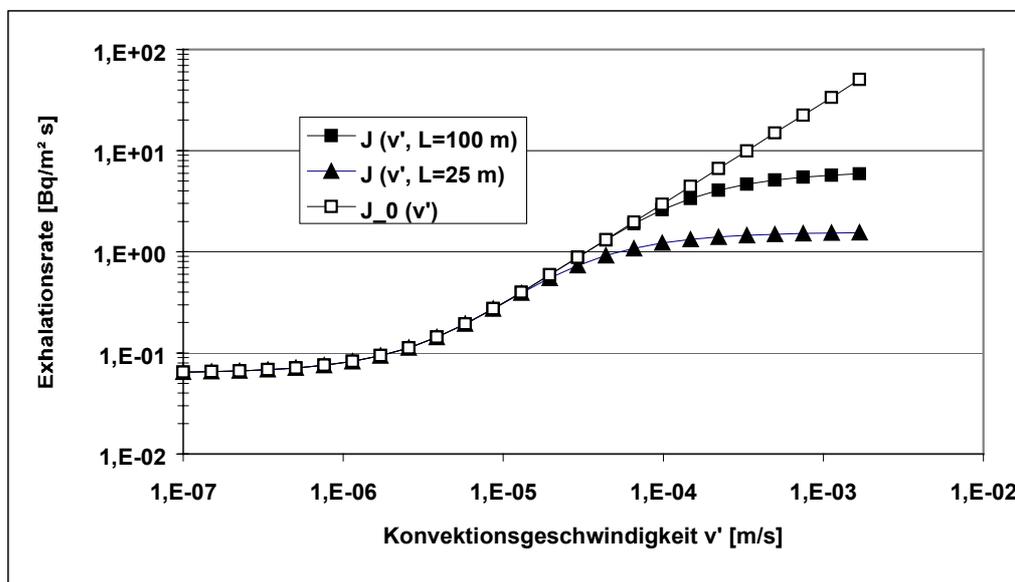


Abbildung 124: Exhalationsrate  $J(z)$  und  $J_0(z)$  einer Halde für unterschiedliche Konvektionsgeschwindigkeiten  $v'$  (Am Haldenfuß einströmend).

Es ist zu erkennen, dass bei einem Konvektionsweg von 25 m und einer Konvektionsgeschwindigkeit von  $v' = 1 \cdot 10^{-4}$  m/s der asymptotische Wert gemäß Gl. (30) von  $J^{\max} = 1,57 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^2 \text{s}}$  erreicht wird. Bei einem Konvektionsweg von  $L = 100$  m wird die maximale Exhalationsrate von  $J^{\max} = 6,3 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^2 \text{s}}$ , die genau Faktor 4 größer ist als der Wert für  $L = 25$  m, bei einer Konvektionsgeschwindigkeit von etwa  $10^{-3}$  m/s erreicht. In beiden Fällen ist  $C_0 = 100$  kBq/m<sup>3</sup>.

Der dargestellte Sachverhalt kann in folgender Weise zusammengefasst werden. Interessieren nur die Exhalationsverhältnisse auf dem Haldenplateau und ist die Konvektionsgeschwindigkeit vergleichsweise gering,  $v'^2 < \lambda \cdot D'$ , ist die Wahl der Randbedingungen für die Berechnung des Radonkonzentrationsprofils am Haldenfuß nicht von entscheidender Bedeutung. Die diskutierten Randbedingungen liefern praktisch das gleiche Resultat. Die Wahl der korrekten Randbedingungen ist aber dann ausschlaggebend, wenn gleichzeitig die Exhalation am Haldenfuß berechnet werden soll. In dem Fall liefert nur die Randbedingung  $C(z = -L) = C_A$ , wobei  $C_A$  die Radonkonzentration der Außenluft ist, konsistente Resultate.

Übersteigt jedoch die Konvektionsgeschwindigkeit die Diffusionsgeschwindigkeit ( $v'^2 > \lambda \cdot D$ ) deutlich, ist die Wahl der Randbedingungen von entscheidender Bedeutung, um den konvektiven Radontransport korrekt zu erfassen. Es zeigt sich, dass die korrekte Herangehensweise zu einer maximal erreichbaren Exhalationsrate führt, die dem Produkt von Quellstärke und Konvektionsweg  $L$  proportional ist. Benutzt man den Ausdruck einer unendlich hohen Halde für die Berechnung der konvektiven Radonexhalation, steigt die Exhalationsrate mit  $v'$  an, so dass letztlich die tatsächliche Exhalationsrate signifikant überschätzt werden kann. Der Grad der Überschätzung hängt allein von der Größe  $L$  ab. Je kleiner  $L$ , um so größer die Abweichungen bei vorgegebener Konvektionsgeschwindigkeit  $v'$ .

### **9.3.2 Ergebnisse des Versuchs mit Tracergas an Halde 124 in Johannegeorgenstadt**

Erste Untersuchungen mit Tracergasen wurden an der Halde 124 in Johannegeorgenstadt am 19.02.03 durchgeführt. Das Experiment diente neben der Machbarkeit zur Verifizierung der Konvektionsgeschwindigkeit in einer extremen Situation, die dadurch gekennzeichnet war, dass zum einen die Radonaustrittsstelle auf dem Haldenplateau durch die in der Atmosphäre kondensierende warme Haldenluft gut auszumachen und zum anderen, dass am ca. 25 m tiefer gelegenen Haldenfuß bei einer Außentemperatur von ca.  $-16^{\circ}\text{C}$  der Einzug der kalten Außenluft in die Halde experimentell deutlich nachzuweisen war. Diese als typisch für die Winterszeit zu bezeichnenden Bedingungen, führten letztlich dazu, dass die Konvektionsgeschwindigkeit für Teilbereiche der Halde im Bereich von  $v=10^{-2}$  m/s liegt. In der Abbildung 125 ist das Ergebnis der Tracergasausbreitung von der Injektionsstelle am Haldenfuß bis zu den einzelnen Messstellen am Haldenplateau, die durch Peaks bei unterschiedlich langen Ausbreitungszeiten gekennzeichnet sind, dargestellt.

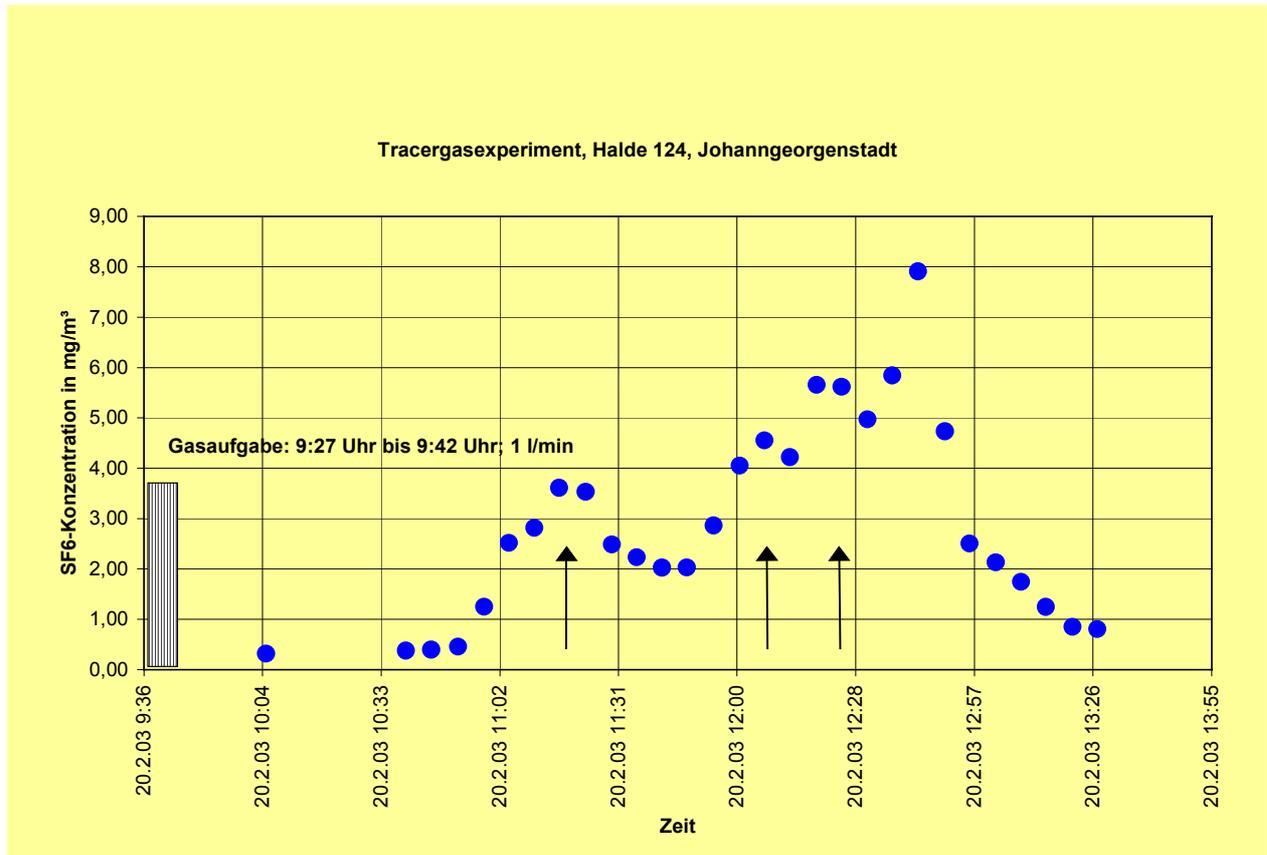


Abbildung 125: Tracergasausbreitung von der Injektionsstelle am Haldenfuß bis zur Messstelle am Haldenplateau der Halde 124

Solch extrem hohe Konvektionsgeschwindigkeiten haben für das Prozeßverständnis weitreichende Konsequenzen, die hier untersetzt werden. Bei Konvektionsgeschwindigkeiten von  $v' = 10^{-2}$  m/s wird in einer Stunde eine Strömungslänge ca. 36 m "zurückgelegt" und somit eine Halde im Verlaufe eines Tages mehrfach mit atmosphärischer Frischluft "gespült". In Abhängigkeit vom Luftaustausch stellt sich deshalb im Haldenkörper ein Gleichgewicht ein, das allein durch die Radonquellstärke und die "Ventilationsrate" bestimmt wird.

Die Mischung der Frischluft mit einer Radonkonzentration  $C_A$  mit der in der Halde vorhandenen Radonkonzentration kann auch durch eine Ventilationsrate  $\lambda_{LW}$  be-

schrieben werden, die ihrerseits direkt proportional zur Konvektionsgeschwindigkeit ist. Die Lösung der zeitabhängigen Differentialgleichung lautet

$$C(t) = \frac{\lambda C_0 + \lambda_{LW} C_A}{\lambda + \lambda_{LW}} [1 - \exp(-(\lambda + \lambda_{LW}) \cdot t)] + C_0 \exp[-(\lambda + \lambda_{LW}) \cdot t]. \quad (31)$$

Der asymptotische Wert ( $t \rightarrow \infty$ ) für die sich einstellende Radonkonzentration in der Halde ist

$$C_H = \frac{\lambda C_0 + \lambda_{LW} C_A}{\lambda + \lambda_{LW}}, \quad (32)$$

der als mittlere Radonkonzentration in der Halde interpretiert werden kann. Die Zerfallskonstante von Rn-222,  $\lambda = 1/132$  [1/h], kann als Ventilationsrate in der Weise interpretiert werden, dass nach 5,5 Tagen ein Radonaustausch in der Halde erfolgt. Im Fall, dass keine Ventilation infolge der Durchströmung der Halde erfolgt, ist  $C_H = C_0$ .

Im Fall, dass , wie im Tracergasexperiment gemessen,  $v = 10^{-2}$  m/s ist, ergibt sich bei  $L=100$  m eine Ventilationsrate von  $\lambda_{LW} = 0,36$  [1/h], d.h. 8,6 Luftwechsel finden in 24 Stunden statt.

Bei Kenntnis der Radonkonzentration  $C_H$  in der Bodenluft kann die Radonquellstärke über die Beziehung

$$Q_0 = C_H \cdot \lambda_{LW} = \lambda \cdot C_0, \quad (33)$$

abgeschätzt werden. Für das obige Beispiel der Halde 124 variierte die im Bereich des Austrittsorts in der Bodenluft gemessene Radonkonzentration auf einem sehr

niedrigen Niveau zwischen 2 und 6 kBq/m<sup>3</sup>. Dieser Radonkonzentrationsbereich korrespondiert mit der direkt über der Austrittsstelle gemessenen Radonkonzentration von 4 kBq/m<sup>3</sup>. Daraus resultiert unter Berücksichtigung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Tracergases eine Quellstärke von  $Q_0 \approx 0,4 \text{ Bq}/(\text{m}^3 \text{ s})$ .

Im Fall  $\lambda_{LW} \gg \lambda$ , was gleichbedeutend mit einer Dominanz konvektiver Prozesse ist, ergibt sich die Exhalationsrate gemäß den obigen Ableitungen zu

$$J \approx C_0 \cdot \lambda \cdot L = Q_0 \cdot L \quad . \quad (34)$$

Dies bedeutet, dass im Fall starker konvektiver Prozesse die Radonexhalation einer Halde nicht von der Konvektionsgeschwindigkeit abhängt, sondern allein durch die Radonquellstärke  $Q_0$  und die Länge des "Konvektionswegs"  $L$  bestimmt wird. Dieses in einfacher Näherung abgeleitete Resultat ist in völliger Übereinstimmung mit dem Ergebnis der exakten Berechnung der Exhalationsrate, die oben diskutiert wurde. Es besagt, dass die sich in der Halde einstellende Radonkonzentration vom Luftaustausch, d.h. von der Konvektionsgeschwindigkeit abhängt. In anderen Worten, bei genügend hoher Konvektionsgeschwindigkeit ist das Produkt  $C_H \cdot v$  konstant. Höhere Konvektionsgeschwindigkeiten bedingen eine entsprechende Abnahme in der Radonkonzentration  $C_H$ . Das impliziert aber auch, dass durch  $J \approx C_0 \cdot \lambda \cdot L = Q_0 \cdot L$  die maximal erreichbare Exhalationsrate gegeben ist. **Diese Erkenntnis birgt die Möglichkeit, den Einfluß der konvektiven Prozesse auf die abzuschätzende Radonexposition nach oben zu begrenzen.**

Die Abbildung 126 zeigt die Ergebnisse einer Beispielrechnung für die Entwicklung der Radonkonzentration in einer Halde. Die entsprechenden asymptotischen Konzentrationswerte ergeben sich aus der Gl. (32). Es ist zu erkennen, dass im Fall von einem Luftwechsel pro Tag der asymptotische Wert bereits nach ca. 3 Tagen erreicht wird. Dies ist ein vergleichsweise geringer Zeitrahmen wenn man bedenkt, dass in der Wintersaison die konvektive Strömung in einer Halde für einen Zeitraum von mehr als 100 Tagen vom Haldenfuß in Richtung Plateau erfolgen kann, d.h. solange die Temperatur im Haldeninneren größer als die der Außenluft ist.

Für höhere Luftwechselraten pro Tag wird der asymptotische Wert früher erreicht. Bei der Untersuchung an der Halde 124 und den dabei herrschenden Wetterbedingungen kann davon ausgegangen werden, dass der asymptotische Wert bereits nach einem Tag erreicht wurde. Die zeitliche Entwicklung der Radonkonzentration ist in Übereinstimmung mit den oben diskutierten Lösungen der exakten Transportgleichung. Es ist offensichtlich, dass bei vergleichbaren Transportparametern auch die über die Höhe  $z$  gemittelten Radonkonzentrationen der stationären Lösungen den jeweiligen asymptotischen Werten von  $C(t)$  der Abbildung 126 entsprechen.

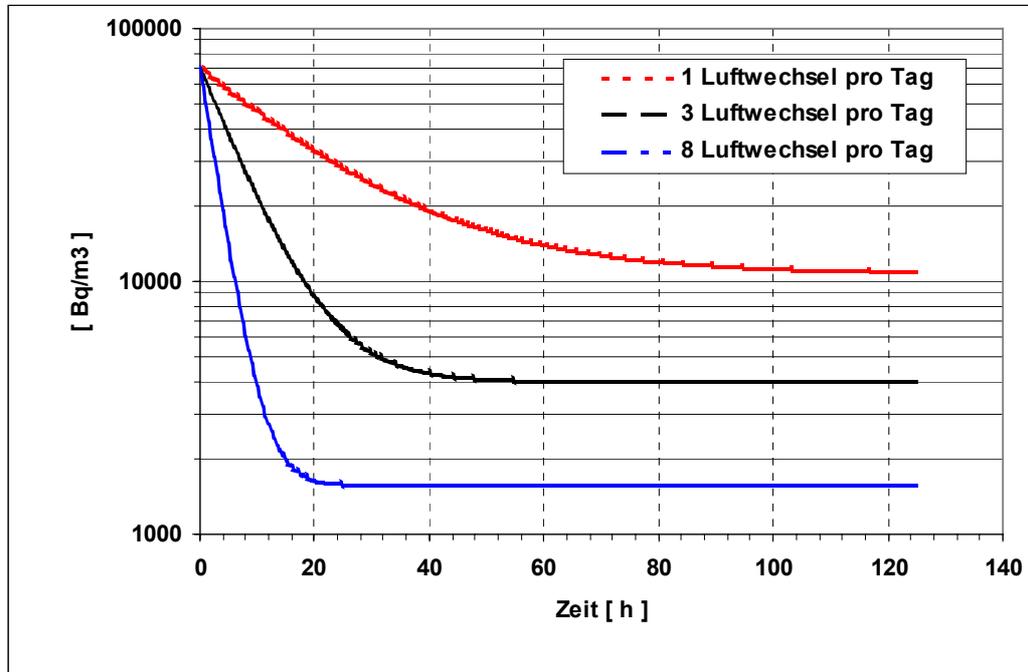


Abbildung 126: Zeitliche Entwicklung der Radonkonzentration in der Halde gemäß (31) mit  $C_A=0$ . Die entsprechenden asymptotischen Werte ergeben sich aus Gl. (32).

Die zeitlichen Veränderungen des konvektiven Radontransports werden durch Änderungen der Lufttemperatur hervorgerufen. Die entscheidende Größe ist die Differenz zwischen der Temperatur im Haldeninneren  $T_H$  und der Außenluft  $T_A$ . Auf diesen Sachverhalt wird noch ausführlicher eingegangen, wenn entsprechende Untersuchungsergebnisse vorgestellt werden. Da die Haldentemperatur im Inneren bei ca.  $10^0$  C liegt, treten neben den bereits oben diskutierten Unterschieden im Winter quasi-periodische Änderungen in den Sommermonaten auf, die sich in den sogenannten Tagesgängen der Radonexhalation manifestieren.

Zur Beschreibung eines instationären Systems nehmen wir vereinfachend an, dass sich die Konvektionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Tageszeit in der folgenden Form ändert

$$v(t) = v_0 \cdot \sin\left[2\pi \frac{t}{24}\right], \quad (35)$$

wobei  $v_0$  ein Parameter ist, der die Amplitude Konvektionsgeschwindigkeit festlegt. Eine positive Geschwindigkeiten bedeutet, dass Außenluft in die Halde am Haldenfuß einströmt.

Die durch (35) festgelegte funktionale Abhängigkeit von der Tageszeit bedeutet, dass die Zeitdauer für das Auftreten von positiver und negativer Konvektionsgeschwindigkeit gleich groß ist. Dies ist nur in Einzelfällen möglich. Wichtig für eine qualitative Interpretation der Exhalationsmuster ist, dass sich die Konvektionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Temperaturunterschied

$$\Delta T = T_H - T_A \quad (36)$$

zwischen dem Inneren der Halde und der Außenatmosphäre quasi-periodisch ändert. Ohne den Radonquellterm würde sich eine Lösung ergeben, die der einer gedämpften Schwingung entspricht. In der Abbildung 127 ist die zeitabhängige Entwicklung der Radonkonzentration in einer Halde bei unterschiedlichen Konvektionsgeschwindigkeiten (Ventilationsverhältnissen) dargestellt.

Betrachten wir beispielhaft die zeitliche Entwicklung mit  $v_0 = 10^{-2}$  m/s. Aufgrund der großen Ventilation, die proportional zu  $v(t)$  ist, fällt die Radonkonzentration anfänglich stark ab. Nach 12 Stunden, wenn  $v=0$  ist, erreicht sie den ersten Plateauwert, um dann weiter abzufallen, da der Halde jetzt vom Plateau aus Außenluft zugeführt wird ( $v<0$ ). Nach ca. 36 Stunden stellt sich bereits ein stationärer Zustand ein, dessen mittlere Radonkonzentration durch das Wechselspiel von Ventilation und Radonproduktion geprägt ist. Der mittlere stationäre Radonkonzentrationswert liegt deutlich höher als der Wert, der bei einer kontinuierlichen Spülung mit fester Ventilationsrate

erhalten wird. Bei kleineren Konvektionsgeschwindigkeiten ist dieser Effekt deutlich schwächer ausgebildet. Er hängt aber entscheidend von der Haldenhöhe ab. Es ist zu erkennen, dass die Radonkonzentration im Zyklus von 24 Stunden zweimal einen Maximalwert erreicht, während dies die Konvektionsgeschwindigkeit nur einmal durchläuft .

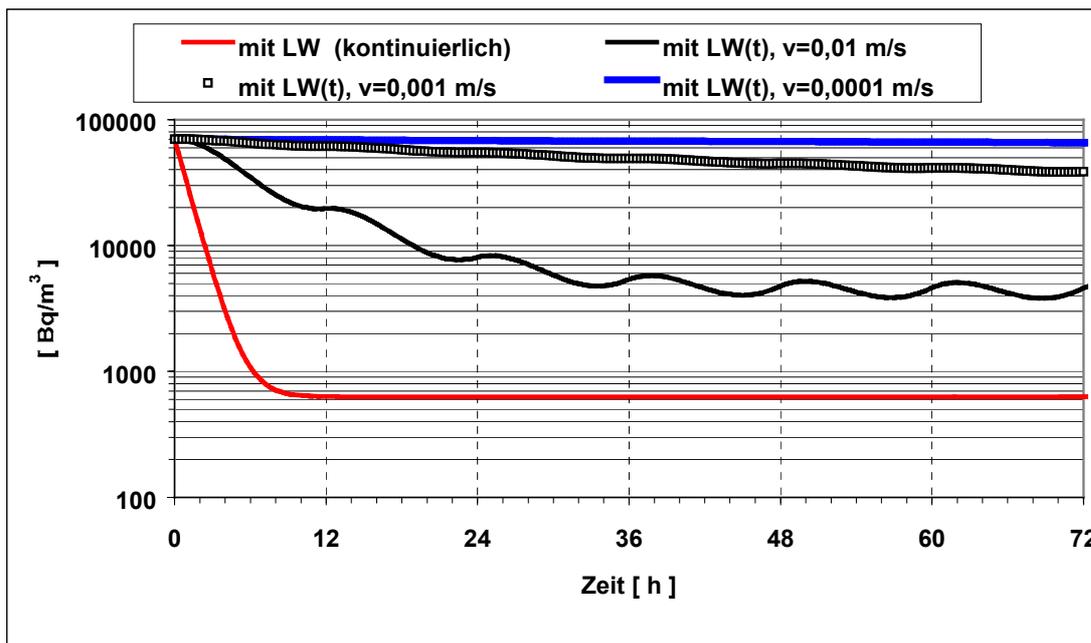


Abbildung 127: Zeitabhängige Entwicklung der Radonkonzentration bei unterschiedlichen Konvektionsgeschwindigkeiten (Ventilationsverhältnissen)

### 9.3.3 Tracergasversuch zur Bestimmung der Gaspermeabilität größerer Bereiche

#### 9.3.3.1 Zielstellung der Tracergasversuche

Die experimentelle Untersuchung der Bleispur in den Abdecksystemen, die vor mehreren Jahrzehnten auf bergbauliche Objekte aufgebracht wurden (sog. Altabdeckungen) ergab, dass in vielen Fällen nur eine relativ geringe Radon-Dämmwirkung vorhanden war. Die in jedem Fall ausgeprägte negative Bleispur im Haldenmaterial oder in den Tailings entsprach nicht den nur teilweise anzutreffenden positiven Bleispuren in der Abdeckschicht. Das weist eindeutig darauf hin, dass insbesondere in Abdecksystemen mit einer Mächtigkeit von etwa 1 m (entspricht etwa der Diffusionslänge des Rn-222 im Boden) und mehr, die eine hinreichende Diffusionsbarriere darstellen, der konvektive Transport eine signifikante Rolle spielen kann. Die Versickerungsversuche mit einer Farbtracer-Flüssigkeit zeigten, dass in den einfachen Abdeckschichten bevorzugte Fließwege vorhanden sind. Wesentlich dabei sind Wurzelkanäle und Grobporen infolge von Materialinhomogenitäten.

In der Altabdeckung auf dem Damm der IAA Dänkriz I legte die Tracerflüssigkeit in 24 h mehr als 1 m zurück. Das entspricht einer Geschwindigkeit von mehr als  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s. Der konvektive Transport der Bodenluft (und damit von Radon) in bevorzugten Fließwegen durch die Abdeckung hindurch kann nicht durch die mittlere Eigenschaften des Abdeckmaterials beschrieben werden. Der wesentliche Parameter zur Charakterisierung des konvektiven Transportes ist die Gaspermeabilität.

Die Tracergasversuche hatten das Ziel, experimentell zu prüfen, ob die Transportgeschwindigkeiten der Bodenluft durch die Abdeckung mit den dazugehörigen Permeabilitäten des Materials sich in prinzipieller Übereinstimmung befinden, oder ob im Falle des konvektiven Radontransportes in Abdeckschichten die Heterogenitäten von Grobporensystemen verstärkt beachtet werden müssen.

Tracergasversuche wurden unter Berücksichtigung des experimentellen Aufwandes im Rahmen dieses Projektes nur exemplarisch an der Altabdeckung der nördlichen Außenböschung des Dammes der IAA Dänkriz I durchgeführt. Dafür sprach die Datenlage für dieses Objekt, wo neben der Bleispur in 4 Schürfen die Rn-

Exhalationsrate, das Tiefenprofil des Bodenradons und die mittels Lanzensonde gemessenen Permeabilitäten vorlagen.

### 9.3.3.2 Ausgangsinformationen

Die Materialeigenschaften des vorhandenen Abdeckmaterials wurden zunächst mit Stechzylinderproben aus den Schürfen (Schurf 27) stichprobenartig bestimmt. Die Trockenrohddichte wurde zwischen  $1,6 \text{ g/cm}^3$  und  $1,73 \text{ g/cm}^3$  ermittelt. Die Porosität betrug zwischen 35 % und 40 %. Die für die einzelnen Proben ermittelten Parameter und ihre Variabilität wurden wesentlich durch Materialinhomogenitäten beeinflusst.

Die im Labor an den Stechzylinderproben ermittelten Gaspermeabilitäten betragen nach der Klinkenberg-Korrektur und der Turbulenzkorrektur:

für Proben aus 0,4 m Tiefe:  $7,8 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$  und  $2,8 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ ,

für Probe aus 0,8 m Tiefe:  $3,0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ .

Mittels Lanzensonde wurden unter Feldbedingungen unterhalb der Abdeckung in den sandigen Tailings Permeabilitäten im Bereich von  $(1 \text{ bis } 2) \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$  und in der Abdeckung in 40 cm Tiefe etwa  $1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$  gemessen. Das Tiefenprofil der Gaspermeabilität ist von der Bodenfeuchte bzw. der Wassersättigung des Porenraumes abhängig. Es können jedoch bei diesem Messverfahren nur relativ kleine Bodenbereiche charakterisiert werden.

Die sandigen Tailings unter der Abdeckung hatten eine spezifische Ra-226-Aktivität von  $3200 \text{ Bq/kg}$  bis  $8000 \text{ Bq/kg}$ . Die gemessenen Exhalationsraten lagen im Bereich von  $0,3 \text{ Bq/(m}^2\text{s)}$  bis  $0,75 \text{ Bq/(m}^2\text{s)}$ . Das Tiefenprofil der Bodenradonkonzentration (s. Abschnitt 9.1.8) weist zwar eindeutig auf eine Dämmwirkung der Abdeckung bezüglich des diffusiven Radontransportes hin, jedoch muss auch ein konvektiver Anteil vorhanden sein.

### 9.3.3.3 Versuchsanordnung

Die Tracergasversuche wurden in der Nähe vom Schurf 27 auf der IAA Dänkriz I durchgeführt. Dabei war der Bereich so ausgewählt worden, dass die Tracergasausbreitung im Wurzelbereich von Bäumen stattfand.

Zur Injektion des Tracergases wurde in einer Bohrung durch die Abdeckschicht ein Rohr (Durchmesser 30 mm) installiert und gut abgedichtet. Mittels Pumpe wurde Luft in den Gasbrunnen mit einem Volumenstrom von etwa 1 l/min eingeleitet. Für eine Zeitdauer von wenigen Minuten wurde SF<sub>6</sub> zudosiert. Die Aufgabestelle befand sich in den sandigen Tailings in einer Tiefe von 0,9 m unter der Abdeckung.

In einer Entfernung von etwa 0,5 m befand sich in gleicher Tiefe die erste Messstelle zur Bestimmung der Tracergaskonzentration (MP 1). Hierzu wurde ein Schlauch mit einem porösen Ansaugstück in einer Bohrung installiert und abgedichtet. Die weiteren Messstellen zur Gasentnahme (MP 2 - 4) befanden sich jeweils im Abstand von 0,5 m zueinander in unterschiedlichen Tiefen. Ebenfalls in einem Abstand von 0,5 m zur Injektionsstelle befand sich eine Druckmessstelle, wo der Differenzdruck im Boden zur Atmosphäre bestimmt werden konnte. In einer Entfernung von etwa 1,05 m von der Injektionsstelle war auf der Bodenoberfläche eine Box (Abstand Boxmitte – Injektionsstelle 1,6 m) mit einer Fläche von 1 m<sup>2</sup> aufgestellt. In dieser Box konnte ein geringer Unterdruck durch Abpumpen von Luft erzeugt werden. Dadurch war es möglich, eine gerichtete Konvektionsströmung zur Bodenoberfläche zu simulieren. In Abbildung 128 ist die Anordnung der Messstellen am Messort I schematisch dargestellt. Nach der impulsförmigen Tracergasinjektion wurde die Tracergaskonzentration in der freien Atmosphäre und an den verschiedenen Messstellen nacheinander mittels Multiplexer und Tracergasgerät bestimmt. Die Druckmessung erfolgte mit einem digitalen Druckmessgerät. Das eingeleitete Volumen der Luftinjektion wurde mittels Gasuhr ermittelt.

