

# Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz

**Untersuchungen zu singulären Radonfreisetzungen aus  
bergbaulichen Hinterlassenschaften und ihre Auswirkungen  
auf die Radonkonzentration im Freien - Vorhaben 3609S10005**

**Auftragnehmer:  
G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH, Freiberg**

**M. Martin**

**J. Pinka**

**Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.**

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMU (UFOPLAN) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

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

#### **BfS-RESFOR-58/12**

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:  
**urn:nbn:de:0221-201202277479**

Salzgitter, März 2012

# Abschlussbericht

## *Untersuchungen zu singulären Radonfreisetzungen aus bergbaulichen Hinterlassenschaften und ihre Auswirkungen auf die Radonkonzentration im Freien*

Projekt-Nr. 50090021



Auftraggeber: Bundesamt für Strahlenschutz  
AG-F1  
Postfach 10 01 49  
38201 Salzgitter

Halsbrücke, den 20.09.2011

**G.E.O.S.**

Ingenieurgesellschaft mbH

09633 Halsbrücke  
Gewerbepark „Schwarze Kiefern“  
09581 Freiberg, Postfach 1162  
Telefon: +49(0)3731 369-0  
Telefax: +49(0)3731 369-200  
E-Mail: [info@geosfreiberg.de](mailto:info@geosfreiberg.de)  
[www.geosfreiberg.de](http://www.geosfreiberg.de)

Geschäftsführer:  
Jan Richter

Beiratsvorsitzender:  
Dr. Horst Richter

HRB 1035 Amtsgericht  
Registergericht Chemnitz

Sparkasse Mittelsachsen  
Konto 3115019148  
BLZ 870 520 00

Deutsche Bank AG Freiberg  
Konto 2201069  
BLZ 870 700 00

USt.-IdNr. DE811132746

**Singuläre  
Radonfreisetzungen**

---

<b>Auftraggeber:</b>	Bundesamt für Strahlenschutz AG-F1 Postfach 10 01 49 38201 Salzgitter
<b>Projekt-Nr. G.E.O.S.:</b>	50090021
<b>Bearbeitungszeitraum:</b>	
<b>Bearbeiter:</b>	Dr. René Kahnt (Projektleiter) Dipl.-Chem. Mirko Martin Dr. Jana Pinka
<b>Land/Landkreis/Kommune:</b>	-
<b>Messtischblatt:</b>	-
<b>Seitenanzahl Text:</b>	169
<b>Anzahl der Anlagen:</b>	2

Halsbrücke, den 20.09.2011

Jan Richter  
Geschäftsführer

Dr. René Kahnt  
Prokurist

i. A.

Mirko Martin  
Projektbearbeiter

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
<b>0</b>	<b>Zusammenfassung..... 16</b>
<b>1</b>	<b>Veranlassung und Aufgabenstellung ..... 21</b>
<b>2</b>	<b>Problembeschreibung ..... 21</b>
<b>3</b>	<b>Grundlagen..... 22</b>
<b>3.1</b>	<b><i>Radonmesstechnik und -methoden.....22</i></b>
<b>3.1.1</b>	<b>Zeitgetaktete Methoden der Messung der Radonkonzentration ..... 22</b>
3.1.1.1	AlphaGUARD ..... 22
3.1.1.2	Radon Scout/Radon Scout Plus ..... 23
<b>3.1.2</b>	<b>Integrierende Methoden der Messung der Radonkonzentration ..... 23</b>
3.1.2.1	Elektret-Ionisationsammer..... 23
3.1.2.2	Festkörper-Kernspurdetektoren (FKSD) ..... 24
<b>3.2</b>	<b><i>Bestimmung der Radonexhalationsrate von Bergbauhalden.....24</i></b>
<b>3.2.1</b>	<b>Anreicherungsbox..... 24</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Integrierenden Messungen..... 24</b>
<b>3.3</b>	<b><i>Kaltluftabflüsse.....26</i></b>
3.3.1.1	Entstehung und Verhalten..... 26
<b>3.3.2</b>	<b>Modellierung von Kaltluftabflüssen ..... 28</b>
3.3.2.1	Überblick ..... 28
3.3.2.2	Kaltluft-Abflussmodell KLAM_21 ..... 28
<b>4</b>	<b>Radonfreisetzung aus bergbaulichen Hinterlassenschaften – Literatur überblick Standort Johannegeorgenstadt..... 28</b>
<b>4.1</b>	<b><i>Eigene Arbeiten G.E.O.S. ....28</i></b>
<b>4.2</b>	<b><i>Untersuchungen und Ergebnisse anderer Stellen ..... 40</i></b>
<b>4.2.1</b>	<b>Dammhalde Trockenbecken..... 40</b>
<b>5</b>	<b>Auswahl und Charakterisierung der Untersuchungsobjekte ..... 44</b>
<b>5.1</b>	<b><i>Anforderungen an Untersuchungsobjekte.....44</i></b>
<b>5.2</b>	<b><i>Auswahl der Untersuchungsobjekte .....45</i></b>

Singuläre  
Radonfreisetzungen

---

<b>5.3</b>	<b><i>Allgemeine Charakteristik der Untersuchungsobjekte.....</i></b>	<b>46</b>
5.3.1	Dammhalde Trockenbecken.....	48
5.3.2	Dammhalde Steinsee .....	50
<b>6</b>	<b>Feldarbeiten und Messanordnungen .....</b>	<b>51</b>
<b>6.1</b>	<b><i>Messgeräte .....</i></b>	<b>51</b>
6.1.1	Temperaturmessung.....	51
6.1.2	Meteorologische Messung und meteorologische Daten .....	51
6.1.3	Radonmessung .....	52
<b>6.2</b>	<b><i>Messzeiträume.....</i></b>	<b>52</b>
<b>6.3</b>	<b><i>Messkonzeption.....</i></b>	<b>54</b>
<b>6.4</b>	<b><i>Messkampagne Dammhalde Trockenbecken.....</i></b>	<b>54</b>
6.4.1	Vorarbeiten .....	54
6.4.2	Meteorologische Bedingungen .....	55
6.4.3	Messanordnung .....	56
<b>6.5</b>	<b><i>Messkampagne Dammhalde Steinsee .....</i></b>	<b>59</b>
6.5.1	Vorarbeiten .....	59
6.5.2	Meteorologische Bedingungen .....	59
6.5.3	Messanordnung .....	60
<b>7</b>	<b>Ergebnisse und Auswertung.....</b>	<b>64</b>
<b>7.1</b>	<b><i>Messkampagne Dammhalde Trockenbecken.....</i></b>	<b>64</b>
7.1.1	Anstrombereich.....	64
7.1.2	Abstrombereich.....	66
<b>7.2</b>	<b><i>Messkampagne Dammhalde Steinsee .....</i></b>	<b>70</b>
7.2.1	Messwerte.....	70
<b>8</b>	<b>Interpretation der Ergebnisse.....</b>	<b>74</b>
<b>8.1</b>	<b><i>Radonexhalation .....</i></b>	<b>74</b>
<b>8.2</b>	<b><i>Kaltluftabfluss und Radonausbreitung.....</i></b>	<b>75</b>

Singuläre  
Radonfreisetzungen

---

8.2.1	Abhängigkeit der Radonkonzentration von der Temperatur.....	75
8.2.2	Abhängigkeit der Radonkonzentration von der vertikalen Temperaturdifferenz (2 m Höhe und Bodennähe).....	76
8.2.3	Abhängigkeit der Radonkonzentration vom Temperaturabfall .....	77
8.2.4	Fazit.....	78
9	Grundlagen der Modellierung und Beispielrechnungen .....	79
9.1	<i>Theoretischer Hintergrund der Modellierung</i> .....	79
9.1.1	Konvektive Radonfreisetzung .....	79
9.1.2	Kaltluftabflüsse .....	86
9.1.3	Transport in Kaltluftschichten.....	89
9.2	<i>Numerisches Modell</i> .....	91
9.2.1	Softwareplattform GoldSim .....	91
9.2.2	Modellkonzept und räumliche Diskretisierung Haldendurchströmung.....	92
9.2.3	Modellkonzept und räumliche Diskretisierung Kaltluftabfluss und Radontransport .....	93
9.3	<i>Generische Beispielrechnungen Haldendurchströmung</i> .....	95
9.3.1	Haldendurchströmung Beispiel 1: Angenommene Stufenfunktion für die Außentemperatur .....	95
9.3.2	Haldendurchströmung Beispiel 2: Jahresgang der Außentemperatur als Sinusfunktion .....	99
9.3.3	Haldendurchströmung Beispiel 3: Jahresgang der Außentemperatur als Sinusfunktion, reduzierte Haldenpermeabilität.....	103
9.3.4	Haldendurchströmung Beispiel 4: Zusammenhang Permeabilität - Exhalationsrate .....	105
10	Nachmodellierung der Messkampagnen .....	107
10.1	<i>Grundsätze und Annahmen</i> .....	107
10.2	<i>Messkampagne Dammhalde Trockenbecken August 2009</i> .....	109
10.2.1	Standortparameter .....	109

Singuläre  
Radonfreisetzungen

---

10.2.2	Klimatische Randbedingungen .....	109
10.2.3	Modellierung der Kampagne .....	112
10.2.4	Rückwirkende Prognoserechnung Halde Trockenbecken für das Jahr 2009 ....	118
10.3	<i>Messkampagne Dammhalde Steinsee September 2009 .....</i>	<i>120</i>
10.3.1	Standortparameter .....	120
10.3.2	Klimatische Randbedingungen .....	121
10.3.3	Modellierung .....	123
10.3.4	Rückwirkende Prognoserechnung Halde Steinsee für das Jahr 2009 .....	129
10.4	<i>Überblick über einige Schlüsselparameter der durchgeführten Mess kampagnen .....</i>	<i>132</i>
10.5	<i>Abschätzungen und Beispielrechnungen zu Radonexhalationsmessungen für konvektiv dominierte Radonexhalation .....</i>	<i>133</i>
10.5.1	Luftdicht verschlossene Box bei konvektiven Rn-Austrag .....	134
10.5.2	Abschätzungen „unten offene Box“ bei konvektiven Rn-Austrag.....	139
10.5.3	Abschätzungen der Wirkung des Öffnens und Schließens der Box zunächst bei Beschränkung auf diffusiven Rn-Austrag .....	144
10.5.4	Abschätzungen der Wirkung des Öffnens und Schließens der Box unter Berücksichtigung von konvektiven Rn-Austrag .....	146
10.5.4.1	Strömungsgeschwindigkeit $v = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s .....	148
10.5.4.2	Strömungsgeschwindigkeit $v = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s .....	149
10.5.4.3	Strömungsgeschwindigkeit $v = 5 \cdot 10^{-4}$ m/s .....	151
10.5.4.4	Strömungsgeschwindigkeit $v = 1 \cdot 10^{-3}$ m/s .....	153
10.5.4.5	Diskussion der Messdaten .....	155
10.6	<i>Plausibilitätsabschätzung zur Exhalationsrate .....</i>	<i>159</i>
10.7	<i>Gesamteinschätzung zu den durchgeführten Exhalationsmessungen und zur Exhalationsrate .....</i>	<i>161</i>
11	Vorläufiges Beurteilungskonzept für weitere Standorte .....	162
11.1	<i>Erläuterung der Vorgehensweise .....</i>	<i>162</i>
11.2	<i>Felduntersuchungen und Standortparameter .....</i>	<i>163</i>

**Singuläre  
Radonfreisetzungen**

---

<b>11.3</b>	<b><i>Klimadaten</i></b> .....	<b>163</b>
<b>11.4</b>	<b><i>Modellprognosen</i></b> .....	<b>164</b>
<b>12</b>	<b>Erkannte Defizite und Vorschläge für weitere Arbeiten</b> .....	<b>164</b>
<b>13</b>	<b>Literatur- und Quellennachweis</b> .....	<b>167</b>

## **TABELLENVERZEICHNIS**

	Seite
Tabelle 1: Interne Berichte der „Wismut“.....	40
Tabelle 2: Bewertung der Objekte im Raum Johannegeorgenstadt .....	46
Tabelle 3: Meteorologische Voraussetzungen der Messungen .....	52
Tabelle 4: Instrumentierung der Messpunkte Trockenbecken .....	58
Tabelle 5: Instrumentierung der Messpunkte Steinsee .....	61
Tabelle 6: Zusammenstellung mittlerer Werte aus den Messkampagnen bzw. aus der Nachmodellierung (Radonexhalation und mittlere effektive Radonaktivitätskonzentration) .....	133
Tabelle 7: Aus Plausibilitätsbetrachtungen abschätzbare Radonexhalationsraten für die beiden Standorte Halde Trockenbecken und Halde Steinsee.....	160

## **ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

	Seite
Abbildung 1: Messprinzip des AlphaGUARD [1].....	22
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Entstehung eines Kaltluftsees in einem Tal (rechts) und des Kaltluftabflusses in reliefiertem Gelände (links) (aus [5]).....	27
Abbildung 3: Ergebnisse von Radonmessungen in der Bodenluft in Johannegeorgenstadt von 1996, roter Punkt – links: Messstellenbezeichnung, rechts: Radonkonzentrationen in kBq/m <sup>3</sup> .....	30
Abbildung 4: Lage der Untersuchungsstandorte zur Betrachtung der Radonfreisetzung, 1996, 1 - Halde Schurfschacht 19, 2 - Halde an der Haberlandmühle .....	31
Abbildung 5: Prinzipskizze für den Aufbau des Haldenkörpers des Schurfschachtes 19 mit böschungspareller Schicht und grobstückiger Haldenbasis .....	33
Abbildung 6: Messergebnis der 48 h - Messung der Radonkonzentration in der Atmosphäre, 0,1 m über dem Boden, auf der Schurfschachthalde 19 mit zeitlichem Verlauf von Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck .....	34
Abbildung 7: Untersuchte Haldenstandorte zur Bewertung des Radonverhaltens auf Bergehalden im Johannegeorgenstädter Bergrevier unter Winterbedingungen ...	36
Abbildung 8: Lage der Radonmesspunkte auf der Halde am Stolln 226, Messungen vom 25.02.1999 .....	37
Abbildung 9: Lage der Radonmesspunkte auf der Halde am Stolln 226, Messungen vom 25.03.1999 .....	38
Abbildung 10: Lage der Radonmesspunkte auf der Halde am Stolln 226, Messungen vom 14.04.1999 .....	39
Abbildung 11: Verlauf der Radonkonzentration an einer Messstelle am Haldenfuß im Zeitraum 1999 - 2008 (Messstelle BfS 16) [18].....	42
Abbildung 12: Verlauf der Radonkonzentration an einer Messstelle auf dem Haldenplateau im Zeitraum 1999 - 2008 (Messstelle BfS 7) [18].....	42
Abbildung 13: Untersuchungsgebiet mit den beiden Dammhalden Trockenbecken und Steinsee .....	47
Abbildung 14: Lage des Trockenbeckens im Vergleich zur Topographie um 1900 [25] .....	49
Abbildung 15: Lage der IAA Steinsee im Vergleich zur Topographie um 1900 [25] .....	50
Abbildung 16: Tages-Sonnenscheindauer im Zeitraum Juli - September 2009.....	53
Abbildung 17: Rauch einer Feuerung zeigt die austauscharme Wetterlage (20.08.2009, 20:09 Uhr) .....	55
Abbildung 18: Lage des Messprofils Dammhalde Trockenbecken (Foto 27.03.2010).....	56
Abbildung 19: Lage der Messpunkte des Profils Dammhalde Trockenbecken (20./21.08.2009).....	57
Abbildung 20: Profil West - Ost über Trockenbecken und Dammhalde .....	57
Abbildung 21: Meteorologische Bedingungen während der Kampagne 15. - 18.09.2010 (Wetterstation Erlabrunn/Erzg.), Luftdruck korrigiert.....	60
Abbildung 22: Lage des Messprofils Dammhalde Steinsee (Foto 27.03.2010).....	62

## Singuläre Radonfreisetzungen

Abbildung 23:	Lage der Messpunkte des Profils Dammhalde Steinsee (20./21.08.2009) .....	63
Abbildung 24:	Profil Südwest - Nordost über die Deponie Steinsee/Dammhalde Steinsee bis zur Straße Schwarzenberg - Johanngeorgenstadt .....	63
Abbildung 25:	Messwertübersicht Profil Trockenbecken, Anstrombereich .....	65
Abbildung 26:	Messwertübersicht Profil Trockenbecken, Anstrom – Abstrom .....	67
Abbildung 27:	Zeitlicher Verlauf der Radonkonzentration in der Anreicherungsbox (Standort auf dem Haldenfuß, abwechselnd 1 h geschlossener und offener Deckel, AlphaGUARD im Pumpbetrieb) .....	68
Abbildung 28:	Räumliche (Abszisse) und zeitliche (Ordinate) Radonausbreitung zwischen Anstrom (MP 1 linker Bildrand) und Abstrom (MP 12 rechter Bildrand) .....	69
Abbildung 29:	Messwertübersicht Profil Steinsee, Anstrom - Abstrom .....	71
Abbildung 30:	Zeitlicher Verlauf der Radonkonzentration in der Anreicherungsbox (Standort auf dem Haldenfuß, abwechselnd 1 h geschlossener und offener Deckel, AlphaGUARD im Pumpbetrieb) .....	72
Abbildung 31:	Räumliche (Abszisse) und zeitliche (Ordinate) Radonausbreitung zwischen Anstrom (MP 1 linker Bildrand) und Abstrom (MP 6 rechter Bildrand) .....	73
Abbildung 32:	Korrelation von Radonkonzentration und Temperatur (MP 2: Haldenfuß, MP 6: Haldenvorfeld/Abstrom), Kampagne Steinsee .....	75
Abbildung 33:	Abhängigkeit der Radonkonzentration von der vertikalen Temperaturdifferenz (2 m und 0,2 m Höhe), Kampagne Trockenbecken .....	76
Abbildung 34:	Abhängigkeit der Radonkonzentration von der vertikalen Temperaturdifferenz (2 m und 0,2 m Höhe), Kampagne Steinsee .....	76
Abbildung 35:	Radonkonzentration in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten (Abkühlungsrate) der vorangegangenen 30 Minuten Haldenplateau und Haldenvorfeld (Kampagne Trockenbecken) .....	77
Abbildung 36:	Radonkonzentration in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten der vorangegangenen 30 Minuten für Haldenfuß und Haldenvorfeld (Kampagne Steinsee) .....	78
Abbildung 37:	Hanglänge und Länge der Stromlinie zwischen Ein- und Austrittspunkt einer Stromlinie für eine idealisierte Halde mit dem Schüttwinkel $\gamma$ .....	84
Abbildung 38:	Abhängigkeit der Permeabilität sowie der resultierenden konvektiven Strömungsgeschwindigkeit für typische Haldenparameter .....	85
Abbildung 39:	Vertikalprofil der Kaltluftströmungsgeschwindigkeit nach [5] .....	87
Abbildung 40:	Schematische Darstellung zum Modellaufbau und zur Diskretisierung im Teilmodell Haldendurchströmung .....	93
Abbildung 41:	Schematische Darstellung zum Modellaufbau und zur Diskretisierung im Teilmodell Kaltluftabfluss .....	94
Abbildung 42:	Generischer Zeitverlauf der Außentemperatur über 4 Monate und die daraus resultierende mittlere Durchströmungsgeschwindigkeit $\bar{v}$ (in der Abbildung mit $v_{\text{quer}}$ bezeichnet) der Halde .....	96

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

Abbildung 43:	Zeitliche Entwicklung der Außentemperatur und der Radonaktivitätskonzentration im durchströmten Bereich (Aktivität1_5[Rn]) und im diffusiv angekoppelten Bereich (Aktivität1_5_1[Rn]). Der Beobachtungspunkt befindet sich etwa in der Mitte der Strömungsbahn.....	97
Abbildung 44:	Zeitliche Entwicklung der Außentemperatur und der Radonaktivitätskonzentration im durchströmten Bereich in der Nähe des Haldenplateaus (Aktivität1_1[Rn]) und in der Nähe des Haldenfußes (Aktivität1_10[Rn]) .....	98
Abbildung 45:	Zeitliche Entwicklung der Außentemperatur und der Radonaktivitätskonzentration im durchströmten Bereich in der Nähe des Haldenplateaus (Aktivität1_1[Rn]) und in der Nähe des Haldenfußes (Aktivität1_10[Rn]) in logarithmischer Darstellung.....	98
Abbildung 46:	Radonexhalationsrate für die Austrittsflächen auf dem Haldenplateau und am Haldenfuß in Abhängigkeit von der Zeit unter den getroffenen generischen Annahmen.....	99
Abbildung 47:	Generischer Zeitverlauf der Außentemperatur in Form einer Sinusfunktion über ein Jahr und die daraus resultierende mittlere Durchströmungsgeschwindigkeit $\bar{v}$ (in der Abbildung mit $v_{\text{quer}}$ bezeichnet) der Halde .....	100
Abbildung 48:	Zeitliche Entwicklung der Außentemperatur und der Radonaktivitätskonzentration im durchströmten Bereich (Aktivität1_5[Rn]) und im diffusiv angekoppelten Bereich (Aktivität1_5_1[Rn]) für Beispiel 2. Der Beobachtungspunkt befindet sich etwa in der Mitte der Strömungsbahn.....	100
Abbildung 49:	Zeitliche Entwicklung der Außentemperatur und der Radonaktivitätskonzentration im durchströmten Bereich in der Nähe des Haldenplateaus (Aktivität1_1[Rn]) und in der Nähe des Haldenfußes (Aktivität1_10[Rn]) für die Annahmen entsprechend Beispiel 2 .....	101
Abbildung 50:	Zeitliche Entwicklung der Außentemperatur und der Radonaktivitätskonzentration im durchströmten Bereich in der Nähe des Haldenplateaus (Aktivität1_1[Rn]) und in der Nähe des Haldenfußes (Aktivität1_10[Rn]) in logarithmischer Darstellung für die Annahmen entsprechend Beispiel 2 .....	101
Abbildung 51:	Radonexhalationsrate für die Austrittsflächen auf dem Haldenplateau und am Haldenfuß in Abhängigkeit von der Zeit unter den getroffenen generischen Annahmen für Beispiel 2 .....	102
Abbildung 52:	Generischer Zeitverlauf der Außentemperatur in Form einer Sinusfunktion über ein Jahr und die daraus resultierende mittlere Durchströmungsgeschwindigkeit $\bar{v}$ (in der Abbildung mit $v_{\text{quer}}$ bezeichnet) der Halde mit einer im Vergleich zu Beispiel 2 auf $\frac{1}{4}$ reduzierten Permeabilität .....	103
Abbildung 53:	Zeitliche Entwicklung der Außentemperatur und der Radonaktivitätskonzentration im durchströmten Bereich in der Nähe des Haldenplateaus (Aktivität1_1[Rn]) und in der Nähe des Haldenfußes (Aktivität1_10[Rn]) in logarithmischer Darstellung für die Annahmen entsprechend Beispiel 3 .....	104
Abbildung 54:	Radonexhalationsrate für die Austrittsflächen auf dem Haldenplateau und am Haldenfuß in Abhängigkeit von der Zeit unter den getroffenen generischen Annahmen für Beispiel 3 .....	104
Abbildung 55:	Variation des Korndurchmessers und der daraus resultierenden Permeabilität und der sich einstellenden mittleren Durchströmungsgeschwindigkeit .....	105

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

Abbildung 56:	Abhängigkeit der Radonaktivitätskonzentration im durchströmten Bereich (Aktivität1_5[Rn]) und im diffusiv angekoppelten Bereich (Aktivität1_5_1[Rn]) für Beispiel 4 in Abhängigkeit von der Permeabilität. Der Beobachtungspunkt befindet sich etwa in der Mitte der Strömungsbahn .....	106
Abbildung 57:	Abhängigkeit der Radonaktivitätskonzentration im durchströmten Bereich in der Nähe des Haldenplateaus (Aktivität1_1[Rn]) und des Haldenfußes (Aktivität1_10[Rn]) in logarithmischer Darstellung für die Annahmen entsprechend Beispiel 4 .....	106
Abbildung 58:	Radonexhalationsrate für die Austrittsfläche am Haldenfuß und Radonaktivitätskonzentration innerhalb der Halde in der Nähe des Haldenfußes jeweils in Abhängigkeit von der Permeabilität entsprechend der generischen Annahmen für Beispiel 4 .....	107
Abbildung 59:	Wetterbedingungen für das Gesamtjahr 2009, Wetterstation Erlabrunn-Klinik.	110
Abbildung 60:	Wetterbedingungen Kampagne Trockenbecken, Wetterstation Erlabrunn-Klinik .....	111
Abbildung 61:	Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen für einen Radiumgehalt von 800 Bq/kg in der Anreicherungsbox (rot) und am Haldenfuß (blau) sowie innerhalb der Halde im Bereich des Ausströmpunktes (schwarz). Die gepunkteten Kurven sind die gemessenen und die durchgezogenen sind die modellierten Kurven.....	113
Abbildung 62:	Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen für einen Radiumgehalt von 2.400 Bq/kg in der Anreicherungsbox (rot) und am Haldenfuß (blau) sowie innerhalb der Halde im Bereich des Ausströmpunktes (schwarz). Die gepunkteten Kurven sind die gemessenen und die durchgezogenen sind die modellierten Kurven.....	113
Abbildung 63:	Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen für einen Radiumgehalt von 1.600 Bq/kg in der Anreicherungsbox (rot) und am Haldenfuß (blau) sowie innerhalb der Halde im Bereich des Ausströmpunktes (schwarz). Die gepunkteten Kurven sind die gemessenen und die durchgezogenen sind die modellierten Kurven. ....	114
Abbildung 64:	Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen im Inneren der Halde für einen Radiumgehalt von 1.600 Bq/kg im durchströmten Bereich (blau gestrichelt) und im nicht durchströmten Bereich (rot). Zusätzlich dargestellt ist der Zeitverlauf der Außentemperatur (schwarz). ....	115
Abbildung 65:	Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen im Inneren der Halde in der Nähe des Haldenplateaus (blau) und in der Nähe des Haldenfußes (rot) für einen Radiumgehalt von 1.600 Bq/kg im durchströmten Bereich. Zusätzlich dargestellt ist der Zeitverlauf der Außentemperatur. ....	115
Abbildung 66:	Zeitlicher Verlauf der modellierten spezifischen Radonexhalationsrate für die Ein- und Austrittsflächen des Luftstromes im Bereich des Haldenfußes (blau) und des Haldenplateaus (rot) für die Messkampagne im August 2009 .....	116
Abbildung 67:	Zeitlicher Verlauf der Bandbreite der modellierten spezifischen Radonexhalationsrate für die Austrittsflächen des Luftstromes im Bereich des Haldenfußes für die Messkampagne im August 2009.....	116
Abbildung 68:	Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen im Abstrom der Halde am Messpunkt 12 in unterschiedlichen Höhen (0,1 m: Aktivität2_1_5, 0,2 m Aktivität2_2_5, 0,35 m Aktivität2_3_5, 0,65 m Aktivität2_4_5 und 1,25 m: Aktivität2_5_5) über der Erdoberfläche für den Messzeitraum im August 2009	117

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

Abbildung 69:	Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen im Abstrom der Halde am Messpunkt 12 in einer Höhe von 0,1 m über dem Boden unter Berücksichtigung der Bandbreiten der Parameter für den Messzeitraum im August 2009.....	118
Abbildung 70:	Rückwirkende Prognose des Jahresganges der Radonaktivitätskonzentration im Bereich des Haldenfußes (rot) und einer Anreicherungsbox, welche sich jeweils an den Austrittsflächen der konvektiven Durchströmung befindet (blau).....	119
Abbildung 71:	Rückwirkende Prognose der spezifischen Radonexhalation pro Einheitsfläche aufgrund konvektiver Durchströmung im Bereich des Haldenplateaus (rot) und des Haldenfußes (blau) für das Jahr 2009.....	119
Abbildung 72:	Rückwirkende Prognose der Radonaktivitätskonzentration im Abstrom der Halde (MP 12) Trockenbecken für eine Höhe von 10 cm (blau) und 1 m (rot) für das Jahr 2009 .....	120
Abbildung 73:	Wetterbedingungen Kampagne Steinsee, Wetterstation Erlabrunn-Klinik.....	122
Abbildung 74:	Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen für einen Radiumgehalt von 4.000 Bq/kg in der Anreicherungsbox (rot) und am Haldenfuß (blau) sowie innerhalb der Halde im Bereich des Ausströmpunktes (schwarz). Die gepunkteten Kurven sind die gemessenen und die durchgezogenen sind die modellierten Kurven.....	123
Abbildung 75:	Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen für einen Radiumgehalt von 8.000 Bq/kg in der Anreicherungsbox (rot) und am Haldenfuß (blau) sowie innerhalb der Halde im Bereich des Ausströmpunktes (schwarz). Die gepunkteten Kurven sind die gemessenen und die durchgezogenen sind die modellierten Kurven.....	124
Abbildung 76:	Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen für einen Radiumgehalt von 6.400 Bq/kg in der Anreicherungsbox (rot) und am Haldenfuß (blau) sowie innerhalb der Halde im Bereich des Ausströmpunktes (schwarz). Die gepunkteten Kurven sind die gemessenen und die durchgezogenen sind die modellierten Kurven.....	124
Abbildung 77:	Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen im Inneren der Halde für einen Radiumgehalt von 6.400 Bq/kg im durchströmten Bereich (blau gestrichelt) und im nicht durchströmten Bereich (rot). Zusätzlich dargestellt ist der Zeitverlauf der Außentemperatur (schwarz).....	125
Abbildung 78:	Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen im Inneren der Halde für einen Radiumgehalt von 6.400 Bq/kg im durchströmten Bereich als Bandbreite unter Berücksichtigung der verwendeten Bandbreiten der Eingangsparameter .....	126
Abbildung 79:	Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen im Inneren der Halde in der Nähe des Haldenplateaus (blau) und in der Nähe des Haldenfußes (rot) für einen Radiumgehalt von 6.400 Bq/kg im durchströmten Bereich. Zusätzlich dargestellt ist der Zeitverlauf der Außentemperatur. ....	126
Abbildung 80:	Zeitlicher Verlauf der modellierten spezifischen Radonexhalationsrate für die Ein- und Austrittsflächen des Luftstromes im Bereich des Haldenfußes (blau) und des Haldenplateaus (rot) für die Messkampagne im September 2009.....	127
Abbildung 81:	Zeitlicher Verlauf der Bandbreite der modellierten spezifischen Radonexhalationsrate für die Austrittsflächen des Luftstromes im Bereich des Haldenfußes für die Messkampagne im September 2009.....	127

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

Abbildung 82:	Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen im Abstrom der Halde am Messpunkt 6 in unterschiedlichen Höhen (0,1 m: Aktivität <sub>2_1_5</sub> , 0,2 m Aktivität <sub>2_2_5</sub> , 0,35 m Aktivität <sub>2_3_5</sub> , 0,65 m Aktivität <sub>2_4_5</sub> und 1,25 m: Aktivität <sub>2_5_5</sub> ) über der Erdoberfläche für den Messzeitraum im September 2009.....	128
Abbildung 83:	Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen im Abstrom der Halde am Messpunkt 6 in einer Höhe von 0,1 m über dem Boden unter Berücksichtigung der Bandbreiten der Parameter für den Messzeitraum im September 2009.....	129
Abbildung 84:	Rückwirkende Prognose des Jahresganges der Radonaktivitätskonzentration im Bereich des Haldenfußes (rot) und einer Anreicherungsbox, welche sich jeweils an den Austrittsflächen der konvektiven Durchströmung befindet (blau).....	130
Abbildung 85:	Rückwirkende Prognose der spezifischen Radonexhalation pro Einheitsfläche aufgrund konvektiver Durchströmung im Bereich des Haldenplateaus (rot) und des Haldenfußes (blau) für das Jahr 2009.....	131
Abbildung 86:	Rückwirkende Prognose der Radonaktivitätskonzentration im Abstrom der Halde (MP 6) Steinsee für eine Höhe von 10 cm (blau) und 1 m (rot) für das Jahr 2009.....	131
Abbildung 87:	Schematische Darstellung einer Messbox am Haldenfuß, in die konvektiver Lufteintritt erfolgt .....	134
Abbildung 88:	Abgeschätzte Zeitkonstante für die zeitliche Änderung des Druckes. Nach einer Zeitdifferenz entsprechend dieser Zeitkonstanten sinkt die Druckdifferenz auf den Teil 1/e ab.....	138
Abbildung 89:	Zeitlicher Verlauf der die Konvektion antreibenden Druckdifferenz entlang einer konvektiv durchströmten Bahn, wenn sich am Ende der Strömungsbahn eine luftdichte Messbox befindet .....	138
Abbildung 90:	Schematische Darstellung einer Messbox am Haldenfuß, in die konvektiver Lufteintritt erfolgt und am Rand wieder austritt. Im Inneren der Box erfolgt ausschließlich diffusiver Transport. ....	139
Abbildung 91:	Zeitlicher Verlauf der Rn-Aktivitätskonzentration für unterschiedliche Beobachtungspunkte in der Box für eine unten offene Box .....	141
Abbildung 92:	Zeitverlauf der simulierten Messergebnisse für die unten offene Box für eine Höhe des Alphaguards in der Box von 20 cm für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box). Im Vergleich Messwerte für eine kontinuierliche Messung (theoretische Betrachtung) .....	142
Abbildung 93:	Zeitverlauf der aus den simulierten Messergebnissen für die unten offene Box für eine Höhe des Alphaguards in der Box von 20 cm für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box) berechneten Exhalationsraten .....	143
Abbildung 94:	Zeitverlauf der simulierten Messergebnisse für eine Höhe des Alphaguards in der Box von 20 cm für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box). Es wurde angenommen, dass die Konzentration am Boden der Box konstant ist und der Deckel im Stundenintervall auf und zu geht. Im Vergleich Messwerte für eine kontinuierliche Messung (theoretische Betrachtung).....	145

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

- Abbildung 95: Zeitverlauf der aus den simulierten Messergebnissen für den diffusiven Transport für eine Box berechneten Exhalationsraten (Höhe des AlphaGUARDs in der Box von 20 cm) für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box). Es wurde angenommen, dass die Konzentration am Boden der Box konstant ist und der Deckel im Stundenintervall auf und zu geht. Da Konvektion hier nicht betrachtet wird, ist der im Vergleich dargestellte konvektive Anteil der Exhalationsrate  $0 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ..... 146
- Abbildung 96: Zeitverlauf der simulierten Messergebnisse für eine Höhe des AlphaGUARDs in der Box von 20 cm für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box). Es wurde eine Volumenstromgeschwindigkeit der Haldenluft von 10-5 m/s angenommen. Zudem wurde unterstellt, dass die Konzentration am Boden der Box der Haldenluftkonzentration entspricht und konstant ist und dass der Deckel im Stundenintervall auf und zu geht. Im Vergleich Messwerte für eine kontinuierliche Messung (theoretische Betrachtung)..... 148
- Abbildung 97: Zeitverlauf der aus den simulierten Messergebnissen für den konvektiven und diffusiven Transport für eine Box berechneten Exhalationsraten (Höhe des AlphaGUARDs in der Box von 20 cm) für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box) für eine Volumenstromgeschwindigkeit von 10-5 m/s. Es wurde angenommen, dass die Konzentration am Boden der Box konstant ist und der Deckel im Stundenintervall auf und zu geht. Im Vergleich theoretischer Wert für den rein konvektiven Anteil der Exhalationsrate. .... 149
- Abbildung 98: Zeitverlauf der simulierten Messergebnisse für eine Höhe des AlphaGUARDs in der Box von 20 cm für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box). Es wurde eine Volumenstromgeschwindigkeit der Haldenluft von 10-4 m/s angenommen. Zudem wurde unterstellt, dass die Konzentration am Boden der Box der Haldenluftkonzentration entspricht und konstant ist und dass der Deckel im Stundenintervall auf und zu geht. Im Vergleich Messwerte für eine kontinuierliche Messung (theoretische Betrachtung)..... 150
- Abbildung 99: Zeitverlauf der aus den simulierten Messergebnissen für den konvektiven und diffusiven Transport für eine Box berechneten Exhalationsraten (Höhe des AlphaGUARDs in der Box von 20 cm) für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box) für eine Volumenstromgeschwindigkeit von 10-4 m/s. Es wurde angenommen, dass die Konzentration am Boden der Box konstant ist und der Deckel im Stundenintervall auf und zu geht. Im Vergleich theoretischer Wert für den rein konvektiven Anteil der Exhalationsrate. .... 151
- Abbildung 100: Zeitverlauf der simulierten Messergebnisse für eine Höhe des AlphaGUARDs in der Box von 20 cm für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box). Es wurde eine Volumenstromgeschwindigkeit der Haldenluft von  $5 \cdot 10^{-4}$  m/s angenommen. Zudem wurde unterstellt, dass die Konzentration am Boden der Box der Haldenluftkonzentration entspricht und konstant ist und dass der Deckel im Stundenintervall auf und zu geht. Im Vergleich Messwerte für eine kontinuierliche Messung (theoretische Betrachtung). .... 152

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

- Abbildung 101: Zeitverlauf der aus den simulierten Messergebnissen für den konvektiven und diffusiven Transport für eine Box berechneten Exhalationsraten (Höhe des AlphaGUARDs in der Box von 20 cm) für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box) für eine Volumenstromgeschwindigkeit von  $5 \cdot 10^{-4}$  m/s. Es wurde angenommen, dass die Konzentration am Boden der Box konstant ist und der Deckel im Stundenintervall auf und zu geht. Im Vergleich theoretischer Wert für den rein konvektiven Anteil der Exhalationsrate. .... 153
- Abbildung 102: Zeitverlauf der simulierten Messergebnisse für eine Höhe des AlphaGUARDs in der Box von 20 cm für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box). Es wurde eine Volumenstromgeschwindigkeit der Haldenluft von  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s angenommen. Zudem wurde unterstellt, dass die Konzentration am Boden der Box der Haldenluftkonzentration entspricht und konstant ist und dass der Deckel im Stundenintervall auf und zu geht. Im Vergleich Messwerte für eine kontinuierliche Messung (theoretische Betrachtung)..... 154
- Abbildung 103: Zeitverlauf der aus den simulierten Messergebnissen für den konvektiven und diffusiven Transport für eine Box berechneten Exhalationsraten (Höhe des AlphaGUARDs in der Box von 20 cm) für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box) für eine Volumenstromgeschwindigkeit von  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s. Es wurde angenommen, dass die Konzentration am Boden der Box konstant ist und der Deckel im Stundenintervall auf und zu geht. Im Vergleich theoretischer Wert für den rein konvektiven Anteil der Exhalationsrate. .... 155
- Abbildung 104: Ergebnisse der aus den Messwerten unter verschiedenen Annahmen abgeschätzten Radonexhalationsraten für die Messkampagne am Trockenbecken..... 158
- Abbildung 105: Ergebnisse der aus den Messwerten unter verschiedenen Annahmen abgeschätzten Radonexhalationsraten für die Messkampagne am Steinsee .. 159

## ANLAGENVERZEICHNIS

- Anlage 1: Messergebnisse der Messkampagne Dammschalde Trockenbecken  
Anlage 2: Messergebnisse der Messkampagne Dammschalde Steinsee

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

## **0 Zusammenfassung**

Die G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH wurde durch das Bundesamt für Strahlenschutz beauftragt, experimentelle zeitauflösende Untersuchungen zur Radonfreisetzung sowie zeit- und ortsauflösende Untersuchungen der atmosphärischen Ausbreitung im Nahbereich von Halden durchzuführen. Dabei sollen singuläre Radonfreisetzungen und die Ausbreitungsbedingungen in Abhängigkeit von den topographischen und meteorologischen Verhältnissen adäquat erfasst werden.

In einer ersten Bearbeitungsstufe wurden die bisherigen für die Aufgabenstellung relevanten Arbeiten des Auftragnehmers und anderer Stellen sowie wichtige einschlägige Literatur recherchiert.

Eigene Untersuchungen liegen dabei insbesondere aus dem Raum Johannegeorgenstadt vor. An einer Tafelhalde und einer Halde in Hanglage wurde exemplarisch untersucht, inwieweit morphologische Unterschiede eine Rolle bei der Radonfreisetzung aus den Haldenkörpern spielen. Zudem wurden die Faktoren Abdeckung und natürliche Bodenbildung und Zusammensetzung des Haldenmaterials betrachtet. Als Untersuchungsgegenstände wurden die Halde an der Haberlandmühle sowie die Schurfschachthalde 19 verwendet. Mit den durchgeführten Untersuchungen wurde bestätigt, dass die Haldenmorphologie der Schurfschachthalde 19, Oberjugel, einen deutlichen Einfluss auf die Konzentration von Radon in der Bodenluft und in der atmosphärischen Luft über der Halde hat.

Unter Verwendung des Messgerätes AlphaGUARD erfolgten Bestimmungen der Radonkonzentration über der Oberfläche von Bergbauhalden. Die an fünf verschiedenen Halden des Johannegeorgenstädter Raumes durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass die Konvektionsprozesse in den Halden stark differieren. Neben klimatischen Einflussfaktoren wurden die Haldengröße und auch strukturelle Inhomogenitäten im Haldenkörper als Ursache erkannt.

Die durchgeführten Untersuchungen an Uranerzbergehalten zeigten, dass folgende Faktoren die Radonfreisetzung beeinflussen:

- Haldenmorphologie, Haldenentwicklung (Haldenaufbau, Haldenverdichtung), Haldengröße
- Haldensubstrate (Radionuklidinventar), Kornverteilung (grobblockig oder tonig) und substratbedingte Bodenfeuchte

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

- Jahres- und Tageszeit, Wetterlage
- Abdeckung, Bewuchs

Ergebnisse der IAF Radioökologie, der Wismut und des BfS belegen die Relevanz von konvektiven Prozessen für die Radonfreisetzung und von Kaltluftabflüssen für die Radonausbreitung. Dabei ist jedoch anzunehmen, dass Untersuchungsergebnisse der Wismut GmbH nur sehr eingeschränkt zur Verfügung standen.

Als Ergebnis der Recherchen werden die Dammhalde Steinsee besonders wegen ihrer einfachen Geometrie sowie der günstigen Lage und die Dammhalde Trockenbecken wegen ihrer Relevanz für die umliegende Wohnbebauung und der umfangreichen bisherigen Untersuchungen als Untersuchungsobjekte vorgeschlagen. Die Untersuchungen konzentrierten sich auf sommerliche Bedingungen.

In zwei Messkampagnen wurden die beiden ausgewählten Standorte messtechnisch untersucht. Die Messungen erfolgten auf Profilen vom Haldenplateau über den Haldenfuß bis in das Haldenvorfeld. Erfasst wurden neben meteorologischen Bedingungen die Radonkonzentration in 0,2 m Höhe sowie die Temperatur in verschiedenen Höhen.

An beiden untersuchten Halden wurden Kaltluftabflüsse nachgewiesen. Die Wirkung dieser Abflüsse ist in Richtung der Hangneigung gerichtet. Zeitweise kommt es im Vorfeld der Halden (bis >100 m Entfernung) zu extrem hohen Radonkonzentrationen. Diese lassen sich kausal den Kaltluftabflüssen zuordnen.

Für das Auftreten von Kaltluftabflüssen müssen 2 Bedingungen erfüllt sein:

- sinkende Temperaturen, als Folge einer negativen Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche
- positiver vertikaler Temperaturgradient ( $T(2\text{ m}) > T(0,2\text{ m})$ )

Diese Bedingungen sind nur bei Abkühlung der Luft, insbesondere abends/nachts gegeben.

Die Kaltluftabflüsse treten dabei sowohl kurzzeitig (Messung am Trockenbecken) als auch über längere Zeiträume (Messung am Steinsee) auf.

Die Kaltluftabflüsse sind nicht auf hohe Tagestemperaturen mit anschließender Strahlungsnacht beschränkt, sondern können auch bei kühler Witterung auftreten (Messung Steinsee). Die Haupttriebkraft der KL-Abflüsse sind der vertikale Temperaturgradient ( $T(2\text{ m}) > T(0,2\text{ m})$ ) und die Hangneigung. Daher sind Kaltluftabflüsse bei starker Hangneigung auch bei kleinen Temperaturdifferenzen möglich und daher auch bei relativ kühlen Wetterlagen.

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

Mit den gemessenen Werten wurden Untersuchungen zur Modellierung durchgeführt. Dazu wurden zunächst die bestimmenden physikalischen Prozesse identifiziert. Die beiden grundlegenden Prozesse

- Halde als Radonquelle mit konvektiver Radonfreisetzung und
- Transport des freigesetzten Radons innerhalb von Kaltluftabflüssen talwärts zu den Immissionspunkten im Abstrom

wurden in 2 Teilmodellen abgebildet und über die meteorologischen Randbedingungen (Wetterstatistik) miteinander gekoppelt. Die freie Konvektion in der Halde wird dabei durch Temperaturunterschiede innen - außen getrieben, die Kaltluftabflüsse im Haldenabstrom durch Kaltluftbildung infolge Abstrahlung bei abnehmenden Temperaturen.

Die Modelle wurden mit der Modellsoftware GoldSim erstellt. Um die Wirkungsweise der dargestellten Prozesse und Ansätze zu demonstrieren wurden Beispielrechnungen unter vereinfachten, d. h. generischen klimatischen Randbedingungen durchgeführt. Dabei zeigte sich an der Exhalationsrate, dass eine erhöhte Exhalation zu solchen Zeitpunkten zu erwarten ist, wenn vorher keine Durchströmung stattgefunden hat und sich im Haldeninneren eine hohe Aktivitätskonzentration aufbauen konnte. Dies bedeutet, dass unter der Annahme guter Durchströmungsbedingungen die aktuell austretende Radonaktivitätskonzentration in hohem Maße von der Vorgeschichte der Durchströmung der letzten Tage abhängig ist.

Anhand der durchgeführten Modellierungen wurde deutlich, dass trotz der zeitlich variablen mittleren Haldendurchströmungsgeschwindigkeiten und der resultierenden Abhängigkeiten der Konzentration die rechnerische Exhalationsrate nahezu konstant ist.

Im Ergebnis der generischen Berechnungen kann die Hypothese bestätigt werden, dass die konvektiv dominierte Exhalationsrate zumindest für stationäre klimatische Bedingungen (konstante Temperatur) in weiten Bereichen oberhalb eines Schwellenwertes unabhängig von der Korngröße bzw. der Permeabilität ist. Für den Zusammenhang zwischen Korndurchmesser und Permeabilität liegt der Schwellenwert bei ca. 5 mm. Der zugehörige Schwellenwert für die Permeabilität beträgt somit ca.  $3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ .

Mit dem Modell wurden die beiden durchgeführten Messkampagnen nachmodelliert. Dabei sollte geprüft werden, ob das am realen Objekt beobachtete Verhalten mit dem Modellansatz erfasst werden kann. Weiterhin sollten solche Parameter, die einer repräsentativen Messung nicht zugänglich sind, durch Vergleich der Modellergebnisse mit den Messwerten iterativ angepasst werden. In einem ersten Schritt wurden alle diejenigen Modellparameter belegt, die einer Messung direkt zugänglich waren bzw. die direkt bestimmt worden sind. Danach wurden diejenigen Parameter belegt, die durch Plausibilitätsüberlegungen zugänglich sind bzw. die aufgrund der geringen Sensitivität abgeschätzt werden können.

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

Das gesamte Modellkonzept konzentriert sich dabei auf den konvektiven Beitrag der Radonexhalation aus der Halde. Es wird versucht, sämtliche beobachteten Phänomene durch diesen konvektiv bedingten Radonaustrag qualitativ und quantitativ zu erklären.

Im Anschluss daran erfolgt eine Nachmodellierung der Messkampagnen zur Anpassung der restlichen Parameter. Als Kalibrierparameter wurden die repräsentative Radiumaktivität im Bereich der durchströmten Haldenbereiche und die Parameter der turbulenten Diffusion innerhalb des Kaltluftabflusses betrachtet. Für die Höhe des in der Halde durchströmten Bereiches wurden plausible Annahmen getroffen. Diese beeinflussen den resultierenden Wert der Exhalationsrate (umgekehrt proportional zur Höhe der durchströmten Fläche), nicht jedoch die mit dem Modell ermittelte konvektive Gesamtexhalation.

Im Ergebnis der Nachmodellierung der Messkampagnen konnte sowohl das qualitative als auch das quantitative Verhalten der gemessenen Radonkonzentration auf der Grundlage der messtechnisch erfassten meteorologischen Randbedingungen modellhaft abgebildet werden.

In einem ersten Schritt wurde für die erste Messkampagne (Trockenbecken) durch Variation der Radiumaktivitätskonzentration die am Haldenfuß gemessene Konzentration reproduziert. Dabei ist zu beachten, dass es sich hierbei um einen effektiven Parameter handelt, da mit diesem Parameter Fehler der Geometrie, insbesondere der Länge des Strömungspfad, überkompensiert werden. Dies scheint insofern akzeptabel, da die tatsächliche repräsentative mittlere Radiumaktivitätskonzentration im gut durchströmten Haldenbereich keiner Messung zugänglich ist.

Im Anschluss daran wurde der Parameter für die Turbulenzdiffusion am ersten Standort bestimmt, der die Abstromkonzentrationen am besten abbildet.

Für den zweiten Standort (Steinsee) wurde dann die standortspezifischen geometrischen und topologischen Parameter im Modell verwendet und wiederum die Radiumaktivitätskonzentration variiert, um die gemessenen Konzentrationen in der Messbox und am Haldenfuß zu reproduzieren. Der Parameter für die Turbulenzdiffusion wurde bei dem am Trockenbecken gefundenen Wert belassen.

Nachdem die Messkampagnen anhand der klimatischen Bedingungen gewissermaßen zur Kalibrierung des Modells dienten, wurden mit den Wetterdaten des Jahres 2009 rückwirkende Prognosen für die zeitliche Entwicklung der Radonaktivitätskonzentration am Haldenfuß, auf dem Haldenplateau und im Abstrom erstellt. Dabei konnte zunächst ein plausibles Verhalten reproduziert werden.

Zudem wurde der zeitliche Verlauf der Radonexhalationsraten für den konvektiven Anteil der Exhalation für den Haldenfuß als auch für das Haldenplateau quantifiziert. Dabei zeigen sich zwar einerseits sehr große Fluktuationen die jedoch ihrerseits um nahezu konstante mittlere Exhalationsraten schwanken. Dieses Verhalten erscheint qualitativ plausibel. Da die Größenord-

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

nung der berechneten konvektiv bedingten Exhalationsraten nicht mit aus Messungen bekannten Werten übereinstimmt, sondern diese um einen Faktor von mehr als einer Größenordnung übersteigt, wurde abgeschätzt, ob mit den verwendeten Verfahren einer der konvektive Anteil der Radonexhalation messtechnisch belastbar erfasst werden kann. Die auf der Grundlage rein physikalischer Untersuchungen und Abschätzungen berechneten Zeitverläufe der Konzentration bzw. des Druckes in der Box legen den Schluss nahe, dass bei signifikanten konvektiven Anteil die Exhalationsrate nicht mit der verwendeten Methode belastbar bestimmt werden kann.

Die auf dieser Grundlage für den Abstrom berechneten über das Jahre gemittelten Radonaktivitätskonzentrationen ausschließlich als Folge der singulären Radonfreisetzung liegen für das Trockenbecken bei ca. 340 Bq/m<sup>3</sup> und für den Steinsee bei ca. 1.360 Bq/m<sup>3</sup>. Daraus kann geschlossen werden, dass die Gesamtexhalation mit der im Rahmen des Vorhabens entwickelten Methode gut abgebildet werden kann. Dagegen sind die rechnerisch ermittelten spezifischen Exhalationsraten eher als Hilfsgrößen zu betrachten und als sehr unsicher einzuschätzen, da diese von der angenommenen Höhe des durchströmten Haldenbereiches bzw. der Austrittsfläche abhängig sind. Eine Erhöhung dieses Wertes führt zu einer umgekehrt proportionalen Reduzierung der rechnerisch ermittelten spezifischen Exhalationsrate. Demgegenüber wird die resultierende Gesamtexhalation als Produkt aus Austrittsfläche und Exhalationsrate als deutlich belastbarer angesehen.

Eine wesentliche Zielstellung des Forschungsauftrages bestand darin, eine Methodik zu entwickeln, die es erlaubt, entsprechende Prognosen auch für weitere Standorte bzw. Objekte mit einem vertretbaren Aufwand durchzuführen.

Dazu wurde ein entsprechender Vorschlag erarbeitet, welcher auf dem im Rahmen des Vorhabens entwickelten Modell beruht. Als Eingangsdaten werden sowohl Standortparameter, als auch Klimadaten benötigt. Die Standortparameter müssen teilweise aus Felduntersuchungen gewonnen werden, teilweise können sie aus topografischen Informationen und Altunterlagen zum Objekt abgeleitet werden.

Auf der Grundlage dieser Daten kann dann mit dem dargestellten Modellkonzept eine Prognose für den Zeitverlauf der Konzentration und für die entsprechenden Jahresmittelwerte erfolgen.

Während der Bearbeitung der Aufgabenstellung erkannte Defizite wurden dargestellt und Hinweise für weiterführende Arbeiten gegeben. Insbesondere wird eine Verifizierung der entwickelten Methode an weiteren Standorten empfohlen.

## **1 Veranlassung und Aufgabenstellung**

Atmosphärische Radonfreisetzungen aus flächenhaften bergbaulichen Hinterlassenschaften, wie z. B. Halden, können in deren unmittelbarem Umfeld zu hohen Strahlenexpositionen für Einzelpersonen der Bevölkerung führen, für die insbesondere im Haldenfußbereich beobachtete hohe Radonkonzentrationen verantwortlich sind. Die zu diesen (unerwartet) hohen Radonkonzentrationen führenden Prozesse ergeben sich hauptsächlich aus singulären, d. h. räumlich und zeitlich begrenzten Radonfreisetzungen infolge konvektiver Transportvorgänge im Haldenkörper.

Die G.E.O.S. Freiberg Ingenieurgesellschaft mbH wurde durch das Bundesamt für Strahlenschutz beauftragt, experimentelle zeitauflösende Untersuchungen zur Radonfreisetzung sowie zeit- und ortsauflösende Untersuchungen der atmosphärischen Ausbreitung im Nahbereich von Halden durchzuführen. Dabei sollen singuläre Radonfreisetzungen und die Ausbreitungsbedingungen in Abhängigkeit von den topographischen und meteorologischen Verhältnissen adäquat erfasst werden.

Die Untersuchungen sollen zur Erklärung der Entstehung hoher Radonkonzentrationen im Nahbereich entsprechender Halden beitragen. Des Weiteren sollen Lösungswege zur Modellierung und insbesondere bei der Bewertung des „Radonpfades“ aufgezeigt werden, die in vorhandene Berechnungsvorschriften und Empfehlungen des Bundes übernommen werden können.

## **2 Problembeschreibung**

Die Radonfreisetzung in die Atmosphäre wird bei vielen Halden des Uran- und Altbergbaus durch konvektive Luftströmungen im Haldeninneren, insbesondere bei erhöhter Gasdurchlässigkeit, dominiert. Diese Luftströmungen sind eng mit der Temperaturdifferenz zwischen der Außenluft und dem Haldeninneren gekoppelt und bedingen neben starken tages- und jahreszeitlichen Schwankungen der Radonexhalationsrate auch stark inhomogene Radonfreisetzungen auf der Haldenfläche.

Die Radonfreisetzungen treten lokal begrenzt auf bestimmten Haldenbereichen auf und können in austauscharmen Wetterlagen zu lokal ungewöhnlich hohen Radonexpositionen für Einzelpersonen der Bevölkerung führen. Diese Radonkonzentrationen können durch Kaltluftabflüsse, insbesondere in Hanglagen, noch erhöht werden.

Die hohen Expositionswerte gehen oftmals mit nur geringen spezifischen Aktivitäten des Haldenmaterials einher.

Die in vorangegangenen Untersuchungen gemessenen Extremwerte der Radonfreiluftkonzentration können zzt. nur mit großen Unsicherheiten prognostiziert werden.

### 3 Grundlagen

#### 3.1 Radonmesstechnik und -methoden

Messgeräte mit zeitgetaktetem Betrieb und Langzeitexposimeter sind für Radon-222 in Luft heute die Standardgeräte [1]. Langzeitexposimeter sind dabei nur für lange Messzeiträume, in Abhängigkeit von der Radonkonzentration im Allgemeinen mehrere Tage, verwendbar. Für die Untersuchung von konvektionsgetriebener Radonfreisetzung und kaltluftabflussgetragener Radonausbreitung sind Zeitskalen im Bereich weniger Stunden zu erwarten. Daher kommen für entsprechende Untersuchungen nur Messgeräte mit zeitlicher Auflösung  $<1$  h, in Betracht. Dies ist nur bei Messgeräten mit zeitgetaktetem Betrieb erfüllt.

##### 3.1.1 Zeitgetaktete Methoden der Messung der Radonkonzentration

###### 3.1.1.1 AlphaGUARD

Das Messgerät AlphaGUARD basiert auf einem verbesserten Prinzip der klassischen Pulsionisationskammer (Alphaspektroskopie, Abbildung 1). Bedingt durch eine optimierte Geometrie der Messkammer und Signalverarbeitung besitzt AlphaGUARD eine hohe Nachweiseffektivität und zeichnet sich durch ein schnelles Ansprechvermögen aus. Der Monitor eignet sich zur kontinuierlichen Bestimmung der Radonkonzentration über einen großen Messbereich (2 bis 2.000.000 Bq/m<sup>3</sup>) und erlaubt einen wartungsfreien Betrieb mit langzeitstabilem Kalibrierfaktor. Im Diffusionsmodus (z. B. für Langzeitmessungen) sind ausschließlich verschleißfreie Komponenten im Einsatz, Pumpen und Trocknungselemente werden dabei nicht benötigt.

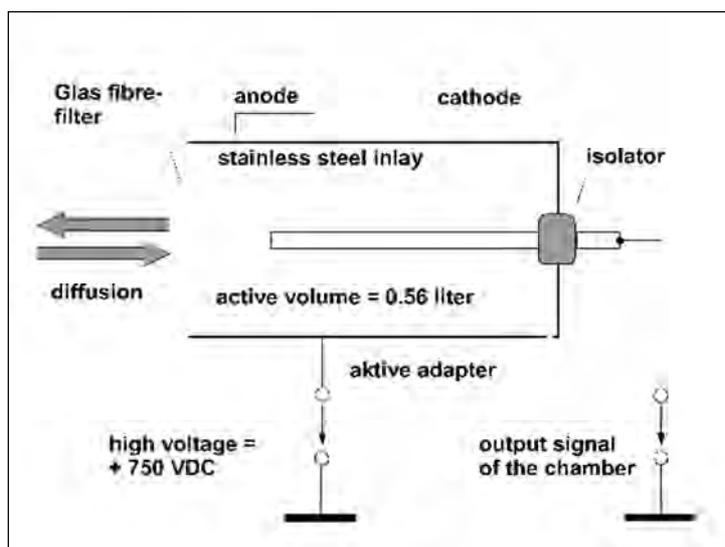


Abbildung 1: Messprinzip des AlphaGUARD [1]

Da das Messgerät im Diffusionsbetrieb eine relativ große Zeitkonstante aufweist, besteht zur Realisierung besonders kurzer Messintervalle die Möglichkeit, die zu messende Luft über eine externe Pumpe anzusaugen.

### **3.1.1.2 Radon Scout/Radon Scout Plus**

Im Gegensatz zum AlphaGUARD arbeitet das Gerät mit einem Halbleiterdetektor und Hochspannungsanreicherung im Diffusionsbetrieb. Der Radon Scout besitzt gegenüber dem AlphaGUARD eine geringere Messeffektivität, was sich auch in einer höheren Nachweisgrenze äußert. So kann in einem Messintervall von 1 h eine Radonkonzentration von 200 Bq/m<sup>3</sup> bei einem statistischen Fehler von 20 % bestimmt werden, in drei Stunden eine Radonkonzentration von 100 Bq/m<sup>3</sup> mit einem statistischen Fehler von 17 %. Analog zum AlphaGUARD besitzt auch der Radon Scout Sensoren für Luftfeuchte, Lufttemperatur und Luftdruck sowie einen Bewegungssensor.

## **3.1.2 Integrierende Methoden der Messung der Radonkonzentration**

### **3.1.2.1 Elektret-Ionisationsammer**

Bei den Elektret-Messgeräten handelt es sich um passive integrierende Ionisations-Monitore. Elektrete besitzen eine quasipermanente elektrische Ladung, wobei die Differenz der Ladungen von Vorder- und Rückseite scheiben- oder plattenförmiger Elektrete die Elektretspannung ergibt, die ein Maß für den Ladungszustand des Elektreten ist. Das Radon-Gas diffundiert durch einen Filter in die Kammer, wo die beim Zerfall entstehenden Alpha-Teilchen die Luftmoleküle ionisieren. Die so entstandenen negativen Ladungsträger bewegen sich unter dem Einfluss des elektrischen Feldes zu den Elektretoberflächen und kompensieren dort die Ladung. Die sich dadurch verändernde Elektretspannung ist dem Produkt aus Radon-222-Konzentration und Exposition proportional.

Für das Messverfahren werden folgende Messbereiche angegeben [3]:

- 100 - 500 kBq/m<sup>3</sup>                      bei 1 Tag Expositionszeit
- 0,01 - 5 kBq/m<sup>3</sup>                      bei 3 Monaten Expositionszeit

Für Kurzzeitmessungen ist das Messverfahren demnach nicht geeignet.

### **3.1.2.2 Festkörper-Kernspurdetektoren (FKSD)**

Alphateilchen als schwere, geladene Teilchen erzeugen entlang ihrer Bahn in einem elektrisch nicht leitenden Festkörper (Folie) eine feine Spur von beschädigtem Material, eine Kernspur mit einem Durchmesser von 5 - 10 nm. Mit Ätzmitteln können die primären latenten Kernspuren zu mikroskopischen Ätzspuren vergrößert werden. Wird in einem elektrischen Wechselfeld geätzt, können die Kernspuren weiter vergrößert werden, bis sie auch ohne Mikroskop sichtbar werden [1].

Solche Messgeräte (z.B. ALTRAC) werden zur passiven, integrierenden Messung über längere Zeiträume (z. B. 3 Monate) eingesetzt. Für das Messverfahren wird ein Messbereich von 0,5 - 100 kBq/m<sup>3</sup>d angegeben [3]. Bei einer mittleren Radonkonzentration von 1.000 Bq/m<sup>3</sup> ergibt sich daraus eine Mindestexpositionsdauer von 2 Tagen. Daher ist das Messverfahren für Kurzzeitmessungen nicht geeignet.

## **3.2 Bestimmung der Radonexhalationsrate von Bergbauhalden**

### **3.2.1 Anreicherungsbox**

Die Exhalationsrate von Radon aus dem Erdboden wird bisher meist mittels Anreicherungsbox gemessen. Die Methode wird u.a. in [17] näher vorgestellt. Die Box muss so auf die zu untersuchende Fläche aufgesetzt werden, dass kein Austausch der Luft in der Box mit der Außenluft stattfindet. Die Messung selbst erfolgt dabei mit üblichen Monitoren, wobei sich diese in der Box (Diffusionsmessverfahren) oder, über eine Pumpe angeschlossen, außerhalb der Box (Umwälzmessverfahren) befinden können. Aus dem Anstieg der Radonkonzentration in der Box wird die Exhalationsrate bestimmt. Die Messzeit beträgt üblicherweise etwa 1 h.

### **3.2.2 Integrierenden Messungen**

Einer flächendeckenden Messung der Radonexhalationen auf Bergbauhalden mittels Anreicherungsboxen stehen ökonomische Bedenken (große Anzahl benötigter Boxen) entgegen.

Eine zur Beurteilung der Radonexhalationen großer Flächen, wie sie Bergbauhalden darstellen, geeignete Messmethode wird ausführlich in [4] dargestellt. Dabei wurde gezeigt, dass sich die tages- und jahreszeitlichen Schwankungen durch die Temperaturunterschiede zwischen Atmosphäre und Haldenkörper (Boden) erklären lassen.

Die Messung der Radonkonzentration mit Hilfe von Kernspurdetektoren in geringen Höhen (5 - 15 cm) reflektiert das komplexe Exhalationsverhalten einer Halde bzw. einer geogenen Fläche. Im Sommerhalbjahr werden am Haldenfuß, im Winter auf dem Haldenplateau höhere Kon-

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

zentrationen gemessen. Konzentrationsmessungen in 1 - 1,5 m Höhe liefern solche Informationen nicht. Der Vorteil der integrierenden Messungen manifestiert sich vor allem darin, dass über viele Einflüsse, wie z. B. Temperaturunterschiede, Wind, Regen, Bewuchs, gemittelt wird.