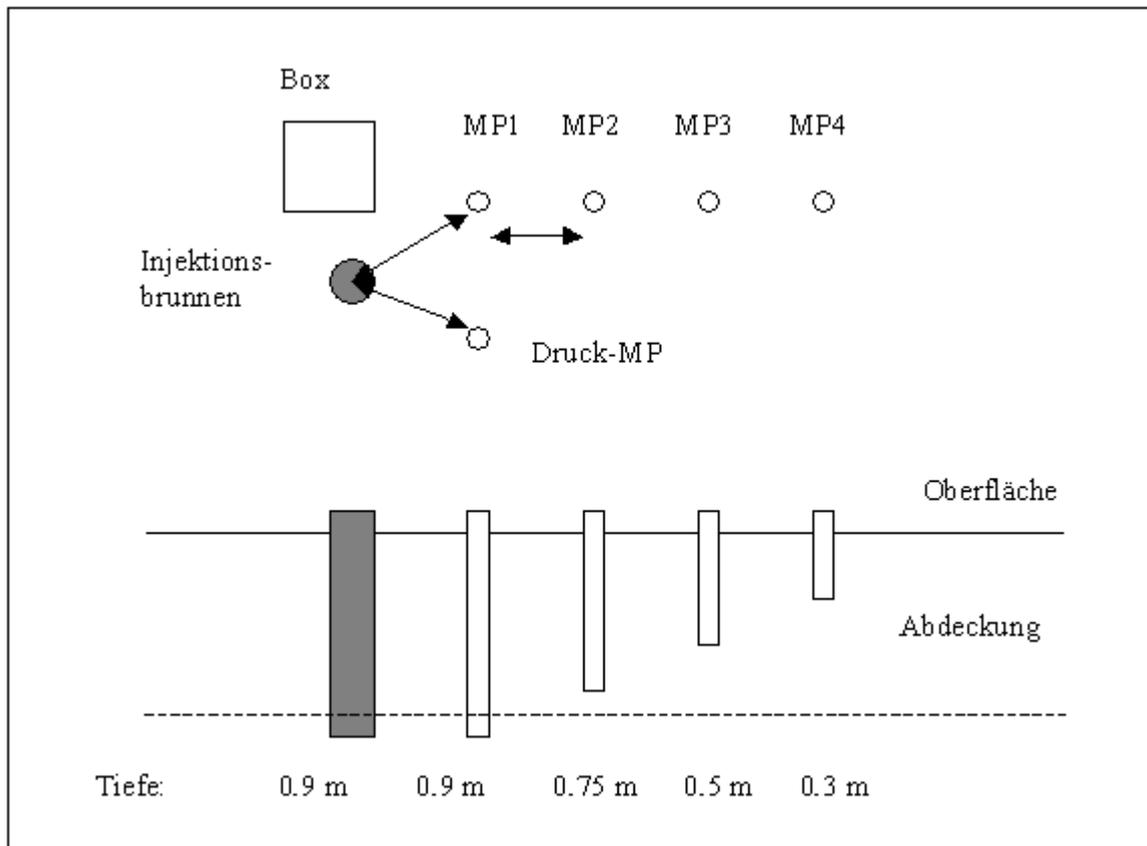


Abbildung 128: Schematische Darstellung des Tracergasversuchs

### 9.3.3.4 Ergebnisse der Tracergasversuche

Das Tracergasexperiment wurde am 02.07.2003 durchgeführt und am 03.07.2003 an einem benachbarten Messort II unter ähnlichen Bedingungen aber geänderten Versuchsregime wiederholt.

#### 9.3.3.4.1 Versuchsablauf am Messort I (02.07.03)

- 12:15 Uhr bis 12:23 Uhr Injektion von SF<sub>6</sub>, insgesamt 1 l
- 12:25 Uhr Beginn der Luftaufgabe, Volumenstrom: 1 l/min,

### 186 Pa Überdruck bei Luftaufgabe

- 15:25 Uhr Unterdruck an Box: - 2 Pa
- 15:30 Uhr Erhöhung des Volumenstromes der Luft auf 3 l/min
- 17:08 Uhr Unterdruck an Box: - 3Pa

Aus Abbildung 129 ist ersichtlich, dass das Tracergas in der Tailingschicht in etwa 1 h eine Wegstrecke von mehr als 0,5 m zurückgelegt hat bis die Sättigungskonzentration erreicht war. Das entspricht einer Abstandsgeschwindigkeit von etwa  $1,4 \cdot 10^{-4}$  m/s. In der Tailingschicht stellte sich eine konstante Tracergaskonzentration ein. Erst die Erhöhung des Volumenstroms von Frischluft an der Gasaufgabestelle führte zu einer Reduzierung der Tracergaskonzentration in der Tailingschicht (Verdünnungseffekt).



dünnungseffekt).

Abbildung 129: Tracergasausbreitung von der Injektionsstelle bis zur Messstelle in den Tailings in 0,5 m Abstand

Am Messpunkt 2 (etwa 1 m entfernt von der Gasaufgabe in 0,75 m Tiefe) wurde die Tracergaskonzentration zeitlich verzögert registriert (s. Abbildung 130). Die Konzentrationen waren erwartungsgemäß deutlich geringer. Nach etwa 1 h beginnt die Konzentration kontinuierlich anzusteigen. Die Erhöhung des Volumenstromes an der Injektionsstelle führte zu einem schnelleren Anstieg der Tracergaskonzentration. Nach etwa 4 h ist die maximale Tracergaskonzentration erreicht.

Die Zeitabhängigkeit der Tracergaskonzentration am Messpunkt 3 ist in Abbildung 131 dargestellt. Die maximale Tracergaskonzentration stellt sich erst nach mehr als 4 h ein, nachdem der Volumenstrom der Luft an der Gasaufgabestelle erhöht wurde. Die Abstandsgeschwindigkeit liegt damit ebenfalls in der Größenordnung von  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s.

Der künstlich aufgeprägter Volumenstrom an der Gasaufgabestelle erzeugte in einem Abstand von 0,5 m (Druckmesspunkt) einen Differenzdruck von etwa 27 Pa.



Abbildung 130: Tracergasausbreitung bis zur Messstelle 2 in 0,75 m Tiefe in der Abdeckung

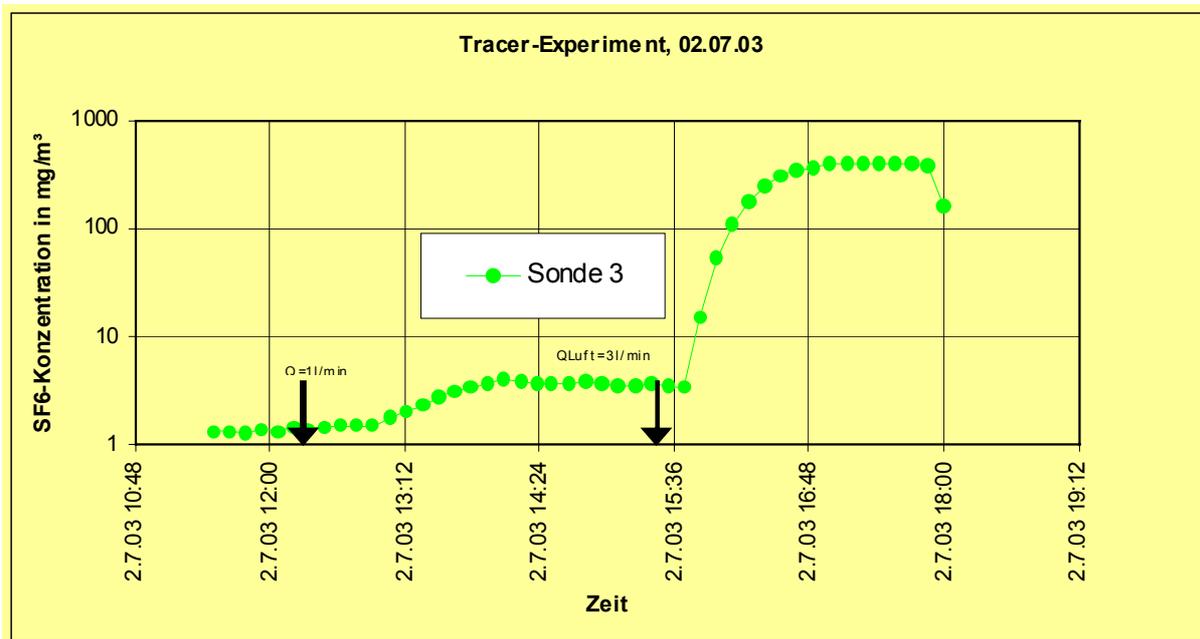


Abbildung 131: Tracergasausbreitung bis zur Messstelle 3 in der Abdeckung in 0,5 m Tiefe



Abbildung 132: Zeitabhängigkeit der Tracergaskonzentration in der Box auf der Abdeckung

Die Zeitabhängigkeit der Tracergaskonzentration in der Box auf der Abdeckung ist in der Abbildung 132 dargestellt. Aus diesem Ergebnis geht hervor, dass das Tracergas maximal 4 h 20 min benötigt, um von der Tailingsschicht in 0,9 m Tiefe an die Oberfläche der Abdeckung zu gelangen. Das entspricht etwa einer Abstandsgeschwindigkeit von  $0,6 \cdot 10^{-4}$  m/s.

Es ergab sich damit eindeutig, dass selbst bei relativ geringen Druckdifferenzen infolge der Heterogenität der Abdeckung in Verbindung mit der vorhandenen Durchwurzelung ein konvektiver Radontransport durch die Abdeckung hindurch stattfinden kann. Die Zeitabhängigkeit der Tracergaskonzentration an den einzelnen Messstellen und ihre Reaktion auf die Veränderung des Volumenstromes bzw. Druck durch Luftzufuhr kann über einen Diffusionsprozess nicht erklärt werden.

#### 9.3.3.4.2 Versuchsablauf am Messort II (03.07.03)

- Tracergasaufgabe: 11:30 Uhr bis 11:35 Uhr 1 l SF<sub>6</sub>,  
in Luftvolumenstrom von 1 l/min
- Erhöhung Luftvolumenstrom: 11:40 Uhr 30 l/min, Diff.-Druck 17 Pa  
11:43 Uhr 20 l/min  
11:49 Uhr 10 l/min, Diff.-Druck 10 Pa
- Unterdruck an Box: 11:35 Uhr-17 Pa  
12:35 Uhr 0 Pa  
13:37 Uh - 13 Pa  
13:52 Uhr 0 Pa

- Versuchsende: 14:42 Uhr

Die gemessene Zeitabhängigkeit der Tracergaskonzentration an den verschiedenen Messstellen ist in der Abbildung 133 dargestellt. Das Ende der Tracergasaufgabe (11:35 Uhr) ist markiert. Aus der Abbildung geht hervor, dass in wenigen Minuten das Tracergas eine Strecke von 0,5 m in den Tailings bis zur Messstelle 1 zurückgelegt hat. Die Tracergaskonzentration wird durch den vergrößerten Volumenstrom an Frischluft, die nach dem kurzzeitigen Tracergasimpuls an der Aufgabestelle eingeleitet wurde, kontinuierlich verdünnt. Es erfolgt durch die nachströmende Luft eine Verteilung des Tracergases in den Poren der Tailings und der Abdeckung. Nach etwa 10 Minuten erreicht das Tracergas (Maximalkonzentration) die Sonde 2. Das entspricht einer Abstandsgeschwindigkeit von etwa  $1,7 \cdot 10^{-3}$  m/s. Die Sonde 3 befand sich etwa in 1,5 m Entfernung von der Tracergasaufgabestelle. Hier wurde der Konzentrationsanstieg nach etwa 15 Minuten (Erreichen einer relativ konstanten Konzentration) festgestellt. Die Abstandsgeschwindigkeit hat sich somit nicht signifikant geändert.

Selbst in der Box auf der Oberfläche der Abdeckung kommt das Tracergas nach etwa 1 h 10 min an. Das entspricht einer Abstandsgeschwindigkeit von  $2 \cdot 10^{-4}$  m/s. Die Konzentration ist jedoch um mehr als den Faktor 10 geringer als in der Tailingschicht. Die transportierte Luftmenge ist also relativ gering.

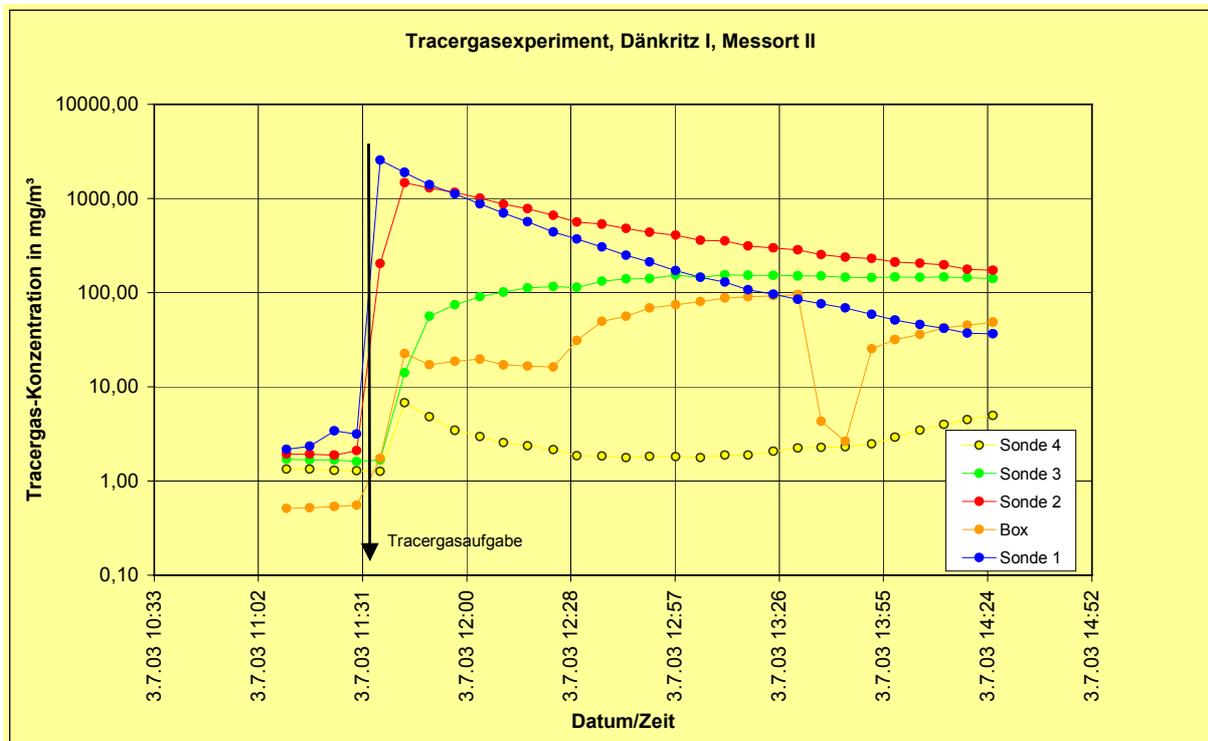


Abbildung 133: Zeitliche Veränderung der Tracergaskonzentration an den verschiedenen Messstellen nach der Tracergasaufgabe

Das qualitativ andere Verhalten der gemessenen Tracergaskonzentration am Messort II im Vergleich zum Messort I ist wesentlich auf die veränderten Versuchsbedingungen zurückzuführen. Das Tracergas wurde an der Gasaufgabestelle durch einen größeren Volumenstrom an Luft verdünnt. Infolge des vergrößerten Volumenstromes stellte sich in der Abdeckschicht auch ein größerer, messbarer Druckgradient ein. Die gemessenen Zeitabhängigkeiten der Tracergaskonzentration lassen sich nicht mit einem Modell des diffusiven Gastransportes in der Bodenluft beschreiben.

Ungeachtet der Schwierigkeiten bei der exakten Quantifizierung des Tracergasexperimentes durch eine modellhafte Beschreibung kann aus den experimentellen Ergeb-

nissen die **weitreichende Schlussfolgerung** gezogen werden, dass in der Abdeckung bei Druckdifferenzen von wenigen Pa ein Konvektionsstrom der Bodenluft von den Tailings durch die Abdeckung an die Oberfläche der Abdeckung stattfindet. Dieser schnelle Gastransport kann nur in Grobporensystemen stattfinden.

Wird von einer laborativ bestimmten Permeabilität des Bodens in der Größenordnung von  $10^{-11}$  m<sup>2</sup> ausgegangen und ein Druckgradient von etwa 10 Pa/m angenommen, so würde sich eine Transportgeschwindigkeit für das Tracergas in der Größenordnung von  $10^{-5}$  m/s ergeben. Das sind einige cm/h. Hieraus ergibt sich, dass die Transportgeschwindigkeit des Tracergases eher durch den konvektiven Transport in Grobporensystemen bestimmt wird.

Luftdruckschwankungen infolge von Temperaturänderungen in der freien Atmosphäre liegen in der Größenordnung von wenigen Pa. Im Jahresmittel werden gewöhnlich Luftdruckdifferenzen von etwa 500 Pa infolge der Änderungen der Wetterlage beobachtet. Unter Berücksichtigung der Transportgeschwindigkeit des Tracergases in der Abdeckung bei vergleichbaren Druckdifferenzen bzw. Druckgradienten kann geschlossen werden, dass der konvektive Transport von Radon durch die Altdeckung in wenigen Stunden erfolgt. Dies steht grundsätzlich mit den Ergebnissen der Bleispurbestimmung in Übereinstimmung.

Parallel zu den Tracergasversuchen wurde mittels Boxmethode die Rn-Exhalation gemessen. Dies erfolgte mit einer Box, die einen Durchmesser von 0,83 m und eine Höhe von 0,29 m hatte. Zunächst stellte sich ein konstanter Anstieg der Rn-Konzentration in der Box ein. Durch Abpumpen der Luft aus der Box mit einem Volumenstrom von etwa 150 l/min wurde gegenüber der Atmosphäre ein Unterdruck von 2 Pa erzeugt. Trotz erhöhtem Luftaustausch durch Undichtigkeiten auch mit der Atmosphäre (Verdünnungseffekt) kam es infolge des Unterdruckes zu einer erhöhten Rn-Freisetzung aus der Oberfläche der Abdeckung. Es wurde ein Konvektionsstrom von radonhaltiger Bodenluft in die Box hervorgerufen. Die Zeitabhängigkeit der Rn-Konzentration in der Box ist in Abbildung... dargestellt. Während des Absaugens der Luft erhöhte sich die Konzentration anstatt durch die Verdünnung mit der Außenluft abzunehmen.

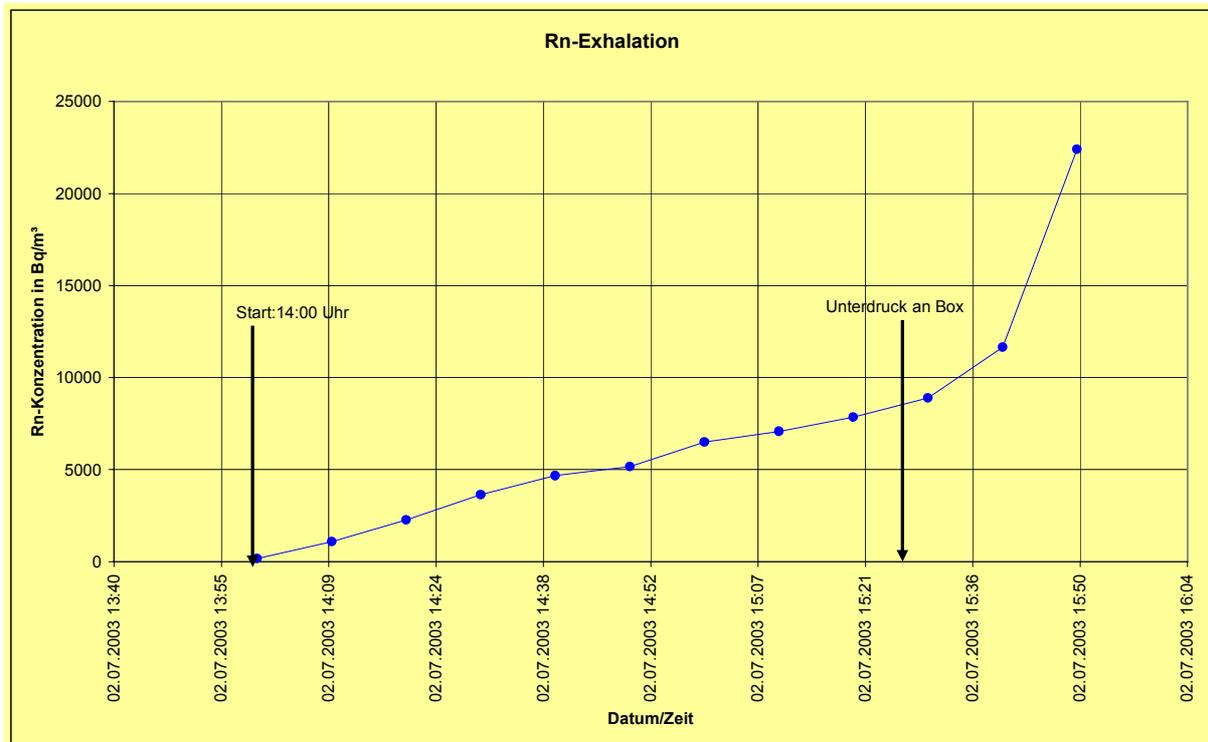


Abbildung 134: Zeitabhängigkeit der Rn-Konzentration bei einer Rn-Exhalationsmessung mittels Boxmethode vor und nach Anlegen eines Unterdruckes

### 9.3.4 Schlußfolgerung aus den Tracergasversuchen

Ausgehend von dem obigen Modellbeispiel, das mit aktuellen Meßwerten des Tracer-Versuchs auf der Halde 124 unterlegt wurde, kann folgende Schlußfolgerung gezogen werden. Bei verhältnismäßig großer Konvektion spielt die Länge des Konvektionswegs (Höhe der Halde) eine entscheidende Rolle. Falls die im Zeitraum von ca. 12 Stunden durchströmte Länge größer ist als die der Halde, ist die Endlichkeit des Konvektionswegs zu berücksichtigen. Die daraus abgeleitete kritische Konvektionsgeschwindigkeit ist in Abhängigkeit von der Länge L in der Abbildung 135 dargestellt.

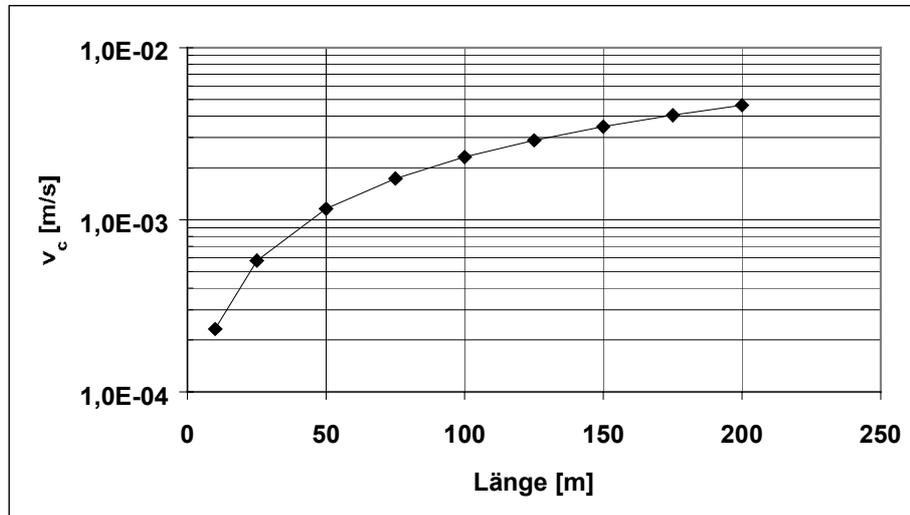


Abbildung 135: Kritische Konvektionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Haldehöhe

Daraus folgt, dass bei Halden von  $L < 50$  m die kritische Konvektionsgeschwindigkeit im Bereich von  $< 10^{-3}$  m/s liegt. Halden, die diesem Konvektionsregime unterliegen, zeichnen sich dadurch aus, dass die Exhalationsrate einem Maximalwert zustrebt und dass die Radonkonzentration im Haldenkörper bereits durch die Zufuhr von Frischluft stark beeinflusst wird. In dem Zusammenhang ist zu prüfen, inwieweit die Zufuhr von kalter Luft die Innentemperatur im Haldenkörper verringert und auf diese Weise der durch Temperaturunterschiede bedingten Konvektion entgegenwirkt.

Des Weiteren kann geschlossen werden:

- Ab einer bestimmten Konvektionsgeschwindigkeit kann nur noch soviel Radon abgeführt werden, wie produziert wird.
- Es existiert eine maximale Exhalationsrate für eine Halde mit endlicher Ausdehnung.
- Die maximal erreichbare Exhalationsrate wird durch die Radonquellstärke und Konvektionslänge bestimmt und nicht durch die Konvektionsgeschwindigkeit.

- Infolge der Kluftstruktur in bestimmten Bereichen von Bergbauhalden findet ein relativ schneller Radontransport statt. Dieser "schnelle" Radontransport findet in kluftartigen "Röhren" statt, die sich bereits während der Schüttung herausgebildet haben (stark verzweigtes, teils chaotisches "bronchialähnliches System").
- Dem ist ein langsamer Radontransport im Porenraum überlagert.
- Die Gesamtradonfreisetzung der Halden wird durch die jeweiligen Anteile (Kluft- und Porenraum) des konvektiven Radontransports bestimmt.

Die Tracergasexperimente im Dammbereich der IAA Dänkriz haben gezeigt, dass in der Abdeckschicht bei Druckdifferenzen von wenigen Pa ein Konvektionsstrom der Bodenluft von den Tailings durch die Abdeckung an die Oberfläche der Abdeckung stattfindet. Es wurden Konvektionsgeschwindigkeiten von  $< 10^{-4}$  m/s gemessen. Aus den experimentellen Ergebnissen kann die Schlussfolgerung gezogen werden, daß ein schneller Gastransport im Grobporensystem der etwa 1 m mächtigen Abdeckung stattfindet. Dies ist auch anhand weiterer Untersuchungsergebnisse belegt worden (s. Abschnitt 9.1.8).

Somit kann zusammenfassend festgestellt werden, dass am Beispiel der Altabdeckung auf dem Außendamm der IAA Dänkriz I infolge einer starken Durchwurzelung und vorhandener Materialinhomogenitäten (relativ hoher Kiesanteil) ein konvektiver Transport der Bodenluft und damit der Rn-Freisetzung dominiert. Durch wenige stichprobenartige Rn-Exhalationsmessungen kann dieses Verhalten nicht zweifelsfrei bestimmt werden. Die Bleispurmethode zeigte, dass sich über einige Jahrzehnte eine Bleispur entwickelt hat, die eindeutig auf das Vorhandensein von konvektiven Prozessen hinweist. Mit der Tracergasmethode wurde nachgewiesen, daß es bei der untersuchten Abdeckung bei wenigen Pa Druckdifferenz zu einem schnellen Gastransport im Grobporensystem kommt. Inwieweit dies auch auf andere Abdeckungen zutrifft, muß durch entsprechende Untersuchungen geprüft werden.

Eine ins Auge zu fassende weitere Möglichkeit der Quantifizierung von Radonaustrittspfaden könnte sich durch einen Einsatz von Infrarotaufnahmen ergeben. Konvektionsgeschwindigkeiten von  $> 10E-4$  m/s sind nur in Grobporen- und Kluftsystemen möglich. Solche Systeme können sich z.B. im Ergebnis der Haldenschüttung herausbilden, wobei sich infolge von Aggregationsprozessen nach dem Abkippen die größeren Steine an den Haldenfüßen ansammeln. Diese bilden dann natürliche Austrittsstellen für die durch Konvektion bewegte radonhaltige Haldenluft. Solche Stellen können im Sommer an Haldenfüßen durch Messung der Bodentemperatur oder durch den Pflanzenbewuchs (Moose) ausgemacht werden.

Die aus der Halde ausströmende Luft ist am Haldenfuß immer deutlich kühler als die Luft der umgebenden Atmosphäre (s. [39]). Typische Werte für die Luft im Haldenkörper sind 8 - 15 °C. An sehr heißen Sommertagen kann somit der Temperaturunterschied am Austrittsort der Haldenluft 20 °C und mehr betragen. Um diese lokal ausströmende Haldenluft nachweisen zu können, wurde erstmals in diesem Zusammenhang eine Wärmekamera eingesetzt. In der Abbildung 136 ist ein kleiner Teil des Haldenfußes der Zentralschachthalde 124 abgebildet. Die Pfeile markieren die beobachteten Austrittsstellen der radonhaltigen Haldenluft. Die Radonkonzentration in der bodennahen Luft überstieg in diesem Areal 10 kBq/m<sup>3</sup>. Deutlich ist zu erkennen, dass im Bereich der Austrittsstellen sich die Temperatur auf ca. 8 - 10 °C abgesenkt hat, während in den umliegenden Stellen die Lufttemperatur von ca. 20 °C erreicht wird. In der Abbildung 137 ist ein weiteres Thermogramm für den Haldenfuß der Halde 124 dargestellt. Es verdeutlicht, dass kalte Haldenluft in einem größeren Bereich aus der Halde austritt. Die Temperaturunterschiede sind deshalb nicht so groß wie in Abbildung 136. Schließlich zeigt die Abbildung 138 eine lokale Austrittsstelle am Fuße der Halde 124. Gut zu sehen ist, dass sich hier die großen Steine infolge der Aggregation abgelagert. Die Temperatur der austretenden Haldenluft liegt bei ca. 10 °C.

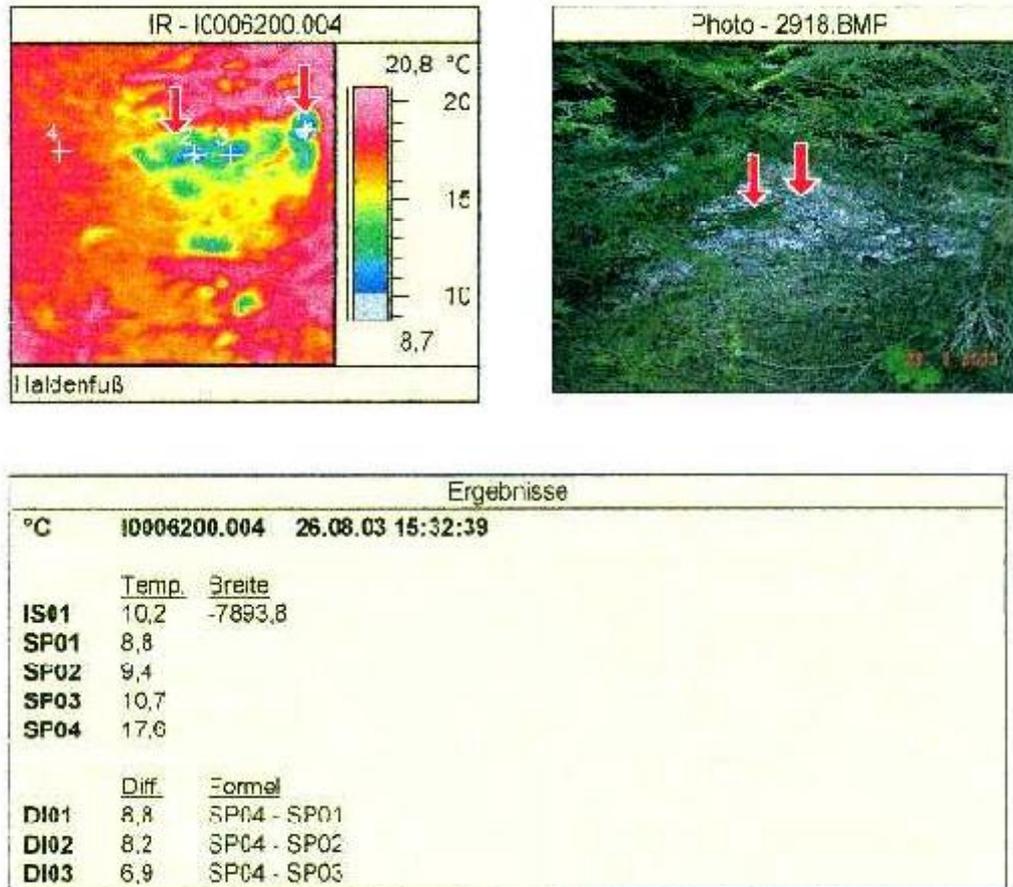


Abbildung 136: Thermogramm von Radonaustrittsstellen der radonhaltigen Luft am Haldenfuß der Zentralschachthalde in Johanngeorgenstadt.