Ausgehend von dem gegenwärtigen Kenntnisstand wird in [4] folgende Herangehensweise empfohlen:

- Messung der Radonkonzentration in geringen Höhen, um das Verteilungsmuster der Radonaustrittsgebiete zu erhalten, die Unterschiede in den Radonkonzentrationen sind in der Regel durch die unterschiedlichen Exhalationsraten bedingt
- Ausgehend von dieser Prämisse genügt es, an wenigen Punkten die Exhalationsrate direkt zu bestimmen, um die an anderen Messpunkten bestimmten Radonkonzentrationswerte in Exhalationsraten umzurechnen.
- Nach Akkumulierung empirisch gewonnener Kenntnisse kann auf die zusätzliche Messung der Exhalation weitestgehend verzichtet werden und die Kalibrierung, d. h. Umrechnung der Konzentrationswerte in Exhalationswerte, direkt durchgeführt werden. Nur noch stichpunktartige Messungen der Exhalation sind erforderlich.
- Von gewissem Vorteil ist auch, einige Kernspurdetektoren mit einem ca. 30 cm hohen Ring zu umgeben, um Informationen über den Einfluss der Windadvektion zu gewinnen.
- Im Unterschied zu den in der freien Atmosphäre in 10 cm Höhe positionierten Kernspurdetektoren werden diese mit einem ca. 30 cm hohen Ring umgebenen Kernspurdetektoren als Kernspur-Radonflux-Monitor (KRF-Monitor) bezeichnet. Die Bezeichnung erfolgt in Anlehnung an die E-Perm-Monitore, die auf der Basis von Elektreten arbeiten und eine Messeinrichtung darstellen, die für den Feldeinsatz nur bedingt geeignet ist und die Exhalationsrate einer vergleichsweise geringen Fläche von 180 cm<sup>2</sup> bestimmt, während die der KRF-Monitore bei 0,4 m<sup>2</sup> liegt und wegen ihrer Robustheit für Feldeinsätze gut geeignet ist.
- Es ist als das wichtigste Resultat der Untersuchungen zu konstatieren, dass das Verteilungsmuster der Radonkonzentration in geringen Höhen die gewünschte Information über den Gesamtzustand der Exhalation einer Fläche liefert. Die Mittelung über diese Konzentrationen über die Gesamtfläche oder Teilflächen erlaubt, die entsprechenden mittleren Exhalationsraten zu extrahieren. Damit kann eine Klassifizierung von Flächen allein anhand der in niedriger Höhe gemessenen Radonkonzentrationen erreicht werden. Die empirisch gewonnenen Ergebnisse liefern dabei den Maßstab.

### **3.3 Kaltluftabflüsse**

Entstehung, Dynamik und Wirkung lokaler Kaltluft, insbesondere hinsichtlich der Regional- und Stadtplanung werden in der Richtlinie VDI 3787 ausführlich behandelt [1], auf die nachfolgend Bezug genommen wird.

Diese Richtlinie definiert lokale Kaltluft als bodennahe Luft, die kälter als die ihrer Umgebung ist. Diese Kaltluft wird entweder vor Ort auf Grund des Energieumsatzes an der Erdoberfläche gebildet oder durch kleinräumige Zirkulation herantransportiert. Kaltluftentstehung und -abfluss hängen von meteorologischen Verhältnissen, der Flächennutzung sowie von der Geländeform und -exposition ab.

Kaltluft und Kaltluftabflüsse können die Luftqualität verbessern oder verschlechtern. Verbesserungen ergeben sich beim Herantransport von Luft mit der Qualität der lufthygienischen Hintergrundbelastung. Driftet die Kaltluft über Emissionsquellen, kann sie Luftbeimengungen (z. B. aus Kfz-Emissionen und Hausbrand) oder Gerüche aufnehmen und bis in Wohngebiete transportieren. Ähnliches wird für die Ausbreitung von Radonexhalationen aus Bergbauhalden diskutiert (z. B. [19]).

#### **3.3.1.1 Entstehung und Verhalten**

Lokale Kaltluft entsteht während des nachmittäglichen bzw. abendlichen Abkühlungsprozesses und insbesondere in der Nacht an der Erdoberfläche. Aus der nächtlichen Energiebilanzgleichung für die Erdoberfläche ergibt sich, dass sich die nächtliche Strahlungsbilanz aus der Ausstrahlung der Erdoberfläche (von der Oberfläche weg gerichtet) und der atmosphärischen Gegenstrahlung (zur Oberfläche hin gerichtet) zusammensetzt. Die Gegenstrahlung wird maßgeblich durch den Wasserdampfgehalt der Atmosphäre in den unteren 150 m bestimmt, indem sie mit abnehmendem Wasserdampfgehalt ebenfalls abnimmt. Dadurch kommt es zu einem Überwiegen der Ausstrahlung von der Erdoberfläche. Die Bildung von Kaltluft wird demnach begünstigt durch

- wolkenlosen Himmel sowie
- geringen Wasserdampfgehalt der unteren Atmosphärenschichten.

**Dies führt zu maximaler nächtlicher Kaltluftproduktion bei ausgeprägten Hochdruckwetterlagen mit wolkenlosem Himmel.**

Neben den meteorologischen Bedingungen bildet die Topografie einen weiteren bedeutenden Einflussfaktor auf Entstehung und Ausbreitung von Kaltluft. Die Abkühlungsraten der Luft werden

## Singuläre Radonfreisetzungen

durch die Geländeform, die Exposition, die Art der Oberflächen und deren physikalische Eigenschaften (z. B. Bodenart und -beschaffenheit) bestimmt.

Heterogene Flächennutzung und unterschiedliche physikalische Eigenschaften des Untergrundes bedingen eine räumlich differenzierte Abkühlung mit der Ausbildung horizontaler Luftdruckgradienten. Aufgrund dieser Gradienten sind auch in ebenem Gelände thermisch induzierte Luftzirkulationen möglich (sog. Flurwindssysteme).

Gebäude oder Dämme führen zu einem Kaltluftstau und werden gegebenenfalls mit zunehmender Kaltluftschichtdicke zeitversetzt über- bzw. umströmt. Bei der Durchströmung von Büschen oder Baumgruppen erhöht sich die dynamische Turbulenz mit der Folge von horizontalen oder vertikalen Verlagerungen des Strömungsmaximums.

Von höher gelegenen Flächen fließt die Kaltluft dem Geländegefälle folgend zu tiefer gelegenen Gebieten ab (Abbildung 2). Dabei werden die Fließrichtung durch die Geländeform, die die Fließgeschwindigkeit von der Neigung und Rauigkeit der Oberfläche bestimmt.

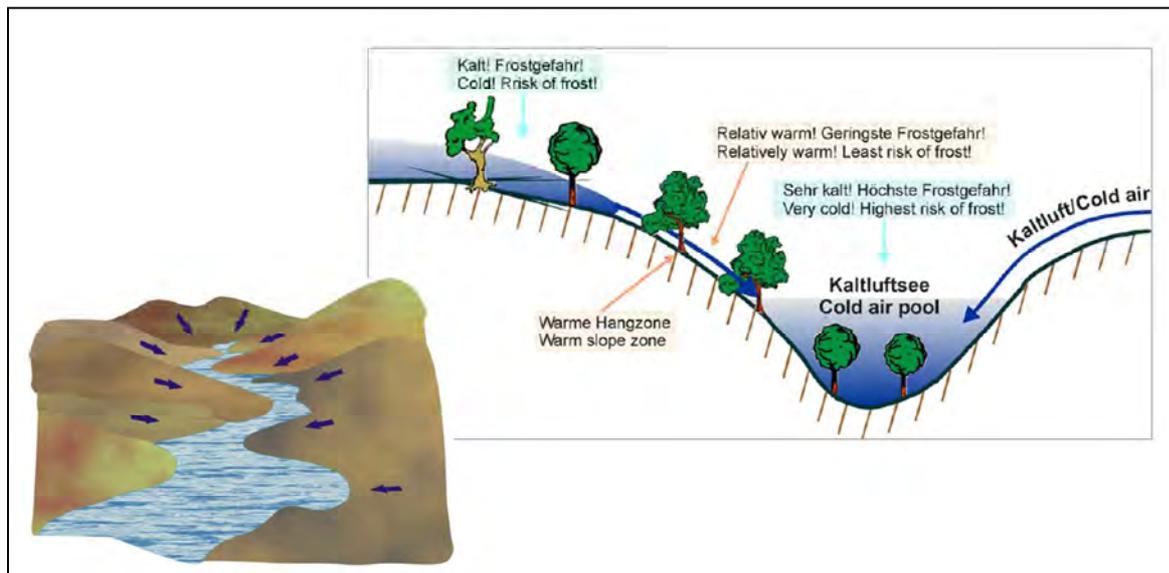


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Entstehung eines Kaltluftsees in einem Tal (rechts) und des Kaltluftabflusses in reliefiertem Gelände (links) (aus [5])

In tiefer gelegenen konkaven Geländeteilen (Täler, Talkessel, Schluchten und Mulden) kann sich die Kaltluft sammeln und Kaltluftseen bilden.

Für einen bestimmten Standort lässt sich unter Berücksichtigung der meteorologischen und topografischen Verhältnisse ein Kaltlufteinzugsgebiet festlegen, das die Kaltluftproduktionsgebiete umfasst, die für den Standort von Bedeutung sind (Wirkungsraum nach [5]). Je größer ein Kaltlufteinzugsgebiet ist, umso mehr kalte Luft fließt talwärts ab und umso höher steigt der Kaltluftsee an. Die Abflussgeschwindigkeit steigt dabei mit der Geländeneigung an.

### **3.3.2 Modellierung von Kaltluftabflüssen**

#### **3.3.2.1 Überblick**

Die Grundlagen der Modellierung von Kaltluftentstehung und -abfluss werden in [5] beschrieben. Anforderungen an entsprechende Modelle werden formuliert. Die Modellierung ist numerisch (Computermodelle) oder analog-physikalisch (Kaltluftkammern) möglich. Nachfolgend wird das vom Deutschen Wetterdienst entwickelte Kaltluft-Abflussmodell KLAM\_21 näher vorgestellt.

#### **3.3.2.2 Kaltluft-Abflussmodell KLAM\_21**

Bei KLAM\_21 handelt es sich um ein vom Deutschen Wetterdienst entwickeltes 2-dimensionales Simulationsmodell für Kaltluftströmungen in orographisch gegliedertem Gelände. Es ermöglicht die Berechnung der bei nächtlicher Abkühlung entstehenden Schwereströmungen. Ergebnisse der Modellrechnung sind

- die zeitliche Entwicklung und die flächenhafte Verteilung der Kaltluflthöhe nach Sonnenuntergang während der folgenden Nachtstunden,
- das mittlere Windfeld oder der Volumenstrom der Kaltluft zu beliebigen Zeitpunkten,
- die Ausbreitung von Luftbeimengungen.

Als besonderer Aspekt ist die Möglichkeit des „Nestings“ anzusehen. Dabei ist ein hoch aufgelöster Kernbereich mit den lokalen Strömungen in einen gröber aufgelösten Einflussbereich mit den regionalen Ausgleichsströmungen eingebettet [6]. Mit dieser Vorgehensweise wird die bei lokalen Modellen üblicherweise vorhandene Problematik der sachgerechten Randbedingungen weitestgehend umgangen.

## **4 Radonfreisetzung aus bergbaulichen Hinterlassenschaften - Literaturüberblick Standort Johannegeorgenstadt**

### **4.1 Eigene Arbeiten G.E.O.S.**

Durch die Firma G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH wurden seit Anfang der 90iger Jahre bis heute für strahlenschutzrechtliche Fragestellungen Dienstleistungen für Bundes- und Landesbehörden, für kommunale und regionale Verwaltungen sowie private Auftraggeber erbracht. Dies umfasst alle in Sachsen befindlichen Uranbergbaustandorte. Nachfolgend werden die Unterlagen ausgewertet, die im Untersuchungsraum Johannegeorgenstadt vorliegen.

**Messprogramm 16/2 Johannegeorgenstadt Teilflächen I, III-VI, Messprogramm 16/3  
Johannegeorgenstadt Teilfläche II, Auftraggeber: Gesellschaft für Anlagen- und  
Reaktorsicherheit (GRS) mbH Köln, Berichtszeitraum: 1994 - 1996**

Im Zuge der Erfassung, Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten wurden im Auftrag der GRS durch die G.E.O.S. Freiberg die Messprogramme 16/2 und 16/3 bearbeitet. Hierbei erfolgten in den Untersuchungsgebieten neben der Erfassung der Ortsdosisleistungen in einem definierten Raster die Entnahme und Analyse von Boden-, Sediment-, Wasser-, Bio- und Baustanzproben die Ermittlung der aktuellen Radonbelastung.

Das Messprogramm 16/2 umfasste die Teilgebiete Jugel, Antonsthal, Breitenbrunn und Erlabrunn, während das Messprogramm 16/3 die Teilgebiete Johannegeorgenstadt, Eibenstock und Zschorlau beinhaltete. Ergebnisse hinsichtlich der Radonsituation sollen daher nur für den Standort Johannegeorgenstadt ausgewertet werden.

Im Ergebnis der radiometrischen Erfassung der Ortsdosisleistungen (ODL) und der stoffspezifischen Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Haldenkomplexe in Johannegeorgenstadt durch relativ schwache, aber gleichmäßig erhöhte Radionuklidkonzentrationen geprägt sind. ODL-Werte  $> 1.000 \text{ nSv/h}$  wurden an Halden nur lokal, insbesondere in Bereichen, die dem Umschlag von Uranerz dienten bzw. wo Uranerzreste das Haldenmaterial prägten, nachgewiesen.

Untersuchungen an Bohrkernen belegten die Differenzierung von Radionukliden im Haldenkörper aufgrund geochemischer Migrationsprozesse, die für die einzelnen Radionuklide unterschiedlich in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen ablaufen und was sich auch in der Zusammensetzung der Haldensickerwässer widerspiegelte. Zudem konnte gezeigt werden, dass unter Hinzunahme von geophysikalischen Bohrlochmessmethoden eine Abschätzung des Volumens radioaktiv kontaminierter Massen möglich ist.

Mit dem Ziel der Ermittlung der geogenen Grundbelastung des Untersuchungsgebietes mit Radon wurde auf einem Nord-West-Profil dessen Bodenluftkonzentration ermittelt (Abbildung 3). Es wurden, auch durch Wiederholungsmessungen, keine signifikant erhöhten Messwerte registriert. Als geogenes Grundniveau wurde  $20 \text{ kBq Rn/m}^3$  Bodenluft für das durch Phyllite geprägte Untersuchungsgebiet angegeben. Mit Annäherung an den tektonischen Kontakt zwischen Phyllit und Granit wurde ein Ansteigen der Radonkonzentration in der Bodenluft festgestellt, der letztlich zu einem höheren Background im durch Granite geprägten Untersuchungsgebiet von  $40 \text{ kBq Rn/m}^3$  führte.

## Singuläre Radonfreisetzungen

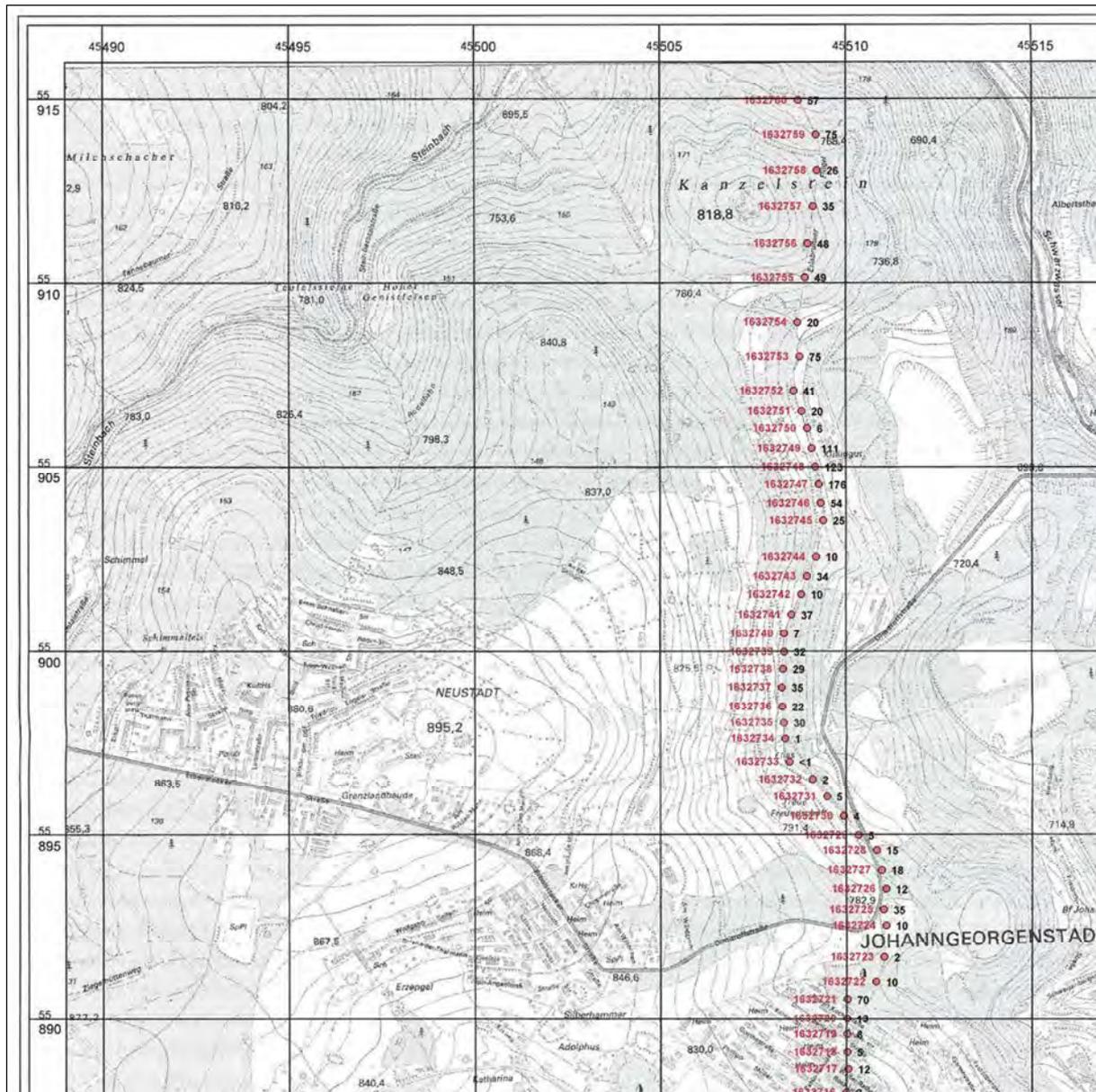


Abbildung 3: Ergebnisse von Radonmessungen in der Bodenluft in Johanngeorgenstadt von 1996, roter Punkt – links: Messstellenbezeichnung, rechts: Radonkonzentrationen in kBq/m<sup>3</sup>

Auffällig sind dabei die erhöhten Radonkonzentrationen (> 1 kBq/m<sup>3</sup>) im Bereich oberhalb der ehemaligen IAA Steinsee.

### **Studie zur Intensität der Radonexhalation auf Bergbauhalden in Abhängigkeit von Lage und Abdeckung, Auftraggeber: Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landesentwicklung, Berichtszeitraum: 1996**

In dieser Studie wurden exemplarisch an einer Tafelhalde und an einer Halde in Hanglage untersucht, inwieweit morphologische Unterschiede eine Rolle bei der Radonfreisetzung aus den

## Singuläre Radonfreisetzungen

Haldenkörpern spielen. Zudem wurden die Faktoren der Abdeckung und natürlichen Bodenbildung und die Zusammensetzung des Haldenmaterials betrachtet.

Als Haldenkomplexe wurden die Halde an der Haberlandmühle (Halde am Hang) sowie die Schurfschachthalde 19 (Tafelhalde) ausgewählt (Abbildung 4).

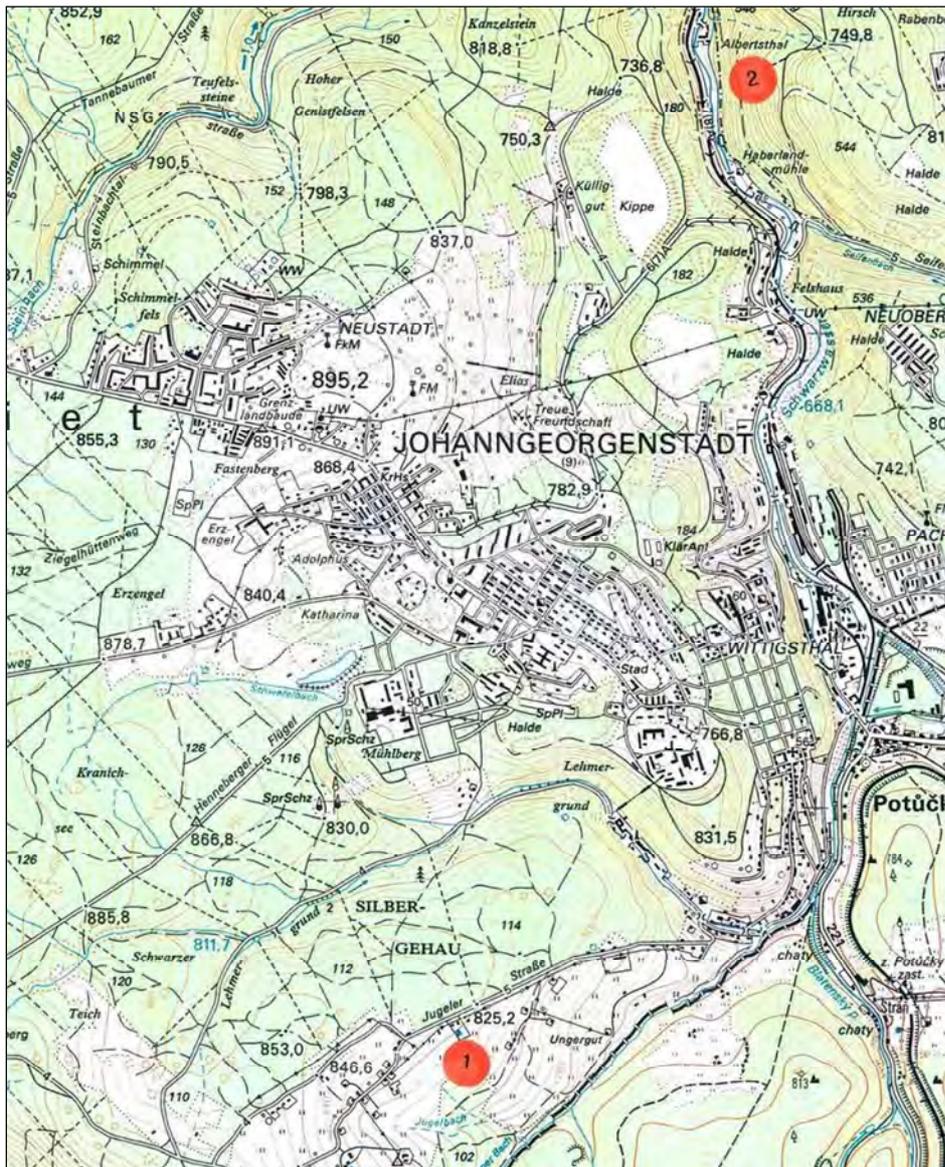


Abbildung 4: Lage der Untersuchungsstandorte zur Betrachtung der Radonfreisetzung, 1996,  
1 - Halde Schurfschacht 19, 2 - Halde an der Haberlandmühle

Auf beiden Halden wurden in definierten Flächen Radonlangzeitmessungen in der Bodenluft und in unterschiedlichen Niveaus über der Bodenschicht durchgeführt. Die Messwerte für die Bodenluft auf der Halde des Schurfschachtes 19 lagen zumeist deutlich unter  $10 \text{ kBq Rn/m}^3$ , während

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

in der atmosphärischen Luft in 0,1 m Höhe Werte von maximal 670 Bq Rn/m<sup>3</sup> ermittelt wurden, die in 1 m - Messhöhe auf Werte unter 80 Bq Rn/m<sup>3</sup> sanken. In der Bodenluft der Halde an der Haberlandmühle wurden überwiegend Konzentrationen > 10 kBq Rn/m<sup>3</sup> ermittelt, während sie in 0,1 m Höhe in der Atmosphäre wiederum wesentlich geringere Werte bis maximal 1.100 Bq Rn/m<sup>3</sup> erlangten und in einer Messhöhe von 1 m immer noch deutlich über 80 Bq Rn/m<sup>3</sup> lagen.

Die Messungen erfolgten im September, wobei genauere Klimadaten nicht ausgewiesen wurden.

Im Vergleich der Messreihen beider Halden wurde abgeleitet, dass:

- die Haldenmorphologie und der strukturelle Bau der Halde zu unterschiedlichen Radonfreisetzungen führen können,
- der Anteil der aus Tagesöffnungen des Bergbaus stammenden Anteils an Radon in Hinsicht auf Sanierungsmaßnahmen ermittelt werden sollte, um den Umfang und die Sinnigkeit solcher Arbeiten real einzuschätzen und den Aufwand unter Beachtung strahlenschutzrechtlicher Erfordernisse zu optimieren,
- naturnahe Sanierungskonzepte (Aufforstung) zu prüfen, um abzuschätzen, ob durch fortschreitende Bodenbildung eine nachhaltige Wiederherstellung natürlicher Verhältnisse bezüglich Radon und Erosion wieder erlangt werden kann.

**Studie zum Radonverhalten auf Halden des Uranbergbaus,  
Auftraggeber: Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und  
Landesentwicklung, Berichtszeitraum: 1998**

Mit den durchgeführten Untersuchungen wurde bestätigt, dass die Haldenmorphologie der Schurfschachthalde 19, Oberjügel, einen deutlichen Einfluss auf die Konzentration von Radon in der Bodenluft und in der atmosphärischen Luft über der Halde hat. Nach den Ergebnissen 1994 durchgeführter radiologischer Untersuchungen ist sie im Allgemeinen durch spezifische Aktivitätskonzentrationen im Haldenmaterial von < 1.000 Bq/kg gekennzeichnet. Nur lokal sind in Bohrungen Schüttungen mit höheren Werten festgestellt worden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Halde in Abhängigkeit vom Verkippungsverlauf strukturelle Inhomogenitäten aufweist, was unmittelbar auf einen differenzierten Radontransport Einfluss hat (Abbildung 5).

## Singuläre Radonfreisetzungen

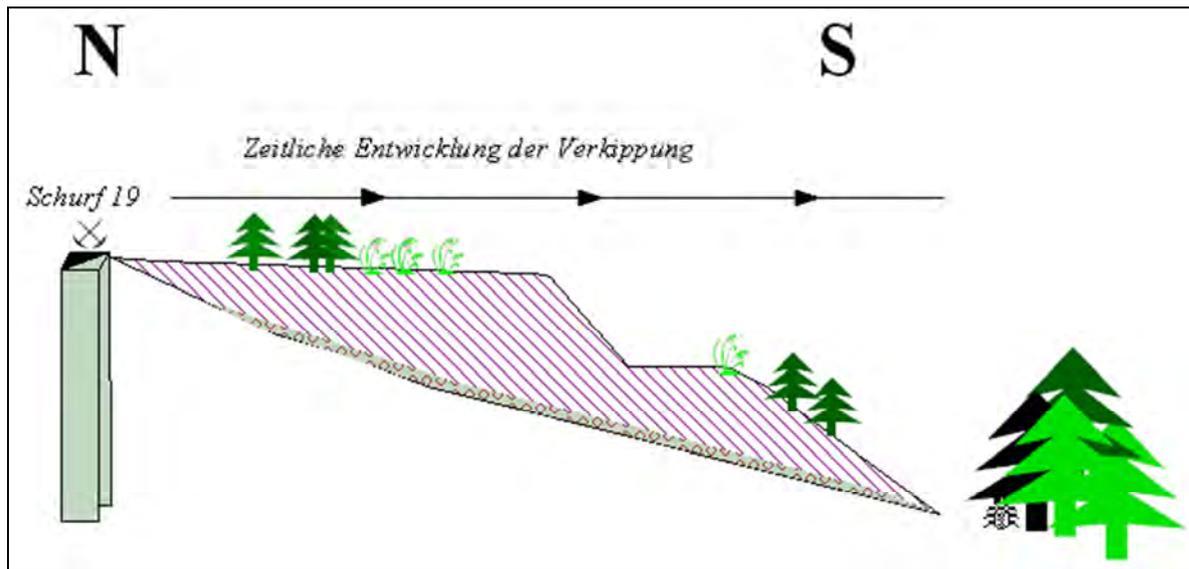


Abbildung 5: Prinzipskizze für den Aufbau des Haldenkörpers des Schurfschachtes 19 mit böschungspareller Schicht und grobstückiger Haldenbasis

Auf der Schurfschachthalde 19 wurden im Raster 20 m x 20 m, lokal verdichtet auf 10 m x 10 m, Langzeitmessungen der Radonkonzentration im Zeitraum ab 06.11. bis 01.12.1997 an insgesamt 65 Messpunkten durchgeführt. Im gleichen Raster sind mittels ALTRAC-Detektoren die Radonkonzentration in der Bodenluft (0,1 m unter Geländeoberkante) und in der bodennahen atmosphärischen Luft (0,1 m über Geländeoberfläche) gemessen worden

Besonders auffallende Bereiche mit erhöhten Radonkonzentrationen wurden im oberen Hangbereich, unmittelbar unterhalb des Haldenplateaus, sowie am Haldenfuß ebenso festgestellt, wie tages- und jahreszeitlich bedingte Wechsel maximaler Radonexhalationen zwischen diesen beiden.

## Singuläre Radonfreisetzungen

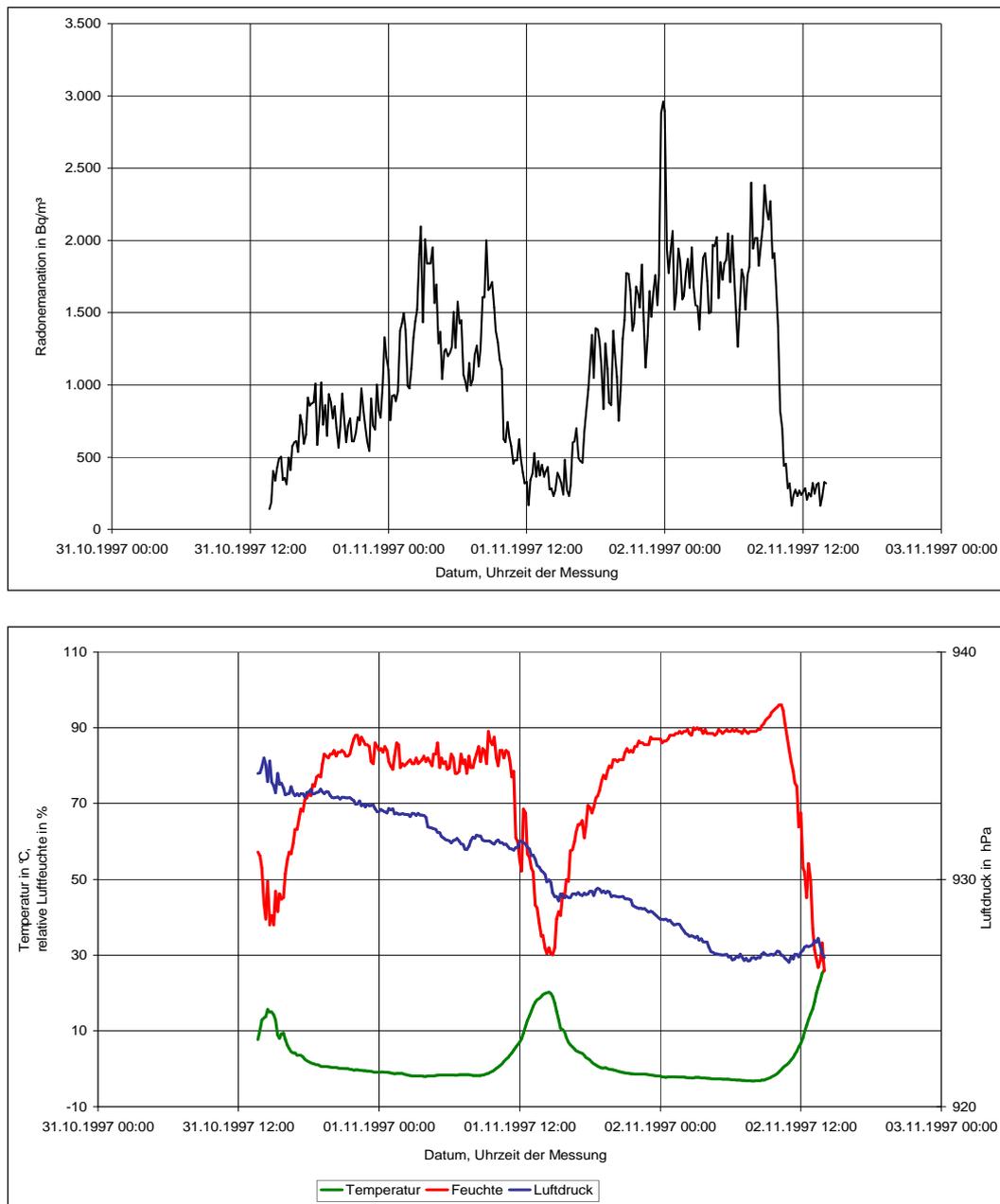


Abbildung 6: Messergebnis der 48 h - Messung der Radonkonzentration in der Atmosphäre, 0,1 m über dem Boden, auf der Schurfschachthalde 19 mit zeitlichem Verlauf von Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck

Gegenüber den 1996 auf dem Plateau der gleichen Halde vorgenommenen Messungen, die über den abgedeckten Bereichen ausschließlich niedrige Radonkonzentrationen in der Atmosphäre zeigten, wiesen die 1997 auf den Böschungen der Halde durchgeführten Arbeiten darauf hin, dass bei gleichbleibender Zusammensetzung des Haldensubstrates (Lockersyrosem mit 60 - 80 % Skelettanteil) und fehlender Abdeckung mit bindigem Material deutliche Unterschiede in der flächenhaften Verteilung von Bereichen hoher und niedriger Radonkonzentration in der

Freiluft auftreten. Das weist auf Kamineffekte bei Transport und Austritt der Haldenluft in die Atmosphäre hin.

**Studie zum Radonverhalten auf Bergbauhalden unter Winterbedingungen,  
Auftraggeber: Sächsisches Staatsministerium für  
Umwelt und Landwirtschaft, Berichtszeitraum: 1999**

Unter Verwendung des Messgerätes AlphaGUARD erfolgten Bestimmungen der Radonkonzentration über der Oberfläche von Bergbauhalden. Die an fünf verschiedenen Halden (Abbildung 7) des Johanngeorgenstädter Raumes durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass die Konvektionsprozesse in den Halden stark differieren. Neben klimatischen Einflussfaktoren wurden die Haldengröße und auch strukturelle Inhomogenitäten im Haldenkörper als Ursache benannt.

Die im Winter in den Halden ablaufenden konvektiven Lufttransporte können lokal zum Schmelzen der Schneedecke auf den Halden führen. Das war zu beobachten, wenn keine Haldenabdeckung existierte und wenn die Konvektionsströme sich intensiv genug ausbilden konnten. Nach den erfolgten Beobachtungen waren solche Schmelzlöcher im Schnee vorzugsweise auf größeren Halden zu beobachten. Diese Bereiche konvektiver Haldenluftaustritte sind nicht permanent durch Exhalationen charakterisiert. Vielmehr waren ständige Verlagerungen dieser konvektiven Ausgasungen nachweisbar. Im Idealfall war unter winterlichen Verhältnissen eine lineare Anomalie hoher Radonwerte in der Luft über dem obersten Haldenbereich zu messen. Darüber hinaus traten Radonanomalien über strukturellen Inhomogenitäten im Haldenkörper auf. Diese blieben teilweise auch bei einem Witterungswechsel zu höheren sommerlichen Temperaturen noch wirksam, wenn die konvektiven Haldenluftaustritte sich an die Haldenbasis verlagerten. Der Temperaturbereich, in dem das Regime der Konvektionen umschlägt, ist relativ breit und überstreicht nach den durchgeführten Messungen wenigstens das Intervall von +5 bis +10 °C. Zwischen kleinen und großen Halden ließen sich signifikante Unterschiede hinsichtlich des Verhaltens in diesem Temperaturübergangsbereich beobachten. Es wurde vermutet, dass das mit einem in kleinen Halden schneller anlaufenden Austausch der in ihnen enthaltenen Luft zusammenhängt. Die unter den Winterbedingungen vorgenommenen Messungen der Radonkonzentration zeigten unmittelbar über der Haldenoberfläche maximale Konzentrationswerte von > 2.000 Bq/m<sup>3</sup>. Diese Werte waren von Größe und Radionuklidinventar der Halde unabhängig. Es wurde davon ausgegangen, dass die Korngröße des Haldenmaterials das entscheidende Kriterium ist: Hohe Radonkonzentrationen traten bei hohen Feinkornanteilen auf. Kurzzeitig eingetretene höhere Lufttemperaturen von > 10 bis 20 °C waren mit lokalen Maximalwerten der Radonkonzentration von bis zu rund 1.000 Bq/m<sup>3</sup> am Haldenfuß verbunden. Vorliegende Vergleichsmessungen aus den Sommermonaten an diesen Standorten wiesen hier Spitzen von > 2.000 bis > 10.000 Bq/m<sup>3</sup> auf. Exemplarisch sind die Ergebnisse für die Halde am Stolln 226 in Abbildung 7 bis Abbildung 10 dargestellt. Diese Halde befindet sich in unmittelbarer Nähe der jetzigen Untersuchungsstandorte.

## Singuläre Radonfreisetzungen

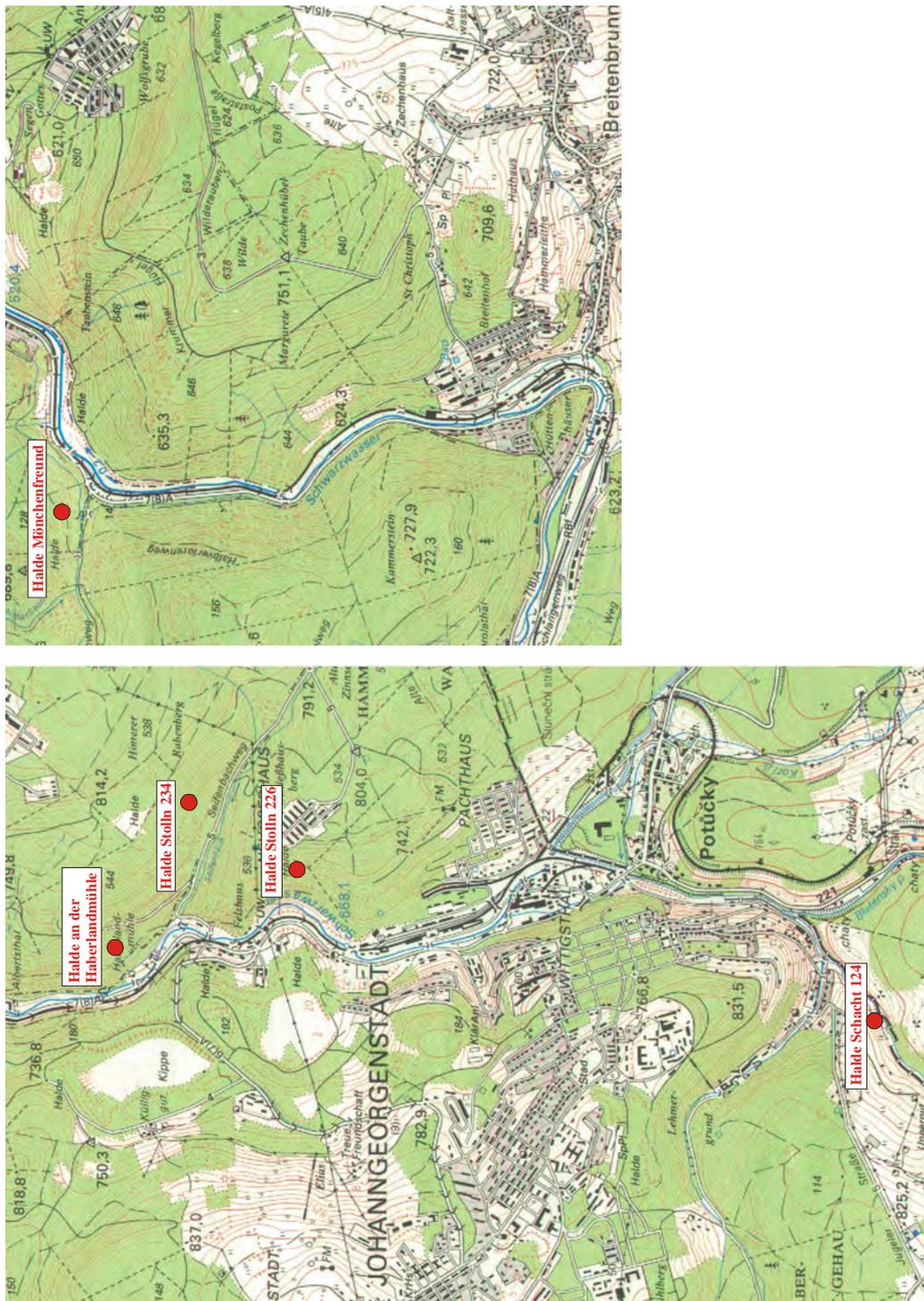


Abbildung 7: Untersuchte Haldenstandorte zur Bewertung des Radonverhaltens auf Berghalden im Johanngeorgenstädter Bergrevier unter Winterbedingungen

## Singuläre Radonfreisetzungen

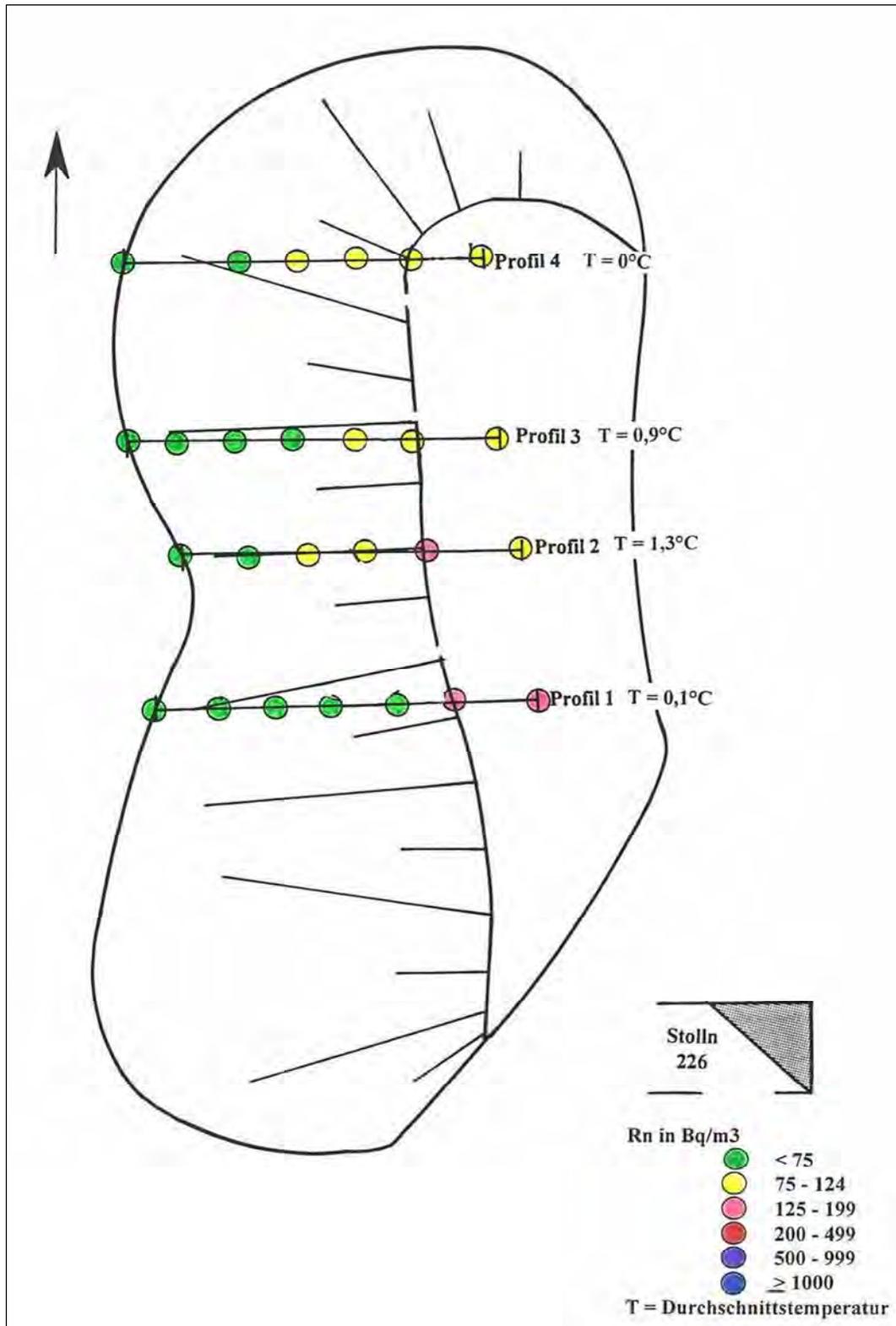


Abbildung 8: Lage der Radonmesspunkte auf der Halde am Stolln 226, Messungen vom 25.02.1999

## Singuläre Radonfreisetzungen

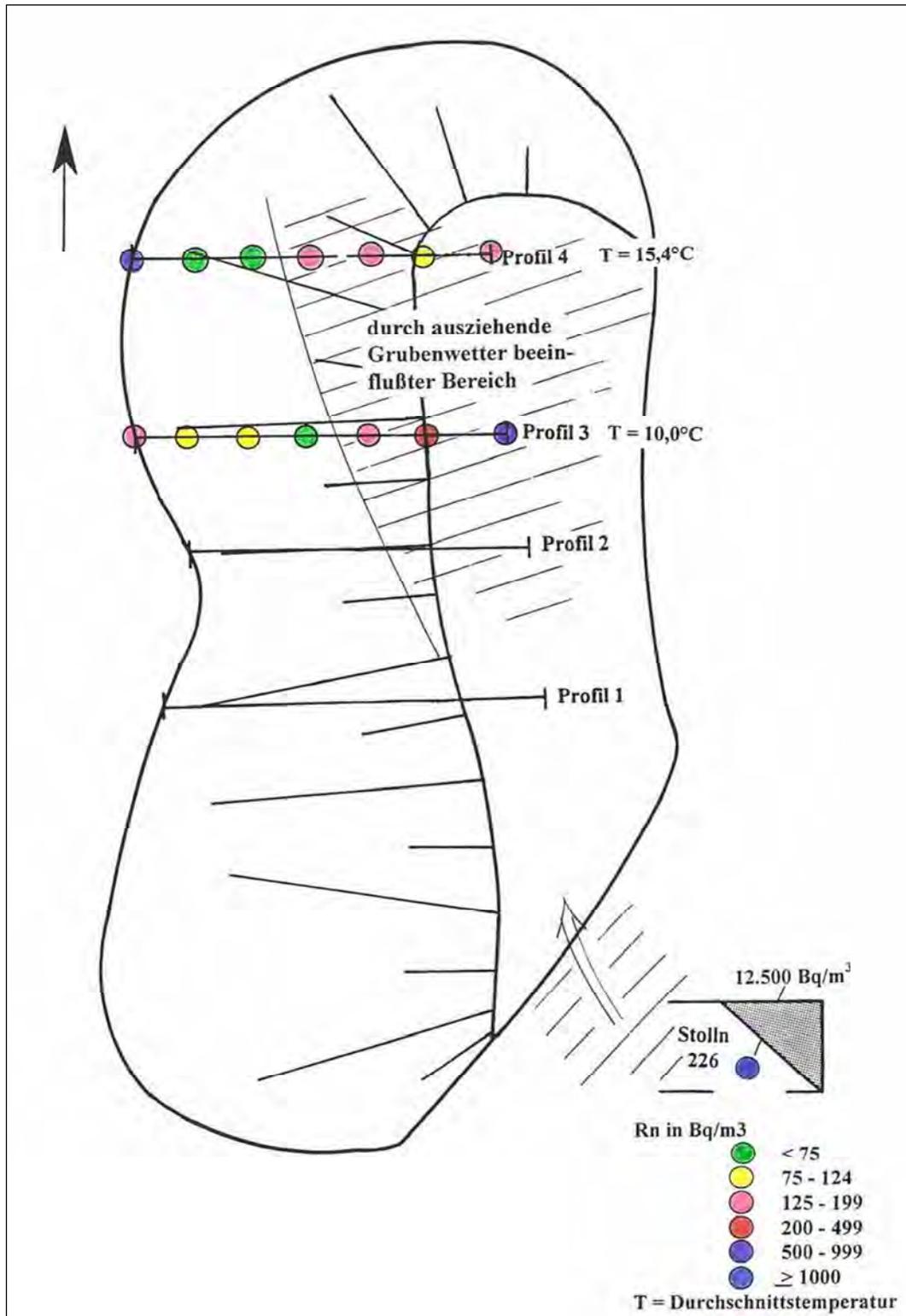


Abbildung 9: Lage der Radonmesspunkte auf der Halde am Stolln 226, Messungen vom 25.03.1999

## Singuläre Radonfreisetzungen

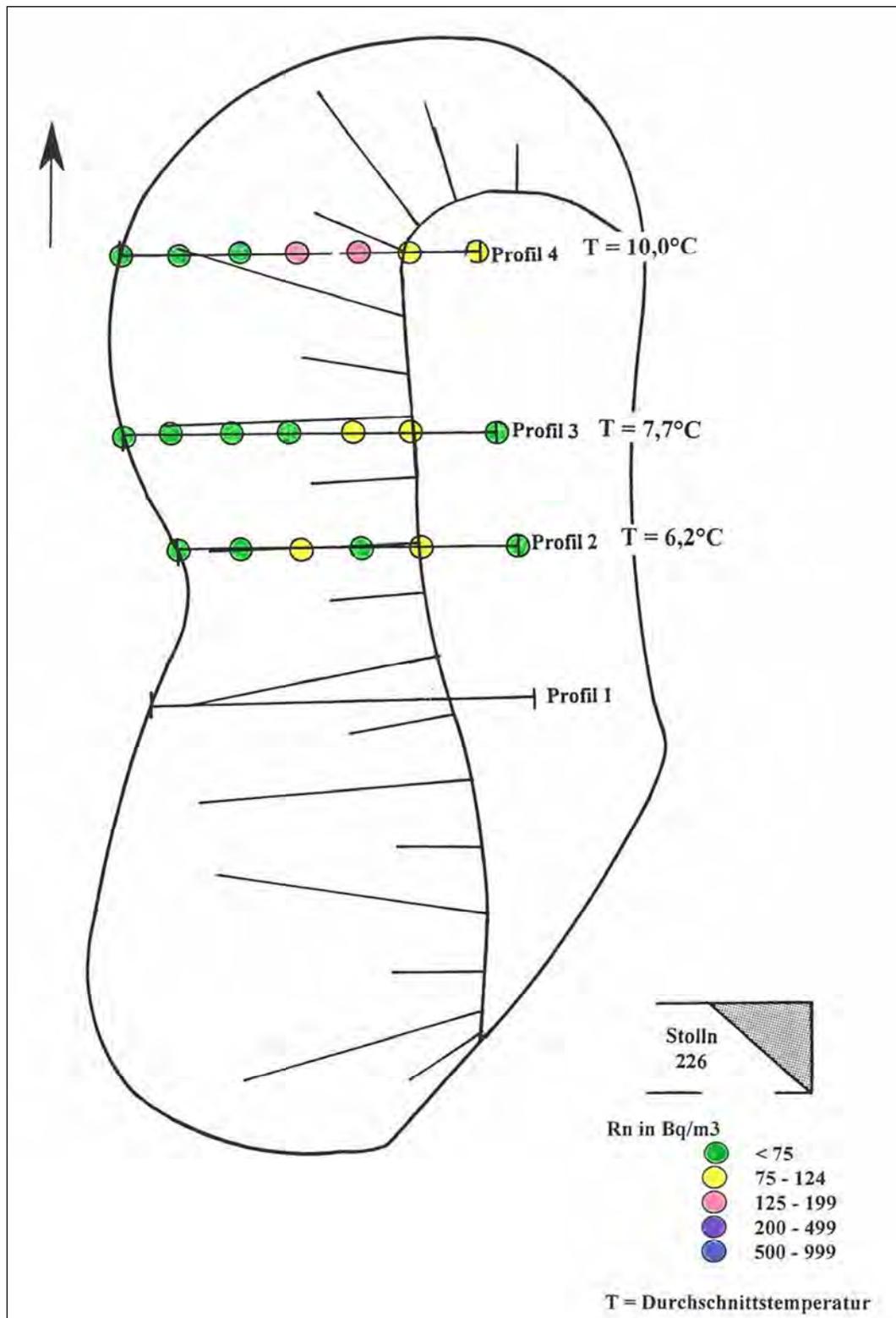


Abbildung 10: Lage der Radonmesspunkte auf der Halde am Stolln 226, Messungen vom 14.04.1999

## **4.2 Untersuchungen und Ergebnisse anderer Stellen**

Folgende interne Arbeiten der „Wismut“ konnten recherchiert, jedoch bis zur Erstellung dieses Berichtes nicht eingesehen und ausgewertet werden:

Tabelle 1: Interne Berichte der „Wismut“

<b>Objekt</b>	<b>Titel</b>	
Haldenkomplex Schächte 18, 52, 53, 227	Umweltbewertung zum Ist-Zustand der Zentralschachthalde in Johanngeorgenstadt (Reg.-Nr. Z 125)	2003
Haldenkomplex Schacht 87, Stolln 40, 146, 232	Umweltbewertung zum Ist-Zustand der Halde an der Haberlandmühle in Breitenbrunn (Reg.-Nr. Z 126)	2003
	Ist-Zustandserfassung der Radonsituation und der Bewetterungsverhältnisse des Verwahrbereiches A (Hammerberg) in Johanngeorgenstadt unter winterlichen und sommerlichen Bedingungen (Reg.-Nr. Z 154)	2005
	Dokumentation von Wismut-Altstandorten	04/1998
	Standortsanierungskonzept Johanngeorgenstadt	2005

Die umfangreichsten Untersuchungsergebnisse und Datenbestände anderer Stellen wurden für die Dammhalde Trockenbecken in Johanngeorgenstadt recherchiert, welche nachfolgend zusammengefasst werden.

### **4.2.1 Dammhalde Trockenbecken**

#### **Untersuchungen des BfS 1990 - 2008 [15], [18]**

Im Jahre 1990 wurden an dem BfS-Messpunkt 401.04 unmittelbar am Fuß der Dammhalde Trockenbecken im Ortsteil Steigerdorf mit bis zu 1.000 Bq/m<sup>3</sup> ungewöhnlich hohe Werte der Radon-Freiluftkonzentration ermittelt. Daher wurde nachfolgend das Messnetz auf das Gebiet des Steigerdorfes erweitert (Messpunkte 401.49 - 401.58) [15]. Die Ergebnisse zeigten, dass in dem im Nahbereich des Haldenkörpers gelegenen Teil des Steigerdorfes die langzeitigen Mittelwerte der Radonkonzentration oberhalb des empfohlenen Richtwertes der langzeitigen Radonkonzentration im Freien in den einer bergbaulichen Hinterlassenschaft nächstgelegenen Wohngebieten von 80 Bq/m<sup>3</sup> liegen. An den 100 - 150 m von der Dammhalde entfernten Messpunkten lagen die Messwerte innerhalb des Normalbereiches.

Sanierungsarbeiten an den Haldenböschungen in den Jahren 1993 - 1995 durch Begradigung und Abdeckung mit 10 - 15 cm lehmhaltigem Material führten in der Folge zu einem deutlichen Rückgang der Radonkonzentrationen. Nachfolgend kam es zu einem erneuten Anstieg dieser Werte.

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

Insbesondere im Bereich des Haldenfußes gelegene Messstellen zeigten ausgeprägte jahreszeitliche Veränderungen der Radonkonzentration, indem im Sommer deutlich höhere Werte, als im Winter gemessen wurden. Dies deutet auf konvektive Transportprozesse im Haldenkörper hin.

Im Jahre 1999 wurden zur Ermittlung der Ursache der erhöhten Konzentrationen zusätzliche Untersuchungen durchgeführt [15]. Durch Messungen in geringer Höhe mit Kernspurdetektoren (Expositionszeit 6 Wochen) auf mehreren Profilen konnte ausgeschlossen werden, dass die erhöhten Radonkonzentrationen durch einen unter dem Haldenbereich verlaufenden Altbergbaustollen verursacht werden.

Austretende Sickerwässer im Bereich des überkippten Kirschbächltales sind aufgrund kontinuierlicher Radonfreisetzung von lokaler Bedeutung.

Untersuchungen mit aktiven Messgeräten „ILMA“ und „AlphaGUARD“ in geringer Höhe zeigten, dass aus der gesamten Fläche des unteren Böschungsbereiches zwischen Haldenfuß und 1. Berme deutlich mehr Radon freigesetzt wird, als aus anderen Flächen. Insbesondere bei stabilen Wetterlagen und Lufttemperaturen, die über der Temperatur im Haldenkörper liegen, entweicht in den Sommermonaten Radon kontinuierlich in die Freiluft. Die höchsten Werte mit etwa  $100 \text{ kBq/m}^3$  zeigten sich im Bereich von grobstückigen Ablagerungen mit großer Klüftigkeit, die während der Sanierungsarbeiten nicht oder unzureichend abgedeckt wurden.

Die Messungen wurden seit 1999 mit FKSD entlang von 3 Profilen in geringen Höhen und z. T. in 1,5 m Höhe (Expositionszeit zwischen 4 und 10 Wochen) fortgeführt [21] und dauern auch gegenwärtig an [18].

Die Ergebnisse dieser Messungen zeigen im Winterhalbjahr erhöhte Radonexhalationen an allen Messpunkten am Haldenplateau, hingegen im Sommerhalbjahr deutliche Exhalationsmaxima an den Messpunkten am Haldenfuß [18]. Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 11 und Abbildung 12 die Verläufe der Radonkonzentration an jeweils einer Messstelle am Haldenfuß bzw. auf dem Haldenplateau dargestellt.

Zwischen den einzelnen Messpunkten am Haldenfuß zeigen sich deutliche Variationen.

## Singuläre Radonfreisetzungen

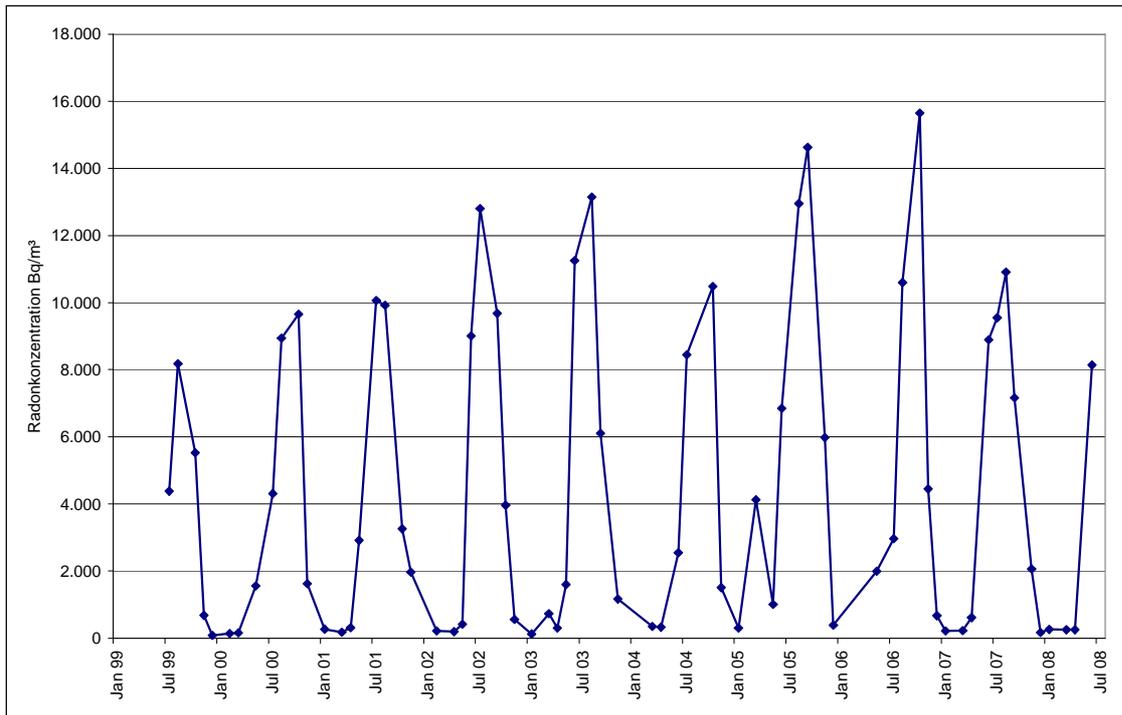


Abbildung 11: Verlauf der Radonkonzentration an einer Messstelle am Haldenfuß im Zeitraum 1999 - 2008 (Messstelle BfS 16) [18]

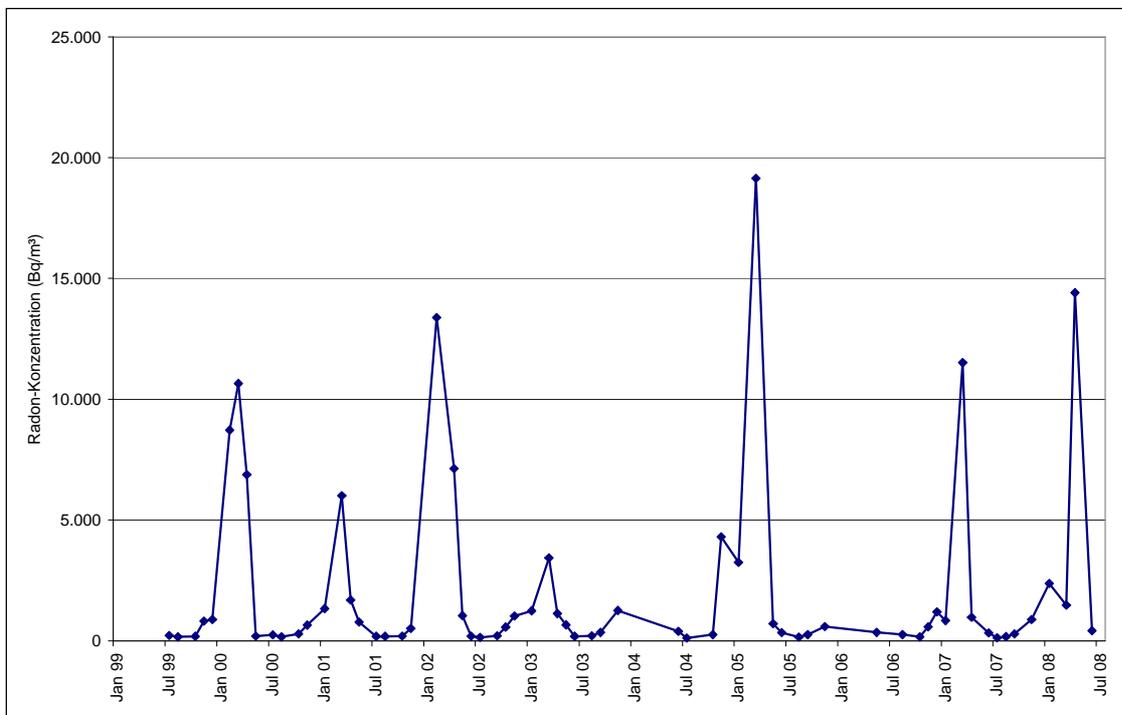


Abbildung 12: Verlauf der Radonkonzentration an einer Messstelle auf dem Haldenplateau im Zeitraum 1999 - 2008 (Messstelle BfS 7) [18]

### **Untersuchungen der IAF GmbH 2005 [21]**

Im Vorfeld der technischen Planungsarbeiten zur Sanierung der Dammhalde Trockenbecken wurden von der IAF - Radioökologie GmbH Dresden Untersuchungen zur Charakterisierung der Radonsituation durchgeführt [21]. Diese umfassten

- integrierende Langzeitmessungen der Radonkonzentration in 10 cm Höhe zur Bestimmung der Radonexhalationsrate an 118 Messstellen entlang von 26 Profilen (Expositionszeit ca. 4 Wochen) vom Haldenfuß zum Haldenplateau, Zeitraum 04.08.2005 - 15.09.2005
- quasikontinuierliche Messungen der Radonexhalationsrate mit automatisch arbeitenden Anreicherungsboxen an 2 Messpunkten über mehrere Tage am Haldenfuß, Zeitraum 18.08.2005 - 22.08.2005
- Messungen der Radonkonzentration in der Bodenluft (0,7 m Tiefe) an 4 Messpunkten in der Zeit 8.00 - 16.00 Uhr an je einem Tag (2h-Rhythmus)
- Messungen der Radonkonzentration in geringer Höhe über der Haldenoberfläche an 12 Messstellen im NO-Bereich der Halde
- parallel Erfassung der relevanten Wetterdaten

Im Untersuchungszeitraum zeigte die Lufttemperatur die üblichen Tagesgänge mit tiefsten Nachttemperaturen um 5°C.

Die Langzeitmessungen zeigten eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen des BfS-Messnetzes.

Die Untersuchungen entlang der Profile zeigten am Haldenfuß deutlich höhere Radonkonzentrationen (max. 86kBq/m<sup>3</sup>) als auf dem Plateau.

Im Tagesgang der Radonkonzentration in der Bodenluft zeigte sich, dass morgens (8.00 und 10.00 Uhr) am Haldenfuß die höhere Konzentration gemessen wurde.

### **Umweltbewertung zum Ist-Zustand (Wismut GmbH, [19])**

Eine umfassende Auswertung der oben genannten Untersuchungen [21] erfolgte im Rahmen der Umweltbewertung der Dammhalde Trockenbecken [19]. Der Bewertung der Radonsituation liegen langjährige Messungen seitens des BfS an 9 relevanten Messstellen, Messungen in 2 zusätzlichen Messnetzen (20 bzw. 26 Messstellen, Juli/August 2005), Messungen an einem Raster mit bis zu 120 Messpunkten (August/September 2005) sowie quasikontinuierliche Messungen an 2 Messpunkten (Anschlusskalibrierung) zugrunde.

Die Ergebnisse zeigen, dass Radonfreisetzungen mit typischen jahreszeitlichen und örtlichen Schwankungen auf der gesamten Haldenschüttung vorhanden sind. Infolge konvektiver Bodenluftströmungen mit der Temperaturdifferenz Halde - Außenluft als Triebkraft sorgen besonders sommerliche Temperaturverhältnisse für eine hohe Radonfreisetzung der unteren Haldenböschung. Dies bewirkt einen Konzentrationseffekt auf die untere Böschung mit einer Breite von 30 - 50 m (mittlere Exhalationsrate ca. 2,5 Bq/(m<sup>2</sup>s)) und besonders hohe Radonexhalationen innerhalb eines 20 - 30 m breiten Streifens (mittlere Exhalationsrate ca. 4,1 Bq/(m<sup>2</sup>s)), während der oberhalb anschließende Böschungsbereich geringere Radonexhalationsraten zeigt.

Neben der relativ hohen Radonexhalation der Haldenfußbereiche wurde als weiterer relevanter Effekt für das Entstehen hoher Immissionen der Kaltluftabfluss identifiziert. Durch die bodennahe Kaltluftströmung mit einer sehr geringen vertikalen Dispersion kommt es zu einem zusätzlichen Sammeleffekt des von der Haldenböschung freigesetzten Radons. Mit der abfließenden Kaltluft wird das Radon relativ konzentriert in das Haldenvorfeld und damit zu der dort befindlichen Wohnbebauung transportiert.

Ein Kaltluftexperiment am 07.09.2005 mit zeitaufgelösten Messungen an der Oberkante der Haldenböschung, der Böschungsmitte und im Bereich eines Wohngebäudes am Haldenfuß zeigte einen prägnanten Verlauf der Radonkonzentration. In den Nachmittagsstunden traten korrespondierend mit hohen Lufttemperaturen und damit starker Konvektion auffällig hohe Werte auf dem Wohngrundstück am Haldenfuß auf (bis zu 4.000 Bq/m<sup>3</sup>). Die Konzentrationen nahmen gegen Abend ab und glichen sich an. Ab etwa 18.40 Uhr kam es zu einer Überlagerung durch einen weiteren Effekt. Es setzte eine deutliche Wirkung der Kaltluftströmung ein und die Radonkonzentration stieg wieder an (von 50 - 60 Bq/m<sup>3</sup> auf bis zu 700 Bq/m<sup>3</sup>). Die Radonkonzentration war auf der ganzen Böschung und im beeinflussten Grundstück nahezu gleich. Es trat keine ausgeprägte Höhenabhängigkeit der Radonkonzentration auf. Es wird geschlossen, dass ab etwa 18.40 Uhr die Quelle des auf dem betrachteten Grundstück gemessenen Radons außerhalb der Haldenböschung im Anstrombereich der Kaltluftströmung lag.

## **5 Auswahl und Charakterisierung der Untersuchungsobjekte**

### **5.1 Anforderungen an Untersuchungsobjekte**

Für die Untersuchung der Radonfreisetzung und -ausbreitung im Zusammenhang mit konvektiven Vorgängen in den Bergbauhalden einerseits und Kaltluftabflüssen andererseits sowie eine Modellierung der Prozesse sind Modellstandorte notwendig. Folgende grundsätzliche Anforderungen sind an solche Standorte zu stellen:

- typischer Standort, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere zu ermöglichen,

- Halde mit signifikanter Radonexhalation,
- Halde mit Konvektionsprozessen (d. h. nicht oder wenig abgedeckt), bevorzugt Hangschüttung,
- Lage in einer Region mit hoher Wahrscheinlichkeit von Kaltluftabflüssen.

## **5.2 Auswahl der Untersuchungsobjekte**

Singulär erhöhte Radonimmissionen wurden bisher für Wohnbebauung in Johanngeorgenstadt und Schlema, ferner in Crossen, Lengenfeld sowie eingeschränkt in Annaberg-Buchholz festgestellt [7].

Während in der Region von Schlema Restriktionen bezüglich der Zugänglichkeit der Standorte infolge laufender Sanierungsmaßnahmen der „Wismut“ bestehen, ist die Region Johanngeorgenstadt aus radiologisch-meteorologischer Sicht grundsätzlich geeignet. Weiterhin liegen umfangreiche Untersuchungen, auch über längere Zeiträume, vor (z. B. [19], [21], [22], [23]).

Auf der Grundlage der recherchierten Untersuchungsergebnisse und der Zugänglichkeit der Standorte wurde für die geplanten Arbeiten der Standort „Johanngeorgenstadt“ ausgewählt. Als Objekte kommen dabei hinsichtlich Geometrie und nachgewiesener Radonexhalation in Frage:

- Damthalde Trockenbecken
- Damthalde Steinsee
- Halde an der Haberlandmühle
- Zentralschachthalde
- Halde von Schacht 51 (Lehmergrund)

Aus Sicht der recherchierten Datenbestände sind die Halden Trockenbecken und Haberlandmühle am besten untersucht.

Die Zentralschachthalde weist aufgrund ihrer Lage auf dem Bergsporn zwischen Lehmergrund und Breitenbachtal sowie der Lage relativ weit oben am Hang und der teilweisen Rekultivierung komplizierte geometrische Verhältnisse auf. Weiterhin fanden besonders am Haldenfuß Radonsanierungsmaßnahmen statt.

Die Halden von Schacht 51 und die Halde an der Haberlandmühle sind ebenfalls teilweise rekultiviert. An letzterer wurden im Untersuchungszeitraum Radonsanierungsmaßnahmen durchgeführt.

In Tabelle 2 werden die betrachteten Objekte einer Bewertung unterzogen.

## Singuläre Radonfreisetzungen

Tabelle 2: Bewertung der Objekte im Raum Johanngeorgenstadt

Objekt	Geometrie <sup>1</sup>	Relevanz für Wohnbebauung <sup>2</sup>	vorliegende Ergebnisse <sup>3</sup>	Abdeckung <sup>4</sup>
Dammhalde Trockenbecken	-	++	++	+
Dammhalde Steinsee	++	+	--	++
Halde an der Haberlandmühle	+	+	++	--
Zentralschachthalde	--	++	--	-
Halde von Schacht 51	-	+	+	-

günstige Bewertung: <sup>1</sup> einfache Geometrie, <sup>2</sup> relevant für Wohnbebauung, <sup>3</sup> umfangreich untersucht,  
<sup>4</sup> nicht abgedeckt

Die angestellten Erwägungen führen dazu, die Dammhalde Steinsee besonders wegen ihrer einfachen Geometrie sowie der günstigen Lage und die Dammhalde Trockenbecken wegen ihrer Relevanz für die umliegende Wohnbebauung und der umfangreichen bisherigen Untersuchungen als Objekte auszuwählen. Die Untersuchungen werden dabei auf sommerliche Bedingungen konzentriert, da im Winter die Konvektion umgekehrt verläuft, die erhöhten Radonaustritte auf dem Haldenplateau auftreten und diese infolge der Verdünnung für die umliegende Wohnbebauung geringere Relevanz aufweisen.

### **5.3 Allgemeine Charakteristik der Untersuchungsobjekte**

Die beiden Untersuchungsobjekte liegen im Haldengelände nördlich Johanngeorgenstadt. Eine Überblicksdarstellung zeigt Abbildung 13.

## Singuläre Radonfreisetzungen

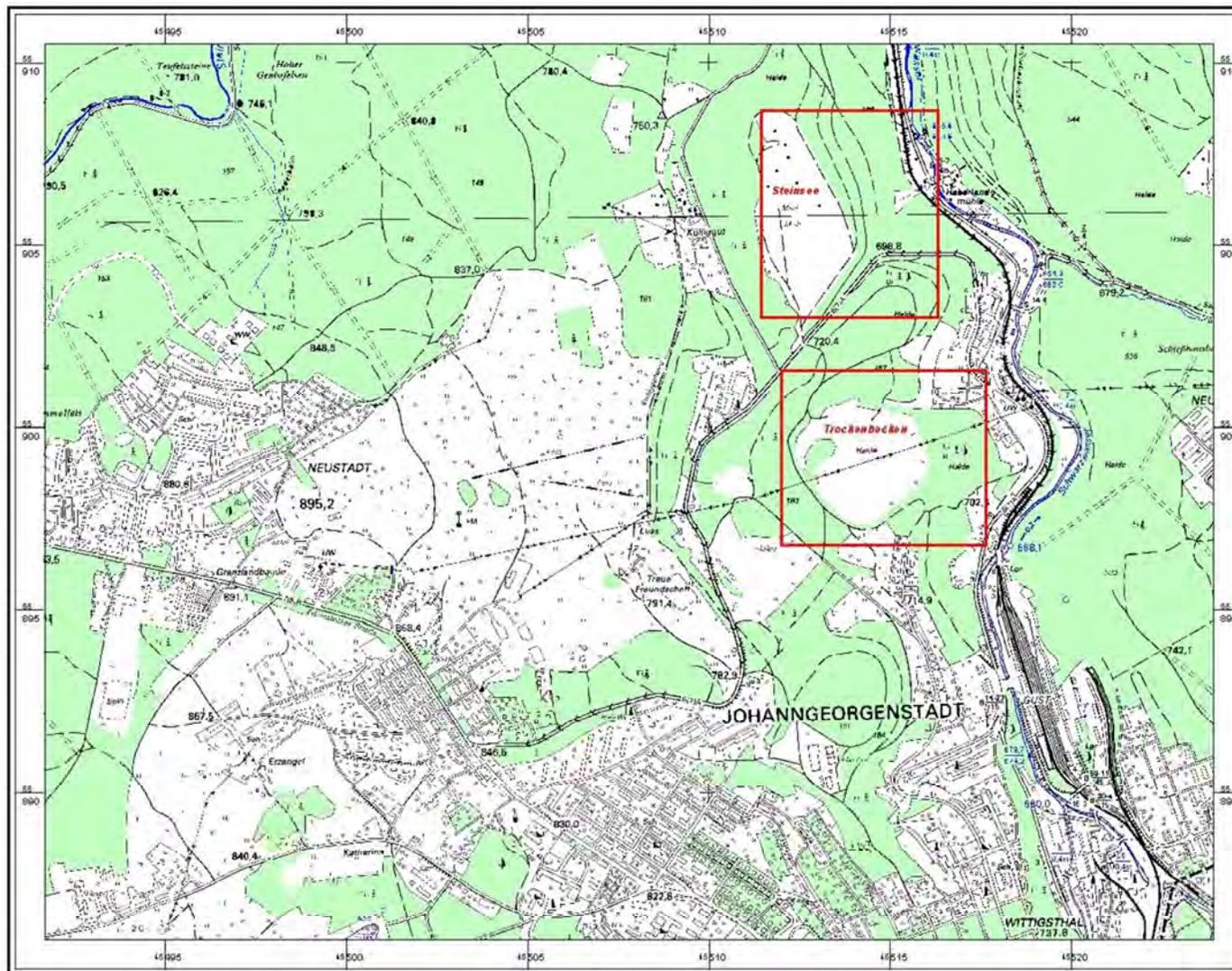


Abbildung 13: Untersuchungsgebiet mit den beiden Dammhalden Trockenbecken und Steinsee

Beide Absetzanlagen wurden in natürlichen Geländesenken errichtet. (siehe Abbildung 14 und Abbildung 15). Die notwendigen Dämme wurden mit Bergematerial von Gruben im Revier Johannegeorgenstadt durch die Bahnförderung geschüttet [26]. In die entstandenen Absetzbecken wurden die schlammförmigen Aufbereitungsabgänge eingespült.

Beide Objekte bestehen daher aus einem umfangreichen Bergedamm und dem dahinter liegenden Spülhaldenkörper. Die IAA Trockenbecken wurde nach der Betriebseinstellung 1953 mit Haldenmaterial abgedeckt. Im Falle der IAA Steinsee wurde nachträglich über dem Spülhaldenkörper eine Hausmülldeponie angelegt, welche bis 2000 betrieben und 2006 - 2008 abgedichtet und verwahrt wurde [26].

Da beide Spülhalden zu ihrer Betriebszeit von Spülseen bedeckt waren, ist von einer weitgehenden Wasserundurchlässigkeit des eingespülten Materials auszugehen. Nach den recherchierten Angaben ist davon auszugehen, dass sich beide Dammhalden weitgehend analog zu ähnlichen an Hängen geschütteten Bergehalden verhalten.

### **5.3.1 Dammhalde Trockenbecken**

Die Dammhalde Trockenbecken bildet in Johannegeorgenstadt einen umfangreichen Haldenzug im Bereich Steigerstraße/Schwarzenberger Straße. Dieser umgibt halbkreisförmig von Nordwesten bis Südosten die ehemalige Absetzanlage Trockenbecken der Uranerzaufbereitung Objekt 98 [19], [24]. Die Halde ist im Bergbaualtlastenkataster des BfS unter der GRS-Nummer 3651 erfasst. Eine genauere Charakterisierung findet sich in [19]. Danach beträgt die Aufstandsfläche 17,5 ha, das Volumen 1,0 - 2,0 Mill. m<sup>3</sup>. Die Schüttung der Halde erfolgte im Zeitraum 1948/49 - 1956 mit Bergen des Uranerzbergbaus aus den Stollenanlagen im Bereich Wittigsthal sowie mit Sortierbergen der radiometrischen Aufbereitung.



Abbildung 14: Lage des Trockenbeckens im Vergleich zur Topographie um 1900 [25]

Die spezifischen Aktivitäten in der anthropogenen Aufschüttung liegen in dem weiten Bereich zwischen 0,1 und 35 Bq/g.

Die Wohnbebauung im Bereich Steigerdorf reicht am östlichen Haldenfuß bis ca. 15 m an die Halde heran. Die Nord- und Ostböschungen erfuhren in der Vergangenheit in mehreren Etappen eine Profilierung, an letzterer wurde stellenweise eine 0,1 - 0,2 m mächtige Mineralboden-Abdeckung aufgebracht. Die letzten Arbeiten an der Dammböschung wurden 1993/94 durchgeführt.

Die Südostböschung der Halde ist an der Kleingartensparte am Heimberg in ihrer ursprünglichen Form erhalten und bei ca. 10 m Höhe dürrtig bewachsen. Das Haldenplateau wurde ohne Abdeckung aufgeforstet. Im Nordteil der Halde sind die Böschungen in Form von bis zu 5 Bermen ausgebildet

Für den Zeitraum 2009 - 2012 ist die Sanierung der Dammhalde Trockenbecken geplant [7].

### 5.3.2 Dammmhalde Steinsee

Die Dammmhalde umgibt das Absetzbecken J2 wallförmig im Norden, Osten und Süden. Die Halde ist im Bergbauatlastenkataster des BfS unter der GRS-Nummer 3650 erfasst. Die Schüttung der Halde erfolgte im Zeitraum 1953 - 1956 mit Bergen des Uranerzbergbaus. Im Absetzbecken selbst wurden Abgänge der gravitativen Uranerzaufbereitung (Objekt 98) abgelagert. In späterer Zeit wurde auf dem Absetzbecken eine Hausmülldeponie angelegt und bis Ende der 1990er Jahre betrieben.

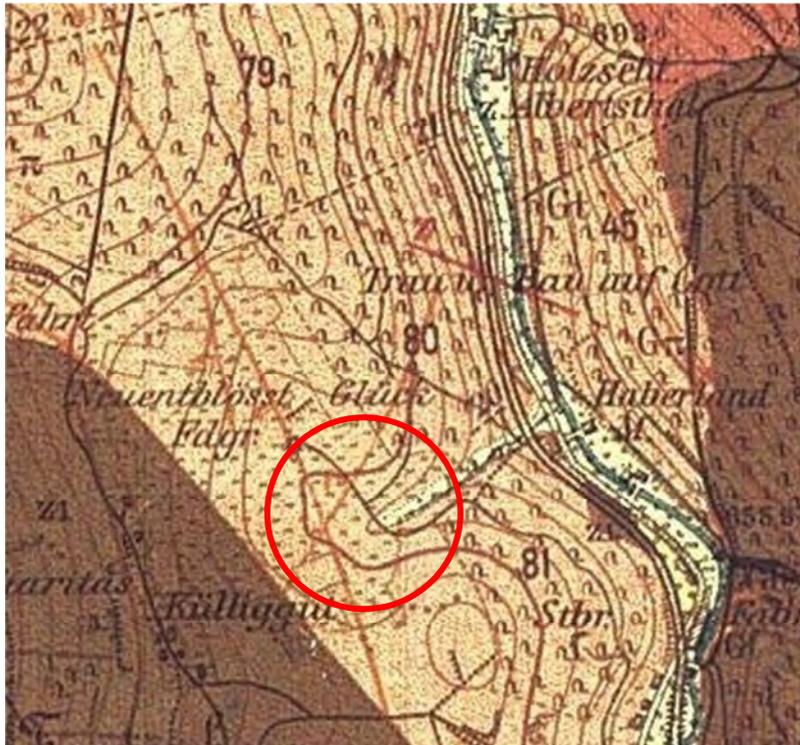


Abbildung 15: Lage der IAA Steinsee im Vergleich zur Topographie um 1900 [25]

Die Fläche der Dammmhalde beträgt 15 ha, das Volumen ca. 2,25 Mill. m<sup>3</sup>. Die Ostböschung der Dammmhalde besteht derzeit aus 3 Bermen. Die Halde ist fast vollständig aufgeforstet.

Im Bereich von Wohnbebauung in der Umgebung der Dammmhalde Steinsee zeigten Messungen erhöhte Radonkonzentrationen zwischen 50 und 140 Bq/m<sup>3</sup> [15]. Nähere Angaben zur Radonfreisetzung im Bereich Steinsee, die bei der „Wismut“ vorliegen, konnten bis zum Zeitpunkt der Berichterstellung nicht erlangt werden.

## **6 Feldarbeiten und Messanordnungen**

### **6.1 Messgeräte**

#### **6.1.1 Temperaturmessung**

Für die Temperaturmessungen wurden folgende Messgeräte eingesetzt:

- interne Temperaturfühler der Radonmessgeräte (AlphaGUARD bzw. Radon Scout)
- Temperaturlogger TL-TSN-50 E der Fa. Arexx mit Datenfernübertragung
- Temperaturlogger DL-100 T mit interner Aufzeichnung der Fa. Voltcraft

Vor den Kampagnen Messfühler abgeglichen und die Messwerte wurden entsprechend korrigiert

#### **6.1.2 Meteorologische Messung und meteorologische Daten**

Zur Aufzeichnung der meteorologischen Bedingungen kam eine Funkwetterstation TE831X mit Datenfernübertragung zum Einsatz. Diese zeichnete folgende Daten auf:

- Lufttemperatur
- Luftfeuchte
- Luftdruck
- Niederschlag
- Windrichtung und Stärke

Die Wetterstation wurde bei den Messungen an der Dammhalde Trockenbecken ca. 50 m nördlich von MP 9 aufgebaut. Bei er Messkampagne an der Dammhalde Steinsee stand diese ca. 10 m nordwestlich von MP 6.

Während Temperatur- und Luftdruckmessung als sehr zuverlässig einzuschätzen sind, traten bei der Windmessung Schwierigkeiten auf. Die Messung am Trockenbecken ist dabei als relativ zuverlässig einzuschätzen. Die Messwerte am Steinsee zeigen jedoch meist sehr geringe Windgeschwindigkeiten. Dies ist wahrscheinlich auf ein schlechtes Ansprungsverhalten des Messrotors zurückzuführen.

Zur Absicherung der wichtigsten meteorologischen Parameter dienen Daten der nächstgelegenen Wetterstation. Dabei handelt es sich um die Station 95700 Erlabrunn (Erzgebirge), welche von der Fa. Meteomedia GmbH betrieben wird. Diese liegt nördlich von Johannegeorgenstadt auf dem Gelände des Klinikums Erlabrunn in 665 m Höhe. Die Entfernung zum Messstandort Dammhalde Trockenbecken beträgt ca. 3,4 km und zum Standort Dammhalde Steinsee

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

ca. 2,9 km. Da diese Station über keine entsprechende Aufzeichnung des Luftdrucks verfügt, wurden die Luftdruckdaten der Station Carlsfeld (899 m Höhe, ca. 8 km Entfernung) verwandt.

Alle Luftdruckdaten wurden auf Meeresspiegelhöhe korrigiert.

### 6.1.3 Radonmessung

Die Messprinzipien der Radonmessgeräte wurden in Abschnitt 3.1.1 dargestellt. Bei den beiden Messkampagnen kamen die folgenden Messgeräte zum Einsatz:

- 1. Kampagne:           5 Stk. AlphaGUARD  
                          9 Stk. Radon Scout
  
- 2. Kampagne:           3 Stk. AlphaGUARD  
                          5 Stk. Radon Scout

Die Instrumentierung wird ausführlicher in Abschnitt 6 dargestellt.

## 6.2 Messzeiträume

Aus den in den Abschnitten 3 und 4 abgeleiteten Aussagen ergibt sich, dass zur Untersuchung nächtlicher Kaltluftabflüsse im Zusammenhang mit der Radonausbreitung aus meteorologischer Sicht die in Tabelle 3 aufgeführten Bedingungen erfüllt sein müssen.

Tabelle 3: Meteorologische Voraussetzungen der Messungen

Bedingung	Wirkung
Lufttemperatur > Temperatur im Haldeninneren	konvektive Radon-Exhalation am Haldenfuß
geringe Windgeschwindigkeiten	keine schnelle Verdünnung der radonhaltigen Luft
deutliche nächtliche Abkühlung	genügende Kaltluftgenerierung für Ausbildung von Kaltluftabflüssen

Diese meteorologischen Bedingungen erfordern als Wetterlage ein stabiles Hochdruckgebiet (abends und nachts geringe Windgeschwindigkeiten, relativ hohe Tagestemperaturen, „Strahlungsnächte“ mit wolkenlosem Himmel und deutlicher abendlicher/nächtlicher Abkühlung). Daher wurde als potenzieller Untersuchungszeitraum Juli - September 2009 ausgewählt.

## Singuläre Radonfreisetzungen

In diesem Zeitraum waren geeignete Messbedingungen selten. Auch nachträglich ist es dabei schwierig, geeignete Zeiträume anzugeben, da es keine eindeutigen meteorologischen Kriterien gibt (Luftdruck, Temperaturen, Sonnenscheindauer).

Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 16 für die Wetterstation Erlabrunn die tägliche Sonnenscheindauer für den Zeitraum jeweils 5.00 - 18.00 Uhr dargestellt. Dieser dreizehnstündige Zeitraum entspricht 780 Minuten. Als Maximum wurden dabei am 27.07.2009 726 Minuten Sonnenschein registriert. Setzt man für eine stabile Hochdrucksituation eine Sonnenscheindauer von 500 min/d an, so zeigt sich, dass es bis Mitte August gar keine längeren Zeiträume mit geeigneten Bedingungen gab. Zwischen dem 15.08. und 21.08. lag der einzige längere Zeitraum vor. Ende August/Anfang September und Mitte September 2009 waren nochmals kurze Abschnitte mit geeigneten Bedingungen.

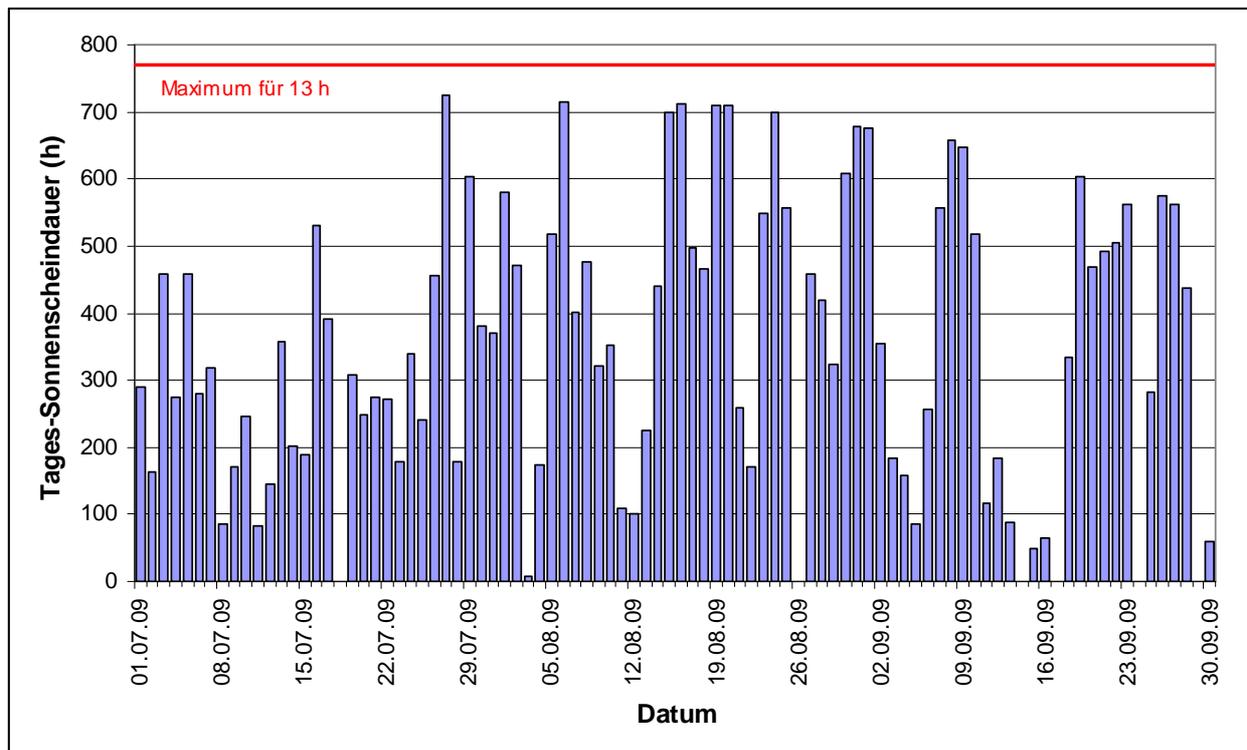


Abbildung 16: Tages-Sonnenscheindauer im Zeitraum Juli - September 2009

Darüber hinaus sind die Messungen personell und materiell sehr aufwändig und benötigen 3 - 4 Tage Vorbereitungszeit, was die geeigneten Abschnitte weiter einschränkte.

Aus den genannten Gründen wurden die geplanten beiden Messkampagnen einerseits in dem oben genannten Abschnitt Mitte August (20. - 21.08.2009), andererseits Mitte September durchgeführt. Der 20.08. war dabei der wärmste Tag des Jahres 2009.

Die Kampagne 15. - 18.09.2009 fand zwar in der durch die Wetterprognose vorhergesagten stabilen Hochdruckphase statt, die austauscharme Wetterlage führte jedoch zu nebligem Wetter mit relativ geringen Temperaturen.

Durch Vor-Ort-Begehungen wurden an den ausgewählten Untersuchungsobjekten geeignete Standorte für die Messungen ausgewählt.

### **6.3 Messkonzeption**

Das Ziel der Arbeiten bestand einerseits in der Charakterisierung des Radon-Exhalationsverhaltens der Halden unter sommerlichen Bedingungen (Charakterisierung der „Quelle“), andererseits in der messtechnischen Untersuchung auftretender Kaltluftabflüsse und der damit in Zusammenhang stehenden Ausbreitung dieser Exhalationen.

Die Messung der Radonkonzentration erfolgte dazu auf Profilen. Die Profile wurden in Strömungsrichtung potenzieller Kaltluftabflüsse vom jeweiligen Haldenplateau („Anstrombereich“) über den Haldenfuß („Quelle“) bis 100 - 200 m ins Vorfeld der Halde („Abstrom“) gelegt. Auf den Profilen wurden jeweils die Radonkonzentration und die Temperatur in 20 cm Höhe gemessen.

Parallel dazu wurde die Lufttemperatur entlang des Profils in weiteren Höhen gemessen. Ergänzende Temperaturmessungen erfolgten parallel zu den jeweiligen Hauptprofilen. Zum Ausschluss von Erwärmung durch Sonneneinstrahlung wurden die Temperaturfühler weitgehend abgeschattet, ohne jedoch die Messungen zu beeinflussen.

Die Lage der Messprofile und der Messpunkte ist in Abbildung 19 und Abbildung 23 dargestellt. Die Abbildungen zeigen auch das Oberflächenrelief. Dazu wurden die Topographischen Daten mit einem digitalen Höhenmodell überlagert. Die Profile liegen in flachen Geländemulden, die bevorzugte Kaltluft-Strömungsbahnen darstellen.

### **6.4 Messkampagne Dammalde Trockenbecken**

#### **6.4.1 Vorarbeiten**

Im Rahmen einer Geländebegehung am 28.07.2009 wurden Übersichtsmessungen der Rn-Konzentration der bodennahen Luft (20 cm Höhe) durchgeführt. Bei den am Vormittag durchgeführten Messungen zeigten sich hohe Rn-Konzentrationen entlang des Fußes der Dammalde von 20 bis 40 kBq/m<sup>3</sup>. Auf der Haldenböschung sowie der Böschung des eigentlichen Trockenbeckens war die Konzentration weitaus geringer, 0,4 bis 3 kBq/m<sup>3</sup>. Oberhalb des Trockenbe-

ckens liegt ein weiterer umfangreicher Haldenkomplex. An dessen Fuß, der in das Trockenbecken übergeht, lagen die Konzentrationen im Bereich 0,5 bis 6 kBq/m<sup>3</sup>.

Dieser Geländebefund stimmt sehr gut mit den theoretischen Erwartungen und den Literaturangaben, z. B. in [18] überein. Die oberhalb des Trockenbeckens gelegene Halde bildet demnach ein eigenes Konvektionssystem mit Austritt an deren Fuß. Für die Untersuchung der Kaltluftabflüsse ist dies insofern bedeutsam, als diese Austritte eine „Rn-Vorbelastung“ des Anstromes bewirken können.

### 6.4.2 Meteorologische Bedingungen

Die Messkampagne an der Dammhalde Trockenbecken wurde am 20./21.08.2009 durchgeführt. Dabei war der 20.08. der heißeste Tag des Jahres 2009 mit nachmittägiger Höchsttemperatur am Standort bis über 36 °C. Aufgrund fehlender Wolkendecke folgte eine „Strahlungsnacht“ mit starker Abkühlung auf min. 8 °C. Gegen Morgen zogen allmählich Wolken auf und am 21.08. kam es ab ca. 10:00 Uhr zu heftigen Gewittern mit deutlicher Abkühlung.

Während tagsüber bei Sonneneinstrahlung schwache, aber deutliche Luftbewegungen („Hangwind“) auftraten, war es ab Sonnenuntergang weitgehend windstill. Verdeutlicht wird dies durch den Rauch einer Feuerung in der nordöstlich vom Messprofil gelegenen Wohnbebauung (Abbildung 17).



Abbildung 17: Rauch einer Feuerung zeigt die austauscharme Wetterlage (20.08.2009, 20:09 Uhr)

### 6.4.3 Messanordnung

Die Anordnung des Hauptprofils zeigen Abbildung 18 und Abbildung 19. Da nicht absehbar war, wie sich Kaltluftabflüsse und Radonfreisetzung verhalten und welchen Einfluss die Topographie hat, wurden die Messungen mit umfangreicher Instrumentierung durchgeführt. Es kamen auf dem Hauptprofil 7 Radonmessgeräte zum Einsatz. Der Messpunkt MP 7 befand sich dabei unmittelbar auf dem Haldenfuß und diente der Charakterisierung der „Quelle“. MP 1, 4 und 6 waren hinsichtlich des Kaltluftabflusses als „Anstrommessstellen“ und die MP 9, 11 und 12 als „Abstrommessstellen“ konzipiert. Mit den MP 3 und 5 wurde der Anstrombereich und mit MP 10 und 24 der Abstrombereich jeweils nördlich und südlich des Hauptprofils erfasst. MP 2 lag auf der Böschung des oberen Haldenplateaus (potenzielles Kaltluftbildungsgebiet). Der MP 8 wurde südlich des Hauptprofils zusätzlich ca. 2 m unterhalb des Haldenfußes platziert.

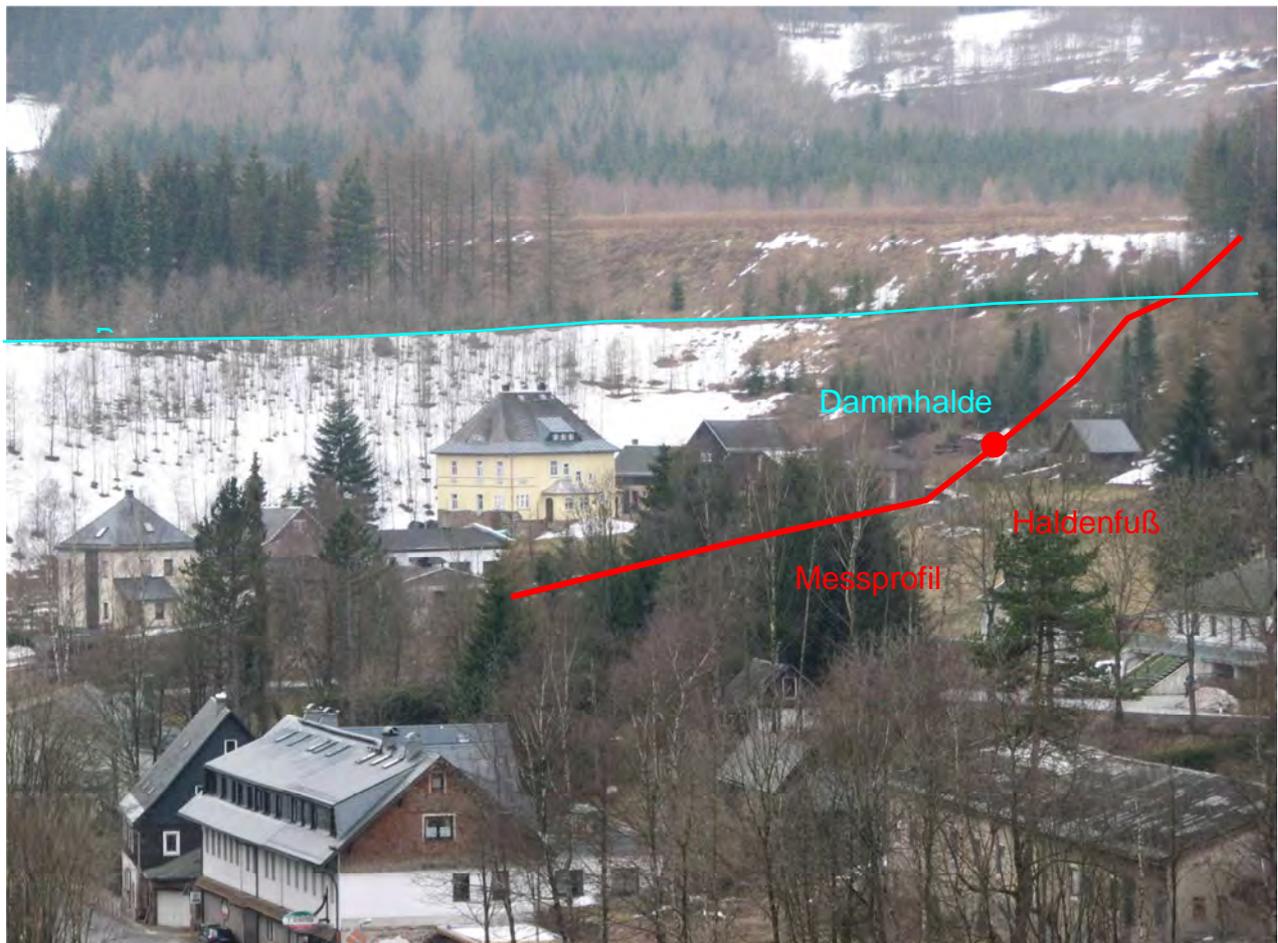


Abbildung 18: Lage des Messprofils Dammhalde Trockenbecken (Foto 27.03.2010)

## Singuläre Radonfreisetzungen

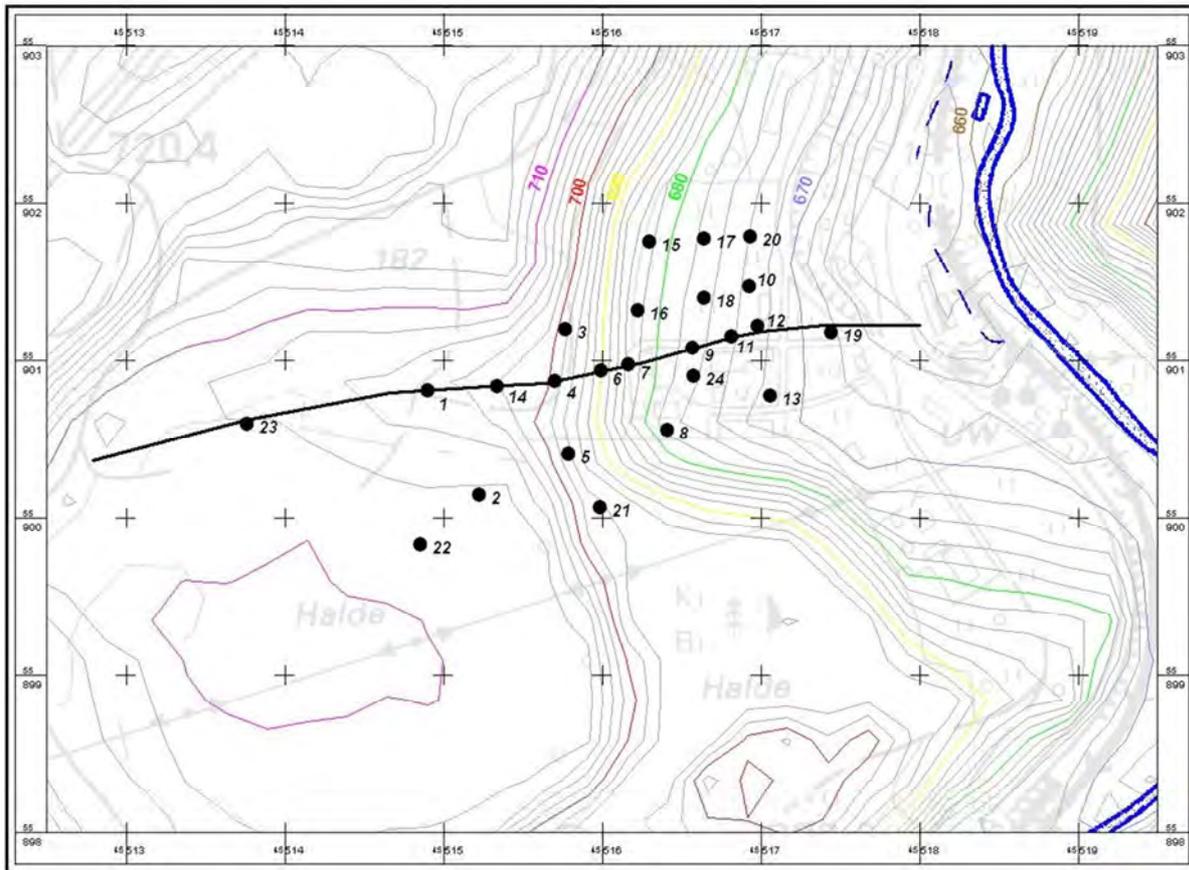


Abbildung 19: Lage der Messpunkte des Profils Dammhalde Trockenbecken (20./21.08.2009)

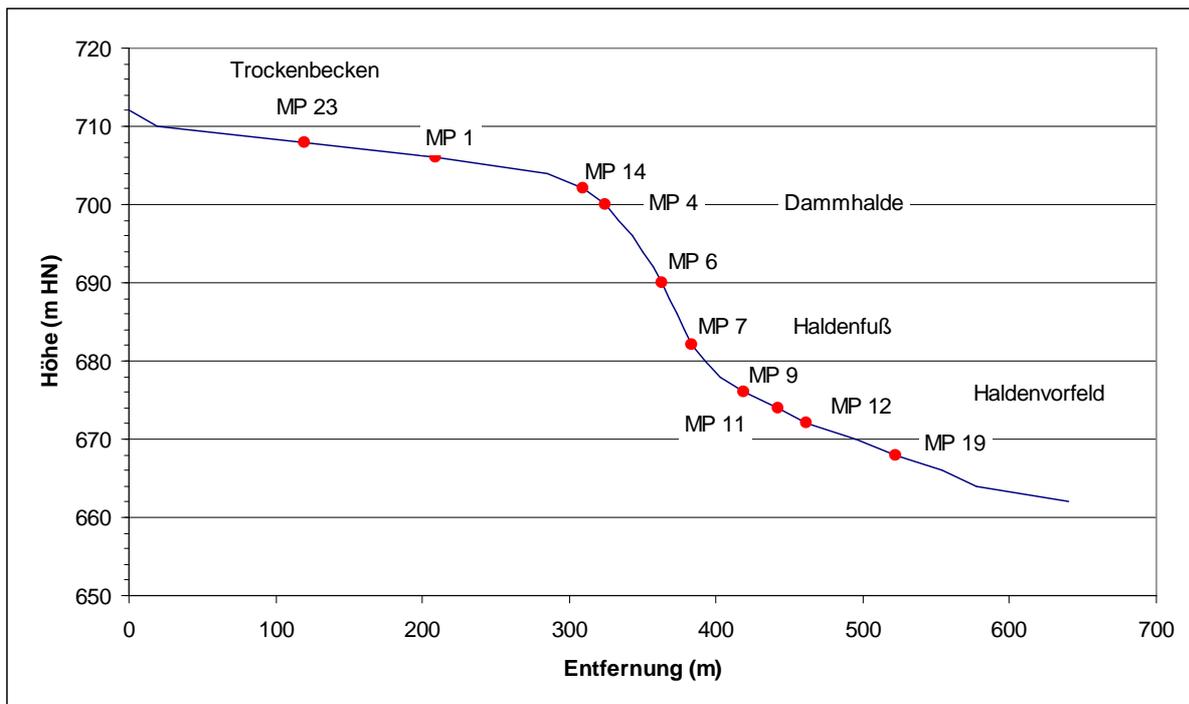


Abbildung 20: Profil West - Ost über Trockenbecken und Dammhalde

## Singuläre Radonfreisetzungen

Abbildung 24 zeigt ein anhand der Daten des Digitalen Höhenmodells erstelltes Profil der IAA Trockenbecken mit der Dammhalde und den Messpunkten.

Die Temperaturfühler waren hauptsächlich im Abstrombereich der Kaltluft positioniert.

Eine Übersicht über die instrumentelle Ausstattung der Messpunkte gibt Tabelle 4.

Tabelle 4: Instrumentierung der Messpunkte Trockenbecken

Messpunkt	Rn-Messung	Temperaturmessung	
		Höhe (m)	Messgerät
MP 1	Radon Scout 60	0,2	Radon Scout 60
MP 2	Radon Scout 60	0,2	Radon Scout 60
		2	TL
MP 3	Radon Scout 60	0,2	Radon Scout 60
MP 4	Radon Scout 10	0,2	Radon Scout 10
		2	TL
MP 5	Radon Scout 60	0,2	Radon Scout 60
		2	TL
MP 6	Radon Scout 60	0,2	Radon Scout 60
MP 7	AlphaGUARD	0,2	AlphaGUARD
MP 8	AlphaGUARD	0,2	AlphaGUARD
		2	TL-USB
MP 9	AlphaGUARD	0,2	AlphaGUARD
		2	TL
MP 10	AlphaGUARD	0,2	AlphaGUARD
		2	TL
MP 11	Radon Scout 10	0,2	Radon Scout 10
		2	TL
MP 12	AlphaGUARD	0,2	AlphaGUARD
		2	TL
MP 13	Radon Scout 60	0,2	Radon Scout 60, Messgerät ausgefallen
		2	TL-USB
MP 14		0,2	TL
MP 15		0,2	TL
		2	TL
MP 16		0,2	TL
MP 17		0,2	TL
MP 18		0,2	TL
MP 19		0,2	TL

## Singuläre Radonfreisetzungen

Messpunkt	Rn-Messung	Temperaturmessung	
		Höhe (m)	Messgerät
MP 20		0,2	TL
		2	TL
MP 21		0,2	TL
MP 22		0,2	TL
		2	TL
MP 23		0,2	TL
MP 24	Radon Scout 60	0,2	Radon Scout 60

Radon Scout 10	10 min Messintervall
Radon Scout 60	60 min Messintervall
TL	Temperaturlogger mit Fernübertragung
TL-USB	Temperaturlogger mit interner Aufzeichnung

### 6.5 Messkampagne Dammalde Steinsee

#### 6.5.1 Vorarbeiten

Im Rahmen einer Geländebegehung am 28.07.2009 wurden im Bereich der Lichtung (Abbildung 22) Übersichtsmessungen der Rn-Konzentration der bodennahen Luft (20 cm Höhe) durchgeführt.

Bei den am Nachmittag durchgeführten Messungen zeigten sich hohe Rn-Konzentrationen entlang des Fußes der Dammalde von 20 bis 40 kBq/m<sup>3</sup>. Auf der untersten Berme waren die Konzentrationen wie auch auf der Böschung der Dammalde weitaus geringer, 0,5 bis 2 kBq/m<sup>3</sup>.

#### 6.5.2 Meteorologische Bedingungen

Die meteorologischen Bedingungen der Messkampagne 15. - 18.09.2010 war von einer stabilen Hochdrucklage gekennzeichnet. Die Daten der Wetterstation Erlabrunn/Erzg. (2,9 km Entfernung vom Messstandort) sind in Abbildung 21 dargestellt.

## Singuläre Radonfreisetzungen

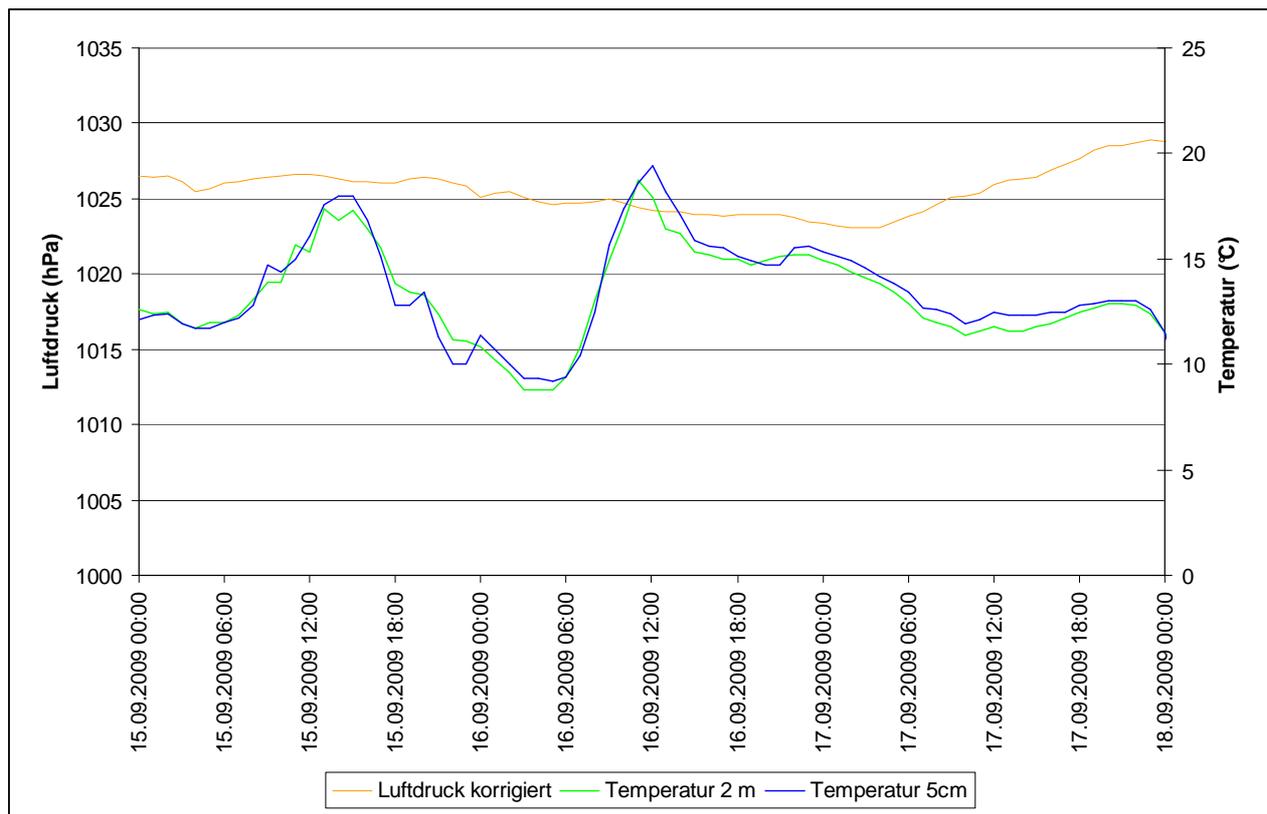


Abbildung 21: Meteorologische Bedingungen während der Kampagne 15. - 18.09.2010 (Wetterstation Erlabrunn/Erzg.), Luftdruck korrigiert

Die Bedingungen waren durch herbstliches Wetter mit sehr geringen Luftbewegungen, z. T. mit Nebel gekennzeichnet. Entgegen der Wettervorhersage im Vorfeld der Kampagne trat tagsüber kaum Sonnenschein auf, was zu relativ geringen Tagestemperaturen von maximal 20 °C führte. In den Nächten fand starke Abkühlung bis unter 10 °C statt. Dies ließ abends und nachts trotzdem Kaltluftabflüsse erwarten.

### 6.5.3 Messanordnung

Die Anordnung des Hauptprofils der Messung an der Dammhalde Steinsee zeigen Abbildung 22 und Abbildung 23. Auf der Grundlage der Erfahrungen der ersten Kampagne konnte der Instrumentierungsaufwand deutlich reduziert werden. Insbesondere der „Anstrombereich“ wurde nur mit einem Messgerät bestückt, da die Messung am Trockenbecken zeigte, dass der Haldenfuß die eigentliche „Quelle“ bildet.

Auf dem Hauptprofil kamen 6 Radonmessgeräte zum Einsatz. Der Messpunkt MP 2 befand sich dabei unmittelbar auf dem Haldenfuß und diente der Charakterisierung der „Quelle“. MP 1 war hinsichtlich des Kaltluftabflusses als „Anstrommessstelle“ und die MP 3, 4, 5 und 6 als „Abstrommessstellen“ konzipiert. MP 7 befand sich an der Brücke der Schwarzenberger Straße über

## Singuläre Radonfreisetzungen

den Bach und sollte eventuell Radon führende Kaltluftabflüsse im Bereich des Bachbettes erfassen. Die Temperaturfühler waren zusätzlich nördlich und südlich des Hauptprofils parallel zu diesem positioniert.

Eine Übersicht über die instrumentelle Ausstattung der Messpunkte gibt Tabelle 5.

Tabelle 5: Instrumentierung der Messpunkte Steinsee

Messpunkt	Rn-Messung	Temperaturmessung	
		Höhe (m)	Messgerät
MP 1	Radon Scout 60	0,2	Radon Scout 60
MP 2	Radon Scout 60	0,2	Radon Scout 60
		2	TL
MP 3	Radon Scout 60	0,2	Radon Scout 60
MP 4	Radon Scout 10	0,2	Radon Scout 10
		2	TL
MP 5	Alphaguard	0,2	AlphaGUARD
		2	TL
MP 6	Radon Scout 60	0,2	AlphaGUARD
		1	TL
		2	TL
		3	TL
MP 7	AlphaGUARD	0,2	Radon Scout 60
MP 8	Alphaguard	0,2	Alphaguard
		2	TL
MP 9		0,2	TL
		2	TL
MP 10		0,2	TL
		2	TL
MP 11		0,2	TL
		1	TL
		2	TL
		3	TL
MP 12		0,2	TL
		2	TL
MP 13		0,2	TL
		2	TL
MP 14		0,2	TL
		2	TL
MP 15		0,2	TL
		1	TL
		2	TL
		3	TL

Radon Scout 10  
Radon Scout 60  
TL

10 min Messintervall  
60 min Messintervall  
Temperaturlogger mit Fernübertragung

## Singuläre Radonfreisetzungen

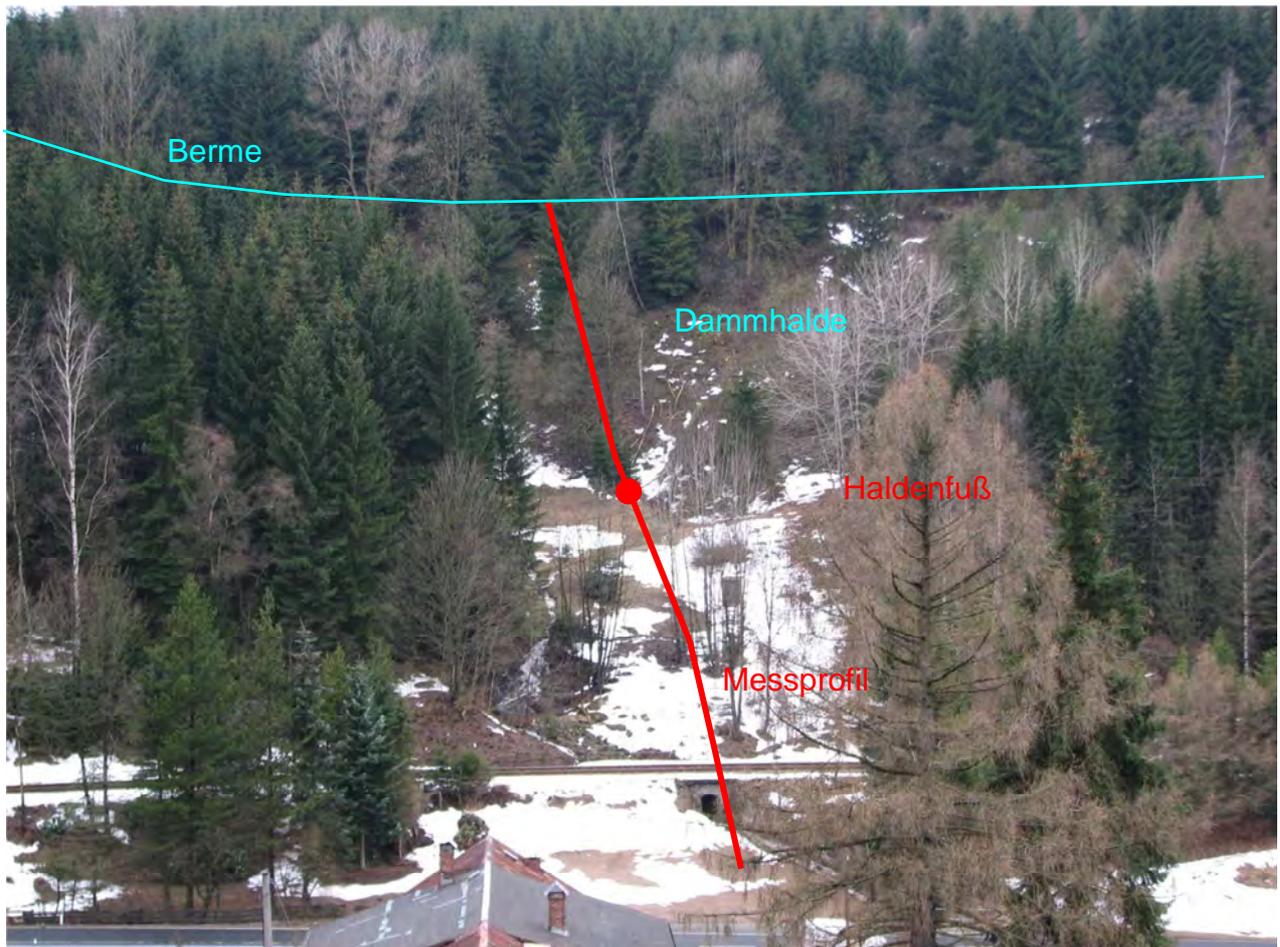


Abbildung 22: Lage des Messprofils Dammhalde Steinsee (Foto 27.03.2010)

## Singuläre Radonfreisetzungen

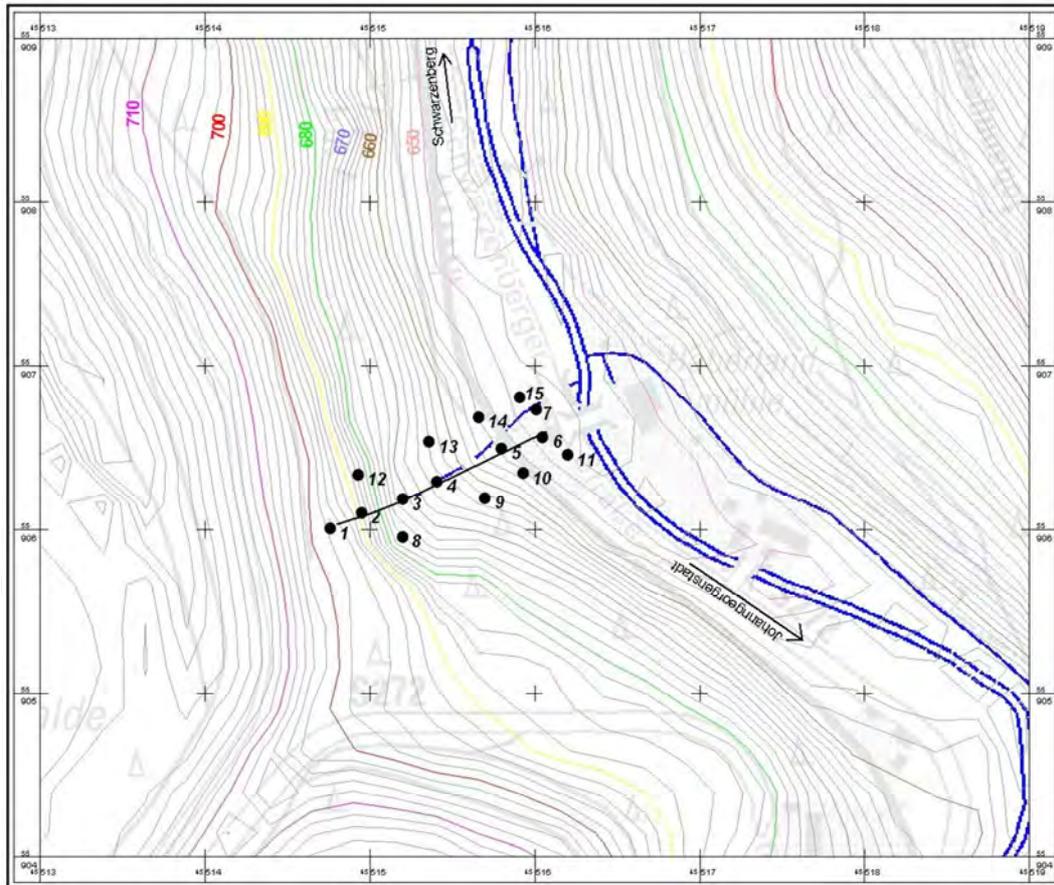


Abbildung 23: Lage der Messpunkte des Profils Dammschleife Steinsee (20./21.08.2009)

Abbildung 24 zeigt ein anhand der Daten des digitalen Höhenmodells erstelltes Profil der IAA Steinsee mit der Dammschleife und den Messpunkten.

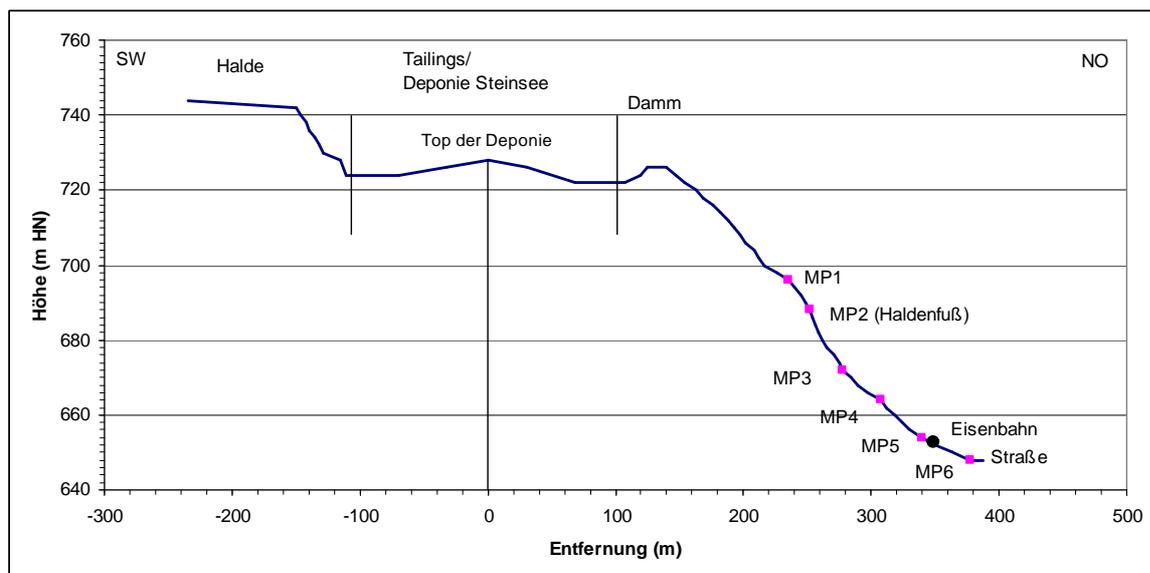


Abbildung 24: Profil Südwest - Nordost über die Deponie Steinsee/Dammschleife Steinsee bis zur Straße Schwarzenberg - Johanngeorgenstadt

Oberhalb der Deponie Steinsee (linker Rand) ist ein größeres Haldengebiet vorhanden. Die Deponie selbst befindet sich innerhalb der ehemaligen IAA. Talwärts wird das Deponiegelände durch den Damm abgeschlossen, der ersteres deutlich überragt. Aus diesem Grunde dürfte das Deponiegelände selbst als Kaltluftbildungsgebiet für den Untersuchungsstandort kaum eine Rolle spielen. Kaltluft könnte nur bei entsprechendem Aufstau vor dem Damm über diesen fließen. Da der Kaltluftabfluss jedoch über den Bereich Deponiezufahrt in Richtung Steigerstraße möglich ist, dürfte ein solches „Überfließen“ nicht auftreten.

## **7 Ergebnisse und Auswertung**

Die Messergebnisse sind in Diagrammform ausführlich in den Anlagen 1 und 2 dargestellt. Die Angabe der Uhrzeiten erfolgt dabei in MESZ.