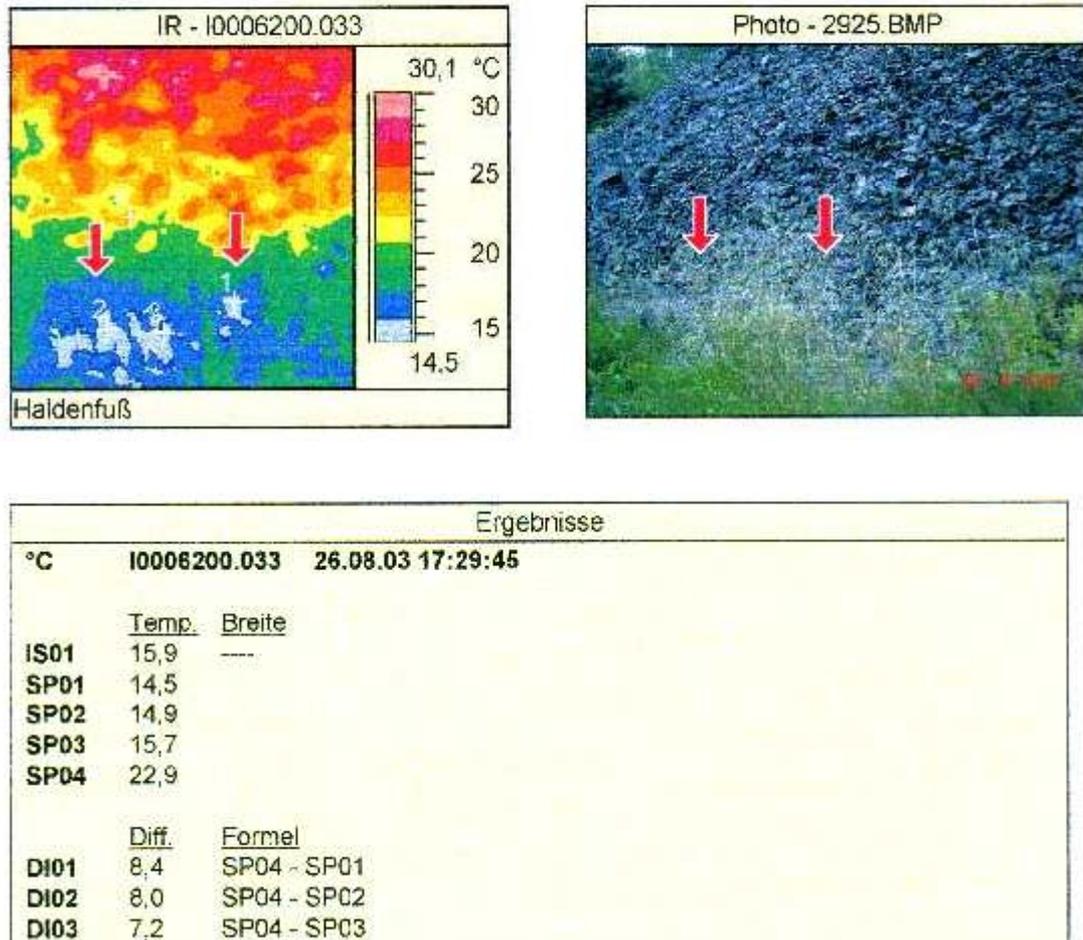


Abbildung 137: Thermogramm von Radonaustrittsstellen der radonhaltigen Luft am Haldenfuß der Halde 124 in Johanngeorgenstadt.

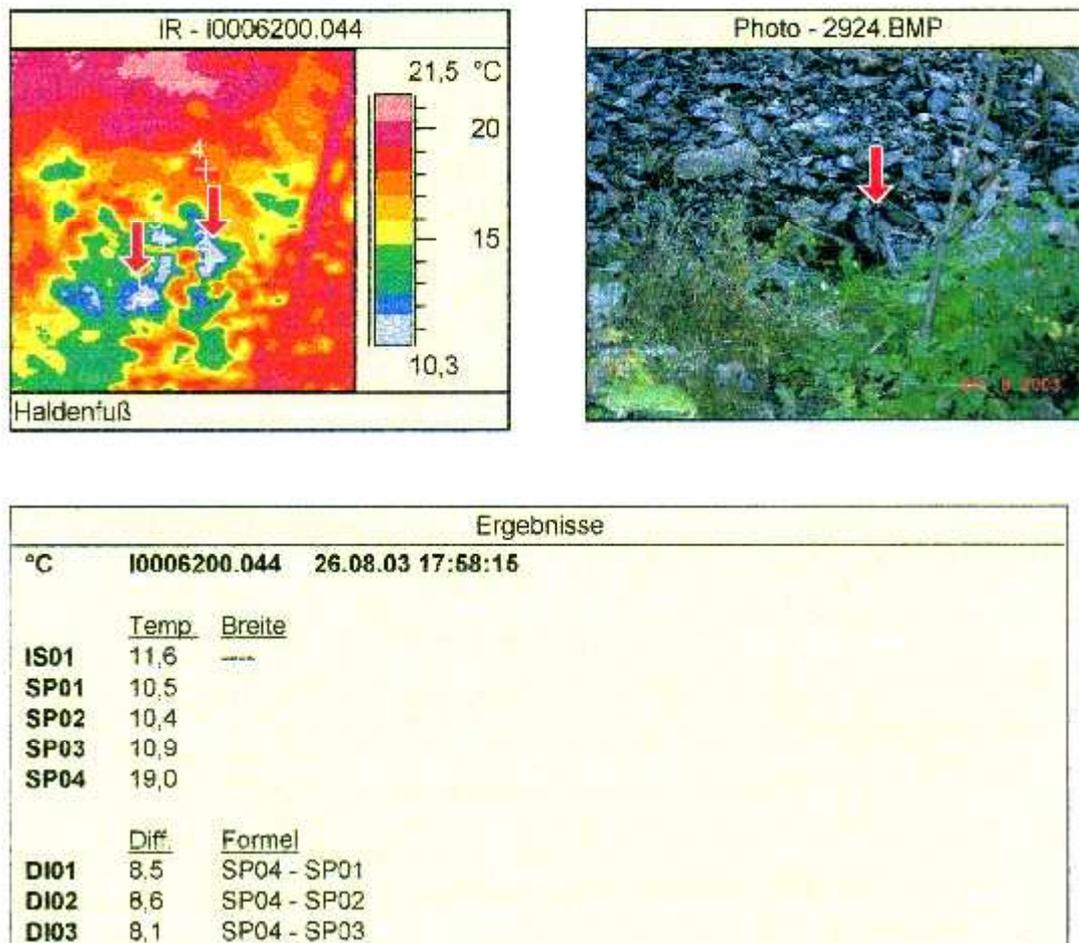


Abbildung 138: Thermogramm von einer sehr lokalen Radonaustrittsstelle der radonhaltigen Luft am Haldenfuß der Halde 124 in Johanngeorgenstadt.

Diese ersten Untersuchungen zeigen, dass möglicherweise potenzielle Möglichkeiten bestehen, durch thermographische Verfahren zusätzliche Informationen über den Radonaustrittspfade zu gewinnen. Diese Verfahren eignen sich insbesondere, um lokal starke Austrittsstellen zu konturieren oder auch abgedeckte Halden zu überwachen. Für den erfolgreichen Einsatz dieser neuen Technik ist jedoch unabdingbar, dass die Hauptmechanismen der Radonfreisetzung der Halde untersucht sind und ein fundiertes Prozessverständnis erreicht ist.

## 9.4 Untersuchung von Kornfraktionen aus ausgewählten Schürfen

### 9.4.1 Vorbemerkung

Im Rahmen des Forschungsprojekts /8/ ist eine erste Siebanalyse einer Bodenprobe mit dem Ziel durchgeführt worden, einen Zusammenhang zwischen der in der Bodenluft gemessenen Radonkonzentration und den bodenphysikalischen Parametern herstellen zu können. Diese Untersuchung war deshalb von Interesse, da auf einer geogenen Fläche mit relativ geringen mittleren spezifischen Ra-226-Aktivitäten im Boden von etwa 60 Bq/kg eine Radonkonzentration in der Bodenluft von bis zu 457 kBq/m<sup>3</sup> in 1 m Tiefe gemessen wurde. Die Auswertung dieser Ergebnisse zeigte, dass bei der Interpretation der Meßwerte sehr differenziert vorgegangen werden muß und dass die Indikation einer hohen Radonkonzentration in der Bodenluft nicht gleichsam bedeutet, dass auch ein hohes Radonrisiko bzw. -potential vorhanden ist.

Die gemessenen erhöhten Radonkonzentrationen sind durch das Zusammenwirken von zwei Haupteffekten bedingt. Zum einen ist die spezifische Ra-226-Aktivität der Feinfraktion 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 führen zu einer lokalen Erhöhung der Radonkonzentration, die mehr als eine Größenordnung betragen kann.

Eine im Boden festgestellte hohe Radonkonzentration bedeutet demnach nicht zwangsläufig, dass global von einem erhöhten Radonpotential auszugehen ist. Wie diese Untersuchungen gezeigt haben, ist die erhöhte Radonkonzentration auch zum großen Teil darauf zurückzuführen, dass der für die Radonausbreitung zur Verfügung stehende Porenraum, auf den die Radonkonzentration in der Bodenluft bezogen ist, durch die Lagerungsverhältnisse lokal stark eingeschränkt sein kann.

Bei Halden ist von einer anderen Situation auszugehen. Im Bergematerial dominieren massenmäßig die grobstückigen Anteile deutlich über den Feianteile, so dass

sich die Frage stellt, wie das mittlere Radonpotential bzw. die Radonquellstärke einer Halde zu bestimmen ist. Des weiteren ist, wie die qualitative Analyse zeigt davon auszugehen, dass infolge der konvektiven Prozesse die spezifische Pb-Aktivität des Feinkornanteils in der Halde deutlich geringer als die spezifische Ra-226-Aktivität ist.

Durch die Konvektion wird das emanierte Radon mehr oder weniger sofort vom Entstehungsort abtransportiert und somit die maximal mögliche negative Bleispur von  $-E \cdot A(\text{Ra-226})$  erreicht. Dies gilt auch für eine gering mächtige Abdeckung, wenn konvektive Prozesse dominieren. In einer Abdeckung ist jedoch der grobstückige Anteil bedeutend geringer.

Um den Einfluß der Konvektion durch zusätzliche Messungen besser quantifizieren zu können, wurden die für einzelne Schürfe in ausgewählten Beprobungshorizonten gewonnenen Proben einer Siebanalyse unterworfen.

#### **9.4.2 Auswertung der Kornfraktionen**

Beispielhaft wurden Siebkornanalysen von Proben aus Schürfen von der Zentralschachthalde sowie der Halde am Schindlerschacht in Schneeberg analysiert. Die Ergebnisse für die Bleispur wurden für die ausgewählten Schürfe im Abschnitt 9.1 diskutiert. Sie zeichnen sich insbesondere dadurch aus, dass über dem gesamten Erkundungsbereich von bis zu ca. 1 m eine deutlich ausgeprägte negative Bleispur beobachtet wurde, wobei die maximal erreichbare negative Bleispur in allen Teufenbereichen nahezu erreicht wurde. Dies ist ein Indiz dafür, dass das gesamte in den Porenraum emanierte Radon durch konvektive Prozesse in die Atmosphäre transportiert wurde. Die Untersuchungen der Kornfraktionen soll deshalb klären, inwieweit dies auch auf den Feinstkornanteil zutrifft und welche Kornfraktionen den Hauptbeitrag zur Gesamtquellstärke einer Halde liefern.

Die Ergebnisse der Sieb- und Radionuklidanalyse werden in den folgenden Abschnitten jeweils in 4 Abbildungen dargestellt. Die Abbildungen, gekennzeichnet mit a), zeigen den Emanationskoeffizienten  $E$  in Abhängigkeit von der Korngröße. Zusätzlich ist ein angenäherter Emanationskoeffizient  $E(\text{Pb-210})$  angegeben, der durch

$$E(\text{Pb} - 210) = \frac{A(\text{Ra} - 226) - A(\text{Pb} - 210)}{A(\text{Ra} - 226)} \quad (37)$$

definiert ist. Aus der Definition für den Emanationskoeffizienten E folgt, dass

$$E \geq E(\text{Pb}-210) \quad (38)$$

gilt.

Falls das gesamte emanierte Radon vom Entstehungsort "abtransportiert" wird und sich kein Radon aus anderen Schichten anlagert, gilt  $E = E(\text{Pb}-210)$ . Durch den Vergleich dieser zwei Größen kann somit eine zusätzliche Information über die Relevanz von konvektiven Prozessen gewonnen werden.

In den Abbildung, gekennzeichnet mit b), sind die spezifischen Aktivitäten von Ra-226 und Pb-210 in Abhängigkeit von der Korngröße aufgetragen. Sie illustriert das Anwachsen der spezifischen Aktivität mit abnehmender Korngröße und quantifiziert somit die Relevanz des Feinstkornanteils an der Radongesamtquellstärke einer Halde.

In der Abbildungen, gekennzeichnet mit c), sind für die einzelnen Kornfraktionen i die Größe

$$\bar{Q}_i = \frac{E_i \cdot A_i(\text{Ra} - 226) \cdot M_i}{M}, \quad (39)$$

dargestellt, die der Radonquellstärke proportional ist und hier als solche bezeichnet wird. Diese Größe ist auf die Gesamtmasse M normiert und zeigt an, welche Kornfraktion den größten Beitrag zur Gesamtquellstärke liefert. Als zweite Größe ist in dieser Abbildung die Kornfraktionsmassenverteilung angegeben.

Schließlich zeigen die Abbildungen, gekennzeichnet mit d), die Ergebnisse für die Quellstärke und die Massenverteilung in kumulativer Darstellung, wobei auf die Gesamtmasse M normiert wurde.

#### **9.4.2.1 Zentralschachthalde Johanngeorgenstadt**

In den Abbildungen 139 und 140 sind für die Schürfe 14 und 15 die Ergebnisse zusammengestellt, die für die Proben aus 30 cm (14\_6, 15\_6) und 35 cm (14\_7) Tiefe erhalten wurden. Für den Schurf 14 sind Proben aus übereinanderliegenden Horizonten untersucht worden, um den Einfluß der sprunghaften Änderung der spezifischen Ra-226-Aktivität besser quantifizieren zu können.

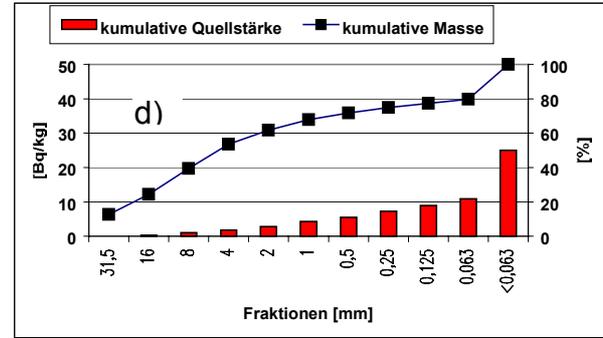
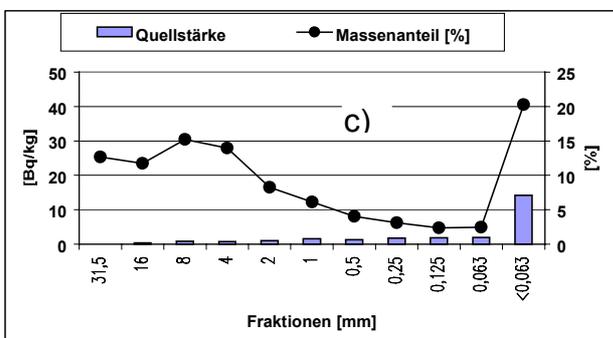
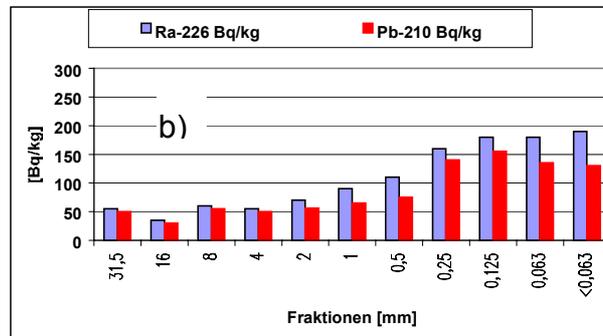
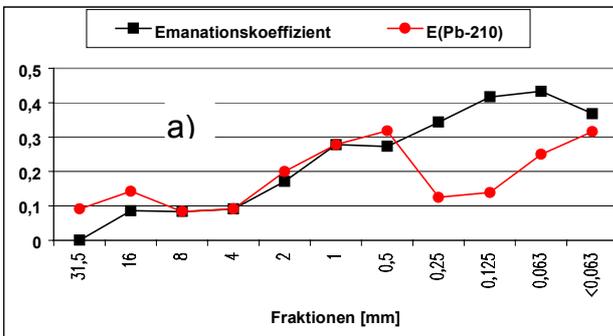
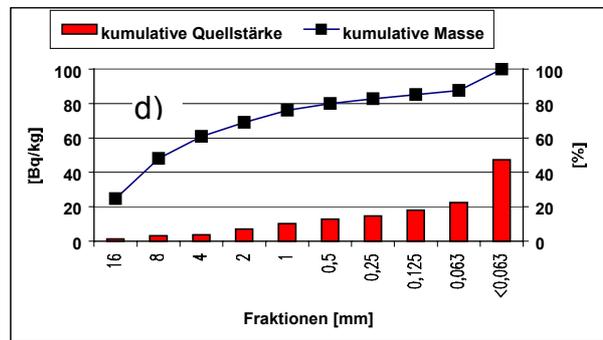
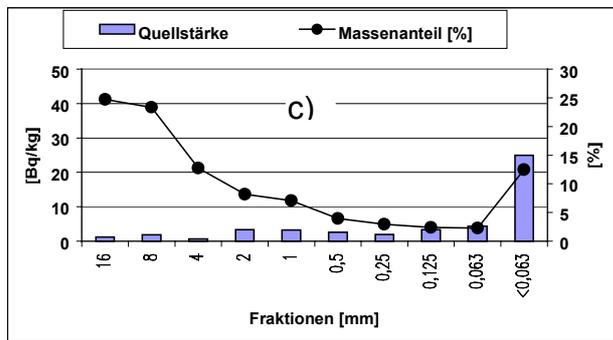
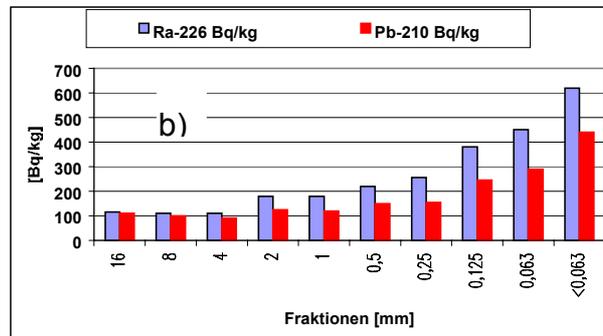
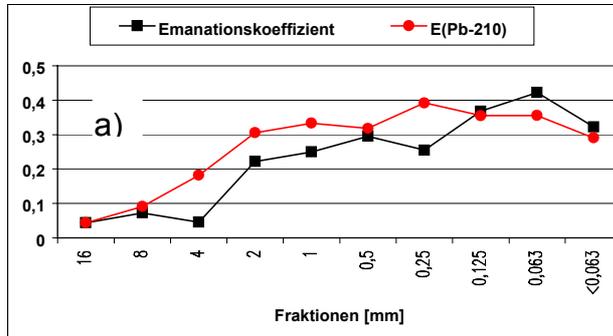


Abbildung 139: Ergebnisse der Siebkornanalyse für die Proben aus den Schürfen 14\_6 (obere 4 Abbildungen) und 14\_7 (untere 4 Abbildungen) vom Haldenplateau der Zentralschachthalde Johanngeorgenstadt.

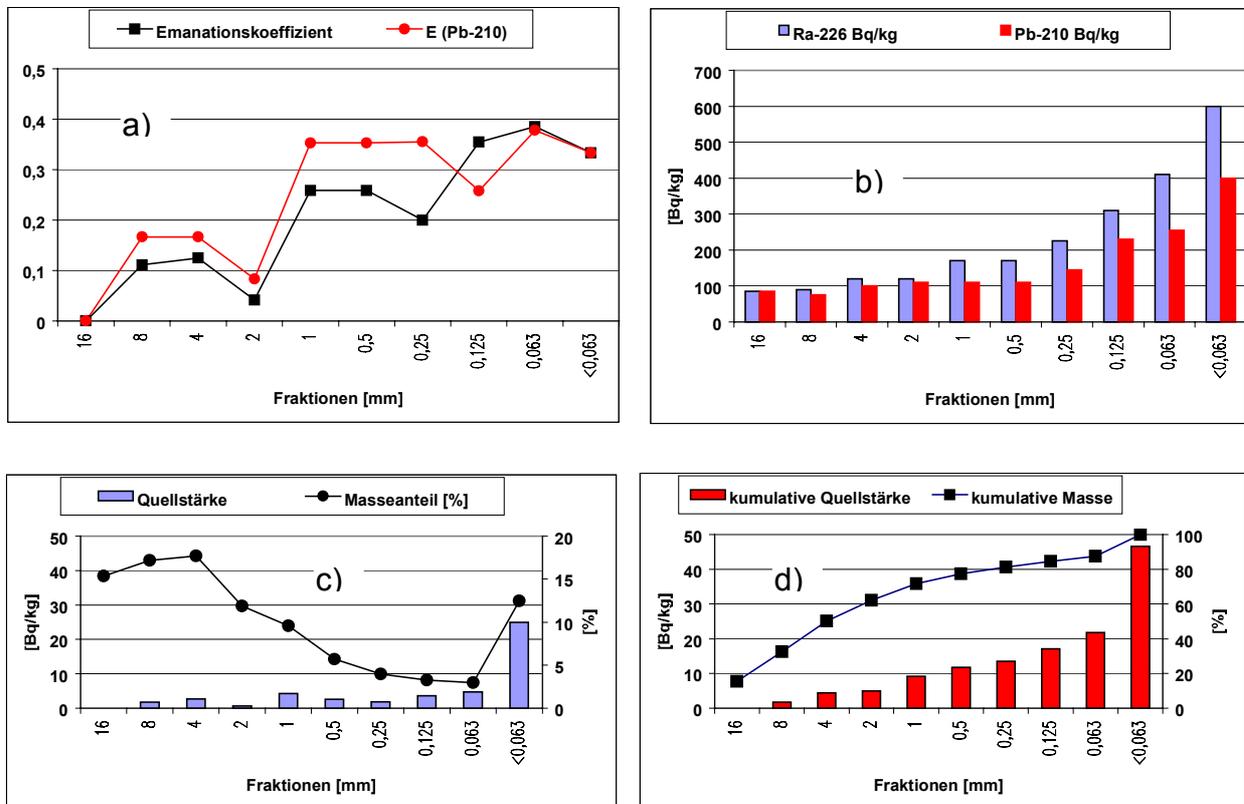


Abbildung 140: Wie Abbildung 139, jedoch für den Schurf 15-6

### Abbildungen a)

Die Emanationskoeffizienten E steigen mit Verringerung der Korngröße deutlich an. Sie sind bis auf wenige Ausnahmen innerhalb der experimentellen Fehler vergleichbar mit der Größe E(Pb-210). Die spezifische Pb-210-Aktivität ist somit in allen Fraktionen teils deutlich geringer als die von Ra-226. Das bedeutet, dass nahezu das gesamte Radon vom Entstehungsort "abtransportiert" worden ist und sich kein Radon aus anderen Schichten, wie es im Kontext einer rein diffusiven Radonmigration zu erwarten wäre, angelagert hat. Dies besagt im Umkehrschluß, dass nur starke konvektive Prozesse zu solch einem Ergebnis führen können.

#### *Abbildungen b)*

Die spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 wächst stetig mit Verringerung der Korngröße an. Gegenüber der größten Fraktion ist eine Aufkonzentrierung bis zu einem Faktor 6 zu erkennen. Diese Aufkonzentrierung der spezifischen Aktivität als Folge der Verwitterung und anderer Fragmentationsprozesse ist ein bekannter Effekt, der dadurch entsteht, dass die Teilung größerer Körner in kleinere vorwiegend an den Korngrenzen, in denen die Schwermetalle eingelagert sind, stattfindet. Auch die Ergebnisse für die Emanationskoeffizienten zeigen, dass in der Tendenz die Emanation mit Verringerung der Korngröße ansteigt. Dieses erwartete Verhalten folgt unmittelbar aus den geometrischen Beziehungen von E in Abhängigkeit von der Korngröße.

#### *Abbildungen c) und d)*

Auffällig ist, dass der Massenanteil der Fraktion  $< 0,063$  mm einen bedeutenden Anteil zur Gesamtmasse M liefert und sein Anteil zur Gesamtradonquellstärke in allen Beispielen deutlich dominiert. Dies kann aus der kumulativen Darstellung für die Quellstärke und die Massenanteile entnommen werden.

Aus diesen Ergebnissen folgt als ein wichtiger Trend, dass die Fraktionen mit Korngrößen  $> 1$  mm ca. 70 - 80 % der Gesamtmasse liefern, jedoch ihr Beitrag zur Gesamtquellstärke mit höchstens 30 % zu veranschlagen ist. Dieser unerwartet hohe Unterschied ist vor allem darauf zurückzuführen, dass der Emanationskoeffizient mit abnehmender Korngröße ansteigt und sich gleichzeitig die spezifische Ra-226-Aktivität deutlich (bis Faktor 6) vergrößert.

Des Weiteren ist wichtig festzuhalten, dass der Beitrag der Fraktion  $< 0,063$  mm zur Gesamtquellstärke in etwa genau so groß ist wie die Summe aller anderen Fraktionen. Dies ist ein Effekt, der in dieser Deutlichkeit noch nicht beschrieben wurde. Deshalb kann die Quellstärke einer Halde nur mit Hilfe von repräsentativen Proben bestimmt werden, wobei die Variation der Emanationskoeffizienten in Abhängigkeit

von der Korngröße und die spezifische Aktivität der einzelnen Massenanteile zwingend zu berücksichtigen sind.

Vergleicht man die Ergebnisse für die Proben 14\_6 und 14\_7 miteinander, so sind die oben beschriebenen Trends für beide Proben nahezu übereinstimmend, obwohl in der Probe 14\_6, die ca. 5 cm oberhalb Probe 14\_7 entnommen wurde, die mittlere spezifische Ra-226-Aktivität deutlich voneinander unterscheiden.

Des Weiteren ist wichtig zu konstatieren, dass die aus allen Fraktionen berechnete mittlere spezifische Aktivität von Ra-226 teils beträchtlich größer als die der größeren Steine ist. Analoges gilt auch für Pb-210. Dieser Unterschied ist dadurch bedingt, dass sich die Verteilung über die Korngrößen über sehr lange Zeiträume eingestellt hat, wobei sich durch unterschiedliche Transportprozesse vor allem feinste Körner mit vergleichsweise höherer spezifischer Aktivität in den Zwischenräumen der größeren Steine abgelagert haben. Das bedeutet, dass diese Kornverteilung einer Bodenprobe nicht derjenigen entspricht, die man aus der Zertrümmerung von großen Steinen erhalten würde.

#### **9.4.2.2 Halde am Schindlerschacht Schneeberg**

In der Abbildung 141 sind die Ergebnisse der Siebkornanalyse für die Proben aus den Schürfen 3\_6 (obere 4 Abbildungen) und 2\_5 (untere 4 Abbildungen) vom Haldenfuß und Mittelhang der Halde am Schindlerschacht in Schneeberg zusammengestellt. Die Beprobungstiefe war 30 bzw. 25 cm. Die Abbildung 142 enthält die entsprechende Ergebnisse für Proben vom Haldenplateau, wobei die oberen 4 Abbildungen für die Probe 1\_7 und die unteren für die Probe 1\_6 sind. Die Beprobungstiefe war 35 bzw. 30 cm, d.h. die Proben stammen aus übereinanderliegenden Schichten.

Die Radionuklidanalyse der Proben über das erkundete Tiefenintervall zeigte, dass auf dieser Halde (Hanganschüttung) starke konvektive Prozesse auftreten. Andernfalls wäre nicht zu erklären, warum die negative Bleispur die maximal möglichen Werte nahezu erreicht.