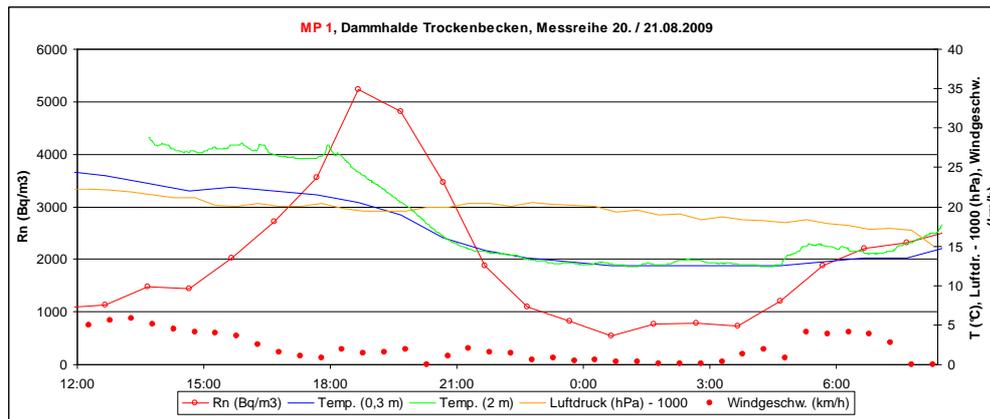
### **7.1 Messkampagne Dammalde Trockenbecken**

Temperaturen zeigen am Tage hohe Werte, die abends absinken. Offenbar war bei einigen Sensoren die Sonnenabschirmung nicht ausreichend.

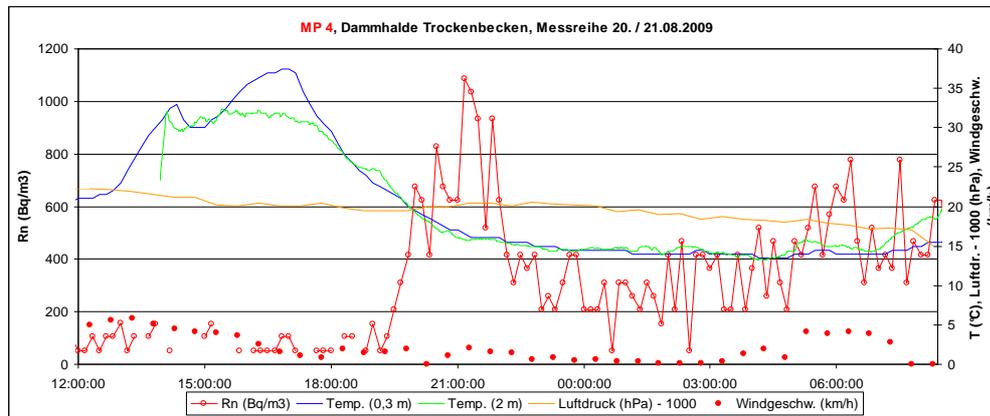
#### **7.1.1 Anstrombereich**

Abbildung 25 zeigt die Diagramme der Messpunkte im „Anstrombereich“ hinsichtlich möglicher Kaltluftabflüsse vom Plateau des Trockenbeckens (MP 1) bis zum Fuß der Dammalde (MP 7).

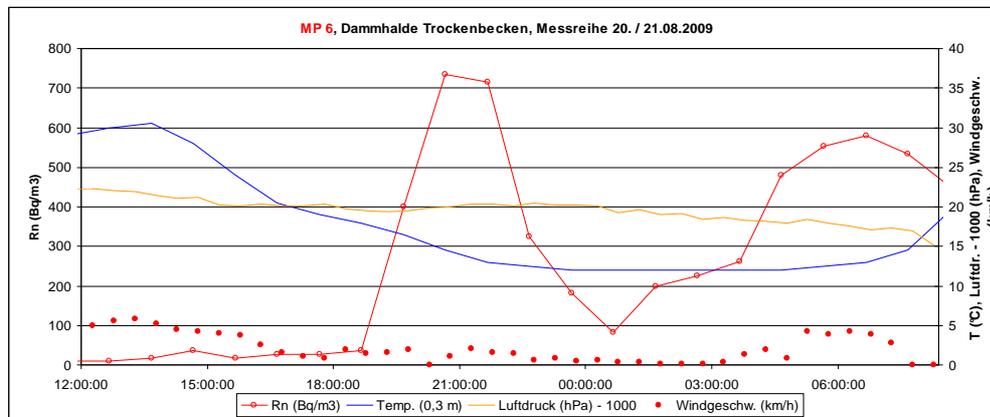
## Singuläre Radonfreisetzungen



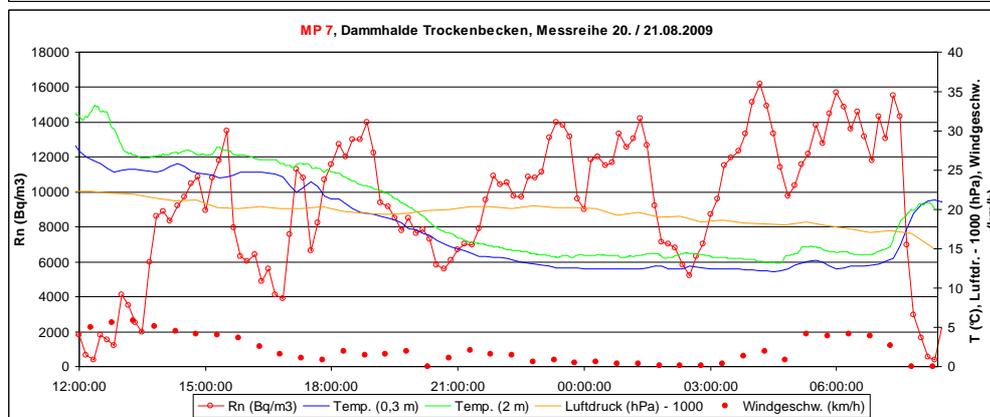
Anstrombereich,  
Plateau



Anstrombereich,  
Berme



Anstrombereich,  
Böschung der  
Dammhalde



Anstrombereich,  
Haldenfuß

Abbildung 25: Messwertübersicht Profil Trockenbecken, Anstrombereich

Es zeigt sich, dass, verglichen mit dem Haldenfuß, die Radonkonzentrationen im Anstrombereich gering sind. Lediglich am MP 1 treten zwischen 16:00 Uhr und 22:00 Uhr Konzentrationen über 2.000 Bq/m<sup>3</sup> auf.

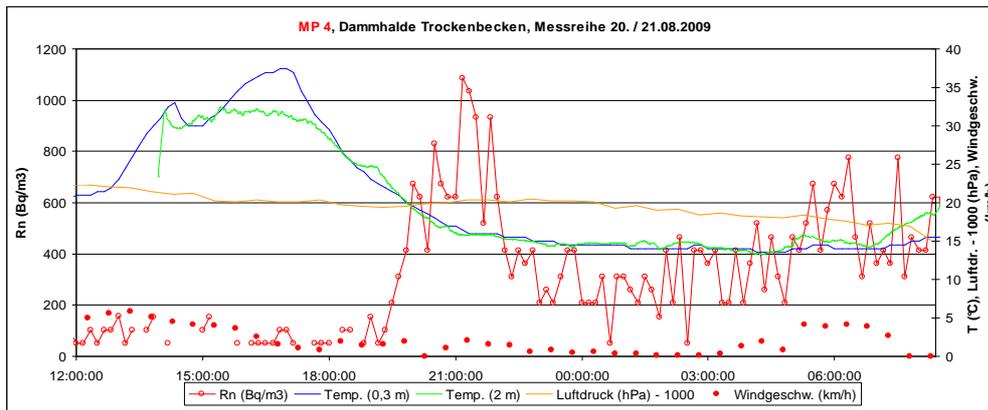
### **7.1.2 Abstrombereich**

Abbildung 26 zeigt die Daten für den Profilabschnitt vom Haldenfuß bis MP 12. Zum Vergleich ist das Diagramm des Anstrom-Messpunktes MP 4 angefügt.

Am auffälligsten sind die scharfen Maxima der Radonkonzentration im Abstrombereich in einer Entfernung von ca. 160 m vom Haldenfuß (MP 12). Diese treten mit Sonnenuntergang auf (Maximum gegen 20:30 Uhr) sind nur durch das Wirken von Kaltluftabflüssen zu erklären.

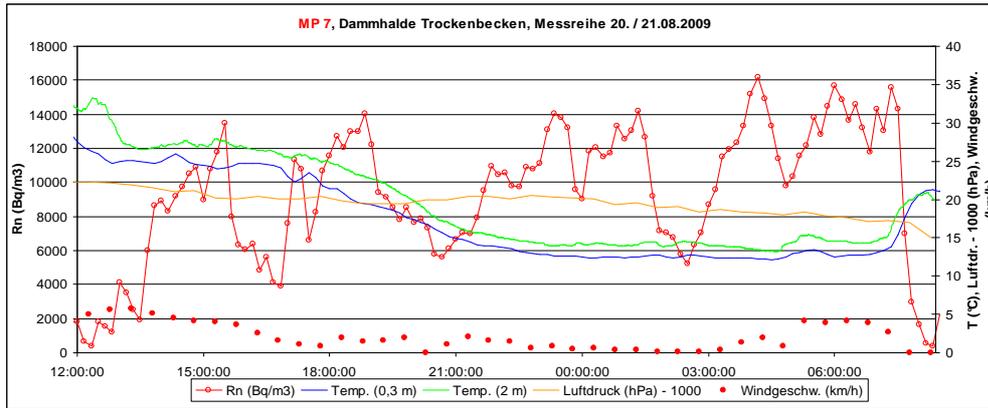
Die Messwerte des Anstromes (MP 4) zeigen relativ geringe Radonkonzentrationen. Am Haldenfuß (MP 7, „Quelle“) zeigt sich ein relativ gleichmäßiges Exhalationsverhalten. Die Konzentration zeigt drei markante Minima gegen 17:00 Uhr, 20:00 Uhr und 02:00 Uhr. Während aus den Messwerten für das erste Minimum keine Erklärung abzulesen ist, korreliert das zweite Minimum mit den stark erhöhten Konzentrationen im Abstrom (MP 9, MP 12). Das dritte große Minimum korreliert ebenfalls mit (kleineren) Maxima im Abstrom. Weiterhin gibt es eine deutliche Korrelation zwischen dem Maximum im Anstrombereich (MP 4), dem großen Minimum am Haldenfuß (MP 7) und den Maxima im Abstrombereich (MP 9, MP 12).

## Singuläre Radonfreisetzungen



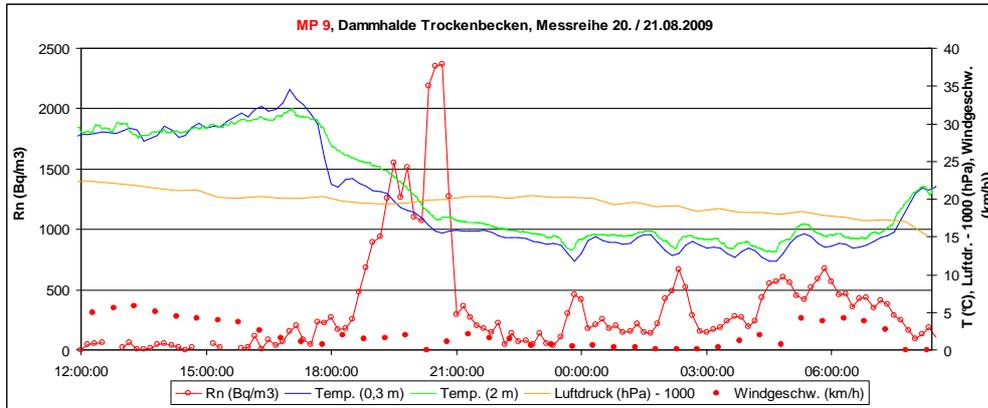
**MP 4**

Anstrombereich,  
Plateau



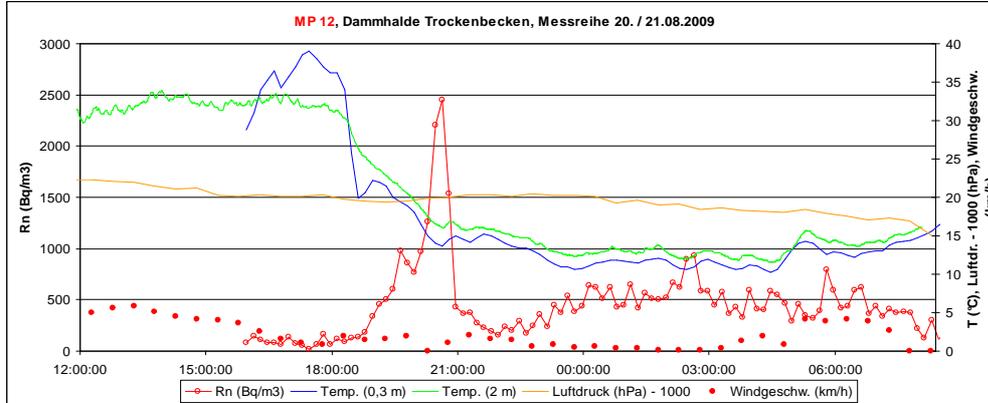
**MP 7**

Haldenfuß



**MP 9**

naher Abstrom



**MP 12**

fernerer Abstrom

Abbildung 26: Messwertübersicht Profil Trockenbecken, Anstrom – Abstrom

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

Abbildung 27 zeigt den zeitlichen Verlauf der Radonkonzentration in der Anreicherungsbox.

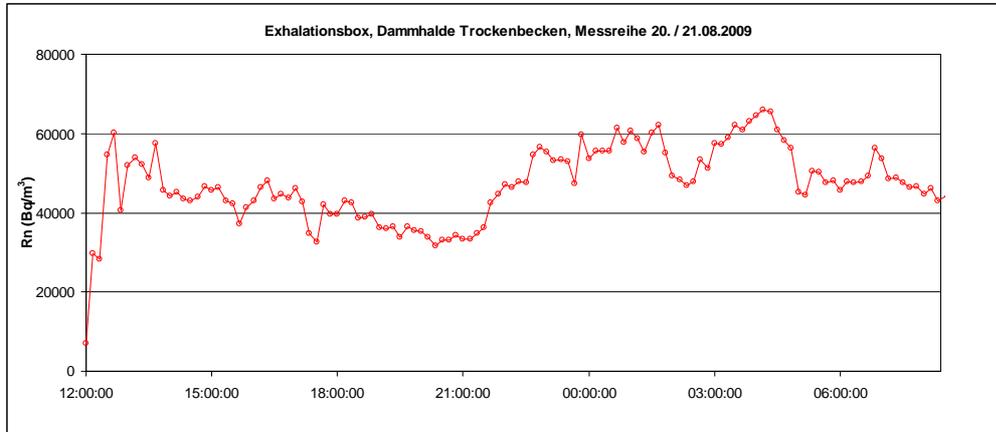


Abbildung 27: Zeitlicher Verlauf der Radonkonzentration in der Anreicherungsbox (Standort auf dem Haldenfuß, abwechselnd 1 h geschlossener und offener Deckel, Alpha-GUARD im Pumpbetrieb)

Der Verlauf entspricht einer relativ gleichmäßigen Exhalation.

Abbildung 28 visualisiert die Daten zeitlich und räumlich. Dabei wurde auf der Abszisse die Radonkonzentration im Profilverlauf und auf der Ordinate die Zeit dargestellt. Die Radonkonzentration wurde in Klassen unterteilt und farblich kenntlich gemacht. Wegen der großen Konzentrationsunterschiede wurden Werte  $> 3.000 \text{ Bq/m}^3$  zur höchsten Klasse zusammengefasst.

## Singuläre Radonfreisetzungen

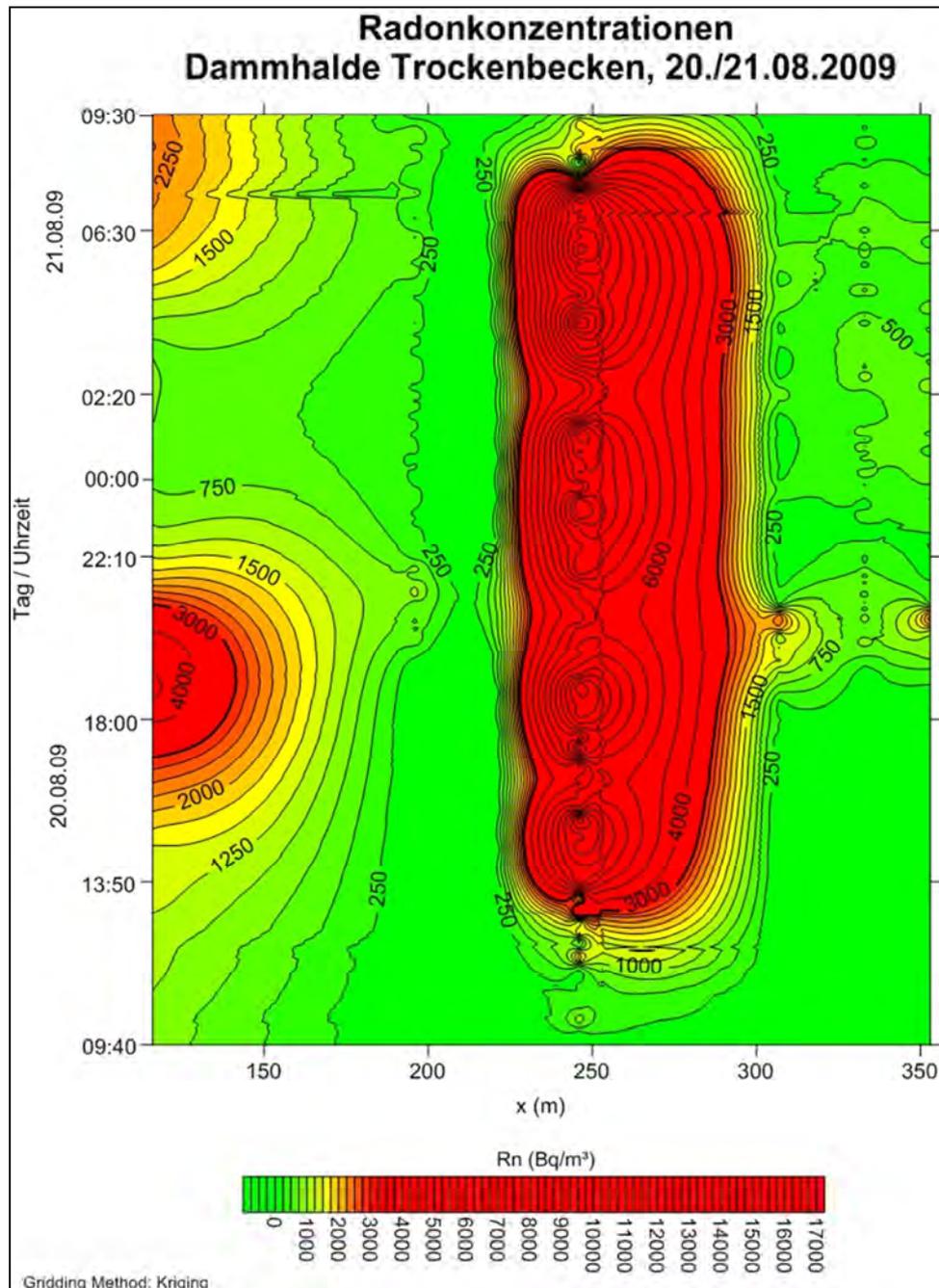


Abbildung 28: Räumliche (Abszisse) und zeitliche (Ordinate) Radonausbreitung zwischen Anstrom (MP 1 linker Bildrand) und Abstrom (MP 12 rechter Bildrand)

Zu erkennen ist nach einer Anlaufzeit der Messtechnik die Radonexhalation des Haldenfußes (MP 7), die während des gesamten Messintervalls wirksam ist. Gegen 18.30 Uhr beginnt eine deutliche Radonausbreitung hangabwärts, die weit im Haldenvorfeld zu erhöhten Radonkonzentrationen führt und gegen 21.00 Uhr beendet ist.

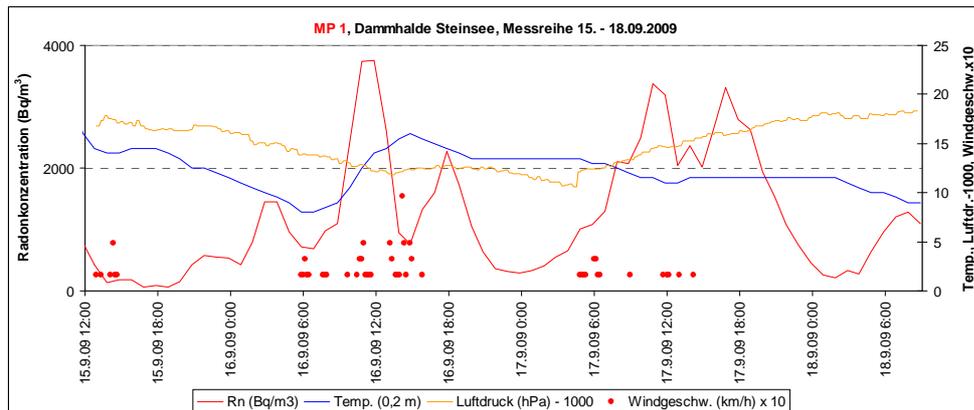
## **7.2 Messkampagne Dammhalde Steinsee**

### **7.2.1 Messwerte**

Abbildung 25 zeigt die Diagramme der Messpunkte von der Berme der Dammhalde Steinsee (MP 1, Anstrombereich) bis zum Fuß der Dammhalde (MP 6, Abstrombereich).

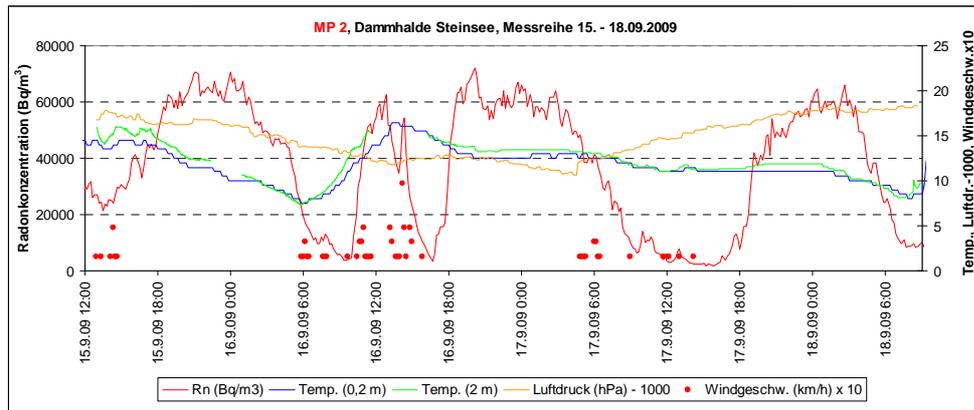
Der Anstrombereich (MP 1) zeigt vergleichsweise geringe Radonkonzentrationen unter  $4.000 \text{ Bq/m}^3$ . Dies belegt zusammen mit den extremen Werten am Haldenfuß (bis über  $70.000 \text{ Bq/m}^3$ , MP 2), dass erhöhte Konzentrationen hangabwärts auf Wirkungen des Haldenfußes zurückzuführen sind und nicht von hangaufwärts gelegenen Quellen stammen können.

## Singuläre Radonfreisetzungen



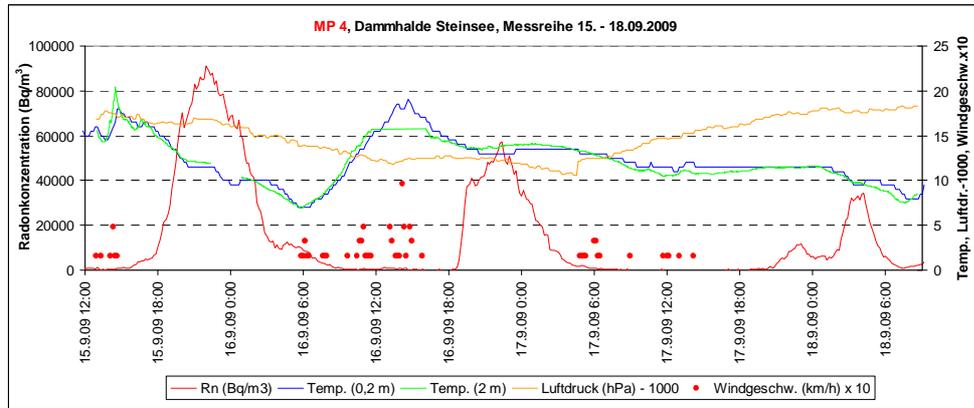
**MP 1**

Anstrombereich,  
Berme



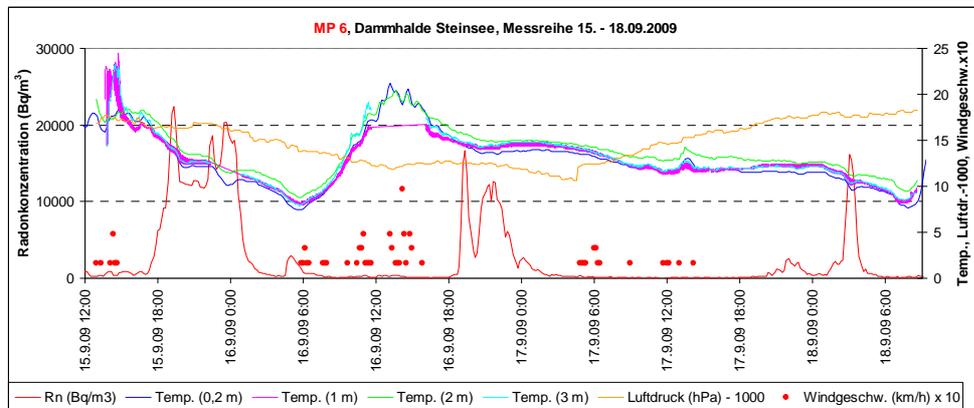
**MP 2**

Haldenfuß



**MP 4**

naher Abstrom



**MP 6**

fernerer Abstrom,  
Nähe Talsohle

Abbildung 29: Messwertübersicht Profil Steinsee, Anstrom - Abstrom

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

Die zeitliche Entwicklung der Radonkonzentration in der Anreicherungsbox ist in Abbildung 30 dargestellt.

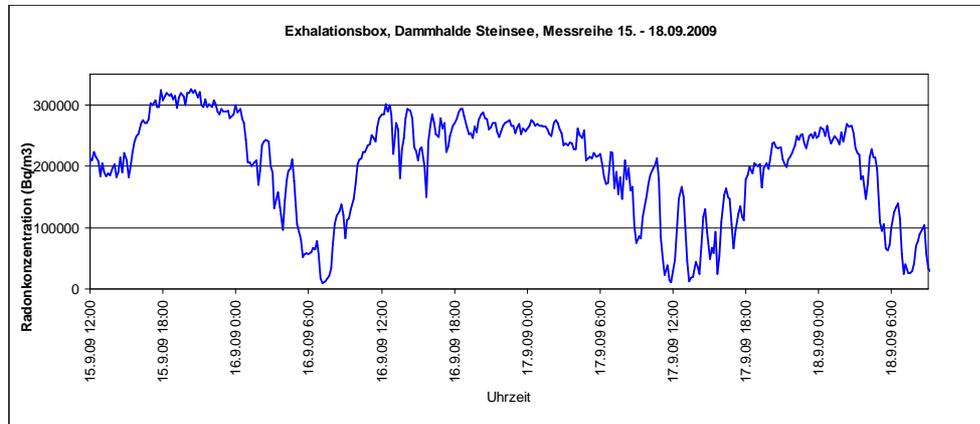


Abbildung 30: Zeitlicher Verlauf der Radonkonzentration in der Anreicherungsbox(Standort auf dem Haldenfuß, abwechselnd 1 h geschlossener und offener Deckel, Alpha-GUARD im Pumpbetrieb)

Die Konzentrationen sind erwartungsgemäß deutlich höher als in der bodennahen Luft (MP 7). Der zeitliche Verlauf entspricht jedoch weitgehend dem an MP 7. Das zwischenzeitliche Maximum am 16.09. um die Mittagszeit ist jedoch nicht so deutlich getrennt.

Abbildung 31 visualisiert die Messwerte räumlich und zeitlich analog Abbildung 28. Deutlich ist die jeden Tag gegen Abend auftretende Ausbreitung der Radonkonzentration hangabwärts zu erkennen. Dabei treten auch in einer Entfernung von ca. 100 m vom Haldenfuß noch sehr hohe Konzentrationen  $> 20.000 \text{ Bq/m}^3$  auf.

## Singuläre Radonfreisetzungen

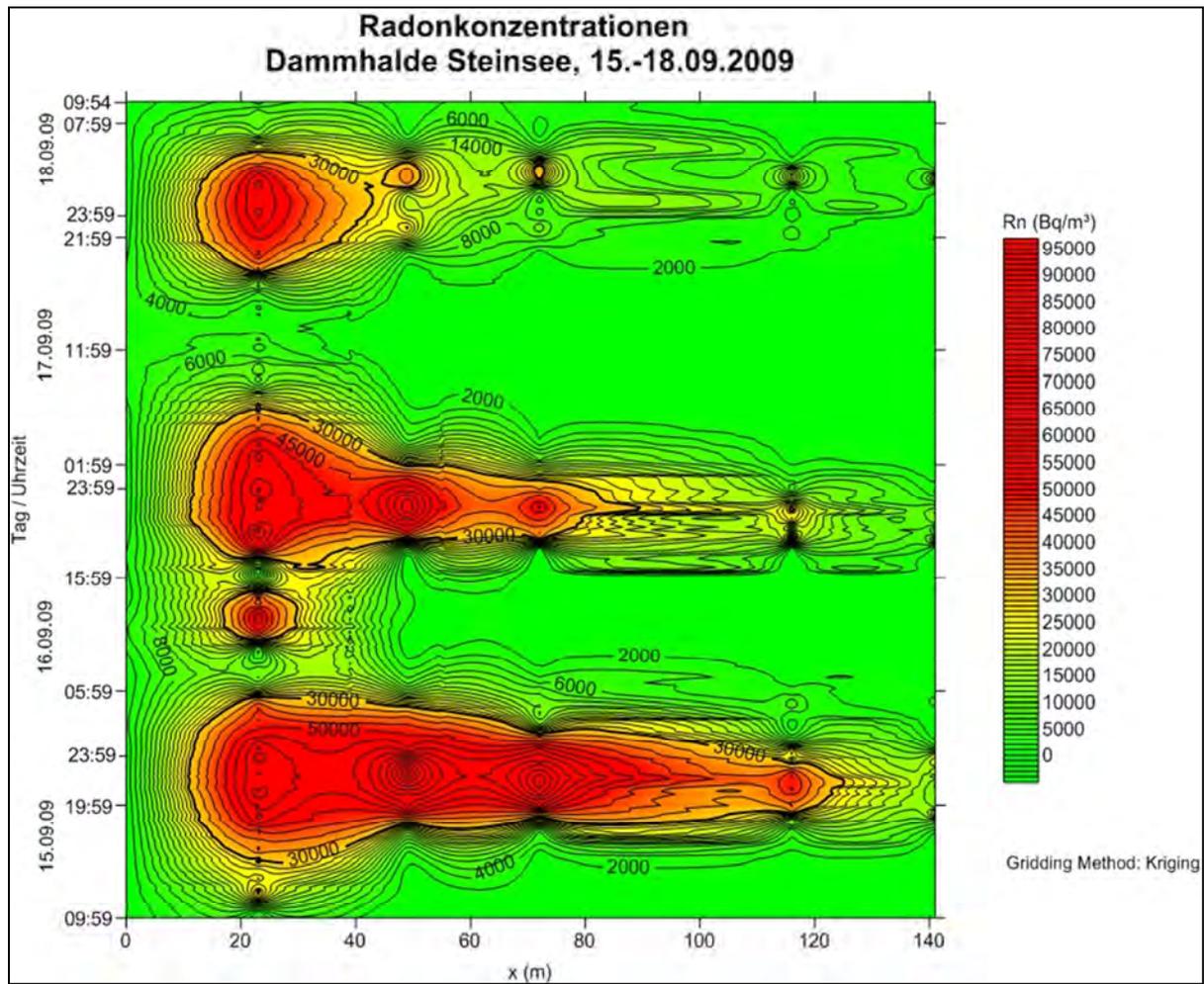


Abbildung 31: Räumliche (Abszisse) und zeitliche (Ordinate) Radonausbreitung zwischen Anstrom (MP 1 linker Bildrand) und Abstrom (MP 6 rechter Bildrand)

Weiterhin ist zu erkennen, dass sich die Radonausbreitung von Tag zu Tag abschwächt. Dies wird auf eine Abschwächung der Exhalation und/oder eine Abschwächung der Kaltluftabflüsse infolge rückläufiger Lufttemperaturen zurückgeführt. Die sinkenden Temperaturen führen zur Abschwächung der Triebkraft sowohl der Konvektion in der Halde als auch der Kaltluftabflüsse.

## **8 Interpretation der Ergebnisse**

### **8.1 Radonexhalation**

Die Messergebnisse bestätigen grundsätzlich die erwarteten Austritte Rn-haltiger Luft am Haldenfuß infolge Konvektion unter sommerlichen Bedingungen (Temperatur im Haldeninneren < Temperatur der Umgebungsluft). Dabei kommt es zu extremen Konzentrationen bis 70.000 Bq/m<sup>3</sup> in 20 cm über dem Haldenfuß.

Unter sommerlichen Bedingungen (Kampagne Trockenbecken) zeigte sich eine gewisse „Trägheit“ der Exhalation, d. h. bei sinkender Lufttemperatur geht diese zurück, hört aber nicht auf.

Die beiden durchgeführten Messkampagnen zeigten hinsichtlich der Exhalationen am Haldenfuß eine unterschiedliche Charakteristik. Am Trockenbecken (MP 7) war ein normales Verhalten zu beobachten, d. h. es traten über den gesamten Zeitraum relativ gleichmäßige Exhalationen auf. Am Steinsee hingegen war nur in den Nachtstunden ein solches normales Verhalten festzustellen. Tagsüber, wenn die höchsten Radonkonzentrationen in geringer Höhe über dem Haldenfuß zu erwarten wären, gingen diese stark zurück.

In den Morgenstunden erwärmt die Sonnenstrahlung insbesondere die bodennahe Luft im oberen Teil des Berghanges, so dass sich eine Temperaturdifferenz und damit ein Druckgradient vom Haldenplateau (höherer Druck) zum Haldenfuß (niedrigerer Druck) herausbildet. Dieser dem Betrag nach nicht abschätzbare Druckunterschied wirkt der durch den Dichteunterschied kalter und warmer Luft getriebenen Konvektion entgegen. Dies könnte den Radon-Konzentrationsrückgang am Fuß der Dammalde Steinsee in den jeweiligen Morgenstunden erklären.

In den Daten der Windmessung spiegeln sich diese Hangwinde zumindest in der Kampagne am Steinsee insofern wider, als nur in diesen Zeiträumen höhere Windgeschwindigkeiten registriert wurden (Abbildung 29).

## 8.2 Kaltluftabfluss und Radonausbreitung

Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen zeigen, dass die am Haldenfuß auftretenden Exhalationen durch Wind und Diffusion gewöhnlich relativ schnell verteilt und in größeren Entfernungen von der Halde bzw. im Bereich der Wohnbebauungen erst durch weitere Prozesse, d. h. Kaltluftabflüsse, relevant werden.

### 8.2.1 Abhängigkeit der Radonkonzentration von der Temperatur

Für die Messergebnisse der Kampagne Steinsee (September 2009) wurde die Korrelation der Rn-Konzentration und der Temperatur der jeweiligen Messpunkte angestellt (Abbildung 32).

Am Haldenfuß (MP 2) wird die Radonkonzentration überwiegend durch die Exhalation von Haldenluft bestimmt. Wie aus den Darstellungen (Abbildung 32) deutlich wird, ist keine Korrelation der Temperatur (und damit auch nicht der Temperaturdifferenz Außentemperatur zur Haldeninnentemperatur) zur Radonkonzentration erkennbar. Eine eigentlich zu erwartende Auswirkung der Temperatur auf die Konvektion und auf die am Haldenfuß gemessene Radonkonzentration ist nicht festzustellen.

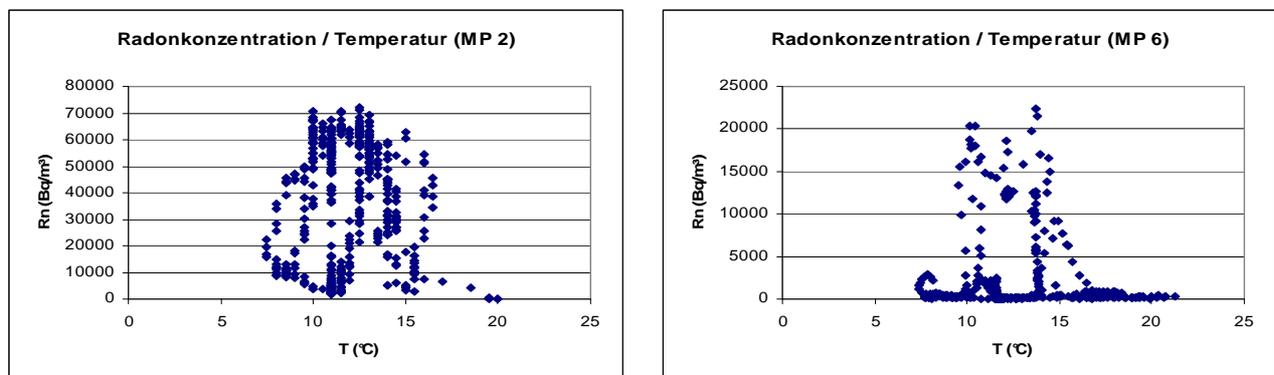


Abbildung 32: Korrelation von Radonkonzentration und Temperatur (MP 2: Haldenfuß, MP 6: Haldenvorfeld/Abstrom), Kampagne Steinsee

Im Haldenvorfeld (MP 6) wird hingegen die Radonkonzentration durch Kaltluftabfluss bestimmt. Daher sind hohe Radonkonzentrationen auf bestimmte Temperaturintervalle konzentriert, welche wahrscheinlich dem Temperaturniveau der Zeiträume erhöhter Konzentrationen infolge von Kaltluftabflüssen entsprechen.

### 8.2.2 Abhängigkeit der Radonkonzentration von der vertikalen Temperaturdifferenz (2 m Höhe und Bodennähe)

Da eine Voraussetzung für Kaltluftabflüsse die Kaltluftbildung ist und diese infolge der Abstrahlung bevorzugt in Bodennähe erfolgt, wurde die Abhängigkeit der Radonkonzentration von der Temperaturdifferenz in 2 m und 0,2 m Höhe untersucht. Die Ergebnisse sind für die Kampagne Trockenbecken in Abbildung 33 und für die Kampagne Steinsee in Abbildung 34 dargestellt.

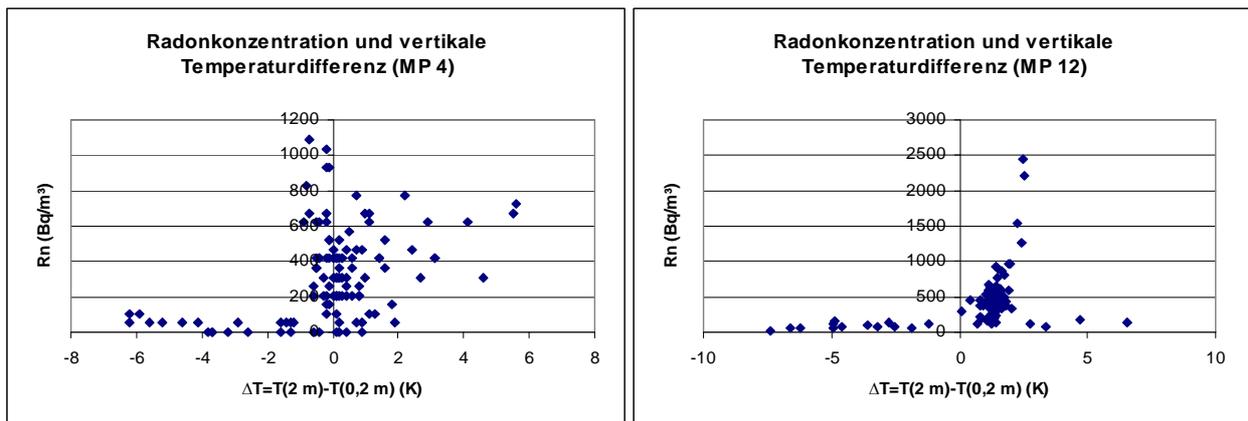


Abbildung 33: Abhängigkeit der Radonkonzentration von der vertikalen Temperaturdifferenz (2 m und 0,2 m Höhe), Kampagne Trockenbecken

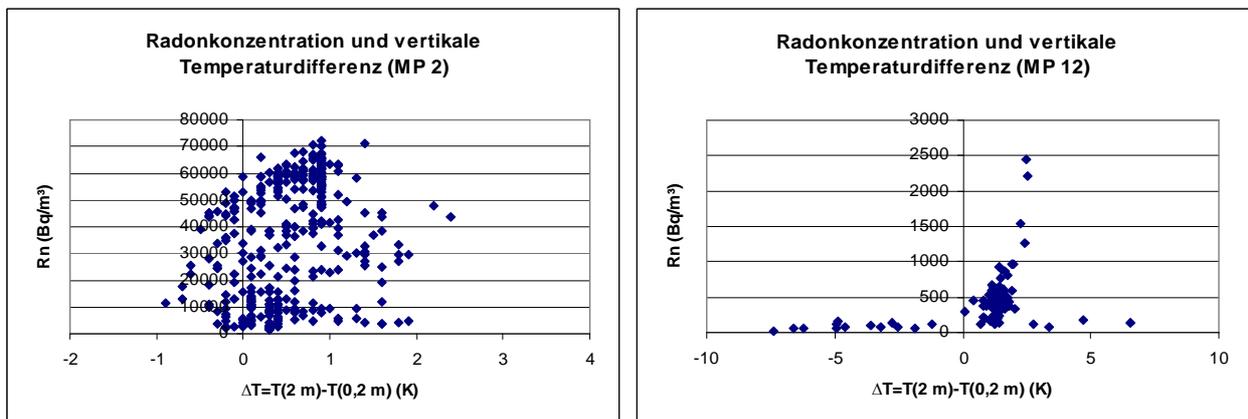


Abbildung 34: Abhängigkeit der Radonkonzentration von der vertikalen Temperaturdifferenz (2 m und 0,2 m Höhe), Kampagne Steinsee

Bei der Messung am Trockenbecken zeigt MP 4 (Haldenplateau) eine weitgehende Unabhängigkeit beider Größen. Hohe Radonkonzentrationen sind fast über das gesamte Intervall von Temperaturdifferenzen verteilt.

## Singuläre Radonfreisetzungen

Im Haldenvorfeld (MP 12) treten hohe Radonkonzentrationen nur bei  $T(2\text{ m}) > T(0,2\text{ m})$  auf. Dies belegt, dass diese Konzentrationen durch Kaltluftabflüsse bewirkt werden.

Noch deutlicher wird dieses Verhalten an den Ergebnissen der Kampagne Steinsee. Hier zeigt sich am Haldenfuß keinerlei Zusammenhang, während im Haldenvorfeld hohe Radonkonzentrationen an ein relativ enges, Intervall von Temperaturdifferenzen gebunden sind.

### 8.2.3 Abhängigkeit der Radonkonzentration vom Temperaturabfall

Die Kaltluftbildung als Voraussetzung für Kaltluftabflüsse ist mit einem negativen Temperaturgradienten, d. h. mit einem Temperaturabfall verbunden. Daher wurden Korrelationen zwischen der Radonkonzentration und dem Temperaturgradienten hergestellt. Die Ergebnisse für die Temperaturentwicklung der jeweils zurückliegenden 30 min sind in Abbildung 35 (Trockenbecken) und Abbildung 36 (Steinsee) dargestellt.

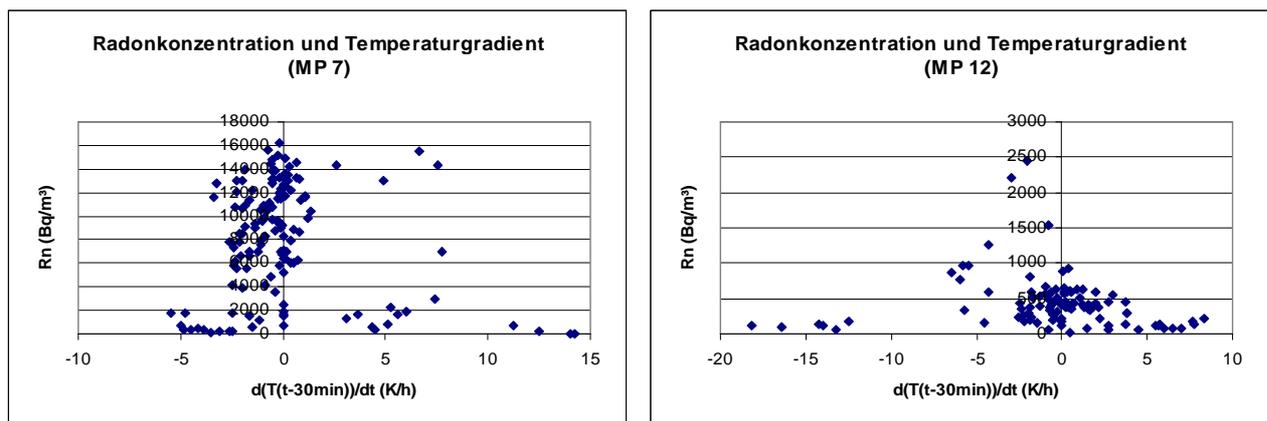


Abbildung 35: Radonkonzentration in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten (Abkühlungsrate) der vorangegangenen 30 Minuten Haldenplateau und Haldenvorfeld (Kampagne Trockenbecken)

Die Daten zeigen für den Haldenfuß (MP 7) keinen deutlichen Zusammenhang, d. h. die hohen Radonkonzentrationen finden sich neben negativer Temperaturentwicklung (Abkühlung) auch bei positiver (Erwärmung). Im Haldenvorfeld hingegen treten hohe Radonkonzentrationen nur bei negativem zeitlichen Temperaturgradienten (entsprechend Abkühlung). Dieses Verhalten ist mit der Radonausbreitung infolge Kaltluftabflusses zu erklären. Allerdings liegen an MP 12 nur relativ wenige Messwerte vor.

## Singuläre Radonfreisetzungen

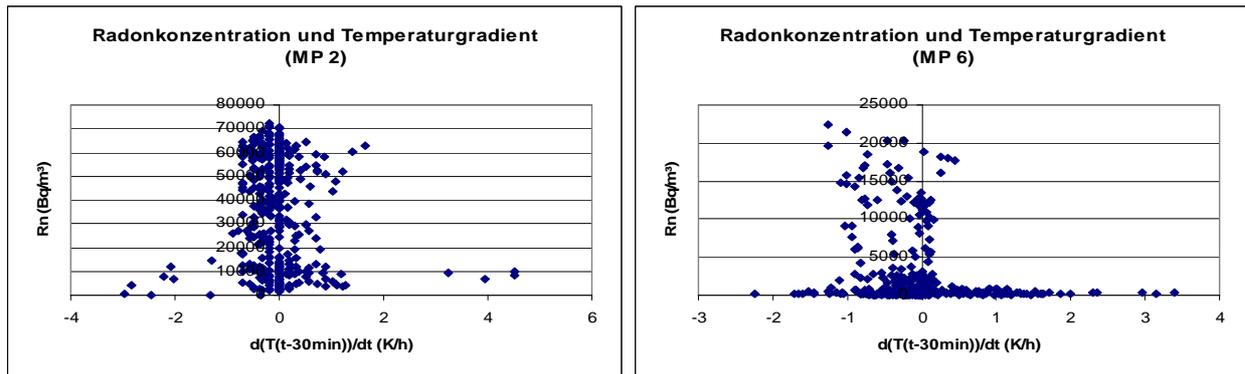


Abbildung 36: Radonkonzentration in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten der vorangegangenen 30 Minuten für Haldenfuß und Haldenvorfeld (Kampagne Steinsee)

Für die Dammhalde Steinsee zeigt sich bei einer deutlich größeren Messwertzahl ein ähnliches Bild. Am Haldenfuß (MP 2) liegen die hohen Radonkonzentrationen nahezu symmetrisch um den Wert Null. Im Haldenvorfeld (MP 6) liegt die überwiegende Mehrzahl hoher Werte im Bereich negativer zeitlicher Temperaturgradienten, d. h. im Bereich mit Abkühlung der Umgebungsluft. Werte bei 0 und darüber entsprechen hohen Radonkonzentrationen im Kaltluftabfluss, ohne dass weitere Abkühlung erfolgt

### 8.2.4 Fazit

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass an beiden untersuchten Halden Kaltluftabflüsse nachgewiesen wurden. Die Wirkung dieser Abflüsse ist in Richtung der Hangneigung gerichtet. Zeitweise kommt es im Vorfeld der Halden (bis > 100 m Entfernung) zu extrem hohen Radonkonzentrationen. Diese lassen sich kausal den Kaltluftabflüssen zuordnen.

Für das Auftreten von Kaltluftabflüssen müssen 2 Bedingungen erfüllt sein:

- sinkende Temperaturen
- positiver vertikaler Temperaturgradient ( $T(2\text{ m}) > T(0,2\text{ m})$ )

Diese Bedingungen sind nur bei Abkühlung der Luft, insbesondere abends/nachts gegeben.

Die Kaltluftabflüsse treten dabei sowohl kurzzeitig (Messung am Trockenbecken) als auch über längere Zeiträume (Messung am Steinsee) auf.

Eine zeitliche Auflösung des Beginns der Kaltluftabflüsse ist mit den verfügbaren Messgeräten nicht möglich, da das Integrationsintervall minimal 10 min lang ist, die Kaltluftgeschwindigkeit im Bereich m/s, entsprechend 100 m/min, liegt.

Eine weitere bedeutende Schlussfolgerung ist, dass Kaltluftabflüsse nicht auf hohe Tagestemperaturen mit anschließender Strahlungsnacht beschränkt sind, sondern auch bei kühler Witterung auftreten können (Messung Steinsee). Die Haupttriebkraft der KL-Abflüsse ist der vertikale Temperaturgradient ( $T(2\text{ m}) > T(0,2\text{ m})$ ) und die Hangneigung. Daher sind Kaltluftabflüsse bei starker Hangneigung auch bei kleinen Temperaturdifferenzen möglich und daher auch bei relativ kühlen Wetterlagen.

## **9 Grundlagen der Modellierung und Beispielrechnungen**

### **9.1 Theoretischer Hintergrund der Modellierung**

#### **9.1.1 Konvektive Radonfreisetzung**

Zur Modellierung der diffusiven Radonfreisetzung aus relativ homogenem Material, wie Boden oder Aufbereitungstillings sowie die großmaßstäbliche Radonausbreitung liegen international umfangreiche Untersuchungen vor (z. B. [4], [8], [13], [14]).

Dabei wird in der Regel unterschieden zwischen einerseits der Radonemanation, der infolge des Radiumzerfalls stattfindenden Radonfreisetzung aus dem Gesteinskorn in den Porenraum der Halde und andererseits dem diffusiven Transport im Haldenkörper.

Beide Vorgänge werden vom Wassergehalt beeinflusst, da es zu Veränderungen des luftgesättigten Porenraumes und damit zur Veränderung der Tortuosität, welche sich direkt auf die effektive Diffusionskonstante auswirkt, kommt. Zudem führen Veränderungen in der Feuchte zu einer Zunahme oder Abnahme der Wasserschicht um die einzelnen Gesteinskörner. Diese wirkt sich damit auf die Radonemanation, d. h. auf die Freisetzung aus dem Gestein in den Porenraum aus.

Zwar ist die instationäre Modellierung der Bodenfeuchte als Stand der Technik zu bezeichnen, allerdings versagt diese Vorgehensweise in der Regel bei den sehr inhomogenen Haldenkörpern.

Aufgrund der begrenzten Transportgeschwindigkeit bei diffusivem Transport ist die Einbeziehung des oberflächennahen Haldenbereiches ausreichend. Aus diesem Grunde kann dieser Prozess mit ausreichender Genauigkeit durch eindimensionale Modellansätze abgebildet werden ([8]).

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

Die Gleichung für den eindimensionalen Radontransport entlang der Koordinaten  $z$  gegeben:

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

Dabei sind:

$D' = D / \varepsilon$  - effektive Diffusionskonstante,  $D$  - Diffusionskonstante in Luft

$\lambda$  - Zerfallskonstante für Radon ( $= 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ )  
 $\varepsilon$  - Porosität

Der Term für die Radonproduktion  $\lambda C_0$  kann über den Emanationskoeffizienten  $E$  sowie die Radium-226-Aktivität des Materials  $A_{Ra}$  ausgedrückt werden:

$$(F 2) \quad \lambda C_0 = \lambda E \frac{\rho_d A_{Ra}}{\varepsilon}$$

mit:

$\rho_d$  - Trockendichte des Materials

Aus (F 1) resultiert unter Berücksichtigung der Randbedingungen

$$C(z = 0) = 0$$

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

die Radonkonzentration als Funktion der Tiefe  $z$ :

$$(F 3) \quad C(z) = C_0 \left( 1 - \exp \left( - \sqrt{\frac{\lambda}{D'}} z \right) \right)$$

Werden konvektive Prozesse einbezogen, so muss die Gleichung (F 1) um einen Konvektionsterm erweitert werden. U. a. in [4] wird die Gleichung für den eindimensionalen Radontransport entlang der Koordinaten  $z$  unter Einbeziehung der Konvektion gegeben:

$$(F 4) \quad \frac{\partial C(t, z)}{\partial t} = D' \frac{\partial^2 C(t, z)}{\partial z^2} - v' \frac{\partial C(t, z)}{\partial z} - \lambda C(t, z) + \lambda C_0$$

Dabei sind:

$v' = v / \varepsilon$  - effektive Strömungsgeschwindigkeit entlang der Strömungsbahn

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

Werden diese konvektiven Prozesse berücksichtigt, so berechnet sich die Exhalationsrate  $J$  auf der Grundlage von (F 4) zu:

$$(F 5) \quad J = \varepsilon \left[ v' C - D' \frac{\partial C}{\partial z} \right]$$

Unter weiteren vereinfachenden Annahmen (Schicht unendlicher Mächtigkeit) kann die Exhalationsrate zu:

$$(F 6) \quad J = \varepsilon C_0 \left( \frac{v'}{2} + \sqrt{\frac{v'^2}{4} + \lambda D'} \right)$$

berechnet werden. Für die Grenzfälle verschwindender Konvektion bzw. Diffusion gilt danach:

$$(F 7) \quad J = \varepsilon C_0 \left( \sqrt{\lambda D'} \right) \text{ (hier wurde in [4] die Porosität vergessen)}$$

$$(F 8) \quad J = C_0 v$$

Durch Berechnungen mit plausiblen Werten für die Diffusionskonstante  $D'$  wurde in [4] gezeigt, dass ab Geschwindigkeiten  $> 1e-5$  m/s die Konvektion dominiert.

Für reale Haldengeometrien sind im Gegensatz zu den obigen Ausführungen für eine modellhafte Abbildung konvektiver Prozesse dreidimensionale Modellansätze oder zumindest zweidimensionale Vertikalschnittmodelle erforderlich. Dafür sind nach dem Kenntnisstand der Autoren keine kommerziellen Modelle verfügbar. U. a. wurden dazu für Halden im Raum Schlema (Hammerberghalde und Halde 66/207) in [28], [29] grundsätzliche Betrachtungen durchgeführt. In diesen Dokumenten wurden sämtliche physikalischen und mathematischen Grundlagen zur quantitativen Beschreibung dieser Phänomene im Detail dargestellt. Leider stand diese Unterlage nicht zur Verfügung. Die nachfolgende Darstellung greift jedoch methodisch einige dieser Ansätze auf.

Die Grundlage für die mathematischen bzw. die anschließende numerische Beschreibung der freien Konvektion in einem porösen Haldenkörper sind die Erhaltungssätze von Masse, Energie und Impuls. Diese können in Form von Differentialgleichungen formuliert werden und müssen unter Berücksichtigung der Geometrie, der Materialparameter sowie der klimatischen Randbedingungen gelöst werden. Sie lauten:

Massenerhaltung:

$$(F 9) \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \underline{v}) = 0$$

Impulserhaltung (Navier-Stokes-Gleichungen):

$$(F 10) \quad \rho \frac{\partial \underline{v}}{\partial t} + \rho (\underline{v} \nabla) \underline{v} - \rho \underline{g} - \eta \Delta \underline{v} = 0$$

Energieerhaltung:

$$(F 11) \quad \rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + (\underline{v} \nabla) T \right) - \left( \frac{\partial p}{\partial t} + (\underline{v} \nabla) p \right) - \nabla (\lambda \nabla T) - \frac{\eta}{2} \sum_{i,k=1..3} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right)^2 + \frac{2}{3} \eta (\nabla \underline{v})^2 = 0$$

In den Formeln (F 9) - (F 11) wurden die folgenden Symbole verwendet:

$\rho$	-	Dichte der Luft im Haldenkörper
$\underline{v}$	-	Geschwindigkeitsvektor
$t$	-	Zeit
$\eta$	-	Dynamische Viskosität
$\underline{g}$	-	Vektor der Erdbeschleunigung
$c_p$	-	spezifische Wärmekapazität der Haldenluft
$\lambda$	-	Wärmeleitfähigkeit der Haldenluft
$\nabla$	-	Nabla-Operator/Gradient
$\Delta$	-	Laplace-Operator

Da für die Haldendurchströmung infolge freier Konvektion zumindest zeitweise von stationären Zuständen ausgegangen werden kann, entfallen jeweils die Ableitungen nach der Zeit. Für langsame Strömungen können die Terme, in die die Geschwindigkeit quadratisch eingeht ebenfalls vernachlässigt werden.

Für die Berechnung eines gemittelten Strömungsfeldes im Inneren der Halde, werden diese Gleichungen nunmehr noch über den Porenraum des Haldenkörpers gemittelt:

Gemittelte Gleichung für die Massenerhaltung:

$$(F 12) \quad \nabla (\bar{\underline{v}}) = 0$$

Gemittelte Gleichung für die Impulserhaltung:

$$(F 13) \quad \rho (\bar{\underline{v}} \nabla) \bar{\underline{v}} - \rho \bar{\underline{g}} + \nabla \bar{p} - \eta \Delta \bar{\underline{v}} = 0$$

Gemittelte Gleichung für die Energieerhaltung:

$$(F 14) \quad \rho c_p (\bar{\underline{v}} \nabla) \bar{T} - ((\bar{\underline{v}} \nabla) \bar{p}) - \nabla (\lambda \nabla \bar{T}) - \frac{\eta}{2} \sum_{i,k=1..3} \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_k} + \frac{\partial \bar{v}_k}{\partial x_i} \right)^2 = 0$$

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

Dabei wurde jeweils eine über den Porenraum gemittelten Größe  $x$  mit  $\bar{x}$  abgekürzt.

Als Randbedingungen müssen die Werte der (jeweils gemittelten) Geschwindigkeit und der Temperatur auf dem Rand des Berechnungsfeldes vorgegeben werden. Für die Temperatur scheint es dabei ausreichend, für das Haldeninnere eine konstante Temperatur vorzugeben.

Für den Außenraum der Halde kann das Strömungsfeld anhand der ungemittelten Gleichungen (F 9) - (F 11), wiederum unter Vernachlässigung der Zeitableitungen sowie der Terme höherer Ordnung in der Geschwindigkeit berechnet werden. Dabei sind die entsprechenden Druck- und Temperaturverläufe in der Atmosphäre zu berücksichtigen.

Unter einer Reihe von vereinfachenden Annahmen kann der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit im Inneren der Halde näherungsweise durch:

$$(F 15) \quad \bar{v} = \frac{k(\varepsilon) \Delta p_I}{\eta L_I}$$

mit:

$$(F 16) \quad \Delta p_I \approx \rho_{0I} g (z_A - z_E)$$

berechnet werden. Dabei sind:

- $k(\varepsilon)$  - Permeabilität als Funktion der Porosität
- $L_I$  - Länge der Strömungsbahn im Inneren der Halde
- $\rho_{0I}$  - Dichtedifferenz zwischen Haldeninnenluft und Haldenaußenluft am Bezugspunkt im Inneren der Halde (Eintritts- oder Austrittspunkt)
- $z_A$  - Höhe des Austrittspunktes der Stromlinie gegenüber dem Bezugspunkt
- $z_E$  - Höhe des Eintrittspunktes der Stromlinie gegenüber dem Bezugspunkt

Da sich die einzelnen Stromlinien nicht kreuzen dürfen, verlaufen diese nahezu parallel zum Hang der Halde. Folglich kann die Länge  $L_I$  einer solchen Stromlinie näherungsweise gleich der Hanglänge  $L_H$  zwischen Ein- und Austrittspunkt gesetzt werden. Der Zusammenhang zwischen dieser Hanglänge und der Höhendifferenz zwischen Ein- und Austrittspunkt wird für eine idealisierte Haldengeometrie (Abbildung 37, keine Bermen) allein durch den Schüttwinkel  $\gamma$  des Haldenhanges bestimmt:

$$(F 17) \quad L_I \approx L_H = \frac{(z_A - z_E)}{\sin \gamma}$$

## Singuläre Radonfreisetzungen

Unter der zusätzlichen Annahme jeweils konstanter Temperatur  $T_I$  im Inneren der Halden und  $T_O$  außerhalb der Halde kann der Dichteunterschied  $\rho_{0I}$  näherungsweise zu:

$$(F 18) \quad \rho_{0I} \approx \rho_0 \alpha (T_I - T_O)$$

mit:

$\alpha$  - Wärmeausdehnungskoeffizient für Luft

berechnet werden.

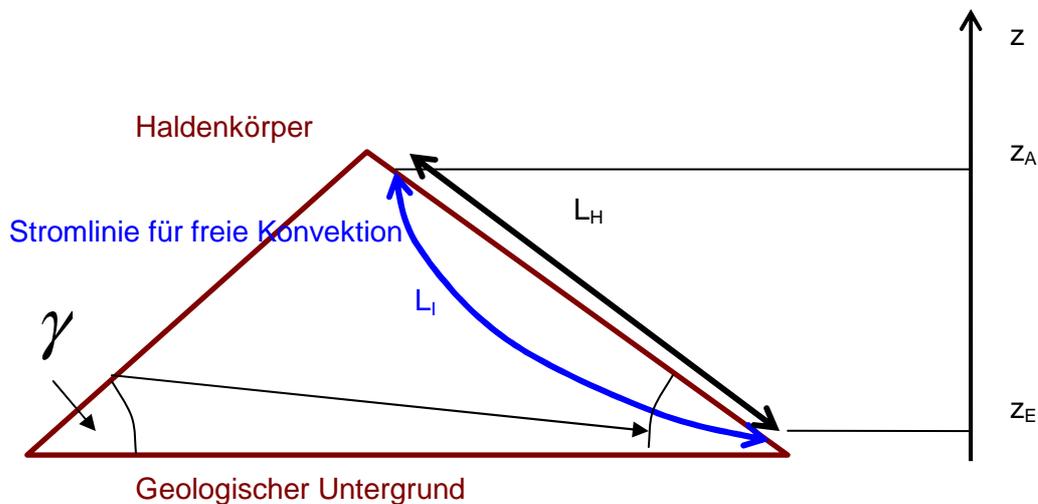


Abbildung 37: Hanglänge und Länge der Stromlinie zwischen Ein- und Austrittspunkt einer Stromlinie für eine idealisierte Halde mit dem Schüttwinkel  $\gamma$

Durch sukzessives Einsetzen von (F 18), (F 17) und (F 16) in (F 15) resultiert für den Betrag der Strömungsgeschwindigkeit näherungsweise:

$$(F 19) \quad |\vec{v}| = \frac{k(\varepsilon)}{\eta} \rho_0 g \alpha (T_I - T_O) \sin \gamma$$

Damit erweist sich die Strömungsgeschwindigkeit unter diesen vereinfachenden Annahmen als unabhängig von der Länge der Stromlinie. Wie anhand der Herleitung und der getroffenen Zusatzannahmen deutlich wurde, ist die Strömungsgeschwindigkeit wieder eindimensional beschreibbar.

Eine genauere Betrachtung von (F 19) unter Einbeziehung der jeweiligen Spannbreiten macht deutlich, dass die Strömungsgeschwindigkeit am sensibelsten von der Permeabilität  $k(\varepsilon)$  abhängig ist, zumal diese für die Kornverteilung realer Halden einen Bereich von mindestens ca. 5 Größenordnungen überspannt.