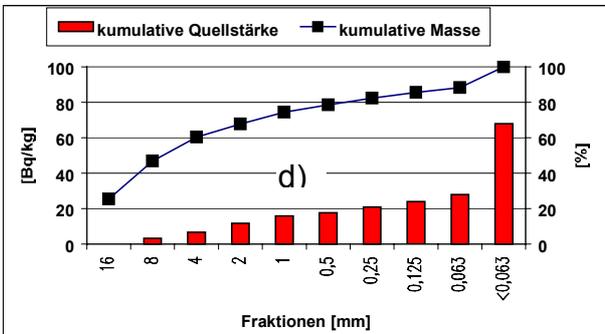
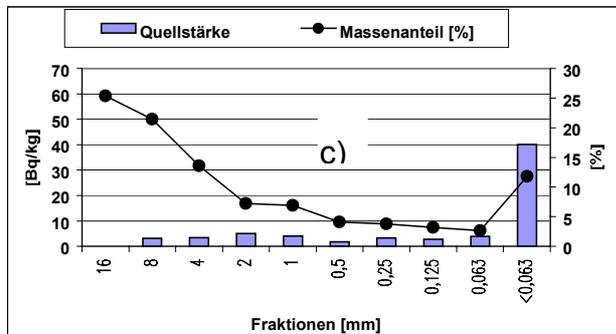
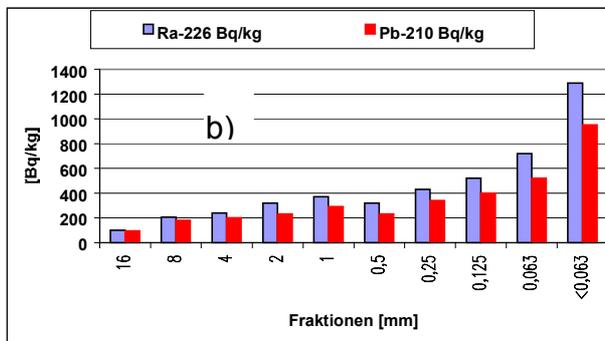
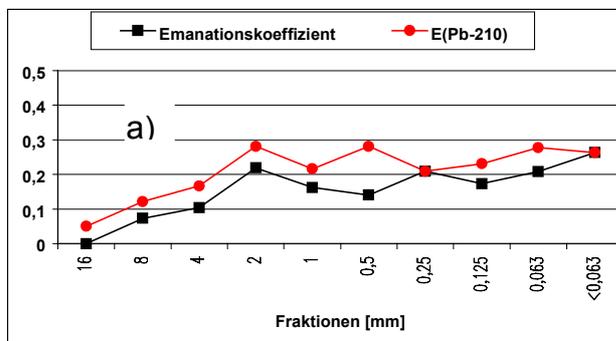
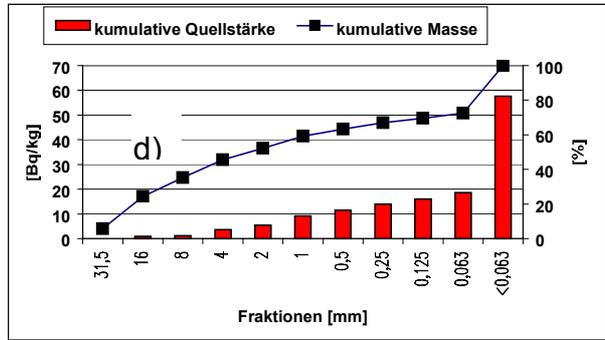
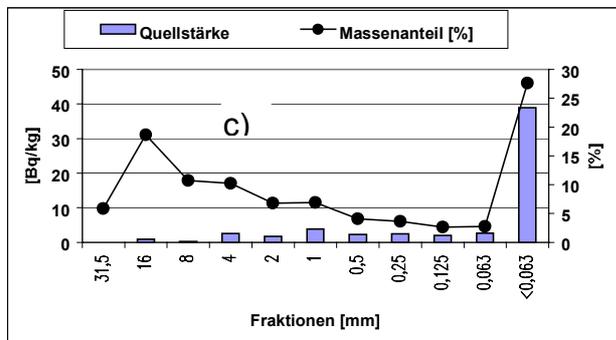
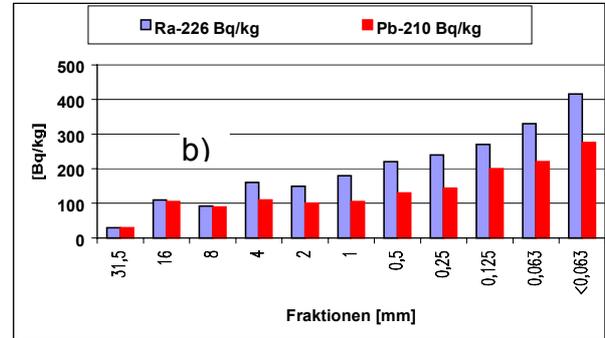
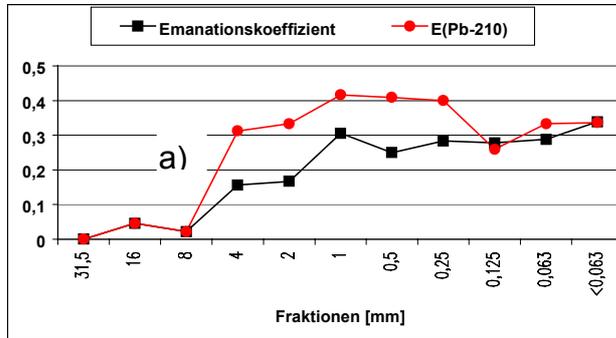


Abbildung 141: Ergebnisse der Siebkornanalyse für die Proben aus den Schürfen 3\_6 (obere 4 Abbildungen) und 2\_5 (untere 4 Abbildungen) vom Haldenfuß und Mittelhang der Halde am Schindlerschacht in Schneeberg

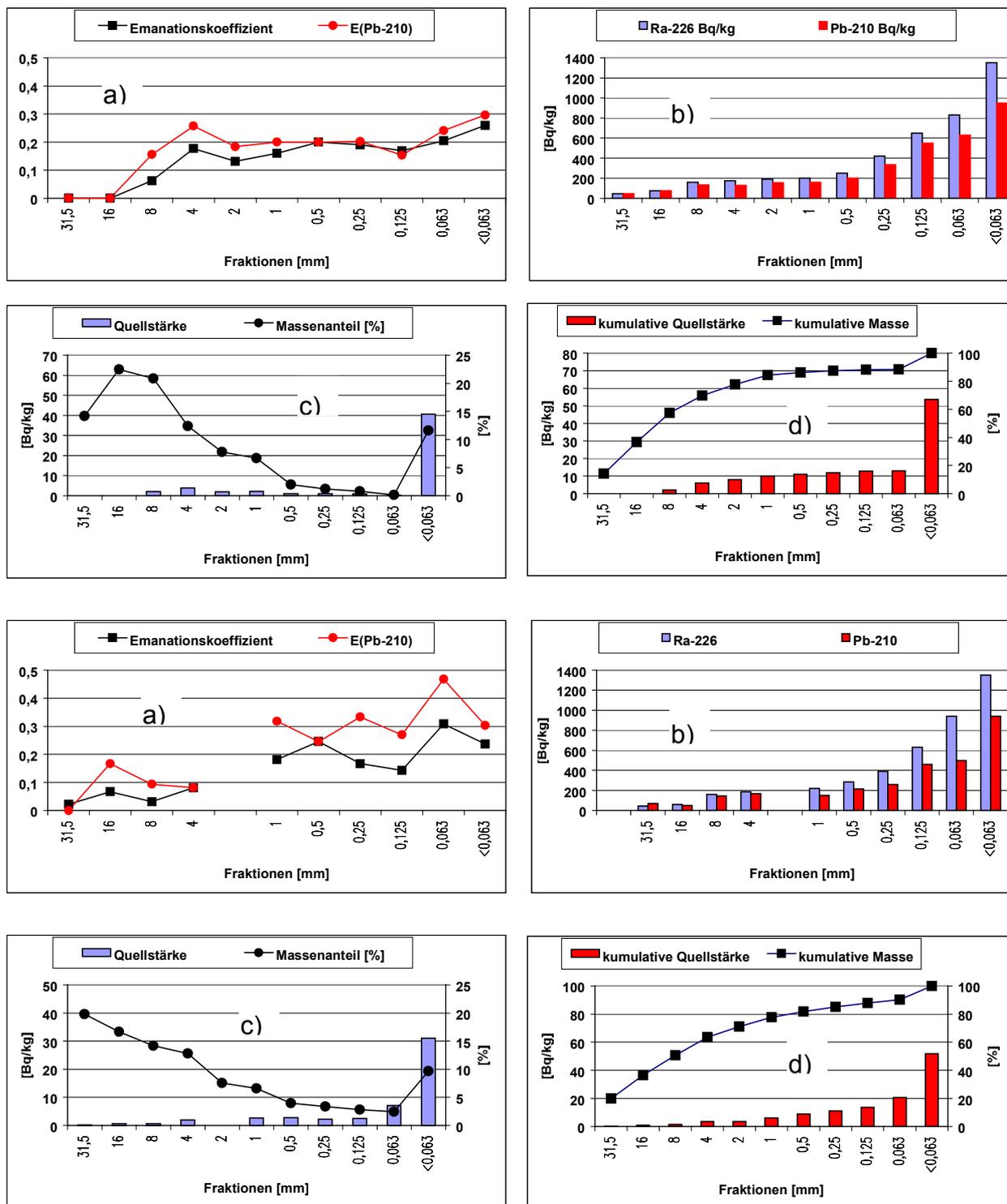


Abbildung 142: Wie Abbildung 141, jedoch für das Haldenplateau. Obere 4 Abbildungen für die Probe 1\_7 untere für die Probe 1\_6

#### *Abbildungen a)*

Die Emanationskoeffizienten E steigen, wie auch bei den Proben von der Zentralschachthalde beobachtet wurde, mit der Verringerung der Korngröße teils deutlich an. Sie sind bis auf wenige Ausnahmen vergleichbar mit der Größe E(Pb-210). Das bedeutet, dass nahezu das gesamte Radon vom Entstehungsort abtransportiert und kein Radon nachgeliefert wurde.

#### *Abbildungen b)*

Die spezifischen Aktivitäten von Ra-226 und Pb-210 steigen annähernd stetig mit Verringerung der Korngröße an. Gegenüber der größten Fraktion ist eine Aufkonzentrierung bis maximal Faktor 30 (vgl. Proben 1\_6 und 1\_7) zu erkennen. Diese Proben stammen vom Haldenplateau. Eine solch hohe Aufkonzentrierung ist bisher nicht beobachtet worden. Sie unterstreicht jedoch, dass bei der Bewertung der Quellstärke einer Halde sehr differenziert vorgegangen werden muß und vor allem der Feinkornanteil zu berücksichtigen ist.

#### *Abbildungen c) und d)*

Bei der Probe 3\_6 ist die Masse des Feinstanteils ( $< 0,063$  mm) größer als der der grobstückigen Anteile. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass Feinkornanteile im Verlauf der Zeit zum Haldenfuß gespült worden. In den anderen Fällen dominiert der grobstückige Anteil teils deutlich. Insgesamt ist auch hier auffällig, dass der Massenanteil der Fraktion  $< 0,063$  mm einen bedeutenden Anteil zur Gesamtmasse M liefert und sein Anteil zur Gesamtquellstärke in allen Beispielen deutlich dominiert.

Aus diesen Ergebnissen folgt ein Trend, der bereits im Abschnitt 9.4.2.1 in Auswertung der Ergebnisse von der Zentralschachthalde diskutiert wurde. Es zeigt sich, dass die Fraktionen mit Korngrößen  $> 1$  mm bis zu etwa 80 % der Gesamtmasse liefern, jedoch ihr Beitrag zur Gesamtquellstärke vergleichsweise geringer ist. Verglichen zu den Ergebnissen von der Zentralschachthalde, ist dieser Trend noch ausgeprägter, da allein die Fraktion  $< 0,063$  mm in einigen Proben bis etwa um den Faktor

3 höhere Beiträge zur Gesamtquellstärke liefert als alle anderen Fraktionen zusammengenommen. Dieser unerwartet hohe Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass vor allem aber die Aufkonzentrierung der spezifischen Aktivität mit kleiner werdender Korngröße erheblich ist (Faktor 30!).

Die Quellstärke einer Halde kann somit nur mit Hilfe von repräsentativen Proben bestimmt werden, wobei die Variation der Emanationskoeffizienten und der spezifischen Ra-226-Aktivität mit der Korngröße die entscheidende Rolle spielt.

#### **9.4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Kornfraktionsuntersuchungen**

Aus den hier vorgestellten Ergebnissen der Radionuklidanalyse von Kornfraktionen aus Proben von zwei Halden aus unterschiedlichen Bereichen (Haldenfuß, Haldenplateau, Mittelhang) können die nachfolgend aufgeführten Schlußfolgerungen gezogen werden.

- Die Emanationskoeffizienten  $E$  steigen mit Verringerung der Korngröße teils deutlich an. Sie sind bis auf wenige Ausnahmen vergleichbar mit der Größe  $E(\text{Pb-210})$ . Die spezifische Pb-210-Aktivität ist somit in allen Fraktionen geringer als die von Ra-226. Das bedeutet, dass nahezu das gesamte Radon vom Entstehungsort abtransportiert wird und sich kein Radon aus anderen Schichten, wie es bei rein diffusiven Radontransportprozessen zu erwarten wäre, angelagert hat. Diese Ergebnisse sind deshalb ein zweifelsfreies Indiz dafür, dass starke konvektive Prozesse den Radontransport dominieren.
- Es zeigt sich, dass die Fraktionen mit Korngrößen  $> 1\text{mm}$  bis zu etwa 80 % der Gesamtmasse liefern. Ihr Beitrag zur Gesamtquellstärke fällt jedoch vergleichsweise gering aus. Dieser Trend ist für die Halde am Schindlerschacht deutlicher ausgeprägt als für die Zentralschachthalde. Allein die Fraktion  $< 0,063\text{ mm}$  liefert in einigen Proben bis etwa um den Faktor 3 höhere Beiträge zur Gesamtquellstärke als alle anderen Fraktionen zusammengenommen.

- Der stark unterschiedliche Beitrag der einzelnen Fraktionen zur Gesamtquellstärke ist darauf zurückzuführen, dass vor allem aber die Aufkonzentrierung der spezifischen Aktivität mit kleiner werdender Korngröße außergewöhnlich hoch ist (Faktor 30!).
- Eine realistische Abschätzung der Quellstärke einer Halde kann nur mit Hilfe von repräsentativen Proben bestimmt werden, wobei die Variation der Emanationskoeffizienten und der spezifischen Ra-226-Aktivitäten mit der Korngröße die entscheidende Rolle spielt.
- Die für gewöhnliche Flächen gewonnenen Erfahrungen hinsichtlich der Berechnung der Radonquellstärke lassen sich auf Halden nur bedingt verallgemeinern, da der Boden im gesamten Haldenkörper seine Konsolidierungsphase nicht erreicht hat, unterschiedlich stark durch Kluft- und Porenleiter geprägt ist und die Radontransportmechanismen durch konvektive Prozesse dominiert werden.
- Da nur bis zu Tiefen von bis 1 m beprobt wurde, beziehen sich die hier aufgezählten Schlußfolgerungen nur auf diesen Teufenbereich, der auch durch die konvektiven Prozesse (wechselseitiger Ein- bzw. Auszug von Frischluft) besonders beeinflusst wird. Falls sich die erhaltenen Resultate auf alle Teufen verallgemeinern lassen, kann damit die Quellstärke einer Halde realistisch abgeschätzt werden. Sie ist demnach der negativen Bleispur der Kornfraktionen  $< 1$  mm direkt proportional. In anderen Worten, dass in diesen Fraktionen festgestellte Defizit an Pb-210 ist der Rn-222-Aktivität proportional, die in die Atmosphäre migriert ist.
- Eine Verallgemeinerung dieser Ergebnisse auf weitere Halden ist zwar naheliegend, doch nicht zwingend. Insbesondere bei Halden, die im Bereich der Haldenfüße sehr grobstückiges Material (Steine mit Durchmessern von 5 cm bis einige 10 cm) aufweisen, sind genauer zu untersuchen. In dem Fall dominiert die Grobfraction deutlich über die Feinfraction, so dass sich die Abhängigkeit der Quellstärke von der Kornfraction qualitativ ändern könnte.

## 9.5 Pflanzcontainerexperiment

Die Ergebnisse des Pflanzcontainerexperimentes sind ausführlich in /14/ enthalten. Im Folgenden werden die wesentlichen Untersuchungsergebnisse zusammengefasst dargestellt.

- Das Pflanzen- und damit auch das Wurzelwachstum blieben aufgrund unterschiedlicher Störeinflüsse (Unwetter, Schädlingsbefall) hinter den Erwartungen zurück. Dies zeigen die Ergebnisse der Bestimmung der Wurzelfeuchtmasse, des Wurzelvolumens (ausgehend von der Wurzelfeuchtmasse) sowie der Wurzel-dichte, die in Anlehnung an /41/ als relativer Anteil des Wurzelvolumens am Bodenvolumen definiert ist. Sie sind in Tabelle 7 dargestellt und zeigen, dass im Vergleich zur im Versuch eingesetzten Masse des Mineralbodens von im Mittel 6,4 kg und des Volumens des Mineralbodens von im Mittel 12 l, die Wurzelmasse als auch das Wurzelvolumen sehr gering sind.

Tabelle 7: Wurzelfeuchtmasse, -volumen und -dichte je Pflanzcontainer

Container-Nr.	Pflanzenart	Wurzelfeuchtmasse	Wurzelvolumen	Wurzel-dichte
		[g]	[ml]	[%]
C1	Sonnenblume	3	4	0,03
C2	Sonnenblume	4,4	7,4	0,12
C3	Dahlien	11,7	16	0,13
C4	Kapuzinerkresse	2,4	4,5	0,04
C5	Kapuzinerkresse	0,3	1,5	0,01
C6	kein Pflanzenwachstum			
C7	Kapuzinerkresse	3,9	6	0,05
C8	Sonnenblume	2,93	4,9	0,08
C9	Dahlien	0,06	0,5	0,004
C10	Kapuzinerkresse	10,48	15,5	0,13

- Die in die Pflanzcontainern eingesäten Pflanzen haben vorwiegend ein lockeres Wurzelgeflecht aus Fein- und Feinstwurzeln mit Wurzeldurchmessern von < 2mm gebildet haben (vgl. beispielhaft Abbildung 143 und Abbildung 144).



Abbildung 143: Wurzeln aus C8



Abbildung 144: Wurzeln aus C10

- Die gemessenen Exhalationsraten überstreichen einen Bereich von 0,004 Bq/m<sup>2</sup>s (Pflanzcontainer 5 im August 2002) bis 0,081 Bq/m<sup>2</sup>s (Pflanzcontainer 4 im November 2002). Sie liegen im Mittel bei 0,04 Bq/m<sup>2</sup>s (vgl. Abbildung 148). Dies entspricht einem Anstieg der Radonkonzentration im Messgefäß auf ca. 200 Bq/m<sup>3</sup> innerhalb von 1 h Messung. Dies ist beispielhaft für die Exhalationsmessung am Pflanzcontainer C2 im März 2002 in Abbildung 145 illustriert. Die spezifische Aktivität der Tailings im unteren Teil der Pflanzcontainer variierte zwischen 3 und 4 Bq/g.

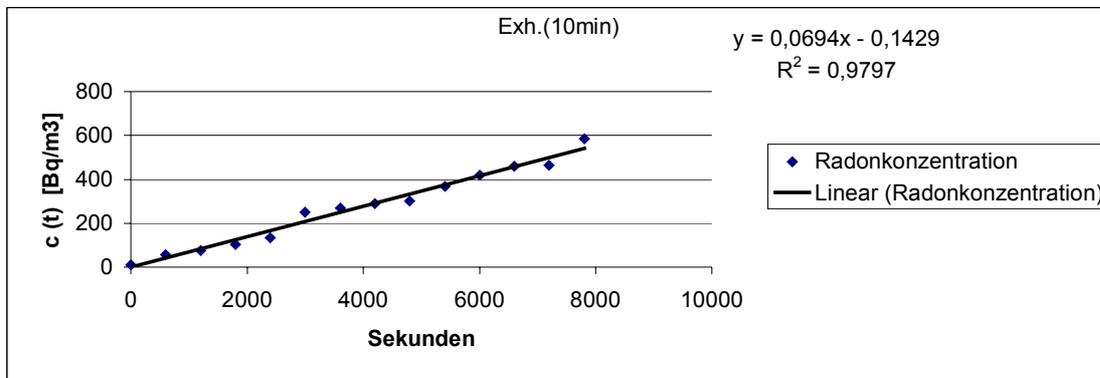


Abbildung 145: Anstieg der Radonkonzentration  $c(t)$  während der Exhalationsmessung am Kübel C2 im März 2002

Die Exhalationsraten sind in Abbildung 146 zusammenfassend für alle auswertbaren Pflanzcontainer graphisch dargestellt.

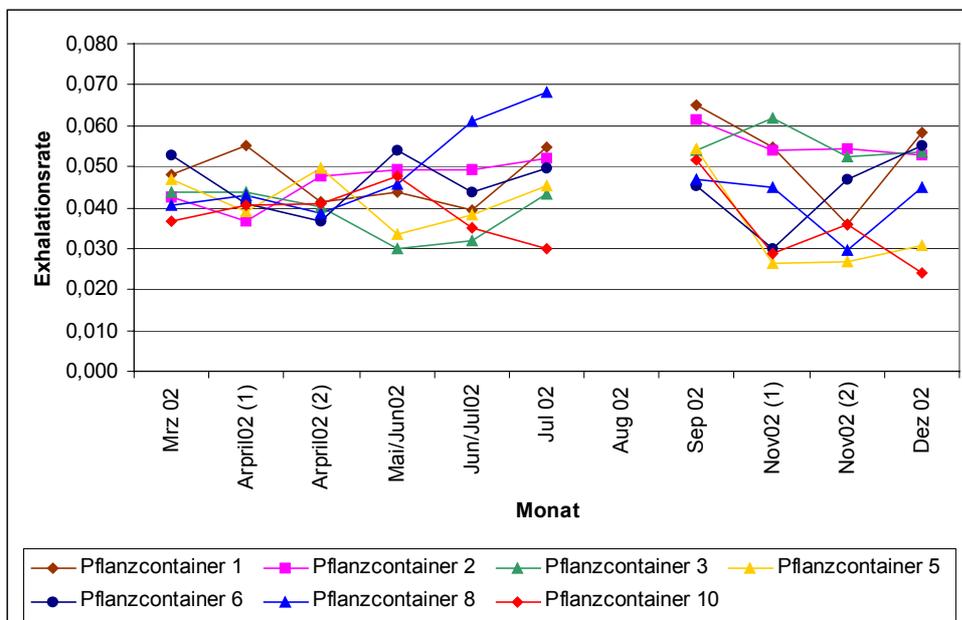


Abbildung 146: Je Pflanzcontainer gemessene Exhalationsraten in  $Bq/(m^2 s)$

Nicht in die Darstellung aufgenommen wurden dabei die Messwerte vom August 2002, die aufgrund der hohen Wassersättigung in den Pflanzcontainern den Minimalwerten der gemessenen Exhalationsraten entsprechen. Abbildung 146 zeigt, dass bereits im darauffolgenden Monat das ursprüngliche Niveau der Exhalationsraten in den Pflanzcontainern erreicht wurde. Die Exhalationsraten für Pflanzcontainer gleicher eingesäter Pflanzenart zeigen einen ähnlichen Trend (vgl. dazu beispielhaft Abbildung 147).

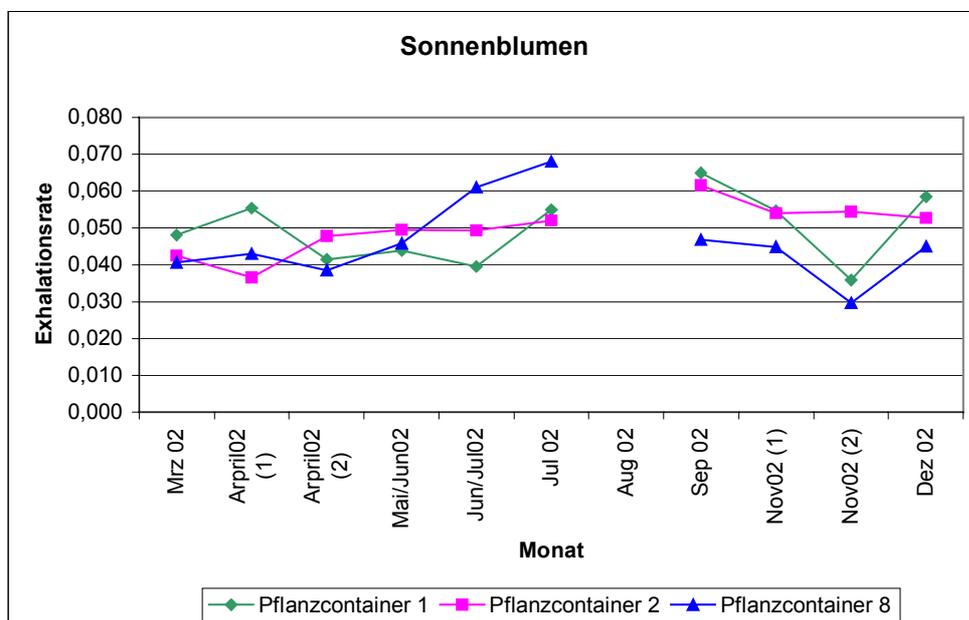


Abbildung 147: Exhalationsraten der Pflanzcontainer mit Sonnenblumen - gutes Pflanzenwachstum

In Abbildung 148 sind die Mittelwerte der Exhalationsraten aller Pflanzcontainer gleicher Bepflanzung über die Zeitdauer des Experimentes dargestellt. Es zeigt sich, dass bei den Pflanzcontainern mit Sonnenblumen ein Anstieg der Exhalationsrate mit zunehmender Entwicklung der Pflanzen (Mai bis Juli) zu verzeichnen ist.

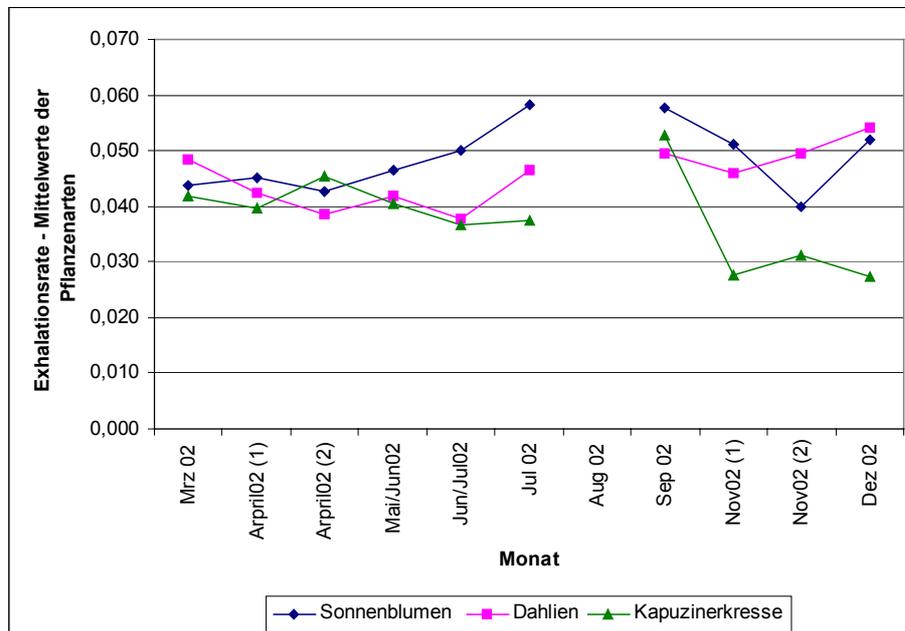


Abbildung 148: Monatliche Mittelwerte der Exhalationsraten aller Pflanzcontainer gleicher Bepflanzung

- Die Ergebnisse der die Exhalationsmessungen begleitenden Wägung der Pflanzcontainer ist in Abbildung 149 dargestellt. Sie zeigt die relative Änderung der Bodenfeuchte über den Versuchszeitraum. Die Messwerte von August 2002 (nach dem Starkregenereignis) blieben in der Darstellung unberücksichtigt, ebenso wie die Daten der nicht auswertbaren Pflanzcontainer (C4, C7). Aus Abbildung 149 ist ersichtlich, dass alle Pflanzcontainer hinsichtlich der Änderung der Bodenfeuchte dem gleichen Trend unterliegen. Die Bodenfeuchte sank im Zeitraum von März bis Ende April in allen Pflanzcontainern. Dies ist durch die in diesem Zeitraum stattfindende Verdunstung (noch keine Einsaat und demzufolge auch keine Befeuchtung der Pflanzcontainer) begründet. Von Mai bis Juli stieg die Bodenfeuchte in den Pflanzcontainern durch die mit der Einsaat beginnende dosierte Befeuchtung und das gute Wasserretentionsvermögen des Mineralbodens deutlich an. Nach dem Ende der Vegetationsperiode im Oktober/November und damit der Beendigung der

Befeuchtung der Pflanzcontainer ist erneut der Trend der Verminderung der Bodenfeuchte erkennbar.

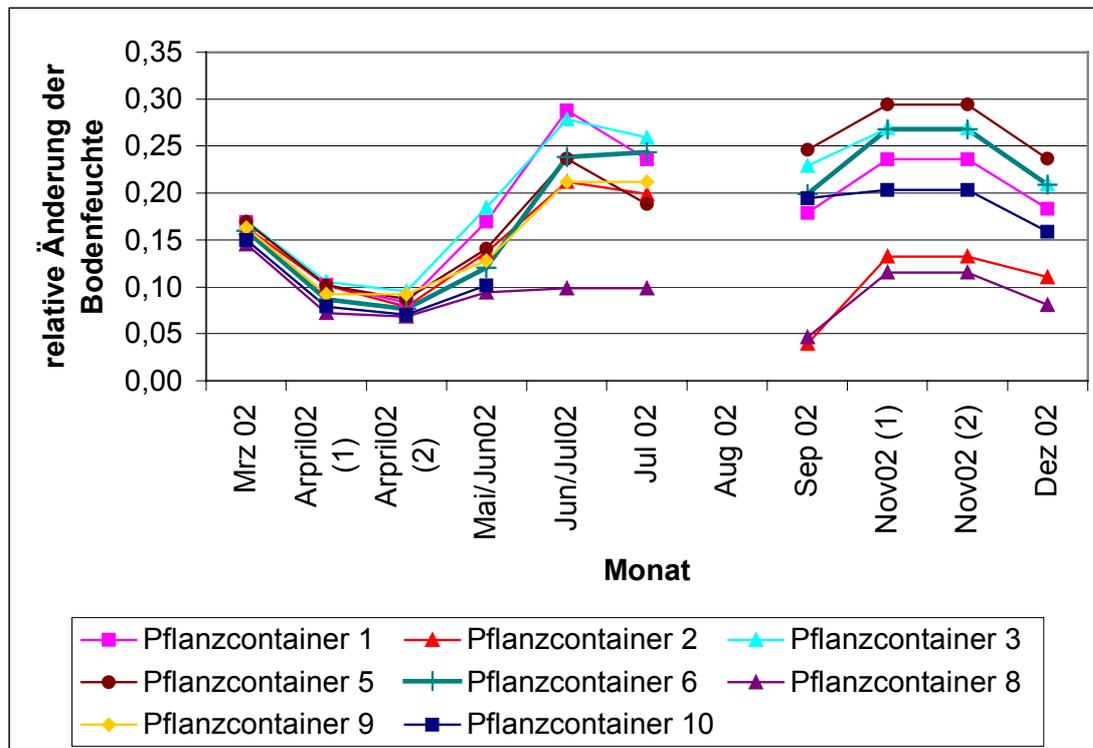


Abbildung 149: Relative Änderung der Bodenfeuchte in den Pflanzcontainern

Ein Vergleich der Abbildung 148 und Abbildung 149 zeigt, dass von Ende April bis Ende Juli sowohl die Bodenfeuchte als auch die Exhalationsrate der Pflanzcontainer ansteigt. Es wird vermutet, dass dieser Trend auf die im selben Zeitraum stattfindende Pflanzenentwicklung (Keimung bis Blüte der Pflanzen) und das damit verbundene Wurzelwachstum zurückzuführen ist, da im allgemeinen durch die mit steigender Bodenfeuchte zunehmende Wassersättigung der Poren im Boden die Wegsamkeiten für Radon/Bodenluft eingeschränkt werden und sich die Exhalationsrate vermindert. Dies zu zeigen, war Ziel der Untersuchungen. Leider sind die Ergebnisse aufgrund des vergleichsweise schlechten Pflanzenwachstums nicht so signifikant wie erwartet.

Eine ähnliche Tendenz, das heißt steigende Exhalationsraten mit zunehmender Entwicklung der Vegetation, wurden für die Trockendammhalde in Johannegeorgenstadt über mehrere Jahre nachgewiesen (vgl. /42/).

## 10 Modellierung der Radonmigration anhand ausgewählter Schürfe

Im Abschnitt 9.1 sind die Ergebnisse der Feldmessungen, der Radionuklidanalyse und der organoleptischen Ansprache für die einzelnen Untersuchungsgebiete qualitativ diskutiert worden. Dabei wurde versucht, die Ergebnisse unter Berücksichtigung aller gemessenen Parameter in einem Zusammenhang zu setzen. Aufgrund der Vielzahl der untersuchten Schürfe und Proben ist es deshalb nicht sinnvoll, alle Ergebnisse einer detaillierten Modellbeschreibung zu unterwerfen, sondern nur die charakteristische Merkmale herauszuarbeiten und diese in ihren komplexen Zusammenhängen des Transportverhaltens von Radon über einen Zeitraum von mehreren Dekaden zu verstehen.

Die theoretischen Grundlagen der Bleispurmethode werden im Abschnitt 10.1 vorgestellt, wobei weitgehend auf die Darstellung in der Studie /8/ zurückgegriffen wird. Wichtige Ergebnisse dieser Studie wurden in /9/ publiziert. Eine Weiterführung der Untersuchungen unter teils neuen Aspekten und Fragestellungen wurde im Auftrag der Wismut GmbH durchgeführt /43/. Auch diese Ergebnisse werden mit berücksichtigt. Im Abschnitt 10.2 werden die Ergebnisse von Modellierungen dargestellt und diskutiert sowie die aus diesen Ergebnissen resultierenden Schlußfolgerungen zusammengefaßt.

### 10.1 Theoretische Grundlagen der Bleispurmethode

#### 10.1.1 Zeitliche Entwicklung der Pb-210-Aktivität im Porenraum

Die geologischen Materialien produzieren eine ihrem Radiumgehalt entsprechende Menge Radon, das nur zu einem bestimmten Prozentsatz das Mineralgerüst des Gesteins verlassen kann und das als Emanierungsvermögen bezeichnet wird. Der sogenannte Emanationskoeffizient  $E$  ist durch das Verhältnis des abgegebenen ( $a$ ) zu dem im Gesteinskorn ( $p$ ) produzierten Radon definiert

$$E = \frac{Rn_a}{Rn_p} . \quad (40)$$

Die Radonkonzentration in einem bestimmten Volumenelement der Bodenluft setzt sich deshalb aus zwei Komponenten, dem diffusiven und dem konvektiven Radonanteil, zusammen.

Untersuchungen haben gezeigt, dass der Emanationskoeffizient von Radon mit zunehmender Korngröße aufgrund des kleiner werdenden Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen abnimmt. Andererseits zeigen Stoffe mit großer innerer Oberfläche, wie sie z.B. die Verwitterungsgesteine besitzen, ein hohes Emanationsvermögen.

Böden haben auf Grund der Tatsache, dass sie u.a. eine große Anzahl mineralischer Partikel mit teils sehr kleinen Durchmessern enthalten, ein vergleichsweise hohes Emanationsvermögen. Die Abgabe von Radon in den Kluft- und Porenraum der Gesteine sowie in die Böden wird außerdem durch die Porosität  $n$  und die Dichte des Bodens nachhaltig bestimmt.

Ist die spezifische Aktivität von Ra-226 eines trockenen Bodens  $A_{Ra}$ , so ist die spezifische Aktivität der im Korn verbleibenden Radionuklide Rn-222 und Pb-210 durch  $A_K = (1-E) \cdot A_{Ra}$  gegeben. Diese spezifische Pb-210-Aktivität von  $(1-E) \cdot A_{Ra}$  stellt somit die Minimalaktivität dar, die eine Bodenprobe aufweisen kann. In Böden, die z.B. Halden oder Tailings überdecken, können, wie in /8, 9/ gezeigt wurde, die spezifischen Pb-210-Aktivitäten einer Bodenprobe die von Ra-226 deutlich übersteigen (positive Bleispur). In diesen besonders interessanten Fällen liefern die spezifischen Aktivitäten von Pb-210 der Bodenproben wichtige Informationen über den Radontransport über Zeiträume von bis zu 30 - 50 Jahren.

Die zeitliche Entwicklung der Pb-210-Konzentration kann am Beispiel eines geschlossenen, mit trockenem Boden gefüllten Behälters einfach nachvollzogen werden. Auf die Praxis übertragen, verkörpert dieses einfache Modell eine dicht abgedeckte Radonquelle. Die Erfüllung der dabei bestehenden funktionalen Abhängigkeiten zwischen den Modellparametern kann als Grenzfall einer Abdeckung mit perfekter Radondämmwirkung interpretiert werden.

Die Aktivitätskonzentration von Ra-226 in dem Behälter ergibt sich zu

$$A_{Ra}^{gesamt} \left[ \frac{Bq}{m^3} \right] = \frac{M_d \cdot A_{Ra}}{V} = \rho_d \cdot A_{Ra}, \quad (41)$$

wobei  $V$  das Volumen des Behälters,  $M_d$  die Masse des trockenen Bodens,  $A_{Ra}$  die spezifische Aktivität von Ra-226 des Bodens, gemessen in Bq/kg, und  $\rho_d$  die Trockendichte sind.

Im Fall, dass sich radioaktives Gleichgewicht eingestellt hat, ist die Aktivitätskonzentration von Rn-222 im Porenraum, d.h. bezogen auf das Volumen  $V_P$ , durch

$$c_{Rn}^P \left[ \frac{Bq}{m^3} \right] = E \frac{M_d \cdot A_{Ra}}{V_P} = E \frac{\rho_d \cdot A_{Ra}}{n} \quad (42)$$

gegeben, wobei  $E$  den Emanationskoeffizienten bezeichnet. Für eine Porosität von  $n = 0,3$ , eine Trockendichte von  $1,5 \text{ t pro m}^3$  und einen Emanationskoeffizienten von  $E = 0,2$  ergibt sich für die Radonkonzentration in der Bodenluft des geschlossenen Behälters eine einfache Näherungsformel

$$c_{Rn}^P \left[ \frac{Bq}{m^3} \right] = 10^3 \cdot A_{Ra}, \quad (43)$$

wobei die spezifische Aktivität von Ra-226 in Bq/kg anzugeben ist.

In dem radondichten Behälter entwickelt sich die Pb-210-Aktivität im Porenraum gemäß

$$c_{Pb-210}^P \left[ \frac{Bq}{m^3} \right] = c_{Rn}^P \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{Pb-210}}\right) \right), \quad (44)$$

wobei  $\tau_{Pb-210}$  die Zerfallszeit (32,2 Jahre) von Pb-210 ist. In der Abbildung 150 ist die zeitliche Entwicklung der Pb-210-Aktivität dargestellt.

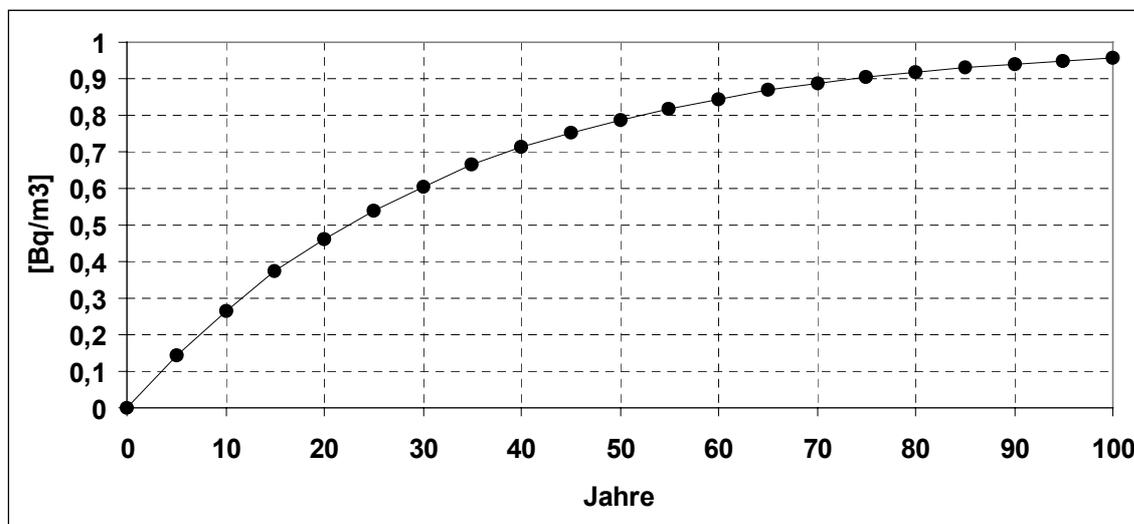


Abbildung 150: Zeitliche Entwicklung der Pb-210-Aktivität im Porenraum

Für die nachfolgende Auswertung von experimentellen Daten ist festzuhalten, dass nach einem Zeitraum von ca. 50 Jahren, der in etwa der Standzeit der ältesten Hal- den des Uranerzbergbaues entspricht, das radioaktive Gleichgewicht zwischen Ra- don und Pb-210 zu 80% erreicht ist.

Die Aktivität von Pb-210 im Behälter ist eine Funktion der Zeit und setzt sich aus der im Porenraum akkumulierten und der im Feststoff enthaltenen Aktivität zusammen

$$\begin{aligned}
 A_{\text{Pb-210}}^{\text{ges}} [\text{Bq}] &= (1 - E) \cdot A_{\text{Ra}} \cdot M_{\text{d}} + c_{\text{Pb-210}}(t) \cdot V_{\text{P}} = \\
 &= (1 - E) \cdot A_{\text{Ra}} \cdot M_{\text{d}} + V_{\text{P}} \cdot c_{\text{Rn}}^{\text{P}} \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{Pb-210}}}\right) \right). \quad (45)
 \end{aligned}$$

Die spezifische Aktivität einer Bodenprobe ergibt sich zu

$$\begin{aligned}
 A_{\text{Pb-210}} \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right] &= (1-E) \cdot A_{\text{Ra}} + c_{\text{Pb-210}}(t) \frac{n}{\rho_d} = \\
 &= (1-E) \cdot A_{\text{Ra}} + \frac{n}{\rho_d} c_{\text{Rn}}^P \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{Pb-210}}}\right) \right). \quad (46)
 \end{aligned}$$

Für  $t \gg \tau_{\text{Pb-210}}$  folgt aus

$$c_{\text{Pb-210}}(t \rightarrow \infty) = c_{\text{Rn}}^P = E \frac{\rho_d \cdot A_{\text{Ra}}}{n} \quad (47)$$

die Gleichgewichtsbedingung

$$A_{\text{Pb-210}} \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right] = (1-E) \cdot A_{\text{Ra}} + E \cdot A_{\text{Ra}} = A_{\text{Ra}}. \quad (48)$$

### 10.1.2 Einführung des Begriffs "Bleispur"

Die für die Auswertung der experimentellen Ergebnisse relevante Größe ist die Differenz der spezifischen Aktivitäten von Pb-210 und Ra-226. Diese **Aktivitätsdifferenz von Pb-210 und Ra-226** wird mit dem Begriff **Bleispur** oder **Pb-Spur**,  $\text{Pb}(z)$ , bezeichnet (s. /8, 9/).

Die tiefenabhängige spezifische Aktivität der Bleispur einer unendlich mächtigen Schicht ergibt sich für große Zeiträume zu

$$\begin{aligned}
 \text{Pb}(z) &= A_{\text{Pb-210}}(z) - A_{\text{Ra}} = \\
 &= (1-E) \cdot A_{\text{Ra}} + E \cdot A_{\text{Ra}} \cdot \left( 1 - e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D}} z} \right) - A_{\text{Ra}} = -E \cdot A_{\text{Ra}} e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D}} z}. \quad (49)
 \end{aligned}$$

Für endliche Zeiträume, d.h. für Zeiten kleiner als 100 Jahre, gilt

$$\text{Pb}(z, t) \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right] = E \cdot A_{\text{Ra}} \left[ \left( 1 - e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D'}} z} \right) \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{Pb-210}}}\right) \right) - 1 \right]. \quad (50)$$

Aus dieser Definition folgt, dass in einem natürlich vorkommenden Boden die Bleispur immer negativ ist, da aufgrund der Radonexhalation ständig Radon aus dem Boden in die Atmosphäre migriert. Würde sich das aus der betrachteten Oberfläche entwichene Radon wiederum in Form von Pb-210 ablagern, so entspricht die an der Erdoberfläche abgelagerte Pb-210-Aktivität genau der durch die negative Bleispur manifestierten fehlenden Pb-210-Aktivität im Boden. Integriert man über die gesamte Bleispur  $\text{Pb}(z)$ , folgt für die Exhalationsrate  $J$  die Relation

$$\rho_d \int_0^{\infty} \text{Pb}(z) dz = -\frac{1}{\lambda} E \cdot A_{\text{Ra}} \cdot \rho_d \sqrt{\lambda \cdot D'} = -\frac{1}{\lambda} J. \quad (51)$$

Das bedeutet, dass **das Integral über die Bleispur der Exhalationsrate direkt proportional ist**. Dies gilt auch, wenn konvektive Prozesse eingeschlossen sind.

Passt man z.B. die tiefenabhängige experimentelle Bleispur  $\text{Pb}_{\text{exp}}(z)$  an die Profilkurve  $\text{Pb}(z)$  an, wird zum einen der Parameter  $\sqrt{\lambda \cdot D'}$  und zum anderen der Vorfaktor  $E \cdot A_{\text{Ra}}$  bestimmt. Daraus berechnet sich die mittlere Exhalationsrate aus der Pb-Spur parameterfrei. Bei dieser Bestimmung der Exhalationsrate wird implizit über alle Einflussfaktoren gemittelt. Die so berechnete Exhalationsrate stellt einen realen Mittelwert über Zeiträume von Dekaden und im Grenzfall über sehr lange Zeiträume dar.

Die Verallgemeinerung des Ausdrucks für die Bleispur für sukzessive Schichten mit unterschiedlicher Dichte und Porosität ist offensichtlich. In Analogie zu (49) folgt der allgemeinere Ausdruck

$$Pb(z_i) = A_{Pb-210}(z_i) - A_{Ra}^i = -E_i \cdot A_{Ra}^i \phi(z_i), \quad (52)$$

wobei die Funktion  $\phi(z_i)$  die Lösung der Transportgleichung für die einzelnen Schichten darstellt.

Bestimmt man die spezifische Aktivität für einzelne Tiefen, erhält man näherungsweise

$$\sum_i Pb(z_i) \cdot \rho_d^i \Delta x_i \approx -\frac{1}{\lambda} J, \quad (53)$$

wobei  $\Delta z_i$  die Mächtigkeit der Schicht,  $Pb(z_i)$  die zugehörige spezifische Aktivität und  $\rho_d^i$  die Dichte der Schicht darstellen.

Aus der Anwendung der Formel (53) folgt bereits ein wichtiges methodisches Hilfsmittel zur experimentellen Auswertung von tiefenabhängigen spezifischen Aktivitäten in Aufschlüssen oder Schürfen. Da die Summe auf der linken Seite von (53) immer negativ sein muss, signalisiert eine positive Summe, dass der Aufschluss nicht genügend tief gegraben wurde, um den gesamten, für den Radontransport relevanten Tiefenbereich zu erfassen. Beschränkt man die Summe nur über den Bereich der Abdeckung einer Halde oder IAA, so muss sie in diesem Bereich positiv sein. Im entgegengesetzten Fall würde diese auf eine nahezu vollständig radondurchlässige Abdeckung schließen lassen. Dieser Zusammenhang wird im nächsten Abschnitt anhand einiger Fallbeispiele weiter untersetzt.

### 10.1.3 Diskussion einfacher Fallbeispiele

Zur Veranschaulichung des Anwendungsbereichs der Bleispurmethode betrachten wir ein für die Praxis relevantes Beispiel. Wir gehen davon aus, dass eine 10 m mächtige Tailingschicht mit einer Schicht aus Mineralboden von 1 m bzw. 2 m Mächtigkeit überdeckt ist. Die spezifische Aktivität der Tailings beträgt beispielhaft

5000 Bq/kg. Die spezifische Aktivität der Abdeckschicht wird als vernachlässigbar gering angenommen.

In den Abbildungen 151 und 152 sind die nach einem Zeitraum von 25 und 50 Jahren bzw. nach einem unendlich langen Zeitraum resultierenden Bleispuren Pb(z), d.h. die Differenzen der spezifischen Aktivität von Pb-210 und Ra-226, dargestellt.

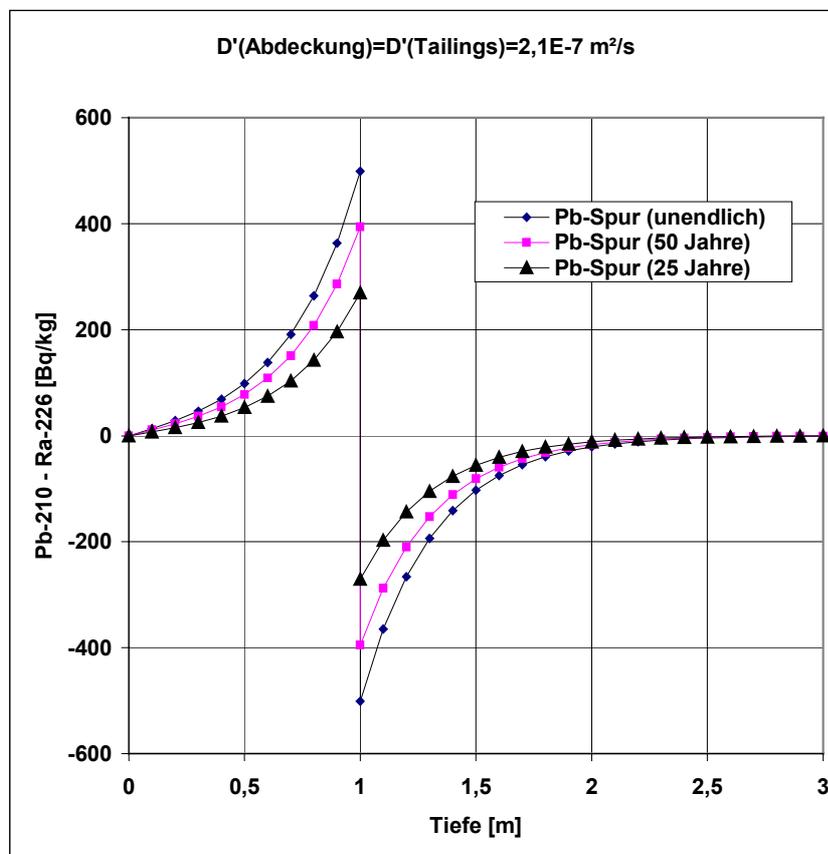


Abbildung 151: Spezifische Aktivität der Bleispur Pb(z) in Abhängigkeit von der Tiefe für ein ideales Modellsystem einer 10 m mächtigen Tailingsschicht mit einer 1 m mächtigen Abdeckung. Die Bleispuren sind für unterschiedliche Zeiträume nach der Aufbringung der Abdeckung berechnet worden.

Im Beispiel der Abbildung 151 ist für das gesamte System Tailings plus Abdeckung eine gemeinsame Diffusionskonstante von  $D' = 2,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  gewählt worden, während in Abbildung 152 die Diffusionskonstante der Abdeckung um den Faktor 10 größer gewählt wurde. Letztere Wahl entspricht einer Diffusionslänge von  $L_D = \sqrt{D'/\lambda} = 1 \text{ m}$  für die abgedeckten Tailings.

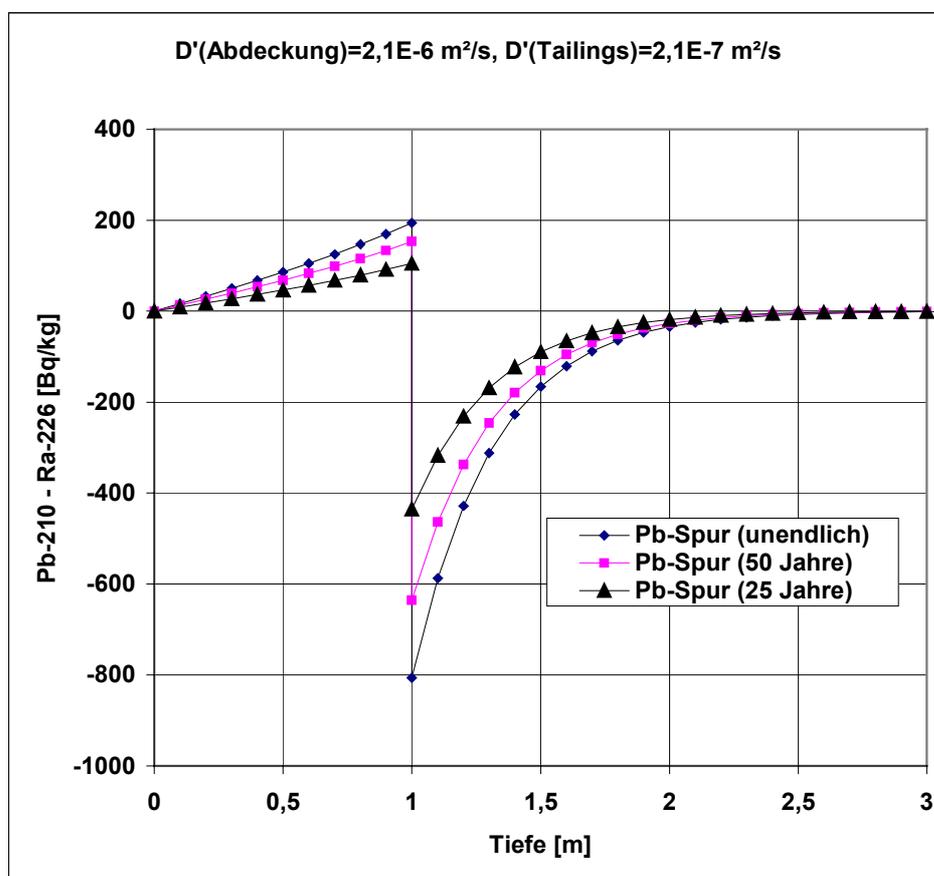


Abbildung 152: Wie Abbildung 151, jedoch für eine um den Faktor 10 größere Diffusionskonstante für die Abdeckschicht.

Die Abbildungen 151 und 152 veranschaulichen, dass sich in der Abdeckung eine positive Bleispur herausbildet, während die der abgedeckten Tailingschicht negativ ist. An der unteren Seite der Abdeckung kann die spezifische Pb-210-Aktivität ge-

genüber der von Ra-226 einen Überschuss von bis zu 500 Bq/kg erreichen, der allein auf den Radontransport aus den Tailings zurückzuführen ist. Dies sind praxisorientierte Werte. In den Abdeckungen der IAA Trünzig wurden experimentell ähnlich hohe Überschüsse der spezifischen Pb-210-Aktivitäten nachgewiesen /8, 9/. Beispielhaft sind in der Abbildung 153 die Ergebnisse für Schürfe auf der IAA Dänkritz (Tailings mit einer ca. 50 cm mächtigen Mineralbodenschicht abgedeckt) dargestellt. Die Summe der spezifischen Aktivität der Bleispur,  $A_{Pb-210} - A_{Ra-226}$ , ober- und unterhalb der Trennlinie zwischen Abdeckung und den Tailings ist deutlich negativ. Dies bedeutet, dass aus den Tailings mehr Radon migriert ist, als sich in Form von Pb-210 in der Abdeckung gebildet hat.

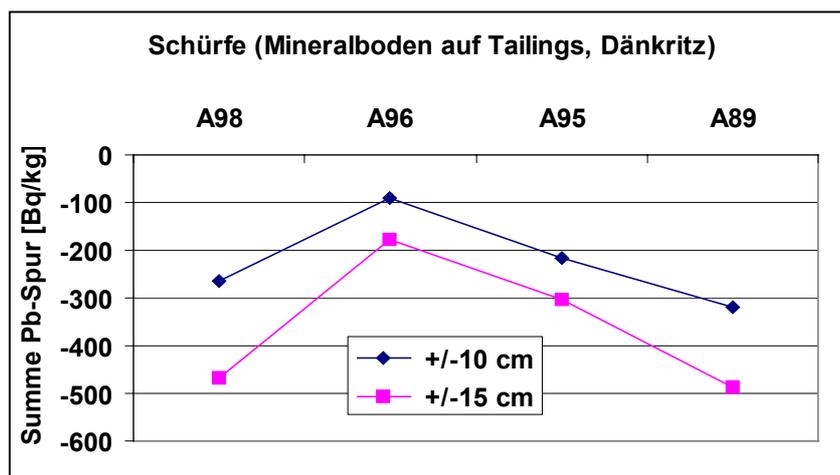


Abbildung 153: Summe der spezifischen Aktivität der Bleispur,  $A_{Pb-210} - A_{Ra-226}$ , ober- und unterhalb der Trennlinie zwischen Abdeckung und den Tailings (IAA Dänkritz). Die Mittelungsbreiten betragen 10 cm und 15 cm.

Des weiteren ist zu bemerken, dass, wie aus dem Vergleich der entsprechenden Ergebnisse in den Abbildungen 151 und 152 hervorgeht, bei der Bewertung der spezifischen Aktivität der Bleispur der Zeitpunkt der Abdeckungsarbeiten mit ins Kalkül zu ziehen ist.

Aus den in den Abbildungen 151 und 152 dargestellten Ergebnissen ist ersichtlich, dass bei einer vergleichsweise moderaten Diffusionskonstante von  $D' = 2,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , entsprechend einer Diffusionslänge von  $L_D = 0,3 \text{ m}$ , die mittlere spezifische Aktivität der Bleispur in der 1 m mächtigen Abdeckung größer ist als bei der um den Faktor 10 höheren Diffusionskonstante von  $D' = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , die eher einen radondurchlässigen Boden mit einer Diffusionslänge von  $L_D = 1 \text{ m}$  charakterisiert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Fall einer radondichteren Abdeckung das in die Abdeckung migrierte Radon zum größten Teil auch in der Abdeckung in Pb-210 zerfällt.

Im Hinblick auf eine experimentelle Grobauswertung kann somit festgestellt werden, dass im Fall einer relativ radondichten Abdeckung die Summe der spezifischen Aktivität der Bleispur ober- und unterhalb der Grenze zwischen Abdeckung und Radonquelle immer positiv ist, während im Fall einer eher radondurchlässigen Abdeckung diese Summe negativ ist. Für das oben diskutierte Beispiel ist dieser Sachverhalt in der Abbildung 154 illustriert.

Im Fall einer radondichten Abdeckung zerfällt das in die Abdeckschicht eingedrungene Radon zum größten Teil in den ersten 1 - 5 cm in Pb-210, so dass die Summe der spezifischen Aktivitäten der Bleispuren oberhalb und unterhalb der Abdeckungsgrenze einen deutlich positiven Wert aufweist. Bei einer eher als radondurchlässig zu bezeichnenden Abdeckschicht ist die Situation gerade entgegengesetzt, d.h. es akkumuliert sich nur ein geringer Teil des Pb-210 in der Abdeckschicht, während die Tailings aufgrund der wenig gedämpften Diffusion eine stark ausgeprägte negative Bleispur aufweisen. Die Summe der spezifischen Aktivitäten der Bleispuren ober- und unterhalb der Trennlinie zwischen Abdeckung und Radonquelle ist deshalb insgesamt negativ.

Somit liefert der Vergleich der spezifischen Pb-210- und Ra-226-Aktivitäten an der Übergangsschicht Abdeckung-Tailings eine wichtige Information über die Güte der Abdeckung im Hinblick auf seine Langzeitstabilität, d.h. es kann in einfacher Weise abgeschätzt werden, ob eine Abdeckung eher als besonders dicht oder als undicht zu klassifizieren ist.

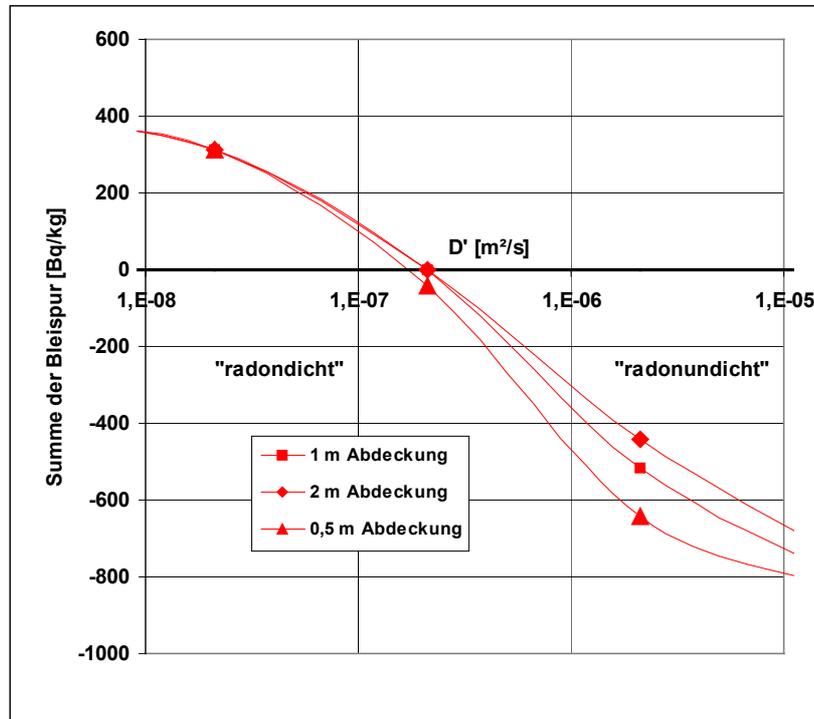


Abbildung 154: Summe der spezifischen Aktivität der Bleispur,  $A_{Pb-210} - A_{Ra-226}$ , ober- und unterhalb der Trennlinie zwischen einer 2 m, 1 m und 0,5 m mächtigen Abdeckung und den Tailings in Abhängigkeit von der Diffusionskonstante der Abdeckschicht. Die Mittelungsbreite beträgt jeweils 10 cm.

Das hier diskutierte Modellbeispiel ist praxisrelevant ist und wurde in /8, 9/ ausgewertet. Auch die dabei ausgewerteten Summen der spezifischen Aktivitäten der Bleispuren von Bodenproben, die 10 - 15 cm ober- und unterhalb einer relativ deutlich erkennbaren Abdeckungsgrenze entnommen wurden, sind deutlich negativ. Damit zeigt diese einfach durchzuführende Grobanalyse der experimentellen Daten, dass die Abdeckschicht in Übereinstimmung mit den oben gezogenen Schlussfolgerungen als ziemlich radondurchlässig zu klassifizieren ist.

Summiert man über die Bleispur des gesamten Schurfs nach Formel (53)

$$\sum_i \text{Pb}(z_i) \cdot \rho_d^i \Delta x_i \approx -\frac{1}{\lambda} J, \quad (54)$$

wobei  $\Delta z_i$  die Mächtigkeit der Schicht,  $\text{Pb}(z_i)$  die zugehörige spezifische Aktivität und  $\rho_d^i$  die Dichte der Schicht darstellen, ergaben sich Radonexhalationsraten, die als ein Mittel über lange Messzeiten zu interpretieren sind. Messungen der Wismut GmbH im Bereich des Dammes der IAA Dänkriz lieferte Exhalationsraten, die diese Langzeitwerte relativ gut reflektieren /44/.

## **10.2 Ergebnisse für ausgewählte Schürfe**

### **10.2.1 Vorbemerkung zur Radonfreisetzung aus Halden**

Das Exhalationsverhalten einer Halde ist sehr komplex und lokal stark unterschiedlich geprägt. Die auf einer Halde auftretenden charakteristischen Exhalationsmuster erhöhter Radonexhalation können mit Hilfe von Rastermessungen der Radonkonzentration in 10 cm Höhe verifiziert werden. In den Arbeiten /10, 39/ wurde gezeigt, dass damit ein belastbares Abbild (**Visualisierung**) der Radonquellstärkeverteilung erhalten werden kann.

Die dabei resultierenden Exhalationsmuster sind in der Abbildung 155 schematisch dargestellt. Auf den plateauartigen Flächen werden generell erhöhte Radonexhalationen in den kühlen Sommernächten und während des gesamten Winters erwartet, während die Exhalation am Haldenfuß nur während der heißen Sommertage besonders ausgeprägt ist.

## Phasen erhöhter Radonexhalation

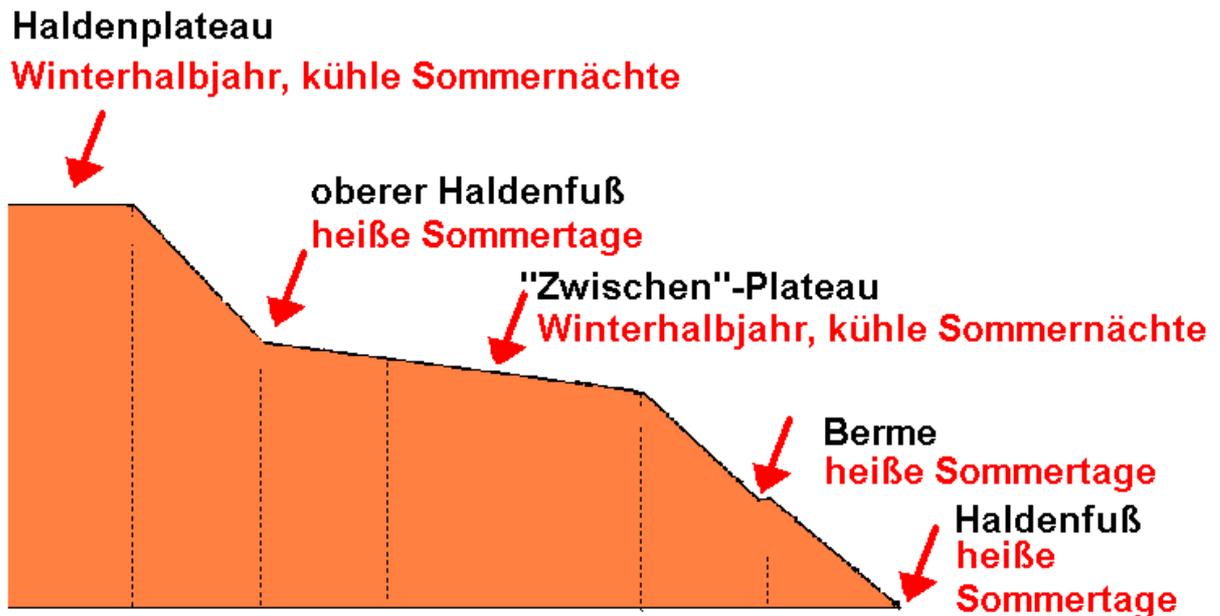


Abbildung 155: Schematische Darstellung der auf der Halde auftretenden charakteristischen Exhalationsmuster.