## Singuläre Radonfreisetzungen

Nach Karman und Kozeny kann die Permeabilität näherungsweise aus der Porosität abgeleitet werden über:

$$(F 20) \quad k(\varepsilon) = K \frac{1}{A_v^2} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}$$

mit:

$$(F 21) \quad A_v \approx 6/d_s$$

Dabei sind:

- $K$  - Karman-Konstante, in der Filtertechnik wird ein Wert von 36/150 verwendet
- $d_s$  - Sauterdurchmesser als mittlerer Korndurchmesser
- $\varepsilon$  - Porosität

Bei Variation des mittleren Korndurchmessers  $d_s$  in einem für Halden durchaus typischen Bereich zwischen 0,1 mm und 20 mm (Es ist zu beachten, dass die Permeabilität maßgeblich durch den Feinkornanteil bestimmt wird.) resultiert der in Abbildung 38 dargestellte Permeabilitätsverlauf als Funktion des mittleren Korndurchmessers. Dabei wurde für die Porosität ein Wert von 0,25 verwendet. Unter Verwendung plausibler Parameter für den Schüttwinkel von 30° und einer Temperaturdifferenz von 10 K resultiert mit dem Tabellenwert für die Viskosität der ebenfalls in Abbildung 38 dargestellte Geschwindigkeitsverlauf.

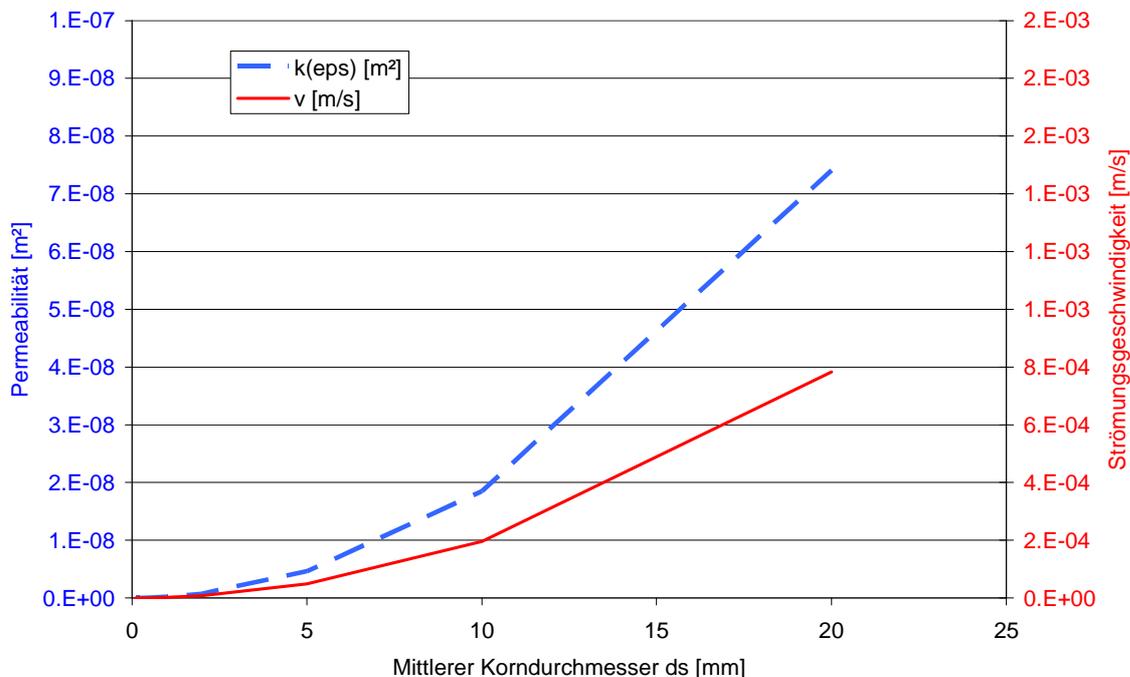


Abbildung 38: Abhängigkeit der Permeabilität sowie der resultierenden konvektiven Strömungsgeschwindigkeit für typische Haldenparameter

Das in Abbildung 38 dargestellte Ergebnis entspricht dabei durchaus den aus Messungen des konvektiven Beitrages bekannten Größenordnungen der Strömungsgeschwindigkeit.

Auf dieser Grundlage soll eine vereinfachte Abschätzung zur Exhalationsrate durchgeführt werden. In [21] wurden z.B. Messungen der Rn-Bodenluftkonzentration in lediglich 0,7 m Tiefe vorgenommen. Diese bewegen sich im Bereich von ca. 100 kBq/m<sup>3</sup>. Wird dieser Wert angesetzt und die berechneten Strömungsgeschwindigkeiten entsprechend Abbildung 38 verwendet, so resultieren Exhalationsraten bis zu ca. 100 Bq/(m<sup>2</sup>s) unter der Annahme rein konvektiver Exhalation (Diese Annahme ist gerechtfertigt für Strömungsgeschwindigkeiten größer 10<sup>-5</sup> m/s, siehe oben). Dies liegt im Bereich der ebenfalls in [21] gemessenen Exhalationsraten.

### **9.1.2 Kaltluftabflüsse**

Die an die Dynamik der Temperaturentwicklung gekoppelte Bewegung von Luftmassen kann gegenwärtig als grundsätzlich verstanden und modellhaft darstellbar eingeschätzt werden. Eine besondere Rolle spielen dabei das Phänomen der Kaltluftbildung und der daraus resultierenden Kaltluftabflüsse sowie die Bildung von Kaltluftseen. Es besitzt deshalb eine besondere Bedeutung, weil Kaltluftabflüsse bei den entsprechenden Witterungsbedingungen einen leistungsfähigen Transportmechanismus in den bodennahen Luftschichten darstellen können. Dadurch kommt es zur oberflächennahen Verlagerung hoher Konzentrationen über größere Entfernungen. Dies spielt insbesondere für die Ausbreitung von Gerüchen, von Luftschadstoffen und unter bestimmten Bedingungen auch von Radionukliden eine große Rolle.

Für die Modellierung von Kaltluftbewegungen und den daran gebundenen Transport von Luftschadstoffen existiert eine Vielzahl kommerziell verfügbarer Programme. U. a. sei auf das Programm KLAM [6] verwiesen. Die wesentlichen wissenschaftlichen Grundlagen sind u. a. in [30], [31] und [32] dargestellt.

Für das vorliegende Projekt wurde bewusst nicht auf derartige Kaltluftmodellierungen zurückgegriffen. Dafür gab es eine Reihe von Gründen, die im Folgenden genannt werden sollen:

- Die beobachteten hohen Radonkonzentrationen entstehen in Folge des komplexen gekoppelten Zusammenwirkens der Haldendurchströmung, der sich dabei einstellenden Konzentrationen der Haldenluft und des Abtransportes des austretenden Radons innerhalb der Kaltluftschicht. Die kommerziell verfügbaren Programme stellen lediglich eine Lösung für den letztgenannten Aspekt dar. Aus der Sicht der Autoren kann jedoch nicht auf eine konsistente Kopplung der Prozesse verzichtet werden.

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

- Im Forschungsprojekt geht es gerade um die Analyse und das Verständnis des Zusammenwirkens der Prozesse und der Identifikation von sensitiven Parametern. Deshalb werden vereinfachte Ansätze bevorzugt.
- Eine Zielstellung des Projektes besteht in der Schaffung einer Methodik, um Prognosen auch für andere Standorte durchführen zu können. Da diese Methodik relativ einfach handhabbar und mit einem vertretbaren Aufwand umsetzbar sein sollte, werden derart aufwändige Modellierungen nicht als Ziel führend betrachtet.

Als Grundlage für die weiteren Betrachtungen wurden die in [5] dargestellten empirischen Beziehungen verwendet.

Danach gilt für das Geschwindigkeitsprofil  $u(z)$  einer Kaltluftschicht in Abhängigkeit von der Höhe über Gelände  $z$  folgende Beziehung:

$$(F 22) \quad u(z) = u * \sin\left(\pi \frac{z - z_0}{H}\right) * \exp\left[-\pi \left(\frac{z - z_0}{H}\right)\right]$$

Dabei sind:

$u$	-	Mittlere Kaltluftgeschwindigkeit
$H$	-	Mächtigkeit der Kaltluftschicht
$z_0$	-	Rauhigkeitslänge

Entsprechend [5] ergibt sich folgendes Vertikalprofil der Geschwindigkeit.

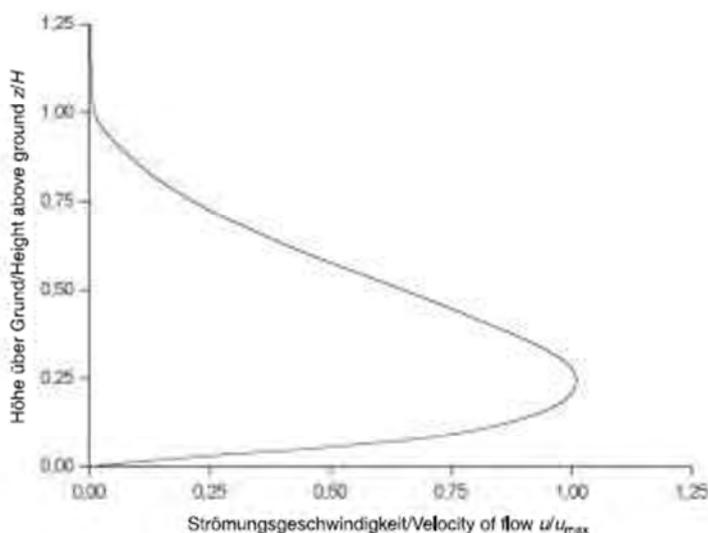


Abbildung 39: Vertikalprofil der Kaltluftströmungsgeschwindigkeit nach [5]

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

Die mittlere Kaltluftgeschwindigkeit selbst ist wiederum von einer Reihe von Parametern abhängig:

$$(F 23) \quad u = \sqrt{\frac{g * H}{\mu} * \frac{T_U - T_{KL}}{T_U} \sin(\alpha)}$$

Dabei sind:

$\mu$	-	Rauhigkeitskonstante (im Mittel 0.02)
$T_U$	-	Temperatur der Luft außerhalb der Kaltluftschicht
$T_{KL}$	-	Temperatur in der Kaltluftschicht
$\alpha$	-	Neigung des Hanges
$g$	-	Erdbeschleunigung

Der mittlere Kaltluftvolumenstrom ist demnach durch:

$$(F 24) \quad Q_{KL} = u * H * B$$

mit  $B$  als der Breite des betrachteten Hanges bestimmt.

Dieser mittlere Volumenstrom ist diejenige Kaltluftmenge, die an den Hängen oberhalb des betrachteten Objektes gebildet wird. Dies wird über eine Kaltluftbildungsrate  $R_{KL}$  und die Anstromlänge des Hanges  $L_{AN}$  beschrieben:

$$(F 25) \quad Q_{KL} = R_{KL} * L_{AN} * B$$

Durch Gleichsetzen von (F 24) und (F 25) und nachfolgenden Einsetzen von (F 23) folgt:

$$(F 26) \quad H = \left( \frac{(R_{KL} * L_{AN})^2 \mu}{g * \sin(\alpha)} * \frac{T_U}{T_U - T_{KL}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Während für die Kaltluftbildungsrate Literaturwerte verwendet werden können, sind die weiteren Parameter aus den jeweiligen Standortgegebenheiten ableitbar bzw. im Falle des Temperaturunterschiedes Kaltluft und Umgebung durch die durchgeführten Messungen zugänglich. Für diese Temperaturdifferenz wurden Werte im Bereich von ca. 1 K ermittelt (siehe Abbildung 26 und Abbildung 29). Die Kaltluftbildungsraten bewegen sich nach [5] im Bereich von ca. 10 - 30 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>h).

Aus der Höhe der Kaltluftschicht  $H$  kann nun über (F 23) auch die mittlere Kaltluftgeschwindigkeit und daraus das Profil der Geschwindigkeit nach (F 22) ermittelt werden.

Als meteorologische Voraussetzung für die Ausbildung von Kaltluftabflüssen sind folgende Bedingungen notwendig:

- Die an einer Wetterstation gemessene Windgeschwindigkeit darf einen festgelegten Maximalwert nicht überschreiten, da das Kaltluftwindfeld ansonsten durch das regionale Windfeld zu stark überprägt wird. Als Maximalwert wurde im Weiteren eine mittlere Windgeschwindigkeit von 2 m/s verwendet. In Bodennähe (in der Höhe der Messgeräte) entspricht dies bei Annahme eines logarithmischen Windprofils einer Windgeschwindigkeit  $< 0.5$  m/s bei der angenommen werden kann, dass dadurch der Kaltluftabfluss (Geschwindigkeiten im Bereich von 1 m/s) nicht grundsätzlich gestört wird.
- Im Bereich der Halde muss ein genereller Temperaturabfall messbar sein. Dazu muss die Temperatur über ausreichende Zeitintervalle gemittelt werden. Als Mittelungszeitraum für den tendenziell ein Temperaturabfall vorhanden sein sollte, wurde im Weiteren ein Zeitraum von 3h verwendet.

### 9.1.3 Transport in Kaltluftschichten

Für Transportphänomene in Kaltluftschichten ist international eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt worden. Insbesondere im Zusammenhang mit der Ausbreitung von Schadstoffen und Gerüchen wurden auch in Deutschland eine Vielzahl von Studien und insbesondere auch Modellrechnungen durchgeführt. Allerdings sind die dabei verwendeten konzeptionellen Grundlagen und Parameter nur teilweise zugänglich.

Entsprechend [36] wird der Transport in atmosphärischen Schichten in kartesischen Koordinaten nach folgender Gleichung beschrieben:

$$(F 27) \quad u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right)$$

Dabei fällt die x-Richtung mit der Richtung der Luftströmung  $u$  zusammen. Die Symbole bedeuten:

$K_x, K_y, K_z$       Turbulenzdiffusionskoeffizienten

Bei Vernachlässigung der longitudinalen Dispersion (in Strömungsrichtung) ergibt sich:

$$(F 28) \quad u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right)$$

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

Dabei ist

$\overline{c^y}$  senkrecht zur Strömungsrichtung lateral gemittelte Konzentration

Für diese Gleichung gelten die Randbedingungen

$$(F 29) \quad K_z \frac{\partial \overline{c^y}}{\partial z} = 0 \quad \text{für } z=0 \text{ bzw. } z=H$$

sowie:

$$(F 30) \quad u * \overline{c^y}(0, z) = Q\delta(z - h_s) \quad \text{für } x=0$$

mit:

$h_s$  Höhe der (Linien-) Quelle

$Q$  Quellstärke der Quelle

Die Turbulenzdiffusionskonstanten werden dabei in der Regel als abhängig von der Höhe über der Erdoberfläche betrachtet und über empirische Formeln beschrieben, welche an Feldexperimenten parametrisiert werden. Nachfolgend sollen dazu einige Ansätze aufgeführt werden:

Nach [36] kann  $K_z$  über folgenden Ansatz beschrieben werden:

$$(F 31) \quad K_z = 0.22w_*H \left(\frac{z}{H}\right)^{1/3} \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{1/3} \left[1 - \exp\left(-4\frac{z}{H}\right) - 0.003\exp\left(8\frac{z}{H}\right)\right]$$

Hier ist:

$w_*$  vertikale Konvektionsgeschwindigkeit

Nach [38] kann  $K_z$  über folgenden Ansatz beschrieben werden:

$$(F 32) \quad K_z = \frac{k*u_**z}{\Phi_h(z/L)}$$

wobei gilt:  $\Phi_h(z/L) = \left(1 - 16\frac{z}{L}\right)^{-1/2}$

mit der Karman Konstante  $k$ .

Alternativ kann  $K_z$  über folgenden Ansatz nach [39] beschrieben werden:

$$(F 33) \quad K_z = k * w_* * z \left(1 - \frac{z}{H}\right)$$

Weitere Ansätze sind u.a. in [40] dargestellt.

Sämtliche dieser Modellansätze stellen Ansätze für konvektive Strömungen in atmosphärischen Grenzschichten dar. Diese Modelle wurden in der Regel an veröffentlichten Feldexperimenten parametrisiert. Dabei ist allerdings zu beachten, dass es sich nicht um typische Kaltluftsituationen gehandelt hat. Insbesondere ist die konvektive Schicht in der Regel mächtiger ausgeprägt und erreicht Höhen von mehreren hundert Metern. Deshalb wird eingeschätzt, dass die Parameter nicht auf den vorliegenden Fall übertragen werden können.

Für eine Bewertung und Parametrisierung an den Daten der beiden Messperioden sind die Messdaten nicht ausreichend. Deshalb wurde im Rahmen der vorliegenden Studie für die vertikale turbulente Diffusion ein konzeptionell einfacher Ansatz gewählt. Insbesondere wird davon ausgegangen, dass der vertikale Turbulenzdiffusionskoeffizient innerhalb der Kaltluftschicht unabhängig von  $z$  und auch unabhängig von der Kaltluftgeschwindigkeit  $u(z)$  ist. Somit gilt:

$$(F 34) \quad K_z = \chi * D$$

mit:

$D$  molekulare Diffusionskonstante von Radon in Luft

$\chi$  empirischer Faktor der den Effekt der turbulenten Diffusion beschreibt

Der empirische Parameter  $\chi$  muss an der gemessenen Konzentrationsabnahme entlang des Strömungspfades bestimmt werden. Dabei wird angestrebt, für beide Messkampagnen einen einheitlichen Wert zu verwenden.

## **9.2 Numerisches Modell**

### **9.2.1 Softwareplattform GoldSim**

Die GoldSim Software-Umgebung wird weltweit zur Simulation unterschiedlichster komplexer Systeme in der Geschäftswelt, im Ingenieurwesen und in der Wissenschaft eingesetzt. GoldSim wird dazu verwendet, die wesentlichen Parameter und Prozesse eines nahezu beliebigen Systems abzubilden und das Zeitverhalten zu simulieren. Damit ist es möglich, das System zu analysieren, Schlüsselparameter zu identifizieren und auf dieser Grundlage unterschiedliche Varianten und Strategien miteinander zu vergleichen.

Innerhalb der grafisch orientierten Benutzeroberfläche steht eine Vielzahl von flexiblen Bausteinen zur Verfügung, mit denen das jeweilige System abgebildet werden kann. Sämtliche Parameter sind mit Einheiten behaftet, können als Verteilungsfunktion vorgegeben werden und komplexe gegenseitige Abhängigkeiten besitzen.

Jedes System, welches sich mathematisch abbilden lässt, kann mit GoldSim simuliert werden, wobei es GoldSim in der Regel dafür genutzt wird, die Ergebnisse von spezifischen Detailmodellen zu integrieren. So können kontinuumsmechanische Probleme in der Regel nur mit eingeschränkter räumlicher Auflösung in GoldSim dargestellt werden.

G.E.O.S. ist aufgrund der langjährigen Erfahrungen der deutsche Partner der GoldSim Technology Group für die Software GoldSim.

### **9.2.2 Modellkonzept und räumliche Diskretisierung Haldendurchströmung**

Ein Schwerpunkt der Leistung besteht in der modellhaften Abbildung derjenigen Prozesse, die zu erhöhten Radonfreisetzungen und dessen Transport zu Immissionspunkten führen.

Das für das vorliegende Projekt verwendete Modell beruht dabei auf einem bereits im Hause G.E.O.S. vorhandenen Modell zur Beschreibung von Transport in der Gasphase. Dieses Modell war im Zusammenhang mit dem Projekt „Methanoxidationsschichten“ entwickelt worden und wurde für Gastransportprozesse in Halden und Deponien eingesetzt.

Dabei wird das Gesamtproblem in zwei Teilprobleme zerlegt: zum einen die Halde als eine Radonquelle mit konvektiven Radonfreisetzungsmechanismen und zum anderen der Transport des freigesetzten Radons innerhalb von Kaltluftabflüssen talwärts zu den Immissionspunkten im Abstrom.

Beide Teilprobleme sind über die Randbedingungen (Temperatur) und über die Radontransportvorgänge miteinander gekoppelt.

Im Inneren der Halde ist zunächst die Radonproduktion infolge des Zerfalls von Radium und die Radonfreisetzung in den Porenraum zu beschreiben. Dazu wird eine Querschnittsfläche des konvektiv durchströmten Bereiches angenommen, da dessen genaue Geometrie nur schwerlich einer Messung zugänglich ist. In lateraler Richtung, d.h. quer zum Hang werden homogene Verhältnisse unterstellt. Deshalb kann eine Beschränkung auf eine Breite von 1 m erfolgen.

An diesen konvektiven Bereich angekoppelt wird noch ein nicht durchströmter Bereich angenommen. Dieser ist lediglich diffusiv an den durchströmten Bereich angekoppelt. Für die Diffusion im Haldeninneren wird die Tortuosität des Materials berücksichtigt.

## Singuläre Radonfreisetzungen

In Strömungsrichtung, d. h. parallel zum Hang wird die Halde in einzelne Teilstücke diskretisiert, die jeweils für sich aus einem konvektiv durchströmten Teilbereich und einem nicht durchströmten Teilbereich bestehen. Die konvektiv durchströmten Teilbereiche sind miteinander über Volumenströme gekoppelt. Schematisch wird dies in Abbildung 40 veranschaulicht.

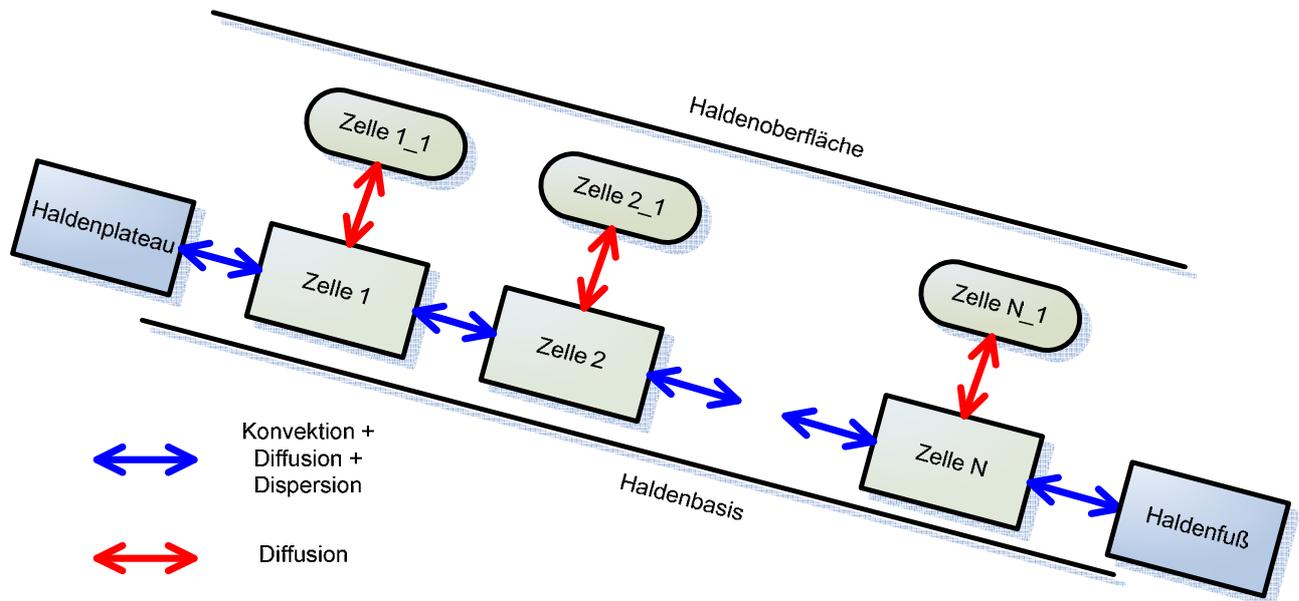


Abbildung 40: Schematische Darstellung zum Modellaufbau und zur Diskretisierung im Teilmodell Haldendurchströmung

Im vorliegenden Fall wurde die Halde in Strömungsrichtung jeweils in 10 Zellen, jede mit der Länge von 1/10 der Strömungsbahn unterteilt.

### 9.2.3 Modellkonzept und räumliche Diskretisierung Kaltluftabfluss und Radontransport

Auch der Kaltluftabstrom wird diskretisiert und in einzelne Zellen unterteilt. Diese sind konvektiv und diffusiv/dispersiv miteinander gekoppelt. Das Geschwindigkeitsprofil wird über einzelne Schichten abgebildet, die jeweils durch eine eigene Geschwindigkeit entsprechend ihrer Höhe und damit einen entsprechenden Volumenstrom charakterisiert sind. Die Mächtigkeit des Kaltluftprofils wird dabei in jedem Zeitschritt neu berechnet.

Das Radon tritt am Haldenfuß (und im Winterhalbjahr analog am Haldenplateau) in die Kaltluftschicht von unten ein und gelangt entlang des Abstrompfades durch turbulente Diffusion in immer höhere Luftschichten der Kaltluftschicht. Während am Haldenfuß das Radon vor allem in den bodennahen Schichten konzentriert ist, verteilt es sich entlang des Transportweges immer mehr auf die gesamte Kaltluftschicht.

## Singuläre Radonfreisetzungen

An der oberen Grenzschicht der Kaltluft zur (ruhend angenommenen) Atmosphäre findet der Austausch ebenfalls über Diffusion und turbulente Dispersion statt.

Die turbulente Diffusion wird dabei vereinfachend über einen Vorfaktor der molekularen Diffusion beschrieben.

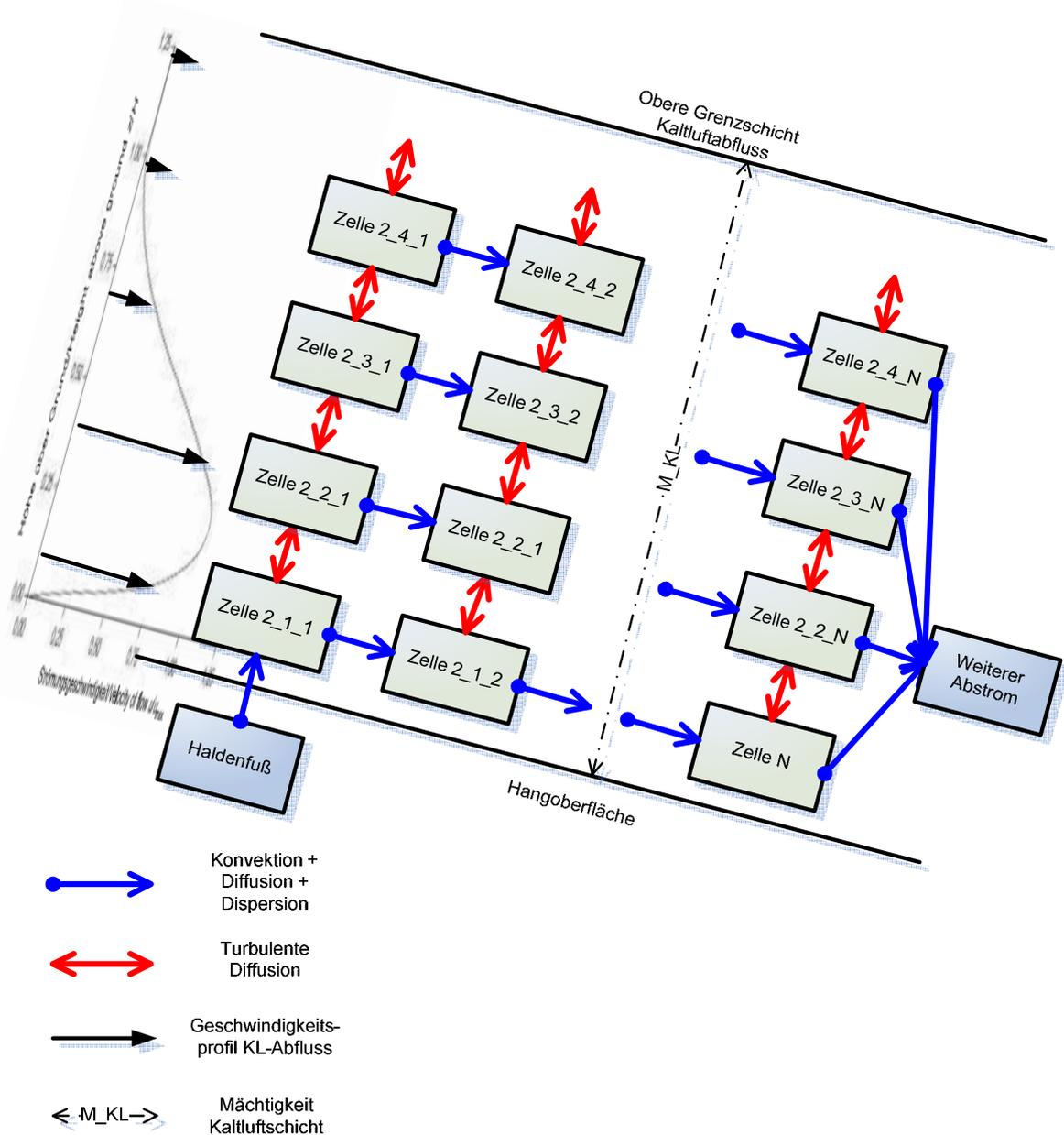


Abbildung 41: Schematische Darstellung zum Modellaufbau und zur Diskretisierung im Teilmodell Kaltluftabfluss

Der Abstrombereich wurde in Strömungsrichtung und senkrecht dazu in jeweils 5 Zellen unterteilt.

### 9.3 Generische Beispielrechnungen Haldendurchströmung

#### 9.3.1 Haldendurchströmung Beispiel 1: Angenommene Stufenfunktion für die Außentemperatur

Um die Wirkungsweise der in Abschnitt 9.1 dargestellten Prozesse und Ansätze zu demonstrieren, sollen zunächst Beispielrechnungen unter vereinfachten, d. h. generischen klimatischen Randbedingungen durchgeführt werden. Dadurch soll ein besseres Verständnis zum Wechselspiel der einzelnen Prozesse untereinander erreicht werden.

In einem ersten Schritt wird die Durchströmung des Haldenkörpers betrachtet. Dazu werden vereinfachende Annahmen zur Außentemperatur als maßgeblicher Randbedingung getroffen.

In Beispiel 1 wird ein stufenförmiger Außentemperaturverlauf über einen Zeitraum von 120 Tagen angenommen:

$$T_a(t) = \begin{cases} 8^\circ\text{C} & \text{für } 0 \text{ d} \leq t < 30 \text{ d} \\ 0^\circ\text{C} & \text{für } 30 \text{ d} \leq t < 60 \text{ d} \\ 16^\circ\text{C} & \text{für } 60 \text{ d} \leq t < 90 \text{ d} \\ 8^\circ\text{C} & \text{für } 90 \text{ d} \leq t < 120 \text{ d} \end{cases}$$

Für die weiteren Parameter werden die folgenden Annahmen getroffen:

Haldenparameter:

$T_i = 8^\circ\text{C}$	Haldeninnentemperatur
$d_s = 20 \text{ mm}$	Korndurchmesser für die gut durchströmten Bereiche
$H_H = 20 \text{ m}$	Höhe der Halde
$\alpha = 17^\circ$	Haldenschüttwinkel (entspricht ca. 30 % Gefälle)
$A_{Ra} = 800 \text{ Bq/kg}$	Radiumaktivität des Haldenmaterials
$E = 0,3$	mittlerer Emanationskoeffizient
$M_{Austritt} = 1 \text{ m}$	Mächtigkeit des Strömungskanals in der Halde
$T_{or} = 0.5$	Tortuosität des Haldenmaterials
$\epsilon_p = 0.3$	Porosität des Haldenmaterials
$\rho_{d} = 2.500 \text{ kg/m}^3$	Trockendichte des Haldenmaterials
$B = 1 \text{ m}$	Breite der Halde (für die Berechnung nicht relevant)

## Singuläre Radonfreisetzungen

In Abbildung 42 ist die zeitliche Entwicklung der mittleren Durchströmungsgeschwindigkeit gemeinsam mit der Temperatur dargestellt.

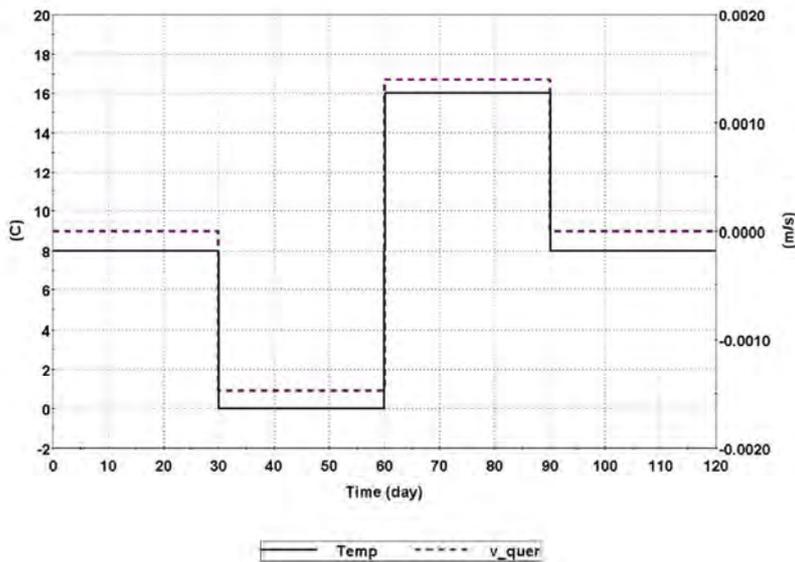


Abbildung 42: Generischer Zeitverlauf der Außentemperatur über 4 Monate und die daraus resultierende mittlere Durchströmungsgeschwindigkeit  $\bar{v}$  (in der Abbildung mit  $v_{\text{quer}}$  bezeichnet) der Halde.

Bei dieser Durchströmungsgeschwindigkeit handelt es sich um die mittlere Volumenstromgeschwindigkeit, d. h.

$$(F 35) \quad \bar{v} = Q / A$$

mit  $Q$  als der Strömungsrate und  $A$  der durchströmten Fläche. Positives Vorzeichen von  $\bar{v}$  bedeutet Luftaustritt am Haldenfuß, negatives Vorzeichen Austritt am Plateau.

Mit dieser Strömungsgeschwindigkeit ergibt sich folgender Verlauf der Radonkonzentration im Haldeninneren. Diese wurde im Modell für insgesamt 10 äquidistante Beobachtungspunkte entlang des Strömungspfades in der Halde berechnet. Für die angenommenen Parameter beträgt ihr Abstand ca. 7 m und der erste Punkt befindet sich ca. 3,5 m vom Haldenplateau entfernt. Der 10te Punkt ca. 3,5 m vom Haldenfuß. Zusätzlich wurde die Aktivitätskonzentration noch für Beobachtungspunkte im Porenraum, welcher diffusiv an den durchströmten Bereich angekoppelt ist, dargestellt. Zu Beginn der Simulation sind sämtliche Aktivitätskonzentrationen  $0 \text{ Bq/m}^3$ .

## Singuläre Radonfreisetzungen

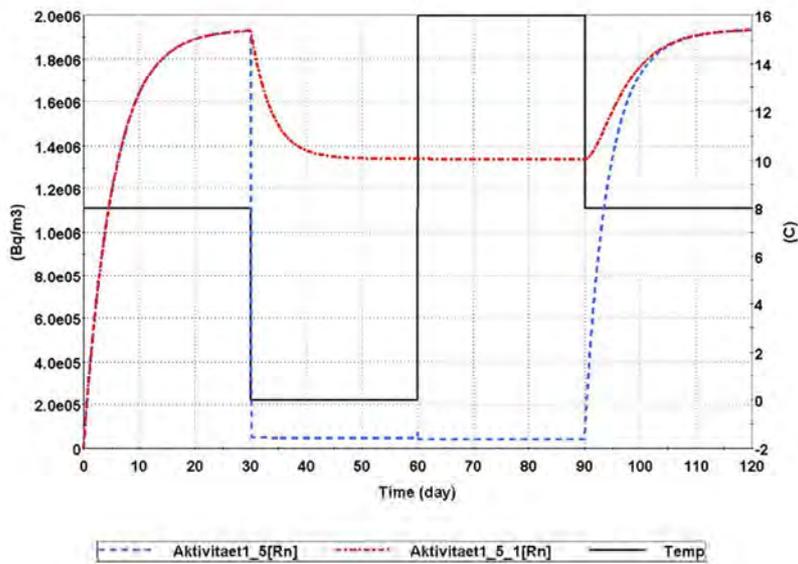


Abbildung 43: Zeitliche Entwicklung der Außentemperatur und der Radonaktivitätskonzentration im durchströmten Bereich (Aktivität1\_5[Rn]) und im diffusiv angekoppelten Bereich (Aktivität1\_5\_1[Rn]). Der Beobachtungspunkt befindet sich etwa in der Mitte der Strömungsbahn.

Anhand von Abbildung 43 können die folgenden Feststellungen getroffen werden:

- Ohne Durchströmung stellt sich ein Konzentrationsgleichgewicht nach ca. 30 d ein.
- Sobald eine Durchströmung einsetzt, sinkt unter den getroffenen Annahmen die Aktivitätskonzentration im durchströmten Bereich signifikant ab.
- Erwartungsgemäß ist es für die Aktivitätskonzentration im Zentrum der Halde bei gleichem Betrag der Strömungsgeschwindigkeit (gleicher Betrag der Temperaturdifferenz außen - innen) unerheblich, in welcher Richtung die Halde durchströmt wird.

Nachfolgend sind in Abbildung 44 die Aktivitätskonzentrationen für die Beobachtungspunkte im durchströmten Bereich in der Nähe des Plateaus (Punkt 1\_1) und in der Nähe des Haldenfußes (Punkt 1\_10) dargestellt.

Zur besseren Veranschaulichung wird der gleiche Sachverhalt nochmals in logarithmischer Achsenteilung dargestellt (Abbildung 45).

## Singuläre Radonfreisetzungen

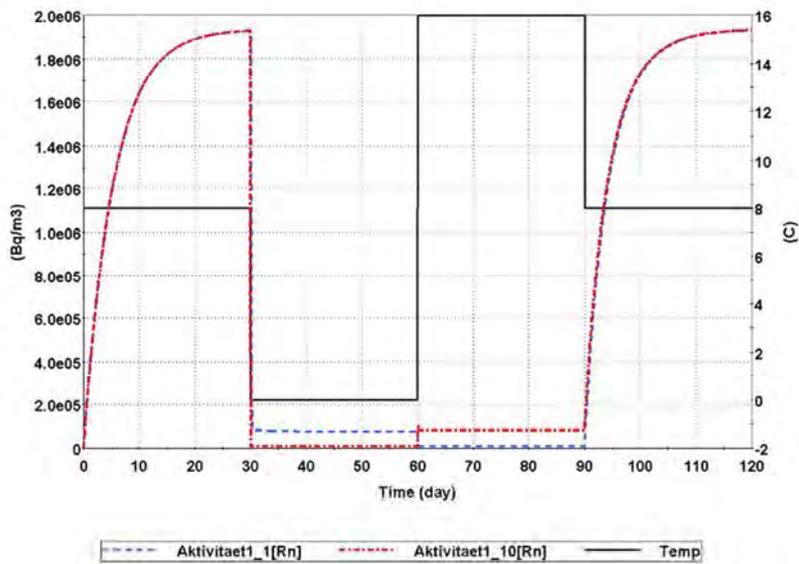


Abbildung 44: Zeitliche Entwicklung der Außentemperatur und der Radonaktivitätskonzentration im durchströmten Bereich in der Nähe des Haldenplateaus (Aktivität1\_1[Rn]) und in der Nähe des Haldenfußes (Aktivität1\_10[Rn])

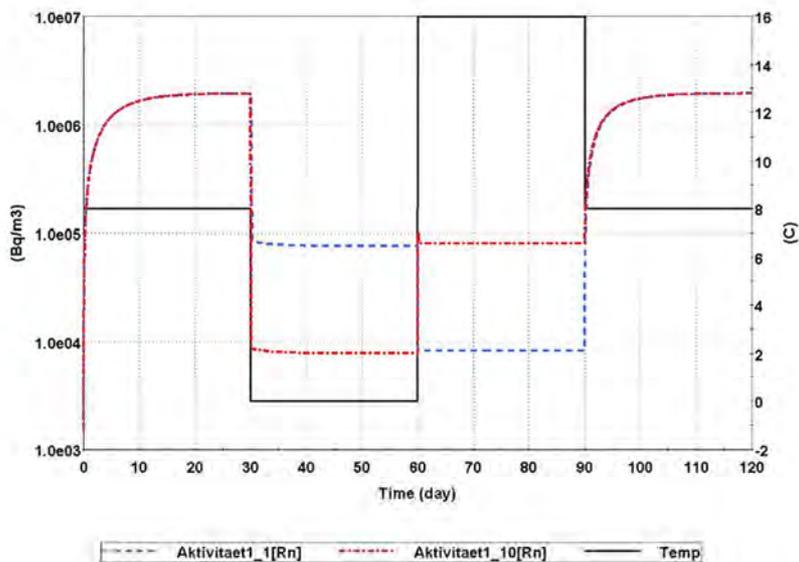


Abbildung 45: Zeitliche Entwicklung der Außentemperatur und der Radonaktivitätskonzentration im durchströmten Bereich in der Nähe des Haldenplateaus (Aktivität1\_1[Rn]) und in der Nähe des Haldenfußes (Aktivität1\_10[Rn]) in logarithmischer Darstellung

Für die Austrittsflächen im Bereich des Plateaus und des Haldenfußes können aus dem Produkt von Radonaktivitätskonzentration und Austrittsfläche die Exhalationsraten berechnet werden. Diese sind in Abhängigkeit von der Zeit in Abbildung 46 dargestellt.

## Singuläre Radonfreisetzungen

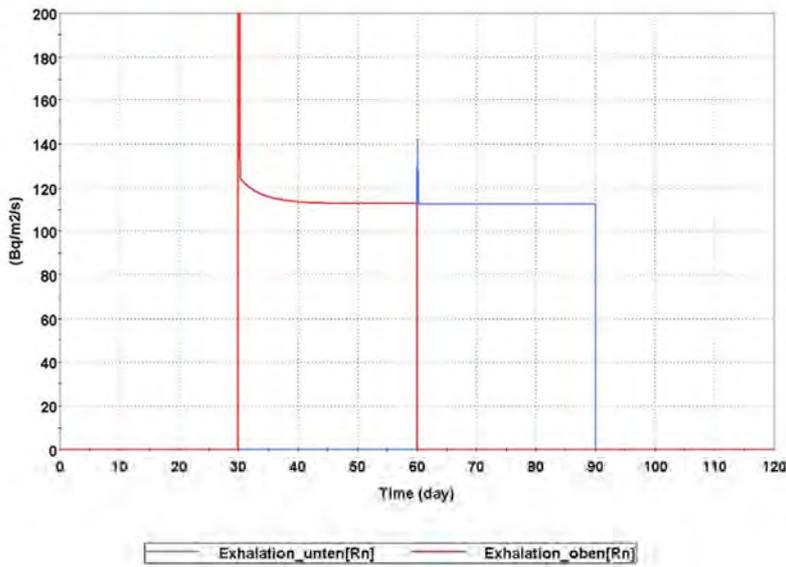


Abbildung 46: Radonexhalationsrate für die Austrittsflächen auf dem Haldenplateau und am Haldenfuß in Abhängigkeit von der Zeit unter den getroffenen generischen Annahmen

An der Exhalationsrate wird deutlich, dass eine erhöhte Exhalation zu solchen Zeitpunkten zu erwarten ist, wenn vorher keine Durchströmung stattgefunden hat und sich im Haldeninneren eine hohe Aktivitätskonzentration aufbauen konnte.

Bereits an diesem einfachen Beispiel kann abgeleitet werden, dass unter der Annahme guter Durchströmungsbedingungen die aktuell austretende Radonaktivitätskonzentration in hohem Maße von der Vorgeschichte der Durchströmung der letzten Tage abhängig ist. In einem weiteren generischen Beispiel soll dieser Aspekt weiter beleuchtet werden. Dieser Aspekt ist bei schlechterer Durchströmung nicht zu erwarten. Je schlechter die Durchströmung, d. h. die Permeabilität ist, desto länger dauert die Passage der Luft durch die Halde und desto eher kann sich ein quasistationäres Gleichgewicht einstellen.

### 9.3.2 Haldendurchströmung Beispiel 2: Jahrgang der Außentemperatur als Sinusfunktion

Für den Jahrgang der Temperatur wird beispielhaft die folgende Funktion für die Außentemperatur als maßgeblicher Randbedingung verwendet:

$$T_a(t) = 8^\circ\text{C} + 20\text{K} * \sin(2\pi * t / 365\text{d} + \pi / 2)$$

Für die weiteren Parameter werden die gleichen Annahmen wie für Beispiel 1 getroffen.

Daraus ergibt sich der in Abbildung 47 dargestellte Jahrgang der mittleren Durchströmungsgeschwindigkeit  $\bar{v}$ , der zusammen mit dem Zeitverlauf der Außentemperatur dargestellt ist.

## Singuläre Radonfreisetzungen

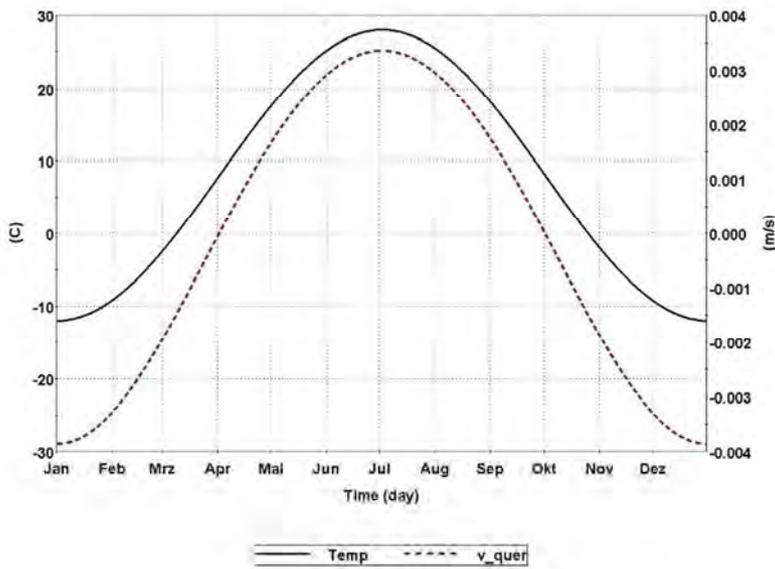


Abbildung 47: Generischer Zeitverlauf der Außentemperatur in Form einer Sinusfunktion über ein Jahr und die daraus resultierende mittlere Durchströmungsgeschwindigkeit  $v$  (in der Abbildung mit  $v_{\text{quer}}$  bezeichnet) der Halde

Analog zum Beispiel 1 können auch für das generische Beispiel 2 die Radonaktivitätskonzentrationen an Beobachtungspunkten im Innern der Halde und in den Bereichen nahe dem Plateau und nahe dem Haldenfuß berechnet werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 48 bis Abbildung 51 dargestellt.

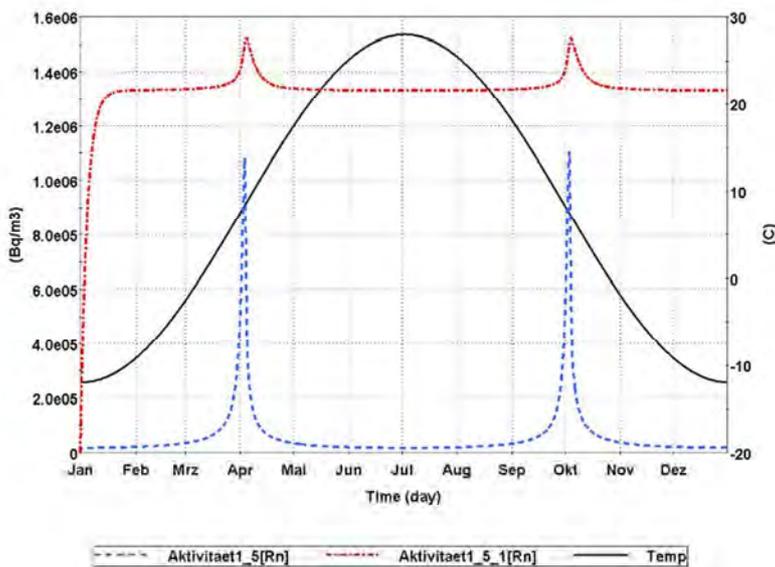


Abbildung 48: Zeitliche Entwicklung der Außentemperatur und der Radonaktivitätskonzentration im durchströmten Bereich (Aktivität1\_5[Rn]) und im diffusiv angekoppelten Bereich (Aktivität1\_5\_1[Rn]) für Beispiel 2. Der Beobachtungspunkt befindet sich etwa in der Mitte der Strömungsbahn

## Singuläre Radonfreisetzungen

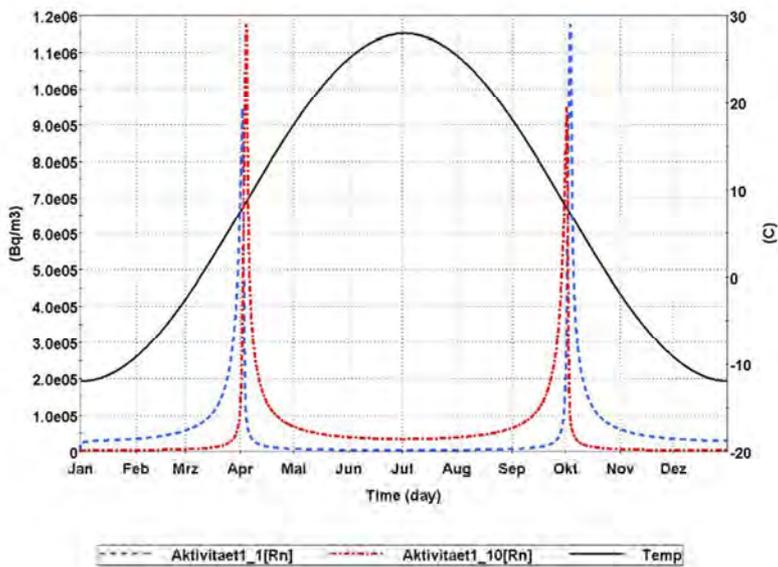


Abbildung 49: Zeitliche Entwicklung der Außentemperatur und der Radonaktivitätskonzentration im durchströmten Bereich in der Nähe des Haldenplateaus (Aktivität1\_1[Rn]) und in der Nähe des Haldenfußes (Aktivität1\_10[Rn]) für die Annahmen entsprechend Beispiel 2

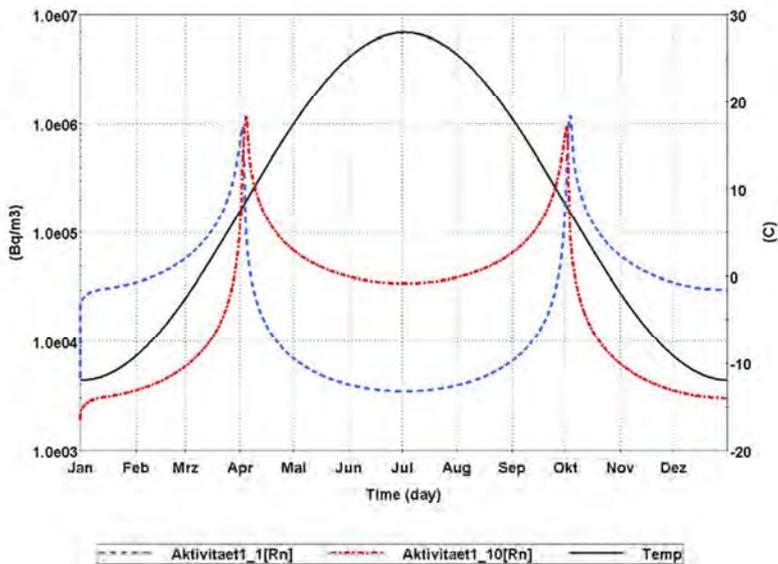


Abbildung 50: Zeitliche Entwicklung der Außentemperatur und der Radonaktivitätskonzentration im durchströmten Bereich in der Nähe des Haldenplateaus (Aktivität1\_1[Rn]) und in der Nähe des Haldenfußes (Aktivität1\_10[Rn]) in logarithmischer Darstellung für die Annahmen entsprechend Beispiel 2

## Singuläre Radonfreisetzungen

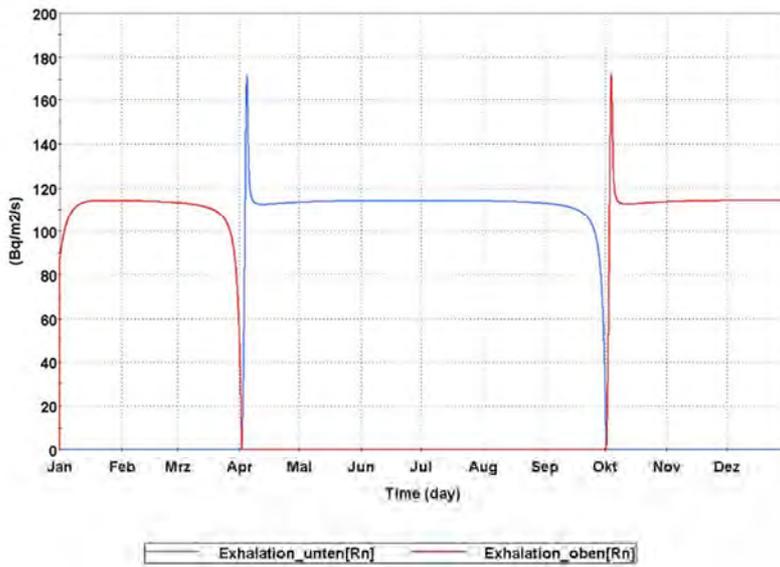


Abbildung 51: Radonexhalationsrate für die Austrittsflächen auf dem Haldenplateau und am Haldenfuß in Abhängigkeit von der Zeit unter den getroffenen generischen Annahmen für Beispiel 2

Auf der Grundlage dieser Rechenergebnisse können die folgenden Feststellungen getroffen werden:

- Es wird sehr deutlich, dass jeweils in dem Bereich, in dem (in Abhängigkeit von der Zeit) die Außenluft eintritt, die Aktivitätskonzentrationen deutlich, d. h. um ca. eine Größenordnung gegenüber dem Austrittsbereich, abgesenkt sind (Abbildung 49 bzw. Abbildung 50).
- Zwischen der Durchströmungsgeschwindigkeit und der Konzentration im Inneren der Halde (in durchströmten Bereichen) besteht ein nichtlinearer Zusammenhang, der insbesondere auch von der jeweiligen Vorgeschichte abhängig ist. So kommt es bei dem Beispiel in den Monaten April und Oktober, in denen Außen- und Innentemperatur vergleichbar sind, zu einem enormen Anstieg der Aktivitätskonzentration in den durchströmten Bereichen im Inneren der Halde (Abbildung 48).
- Unter den getroffenen Annahmen ist trotz der zeitlich variablen mittleren Haldendurchströmungsgeschwindigkeiten und der resultierenden Abhängigkeiten der Konzentration die Exhalationsrate nahezu konstant. Dieser Sachverhalt wurde für eine idealisierte Halde bereits in [33] vorhergesagt und kann hier bestätigt werden.

Aus dem letztgenannten Sachverhalt kann nun folgende Schlussfolgerung abgeleitet werden: Wenn die Exhalationsrate in weiten Grenzen nur sehr geringfügig von der Temperatur, also von der Durchströmungsgeschwindigkeit abhängig ist, so sollte sie auch in weiten Grenzen von der Permeabilität unabhängig sein, da diese die Durchströmungsgeschwindigkeit ebenso wie der Temperaturunterschied beeinflusst. Um diese Schlussfolgerung zu prüfen, wurde eine weitere Berechnung mit den Parametern entsprechend Beispiel 2, jedoch mit Ausnahme der Korngröße, durchgeführt. Die Ergebnisse werden im nächsten Abschnitt dargestellt.

### 9.3.3 Haldendurchströmung Beispiel 3: Jahresgang der Außentemperatur als Sinusfunktion, reduzierte Haldenpermeabilität

Wie im letzten Abschnitt erläutert, soll dieses Beispiel lediglich dazu dienen, die Sensitivität der Exhalationsrate gegenüber der Permeabilität zu prüfen. Für den Jahresgang der Temperatur wird wieder beispielhaft die bereits in Beispiel 2 verwendete Funktion für die Außentemperatur als maßgeblicher Randbedingung verwendet:

$$T_a(t) = 8^\circ\text{C} + 20\text{K} * \sin(2\pi * t / 365\text{d} + \pi/2)$$

Für die weiteren Parameter werden mit Ausnahme des mittleren Korndurchmessers  $d_s$  die gleichen Annahmen wie für Beispiel 1 getroffen. Jetzt wird  $d_s = 10$  mm gesetzt. Dies entspricht einer Halbierung des Korndurchmessers und damit einer Reduzierung der Permeabilität auf  $\frac{1}{4}$ . Dies wird auch an der mittleren Durchströmungsgeschwindigkeit entsprechend Abbildung 52 im Vergleich zu Abbildung 47 deutlich. Diese hat sich ebenfalls auf  $\frac{1}{4}$  reduziert.

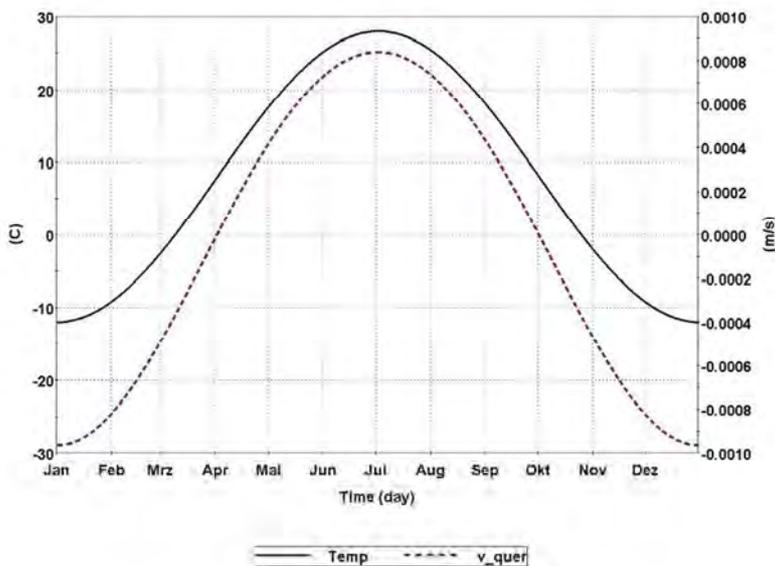


Abbildung 52: Generischer Zeitverlauf der Außentemperatur in Form einer Sinusfunktion über ein Jahr und die daraus resultierende mittlere Durchströmungsgeschwindigkeit  $\bar{v}$  (in der Abbildung mit  $v\_quer$  bezeichnet) der Halde mit einer im Vergleich zu Beispiel 2 auf  $\frac{1}{4}$  reduzierten Permeabilität

Beispielhaft soll hier lediglich noch der Zeitverlauf der Radonaktivitätskonzentrationen an Beobachtungspunkten in den Bereichen nahe dem Plateau und nahe dem Haldenfuß gezeigt werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 53 in logarithmischer Form dargestellt. Auf die weiteren Darstellungen von Aktivitätskonzentrationen wurde verzichtet.

## Singuläre Radonfreisetzungen

Die resultierende Exhalationsrate ist in ihrem zeitlichen Verlauf in Abbildung 54 dargestellt. Durch Vergleich dieser Abbildung mit Abbildung 51 wird die Vermutung, dass die Exhalationsrate nur geringfügig von der Permeabilität abhängig ist, bestätigt.

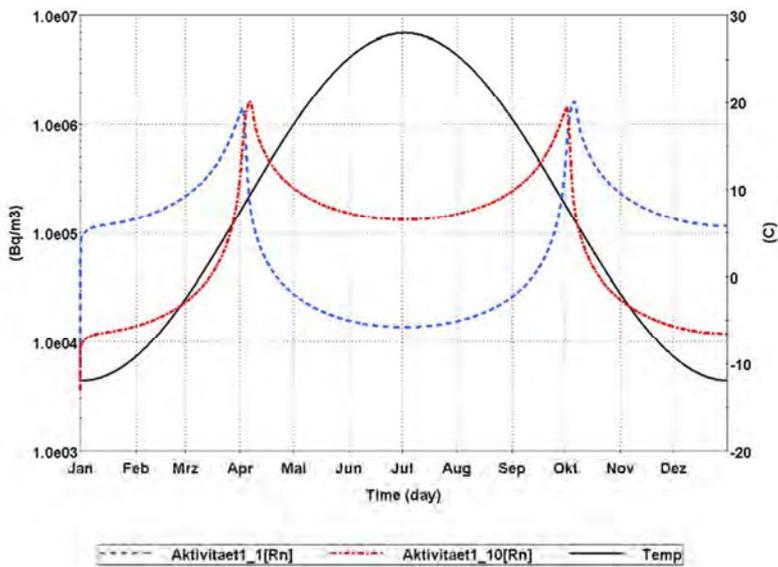


Abbildung 53: Zeitliche Entwicklung der Außentemperatur und der Radonaktivitätskonzentration im durchströmten Bereich in der Nähe des Haldenplateaus (Aktivität1\_1[Rn]) und in der Nähe des Haldenfußes (Aktivität1\_10[Rn]) in logarithmischer Darstellung für die Annahmen entsprechend Beispiel 3

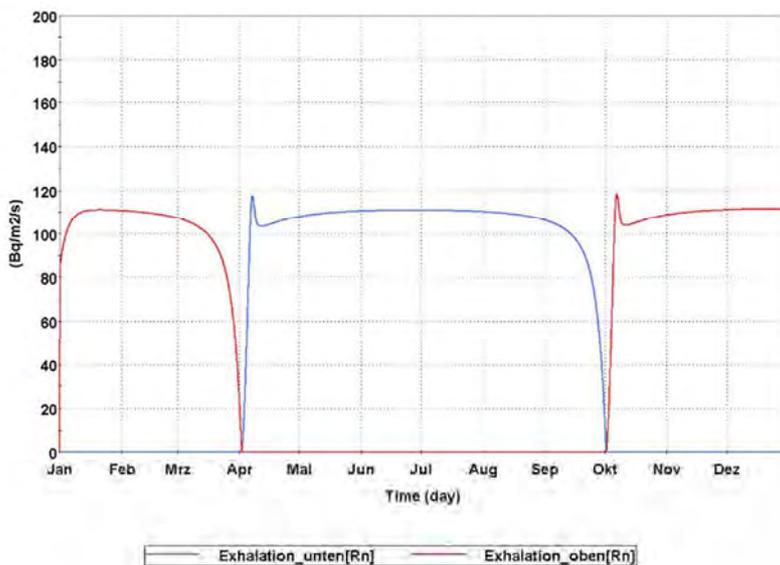


Abbildung 54: Radonexhalationsrate für die Austrittsflächen auf dem Haldenplateau und am Haldenfuß in Abhängigkeit von der Zeit unter den getroffenen generischen Annahmen für Beispiel 3

Um den Bereich der mittleren Korngröße bzw. der resultierenden Permeabilität zu identifizieren wird im nächsten Abschnitt ein weiteres generisches Beispiel gerechnet.

### 9.3.4 Haldendurchströmung Beispiel 4: Zusammenhang Permeabilität - Exhalationsrate

Durch die vorangegangenen Beispiele wurde deutlich, dass die Exhalationsrate in bestimmten Bereichen kaum von der Permeabilität bzw. dem mittleren Korndurchmesser der durchströmten Bereiche abhängig ist. Um dies noch deutlicher zu machen, wird bei jeweils stationären klimatischen Bedingungen der Korndurchmesser und somit die Permeabilität variiert und die sich einstellende stationäre Exhalationsrate bestimmt. Dadurch soll der Bereich des Korndurchmessers bzw. der Permeabilität identifiziert werden, in dem die Exhalationsrate kaum von diesen Größen abhängig ist.

Für die Simulation werden die Parameter entsprechend Beispiel 1 verwendet, allerdings mit folgenden Ausnahmen:

- $T_a(t) = 20^\circ\text{C}$  (konstante Außentemperatur)
- $ds$  - Variation von 1 mm bis 49 mm in Schritten von 1 mm

Unter den getroffenen Annahmen resultiert die folgende Abhängigkeit der Permeabilität und der Durchströmungsgeschwindigkeit vom Korndurchmesser.