Am Haldenfuß treten z.B. Exhalationsmaxima im Sommer dann auf, wenn die Außentemperatur am höchsten ist, d.h. in den Nachmittagsstunden. Zu dieser Zeit erreicht die Exhalation auf dem Haldenplateau ihren Minimalwert.

Die Exhalationsmaxima am Haldenfuß und die Exhalationsminima auf dem Haldenplateau stehen nur bedingt in einem direkten Zusammenhang. Dies trifft nur zu, wenn z.B. in einer langen Winterperiode oder auch in Sommermonaten extreme Temperaturunterschiede dazu führen, dass die effektive Strömungslänge der Konvektion vergleichbar mit der Höhe der Halde ist. Die im Sommerhalbjahr beobachteten Tagesgänge sind in der Mehrzahl durch Strömungslängen charakterisiert, die maximal einige Meter betragen /10, 39, 43/ .

Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass die zeitabhängigen Tagesgänge der Radonexhalation in guter Näherung durch eine periodische Funktion vereinfachend beschrieben werden können und qualitativ den empirischen Sachverhalt reflektieren.

Die stetige Änderung der Konvektionsgeschwindigkeit führt dazu, dass das emanier- te Radon vom Entstehungsort wegtransportiert werden kann und somit letztlich die Bleispur den maximal möglichen negativen Wert von  $-E \cdot A(\text{Ra-226})$  erreicht. Dieser Sachverhalt wurde durch Auswertung der Siebversuche weiter untersetzt. In der Modellierung können diese komplexen zeitabhängigen Prozesse nur bedingt berücksichtigt werden, da die Bleispur die Effekte der in mehreren Dekaden ablaufenden Radonmigrationsprozesse in integraler Weise, d.h. über ein kompliziertes Zeitintegral, enthält. Die Auswertung einzelner Schürfe wird insbesondere unter dem Aspekt betrachtet, ob es möglich ist, Informationen über den konvektiven Radontransport zu erhalten.

### 10.2.2 Einführung zum Modell

Die Gleichungen für den Radontransport wurden in der Studie /8, 9/ ausführlich beschrieben. Hier wird nur auf einige Details, die für das Verständnis der Modellierungsergebnisse von Bedeutung sind, eingegangen.

Die Abdeckung und der darunter liegende Bereich (Radonquelle) werden in eine Anzahl von N Schichten unterteilt,

$$\sum_{i=1}^N \Delta z_i = H_N \quad (55)$$

wobei  $\Delta z_i$  die Mächtigkeit einer einzelnen Beprobungsschicht und  $H_N$  die Mächtigkeit des gesamten Aufschlusses darstellt (s. Abbildung 156).

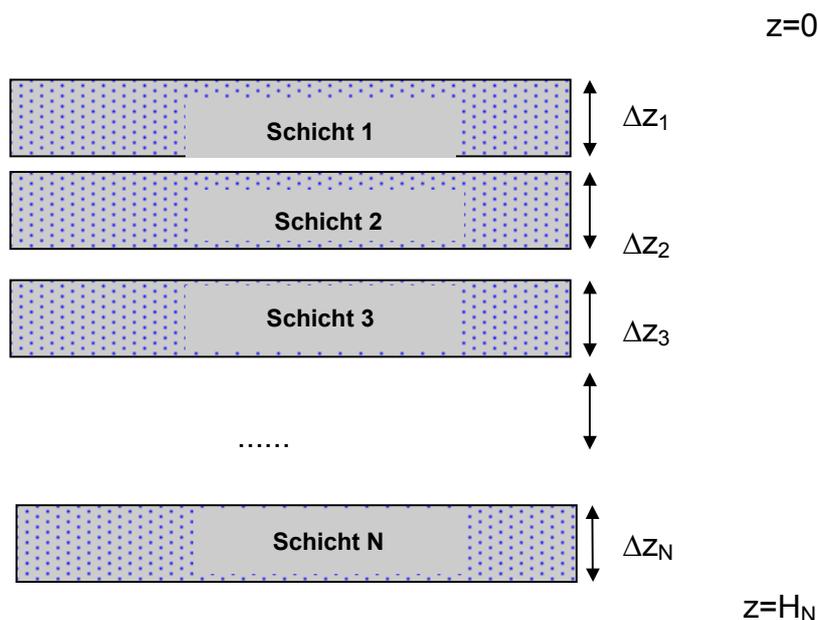


Abbildung 156: Skizzierung der Schichtenfolge eines Aufschlusses. Die Summe der Mächtigkeiten der einzelnen Schichten ist  $\Delta z_1 + \Delta z_2 + \Delta z_3 + \dots + \Delta z_N = H_N$ .

Es gilt Stetigkeit für die Radonkonzentrationen sowie Radonflüsse aufeinanderfolgender Schichten

$$C_k(H_k) = C_{k+1}(H_k), \quad k = 1 \dots N-1 \quad (56)$$

$$n_k \cdot D_k \left. \frac{\partial C_k}{\partial z} \right|_{z=H_k} = n_{k+1} \cdot D_{k+1} \left. \frac{\partial C_{k+1}}{\partial z} \right|_{z=H_k}, \quad k = 1 \dots N-1 \quad (57)$$

und die Randbedingung

$$C_1(0) = 0 \quad (58)$$

an der Geländeoberfläche. Da sich die Schürfe über vergleichsweise geringe Tiefen erstrecken, wird in Abhängigkeit von dem Charakter der tiefenabhängigen Bleispur, die Randbedingung

$$C_N(H_N) = c_Q \quad (59)$$

betrachtet, wobei  $c_Q$  eine frei wählbare Konzentration bezeichnet, die z.B. das Vorhandensein einer Radonquelle in einer nicht aufgeschlossenen, tiefer liegenden Schicht simulieren soll. Bei der Auswertung einzelner Schürfe wird auf dieses Problem noch näher eingegangen.

Die Lösung der Transportgleichung führt somit zu einem gekoppelten Gleichungssystem vom Rang  $2N$ . Für Lagerungszeiträume kleiner als 100 Jahre, die für die Halden und IAA's zu veranschlagen sind, ist die Zeitabhängigkeit der Entwicklung der spezifischen Pb-210-Aktivität explizit mit zu berücksichtigen.

Die zu bestimmenden Diffusionsparameter  $D_i$  der einzelnen Beprobungsintervalle und die Konvektionsgeschwindigkeit werden mit Hilfe einer  $\chi^2$ -Methode ermittelt, wo-

bei in Übereinstimmung mit der organoleptischen Ansprache sogenannte "Gruppenfits" durchgeführt werden können.

Des weiteren wird vereinfachend angenommen, dass die Porosität und die Dichte des Bodens über die Erkundungstiefe annähernd konstant sind. Für letztere wurden für ausgewählte Schürfe die annähernde Konstanz der Bodendichten (Variation von ca. 10%) experimentell bestimmt. Die Porosität wurde wegen des experimentellen Aufwands nur in einigen Ausnahmefällen bestimmt. Ausgehend von diesen Ergebnissen und vorliegenden Erfahrungen wurde generell eine Porosität von  $n=0,3$  in den nachfolgenden Berechnungen berücksichtigt. Die vorliegenden Erfahrungen zeigen, dass dies keine stringente Einschränkung ist.

## 10.2.3 Auswertung einzelner Schürfe

### 10.2.3.1 Schurf 1, Plateau der Halde am Schindlerschacht (Schneeberg)

Als ein erstes für eine Auswertung wird der Schurf 1 betrachtet, der auf dem Haldenplateau des Schindlerschachts angelegt wurde und als Beispiel für die weitere Anwendung der Modellierung der Radonfreisetzung anhand von teufenabhängigen Bleispuren gilt. Die Abbildung 157 zeigt die spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 (oberes Bild) sowie die Bleispur und die maximal mögliche negative Bleispur -E·A(Ra-226) (unteres Bild) als Funktion der Erkundungstiefe.

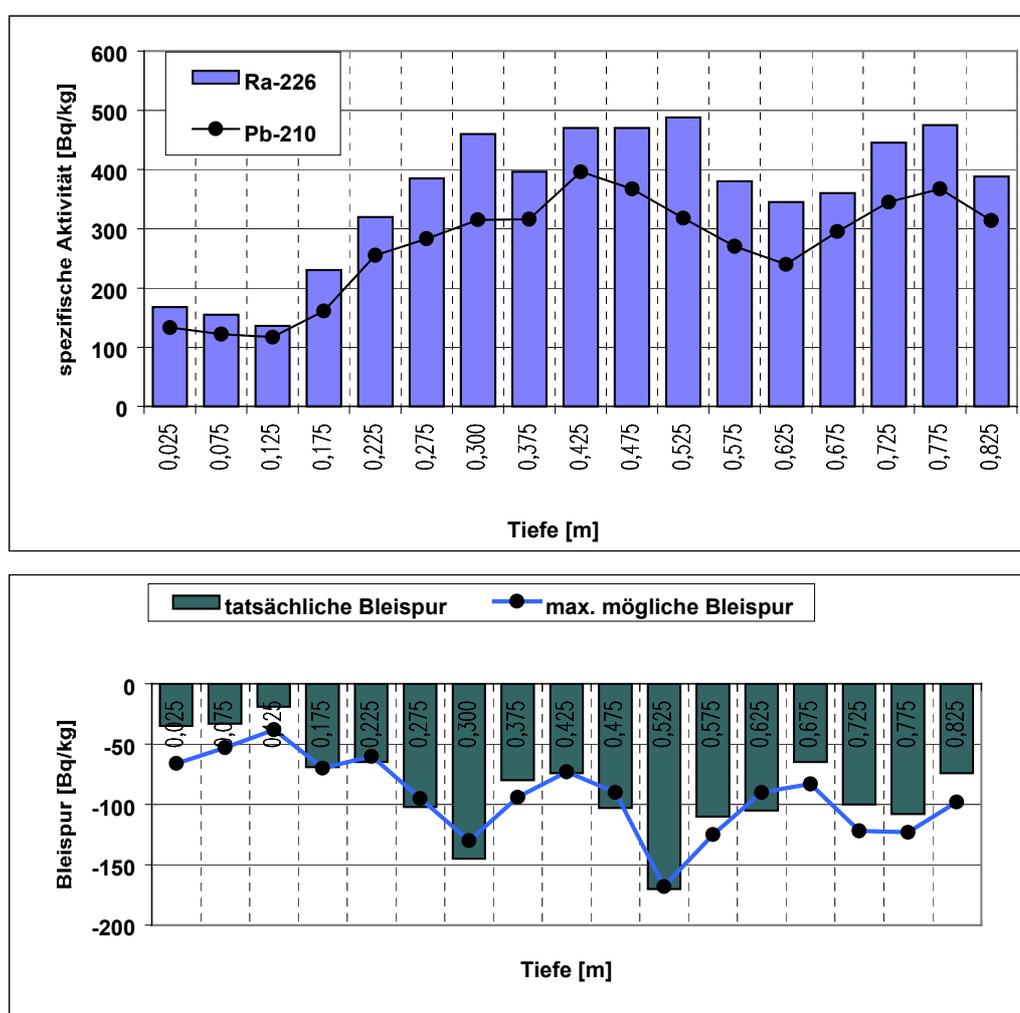


Abbildung 157: Spezifische Aktivität von Ra-226 und Pb-210 (oberes Bild) sowie Bleispur und maximal mögliche negative Bleispur -E·A(Ra-226) (unteres Bild) als Funktion der Tiefe

Die dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass zumindest bis zu einer Tiefe ca. 1 m die maximal erreichbare negative Bleispur auch erreicht wird, so dass davon auszugehen ist, dass in diesem Bereich (Haldenplateau) nahezu das gesamte emanierende Radon von seinem Entstehungsort "abtransportiert" wird. Dies bedeutet auch, dass die mittlere Radonmigrationslänge, die durch Diffusion und/oder Konvektion bedingt ist, größer als 1 m sein muß.

Diese Ergebnisse wurden auch durch die Kornfraktionsanalysen durch die Proben 1\_7 und 1\_6, bestätigt, die aus einer Beprobungstiefe von 35 bzw. 30 cm im Schurf 1 entnommen wurden und im Abschnitt 9.4.2.2 ausführlich diskutiert wurden. Die Analysen zeigten, dass innerhalb der experimentellen Fehler für jede Kornfraktion die maximal mögliche negative Bleispur annähernd erhalten wird.

Hinsichtlich der Ableitung von Informationen über die Konvektion aus der teufenabhängigen Bleispur ist folgendes zu bemerken. Die experimentell bestimmte Bleispur enthält die Dynamik des konvektiven Radontransports (s. 10.2.1) in integraler Weise, so dass z.B. keine Information über die Richtung der Konvektionsgeschwindigkeit gewonnen werden kann. Mit Hilfe der Modellierung einer teufenabhängigen Bleispur kann deshalb nur eine Abschätzung des etwaigen Betrags der mittleren Konvektionsgeschwindigkeit erreicht werden. Anhand einiger Fallbeispiele wird dieser Sachverhalt für den Schurf 1 (Halde am Schindlerschacht, Plateau) in der Abbildung 158 illustriert.

Es ist zu erkennen, dass, wie aus den experimentellen Daten zu erwarten ist, eine Diffusionslänge von 1 - 2 m, entsprechend einer Diffusionskonstante von  $2,1\text{E-}6 \text{ m}^2/\text{s}$  -  $8,4\text{E-}6 \text{ m}^2/\text{s}$ , die experimentelle Bleispur sehr gut reproduziert. Die Ergebnisse können jedoch in einer vergleichbaren Weise reproduziert, wenn von einer Konvektionsgeschwindigkeit von  $0,8\text{E-}5 \text{ m/s}$  ausgegangen wird, wobei die Diffusionslänge lediglich 20 cm (Diffusionskonstante:  $1,0\text{E-}7 \text{ m}^2/\text{s}$ ), beträgt.

Aus diesem Vergleich könnte man entnehmen, dass im Fall einer extrem negativen Bleispur eine direkte Reproduktion der Konvektionsgeschwindigkeit aus den experimentellen Daten ohne weitere Annahmen bzw. empirisch gewonnen Sachverhalte über die Diffusionskonstante nicht möglich ist. Das ist jedoch nicht so, wenn man die

absoluten Werte der Diffusionskonstanten genauer untersucht. Sie sind aufgrund empirischer Daten viel zu groß gewählt worden, um die Radondiffusion im Boden zu reflektieren. Zum Vergleich sei angemerkt, dass die Radondiffusionslänge der Luft ca. 2,3 m (Diffusionskonstante von  $1,1E-5 \text{ m}^2/\text{s}$ ) beträgt. Dieser Wert ist praktisch vergleichbar mit dem in Abbildung 158 ausgewählten Beispiel.

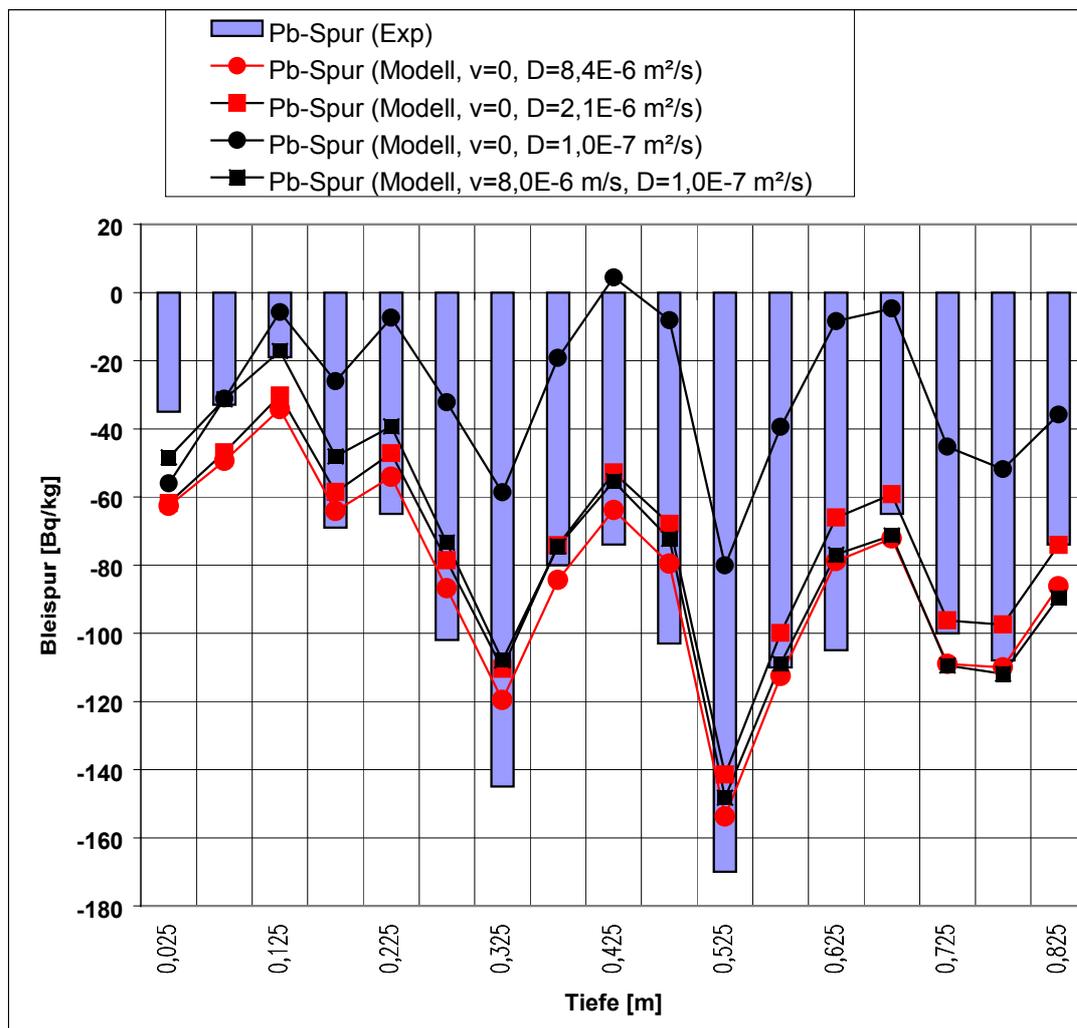


Abbildung 158: Experimentell gemessene Bleispur ist mit den Ergebnissen unterschiedlicher Modellannahmen für die Diffusionskonstante und die Konvektionsgeschwindigkeit verglichen.

Daraus folgt, dass eine maximal negative Bleispur nur dann mit einem rein diffusiven Radontransport kompatibel ist, wenn eine Diffusionskonstante zugrunde gelegt wird, die im Bereich der Radondiffusion in Luft und nicht in einem porösen Medium liegt. Da die Annahme einer solch hohen Diffusionskonstante rein fiktiv ist, kann im Umkehrschluß festgestellt werden, dass im untersuchten Schurf die Konvektion die den Radontransport bestimmende Größe ist. Um diesen Sachverhalt zu untersetzen, ist in dem obigen Beispiel eine relativ geringe Diffusionslänge von 0,2 m und eine moderate Diffusionsgeschwindigkeit von  $0,8E-5$  m/s gewählt worden. Bei dieser Parameterwahl dominiert die Konvektion und führt letztlich dazu, dass das emanierte Radon vom Ort seiner Entstehung in die Atmosphäre transportiert wird. Die konvektive Migrationslänge  $v/\lambda$  beträgt dabei 3,8 m. Man hätte auch eine noch kleinere Diffusionskonstante wählen können, ohne dass die qualitative Aussage hinsichtlich der Wahl der Konvektionsgeschwindigkeit hätte modifiziert werden müssen.

Die Diffusionskonstante könnte durch experimentelle Daten quantifiziert werden, wenn Messungen der Radonkonzentration im Boden in verschiedenen Tiefen vorliegen würden. In betrachteten Fall liegen zwar Ergebnisse von Messungen vor, die jedoch darauf hinweisen, dass starke konvektive Prozesse während der Messungen vorherrschten und dazu führten, dass in 0,2 und 0,45 m Tiefe Radonkonzentrationen in der Bodenluft von 98 und 99 kBq/m<sup>3</sup> gemessen wurden. Für die Extraktion des Diffusionskoeffizienten waren sie daher nicht geeignet.

#### **10.2.3.2 Schurf 20, IAA Lengefeld**

Eine detaillierte Beschreibung dieses Schurfes wurde im Abschnitt 9.1.6 gegeben. Die spezifische Ra-226-Aktivität der Abdeckung von 0,7 m variiert im Mittel zwischen (90 - 175) Bq/kg. Die spezifische Ra-226-Aktivität der Tailings liegt im Mittel bei ca. 4000 Bq/kg

Die Abbildung 159 zeigt die berechnete und experimentelle Bleispur für den Aufschluss Sch20 in Abhängigkeit von der Tiefe. Zu erkennen ist, dass das Defizit an Pb-210 in den obersten Tailingschichten mit bis zu 1500 Bq/kg sehr stark erhöht ist. Aus diesem Grund wurde die Bleispur für den Abdeckbereich separat dargestellt.

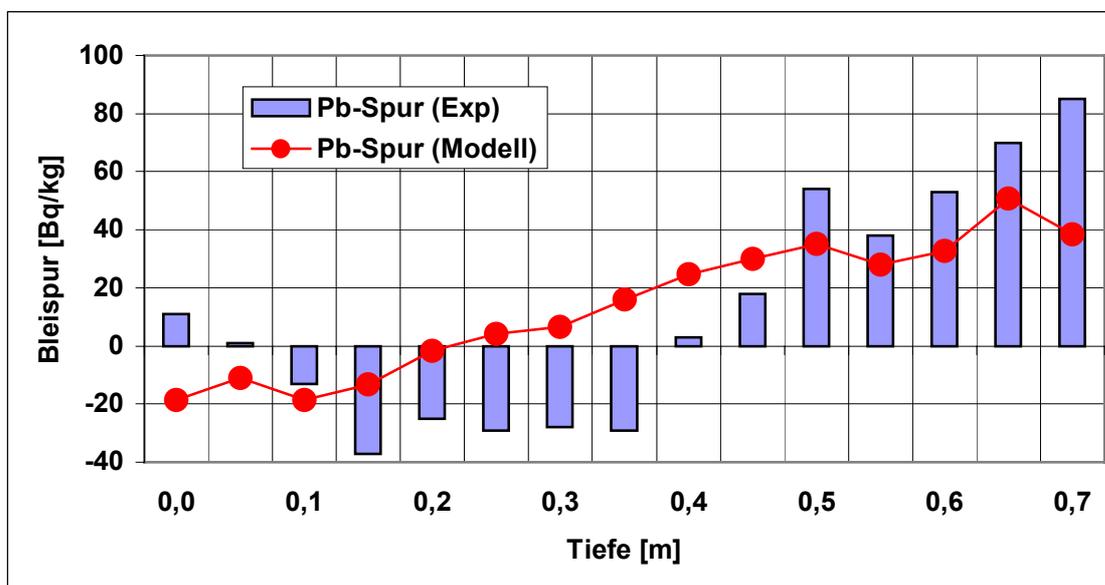
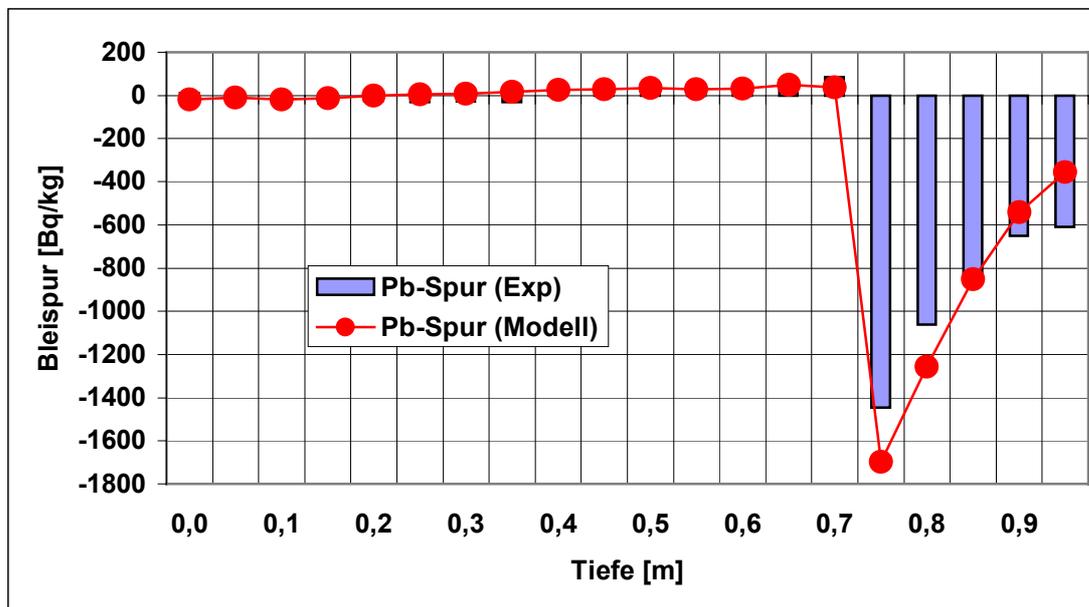


Abbildung 159: Berechnete und experimentelle Bleispur für den Aufschluss Sch20 in Abhängigkeit von der Tiefe (oberes Bild für den gesamten Schurf, unteres Bild nur für den Bereich der Abdeckung)

Der Fit zu den Daten lieferte eine große Diffusionskonstante von  $6,510^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, entsprechend einer Diffusionslänge von 1,8 m. Sie ist nur um den Faktor 2 kleiner als die Diffusionslänge von Radon in Luft. Für die Tailings ergab sich eine Diffusionslänge von 0,17 m, die im erwarteten Bereich liegt. Mit diesen Parameterwerten wurde eine Exhalationsrate von 1,1 Bq/m<sup>2</sup> s berechnet, die gut mit den in der unmittelbaren Nähe der Schürfe erhaltenen Meßwerten übereinstimmt. In Übereinstimmung mit dem im Abschnitt dargestellten Referenzbeispiel, kann die experimentelle Bleispur auch durch eine Konvektionsgeschwindigkeit von ca.  $10^{-6}$  m/s und kleinerer Diffusionslänge für die Abdeckung reproduziert werden.

Da die Konvektionsgeschwindigkeit richtungsabhängig ist, sollte eine dem Problem angepasste Modellierung die Zeitabhängigkeit der Exhalationsgeschwindigkeit in einer Weise enthalten, wie sie in Abschnitt 9.3.2 diskutiert wurde und beispielhaft in der Abbildung 127 dargestellt wurde. Entsprechende Modellrechnungen sind bisher durch IAF - Radioökologie nur in Einzelfällen durchgeführt worden und würden den Rahmen dieser Studie sprengen.

### 10.2.3.3 Schurf 24, Nordhalde Lengenfeld

Eine detaillierte Beschreibung des Schurfs 24 wurde im Abschnitt 9.1.7 gegeben. Den Bewuchs des Standortes bilden Grasgesellschaften mit Einzelbäumen wie z.B. Birken, Fichten. Die Mächtigkeit der Abdeckung betrug bei dem Schurf 24 ca. 0,5 m. Das Abdeckmaterial bestand z.T. aus schluffigem Sand bzw. Kies. Die spezifische Ra-226-Aktivität des Abdeckmaterials betrug im Mittel 100 Bq/kg, die spezifische Ra-226-Aktivität der Tailings Mittel 4500 Bq/kg.

Die Abbildung 160 zeigt die berechnete und experimentelle Bleispur für den Aufschluss Sch24 in Abhängigkeit von der Tiefe. Zu erkennen ist, dass das Defizit an Pb-210 in der obersten 30 cm mächtigen Tailingsschicht mit etwa 800 Bq/kg stark erhöht ist und mit der Tiefe annähernd konstant bleibt. Erst ab ca. 0,9 m Tiefe ist eine Verringerung des Pb-Defizits zu erkennen. Inwieweit dieses Verhalten dadurch bedingt ist, daß die Tailings über längere Zeit ohne Abdeckung Radon freisetzen konnten, kann nur durch weitere Untersuchungen geklärt werden. Der Pb-Überschuss in

der Abdeckung kann bei Weitem das Pb-Defizit in den Tailings nicht aufwiegen. Aus diesem Grund wurde die Bleispur für den Abdeckbereich separat dargestellt.

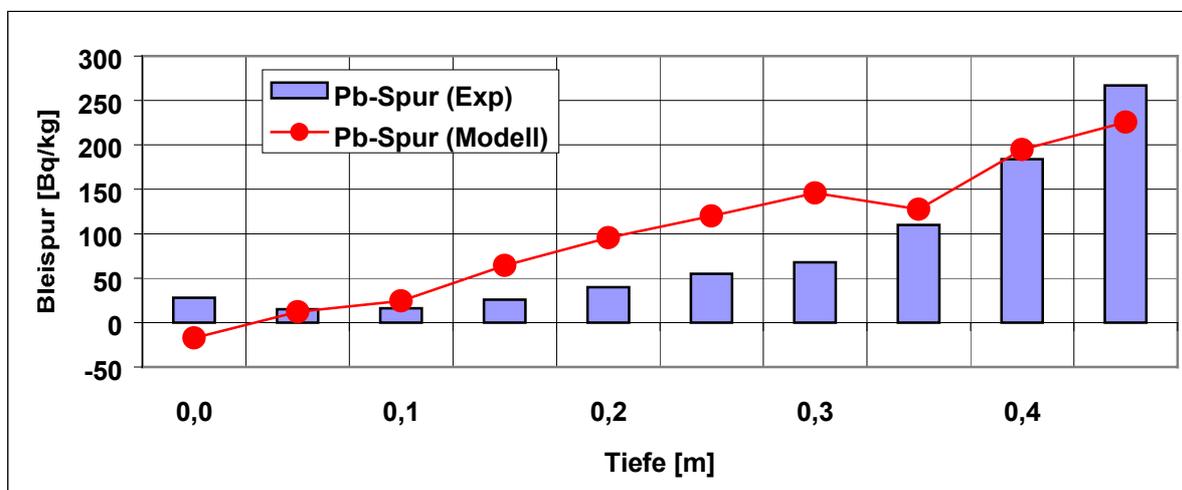
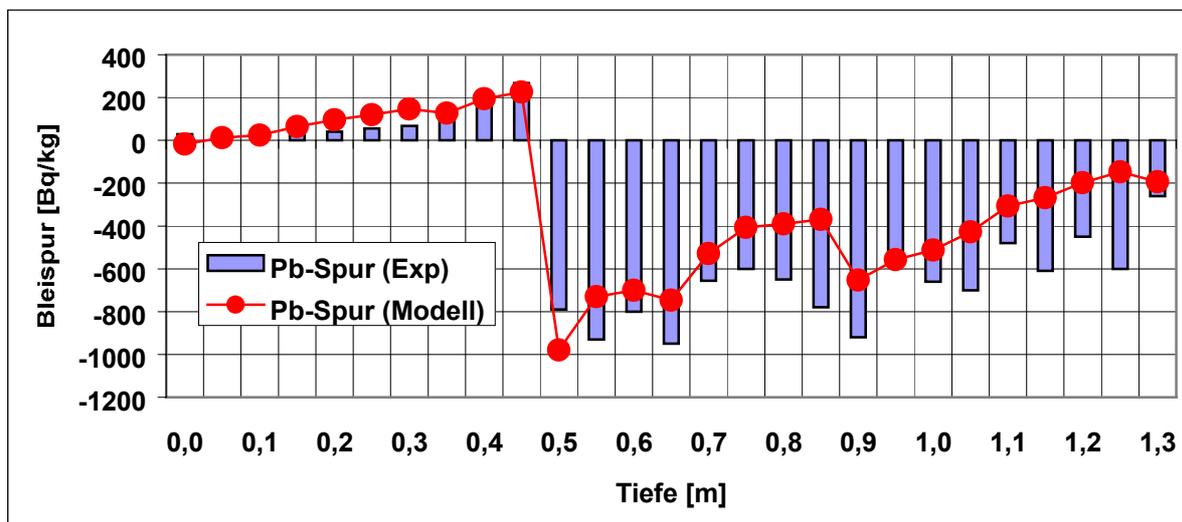


Abbildung 160: Berechnete und experimentelle Bleispur für den Aufschluss Sch24 in Abhängigkeit von der Tiefe (oberes Bild für den gesamten Schurf, unteres Bild nur für den Bereich der Abdeckung)

Der Fit zu den Daten lieferte für die Abdeckung eine Diffusionskonstante von  $2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , entsprechend einer Diffusionslänge von 1 m. Für die Tailings ergab sich ebenfalls eine vergleichsweise große Diffusionslänge von 0,8 m. Ob dies allein ein Effekt der Durchwurzelung ist, könnte nur durch weitere Untersuchungen geklärt werden. Die berechnete Exhalationsrate von  $1,1 \text{ Bq}/\text{m}^2 \text{ s}$  stimmt gut mit den Meßwerten überein, die in der unmittelbaren Nähe der Schürfe erhalten wurden. In Übereinstimmung mit dem im Abschnitt dargestellten Referenzbeispiel, kann die experimentelle Bleispur auch durch eine Konvektionsgeschwindigkeit von ca.  $10^{-6} \text{ m}/\text{s}$  und kleinerer Diffusionslänge für die Abdeckung reproduziert werden.