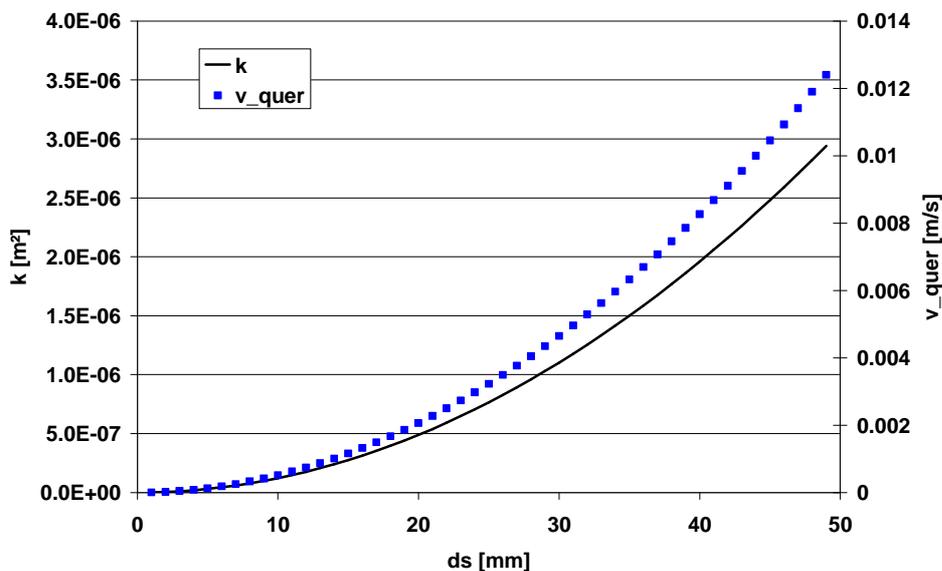


Abbildung 55: Variation des Korndurchmessers und der daraus resultierenden Permeabilität und der sich einstellenden mittleren Durchströmungsgeschwindigkeit

Unter den getroffenen Annahmen resultiert nunmehr folgende Konzentrationsentwicklung für die Beobachtungspunkte im Bereich des Plateaus bzw. des Haldenfußes.

## Singuläre Radonfreisetzungen

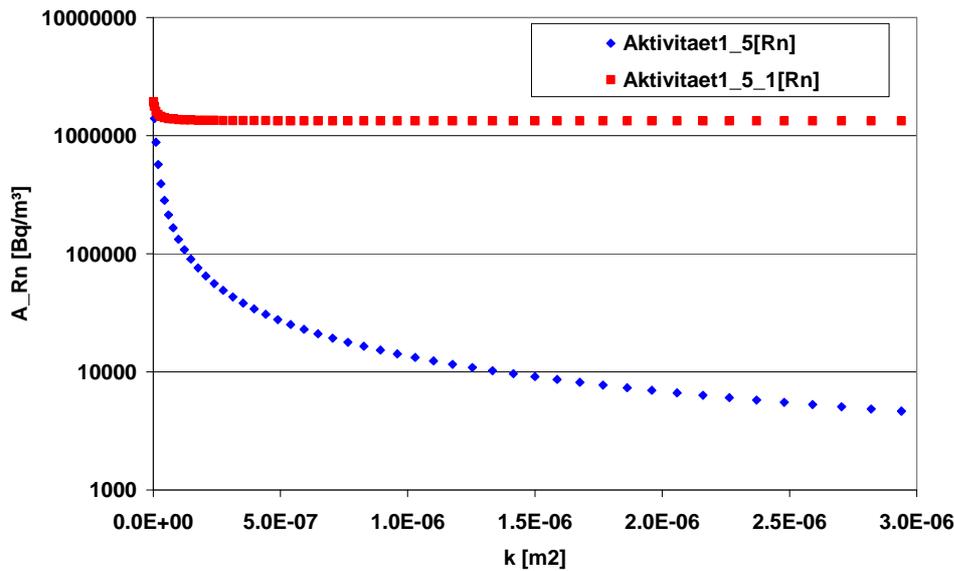


Abbildung 56: Abhängigkeit der Radonaktivitätskonzentration im durchströmten Bereich (Aktivität1\_5[Rn]) und im diffusiv angekoppelten Bereich (Aktivität1\_5\_1[Rn]) für Beispiel 4 in Abhängigkeit von der Permeabilität. Der Beobachtungspunkt befindet sich etwa in der Mitte der Strömungsbahn

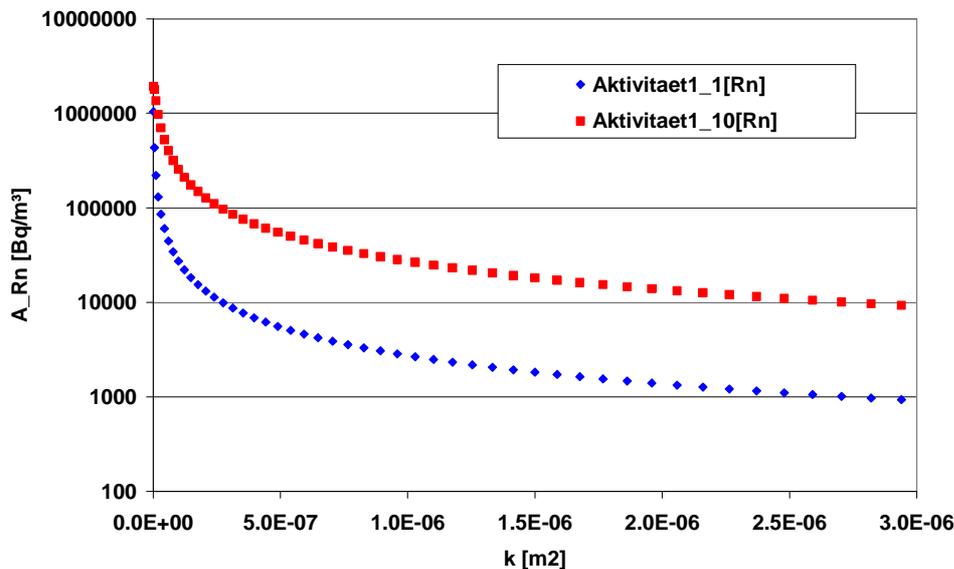


Abbildung 57: Abhängigkeit der Radonaktivitätskonzentration im durchströmten Bereich in der Nähe des Haldenplateaus (Aktivität1\_1[Rn]) und des Haldenfußes (Aktivität1\_10[Rn]) in logarithmischer Darstellung für die Annahmen entsprechend Beispiel 4

## Singuläre Radonfreisetzungen

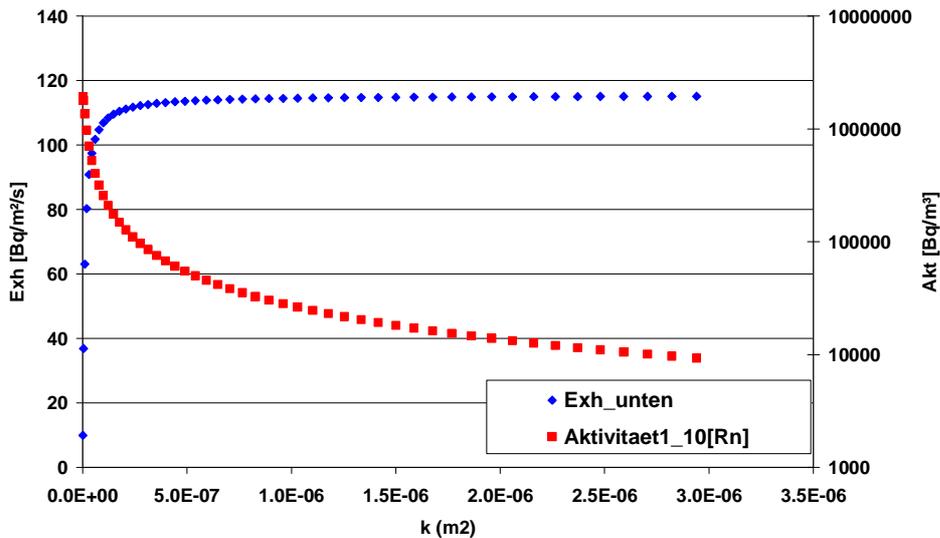


Abbildung 58: Radonexhalationsrate für die Austrittsfläche am Haldenfuß und Radonaktivitätskonzentration innerhalb der Halde in der Nähe des Haldenfußes jeweils in Abhängigkeit von der Permeabilität entsprechend der generischen Annahmen für Beispiel 4

Im Ergebnis der generischen Berechnungen von Beispiel 4 kann die Hypothese bestätigt werden, dass die konvektiv dominierte Exhalationsrate zumindest für stationäre klimatische Bedingungen (konstante Temperatur) in weiten Bereichen oberhalb eines Schwellenwertes unabhängig von der Korngröße bzw. der Permeabilität ist. Für den Zusammenhang zwischen Korndurchmesser und Permeabilität entsprechend Gleichungen (F 20) und (F 21) liegt der Schwellenwert bei ca. 5 mm. Der zugehörige Schwellenwert für die Permeabilität beträgt somit ca.  $3 \cdot 10^{-8}$  m<sup>2</sup>.

## 10 Nachmodellierung der Messkampagnen

### 10.1 Grundsätze und Annahmen

Die Nachmodellierung der Messkampagnen hat mehrere Zielstellungen.

Zunächst soll geprüft werden, ob das am realen Objekt beobachtete Verhalten mit dem Modellansatz erfasst werden kann. Dabei liegt der Schwerpunkt vor allem darauf, den qualitativen Zusammenhang zwischen Eingangsparametern und den Messergebnissen nachzuvollziehen. Besondere Bedeutung kommt dabei den zeitlich veränderlichen klimatischen Randbedingungen zu.

Weiterhin sollen solche Parameter, die einer repräsentativen Messung nicht zugänglich sind, durch Vergleich der Modellergebnisse mit den Messwerten iterativ angepasst werden.

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

Für die Modellierung der Messkampagnen erfolgt eine schrittweise Vorgehensweise. In einem ersten Schritt werden alle diejenigen Modellparameter belegt, die einer Messung direkt zugänglich waren bzw. die direkt bestimmt worden sind. Dabei handelt es sich um folgende Parameter:

- gemessene Klimadaten während der Messkampagne
- geometrische und topografische Parameter des Standortes bzw. der Halde

Hierbei sei nochmals darauf hingewiesen, dass bestimmte Parameter nicht belastbar messtechnisch bestimmt werden können. Hierzu werden plausible Annahmen getroffen. Bspw. handelt es sich um die Höhe des durchströmten Bereiches innerhalb der Halde bzw. die Höhe der Austrittsfläche.

Danach werden diejenigen Parameter belegt, die durch Plausibilitätsüberlegungen zugänglich sind bzw. die aufgrund der geringen Sensitivität abgeschätzt werden können. Dabei handelt es sich um:

- mittleren Korndurchmesser (wie oben gezeigt, ist er nicht sehr sensitiv), hier wird für alle weiteren Betrachtungen ein Wert von 20 mm verwendet.

Im Anschluss daran erfolgt eine Nachmodellierung der Messkampagnen zur Anpassung der restlichen Parameter. Die folgenden Parameter werden in diesem Sinne als Kalibrierparameter betrachtet:

- Repräsentative Radiumaktivität im Bereich der durchströmten Haldenbereiche
- Parameter der turbulenten Diffusion innerhalb des Kaltluftabflusses

Zuerst werden die Messwerte am Haldenfuß bzw. in der Anreicherungsbox dazu verwendet, die Radiumaktivität zu bestimmen. Im Anschluss daran werden die Messwerte im Abstrom verwendet, um die Parameter der turbulenten Diffusion innerhalb des Kaltluftabflusses zu bestimmen.

Anhand der generischen Beispiele (Abschnitt 9.3) wurde deutlich, dass die Konzentration in den unterschiedlichen Bereichen der Halde in hohem Maße von der Durchströmung im Zeitraum von ca. einer Woche vorher abhängig ist. Deshalb muss für die Nachrechnung der Messkampagnen jeweils ein entsprechender Zeitraum davor modelliert werden. Aus Gründen der Praktikabilität wurden sämtliche Rechnungen jeweils für das gesamte Jahr 2009 durchgeführt. Die Ergebnisse werden jedoch meist nur für den Zeitraum der Messkampagne dargestellt.

## **10.2 Messkampagne Dammhalde Trockenbecken August 2009**

### **10.2.1 Standortparameter**

Nachfolgend werden die für die Simulation verwendeten Parameter angegeben. Für die Simulation wurden teilweise entsprechende Spannbreiten berücksichtigt. Diese sind jeweils in Form von Verteilungsfunktionen gegeben. Die Form der Verteilungsfunktion wird durch die Abkürzungen  $U\{\text{Min}; \text{Max}\}$  – Gleichverteilung{Minimalwert; Maximalwert} bzw.  $N\{\text{Mean}; \text{SD}\}$  – Normalverteilung {Mittelwert; Standardabweichung} beschrieben.

Haldenparameter:

$T_i = N\{8^\circ\text{C}, 0,5\text{K}\}$	Haldeninnentemperatur (Normalverteilung)
$d_s = U\{10 \text{ mm}; 30 \text{ mm}\}$	Korndurchmesser für die gut durchströmten Bereiche (Gleichverteilung)
$H_H = 20 \text{ m}$	Höhe der Halde
$\alpha = 17^\circ$	Haldenschüttwinkel (entspricht ca. 30 % Gefälle)
$A_{\text{Ra}}$	Radiumaktivität des Haldenmaterials als Kalibrierparameter
$E = U\{0,24; 0,36\}$	mittlerer Emanationskoeffizient (Gleichverteilung)
$M_{\text{Austritt}} = 1 \text{ m}$	Mächtigkeit des Strömungskanals in der Halde
$\text{Tor} = U\{0,3; 0,6\}$	Tortuosität des Haldenmaterials (Gleichverteilung)
$\text{eps} = U\{0,25; 0,35\}$	Porosität des Haldenmaterials (Gleichverteilung)
$\rho_{\text{d}} = 2.500 \text{ kg/m}^3$	Trockendichte des Haldenmaterials
$B = 1 \text{ m}$	Breite der Halde (für die Berechnung nicht relevant)
$L_{\text{Ab}} = 100 \text{ m}$	Abstromlänge vom Haldenfuß bis zum jeweils dargestellten Messpunkt
$L_{\text{An}} = 130 \text{ m}$	Anstromlänge Kaltluftbildungsgebiet

### **10.2.2 Klimatische Randbedingungen**

In Abbildung 59 sind die Wetterbedingungen für das Jahr 2009 anhand der Daten der Wetterstation Erlabrunn-Klinik dargestellt. Abbildung 60 beinhaltet diese Daten für den Zeitabschnitt der Messkampagne am Trockenbecken. Zu beachten ist, dass die Luftdruckmessung vom 20.08. bis 24.08.2009 ausgefallen war, so dass für diesen Zeitraum keine Luftdruckdaten der Wetterstation vorliegen. Dabei wurden zum Vergleich die Temperaturen am Standort Dammhalde Trockenbecken, Haldenfuß (MP 7) einbezogen.

Die am Untersuchungsstandort gemessenen Wetterdaten wurden bereits in Abschnitt 7.1 aufgeführt.

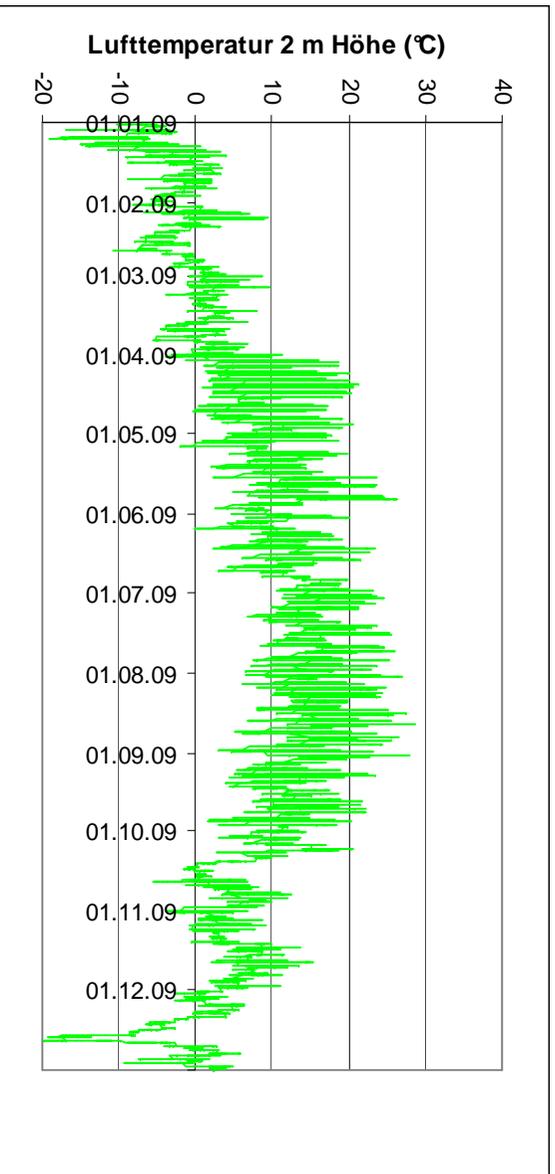
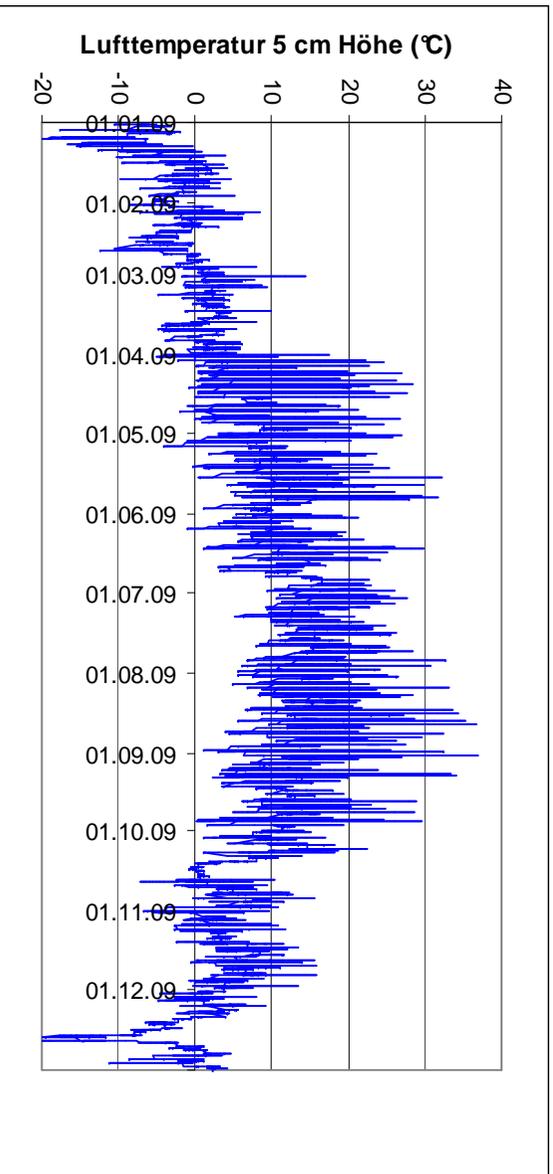
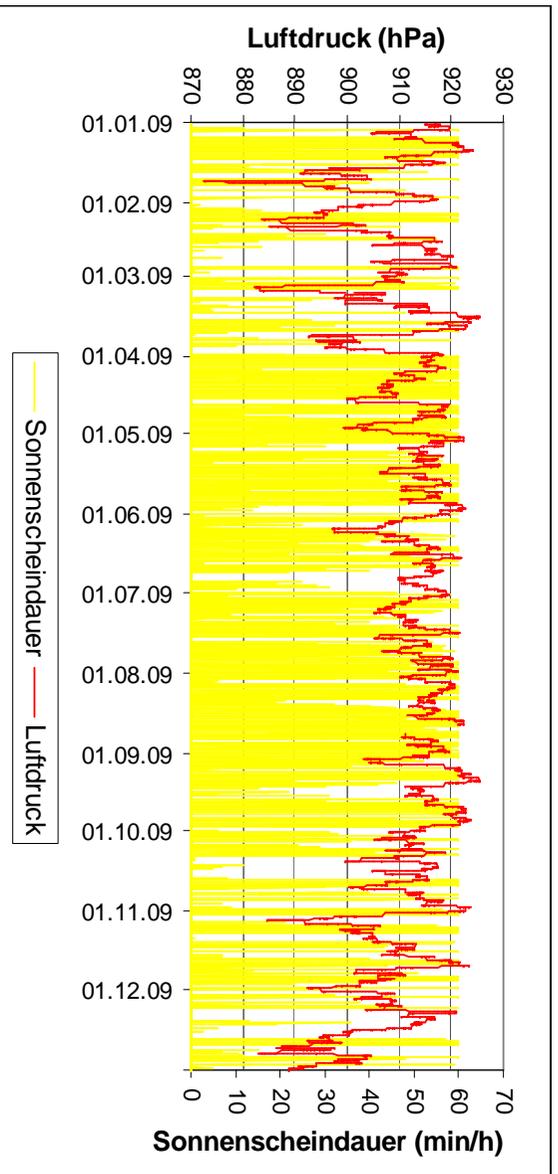


Abbildung 59: Wetterbedingungen für das Gesamtjahr 2009, Wetterstation Erlabrunn-Klinik

Singuläre  
Radonfreisetzungen

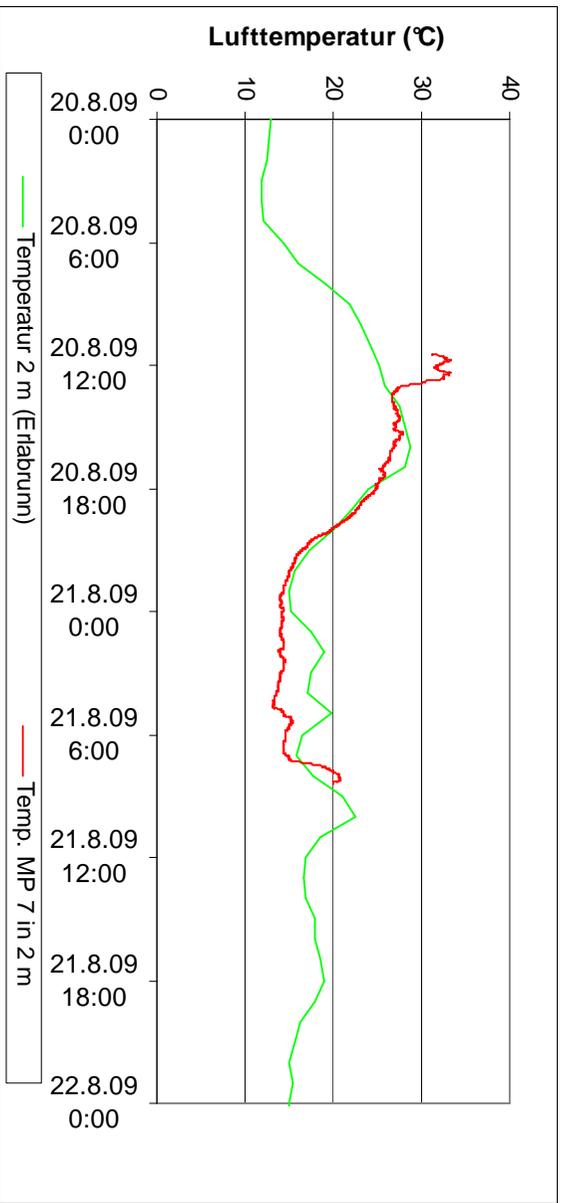
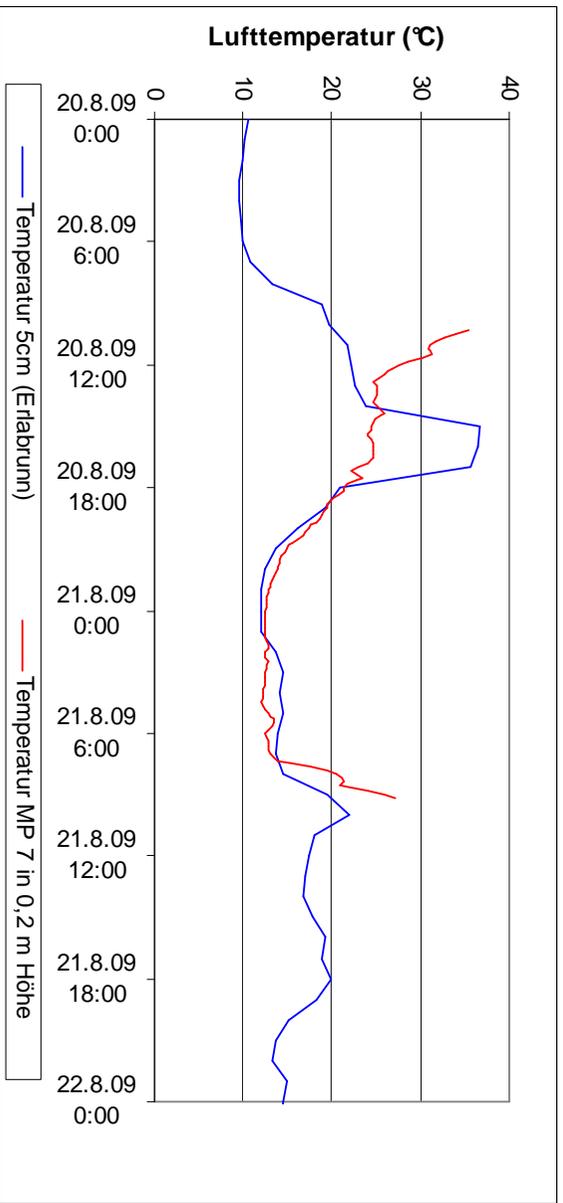
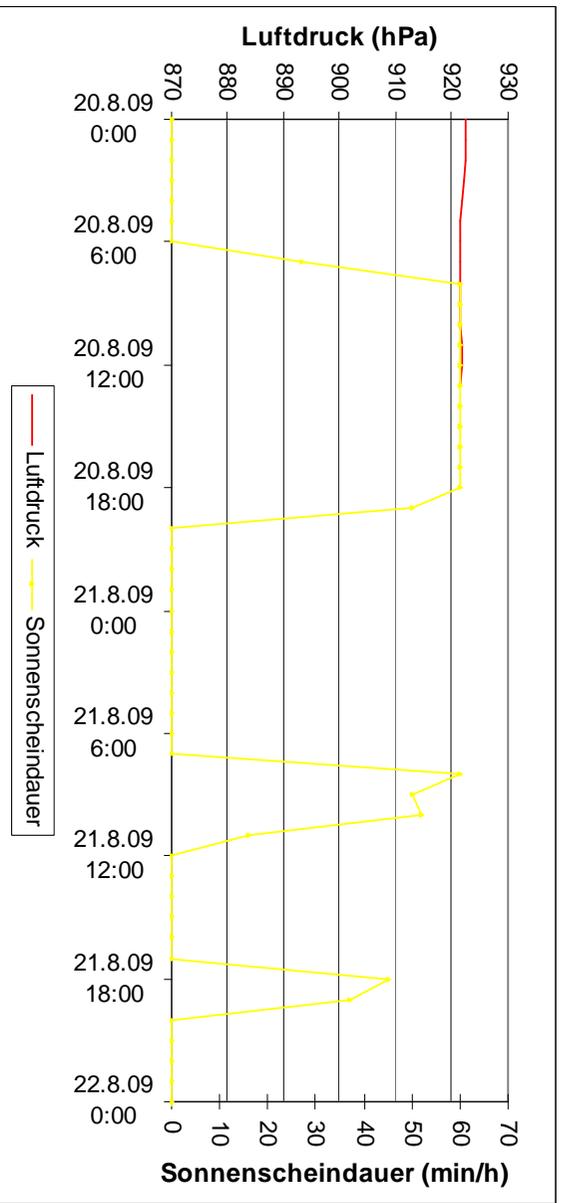


Abbildung 60: Wetterbedingungen Kampagne Trockenbecken, Wetterstation Erlabrum-Klinik

Bei den Temperaturen zeigen sich deutliche Unterschiede der Messwerte vor Ort und denen der Wetterstation. Die Temperaturen am Haldenfuß der Dammhalde Trockenbecken (MP 7) liegen meist etwas niedriger, als die in Erlabrunn. Dies ist auf die unterschiedlichen Standortbedingungen zurückzuführen. Die Sonnenscheindauer gibt Hinweise auf den Bedeckungsgrad.

### **10.2.3 Modellierung der Kampagne**

Wie beschrieben erfolgt in einem ersten Schritt die Anpassung der repräsentativen Radiumaktivität. Dabei ist zu beachten, dass der konkrete Wert von einigen der sonstigen getroffenen Annahmen beeinflusst wird. Letztlich kommt es auf die pro Zeiteinheit produzierte und in den durchströmten Bereichen verfügbare Radonmenge an. Diese wird u. a. durch folgende weitere Parameter ähnlich wie vom Radiumgehalt beeinflusst:

- Länge der Strömungsbahn
- durchströmter Querschnitt entlang der Strömungsbahn
- räumliche Verteilung des diffusiv angekoppelten Bereiches

und weiterer Parameter. Da diese allerdings mit einem verhältnismäßigen Aufwand einer direkten Messung nicht zugänglich sind, wurden für diese Parameter plausible Annahmen getroffen und der Radiumgehalt wird als Kalibrierparameter verwendet. Aus unserer Sicht ist diese Vorgehensweise alternativlos, selbst wenn es für einzelne der oben genannten Parameter gelingen könnte diese genauer zu bestimmen oder zumindest einzugrenzen.

Für die Dammhalde Trockenbecken wurden Berechnungen mit unterschiedlichen Werten für den Radiumgehalt durchgeführt. Nachfolgend sollen lediglich zu Illustrationszwecken die Ergebnisse für drei Werte dieses Parameters dargestellt werden.

Wie anhand von Abbildung 61 bis Abbildung 63 deutlich wird, ergibt sich durch diese iterative Vorgehensweise ein mittlerer Wert des Radiumgehaltes unter Berücksichtigung der sonstigen getroffenen Annahmen von 1.600 Bq/kg. Dieser Wert liegt in dem aus Messungen bekannten Bereich zwischen 69 und 310.000 Bq/kg (Mittelwert 4.745 Bq/kg) [35]. Wie in Abbildung 63 gezeigt, kann damit der zeitliche Verlauf der Radonaktivitätskonzentration am Haldenfuß qualitativ als auch quantitativ recht gut wiedergegeben werden. Dabei wurde bewusst auf eine logarithmische Darstellung verzichtet.

## Singuläre Radonfreisetzungen

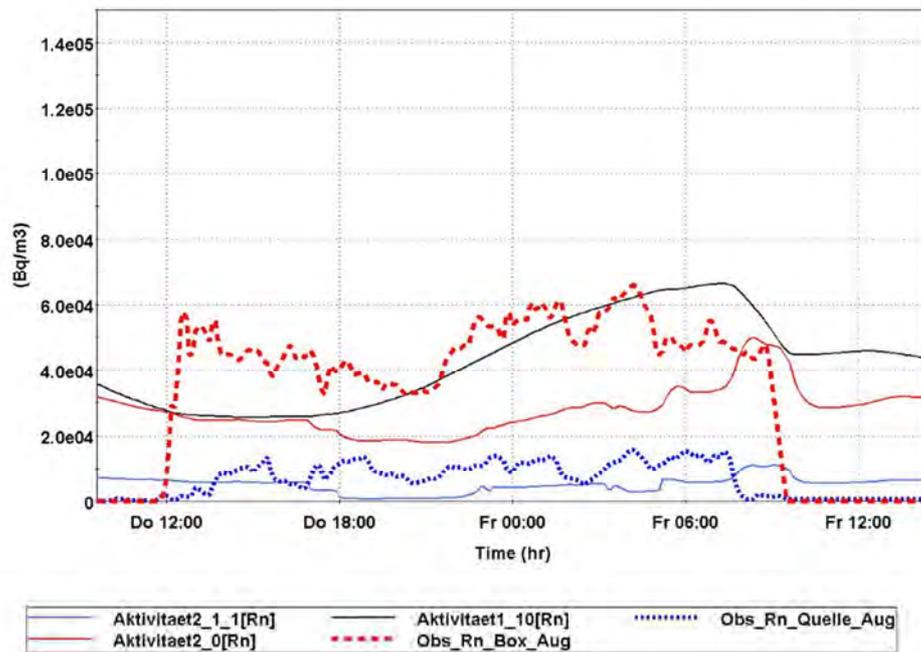


Abbildung 61: Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen für einen Radiumgehalt von 800 Bq/kg in der Anreicherungsbox (rot) und am Haldenfuß (blau) sowie innerhalb der Halde im Bereich des Ausströmpunktes (schwarz). Die gepunkteten Kurven sind die gemessenen und die durchgezogenen sind die modellierten Kurven.

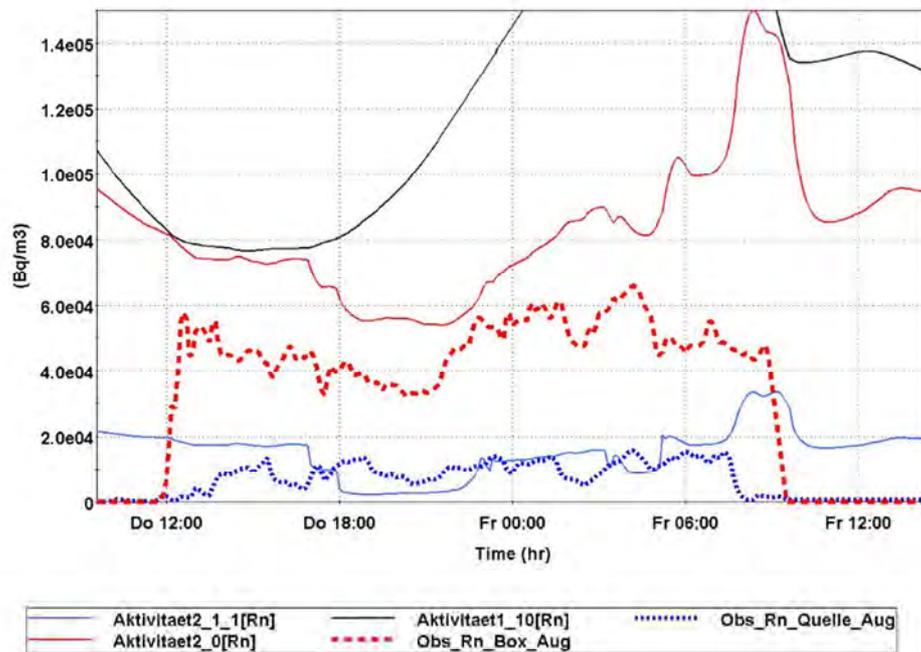


Abbildung 62: Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen für einen Radiumgehalt von 2.400 Bq/kg in der Anreicherungsbox (rot) und am Haldenfuß (blau) sowie innerhalb der Halde im Bereich des Ausströmpunktes (schwarz). Die gepunkteten Kurven sind die gemessenen und die durchgezogenen sind die modellierten Kurven.

## Singuläre Radonfreisetzungen

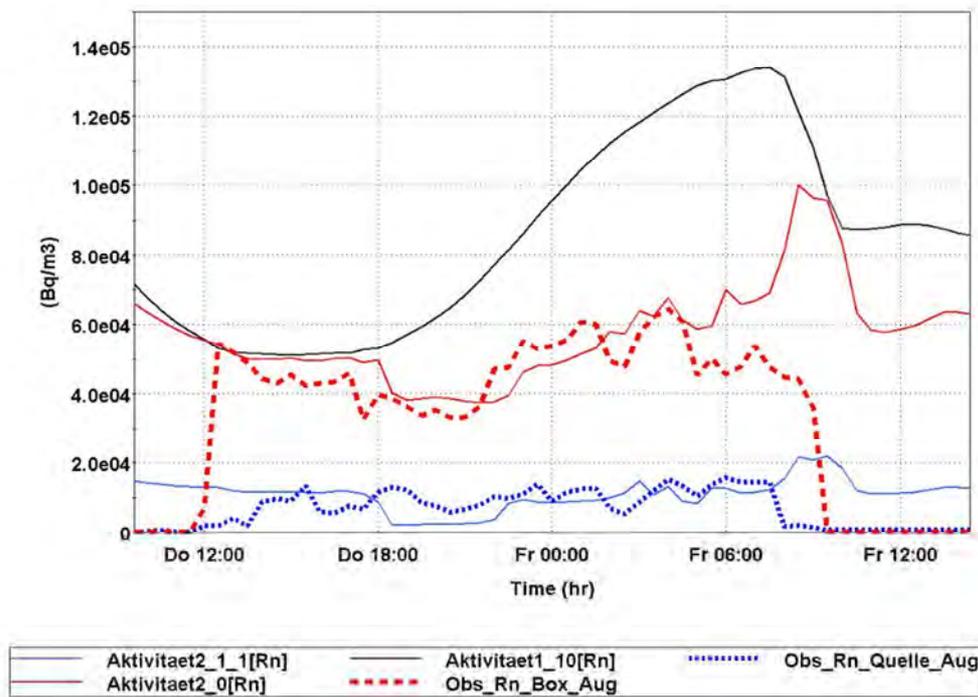


Abbildung 63: Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen für einen Radiumgehalt von 1.600 Bq/kg in der Anreicherungsbox (rot) und am Haldenfuß (blau) sowie innerhalb der Halde im Bereich des Ausströmpunktes (schwarz). Die gepunkteten Kurven sind die gemessenen und die durchgezogenen sind die modellierten Kurven.

Die für den Radiumgehalt von 1.600 Bq/kg berechneten Radonaktivitätskonzentrationen im Inneren der Halde sowie in der Nähe des Plateaus und des Haldenfußes sind in Abbildung 64 bis Abbildung 65 dargestellt.

Außerdem wurde für den Bereich der Austrittsfläche die flächenbezogene Exhalationsrate berechnet. Diese sind in Abbildung 66 für den Mittelwert und in Abbildung 67 als Bandbreite unter Berücksichtigung der dargestellten Unsicherheiten dargestellt.

Hier sei nochmals darauf hingewiesen, dass der berechnete Wert der Exhalationsrate insbesondere von der angenommenen Mächtigkeit des konvektiv durchströmten Kanals abhängig ist. Es wurde ein plausibler Wert von 1 m angenommen. Wird diese Mächtigkeit erhöht, so verringert sich der Wert der rechnerisch ermittelten Exhalationsrate umgekehrt proportional. Dagegen sind die Unsicherheiten in der rechnerisch ermittelten Gesamtexhalation (Produkt aus Exhalationsrate und Austrittsfläche) mit deutlich geringeren Unsicherheiten behaftet.

## Singuläre Radonfreisetzungen

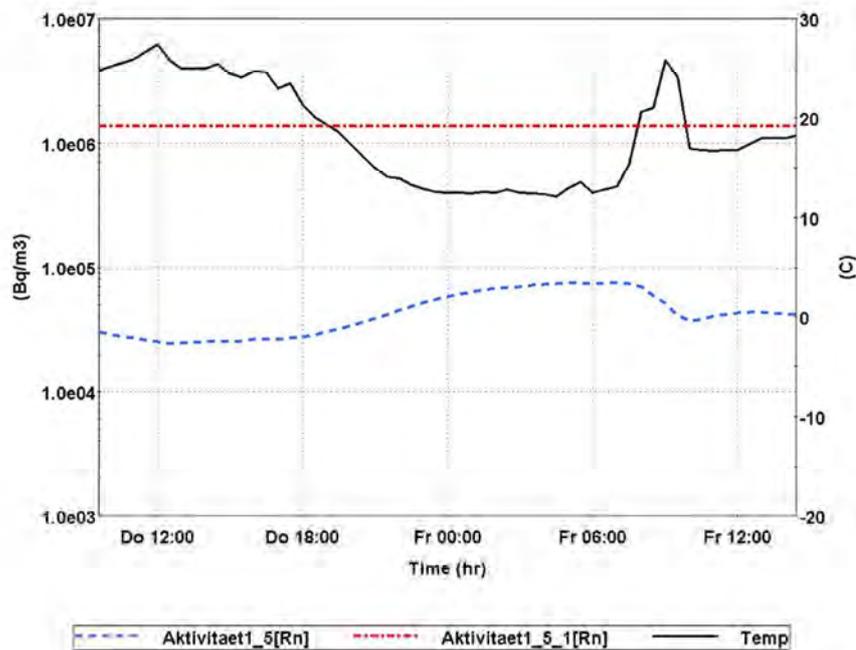


Abbildung 64: Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen im Inneren der Halde für einen Radiumgehalt von 1.600 Bq/kg im durchströmten Bereich (blau gestrichelt) und im nicht durchströmten Bereich (rot). Zusätzlich dargestellt ist der Zeitverlauf der Außentemperatur (schwarz).

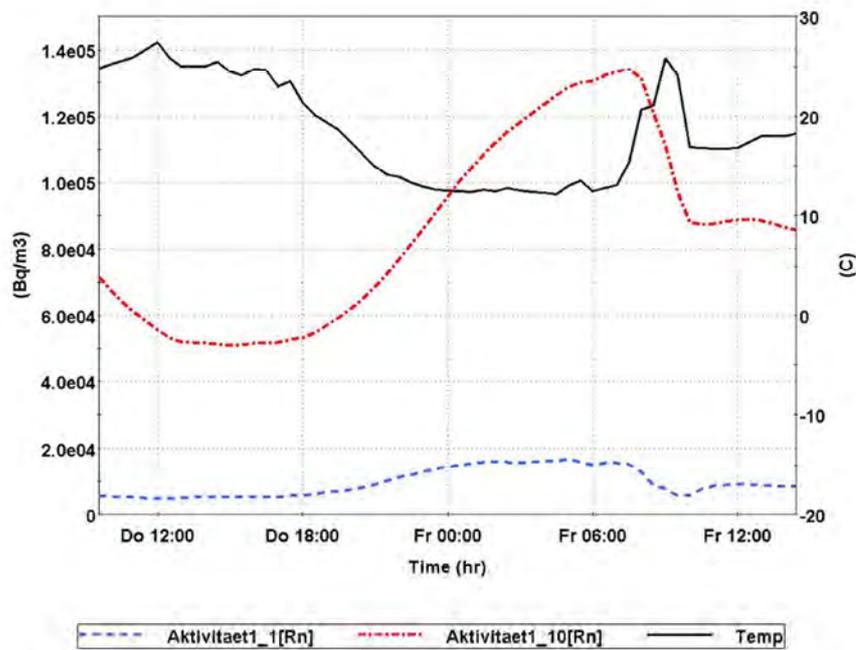


Abbildung 65: Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen im Inneren der Halde in der Nähe des Haldenplateaus (blau) und in der Nähe des Haldenfußes (rot) für einen Radiumgehalt von 1.600 Bq/kg im durchströmten Bereich. Zusätzlich dargestellt ist der Zeitverlauf der Außentemperatur.

## Singuläre Radonfreisetzungen

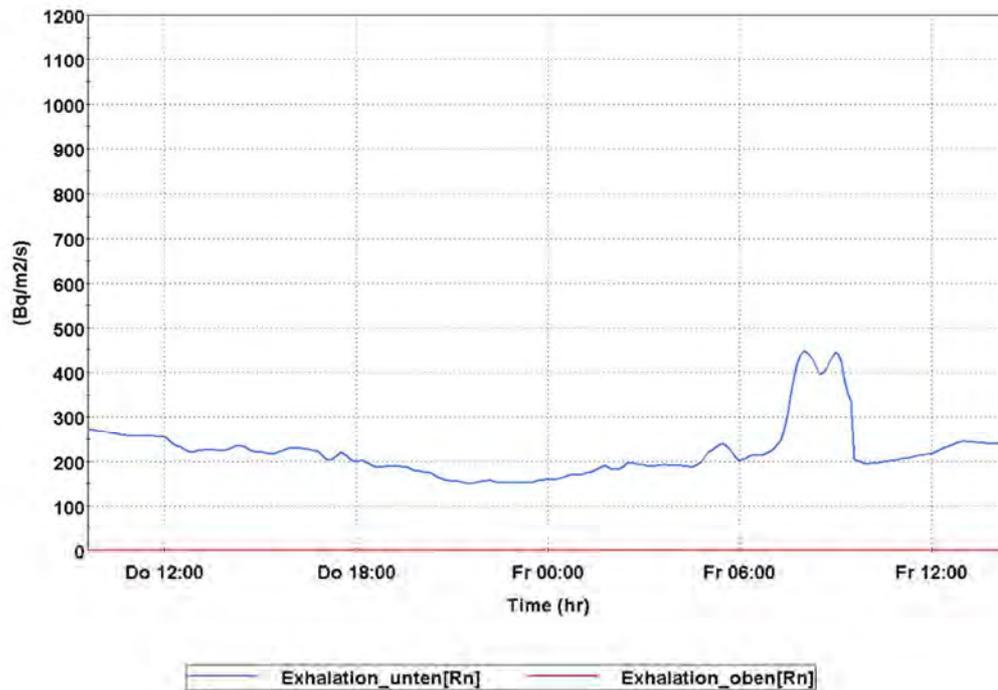


Abbildung 66: Zeitlicher Verlauf der modellierten spezifischen Radonexhalationsrate für die Ein- und Austrittsflächen des Luftstromes im Bereich des Haldenfußes (blau) und des Haldenplateaus (rot) für die Messkampagne im August 2009

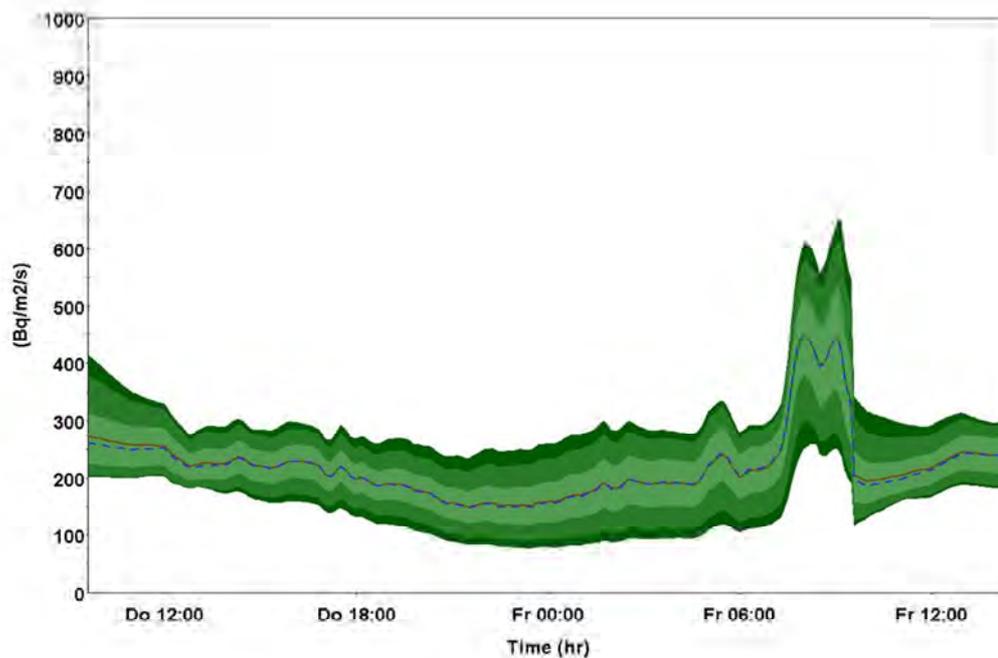


Abbildung 67: Zeitlicher Verlauf der Bandbreite der modellierten spezifischen Radonexhalationsrate für die Austrittsflächen des Luftstromes im Bereich des Haldenfußes für die Messkampagne im August 2009

## Singuläre Radonfreisetzungen

Nachdem das Verhalten der Quelle mit den dargestellten Modellansätzen näherungsweise beschrieben werden kann, wurde die Konzentration im Abstrombereich näher betrachtet. Hierzu wurde der Wert für die turbulente Diffusion variiert. Den Ausgangspunkt bildet der Diffusionskoeffizient von Radon in Luft von ca.  $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ . Dieser Koeffizient ist streng genommen sowohl vom Druck als auch von der Temperatur abhängig [34]. Für die hier durchgeführten Betrachtungen wird dieser Aspekt jedoch vernachlässigt.

Im Ergebnis der Betrachtungen wurde ein Vorfaktor vor dem Diffusionskoeffizienten als plausibler Bereich ermittelt, um die turbulente Diffusion zu beschreiben. Die mit diesem Wert am Messpunkt 12 berechnete Konzentration ist für unterschiedliche Höhen im Vergleich mit den gemessenen Werten in Abbildung 68 dargestellt.

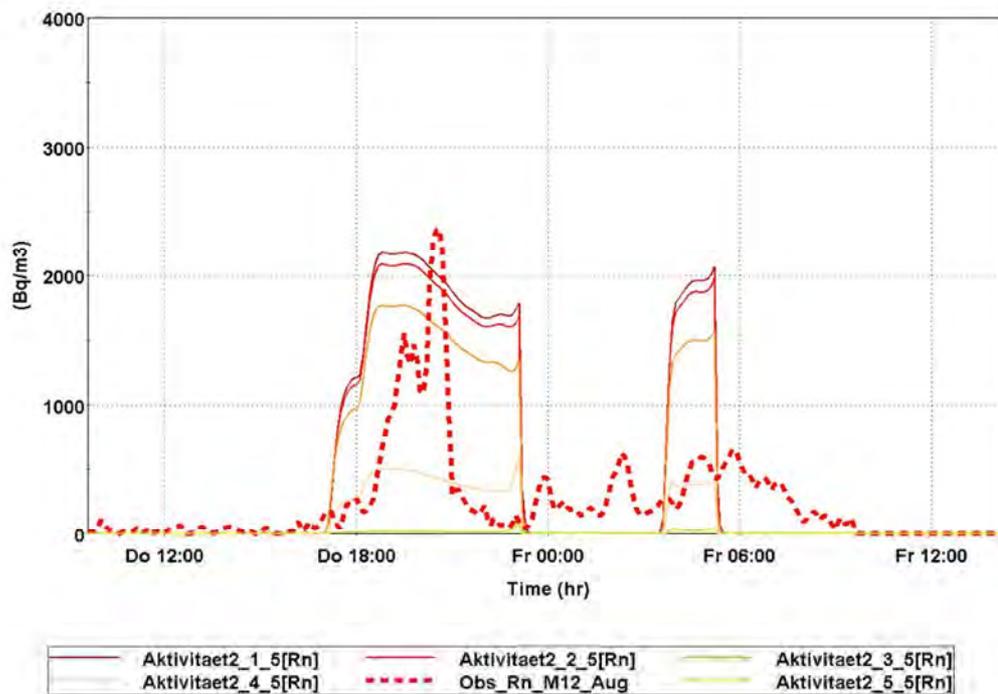


Abbildung 68: Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen im Abstrom der Halde am Messpunkt 12 in unterschiedlichen Höhen (0,1 m: Aktivität2\_1\_5, 0,2 m Aktivität2\_2\_5, 0,35 m Aktivität2\_3\_5, 0,65 m Aktivität2\_4\_5 und 1,25 m: Aktivität2\_5\_5) über der Erdoberfläche für den Messzeitraum im August 2009

## Singuläre Radonfreisetzungen

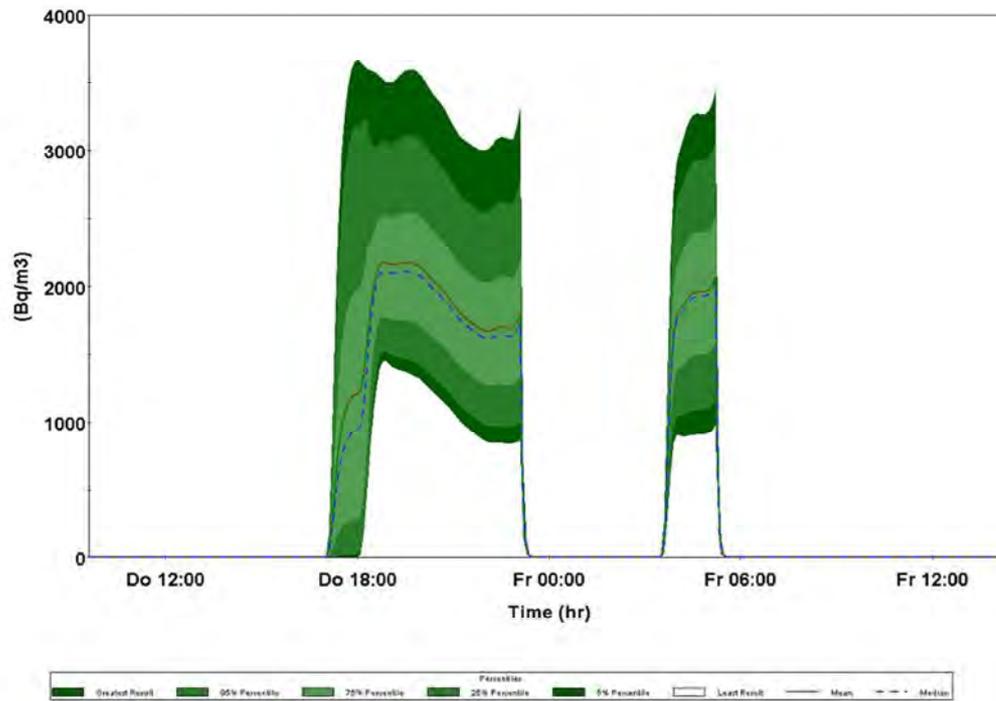


Abbildung 69: Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen im Abstrom der Halde am Messpunkt 12 in einer Höhe von 0,1 m über dem Boden unter Berücksichtigung der Bandbreiten der Parameter für den Messzeitraum im August 2009

### 10.2.4 Rückwirkende Prognoserechnung Halde Trockenbecken für das Jahr 2009

Mit den gefundenen Parametern und anhand der für den Standort verwendbaren Klimadaten soll nunmehr eine rückwirkende Prognose für das Jahr 2009 für einige ausgewählte Parameter erstellt werden. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Abbildung 70 bis Abbildung 72 dargestellt. Bei der Prognose der Konzentration im Abstrom wurden auch Kaltluftabflüsse im Winterhalbjahr berücksichtigt, wobei das im Plateaubereich austretende Radon talwärts über die Halde transportiert wird. Im Jahresmittel ergibt sich für den MP 12 in 10 cm Höhe im Abstrombereich eine mittlere Radonaktivitätskonzentration von 340 Bq/m<sup>3</sup>. Dieser Wert wird vor allem von den Wettersituationen im Sommer bedingt.

Entsprechend der Modellergebnisse wird damit vorhergesagt, dass die spezifische Exhalationsrate für die konvektive Durchströmung stets um einen rechnerisch ermittelten Mittelwert schwankt, der für die gegebenen Verhältnisse bei ca. 240 Bq/(m<sup>2</sup>\*s) liegt. Dieser Wert gilt streng genommen nur für die angenommene durchströmte Mächtigkeit von 1 m. Wird diese Mächtigkeit erhöht, so verringert sich der Wert der rechnerisch ermittelten Exhalationsrate umgekehrt proportional.

Kurzfristig, d. h. im Tagesbereich kann die Exhalationsrate jedoch signifikant davon abweichen. Die Ursache dafür ist, dass die Konzentration im Inneren der Halde in Abhängigkeit der Außen-

## Singuläre Radonfreisetzungen

temperatur und somit der konvektiven Durchströmung schwankt. Da diese Durchströmung hochgradig instationär ist, kommt es im Gegensatz zu den generischen Beispielen (Abschnitt 9.3) kaum zum Einstellen von stationären Konzentrationsverhältnissen.

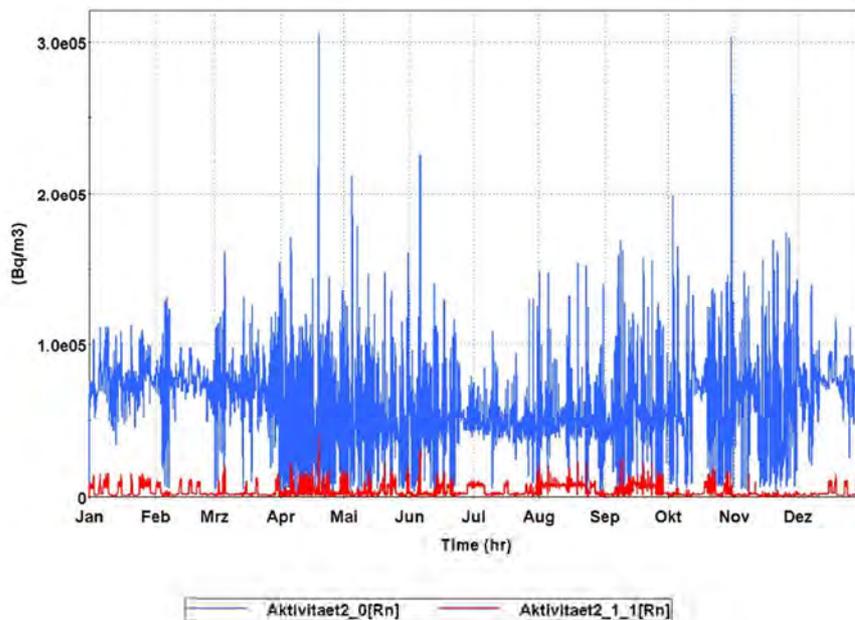


Abbildung 70: Rückwirkende Prognose des Jahresganges der Radonaktivitätskonzentration im Bereich des Haldenfußes (rot) und einer Anreicherungsbox, welche sich jeweils an den Austrittsflächen der konvektiven Durchströmung befindet (blau)

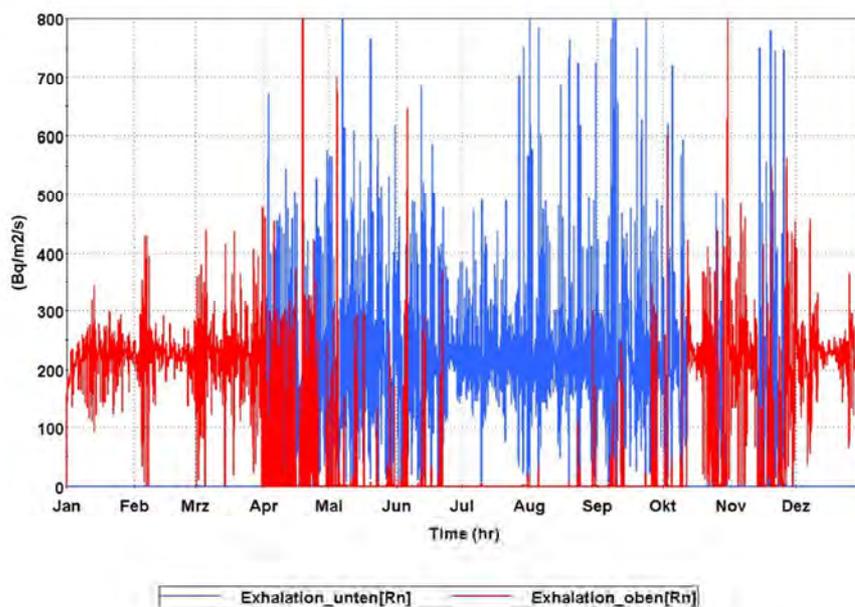


Abbildung 71: Rückwirkende Prognose der spezifischen Radonexhalation pro Einheitsfläche aufgrund konvektiver Durchströmung im Bereich des Haldenplateaus (rot) und des Haldenfußes (blau) für das Jahr 2009

## Singuläre Radonfreisetzungen

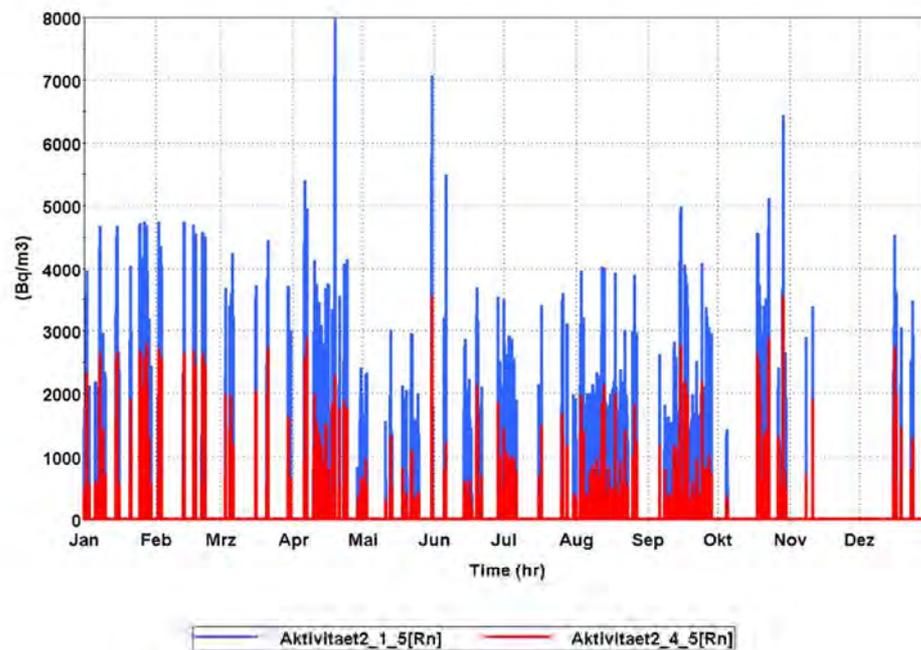


Abbildung 72: Rückwirkende Prognose der Radonaktivitätskonzentration im Abstrom der Halde (MP 12) Trockenbecken für eine Höhe von 10 cm (blau) und 1 m (rot) für das Jahr 2009

### 10.3 Messkampagne Dammalde Steinsee September 2009

#### 10.3.1 Standortparameter

Nachfolgend werden die für die Simulation verwendeten Parameter angegeben. Für die Simulation wurden teilweise entsprechende Spannbreiten berücksichtigt. Diese sind jeweils in Form von Verteilungsfunktionen gegeben. Die Form der Verteilungsfunktion wird durch die Abkürzungen  $U\{\text{Min}; \text{Max}\}$  - Gleichverteilung{Minimalwert; Maximalwert} bzw.  $N\{\text{Mean}; \text{SD}\}$  - Normalverteilung {Mittelwert; Standardabweichung} beschrieben.

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

Haldenparameter:

$T_i = N\{8^\circ\text{C}, 0,5\text{K}\}$	Haldeninnentemperatur (Normalverteilung)
$d_s = U\{10 \text{ mm}; 30 \text{ mm}\}$	Korndurchmesser für die gut durchströmten Bereiche (Gleichverteilung)
$H_H = 40 \text{ m}$	Höhe der Halde
$\alpha = 40^\circ$	Haldenschüttwinkel
$A_{Ra} =$	Radiumaktivität des Haldenmaterials als Kalibrierparameter
$E = U\{0,24; 0,36\}$	mittlerer Emanationskoeffizient (Gleichverteilung)
$M_{A_{\text{Austritt}}} = 1 \text{ m}$	Mächtigkeit des Strömungskanals in der Halde
$T_{or} = U\{0,3; 0,6\}$	Tortuosität des Haldenmaterials (Gleichverteilung)
$\epsilon = U\{0,25; 0,35\}$	Porosität des Haldenmaterials (Gleichverteilung)
$\rho_d = 2.500 \text{ kg/m}^3$	Trockendichte des Haldenmaterials
$B = 1 \text{ m}$	Breite der Halde (für die Berechnung nicht relevant)
$L_{Ab} = 100 \text{ m}$	Abstromlänge vom Haldenfuß bis zum jeweils dargestellten Messpunkt
$L_{An} = 150 \text{ m}$	Anstromlänge Kaltluftbildungsgebiet

### 10.3.2 Klimatische Randbedingungen

In Abbildung 73 sind die Wetterbedingungen während der Messkampagne Steinsee anhand der Daten der Wetterstation Erlabrunn-Klinik dargestellt. Dabei wurden zum Vergleich die Temperaturen am Standort Steinsee, Haldenfuß (MP 2) einbezogen. Die Bedingungen im gesamten Jahr 2009 wurden bereits in Abschnitt 10.2.2 dargestellt.

Bei den Temperaturen zeigen sich deutliche Unterschiede der Messwerte vor Ort und denen der Wetterstation. Die Temperaturen am Haldenfuß der Dammalde Steinsee (MP 2) liegen meist deutlich niedriger, als die in Erlabrunn. Dies ist auf die unterschiedlichen Standortbedingungen zurückzuführen, da der Haldenfuß in bewaldetem Gelände und die Wetterstation im relativ offenen Klinikgelände liegt.

Zusammen mit dem analogen Vergleich bei der Dammalde Trockenbecken (Abschnitt 10.2.2) zeigt dies gewisse Grenzen der Verwendbarkeit der meteorologischen Daten von Wetterstationen.

Singuläre  
Radonfreisetzungen

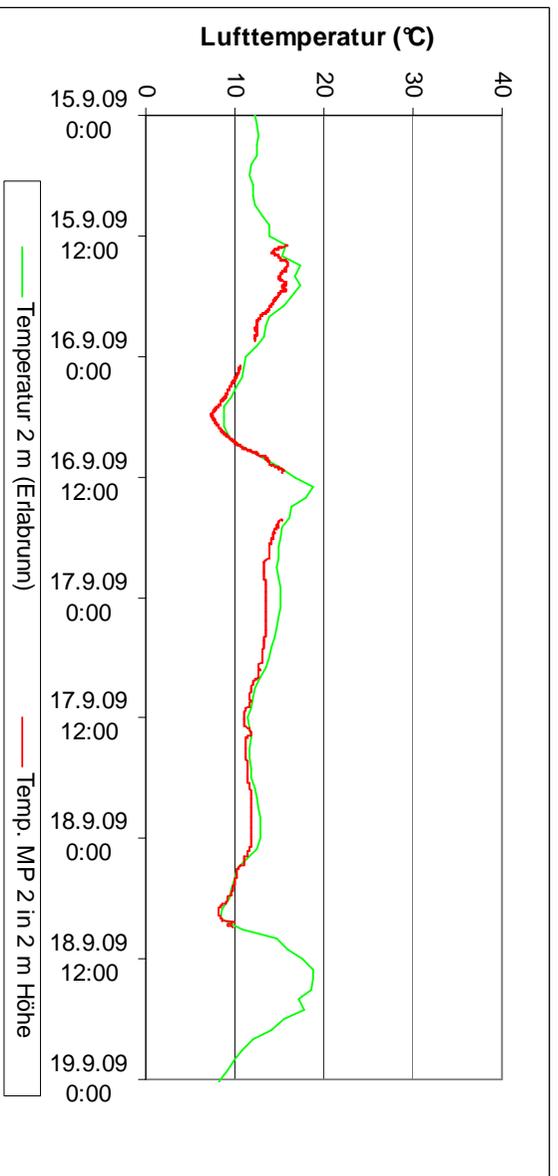
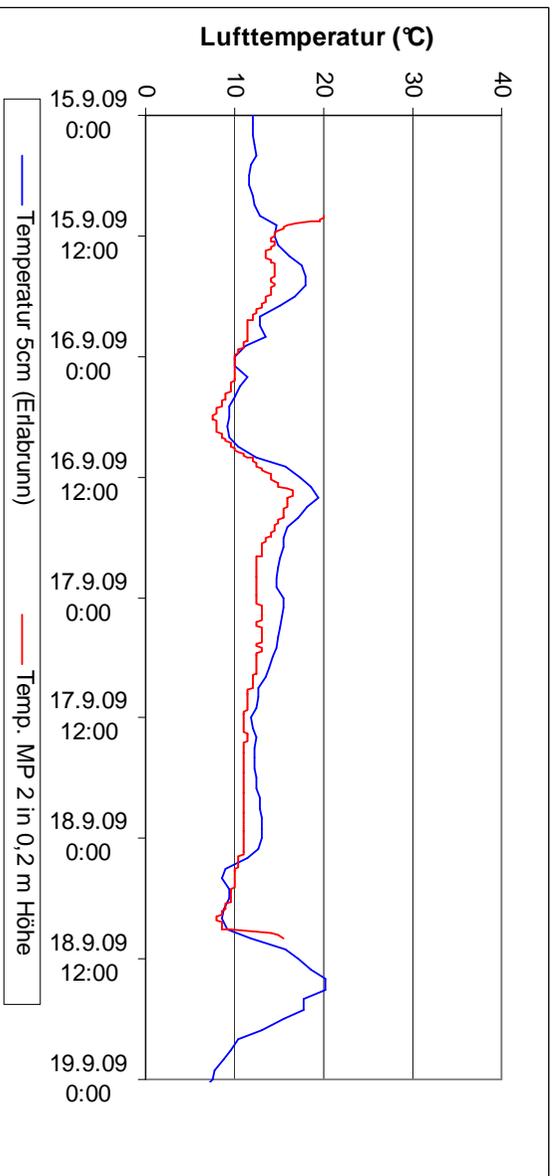
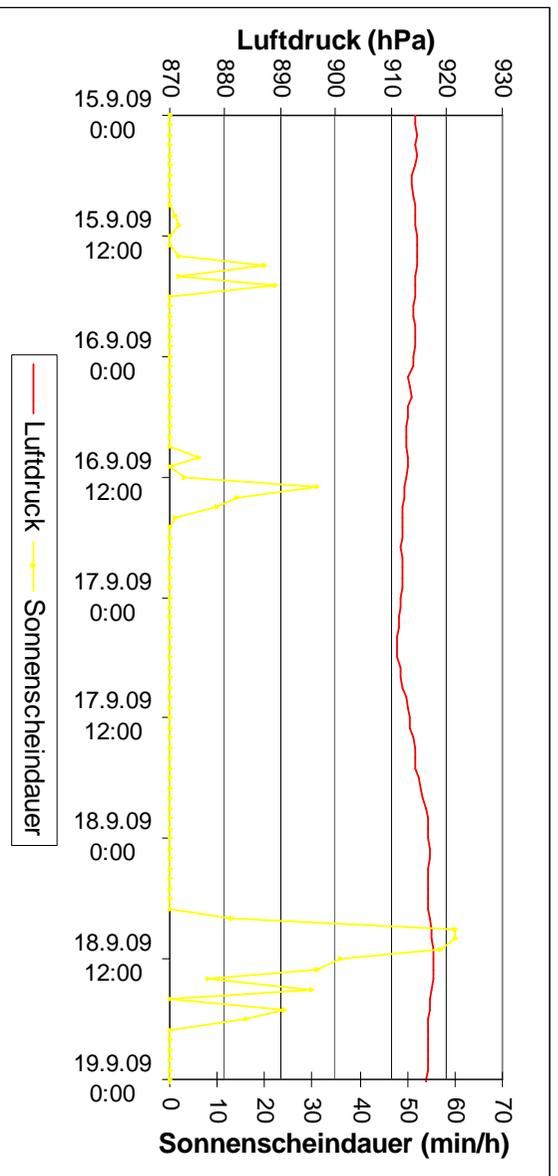


Abbildung 73: Wetterbedingungen Kampagne Steinsee, Wetterstation Erlabrunn-Klinik

### 10.3.3 Modellierung

Analog zur Dammhalde Trockenbecken wurden auch für die Dammhalde Steinsee Berechnungen mit unterschiedlichen Werten für den Radiumgehalt durchgeführt. Nachfolgend werden wieder zu Illustrationszwecken die Ergebnisse für drei Werte dieses Parameters dargestellt werden.

Wie anhand von Abbildung 74 bis Abbildung 76 deutlich wird, ergibt sich durch diese iterative Vorgehensweise ein mittlerer Wert des Radiumgehaltes unter Berücksichtigung der sonstigen getroffenen Annahmen von 6.400 Bq/kg. Für diese Halde lagen keine Messwerte zum konkreten Radiumgehalt vor. Wie in Abbildung 76 gezeigt, kann damit der zeitliche Verlauf der Radonaktivitätskonzentration sowohl in der Anreicherungsbox als auch am Haldenfuß qualitativ als auch quantitativ recht gut wiedergegeben werden. Dabei wurde bewusst auf eine logarithmische Darstellung verzichtet.

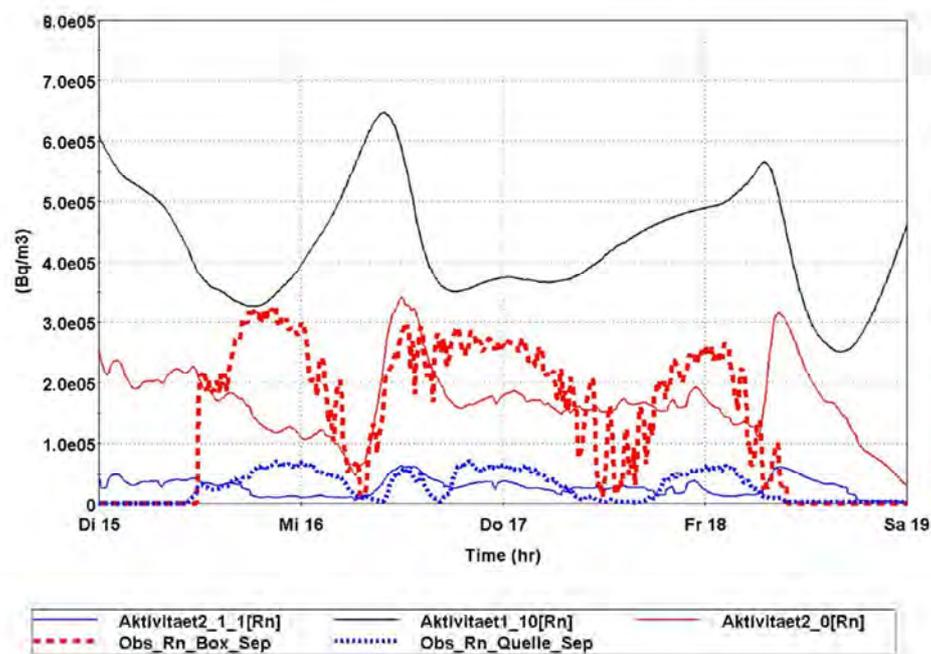


Abbildung 74: Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen für einen Radiumgehalt von 4.000 Bq/kg in der Anreicherungsbox (rot) und am Haldenfuß (blau) sowie innerhalb der Halde im Bereich des Ausströmpunktes (schwarz). Die gepunkteten Kurven sind die gemessenen und die durchgezogenen sind die modellierten Kurven.

## Singuläre Radonfreisetzungen

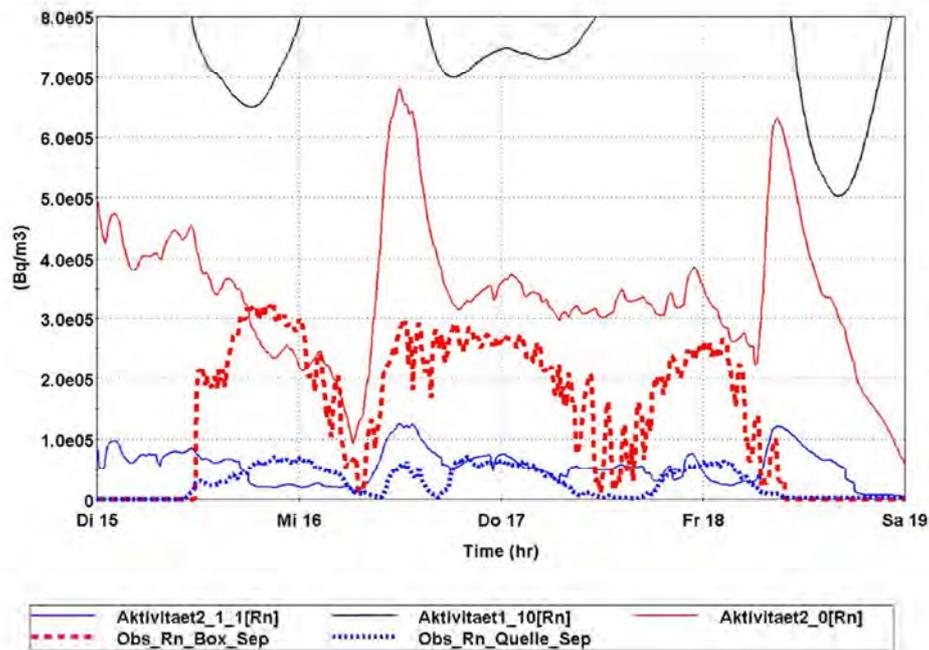


Abbildung 75: Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen für einen Radiumgehalt von 8.000 Bq/kg in der Anreicherungsbox (rot) und am Haldenfuß (blau) sowie innerhalb der Halde im Bereich des Ausströmpunktes (schwarz). Die gepunkteten Kurven sind die gemessenen und die durchgezogenen sind die modellierten Kurven.

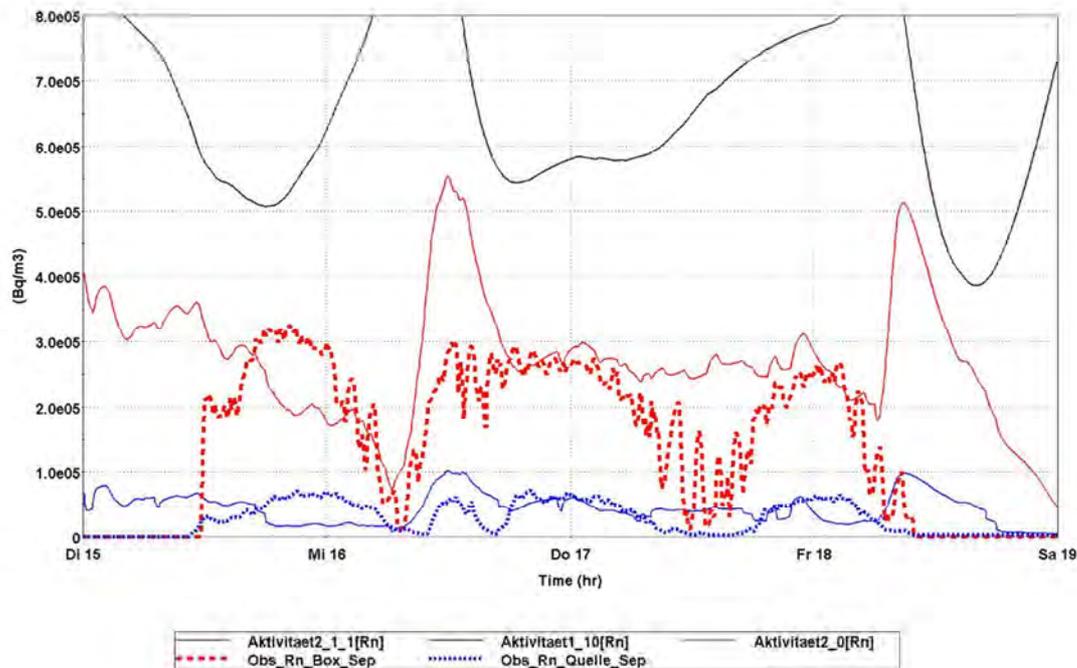


Abbildung 76: Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen für einen Radiumgehalt von 6.400 Bq/kg in der Anreicherungsbox (rot) und am Haldenfuß (blau) sowie innerhalb der Halde im Bereich des Ausströmpunktes (schwarz). Die gepunkteten Kurven sind die gemessenen und die durchgezogenen sind die modellierten Kurven.

## Singuläre Radonfreisetzungen

Die für den Radiumgehalt von 6.400 Bq/kg berechneten Radonaktivitätskonzentrationen im Inneren der Halde sowie in der Nähe des Plateaus und des Haldenfußes sind in Abbildung 77 bis Abbildung 79 dargestellt. Dabei zeigt Abbildung 78 beispielhaft das Ergebnis unter Berücksichtigung der Bandbreiten der einzelnen Eingangsparameter.

Außerdem wurde für den Bereich der Austrittsfläche die flächenbezogene Exhalationsrate berechnet. Diese sind in Abbildung 80 für den Mittelwert und in Abbildung 81 als Bandbreite unter Berücksichtigung der beschriebenen Unsicherheiten dargestellt. Hier sei nochmals darauf hingewiesen, dass der berechnete Wert der Exhalationsrate insbesondere von der angenommenen Mächtigkeit des konvektiv durchströmten Kanals abhängig ist. Es wurde ein plausibler Wert von 1 m angenommen. Wird diese Mächtigkeit erhöht, so verringert sich der Wert der rechnerisch ermittelten Exhalationsrate umgekehrt proportional. Dagegen sind die Unsicherheiten in der rechnerisch ermittelten Gesamtexhalation (Produkt aus Exhalationsrate und Austrittsfläche) mit deutlich geringeren Unsicherheiten behaftet.

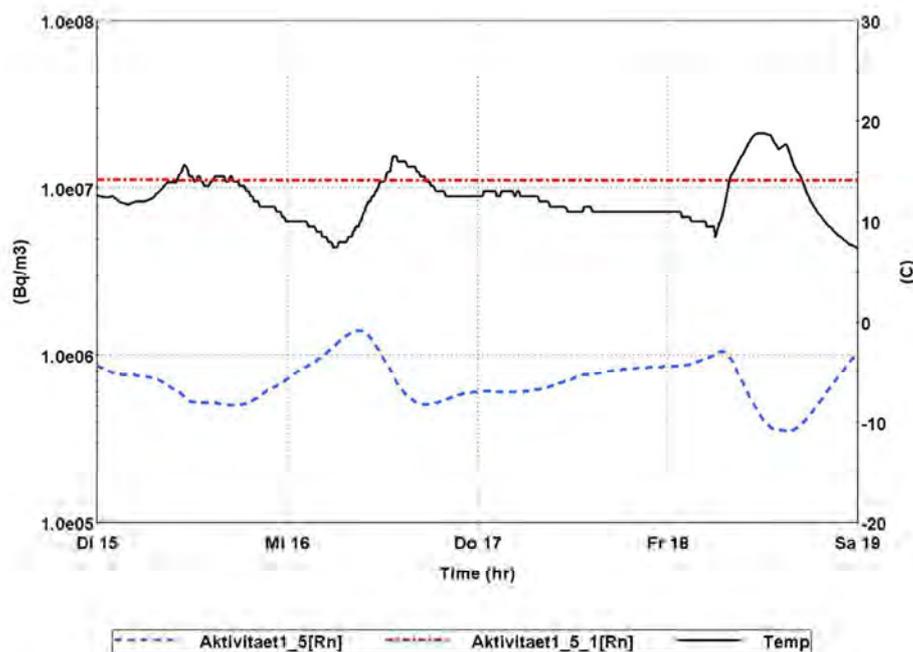


Abbildung 77: Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen im Inneren der Halde für einen Radiumgehalt von 6.400 Bq/kg im durchströmten Bereich (blau gestrichelt) und im nicht durchströmten Bereich (rot). Zusätzlich dargestellt ist der Zeitverlauf der Außentemperatur (schwarz).

## Singuläre Radonfreisetzungen

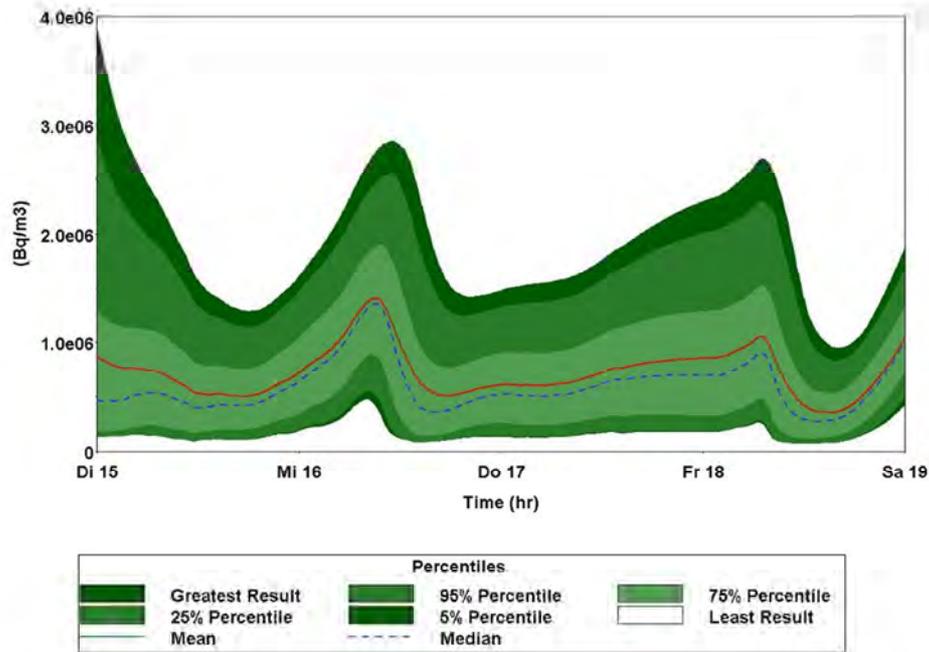


Abbildung 78: Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen im Inneren der Halde für einen Radiumgehalt von 6.400 Bq/kg im durchströmten Bereich als Bandbreite unter Berücksichtigung der verwendeten Bandbreiten der Eingangsparameter

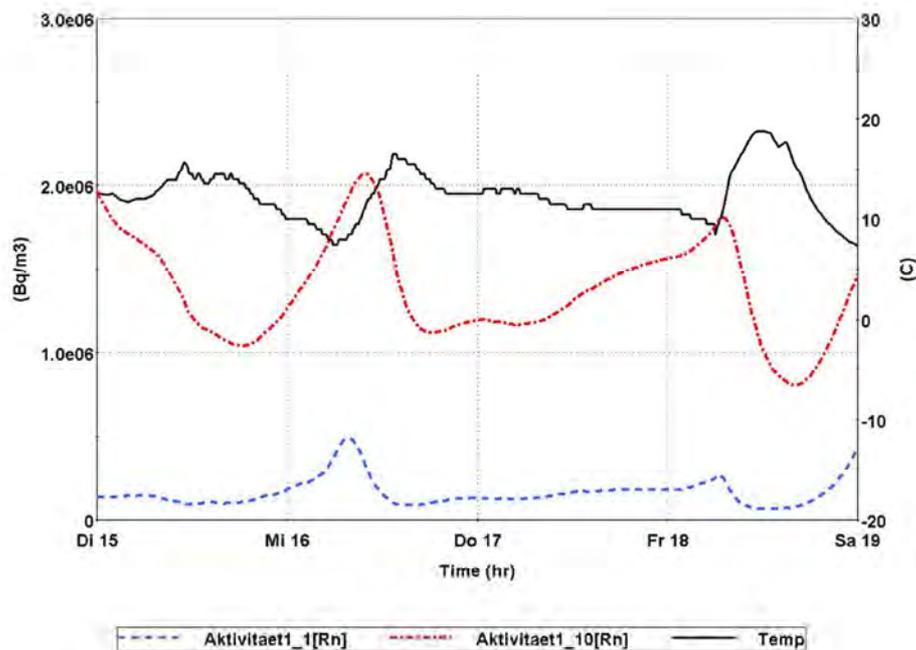


Abbildung 79: Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen im Inneren der Halde in der Nähe des Haldenplateaus (blau) und in der Nähe des Haldenfußes (rot) für einen Radiumgehalt von 6.400 Bq/kg im durchströmten Bereich. Zusätzlich dargestellt ist der Zeitverlauf der Außentemperatur.

## Singuläre Radonfreisetzungen

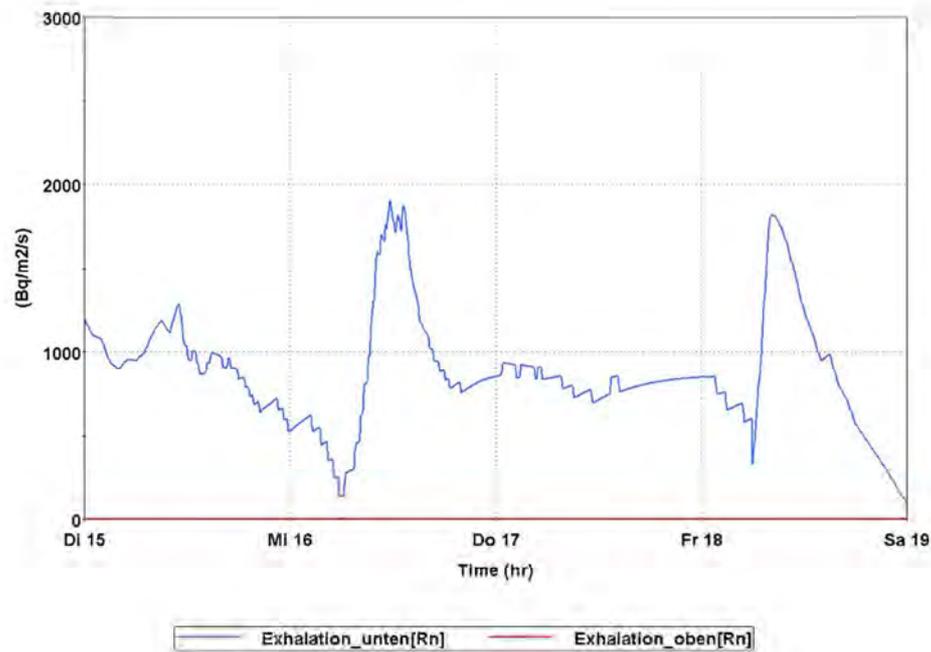


Abbildung 80: Zeitlicher Verlauf der modellierten spezifischen Radonexhalationsrate für die Ein- und Austrittsflächen des Luftstromes im Bereich des Haldenfußes (blau) und des Haldenplateaus (rot) für die Messkampagne im September 2009

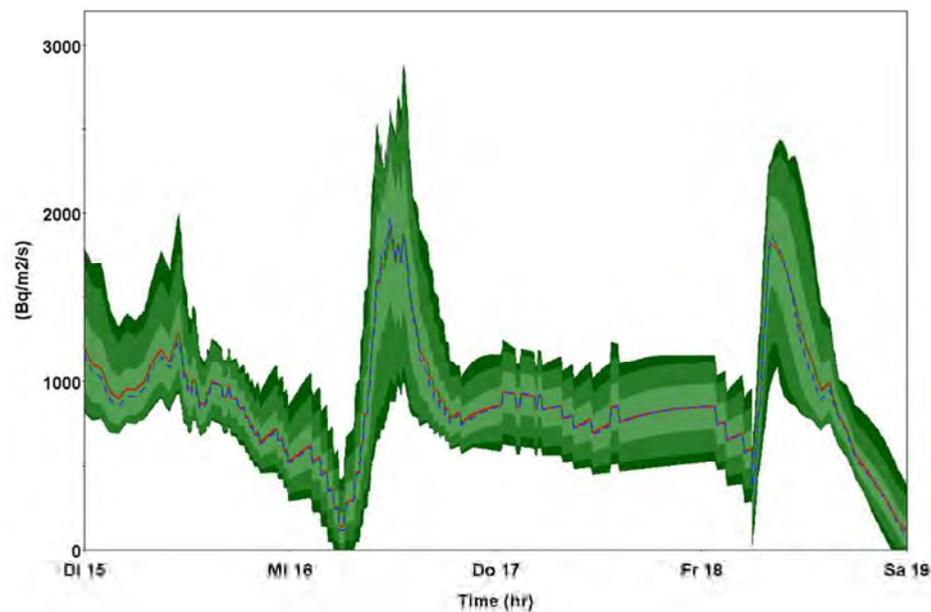


Abbildung 81: Zeitlicher Verlauf der Bandbreite der modellierten spezifischen Radonexhalationsrate für die Austrittsflächen des Luftstromes im Bereich des Haldenfußes für die Messkampagne im September 2009

## Singuläre Radonfreisetzungen

Wieder analog zum Trockenbecken wurde die Konzentration im Abstrombereich näher betrachtet. Allerdings wurde hier der beim Trockenbecken gefundene Wert von ca. 8 für die turbulente Diffusion beibehalten.

Die mit diesem Wert am Messpunkt 6 berechnete Konzentration ist für unterschiedliche Höhen im Vergleich mit den gemessenen Werten in Abbildung 82 dargestellt.

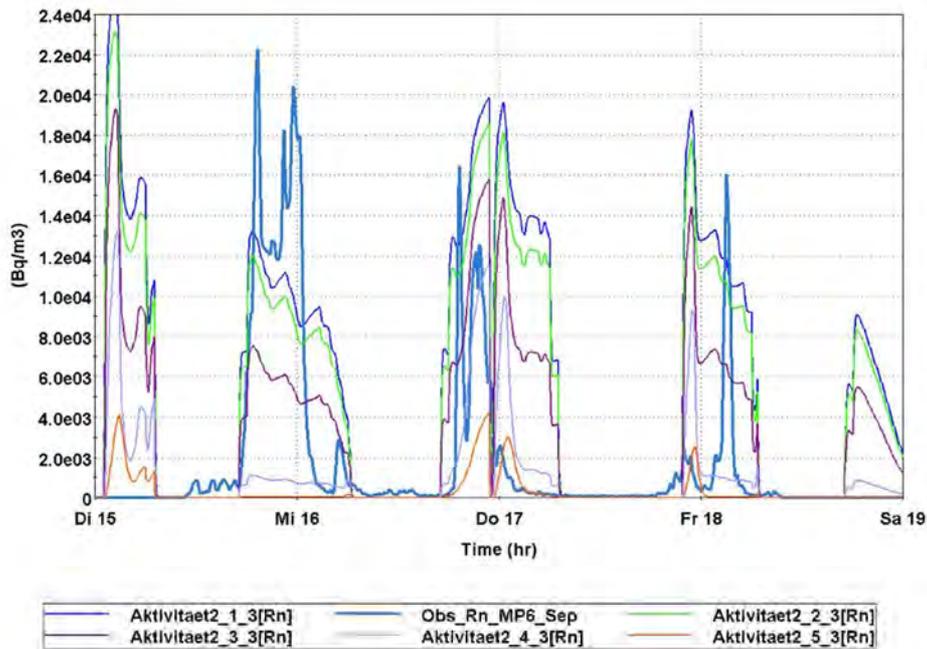


Abbildung 82: Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen im Abstrom der Halde am Messpunkt 6 in unterschiedlichen Höhen (0,1 m: Aktivität2\_1\_5, 0,2 m Aktivität2\_2\_5, 0,35 m Aktivität2\_3\_5, 0,65 m Aktivität2\_4\_5 und 1,25 m: Aktivität2\_5\_5) über der Erdoberfläche für den Messzeitraum im September 2009

Es zeigt sich, dass der Konzentrationsverlauf im Abstrom qualitativ annähernd wiedergegeben werden kann. Die Unterschiede zwischen Messung und Modell sind aus der Sicht der Autoren wahrscheinlich durch die nur näherungsweise empirische Beschreibung der Kaltluftabflüsse bedingt.

## Singuläre Radonfreisetzungen

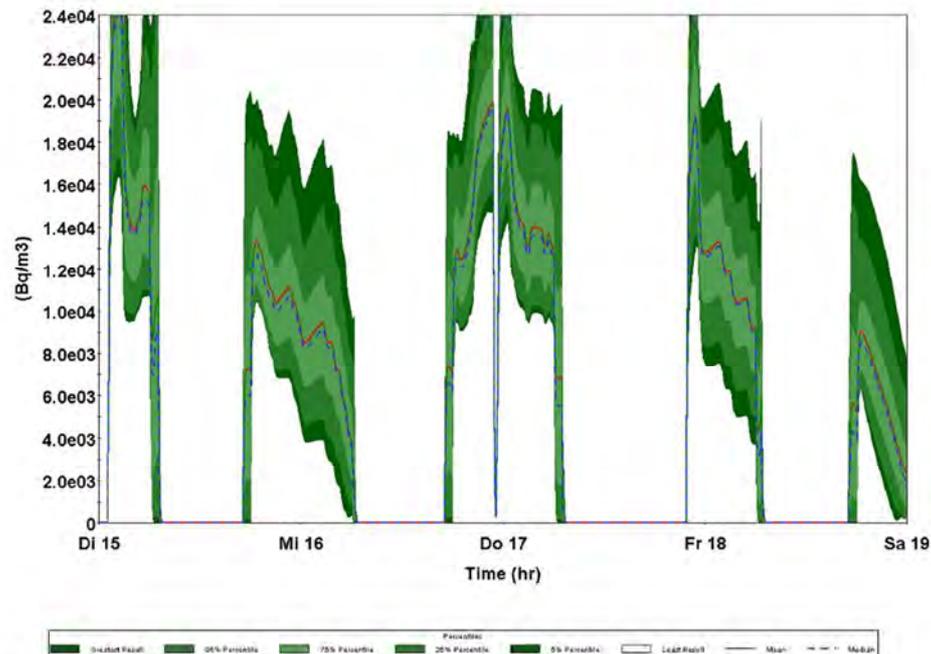


Abbildung 83: Zeitlicher Verlauf der modellierten Radonaktivitätskonzentrationen im Abstrom der Halde am Messpunkt 6 in einer Höhe von 0,1 m über dem Boden unter Berücksichtigung der Bandbreiten der Parameter für den Messzeitraum im September 2009

### 10.3.4 Rückwirkende Prognoserechnung Halde Steinsee für das Jahr 2009

Wieder analog zur Halde Trockenbecken soll mit den gefundenen Parametern und anhand der für den Standort verwendbaren Klimadaten nunmehr eine rückwirkende Prognose für das Jahr 2009 für einige ausgewählte Parameter erstellt werden. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Abbildung 84 bis Abbildung 86 dargestellt.

Bei der Prognose der Konzentration im Abstrom wurden auch wieder Kaltluftabflüsse im Winterhalbjahr berücksichtigt, wobei das im Plateaubereich austretende Radon talwärts über die Halde transportiert wird.

Im Jahresmittel ergibt sich für den MP6 in 10 cm Höhe im Abstrombereich eine mittlere Radonaktivitätskonzentration von 1.360 Bq/m<sup>3</sup>. Dieser Wert wird vor allem von den Wettersituationen im Sommer bedingt.

Entsprechend der Modellergebnisse wird damit vorhergesagt, dass die spezifische Exhalationsrate für die konvektive Durchströmung stets um einen Mittelwert schwankt, der für die gegebenen Verhältnisse bei ca. 900 Bq/(m<sup>2</sup>\*s) liegt. Kurzfristig, d. h. im Tagesbereich kann die Exhalationsrate jedoch signifikant davon abweichen. Die Ursache dafür ist, dass die Konzentration im Inneren der Halde in Abhängigkeit der Außentemperatur und somit der konvektiven Durchströmung

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

schwankt. Da diese Durchströmung hochgradig instationär ist, kommt es im Gegensatz zu den generischen Beispielen (Abschnitt 9.3) kaum zum Einstellen von stationären Konzentrationsverhältnissen.

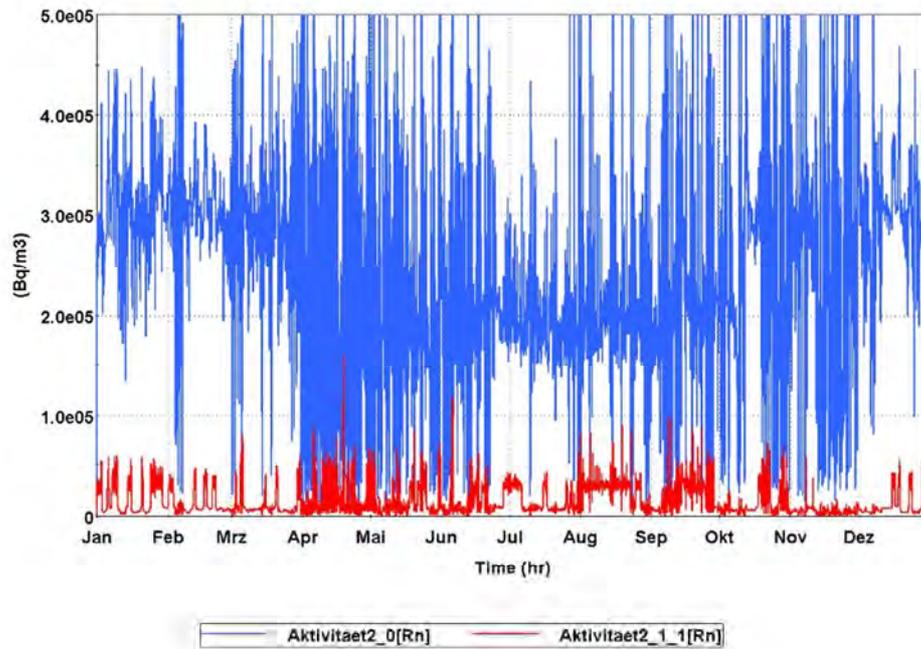
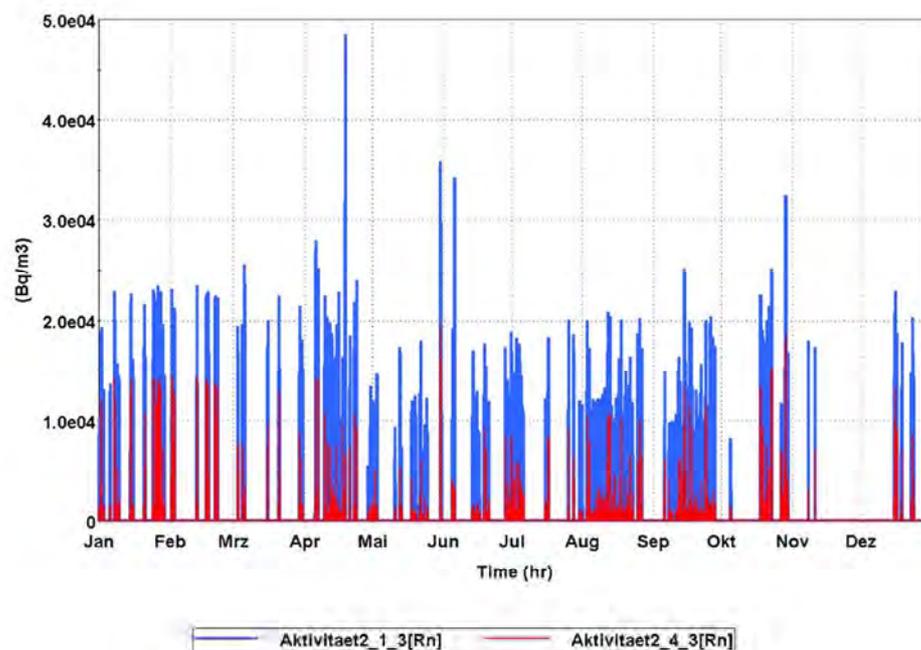
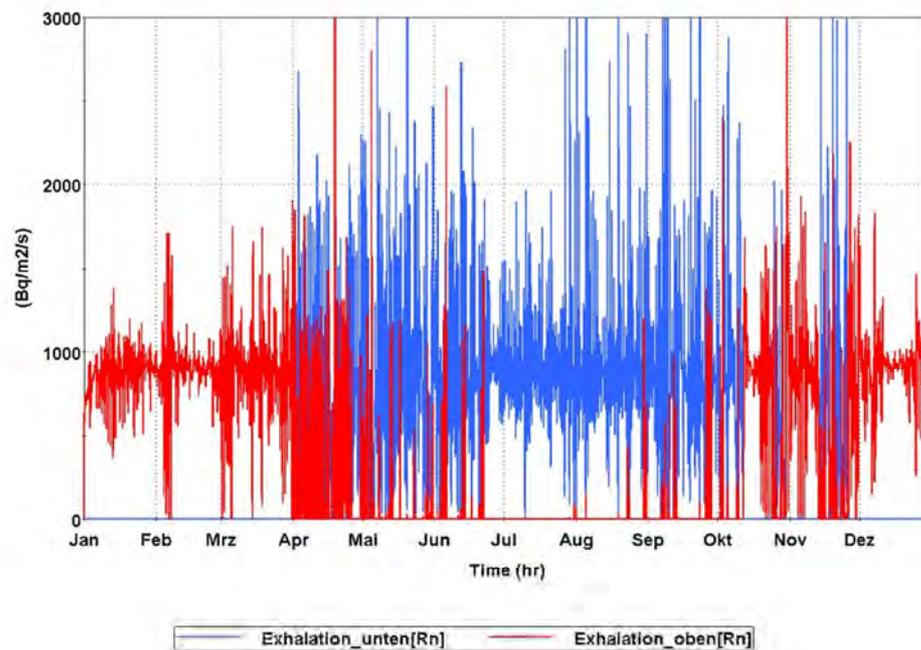


Abbildung 84: Rückwirkende Prognose des Jahresganges der Radonaktivitätskonzentration im Bereich des Haldenfußes (rot) und einer Anreicherungsbox, welche sich jeweils an den Austrittsflächen der konvektiven Durchströmung befindet (blau)

## Singuläre Radonfreisetzungen



Entsprechend des verwendeten konzeptionellen Modells und dessen numerischer Umsetzung müssen die in Abschnitt 9.3 getroffenen Aussagen jetzt dahingehend präzisiert werden, dass die Exhalationsrate im Mittel unabhängig von der Jahreszeit um einen konstanten Wert schwankt. Lediglich die Stelle, an der die Haldenluft konvektiv austritt, wechselt vom Plateau- zum Fußbereich und umgekehrt. Die kurzzeitigen Schwankungen der Exhalationsrate im Stundenbereich können signifikant von diesem konstanten Mittelwert abweichen.

Hier sei zudem noch anzumerken, dass es sich bei der Exhalationsrate derzeit um einen rechnerischen Wert, gewissermaßen um eine Hilfsgröße handelt, der einer direkten Messung mit den verwendeten Methoden nur sehr schwierig zugänglich ist (siehe Abschnitt 10.5).

Der berechnete Wert der Exhalationsrate ist insbesondere von der angenommenen Mächtigkeit des konvektiv durchströmten Kanals abhängig. Es wurde ein plausibler Wert von 1 m angenommen. Wird diese Mächtigkeit erhöht, so verringert sich der Wert der rechnerisch ermittelten Exhalationsrate umgekehrt proportional. Dagegen sind die Unsicherheiten in der rechnerisch ermittelten Gesamtexhalation (Produkt aus Exhalationsrate und Austrittsfläche) mit deutlich geringeren Unsicherheiten behaftet.

Bspw. wurden die hier berechneten konvektiven Exhalationsraten von bis zu ca. 900 Bq/(m<sup>2</sup>\*s) bisher an realen Halden nicht so gemessen. Dies kann durch die hier teilweise verwendeten empirischen Parameter bedingt sein. Auf der anderen Seite liegen den Autoren bisher keine belastbaren Messungen zu konvektiv bedingten Exhalationsraten vor. Die Belastbarkeit der angewendeten Messungen der Exhalationsrate mit der Messbox muss insbesondere für hohe konvektive Anteile in der Exhalation aufgrund von durchgeführten Abschätzungen angezweifelt werden (siehe Abschnitt 10.5). Den Autoren ist allerdings bekannt, dass alternative Methoden erfolgreich eingesetzt wurden, mit denen bspw. die konvektive Haldendurchströmungsgeschwindigkeit gemessen werden kann (bspw. Tracergasmethoden).

#### ***10.4 Überblick über einige Schlüsselparameter der durchgeführten Messkampagnen***

Zur Verbesserung der Lesbarkeit sollen die wesentlichen Parameter der in den beiden Kampagnen untersuchten Standorte nochmals zusammengestellt werden. Dies geschieht vergleichend in tabellarischer Form. Einige der Parameter werden dabei für die Zeiträume angegeben, in denen sowohl konvektive Freisetzung aus der Halde als auch Kaltluftabfluss erfolgt. Sämtliche angegebene Werte sind ungefähre über entsprechende Zeiträume gemittelte Werte. Für die mittlere effektive Exhalationsrate sei nochmals darauf hingewiesen, dass es sich lediglich um einen rechnerischen Hilfsparameter handelt, der von der angenommenen Mächtigkeit des konvektiv durchströmten Bereiches abhängig ist (siehe Diskussion oben).

## Singuläre Radonfreisetzungen

Tabelle 6: Zusammenstellung mittlerer Werte aus den Messkampagnen bzw. aus der Nachmodellierung (Radonexhalation und mittlere effektive Radonaktivitätskonzentration)

Parameter	Halde Trockenbecken	Halde Steinsee
Radiumaktivitätskonzentration [Bq/kg]	1.600	6.400
Rn-Aktivitätskonzentration im Haldeninneren * stagnanter Bereich [Bq/m <sup>3</sup> ] durchströmter Bereich [Bq/m <sup>3</sup> ]	2,7 x 10 <sup>6</sup> (40.000 - 300.000)	1,1 x 10 <sup>7</sup> (300.000 - 4 x 10 <sup>6</sup> )
Rn-Aktivitätskonzentration in der Messbox während Kampagne und KL-Abfluss [Bq/m <sup>3</sup> ]	60.000	300.000
Rn-Aktivitätskonzentration am Haldenfuß während Kampagne und KL-Abfluss [Bq/m <sup>3</sup> ]	10.000	50.000
Rn-Aktivitätskonzentration an repräsentativen Abstrommesspunkten während Kampagne und KL-Abfluss [Bq/m <sup>3</sup> ]	2.000 (500 - 2.500)	15.000 (10.000 - 20.000)
Berechnete mittlere jährliche Radonaktivitätskonzentration für repräsentative Abstrommesspunkte [Bq/m <sup>3</sup> ]	340	1.360
Mittlere effektive Radonexhalationsrate für den konvektiv durchströmten Bereich [Bq/(m <sup>2</sup> *s)]	ca. 220	ca. 1.000

\* Mittelwerte stochastischer Rechnungen

### **10.5 Abschätzungen und Beispielrechnungen zu Radonexhalationsmessungen für konvektiv dominierte Radonexhalation**

Die mit dem Modell durchgeführten Modellierungen anhand der realen Klimadaten führen zu konvektiv bedingten Radonexhalationsraten im Bereich mehrerer hundert Bq/(m<sup>2</sup>\*s). Diese Ergebnisse liegen um einen Faktor von mehr als 10 über den an Halden bestimmten Exhalationsraten. So wurden an Wismut-Halden Exhalationsraten nach [41] im Bereich von 30 - 40, maximal 50 Bq/(m<sup>2</sup>\*s) gemessen. Dabei handelt es sich nach [41] ebenfalls um einen eindeutig konvektiv dominierten Radonaustrag. Demgegenüber wurden in der vorliegenden Arbeit Exhalationsraten im Bereich von mehr als 200 Bq/(m<sup>2</sup>\*s) für das Trockenbecken und von ca. 900 Bq/(m<sup>2</sup>\*s) für den Steinsee berechnet.

Um diesen offenkundigen Widerspruch besser zu verstehen, werden nachfolgend die Messungen unter verschiedenen Annahmen abgeschätzt bzw. simuliert.

### 10.5.1 Luftdicht verschlossene Box bei konvektiven Rn-Austrag

Zunächst wird von einer luftdicht verschlossenen Box ausgegangen. Die Messung mit einer luftdicht geschlossenen Messbox wird hinsichtlich der wesentlichen Prozesse analysiert und über analytische Abschätzungen der verfügbare Zeitrahmen für eine Messung des Beitrages der konvektiven Durchströmung zur Radonexhalation abgeschätzt. Dazu wird idealisiert angenommen, dass die Box luftdicht ist und auch am Boden so abgedichtet ist, dass kein Ausströmen in diesem Bereich möglich ist. Eine davon abweichende Annahme würde dazu führen, dass die Randbedingungen für die Messung nicht eindeutig definiert sind und mithin völlig unklar wäre, was eigentlich gemessen würde.

Die Messanordnung ist in nachfolgender Abbildung 87 dargestellt

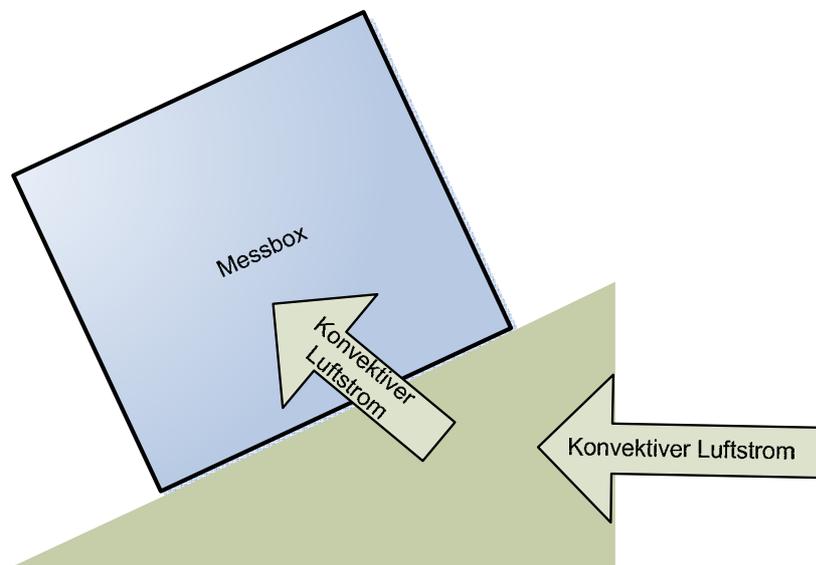


Abbildung 87: Schematische Darstellung einer Messbox am Haldenfuß, in die konvektiver Luft eintritt erfolgt

Die Messbox entsprechend Abbildung 87 habe eine Höhe  $H_B$  und eine Grundfläche  $A_B$ , mithin das Volumen  $V_B = A_B \cdot H_B$ .

Nachfolgend soll nunmehr die zeitliche Entwicklung des Druckes in der Box abgeschätzt werden. Die konvektiv einströmende Luft führt zu einer Druckerhöhung in der Box. Damit steigt der Druck in der Box an und es entsteht ein Überdruck gegenüber der umgebenden Atmosphäre. Wenn dieser Überdruck so groß wird, wie der durch die Temperaturunterschiede inner- und außerhalb der Halde hervorgerufene Druckunterschied, kommt die konvektive Strömung auf der durch die Box begrenzten Strömungsbahn zum Erliegen. Die Berechnungen haben zum Ziel, die Zeitdauer abzuschätzen, in der dieser Druckausgleich stattfindet. Anders ausgedrückt soll der Zeitrahmen abgeschätzt werden, in dem die konvektive Durchströmung der Halde durch die Messanordnung nicht behindert wird und so die Exhalationsrate sachgerecht bestimmt werden kann.

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

Nach Gleichung (F 15) wird die konvektive Strömungsgeschwindigkeit im Inneren der Halde auf der Grundlage von Druckunterschieden definiert. Hier wird nun unterschieden zwischen einem Dichte bedingten Druckunterschied, der gewissermaßen als Antriebsmotor dient und dem in der Box entstehenden Überdruck, der durch einströmende Luft in die Box hervorgerufen wird. Da die Box Teil der Strömungsbahn ist, muss Gleichung (F 15) somit um diesen Druckterm erweitert werden:

$$(F 36) \quad v = \frac{k(\varepsilon) (\Delta p_I - \Delta p_B)}{\eta L_I}$$

mit:

$$\Delta p_B = p_B - p_0$$

$p_0$  - Referenzdruck außerhalb der Box

$p_B$  - Druck innerhalb der Box

$\Delta p_I$  - Druckunterschied am Haldenfuß hervorgerufen durch die Dichteunterschiede zwischen kalter Luft im Inneren der Halde und warmer Luft außerhalb

Der Einfachheit halber wurden der Betrag und das Mittelungssymbol bei der Geschwindigkeit weggelassen. Bedingt durch den zugrunde liegenden Mechanismus muss der Zusatzdruck in der Box  $\Delta p_B$  immer geringer oder maximal gleich dem Druckunterschied  $\Delta p_I$  sein.

Ausgehend von der allgemeinen Gasgleichung

$$(F 37) \quad pV = nRT$$

resultiert für den Druck im Inneren der Box:

$$(F 38) \quad \frac{dp_B}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{n_B RT_B}{V_B}$$

Da das Boxvolumen  $V_B$  und auch die Temperatur näherungsweise als konstant angenommen werden können, resultiert:

$$(F 39) \quad \frac{dp_B}{dt} = \frac{p_B A_B}{V_B} v = \frac{p_0}{H_B} v(t)$$

mit:

$v(t)$  - mittlere konvektiver Strömungsgeschwindigkeit als Funktion der Zeit

$p_0$  - Referenzdruck der Haldenluft (stellt eine Näherung dar)

Unter Verwendung von (F 19) und der Definition von  $\Delta p_B = p_B - p_0$  resultiert für das Verhältnis der Konvektionsgeschwindigkeiten zum Zeitpunkt t zur Konvektionsgeschwindigkeit ohne Box:

$$(F 40) \quad \frac{v(t)}{v_0} = \frac{\left( \alpha(T_1 - T_0) \frac{p_0 M}{RT_0} g \sin(\gamma) - \Delta p_B \right) * L_I \frac{k(\varepsilon)}{\eta}}{\left( \alpha(T_1 - T_0) \frac{p_0 M}{RT_0} g \sin(\gamma) \right) * L_I \frac{k(\varepsilon)}{\eta}}$$

Die verwendeten Symbole sind im Zusammenhang mit der Erläuterung der Grundlagen in Abschnitt 9.1 eingeführt worden. Nach einigen Umformungen kann (F 40) folgendermaßen umgeschrieben werden:

$$(F 41) \quad v(t) = v_0 \left( 1 - \frac{\Delta p_B * \frac{k(\varepsilon)}{\eta}}{L_I * v_0} \right)$$

Durch Einsetzen von (F 41) in (F 39) entsteht eine Differentialgleichung für die Druckdifferenz  $\Delta p_B$ :

$$(F 42) \quad \frac{d\Delta p_B}{dt} = \frac{p_0}{H_B} v_0 \left( 1 - \frac{\Delta p_B k(\varepsilon)}{v_0 L_I \eta} \right)$$

mit der Anfangsbedingung:

$$(F 43) \quad \Delta p_B(t=0) = 0$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung erfolgt über einen Separationsansatz. Im Ergebnis einiger Umformungen und Einsetzen der Anfangsbedingung kann die folgende Lösung für  $\Delta p_B$  abgeleitet werden:

$$(F 44) \quad \Delta p_B(t) = L_I g \sin(\gamma) \alpha(T_1 - T_0) \rho_0 \left( 1 - \exp\left( -\frac{p_0 k(\varepsilon) t}{H_B L_I \eta} \right) \right)$$

Wird (F 44) wieder in (F 36) eingesetzt, entsteht schließlich die gesuchte Gleichung für den Druckunterschied als Funktion der Zeit.

$$(F 45) \quad \Delta p(t) = (\Delta p_I - \Delta p_B) = L_I g \sin(\gamma) \alpha(T_1 - T_0) \rho_0 \exp\left( -\frac{p_0 k(\varepsilon) t}{H_B L_I \eta} \right)$$

Der Vorfaktor  $L_I g \sin(\gamma) \alpha(T_1 - T_0) \rho_0$  bestimmt den maximalen Druckunterschied für die Gesamtströmungsbahn, mithin einschließlich der Box. Dieser Druckunterschied tritt ohne Box bzw. zum Zeitpunkt  $t = 0$  auf, also noch in dem Moment, wenn die Box aufgestellt wird. Danach nimmt

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

dieser Druckunterschied ab und die konvektive Strömung kommt zum Erliegen. Diese Zeitabhängigkeit wird vom zweiten Term gesteuert:  $\exp\left(-\frac{p_0 k(\varepsilon) t}{H_B L_I \eta}\right)$ . Es handelt sich offensichtlich um ein exponentielles Abnehmen des Gesamtdruckunterschiedes mit der Zeit.

Beide Terme werden nun mit plausiblen Zahlenwerten quantifiziert, um ihre Größenordnung abzuschätzen. Die folgenden plausiblen Annahmen werden dazu getroffen:

$$L_I \sin(\gamma) = H = 20m$$

$$(T_1 - T_0) = 10K$$

$$\alpha = 1/300K$$

$$\rho_0 = 1kg/m^3$$

Mit diesen Zahlenwerten resultiert für den ersten Term, d. h. den Maximaldruck, ein Wert von ca. 7 Pa. Dieser Wert entspricht der Größenordnung nach den im Modell berechneten Werten für den Druckunterschied außen - innen der betrachteten Halden.

Für die Abschätzung des zweiten Terms sind weitere Annahmen zu Parametern notwendig:

$$k(\varepsilon) = 1e - 7m^2 \dots 1e - 9m^2$$

$$p_0 = 10^5 Pa$$

$$L = 100m$$

$$\eta = 17.1 * 10^{-6} N/(m^2 * s)$$

$$H_B = 0.5m$$

Im Ergebnis der Variation der Permeabilität ergeben sich folgende Wertepaare für die über

$$(F 46) \quad \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) = \exp\left(-\frac{p_0 k(\varepsilon) t}{H_B L_I \eta}\right)$$

definierte Zeitkonstante  $\tau$ :

## Singuläre Radonfreisetzungen

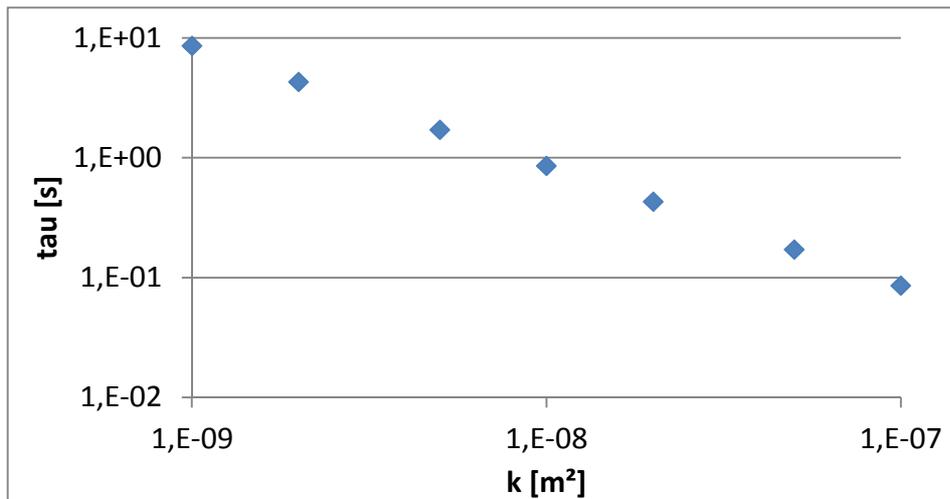


Abbildung 88: Abgeschätzte Zeitkonstante für die zeitliche Änderung des Druckes. Nach einer Zeitdifferenz entsprechend dieser Zeitkonstanten sinkt die Druckdifferenz auf den Teil 1/e ab

Für den kleinsten in Abbildung 88 betrachteten Wert für die Permeabilität (1e-9 m<sup>2</sup>) wird der Zeitverlauf der Druckdifferenz nachfolgend visualisiert. Dieser Permeabilitätswert ist geringer als der für die Prognoserechnungen verwendete Wert. Höhere Permeabilitäten führen zu einer noch schnelleren Abnahme der die Konvektion antreibenden Druckdifferenz.

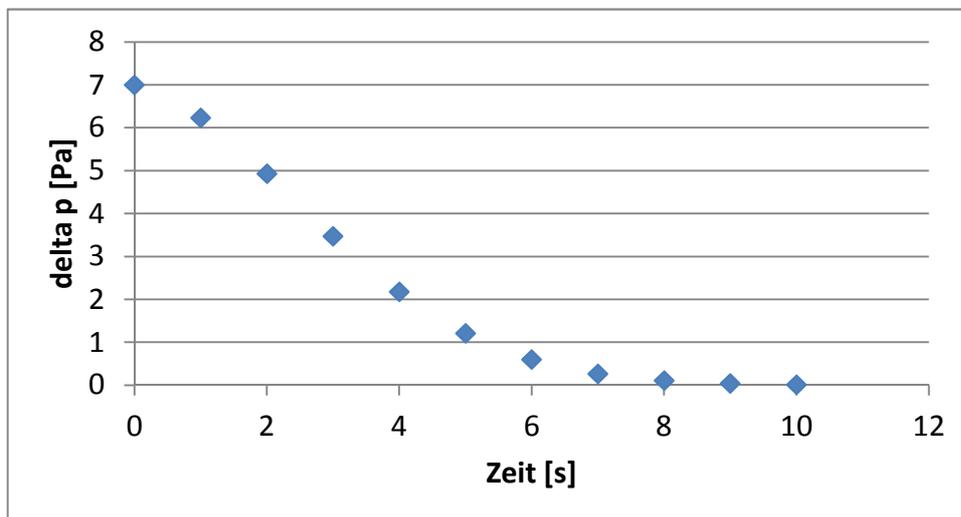


Abbildung 89: Zeitlicher Verlauf der die Konvektion antreibenden Druckdifferenz entlang einer konvektiv durchströmten Bahn, wenn sich am Ende der Strömungsbahn eine luftdichte Messbox befindet

Aus den Ergebnissen entsprechend Abbildung 88 wird deutlich, dass sich der Druckausgleich in einem Zeitraum von in der Regel deutlich weniger als einer Minute einstellt. Deshalb wird mit

einer solchen Messanordnung lediglich die diffusive Komponente der Radonexhalation gemessen.

Daraus muss die Schlussfolgerung gezogen werden, dass mit einer luftdicht geschlossenen Messbox die konvektiv bedingte Radonexhalation nicht gemessen werden kann. Die Hauptursache ist darin zu sehen, dass die notwendigen Messzeiten der AlphaGUARDs (> 10 Min) deutlich über dem Zeitintervall liegen, in welchem bei geschlossener Box konvektive Strömungen auftreten ( $\ll$  1 Min).

In den nächsten Abschnitten werden Messungen mit nicht vollständig geschlossener Box betrachtet. Zunächst wird angenommen, dass die Box an sich luftdicht ist, jedoch die Luft an der Unterkante der Box konvektiv ausströmen kann.

### 10.5.2 Abschätzungen „unten offene Box“ bei konvektiven Rn-Austrag

Mit der Bezeichnung „unten offene Box“ wird angenommen, dass die Box an sich luftdicht ist, jedoch die an der Basisfläche einströmende Luft ohne Druckverlust unten seitlich wieder ausströmen kann. Es wird somit im Gegensatz zum Beispiel in Abschnitt 10.5.1 unterstellt, dass die Box keine Auswirkungen auf die Durchströmung der Halde selbst hat.

Die Messanordnung ist in nachfolgender Abbildung 90 dargestellt.

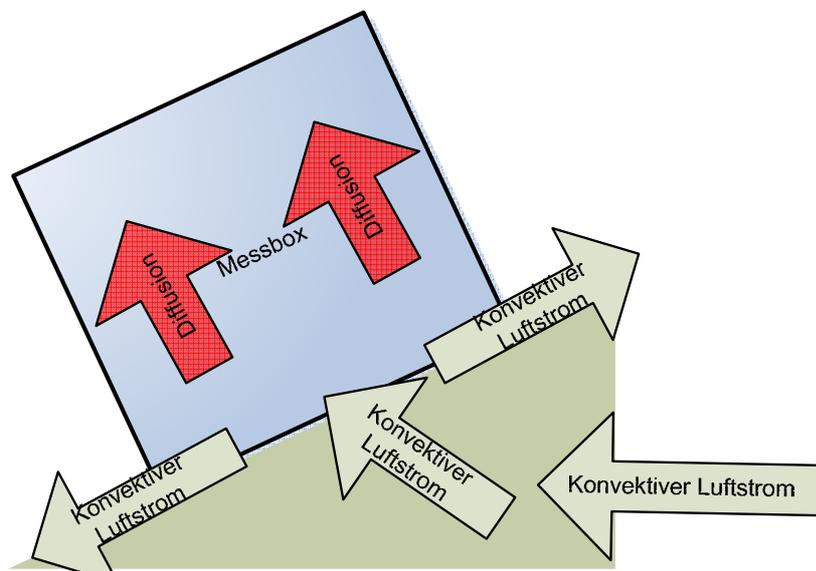


Abbildung 90: Schematische Darstellung einer Messbox am Haldenfuß, in die konvektiver Luft eintritt erfolgt und am Rand wieder austritt. Im Inneren der Box erfolgt ausschließlich diffusiver Transport.

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

Die Messbox entsprechend Abbildung 90 habe eine Höhe  $H_B$  und eine Grundfläche  $A_B$ , mithin das Volumen  $V_B = A_B \cdot H_B$ .

Nachfolgend soll nunmehr die zeitliche Entwicklung der Rn-Aktivitätskonzentration in der Box abgeschätzt werden.

Dazu werden die nachfolgend beschriebenen Annahmen getroffen. Die über die Grundfläche eintretende Luft strömt direkt am Boden zum Rand und tritt dort ohne zusätzlichen Strömungswiderstand aus. Damit besitzt diese dünne Bodenschicht stets die aus der Halde austretende Aktivitätskonzentration  $c_H$  (aufgrund der Verweilzeiten kann der Rn-Zerfall hier vernachlässigt werden). Die Konzentration in der Box wird über Diffusion an die Haldenkonzentration angeglichen, wobei für den Anfangszustand der Einfachheit halber angenommen wird, dass die Anfangskonzentration  $c_0$  in der Box  $c_0 = 0 \text{ Bq/m}^3$  ist.