#### **10.2.3.4 Schurf 27, IAA Dänkriz**

Eine detaillierte Beschreibung des Schurfs 27 wurde im Abschnitt 9.1.8 gegeben. Die Mächtigkeit der Abdeckung beträgt 0,9 m. Die spezifische Ra-226-Aktivität des Abdeckmaterials liegt bei ca.  $50 \text{ Bq}/\text{kg}$ , die der Tailings bei  $5000 \text{ Bq}/\text{kg}$ .

Die Abbildung 161 zeigt die berechnete und experimentelle Bleispur für den Aufschluss Sch27 in Abhängigkeit von der Tiefe. Zu erkennen ist, dass das Defizit an Pb-210 in der obersten, ca. 20 cm mächtigen Tailingssschicht mit der Tiefe stark anwächst. Dies könnte eine Folge der stark erhöhten Ra-226-Aktivität von ca.  $8000 \text{ Bq}/\text{kg}$  sein, die in einer Tiefe von 1,25 m festgestellt wurde. Das Modell beschreibt in der Tendenz diesen Sachverhalt.

Der Fit zu den Daten lieferte für die Abdeckung eine Diffusionskonstante von  $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , entsprechend einer Diffusionslänge von 1 m. Für die Tailings ergab sich eine Diffusionslänge von 0,3 m. Dieser Wert scheint in Hinblick auf die vorliegenden Erfahrungen um Faktor 2 zu hoch zu sein. Die aus dem Fit berechnete Exhalationsrate liegt bei  $0,7 \text{ Bq}/\text{m}^2 \text{ s}$  und stimmt im Mittel gut mit dem auf dem Damm gemessenen Exhalationsraten überein.

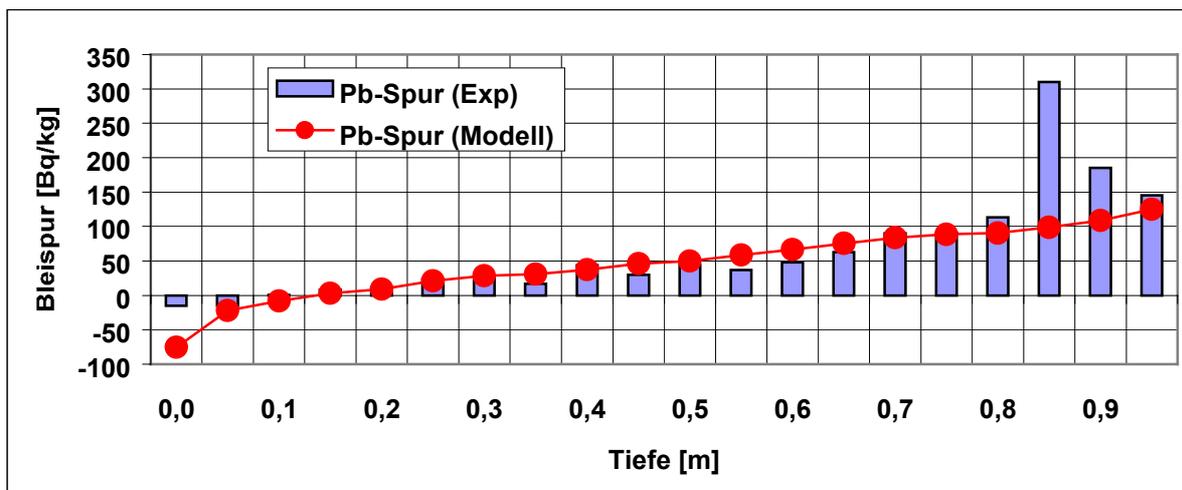
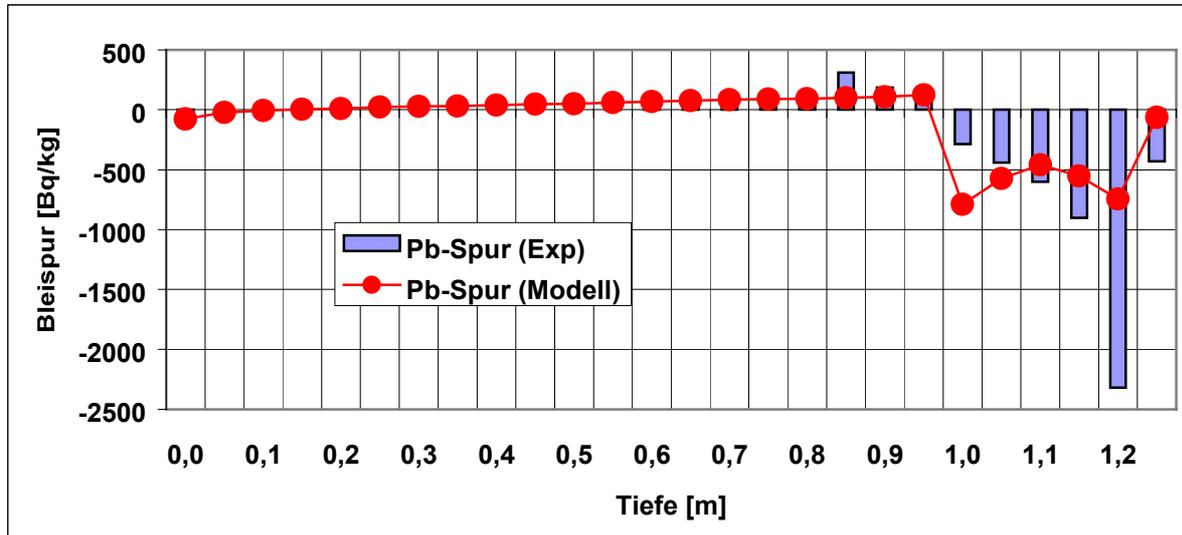


Abbildung 161: Berechnete und experimentelle Bleispur für den Aufschluss Sch27 in Abhängigkeit von der Tiefe (oberes Bild für den gesamten Schurf, unteres Bild nur für den Bereich der Abdeckung)

#### 10.2.3.5 Zusammenfassung der Modellierungsergebnisse

Als verallgemeinerungsfähiges Fazit kann aus den Ergebnissen zu ausgewählten Schürfen gezogen werden, dass für die modellmäßige Reproduktion einer sich über das gesamte Teufenintervall erstreckenden negativen Bleispur, die der maximal möglichen negativen Bleispur nahezu entspricht, eine Radonmigrationslänge von mindestens einem Meter gewählt werden muß, um die experimentellen Daten zu beschreiben. Migrationslängen von mehr als einem Meter sind als Ergebnis eines rein diffusiven Radontransports als eher unwahrscheinlich auszuschließen. Sie belegen auf diese Weise indirekt die Existenz von dominierenden konvektiven Prozessen. Damit kann im Umkehrschluß festgestellt werden, dass das Auftreten einer extrem negativen Bleispur (maximal mögliches Defizit von Pb-210 gegenüber von Ra-226) ein direkter Hinweis darauf ist, dass die Konvektion als der hauptsächliche Radontransportprozeß zu betrachten ist.

Da die Konvektionsgeschwindigkeit richtungsabhängig ist, sollte eine dem Problem angepasste Modellierung die Zeitabhängigkeit der Exhalationsgeschwindigkeit in einer Weise enthalten, wie sie in Abschnitt 9.3.2 diskutiert wurde und beispielhaft in der Abbildung 127 dargestellt wurde. Entsprechende Modellrechnungen sind bisher durch IAF - Radioökologie nur in Einzelfällen durchgeführt worden und würden den Rahmen dieser Studie sprengen.

## 11 Radondämmwirkung und Bioturbation

Bevor auf die physikalisch-technischen Zusammenhänge zwischen Radondämmwirkung und Bioturbation eingegangen wird, erscheint es zweckdienlich, die Problematik nochmals in den Gesamtzusammenhang bei der Sanierung bergbaulicher Hinterlassenschaften zu stellen.

Die übertägigen Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaus und der Uranerzaufbereitung, wie Halden und Absetzanlagen, die erhöhte Werte der spezifischen Aktivität natürlicher Radionuklide aufweisen, können zu erheblichen Strahlenexpositionen der Bevölkerung führen, deren Reduzierung auf ein akzeptables Maß ein wichtiges Ziel der Sanierung und Wiedernutzbarmachung ist.

Diese Strahlenexpositionen hängen jedoch wesentlich von den konkreten örtlichen Gegebenheiten und den Nutzungsverhältnissen ab. Diese bestimmen ihrerseits, welche Expositionspfade im speziellen Fall überhaupt relevant sind. Die Erfahrungen der WISMUT GmbH bei der Sanierung der bergbaulichen Hinterlassenschaften und die vielfältigen Untersuchungen von IAF - Radioökologie auch an Altstandorten haben gezeigt, daß für größere und mittelgroße Halden, die sich in unmittelbarer Umgebung von Wohnbebauungen befinden, der Expositionspfad „Inhalation von Radon/Radonzerfallsprodukten“ dominierend sein kann. Dies hängt nicht nur von der spezifischen Ra-226-Aktivität des abgelagerten Materials ab, sondern in bedeutendem Maße auch von den konvektiven Radontransportprozessen in der Halde selbst. Dadurch können die lokalen Freisetzungen von Radon, insbesondere am Haldenfuß oder dem Haldenplateau, um ein Vielfaches verstärkt auftreten. Hauptsächlich bei austauscharmen Wetterlagen kann sich in der freien Atmosphäre in der näheren Umgebung der Quelle eine relativ hohe Radonkonzentration ausbilden.

Auch in der unmittelbaren Umgebung von unsanierten Absetzanlagen mit sandigen Tailings kann die Freisetzung von Radon in Abhängigkeit von den örtlichen Gegebenheiten im unmittelbaren Umfeld erhebliche Strahlenexpositionen für die allgemeine Bevölkerung zur Folge haben.

In diesen Fällen wird die wirksame Reduzierung der Radonfreisetzung aus den bergbaulichen Hinterlassenschaften ein wesentliches Ziel von Sanierungsmaßnahmen.

Dabei ist der Auswahl geeigneter Abdecksysteme mit langzeitwirksamer Dämmwirkung besondere Bedeutung beizumessen. Es sei an dieser Stelle betont, daß im Prozess der Auswahl optimaler Abdecksysteme die Reduzierung der Radonfreisetzung nur ein Teilaspekt der wesentlich komplexeren Zielstellung der Wiedernutzbarmachung von Halden und Absetzanlagen ist. Nicht unbeachtet bleiben dürfen auch die Aspekte der Überwachung, Wartung/Instandhaltung und Nachsorge von sanierten Bergbauobjekten.

Die maßgebliche Zielstellung für Abdecksysteme ist vielfach die Verringerung der Niederschlagsinfiltration, um den Schadstoffaustrag über den Wasserpfad zu reduzieren. Die bisherige Praxis hat gezeigt, daß die zielgerichtete Materialauswahl, die Einbaubedingungen und die Mächtigkeit, die für die Gewährleistung einer langfristig wirksamen Reduzierung der Niederschlagsinfiltration ausgewählt wurden, auch über eine entsprechende Radondämmwirkung verfügen. Da selbst Haldenabdeckungen der WISMUT am Standort Schlema-Alberoda erst vor wenigen Jahren fertig gestellt wurden, können noch keine praktischen Erfahrungen über deren Langzeitverhalten vorliegen.

Nicht zuletzt haben Abdecksysteme von Halden und Absetzanlagen aber auch den landschaftsgestalterischen Anforderungen und den Anforderungen aus der Folgenutzung zu entsprechen. Dies beinhaltet auch die Schaffung günstiger und langzeitstabiler Verhältnisse für eine Besiedlung mit Flora und Fauna. Vielfach ist für größere Bergbauobjekte die Folgenutzung als Grünland oder Wald alternativlos, wenn ein nachträglicher Eingriff in das Halden- bzw. Tailingsmaterial (Verhinderung einer unbeabsichtigten Kontaminationsverschleppung) infolge der Nachnutzung weitestgehend vermieden werden soll. Eine Versiegelung der Flächen mit dem Ziel der Langzeitsicherung, wie teilweise bei Deponien praktiziert, würde eine Nachnutzung und Eingliederung in die bestehende Landschaft erheblich beeinträchtigen. Dies entspräche auch nicht dem Wiedernutzbarmachungsgebot des Bundesberggesetzes.

Bei allen Abdeckungen von bergbaulichen Hinterlassenschaften der letzten Jahrzehnte und auch im Deponiebau der letzten Jahre hat sich die mineralische Abdeckung mit Bodensubstraten durchgesetzt. Um zum Ausdruck zu bringen, dass

zumindest der obere Abschnitt der Abdeckschicht zielgerichtet den Lebensraum von Pflanzen und Tieren bilden soll, wird häufig dafür auch der Begriff „Rekultivierungsschicht“ verwendet.

Daraus ist die wichtige Schlussfolgerung zu ziehen, daß über lange Zeiträume die in unterschiedlichem Maße stattfindende **Bioturbation durch Flora und Fauna als inhärenter Bestandteil eines Abdecksystems zu betrachten** ist.

Es stellt sich aus diesen grundsätzlichen Sachzusammenhängen nicht die Frage, wie man die Bioturbation möglichst verhindern kann oder sollte, um eine möglichst hohe Dämmwirkung des Abdecksystems dauerhaft zu sichern. Es geht eher darum, diejenigen Lösungen zu identifizieren und bei der technischen Umsetzung zu favorisieren, die infolge der ohnehin stattfindende Bioturbation (Durchwurzelung, grabende Tiere) die ursprüngliche Funktionalität (Dämmwirkung) langfristig nicht soweit aufhebt, dass das angestrebte Ziel der Reduzierung einer Schadstofffreisetzung (im Speziellen die Radonexhalation) auf ein akzeptables Niveau nicht mehr gewährleistet werden kann.

Bei der Prognose der Dämmwirkung von Abdecksystemen, die für die Begründung und Auswahl optimaler Sanierungsentscheidungen, die technische Planung und für die Festlegung von Maßnahmen zur Qualitätssicherung von Sanierungslösungen unabdingbar ist, sind folgende Fragestellungen nach den aktuellen Erkenntnissen zu beantworten:

- Welche Materialparameter und Eigenschaften bestimmen die Dämmwirkung wesentlich?
- Welche natürlich ablaufenden Prozesse führen über längere Zeiträume zu einer Verschlechterung der Materialeigenschaften, die eine bestimmte Funktionalität gewährleisten sollen?
- Welche Transportmechanismen sind in den Abdecksystemen wesentlich und müssen bei der Quantifizierung der Dämmwirkung in Rechnung gestellt werden?
- Welche Materialeigenschaften werden durch die Einwirkung der Bioturbation (insbesondere Wurzeln und grabende Tiere) signifikant verändert?

- 
- Kann die Bioturbation langfristig durch die technische Auslegung während der Herstellung einer Abdeckung beeinflusst werden?
  - Welche Funktionalitäten eines Abdecksystems sind in ihren Anforderungen konkurrierend?
  - Welche Maßnahmen zur Erhöhung der Dämmwirkung behindern langfristig die normale Entwicklung von Flora und Fauna?
  - Wie beeinflusst die Wechselwirkung von Dämmwirkung und Bioturbation den Umfang von Überwachungs- und Nachsorgeaufwendungen?

Die vielfältigen experimentellen Untersuchungen, die im Rahmen dieses Forschungsprojektes an Altabdeckungen bergbaulicher Hinterlassenschaften durchgeführt worden sind, leisteten einen Beitrag, zur Beantwortung der aufgezeigten Fragestellungen. Nicht in jedem Fall ist es jedoch infolge des begrenzten Untersuchungsumfanges und der Spezifik der eingesetzten Untersuchungsmethoden möglich, die oben aufgeführten Fragestellungen quantitativ zu beantworten oder in Form von Gleichungen als physikalisches Modell abzubilden.

Es ist deshalb an dieser Stelle insgesamt nur zweckmäßig, die wesentlichen Erkenntnisse und Schlußfolgerungen aus den durchgeführten Arbeiten zusammenfassend beschreibend darzustellen.

- Die Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes fanden ausschließlich an Objekten des Uranerzbergbaus statt, die vor mehr als 10 Jahren entweder mit einer Rekultivierungsschicht versehen wurden oder in Teilbereichen nur eine Profilierung ohne Abdeckung erfahren haben. In keinem Fall erfolgte die Aufbringung einer Abdeckschicht mit dem Ziel, eine dauerhafte Radondämmwirkung zu erreichen. Die prinzipielle Begrünbarkeit oder die Aufforstung standen damals im Vordergrund. Das hatte zur Folge, daß bei der Auswahl des Abdeckmaterials, der Festlegung des Schichtaufbaus und der Abdeckmächtigkeit keine Anforderungen hinsichtlich der potentiellen Radondämmwirkung beachtet wurden. Die Materialauswahl wurde im Wesentlichen von der örtlichen Verfügbarkeit geprägt.

- 
- Folglich können auch keine Anforderungen an eine bestimmte Dämmwirkung in den einzelnen Fällen gestellt werden. Die existierenden Abdeckungen sind deshalb als Fallbeispiele betrachtet worden, um nach Möglichkeit allgemeinere Schlussfolgerungen ziehen zu können.
  - Ausgehend von den damaligen Kostenüberlegungen war man bemüht, die Aufforstung oder Begrünung mit Grasgesellschaften von Bergbauhalden, speziell mit geringen Abdeckmächtigkeiten, zu realisieren und die sich einstellende natürliche Sukzession als Erosionsschutz zur Wirkung kommen zu lassen. Bei der Analyse der vorhandenen abgedeckten Bergbauobjekte in Sachsen und Thüringen überwogen Abdeckmächtigkeiten bis 30 cm. Die Altdeckung an der Halde Beerwalde und die Altdeckung vom Tagebau Ronneburg wurden mit größerer Mächtigkeit gebaut, um dem negativen Einfluß geochemischer Prozesse (Versauerung) auf das Wachstum von Bäumen entgegenzuwirken.

In den meisten Fällen liegen keine Informationen/Daten über das Radonfreisetzungsverhalten vor Aufbringung der Abdeckung vor. Auch die Zeit, die ein Objekt im unabgedeckten Zustand existierte, ist relativ unsicher.

Die Altdeckung des Außendamms der IAA Dänkritz wurde ursprünglich aufgebracht, um die Durchsickerung des Damms beim Betreiben der Absetzanlage zu reduzieren. Offensichtlich hat ein relativ heterogenes Bodensubstrat (relativ hoher Sand und Kiesanteil) den damaligen Anforderungen genügt.

- In den überwiegenden Fällen hat die Aufbringung einer geringmächtigen Abdeckung unter den damaligen Prämissen dazu geführt, dass sich bis dato eine gute Begrünung (Grasgesellschaften) und ein guter Baumbewuchs ausgebildet, die sich auch teilweise in das Landschaftsbild integriert haben. Die Einnahme der Abdeckungen durch die örtlich vorhandene Flora und Fauna wurde durch das Vorhandensein kontaminierter Bergbaurückstände kaum beeinträchtigt. Im Falle von steilen Böschungen war teilweise ein relativ geringes Wachstum der Bäume zu verzeichnen, was auf das ungenügende Wasser-

speichervermögen (Versorgung der Baumwurzeln) der obersten Bodenschicht zurückgeführt werden kann.

- Die Ausbildung der Wurzeln in der Abdecksicht und bis hinein in das Haldenmaterial oder die Tailings richtet sich offensichtlich nach dem Wasserhaushalt in den Schichten. In den Grobporen ( $> 10 \mu\text{m}$ ) befindet sich meist nur kurzfristig Wasser. Es versickert in diesen Poren rasch in größere Tiefen, so dass es von höheren Pflanzen praktisch kaum aufgenommen werden kann. In den Feinporen (im Lehm ca. 15 Vol%, im Ton ca. 35 Vol%) steht das gespeicherte Wasser den meisten Pflanzen nicht verfügbar. Die Wurzeln in ton- und lehmhaltigen Abdeckungen weichen in Risse, Klüfte und Grobporensysteme aus. Bei Aufgrabungen unter winterlichen Bedingungen sind die Mittelporen (0,2 bis  $10 \mu\text{m}$ ) häufig mit Wasser gefüllt, so daß in der feuchten Jahreszeit die Gaspermeabilität signifikant geringer ist. Unter sommerlichen Bedingungen und einem ausgeprägten Wachstum (hohe Verdunstungsleistung durch Pflanzen und Bäume) wird in den Mittelporen in Abhängigkeit von der Tiefe ein stark wechselndes Ausmaß der Wassersättigung der Poren (bzw. der Bodenfeuchte) festgestellt. Der Wassergehalt in den Abdeckschichten bestimmt die Gasdurchlässigkeit und damit die Radon-Dämmwirkung wesentlich. Ein Abdecksystem sollte zur Reduzierung des diffusiven und konvektiven Radontransportes in den Mittelporen ein relativ gutes Wasserspeichervermögen besitzen.
- Mit geeigneter Feldmesstechnik (Tensiometer, TDR-Sonden, Mikrowellen-Feuchtemeßgeräte) kann der Wasserhaushalt in den Fein- und Mittelporensystemen kontrolliert und geprüft werden. Der Austrocknung des Bodensubstrats von Abdeckungen sollte entgegengewirkt werden. Diese Funktion übernehmen Bäume durch Beschattung der Oberfläche.
- Das Puffervermögen eines Abdecksystems für den versickernden Niederschlag und möglichst ein gleichbleibender Wassersättigungsgrad in den unteren Bereichen eines Abdecksystems ist für die Radondämmwirkung und die normale Bewuchsentwicklung eine wesentliche Funktionalität. Eine Verdich-

tung des Bodensubstrates, um der Radonexhalation vorzubeugen, ist bei der Herstellung der Abdeckung in diesem Zusammenhang wahrscheinlich nicht uneingeschränkt förderlich. Dies ist auch unter dem Aspekt zu betrachten, dass sich eine hohe Bodenverdichtung auch nur über begrenzte Zeiträume aufrecht erhalten lässt.

- Die stichprobenartig ermittelten Gaspermeabilitäten unter Feldbedingungen ergaben in vielen Fällen Hinweise, daß im Bereich von intensiver Durchwurzelung Grobporensysteme und Wurzelkanäle die Gasdurchlässigkeit signifikant erhöhen können. Die Gaspermeabilität kann um Größenordnungen vom Mittelwert, der durch die normale Porengrößenverteilung des Bodens bedingt ist (etwa  $10^{-12}$  m<sup>2</sup>) abweichen<sup>5</sup>. Durch Versuche mit einer Tracerflüssigkeit bzw. auch mit Tracergas konnte der Nachweis erbracht werden, daß ein bevorzugter konvektiver Gastransport über größere Entfernungen, selbst durch das gesamte Abdecksystem bei geringen Druckunterschieden stattfinden kann. Die modellhafte Abbildung von bevorzugten Fließwegen oder Grobporensystemen, die auch von Pflanzenwurzeln gebildet werden können sowie die Bewertung ihrer Auswirkungen auf den Radontransport sollte deshalb zukünftig einer näheren Untersuchung unterzogen werden.
- Die Bleispurprofile, die eine integrale Information über den Radontransport von einigen Jahrzehnten liefern, lassen sich in den verschiedenen Aufgrabungen nicht unter Annahme eines diffusiven Transportmechanismus verstehen. Selbst in Abdeckungen mit größerer Mächtigkeit ist mit einem signifikanten Anteil vom konvektiven Radontransport zu rechnen. Geringmächtige Abdeckungsschichten mit hoher Wassersättigung können unter Einbaubedingungen kurzzeitig eine gute Radondämmwirkung vortäuschen, die nach wenigen Jahren durch die Herausbildung von Grobporen und Wurzelkanälen verloren gehen kann. Es ist somit davon auszugehen, daß Abdeckungsschichten mit einer geringen Mächtigkeit langfristig kaum eine Radondämmwirkung aufweisen werden.

- 
- Bei der Abschätzung der effektiven Gaspermeabilität eines Abdecksystems kann durch Extrapolation der Bodeneigenschaften unter Laborbedingungen oder durch lokale Messungen im Einbauzustand eine signifikante Unterschätzung erfolgen. Die Gaspermeabilität ist skalenabhängig. Tracergasuntersuchungen sind prinzipiell geeignet, um die effektive Gaspermeabilität über größere Bereiche im Zustand der intensiven Durchwurzelung zu untersuchen. Hierzu sind selbst international kaum Daten verfügbar.
  - Zielgerichtete Verdichtungen des Bodensubstrats zur Erhöhung der Radondämmwirkung können sich auf die normale Pflanzenentwicklung, insbesondere im Anfangsstadium, negativ auswirken. Langfristig wird die Bodenverdichtung durch natürliche Auflockerungsprozesse (Frost-Tauwechsel, o-ä.) wieder aufgehoben. Bodensubstrate mit relativ hohem Schluffanteil neigen zur Rissbildung (Trockenrisse, Schrumpfungen). Das Wasser in den Feinporen (Sand 3 Vol%, Lehm ca. 15 Vol%, Ton ca. 35 Vol%) ist nicht "pflanzenverfügbar".
  - Die Untersuchungen zur Korngrößenabhängigkeit der Bleispur und zum Verhalten des Emanationskoeffizienten ergaben, daß Pflanzenwurzeln den Boden weiter aufschließen können und das Radonfreisetzungverhalten der Kornfraktionen beeinflussen. Für die Bewertung des Radonpotentials eines Haldenmaterials sollte der Feinkornanteil bei der Datengewinnung entsprechende Beachtung finden.
  - Ist eine Radondämmwirkung zur Reduzierung der Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung in der näheren Umgebung der bergbaulichen Hinterlassenschaft erforderlich, so sind an das Abdecksystem hinsichtlich der Materialauswahl, dem Schichtaufbau und der Schichtmächtigkeit bestimmte Mindestanforderungen zu stellen. Hierbei sollte zum Ansatz gebracht werden, daß die oberste stark durchwurzelte Schicht langfristig kaum eine Dämmwirkung

---

<sup>5</sup> A. Siehl berichtete beim 16. Radonstatusgespräch Berlin, 2003, dass in Deutschland der überwiegende Teil der flächenmäßig gemessenen Gaspermeabilitäten der oberflächennahen Schicht im Bereich von  $10^{-12}$  m<sup>2</sup> bis  $10^{-11}$  m<sup>2</sup> liegt.

infolge konvektiver Transportprozesse haben wird. Eine Verdichtung der untersten Schicht in einem Abdecksystem reduziert eher die Wurzeldichte.

- Das bessere Verständnis über die konvektiven Transportprozesse innerhalb einer Halde kann dazu ausgenutzt werden, den Bereichen einer Halde, die intensiv durchströmt werden (z. B. grobstückige Bereiche infolge der Schütthistorie, Haldenfußbereich) bei der Auswahl der Abdeckkonfiguration und der Beeinflussung des Wasserhaushaltes besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Der Tracergasversuch zum Durchströmungsverhalten einer Halde hat den experimentellen Nachweis erbracht, daß die Böschungsflanken bezüglich der Radonfreisetzung und folglich auch der Dimensionierung der Abdeckung nicht als kritisch anzusehen sind. Hier bestimmt die Erosionssicherheit und die Standsicherheit des Bewuchses die Abdeckkonfiguration. Hoher Oberflächenabfluß infolge einer dichten Abdeckoberfläche erhöht die Erosionsgefahr. In der WISMUT hat sich z.B. eine humusreiche lockere Oberbodenschicht bewährt, wenn das auch auf den ersten Blick für die Radondämmwirkung aus der Sicht der Materialeigenschaften (hohe Gasdurchlässigkeit) nachteilig erscheint.

## 12 Empfehlung für die Dimensionierung von Abdeckungen

In Auswertung der Recherchen im Rahmen der Projektarbeit und unter Beachtung der Schlussfolgerungen bezüglich der Wechselwirkung von Bioturbation und Radondämmwirkung werden folgende Empfehlungen für die Dimensionierung von Abdecksystemen für bergbauliche Hinterlassenschaften unter Berücksichtigung der Langzeitaspekte und der möglichen Nachsorge- und Pflegeaufwendungen für hervorhebenswert gehalten:

1. Eine erforderliche Radondämmwirkung eines Abdecksystems ist aus der potentiell möglichen Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung bei der Folgenutzung zu begründen. Es sind in jedem Fall Einzelfallentscheidungen. Das Erfordernis einer bestimmten Radondämmwirkung ergibt sich weniger aus dem radioaktiven Inventar einer Halde oder Absetzanlage, sondern vielmehr aus dem speziellen Freisetzungverhalten und der Situation im unmittelbaren Umfeld.
2. Es ist anzustreben, Abdeckungen von Halden und Absetzanlagen so auszulegen, daß die relevanten Zielstellungen zur Reduzierung der Radonfreisetzung langfristig sicher, mit möglichst geringen Kosten für die Herstellung sowie für die langfristige Wartung und Nachsorge erreicht werden.

Die Einbauparameter sind vorrangig für die technische Standsicherheit maßgebend. Die Prognose der erreichbaren Dämmwirkung sollte die Alterung des Abdecksystems (Auflockerung, Porenbildung) und das Vorhandensein eines normal ausgebildeten Bewuchses (einschließlich eines voll entwickelten Wurzelsystems) und die natürliche Besiedlung durch heimische Fauna in geeigneter Form zum Ansatz bringen. Die Verhinderung von Bewuchs oder grabenden Tieren durch administrative Maßnahmen ist unter dem Aspekt des Wartungs- und Nachsorgeaufwandes unrealistisch. Der Bewuchs ist ein inhärenter Bestandteil eines Abdecksystems, der auch verschiedene Funktionalitäten erfüllen muß. Die Sanierung eines Bergbauobjektes ist ohne die Ausbildung eines sich normal entwickelnden Bewuchs als noch nicht abgeschlossen zu be-

trachten. Die Etablierung von Flora und Fauna auf dem Abdecksystem ist ein natürlicher Vorgang, der nicht erst nach der Sanierung in Betracht zu ziehen ist, sondern von vornherein in die Sanierungskonzeption als wichtiges Element mit ins Kalkül gezogen werden sollte.

3. Die bislang vorliegenden Kenntnisse zur Langzeitbeständigkeit von Abdecksystemen beschränken sich aufgrund der historischen Entwicklung auf einen Zeitraum von weniger als 30 Jahren. Um den aktuellen Sachstand zusammenzuführen und in die Planung entsprechender Sanierungsvorhaben einbeziehen zu können, bedarf es weiterhin regelmäßiger Recherchen und gezielter Untersuchungen an bereits fertiggestellter Abdecksysteme.
4. Die Überlegungen zur Modifizierung mineralischer Abdecksysteme unter Verwendung am Standort verfügbarer Bodensubstrate sind nicht als abgeschlossen zu betrachten. Es sollte vermieden werden, bereits hergestellte Abdeckkonfigurationen als „Standard“ zu betrachten und sie auf alle noch ausstehenden Anwendungsfälle übertragen zu wollen. Es wird noch genügend Spielraum für die Entwicklung alternativer Abdeckkonfigurationen unter Beachtung der objektspezifischen Besonderheiten gesehen. Die Abdeckkonfiguration muß auch nicht notwendigerweise für ein bestimmtes Objekt vollkommen einheitlich gestaltet werden. Es macht Sinn, sich auf die Problemstellen der Schadstofffreisetzung zu konzentrieren.
5. Es ist nicht erforderlich, die Radonfreisetzung vollkommen zu verhindern, sie muss ggf. nur auf ein akzeptables Niveau reduziert werden. Dem kann verbal auch dadurch Rechnung getragen werden, dass nicht von Abdichtung oder Dichtschicht gesprochen wird, sondern als Zielstellung langfristig eine Dämmwirkung angestrebt wird, die nicht allein durch die Radonfreisetzung zu begründen ist.
6. Aktuelle Erfahrungen des Deponiebaus haben ergeben, daß bindige Dichtungsschichten von Rissen durchzogen und stellenweise völlig durchwurzelt waren (Wurzelintrusionen) und auch für ein mittleres Niederschlagsniveau eine Mächtigkeit der darüber angeordneten Rekultivierungsschicht von 0,75 m

über der Dichtschicht nicht ausreichend sein muß, um die Funktionalität der Dichtschicht zu gewährleisten.

7. Wald als Folgenutzung einer bergbaulichen Hinterlassenschaft mit intensiver Durchwurzelung und hoher Interzeption in abgestuften Beständen weist relativ hohe Evapotranspirationswerte auf. Sie benötigen ausreichend mächtige, locker gelagerte und tief durchwurzelbare Böden mit hoher pflanzenverfügbaren Wasserspeicherkapazität. Als Folge einer Verdichtung der untersten Schichtbereiche eines Abdecksystems kann das Wurzelwachstum direkt (höherer Eindringwiderstand) und indirekt (durch Sauerstoffmangel) deutlich erschwert werden. Diskussionen zu Festlegungen zur Mindestmächtigkeit von Rekultivierungsschichten werden noch kontrovers diskutiert und sollen nicht als abgeschlossen betrachtet werden.
8. Folgende Randbedingungen sollten für die Konzipierung eines an den jeweiligen Standort optimal angepasstes Abdecksystem beachtet werden:
  - Klimatische Bedingungen,
  - Lage und Geometrie des Objektes,
  - Verfügbarkeit, Qualität und Preis der Abdeckmaterialien,
  - Folgenutzung der sanierten Oberfläche gemäß den standortspezifischen Gegebenheiten.
9. Das Abdecksystem, das eine signifikante Radondämmwirkung erzielen soll, müsste mindestens aus einer 1 m dicken Schicht (entspricht der mittleren Rn-Diffusionslänge im bindigen Boden) aus kulturfähigem Bodenmaterial bestehen. Der Bewuchs hat im Sinne der Nachhaltigkeit der Sanierungslösung hinreichenden Schutz gegen Wind- und Wassererosion zu bieten. Durch eine hohe nutzbare Feldkapazität (Wasserspeichervermögen), eine gewisse Oberflächenneigung (Abfluss), eine optimierte Bepflanzung und auf den Wurzelraum abgestimmte Mächtigkeit der Abdeckung könnten langfristig vertretbare Radondämmwirkungen erreicht werden.

10. Der Parameter zur Qualitätssicherung bei der Auswahl und beim Einbau des entsprechenden Materials ist bei Sanierungsvorhaben der WISMUT hauptsächlich der  $k_f$ -Wert. Er erfasst die Bodeneigenschaften ohne Risse und Grobporensysteme und lässt kaum Rückschlüsse auf die Durchlässigkeit/Gaspermeabilität unter langfristigen Feldbedingungen zu. Hierzu sind geeignete Verfahren zur in situ Bestimmung der Gaspermeabilität zu entwickeln und praxistauglich zu gestalten. In dieser Studie sind dazu entsprechende Vorarbeiten geleistet worden.
11. Eine Verdichtung erfolgt erfahrungsgemäß zugunsten von Feinporen, die Totwasser enthalten, und zu Lasten von Grob- und Mittelporen, die Wasser pflanzenverfügbar speichern können. Der pflanzenverfügbare Bodenwasservorrat ist eine wichtige Zielgröße, der den Gas- bzw. Radontransport unter ungesättigten Bedingungen auch begrenzen kann und damit zur Radondämmwirkung beiträgt.
12. Bei Halden mit einer stark ausgeprägten Konvektion sollten vor Aufbringung der Abdeckung Maßnahmen zur Verringerung der Konvektionsgeschwindigkeit und der Radonwegsamkeit in der Halde in betracht gezogen werden. Es ist zweckmäßigerweise zu prüfen, ob dadurch der Aufwand für die Dämmwirkung der Abdeckung in bestimmten Grenzen reduziert werden kann.
13. Den Heterogenitäten im Material der Abdeckschicht und infolge der Bioturbation ist verstärkt Rechnung zu tragen. Hierzu besteht noch Untersuchungsbedarf.

### 13 Empfehlungen für Bewertungsmethoden

Die endgültige Entscheidung über die Dimensionierung von Abdecksystemen für industrielle Absetzanlagen, den aus der Sicht des Strahlenschutzes kompliziertesten bergbaulichen Hinterlassenschaften, steht noch aus. Die vorliegenden Konzepte und Planungen der WISMUT GmbH befinden sich gegenwärtig bei den zuständigen Behörden im Begutachtungsprozess. Die formale Übertragung bisheriger technischer Lösungen für die Abdeckung von Bergbauhalden mit erhöhter Radonfreisetzung an den WISMUT-Standorten auf die noch zu sanierenden Objekte an den sogenannten Altstandorten ist aus neueren Ergebnissen heraus überdenkenswert. Damit macht es Sinn, die Bewertungsmethoden dem aktuellen Kenntnissstand ständig anzupassen und neue Erkenntnisse zu gewinnen und auch anzuwenden.

Bei der Konzipierung von Abdecksystemen für radiologisch relevante Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaus sind sehr verschiedenartige Aspekte zu berücksichtigen, so dass es sich insgesamt um eine sehr komplexe Aufgabe handelt. Es hat sich in der bisherigen Praxis bei WISMUT bewährt, den Aufbau des Abdecksystems, die Materialauswahl, die Herstellungsbedingungen des Abdecksystems, die Herstellungstechnologie und nicht zuletzt die Auswahl einer an die Landschaft angepassten Begrünung in einem Optimierungsprozess nachvollziehbar zu begründen. Die Herstellungskosten, die Pflege- oder Nachsorgekosten und die Gewährleistung der Folgenutzung fließen dabei wesentlich ein. Die Anforderungen an einzelne Parameter können hinsichtlich bestimmter Funktionalitäten auch gegenläufig sein. Auch die Formulierung von bestimmten Mindestanforderungen zur Gewährleistung der langfristigen Funktionsfähigkeit hat sich grundsätzlich bewährt.

Die speziellen Aspekte der Radon-Dämmwirkung sind hier einzuordnen und können bei der Konzipierung von Abdecksystemen nicht losgelöst behandelt werden. Die im Weiteren aufgeführten Empfehlungen konzentrieren sich entsprechend der Zielstellung der Studie (Wechselwirkung Rn-Dämmwirkung - Bioturbation) folglich nur auf einige ausgewählte Teilaspekte und sind damit in den aktuellen Bearbeitungsstand und die bewährten Methoden entsprechend einzuordnen.

Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführten Recherchen, die Arbeiten zur Weiterentwicklung bestimmter Modellvorstellungen und die teils unter dem Aspekt der Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaus ein Novum darstellenden experimentellen Untersuchungen an bereits seit mehreren Jahren existierenden Altabdeckungen haben ergeben, dass im oben genannten Optimierungsprozess bestimmte Aspekte und Bewertungsmethoden zur Rolle der Bioturbation zukünftig verstärkt in der Bewertung Berücksichtigung finden sollten, um die gegenwärtig noch existierende Bewertungsunsicherheit zum Langzeitverhalten der konzipierten Abdecksysteme zu verringern.

Die Bioturbation wurde in der Vergangenheit bereits vielfältig in Form von Studien und Beobachtungen an natürlichen Böden oder Bergbauobjekten beschreibend untersucht. Die positiven oder auch negativen Auswirkungen auf bestimmte Funktionalitäten (z. B. die Radondämmwirkung oder die Versickerungsrate) ließ sich häufig nur schwer quantitativ ermitteln oder in Form von Modellen abbilden. In den meisten Fällen waren der Zustand und die Materialeigenschaften vor einsetzender Bioturbation nicht ausreichend bekannt, so dass die Veränderungen nicht zweifelsfrei sichtbar gemacht werden konnten. Hinzu kam teilweise ein begrenztes Verständnis der wesentlichen Prozesse in den bergbaubedingten Aufschüttungen. Die Untersuchung einer ausgeprägten Bioturbation an Altabdeckungen mit neuartigen Methoden (Bleispurmethode, Tracergastechnologie, Tracerflüssigkeiten) hat die Möglichkeit eröffnet, zumindest die Auswirkungen auf die Radon-Dämmwirkung besser quantifizieren zu können.

Infolge der hohen Komplexität des Untersuchungsgegenstandes ist die Methode der vergleichenden experimentellen Untersuchung typischer Zustände bereits existierender Altabdeckungen (so weit verfügbar) mit signifikanten Vorteilen verbunden. Die natürlich ablaufenden Alterungsprozesse und Anpassungsprozesse des Abdecksystems an die örtlichen Umweltbedingungen über Jahre oder Jahrzehnte sind durch Testabdeckungen und Modellanlagen mit wenigen Jahren Beobachtungszeit nur im begrenzten Maße simulierbar.

Die durchgeführten Arbeiten im Rahmen dieses Forschungsprojektes bekräftigen folgende Aussagen:

- Für die Dimensionierung von Abdecksystemen mit Radondämmeigenschaften sind ein genaues Prozessverständnis in einer Halde oder Tailingsaufschüttung und die Identifikation der wesentlichen Einflussparameter unabdingbar. Eine ausschließliche Abbildung der Prozesse durch generalisierte Modellannahmen wird als nicht hinreichend eingeschätzt. Die objektspezifischen Besonderheiten, die für die Dimensionierung der Abdeckung wesentlich sein können, sind nur durch zielgerichtete experimentelle Objektuntersuchungen erfassbar.
- Der konvektive Radontransport ist in den überwiegenden Fällen für erhöhte Radonfreisetzungsraten verantwortlich. Damit ist die realistische Bestimmung der Gaspermeabilität als Materialeigenschaft und objektspezifische Eigenschaft als auch die Konvektionsgeschwindigkeit unter bestimmten Bedingungen (Temperatur in der Halde und in der Atmosphäre) für das Systemverhalten wesentlich.
- Die Methode des flächenhaften Screenings mit Radondetektoren in geringer Höhe auf der Oberfläche des unabgedeckten Objektes ermöglicht die Lokalisierung und Visualisierung bevorzugter Radon-Freisetzungsbereiche und deren jahreszeitlichen Veränderungen. Die Haldenoberfläche ist für die Dimensionierung eines Abdecksystems nicht notwendigerweise als einheitlich zu behandeln.
- Die Untersuchung des konvektiven Lufttransportes im Inneren einer Halde mittels der vorgestellten Tracergastechnologie ermöglicht die Quantifizierung und Verifizierung der Konvektionsprozesse und die Abschätzung der objektspezifischen Konvektionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen (insbesondere den Temperaturbedingungen). Es ist eine effektive Methode der experimentellen Voruntersuchung am konkreten Objekt.

- Sollte sich zur Unterbindung des konvektiven Radontransportes die Aufbringung hochwertigerer Abdeckungen in bestimmten Teilbereichen des Objektes als sinnvoll erweisen, so kann nach Herstellung dieser Abdeckung mittels Tracergastechnologie die Wirksamkeit überprüft werden. Es könnte z.B. durchaus auch zweckdienlich sein, die Abdeckung abschnittsweise herzustellen und so dem Systemverhalten anzupassen.
- Für den konvektiven Radontransport in der Halde, aber auch ggf. in der Abdeckung ist die Kenntnis der Gaspermeabilität als wesentlicher Transportparameter erforderlich. Die Gaspermeabilität eines mineralischen Abdecksystems mit Feinporen und Grobporen (auch durch Bioturbation bedingt) ist skalenabhängig. Der Gastransport in Grobporensystemen, Rissen oder Heterogenitäten kann allein durch laborative Materialuntersuchungen nicht erfasst werden. Hierzu sind Versuche zur „großräumigen“ Gaspermeabilität an Bodensubstraten oder Altdeckungen mit normal ausgebildeter Bioturbation erforderlich. Dies kann ebenfalls unter Zuhilfenahme von Tracergas oder Gasbrunnen erfolgen. Die Versuchsmethodik ist nicht im erforderlichen Maße verfügbar und bedarf einer zielgerichteten, problemangepassten Entwicklung. Im Rahmen des Projektes konnte nur die Machbarkeit aufgezeigt werden.
- Die Bleispur-Methode eröffnet die Möglichkeit, den realen Zustand der Radonfreisetzung über längere Zeiträume integrierend zu erfassen. Die entsprechende Untersuchung der Bleispur an charakteristischen Radonaustrittsbereichen trägt zur Identifikation von objektspezifischen Problemstellen erhöhter Radonfreisetzung bei. Die maximal mögliche negative Bleispur in einer ungedeckten Objektoberfläche bis in größere Tiefen ist eine effiziente Nachweismethode für Bereiche mit hoher konvektiver Radonfreisetzung.
- Die Untersuchungen im Rahmen des Projektes haben ergeben, dass nach wie vor auch die klassischen Methoden zur Charakterisierung der Radonfreisetzung (Messung der Rn-Exhalationsrate, des Bodenradonprofils, der Gaspermeabilität, ergänzt durch begleitende Messungen der Bodenfeuchte und der

Saugspannung) weiterhin für die Charakterisierung des Ausgangszustandes unabdingbar sind.

Bezüglich der Notwendigkeit eines Langzeitmonitorings zur Erfassung möglicher Veränderungen der Radondämmeigenschaften von Abdecksystemen existieren unterschiedliche Auffassungen. Die Befürworter von möglichst kontinuierlich arbeitenden Monitoringsystemen begründen dies zum großen Teil mit den gegenwärtig existierenden erheblichen Unsicherheiten bezüglich der Charakterisierung des Langzeitverhaltens.

Dagegen spricht grundsätzlich einerseits, dass die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Störfalles oder des Auftretens eines Defektes am Abdecksystem, der die Funktionalität so wesentlich verschlechtert, dass der Zustand nicht mehr akzeptabel ist, als eher „seltenes Ereignis“ einzustufen ist. Die Monitoringsysteme befinden sich dann die meiste Zeit in einer Art „Warteposition“. Andererseits sind solche Prozesse, wie die fortschreitende Bioturbation, relativ langsam aber auch nicht stetig ablaufende Vorgänge, so dass keine Notwendigkeit für eine zeitnahe Beobachtung des Radondämmverhaltens einer Abdeckung im Sinne eines kontinuierlichen Monitorings besteht. Geringfügige und stetig zunehmende Verschlechterungen sind häufig schwer identifizierbar, zumal das Abdecksystem infolge des sich ständig ändernden Wasserhaushaltes und der veränderten durch die Jahreszeit bedingten Vegetationsbedingungen keinen statischen Zustand annimmt.

Die Kontrolle von Abdecksystemen mit einfachen visuellen Methoden und mit geeigneten objektiven Meßmethoden in bestimmten Abständen erscheint unter anderen Gesichtspunkten jedoch gerechtfertigt und sinnvoll. Da weltweit kaum auf praktische Erfahrungen zum Langzeitverhalten vergleichbarer Abdecksysteme zurückgegriffen werden kann, besteht ein wissenschaftliches und ingenieurtechnisches Interesse an der Verifizierung der vorgenommenen Prognosen und Annahmen. Dies allein rechtfertigt die genauere Untersuchung der verschiedenen Funktionalitäten, so auch der Radondämmwirkung, durchzuführen, nachdem sich ein Gleichgewichtszustand beginnt einzustellen und sich Flora und Fauna auf dem Abdecksystem etabliert haben sowie die Folgenutzung für einen gewissen Zeitraum stattgefunden hat. Das wird in 5

Jahren, in 10 Jahren und nach mehreren Jahrzehnten zu unterschiedlichen Aussagen führen. Kurzfristige Kontrollen der Funktionalitäten innerhalb der ersten Jahre nach der Herstellung ermöglichen die Identifikation von Baumängeln und ihre sofortige Behebung. Neben der Kontrolle sind auch Wartungs- und Pflegemaßnahmen erforderlich, um eine zielgerichtete Entwicklung des Ökosystems zu befördern bzw. zu beschleunigen. Es ist auch plausibel, dass begleitend zu Pflege- und Wartungsarbeiten, insbesondere nach extremen Klimaeinwirkungen, wie Starkregenfälle oder anhaltende Trockenheit, bestimmte Kontrollen zur Funktionsfähigkeit zweckdienlich oder sogar notwendig sind.

Unter Beachtung der Tatsache, dass das Betreiben von umfangreichen Monitoring-Systemen, die kontinuierlich arbeiten oder in relativ kurzen Zeitabständen unter vergleichbaren Bedingungen ständig die Beprobung wiederholen, über lange Zeiträume nach Abschluß der technischen Sanierungsmaßnahmen sehr kosten- und personalintensiv sein kann, wird empfohlen, diese Vorstellungen auf den Prüfstand zu stellen. Die experimentellen Methoden, die im Rahmen des Forschungsprojektes zum Einsatz kamen, stellen zum Teil neue Möglichkeiten der objektiven, messtechnischen Kontrolle für die sich vollziehenden Änderungen in der Funktionalität einer mineralischen Abdeckung hinsichtlich des Radontransports dar und liefern einen Beitrag, das Prozessverständnis der in der Halde dominierenden Radontransportvorgänge zu entwickeln und daraus neue Varianten der Sanierung ins Kalkül zu ziehen.

- Dabei ist es möglicherweise ausreichend, komplexe Untersuchungen exemplarisch an ausgewählten Objekten in größeren Zeitabständen durchzuführen. Zum späteren Vergleich sollte mit diesen Meßmethoden bei gleicher Vorgehensweise der Zustand nach Fertigstellung der Abdeckung und der Erstbegrünung zur Erosionssicherung charakterisiert werden.
- Bei Aufgrabungen zur Charakterisierung der Veränderungen im Inneren des Abdecksystems liefert die Anwendung der Bleispurmethode im Tiefenprofil den direkten Nachweis der über den gesamten Zeitraum integrierten Dämmwirkung. Es wird nicht der Momentanzustand der Dämmwirkung abgebildet. Es gibt keine vergleichbare Untersuchungsmethode, die dies ebenfalls zu leis-

ten vermag. Der Einfluß der Bioturbation ist prinzipiell erfassbar. Der Momentanzustand der Dämmwirkung kann durch Exhalationsmessungen zusätzlich bestimmt werden.

- Die Versickerung eines Farbtracers vor der Aufgrabung ermöglicht die Visualisierung der Fließwege für Wasser und Luft in den Abdecksystemen. Inhomogenitäten werden vor Ort auf einfache Weise sichtbar gemacht.
- Die Installation von Tracergasaufgabestellen unter der Abdeckung und die Messung der Transportgeschwindigkeit eines Tracergases durch die Abdeckung im großflächigem Maßstab zu bestimmten Kontrollterminen ermöglicht die zerstörungsfreie Überprüfung und Quantifizierung der Wegsamkeiten für einen konvektiven Radontransport durch das Abdecksystem. Mit dieser Technologie können lokale Schwachstellen erhöhter Gasdurchlässigkeit identifiziert und ggf. ausgebessert werden. Hinsichtlich der problemangepaßten zerstörungsfreien Kontrolle der Gasdurchlässigkeit/Permeabilität ist noch methodische Entwicklungsarbeit zu leisten.
- Die flächenhafte Installation von Radondetektoren in geringer Höhe über der Abdeckung in ausgewählten Kontrollzeiträumen ermöglicht eine schnelle, kostengünstige und effiziente Situationseinschätzung. Da Messzeiten von etwa einer Woche bereits ausreichen können, kann bei Bedarf der Momentanzustand durch ein Kontrollorgan bestimmt werden oder über ein ausgewähltes Jahr die Dynamik infolge der Wasserhaushaltsschwankungen abgebildet werden.
- Es wird wesentlich eingeschätzt, in bestimmten Abständen, den Wasserhaushalt (Wassergehalt in der ungesättigten Abdeckschicht), der auch für die Radon-Dämmwirkung bedeutsam ist, zu erfassen. Hierfür können moderne Feldmeßmethoden (TDR-Sonden, Mikrowellenabsorptionssonden, Tensiometer) eingesetzt werden.
- Zum Nachweis von ablaufenden Alterungsprozessen im Inneren des Abdecksystems (Auflockerung, Rissbildung) reichen visuelle Beobachtungen an der

Oberfläche nicht aus. Hierfür sind zerstörungsfreie Meßmethoden erforderlich, die räumliche Materialvariabilitäten von tatsächlich stattfindenden Veränderungen unterscheiden können. Hierzu sind entsprechende methodische Entwicklungsarbeiten erforderlich.

Für begleitende Messungen zu den Wartungs- und Pflegearbeiten haben klassische Messungen zur Bestimmung der lokalen Radonfreisetzung (Exhalationsmessungen) weiterhin ihre Berechtigung.

Insgesamt wird eingeschätzt, dass geeignete und leistungsfähige Messverfahren zur Kontrolle der Wechselwirkung von Bioturbation, Alterung, Rissbildung und Quantifizierung der Radondämmwirkung vorzuhalten sind. Das mögliche Risiko bei einem teilweisen Versagen einer Abdeckschicht ist u.E. exemplarisch zu untersuchen. Zu klären wäre, ob durch die Verringerung der Funktionstüchtigkeit der Abdeckung einer bergbaulichen Hinterlassenschaft wieder eine Interventionssituation entsteht. Gewisse Verschlechterungen einzelner Systemparameter können soweit in Kauf genommen werden, wie sie nicht die gefahrlose Folgenutzung der sanierten bergbaulichen Hinterlassenschaft in Frage stellen.

## Literaturverzeichnis

- /1/ Untersuchungen zum Altlastenkataster, Bundesamt für Strahlenschutz, Datenbank A.LAS.KA, erstellt von der GRS mbH, Köln im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS), 1997, 2. Überarbeitete Auflage
- /2/ Sanierungskonzept der Wismut GmbH, Standort Aue, Stand März 1994, Stand 1997
- /3/ Anordnung zur Gewährleistung des Strahlenschutzes bei Halden und industriellen Absetzanlagen und bei der Verwendung darin abgelagerter Materialien vom 17.11.1980 in Gesetzesblatt, Teil I Nr. 34
- /4/ Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Strahlenschutzgrundsätze für die Verwahrung, Nutzung oder Freigabe von kontaminierten Materialien, Gebäuden, Flächen oder Halden aus dem Uranerzbergbau, Empfehlungen der Strahlenschutzkommission, Band 23, Jena 1992
- /5/ Sanierungskonzeption der Wismut GmbH, Chemnitz 1997
- /6/ Sächsische Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (Hrsg.): Leitfaden Uranbergbausanierung. Wegweiser für den Umgang mit radioaktiv kontaminierten Materialien, Flächen, Bergehalden und Absetzanlagen aus dem Altbergbau, Dresden, Dezember 1999
- /7/ <http://www.wiz.uni-kassel.de/fgoen/deutsch/saenger2.html>
- /8/ IAF - Radioökologie GmbH Dresden: Methode zur parameterfreien Bestimmung der Radonexhalation und Dimensionierung von Abdeckschichten bei der Sanierung bergbaulicher Altlasten, Dresden, 23.02.2001, Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU-2002-597
- /9/ H. Schulz, L. Funke, A. Schellenberger Health Physics, Vol. 84, 236, 2003
- /10/ IAF - Radioökologie GmbH Dresden: Entwicklung einer Messmethodik zur Bestimmung der Radonquellstärke großer Flächen und Bewertung der Radondämmwirkung von Abdeckschichten, Dresden, 2002
- /11/ IAF - Radioökologie GmbH Dresden: Untersuchung des Einflusses der Bioturbation von Abdeckungen und kontaminierten Materialien auf die Radondämmwirkung mittels Bleispurmethode, Bericht zu Modul 1, Dresden, 15.04.2002
- /12/ IAF - Radioökologie GmbH Dresden: Untersuchung des Einflusses der Bioturbation von Abdeckungen und kontaminierten Materialien auf die Radondämmwirkung mittels Bleispurmethode, Bericht zum Modul 2.1 und 2.3, Dresden, 09.08.2002

- /13/ IAF - Radioökologie GmbH Dresden: Untersuchung des Einflusses der Bioturbation von Abdeckungen und kontaminierten Materialien auf die Radondämmwirkung mittels Bleispurmethode, Bericht zum Modul 2.2. und 2.4, Dresden, 09.12.2002
- /14/ IAF - Radioökologie GmbH Dresden: Untersuchung des Einflusses der Bioturbation von Abdeckungen und kontaminierten Materialien auf die Radondämmwirkung mittels Bleispurmethode, Bericht zum Modul 3, Dresden, 28.05.2003
- /15/ IAF - Radioökologie GmbH Dresden: Untersuchung des Einflusses der Bioturbation von Abdeckungen und kontaminierten Materialien auf die Radondämmwirkung mittels Bleispurmethode, Bericht zum Modul 4, Dresden, 25.07.2003
- /16/ IAF - Radioökologie GmbH Dresden: Untersuchung des Einflusses der Bioturbation von Abdeckungen und kontaminierten Materialien auf die Radondämmwirkung mittels Bleispurmethode, Bericht zu Versickerungsversuchen, Dresden, 30.06.2003
- /17/ F. Scheffer, P. Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde, Stuttgart, 1989
- /18/ Slobodda, Siegfried: Pflanzengemeinschaften und ihre Umwelt., 2. Aufl., Heidelberg , 1988
- /19/ Jena-Geos-Ingenieurbüro GmbH: Untersuchungen zur qualitativen und quantitativen Beeinflussung von Abdecksystemen durch Bioturbation, erstellt im Auftrag der WISMUT GmbH, 1998
- /20/ Ost-Consult GmbH, Gera; Fachhochschule für Forstwirtschaft Schwarzenburg: Untersuchungen zur Langzeitstabilität von Abdecksystemen unter dem Einfluss der möglichen Bioturbation, erstellt im Auftrag der WISMUT GmbH, 1999
- /21/ G.E.O.S. Freiberg Ingenieurgesellschaft mbH: Untersuchungen zur Alterung von Haldenabdeckungen - Sanierungsbetrieb Königstein und Umgebung, erstellt im Auftrag der WISMUT GmbH, 2001
- /22/ Verband für Agrarforschung und -bildung Thüringen: Bewuchsspezifische Untersuchungen zu verschiedenen Abdeckvarianten der WISMUT GmbH in der Bodenmodellanlage Jena des VAFB Thüringen/Jena, erstellt im Auftrag der WISMUT GmbH, 30.10.2001
- /23/ Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V.: Einrichtung, fachliche Begleitung und Auswertung von Feldversuchen im Rahmen der Abdeckung der Böschungen unterhalb der Bermen 19 und 23 auf der Halde 371/II unter Verwendung des im SB Aue hergestellten Abdeckmaterials, erstellt im Auftrag der WISMUT GmbH, 2000

- 
- /24/ Brenk Systemplanung GmbH Aachen: Fortschritte der Optimierung von Abdeckungen für Halden und Absetzanlagen des Uranerzbergbaus" StSch4167, Aachen, 16.10.2001
- /25/ R.H. Stollwerk, R. Barthel: Fortschritte der Untersuchung zum Langzeitverhalten und zur Auslegung von Abdecksystemen, Bericht zum Vorhaben StSch 4305, Brenk-Systemplanung GmbH, Aachen, 2002
- /26/ St. Melchior: Zeit- und vegetationsabhängige Veränderungen der Wirksamkeit von Abdeckschichten, in Materialien zu Strahlenschutz und Umweltradioaktivität, Workshop Sanierung der Hinterlassenschaften des Uranbergbaus, Tagungsband, Freistaat Sachsen (Hrsg.), Dresden, 10.04.1997
- /27/ St. Melchior: Die Austrocknungsgefährdung von bindigen mineralischen Dichtungen und Bentonitmatten in der Oberflächenabdichtung, in Materialien zu Strahlenschutz und Umweltradioaktivität, Workshop Sanierung der Hinterlassenschaften des Uranbergbaus, Teil II Abdeckungen von Halden des Uranerzbergbaus, Tagungsband, Freistaat Sachsen (Hrsg.), Dresden, 10.04.1997
- /28/ J. Wiegand, S. Feige: Comparison of soil <sup>222</sup>Rn potential in rural and urban areas, Proc. 5th Int. Conference on Rare Gas Geochemistry (1999), 221 - 237
- /29/ S. Feige, J. Wiegand: Vegetation as an important factor controlling radon potential in Radon investigations in the Czech Republic VII and the fourth international workshop on the geological aspects of radon risk mapping, Czech Geological Survey Radon corp., Prague 1998
- /30/ W.J. Waugh, G.M. Smith: Effects of root intrusion at the Burrell, Pennsylvania, Uranium Mill Tailings Disposal Site, U.S. Department of Energy, August 1997
- /31/ U.S. Department of Energy: Plant Encroachment on the Burrell, Pennsylvania, Disposal Cell: Evaluation of Long-Term Performance and Risk, June 1999
- /32/ A. Damkjær, U. Korsbech: A Small-Diameter Probe for In Situ Measurements of Gas Permeability of Soils, Radiat. Prot. Dosim. Vol. 45, p. 85, 1992
- /33/ W. Böhm: Methods of Studying Root Systems, Berlin, 1979
- /34/ J.N. Köstler, E. Brückner, H. Bibelriether: Die Bewurzelung der Waldbäume. Untersuchung zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa. Verlag Paul Parey, Hamburg, 1968
- /35/ L. Funke: Bestimmung des Gehaltes von Uran und seinen Folgeprodukten durch Messung der niederenergetischen Gammastrahlung, Institutspublikation ZfK Rossendorf, ZfK-748, 1991
- /36/ IAF - Radioökologie GmbH Dresden, Interne Berichte zur Kompletten Gamaspektrometrie
- /37/ <http://www.ito.umnw.ethz.ch/SoilPhys/Fliessmuster>

- /38/ Zehe, E.: Stofftransport in der ungesättigten Bodenzone auf verschiedenen Skalen, Dissertation, Karlsruhe, 1999
- /39/ Dushe C., Kümmel M., Schulz H., Investigations of Enhanced Outdoor Radon concentration in Johanngeorgenstadt (Saxony), Health Physics, Vol. 84, Mai 2003
- /40/ Darcy, H. (1856), Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon. Paris: Victor Dalmont.
- /41/ Weitke M, Heindl A, Boots A, Gade B und Gimmler H: Biomassenentwicklung und Transferkoeffizienten von auf MVA-Schlacke wachsenden Pflanzen am Beispiel der Reststoffdeponie Hopferstadt - Beiträge zur wurzel-induzierten Ansäuerung von MVA-Schlacke -. Berichtshefte des Bayerischen Forschungsverbundes für Abfallforschung und Reststoffverwertung, Technische Universität München, Vol 12, 319-333
- /42/ Dushe C: Vortrag auf der 25. Tagung des Arbeitskreises natürliche Radioaktivität (AKNAT) des Fachverbandes für Strahlenschutz vom 08.-09.05.2003 in Wolfenbüttel
- /43/ H. Schulz, Haldenkonvektion, im Auftrag der Wismut GmbH 2003
- /44/ Mitteilung von Dr. Walfried Löbner, Wismut GmbH