Unter diesen Annahmen muss innerhalb der Box lediglich noch die eindimensionale Diffusionsgleichung gelöst werden, um die Konzentrationsentwicklung als Funktion der Zeit zu ermitteln. Dies wurde numerisch umgesetzt. Die folgenden Parameter wurden dazu zugrunde gelegt:

$$D_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$H_B = 0.4 \text{ m}$$

$$c_H = 1 \text{ Bq/m}^3$$

$$c_0 = 0 \text{ Bq/m}^3$$

Zudem wurde zunächst angenommen, dass die Box zum Zeitpunkt  $t = 0 \text{ s}$  im Inneren die Konzentration  $c_0$  besitzt und die Messung kontinuierlich erfolgt. Die Rn-Aktivitätskonzentrationen werden für 10 unterschiedliche Höhen, die sich jeweils um 1/10 der Gesamthöhe unterscheiden, berechnet.

Im Ergebnis der Berechnungen werden die in Abbildung 91 dargestellten Verläufe der relativen Rn-Aktivitätskonzentrationen für die unterschiedlichen Höhen ( $h_0$  am Boden,  $h_{10}$  an der Oberkante der Box) in der Box berechnet. Relative Rn-Aktivitätskonzentrationen insofern, dass die Konzentration der Haldenluft auf  $1 \text{ Bq/m}^3$  gesetzt wurde und alle berechneten Konzentrationen dazu ins Verhältnis gesetzt werden.

Anhand von Abbildung 91 wird deutlich, dass die Rn-Aktivitätskonzentration für den diffusiven Transport in der Box einem Zeitraum von ca. 1h benötigt, um sich der Haldenluftkonzentration anzupassen. Da unter den genannten Bedingungen Aussagen über den Volumenstrom der an der Basisfläche in die Box eintritt nicht getroffen werden können, können unter den getroffenen Annahmen lediglich Rückschlüsse auf die Rn-Aktivitätskonzentrationen gezogen werden. Dabei sind bei der Interpretation jedoch die aufgrund der klimatischen Randbedingungen zu erwarten-

## Singuläre Radonfreisetzungen

den Fluktuationen in der Durchströmungsgeschwindigkeit der Halde und die daraus resultierenden Konzentrationsschwankungen zu beachten. Es wird vermutet, dass die so durchgeführte Konzentrationsmessung zu träge ist.

Unter den getroffenen Annahmen muss festgestellt werden, dass mit dieser Messanordnung Aussagen zur Exhalationsrate nicht möglich sind.

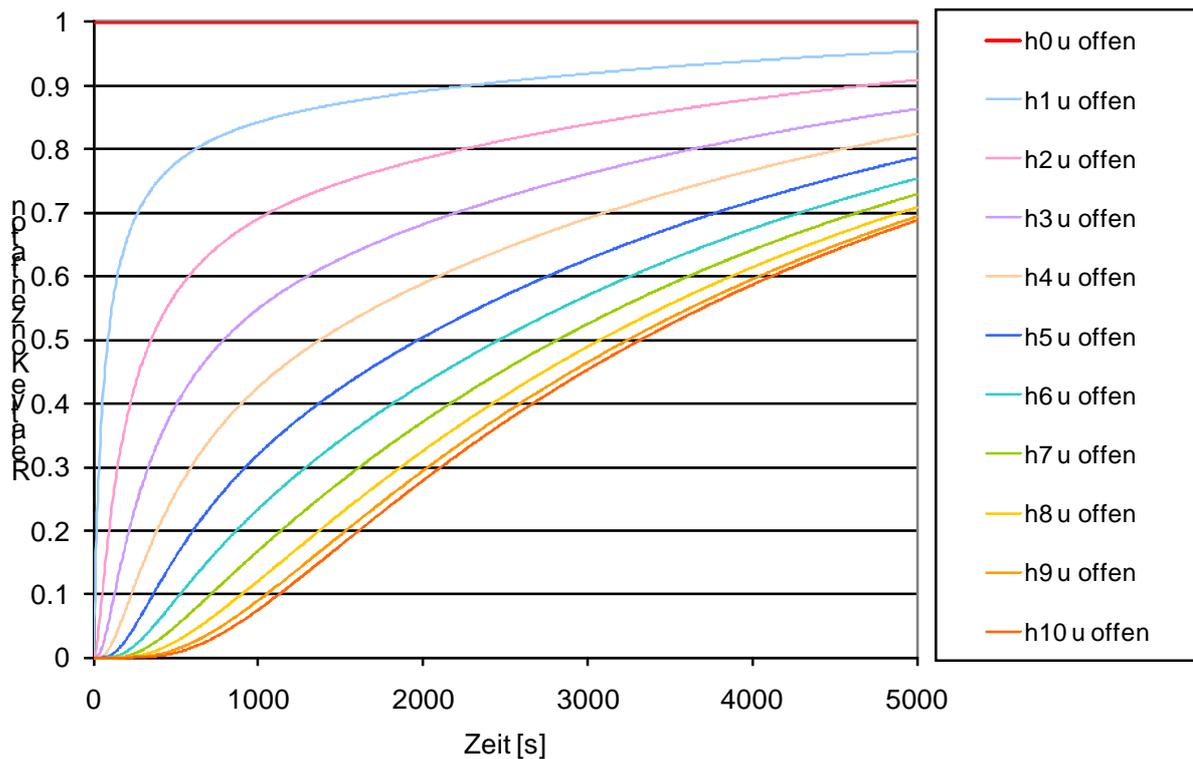


Abbildung 91: Zeitlicher Verlauf der Rn-Aktivitätskonzentration für unterschiedliche Beobachtungspunkte in der Box für eine unten offene Box

Für eine Interpretation der Ergebnisse soll nunmehr noch dargestellt werden, wie diese berechneten kontinuierlichen Kurven messtechnisch erfasst werden würden. Dies hat insbesondere deshalb eine Bedeutung, da die Messzeiten  $\Delta t_{Mess}$  für eine Einzelmessung für jeweils 10 Minuten eingestellt wurden. Innerhalb dieser 10 Minuten erfolgt eine kumulative Messung aus der ein Wert für die mittlere Rn-Aktivitätskonzentration abgeleitet wird.

Zudem ist zu beachten, dass in Realität der Beginn der Messung (d. h. des 10-Minuten-Intervalls) nicht zwingend mit einer Zustandsänderung (hier Aufsetzen der Box) zusammenfällt. Deshalb wurden die Messwerte jeweils für unterschiedliche Zeitverschiebungen berechnet. Die Zeitverschiebungen variieren dabei von 60 s bis zu 540 s. Aus Gründen der Übersichtlichkeit erfolgt eine Beschränkung in der Darstellung auf solche Messintervalle die um jeweils 2 Minuten gegeneinander verschoben sind. Mit dieser Darstellung soll der Unterschied zwischen der real zu einem Zeitpunkt vorhandenen Messgröße und der mit der Messanordnung ermittelten Größe

## Singuläre Radonfreisetzungen

illustriert werden. Speziell soll dargestellt werden, wie gut der tatsächliche Verlauf durch die zeitliche Auflösung abgebildet werden kann.

Um hinsichtlich einer Plausibilitätsbetrachtung möglichst realistische Kurvenverläufe darzustellen, erfolgen die Berechnungen unter zusätzlichen Annahmen für die Haldenluftkonzentration und die Höhe des AlphaGUARDs  $H_{\text{alpha}}$  in der Box. Die folgenden Parameter wurden dazu zugrunde gelegt:

$$H_{\text{alpha}} = 0.2\text{m}$$

$$H_B = 0.4\text{m}$$

$$c_H = 200000\text{Bq}/\text{m}^3$$

$$c_0 = 0\text{Bq}/\text{m}^3$$

$$\Delta t_{\text{Mess}} = 600\text{s}$$

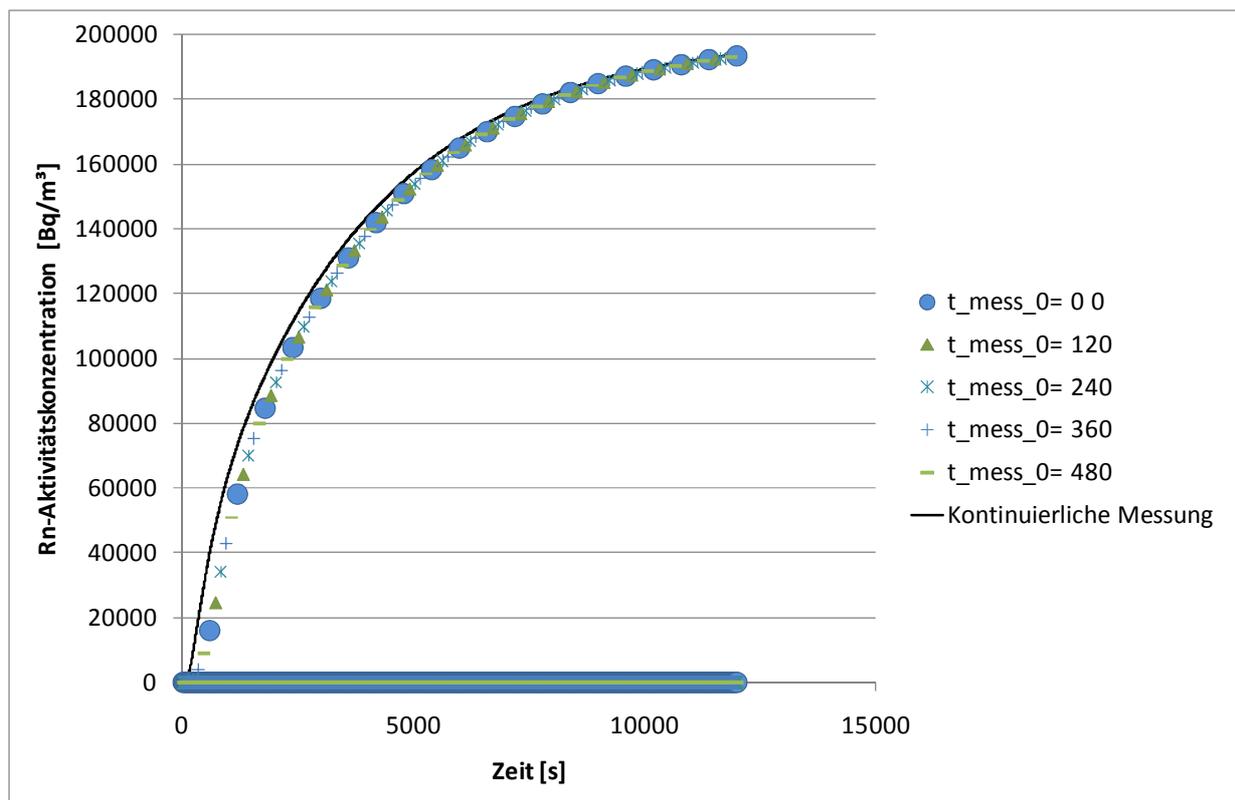


Abbildung 92: Zeitverlauf der simulierten Messergebnisse für die unten offene Box für eine Höhe des Alphaguards in der Box von 20 cm für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box). Im Vergleich Messwerte für eine kontinuierliche Messung (theoretische Betrachtung)

## Singuläre Radonfreisetzungen

Aus dem Kurvenverlauf wird deutlich, dass die Konzentrationsänderung gut mit der zeitlichen Auflösung abgebildet werden kann. Aus den simulierten Messwerten kann nun eine Exhalationsrate berechnet werden. Dazu wird der Anstieg der Konzentrationskurve unter Berücksichtigung der Boxgeometrie ausgewertet. Das Ergebnis dieser Betrachtung ist in Abbildung 93 dargestellt.

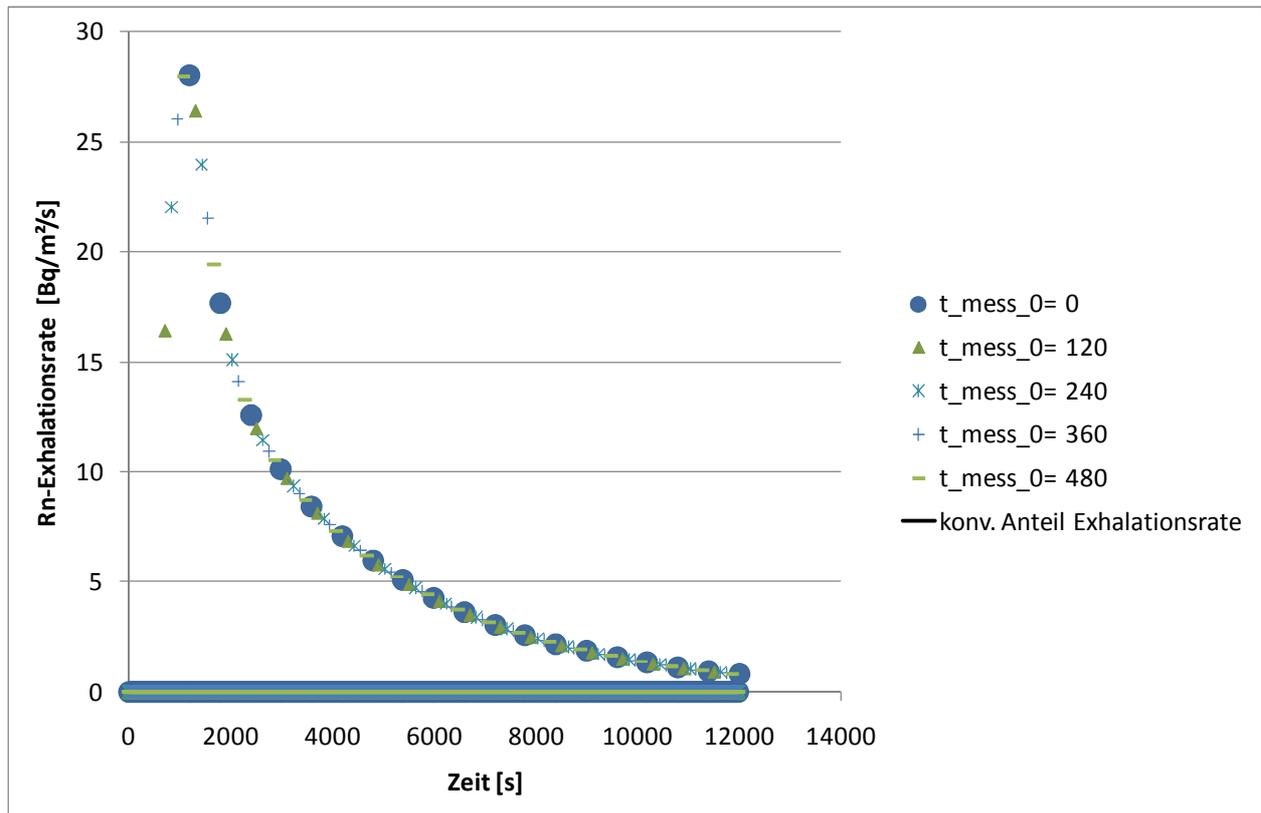


Abbildung 93: Zeitverlauf der aus den simulierten Messergebnissen für die unten offene Box für eine Höhe des Alphaguards in der Box von 20 cm für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box) berechneten Exhalationsraten

Wie bereits erläutert, hat diese Exhalationsrate aufgrund der getroffenen Annahmen nichts mit der tatsächlichen, konvektiv bedingten Exhalationsrate zu tun, da das Messergebnis bei ausreichend großer Haldendurchströmungsgeschwindigkeit unabhängig von dieser ist.

An dieser Stelle soll noch erwähnt werden, dass die für die Modellierung getroffenen Grundannahmen auch gelten für eine Situation gelten, bei der der Rn-Austrag ausschließlich diffusiv vonstattengeht und eine fixe Rn-Aktivitätskonzentration der Haldenluft an der Haldenoberfläche bei ansonsten dichter Box angenommen wird.

### 10.5.3 Abschätzungen der Wirkung des Öffnens und Schließens der Box zunächst bei Beschränkung auf diffusiven Rn-Austrag

Wie bereits am Ende des vorigen Abschnitts angedeutet, kann die konstante Konzentration an der Unterkante der Box auch als diffusiv verursachte Radonkonzentration in der obersten Haldenschicht interpretiert werden. In Ergänzung zu den oben (Abschnitt 10.5.2) getroffenen Annahmen wird jetzt zusätzlich noch angenommen, dass der Deckel der Messbox in einem Intervall von einer Stunde periodisch geöffnet und nach einer weiteren Stunde wieder geschlossen wird. Innerhalb der Box wird nur Diffusion zugelassen. Außerdem wird vereinfachend angenommen, dass die Rn-Aktivitätskonzentration außerhalb der Box stets  $0 \text{ Bq/m}^3$  ist. Diese Annahme stellt dann keine signifikante Einschränkung dar, wenn die Außenluftkonzentration mehr als eine Größenordnung geringer ist, als die Haldenluftkonzentration. In jedem Fall würde eine außen höhere Radon-Aktivitätskonzentration zu einer scheinbar geringeren Exhalationsrate führen.

Hinsichtlich der Parameter werden die nachfolgend beschriebenen Annahmen getroffen. An der Grundfläche der Box liege eine Rn-Aktivitätskonzentration  $c_H$  vor und es gibt keine konvektive Strömungskomponente. Die Konzentration in der Box wird über Diffusion an die Haldenkonzentration angeglichen, wobei für den Anfangszustand der Einfachheit halber angenommen wird, dass die Anfangskonzentration  $c_0$  in der Box  $c_0 = 0 \text{ Bq/m}^3$  ist.

Unter diesen Annahmen muss innerhalb der Box lediglich noch die eindimensionale Diffusionsgleichung gelöst werden, um die Konzentrationsentwicklung als Funktion der Zeit zu ermitteln. In einem Intervall von einer Stunde wird der obere Rand der Box abwechselnd als diffusionsdicht und als mit der Atmosphäre mit der Konzentration  $0 \text{ Bq/m}^3$  verbunden angenommen. Die folgenden Parameter wurden dazu zugrunde gelegt:

$$D_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$H_B = 0.4 \text{ m}$$

$$c_H = 200000 \text{ Bq/m}^3$$

$$c_0 = 0 \text{ Bq/m}^3$$

$$H_{\alpha} = 0.2 \text{ m}$$

$$\Delta t_{\text{Mess}} = 600 \text{ s}$$

Die Messung erfolgt wieder in den Messintervallen von 10 Minuten.

Im Ergebnis der Berechnungen werden die in Abbildung 94 dargestellten Verläufe der Rn-Aktivitätskonzentrationen in der Box berechnet. Dazu wurden analog zum vorigen Abschnitt wiederum verschiedene Zeitverschiebungen der Messung gegenüber Änderungen der Randbedingungen angenommen.

## Singuläre Radonfreisetzungen

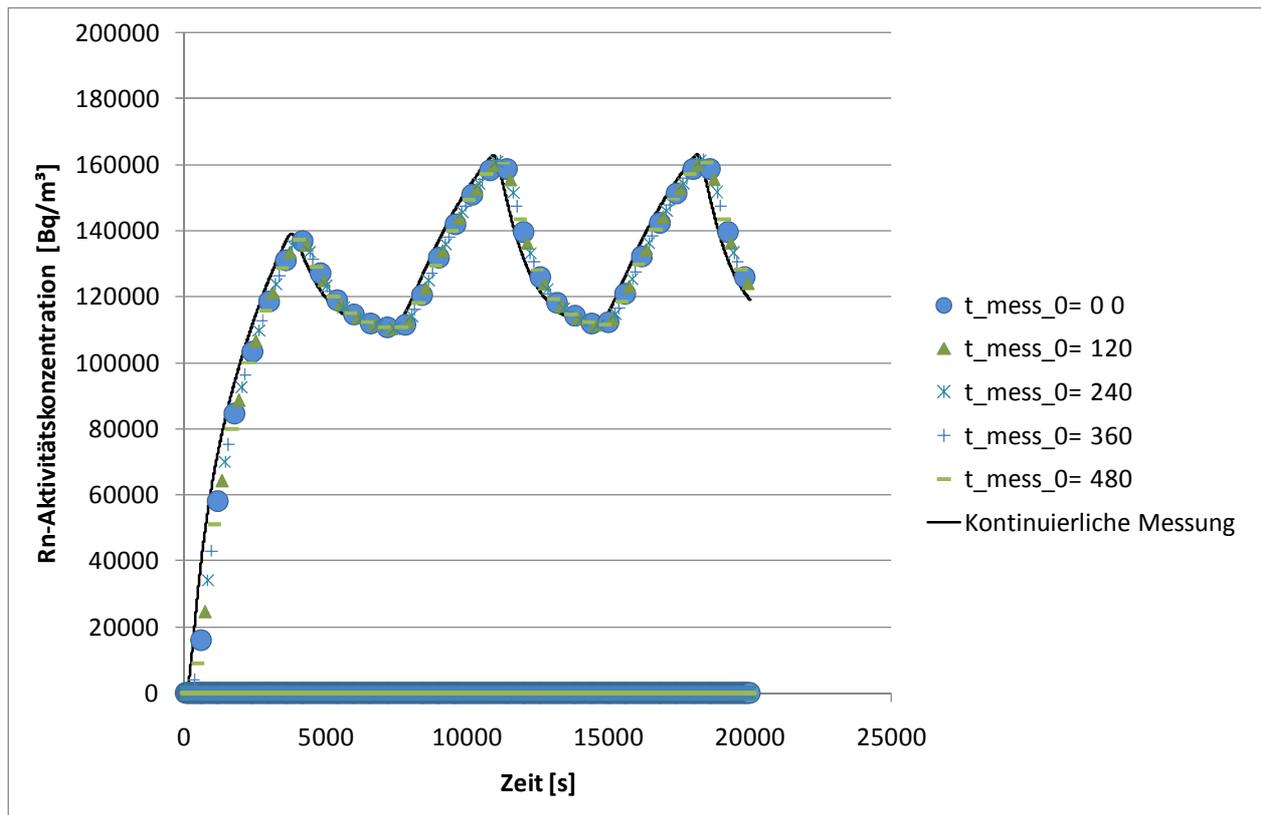


Abbildung 94: Zeitverlauf der simulierten Messergebnisse für eine Höhe des AlphaGUARDs in der Box von 20 cm für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box). Es wurde angenommen, dass die Konzentration am Boden der Box konstant ist und der Deckel im Stundenintervall auf und zu geht. Im Vergleich Messwerte für eine kontinuierliche Messung (theoretische Betrachtung).

Aus dem Kurvenverlauf wird deutlich, dass die Konzentrationsänderung gut mit der zeitlichen Auflösung abgebildet werden kann. Aus den simulierten Messwerten kann nun analog zum vorigen Beispiel eine Exhalationsrate berechnet werden. Dazu wird der Anstieg der Konzentrationskurve unter Berücksichtigung der Boxgeometrie ausgewertet. Das Ergebnis dieser Betrachtung ist in Abbildung 95 dargestellt.

Diese Abbildung zeigt, dass sich die aus dem ersten Anstieg berechnete Exhalationsrate von dem später bestimmten nahezu um den Faktor 3 unterscheidet. Die Ursache ist darin zu sehen, dass bei Beschränkung auf Diffusion die Radonaktivitätskonzentration auch bei offenem Deckel in der Höhe des AlphaGUARDs lediglich auf ca. 70 % des Maximalwertes sinkt (siehe Abbildung 94). Infolgedessen fällt beim Schließen des Deckels der Konzentrationsanstieg geringer aus. Dies entspricht einer geringeren Exhalationsrate.

Die Situation würde sich deutlich anders darstellen, wenn bei offenem Deckel ein leistungsfähigerer Transportmechanismus als die Diffusion vorhanden wäre. So könnte bspw. eine Luftströmung über der Box dazu führen, dass die Luft im Inneren der Box advektiv ausgetauscht wird,

## Singuläre Radonfreisetzungen

was zu einem deutlicheren Abfall der Konzentration beim Öffnen des Deckels und damit zu höheren berechneten Exhalationsraten führen würde. Eine Berechnung dieses Effektes läge deutlich außerhalb des Rahmens der vorliegenden Studie.

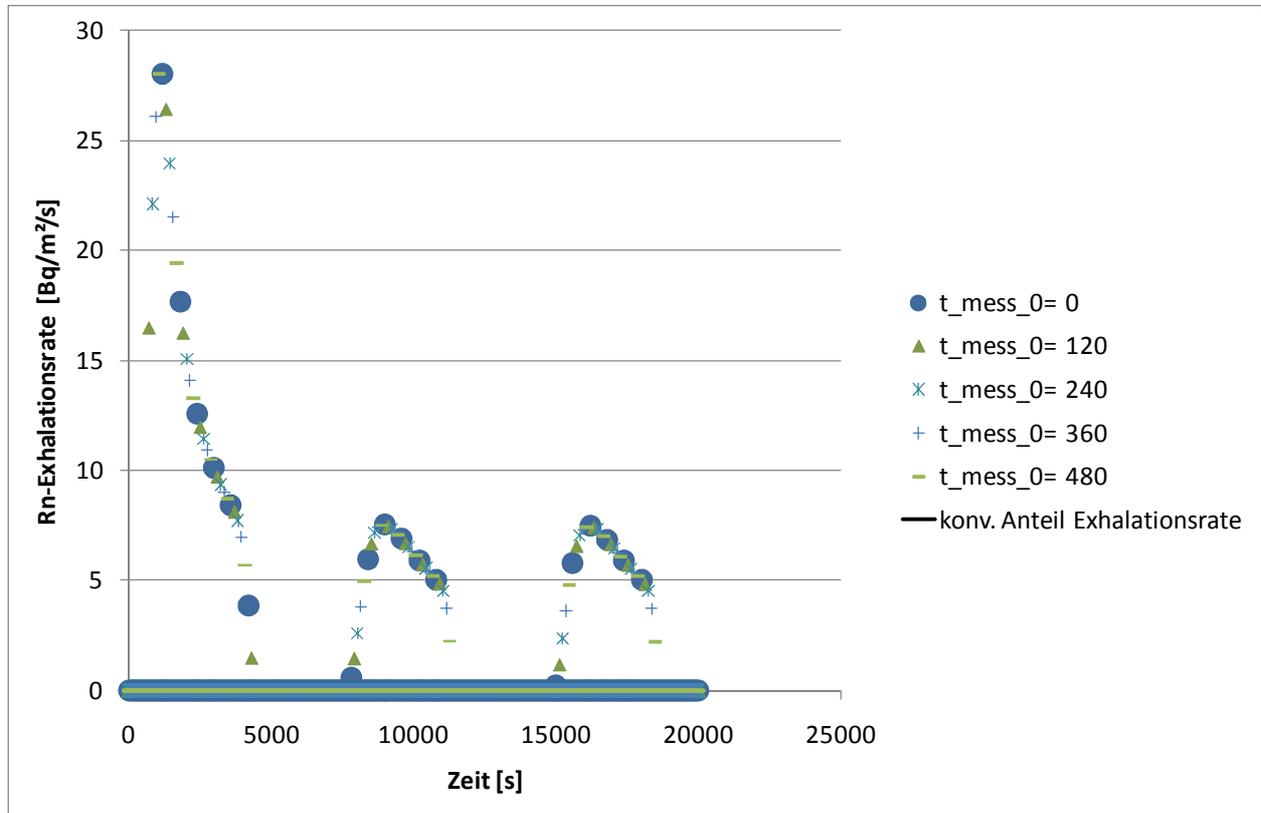


Abbildung 95: Zeitverlauf der aus den simulierten Messergebnissen für den diffusiven Transport für eine Box berechneten Exhalationsraten (Höhe des AlphaGUARDs in der Box von 20 cm) für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box). Es wurde angenommen, dass die Konzentration am Boden der Box konstant ist und der Deckel im Stundenintervall auf und zu geht. Da Konvektion hier nicht betrachtet wird, ist der im Vergleich dargestellte konvektive Anteil der Exhalationsrate 0 Bq/(m<sup>2</sup>\*s).

### 10.5.4 Abschätzungen der Wirkung des Öffnens und Schließens der Box unter Berücksichtigung von konvektiven Rn-Austrag

Die den Berechnungen zugrunde liegende Versuchsanordnung ist analog zum letzten Abschnitt 10.5.3. Nunmehr wird allerdings noch eine konvektive Haldendurchströmung zugelassen. Diese Situation entspricht somit mit hoher Sicherheit der während der Messkampagnen vorgefundenen Situation.

Wieder wird angenommen, dass der Deckel der Messbox in einem Intervall von einer Stunde periodisch geöffnet und nach einer weiteren Stunde wieder geschlossen wird. Innerhalb der Box wird in Abhängigkeit ob der Deckel offen oder geschlossen ist, entweder Konvektion und Diffusi-

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

on oder nur Diffusion zugelassen. Außerdem wird wieder vereinfachend angenommen, dass die Rn-Aktivitätskonzentration außerhalb der Box stets  $0 \text{ Bq/m}^3$  ist.

Diese Annahme stellt dann keine signifikante Einschränkung dar, wenn die Außenluftkonzentration mehr als eine Größenordnung geringer ist, als die Haldenluftkonzentration. In jedem Fall würde eine außen höhere Radon-Aktivitätskonzentration zu einer scheinbar geringeren Exhalationsrate führen.

Hinsichtlich der Parameter werden die nachfolgend beschriebenen Annahmen getroffen. An der Grundfläche der Box liege eine Rn-Aktivitätskonzentration  $c_H$  vor und es gibt eine konvektive Strömungskomponente. Für den Anfangszustand wird wieder der Einfachheit halber angenommen, dass die Anfangskonzentration  $c_0$  in der Box  $c_0 = 0 \text{ Bq/m}^3$  ist.

Innerhalb der Box muss nunmehr die eindimensionale Transportgleichung gelöst werden, um die Konzentrationsentwicklung als Funktion der Zeit zu ermitteln. In einem Intervall von einer Stunde wird der obere Rand der Box abwechselnd als diffusionsdicht bzw. als mit der Atmosphäre mit der Konzentration  $0 \text{ Bq/m}^3$  verbunden angenommen. Es wird zudem idealisiert angenommen, dass eine Konvektion immer stattfindet, d. h. der Deckel zwar diffusionsdicht ist, die Konvektion jedoch nicht behindert wird. Die folgenden Parameter wurden dazu zugrunde gelegt:

$$D_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$H_B = 0.4 \text{ m}$$

$$c_H = 200000 \text{ Bq/m}^3$$

$$c_0 = 0 \text{ Bq/m}^3$$

$$H_{\alpha} = 0.2 \text{ m}$$

$$\Delta t_{\text{Mess}} = 600 \text{ s}$$

Für die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  wird entsprechend der Modellierungsergebnisse in Kapitel 10 eine Bandbreite von  $v = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$  bis  $v = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  angenommen. Dies entspricht in etwa der Bandbreite der Permeabilität von  $1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$  bis  $1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ . Die Berechnungen werden durchgeführt für folgende Volumenstromgeschwindigkeiten:  $v = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ ,  $1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ ,  $5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  und  $1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ . Die Ergebnisse werden analog zu den vorangegangenen Abschnitten jeweils für die Radonaktivitätskonzentration und die abgeleitete Radonexhalationsrate dargestellt.

Die Messung erfolgt wieder in Messintervallen von 10 Minuten. Dazu wurden wiederum verschiedene Zeitverschiebungen der Messung gegenüber Änderungen der Randbedingungen angenommen.

### 10.5.4.1 Strömungsgeschwindigkeit $v = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s

Für eine Strömungsgeschwindigkeit von  $v = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s wird der in Abbildung 96 dargestellte Verlauf der Rn-Aktivitätskonzentrationen in der Box berechnet.

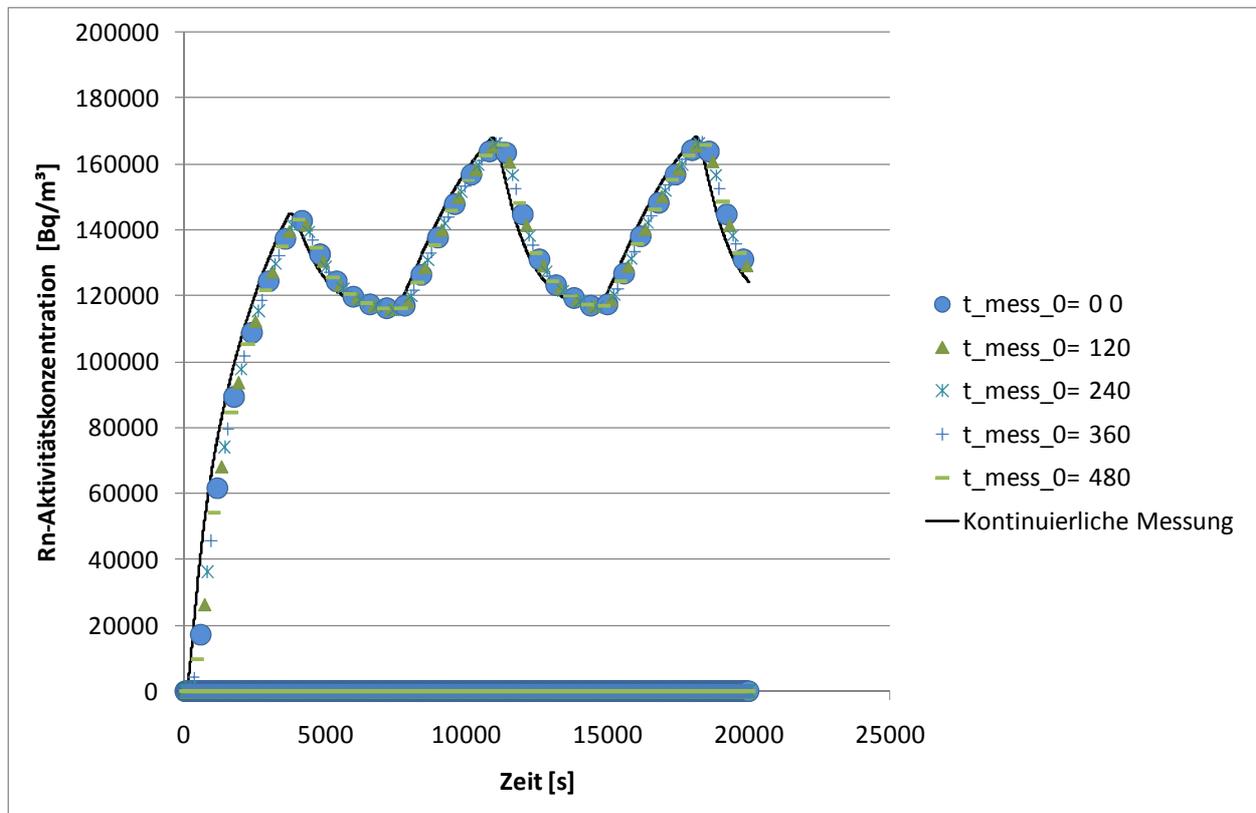


Abbildung 96: Zeitverlauf der simulierten Messergebnisse für eine Höhe des AlphaGUARDs in der Box von 20 cm für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box). Es wurde eine Volumenstromgeschwindigkeit der Haldenluft von  $10^{-5}$  m/s angenommen. Zudem wurde unterstellt, dass die Konzentration am Boden der Box der Haldenluftkonzentration entspricht und konstant ist und dass der Deckel im Stundenintervall auf und zu geht. Im Vergleich Messwerte für eine kontinuierliche Messung (theoretische Betrachtung).

In Abbildung 96 wird deutlich, dass sich die geringe Strömungsgeschwindigkeit von  $10^{-5}$  m/s nahezu nicht auf die Konzentration auswirkt. Der Kurvenverlauf ist fast identisch mit Abbildung 94. Dies wird auch an der daraus berechneten Exhalationsrate deutlich. Dazu wird der Anstieg der Konzentrationskurve unter Berücksichtigung der Boxgeometrie ausgewertet. Das Ergebnis dieser Betrachtung ist in Abbildung 97 dargestellt.

Diese Abbildung zeigt in etwa die gleiche Exhalationsrate wie Abbildung 95. Der in Abbildung 97 eingetragene theoretische konvektive Anteil der Exhalationsrate beträgt  $2 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  und ist damit dem diffusiven Anteil nachgeordnet.

## Singuläre Radonfreisetzungen

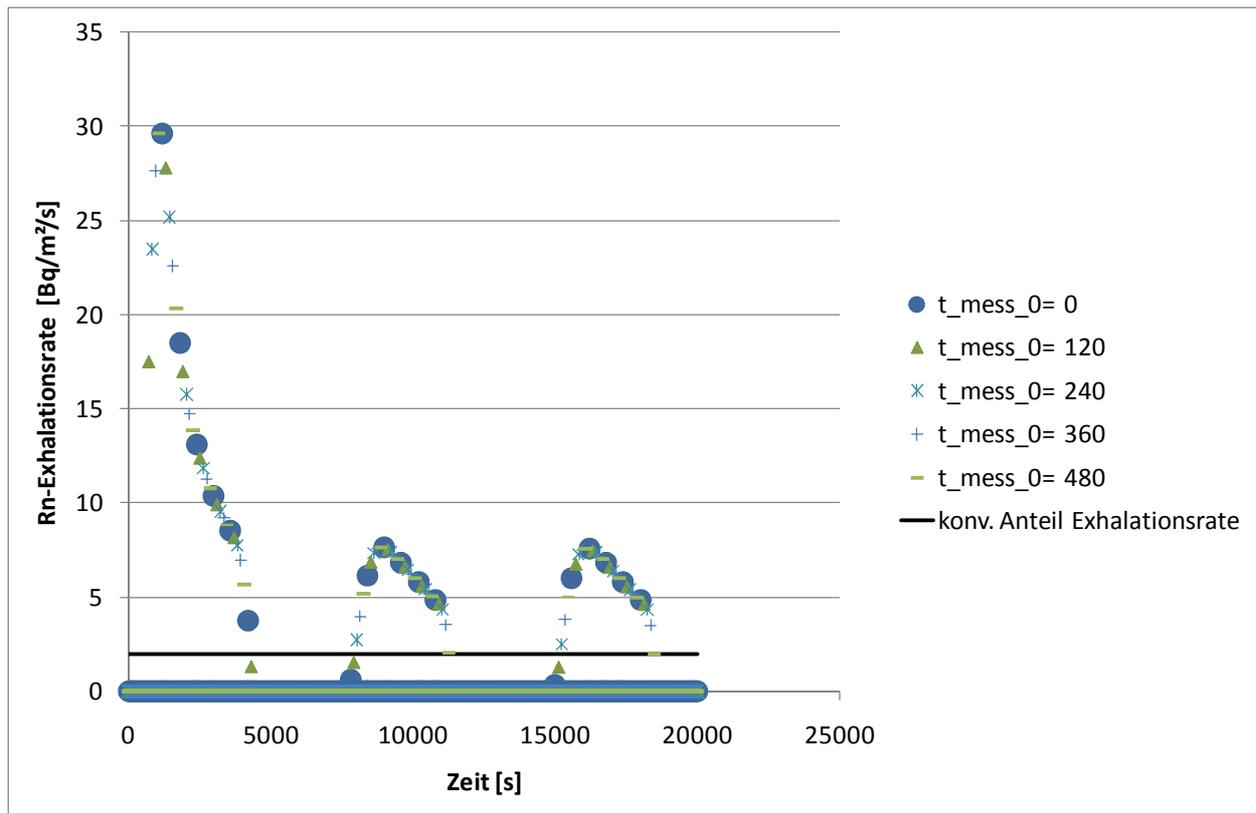


Abbildung 97: Zeitverlauf der aus den simulierten Messergebnissen für den konvektiven und diffusiven Transport für eine Box berechneten Exhalationsraten (Höhe des Alpha-GUARDS in der Box von 20 cm) für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box) für eine Volumenstromgeschwindigkeit von  $10^{-5}$  m/s. Es wurde angenommen, dass die Konzentration am Boden der Box konstant ist und der Deckel im Stundenintervall auf und zu geht. Im Vergleich theoretischer Wert für den rein konvektiven Anteil der Exhalationsrate.

### 10.5.4.2 Strömungsgeschwindigkeit $v = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s

Für eine Strömungsgeschwindigkeit von  $v = 1 \cdot 10^{-4}$  m/s wird der in Abbildung 98 dargestellte Verlauf der Rn-Aktivitätskonzentrationen in der Box berechnet.

## Singuläre Radonfreisetzungen

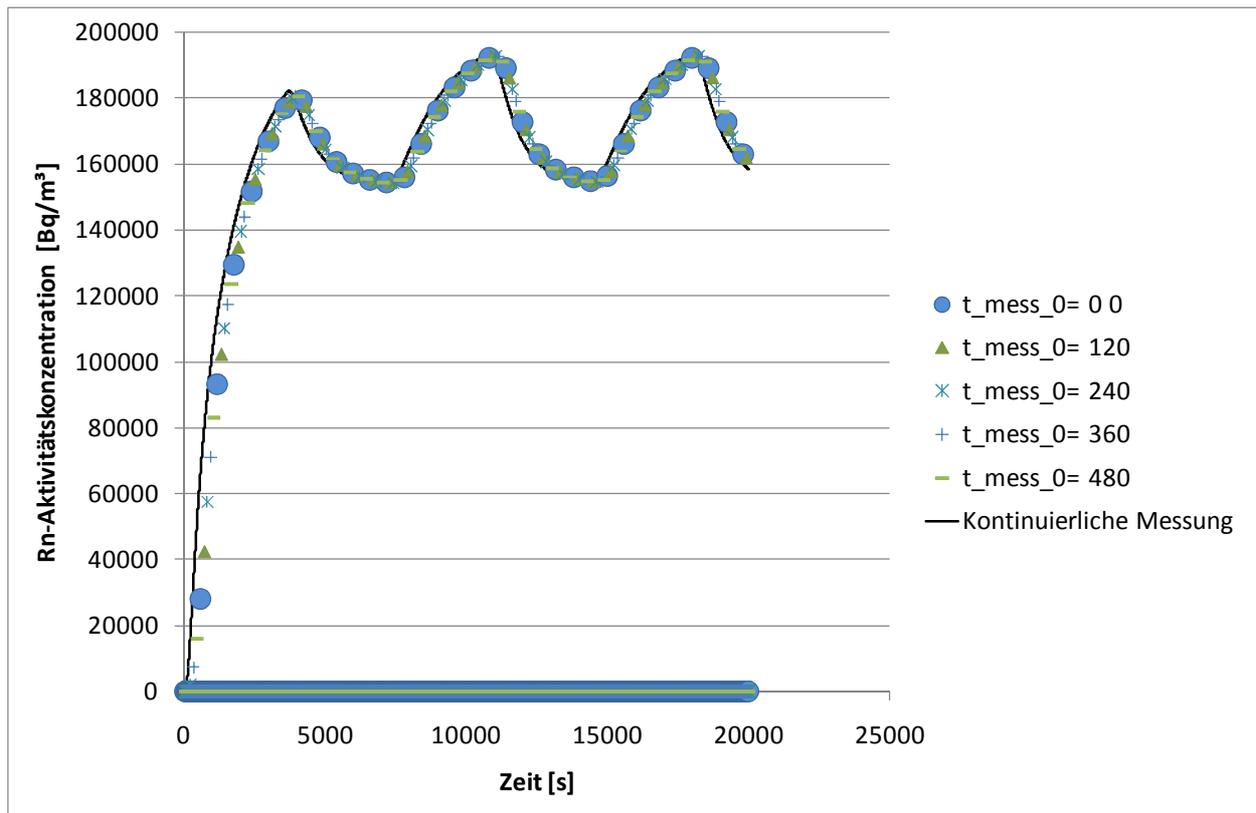


Abbildung 98: Zeitverlauf der simulierten Messergebnisse für eine Höhe des AlphaGUARDs in der Box von 20 cm für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box). Es wurde eine Volumenstromgeschwindigkeit der Haldenluft von  $10^{-4}$  m/s angenommen. Zudem wurde unterstellt, dass die Konzentration am Boden der Box der Haldenluftkonzentration entspricht und konstant ist und dass der Deckel im Stundenintervall auf und zu geht. Im Vergleich Messwerte für eine kontinuierliche Messung (theoretische Betrachtung).

In Abbildung 98 wird deutlich, dass die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit auf  $10^{-4}$  m/s auch zu einer Erhöhung der Konzentration führt. Insgesamt werden in etwa um 10 % höhere Radonaktivitätskonzentrationen erreicht, als ohne Konvektion. Dabei ist allerdings zu bedenken, dass nahezu die Radonaktivitätskonzentration der Haldenluft ( $200.000 \text{ Bq/m}^3$ ) in der Box erreicht wird. Der Unterschied wird an der daraus berechneten Exhalationsrate deutlicher. Dazu wird der Anstieg der Konzentrationskurve unter Berücksichtigung der Boxgeometrie ausgewertet. Das Ergebnis dieser Betrachtung ist in Abbildung 99 dargestellt.

Diese Abbildung zeigt zumindest im ersten Messzyklus (vor dem ersten Deckelöffnen) eine gegenüber dem rein diffusiven Transport deutlich erhöhte Exhalationsrate (Abbildung 95). In den restlichen Messzyklen ist dagegen der erhöhte konvektive Anteil nicht erkennbar. Der in Abbildung 97 eingetragene theoretische konvektive Anteil der Exhalationsrate beträgt  $20 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  und ist damit bereits in der gleichen Größenordnung wie der diffusive Anteil.

## Singuläre Radonfreisetzungen

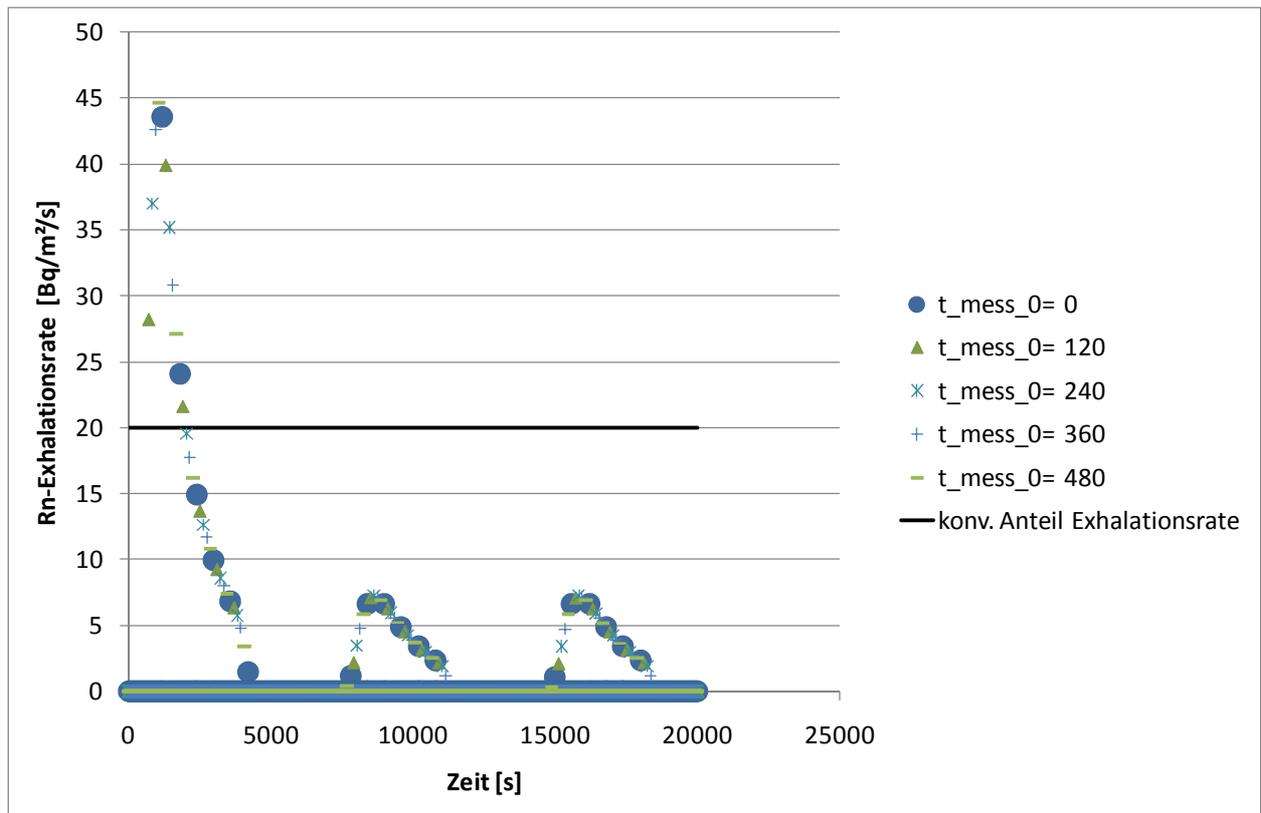


Abbildung 99: Zeitverlauf der aus den simulierten Messergebnissen für den konvektiven und diffusiven Transport für eine Box berechneten Exhalationsraten (Höhe des Alpha-GUARDS in der Box von 20 cm) für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box) für eine Volumenstromgeschwindigkeit von  $10^{-4}$  m/s. Es wurde angenommen, dass die Konzentration am Boden der Box konstant ist und der Deckel im Stundenintervall auf und zu geht. Im Vergleich theoretischer Wert für den rein konvektiven Anteil der Exhalationsrate.

### 10.5.4.3 Strömungsgeschwindigkeit $v = 5 \cdot 10^{-4}$ m/s

Für eine Strömungsgeschwindigkeit von  $v = 5 \cdot 10^{-4}$  m/s wird der in Abbildung 100 dargestellte Verlauf der Rn-Aktivitätskonzentrationen in der Box berechnet.

## Singuläre Radonfreisetzungen

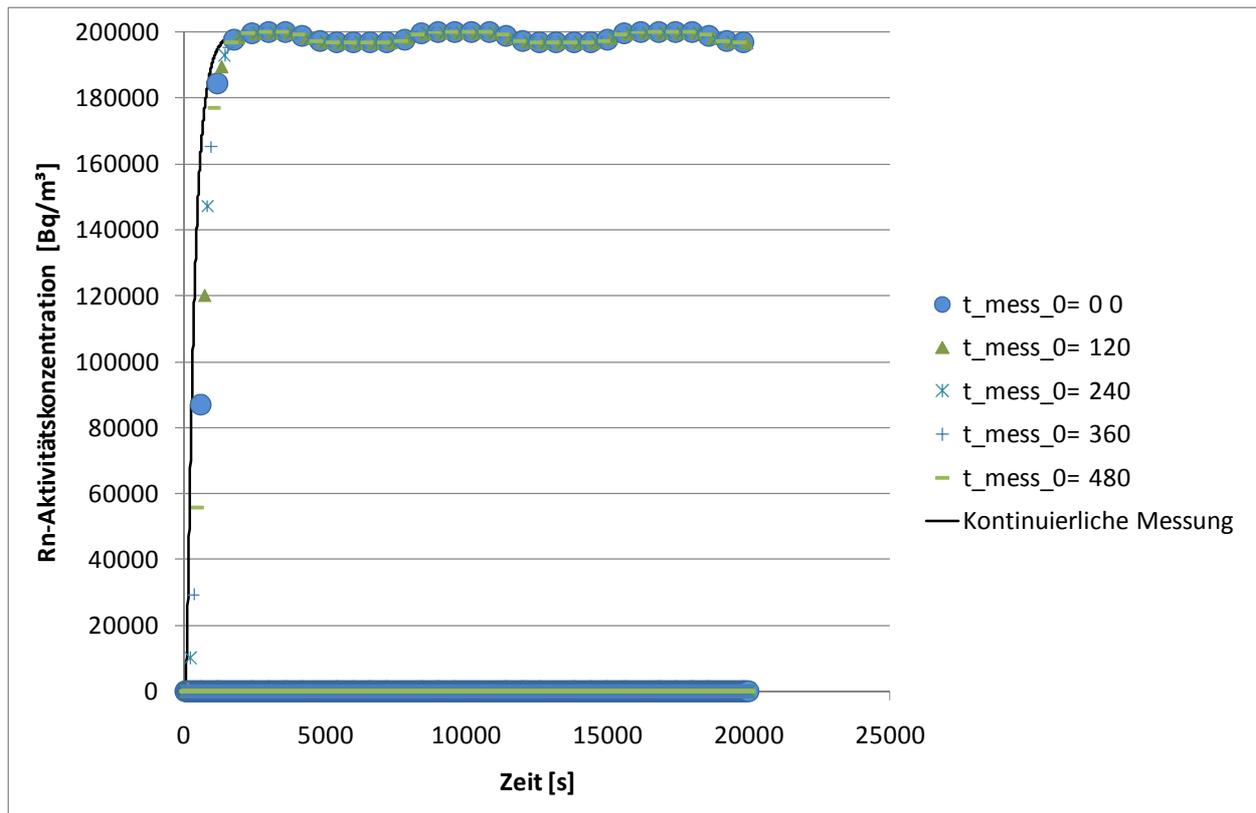


Abbildung 100: Zeitverlauf der simulierten Messergebnisse für eine Höhe des AlphaGUARDs in der Box von 20 cm für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box). Es wurde eine Volumenstromgeschwindigkeit der Haldenluft von  $5 \cdot 10^{-4}$  m/s angenommen. Zudem wurde unterstellt, dass die Konzentration am Boden der Box der Haldenluftkonzentration entspricht und konstant ist und dass der Deckel im Stundenintervall auf und zu geht. Im Vergleich Messwerte für eine kontinuierliche Messung (theoretische Betrachtung).

In Abbildung 100 wird deutlich, dass die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit auf  $5 \cdot 10^{-4}$  m/s dazu führt, dass die Konzentration in der Box nahezu identisch mit der angenommenen Konzentration in der Haldenluft ist und beim Öffnen des Deckels kaum noch schwankt. Es wird wieder der Anstieg der Konzentrationskurve unter Berücksichtigung der Boxgeometrie ausgewertet. Das Ergebnis dieser Betrachtung ist in Abbildung 101 dargestellt.

Diese Abbildung zeigt im ersten Messzyklus (vor dem ersten Deckelöffnen) wiederum eine deutlich erhöhte Exhalationsrate. In den restlichen Messzyklen ist dagegen der erhöhte konvektive Anteil nicht erkennbar. Der in Abbildung 101 eingetragene theoretische konvektive Anteil der Exhalationsrate beträgt  $100 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  und dominiert damit gegenüber dem diffusiven Anteil.

Zudem wird deutlich, dass der im ersten Messintervall tatsächlich gemessene Wert von der eher zufälligen zeitlichen Verschiebung des Messintervalls gegenüber dem Aufsetzen der Box abhängig ist. So würden Exhalationsraten zwischen  $65 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  und  $90 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  abgelesen werden. Demgegenüber beträgt der konvektive Anteil allein bereits  $100 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ . Hier wird deutlich, dass

## Singuläre Radonfreisetzungen

bei Volumenstromgeschwindigkeiten ab der Größenordnung von  $5 \cdot 10^{-4}$  m/s die Exhalationsrate mit den verwendeten Messgeräten und den Messintervallen stets unterschätzt wird. Zudem wird deutlich, dass lediglich der erste Messzyklus die tatsächliche Exhalationsrate in etwa reproduziert. Wie bereits oben diskutiert, ist dies dadurch bedingt, dass bei geöffnetem Deckel insbesondere bei hohen Volumenstromgeschwindigkeiten zu wenig Austausch mit der Atmosphäre stattfindet.

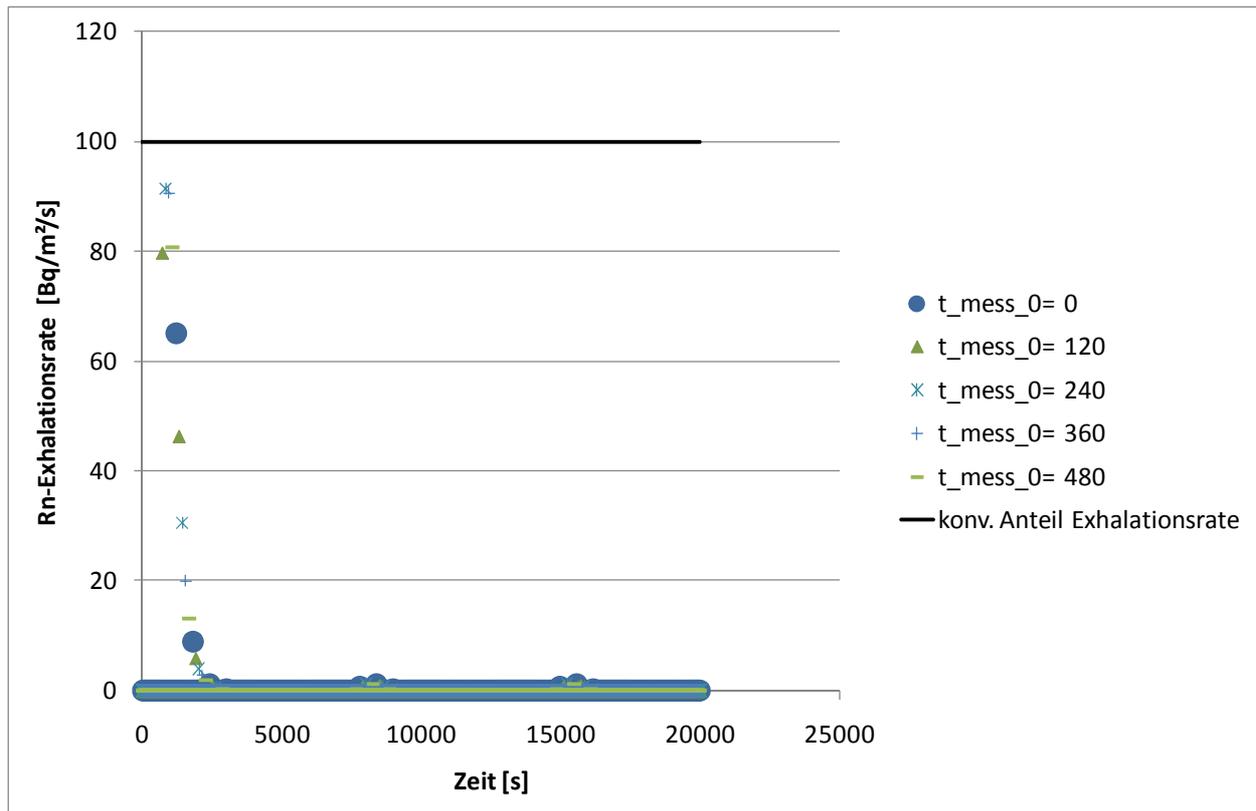


Abbildung 101: Zeitverlauf der aus den simulierten Messergebnissen für den konvektiven und diffusiven Transport für eine Box berechneten Exhalationsraten (Höhe des AlphaGUARDS in der Box von 20 cm) für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box) für eine Volumenstromgeschwindigkeit von  $5 \cdot 10^{-4}$  m/s. Es wurde angenommen, dass die Konzentration am Boden der Box konstant ist und der Deckel im Stundenintervall auf und zu geht. Im Vergleich theoretischer Wert für den rein konvektiven Anteil der Exhalationsrate.

### 10.5.4.4 Strömungsgeschwindigkeit $v = 1 \cdot 10^{-3}$ m/s

Für eine Strömungsgeschwindigkeit von  $v = 15 \cdot 10^{-3}$  m/s wird der in Abbildung 102 dargestellte Verlauf der Rn-Aktivitätskonzentrationen in der Box berechnet.

## Singuläre Radonfreisetzungen

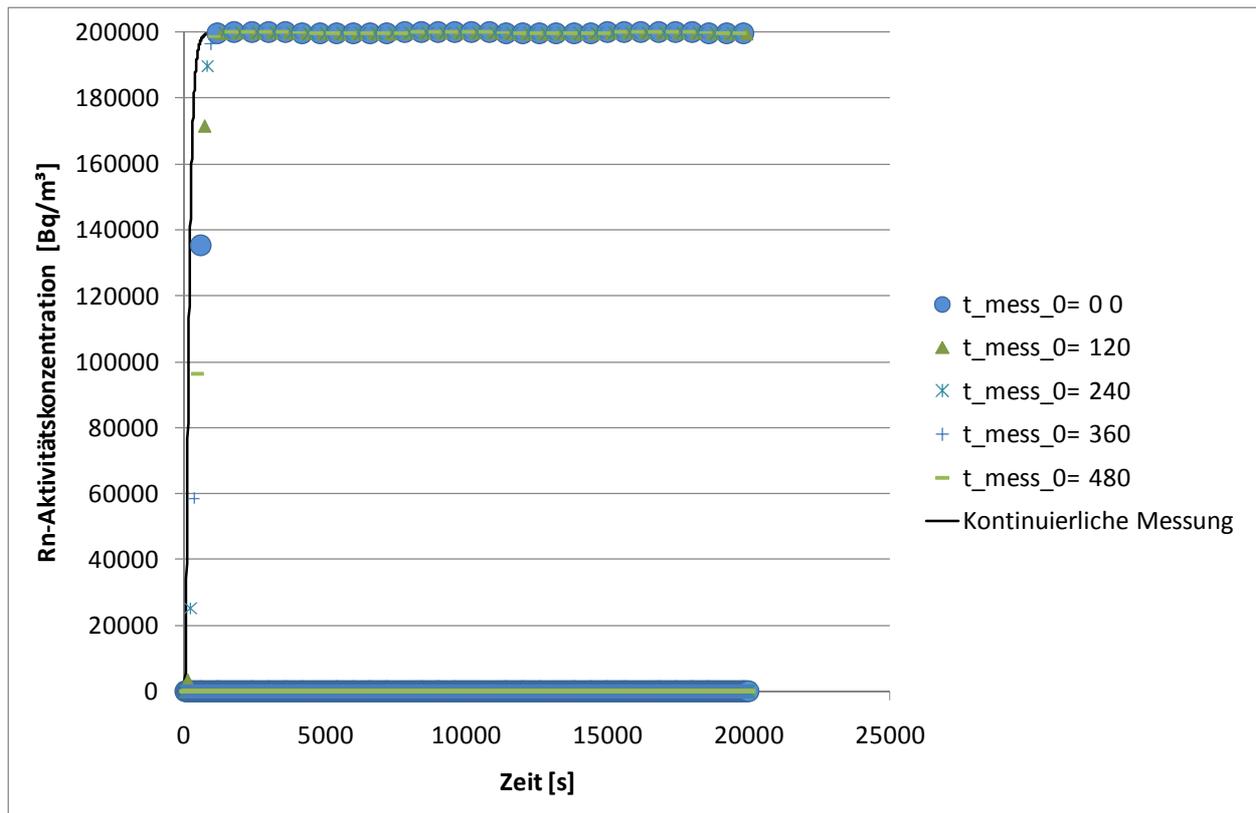


Abbildung 102: Zeitverlauf der simulierten Messergebnisse für eine Höhe des AlphaGUARDs in der Box von 20 cm für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box). Es wurde eine Volumenstromgeschwindigkeit der Haldenluft von  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s angenommen. Zudem wurde unterstellt, dass die Konzentration am Boden der Box der Haldenluftkonzentration entspricht und konstant ist und dass der Deckel im Stundenintervall auf und zu geht. Im Vergleich Messwerte für eine kontinuierliche Messung (theoretische Betrachtung).

In Abbildung 102 wird deutlich, dass die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit auf  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s dazu führt, dass die Konzentration in der Box nach dem anfänglichen Anstieg identisch mit der angenommenen Konzentration in der Haldenluft ist und beim Öffnen des Deckels nicht mehr schwankt. Es wird wieder der Anstieg der Konzentrationskurve unter Berücksichtigung der Boxgeometrie ausgewertet. Das Ergebnis dieser Betrachtung ist in Abbildung 103 dargestellt.

Diese Abbildung zeigt im ersten Messzyklus (vor dem ersten Deckelöffnen) eine Exhalationsrate die lediglich bei ca. 50 % des theoretischen konvektiven Anteils liegt. In den restlichen Messzyklen ist der konvektive Anteil nicht erkennbar. Der in Abbildung 103 eingetragene theoretische konvektive Anteil der Exhalationsrate beträgt  $200 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  und dominiert damit gegenüber dem diffusiven Anteil.

Auch hier wird wieder deutlich, dass der im ersten Messintervall tatsächlich gemessene Wert von der eher zufälligen zeitlichen Verschiebung des Messintervalls gegenüber dem Aufsetzen der Box abhängig ist. So würden Exhalationsraten zwischen  $40 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  und  $120 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  abgele-

## Singuläre Radonfreisetzungen

sen werden. Demgegenüber beträgt der konvektive Anteil allein bereits  $200 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ . Hier wird deutlich, dass bei einer Volumenstromgeschwindigkeit von  $1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  die Exhalationsrate mit den verwendeten Messgeräten und den Messintervallen nicht mehr bestimmbar ist. Zudem wird deutlich, dass lediglich der erste Messzyklus noch die Information bzgl. eines möglichen konvektiven Anteils enthält.

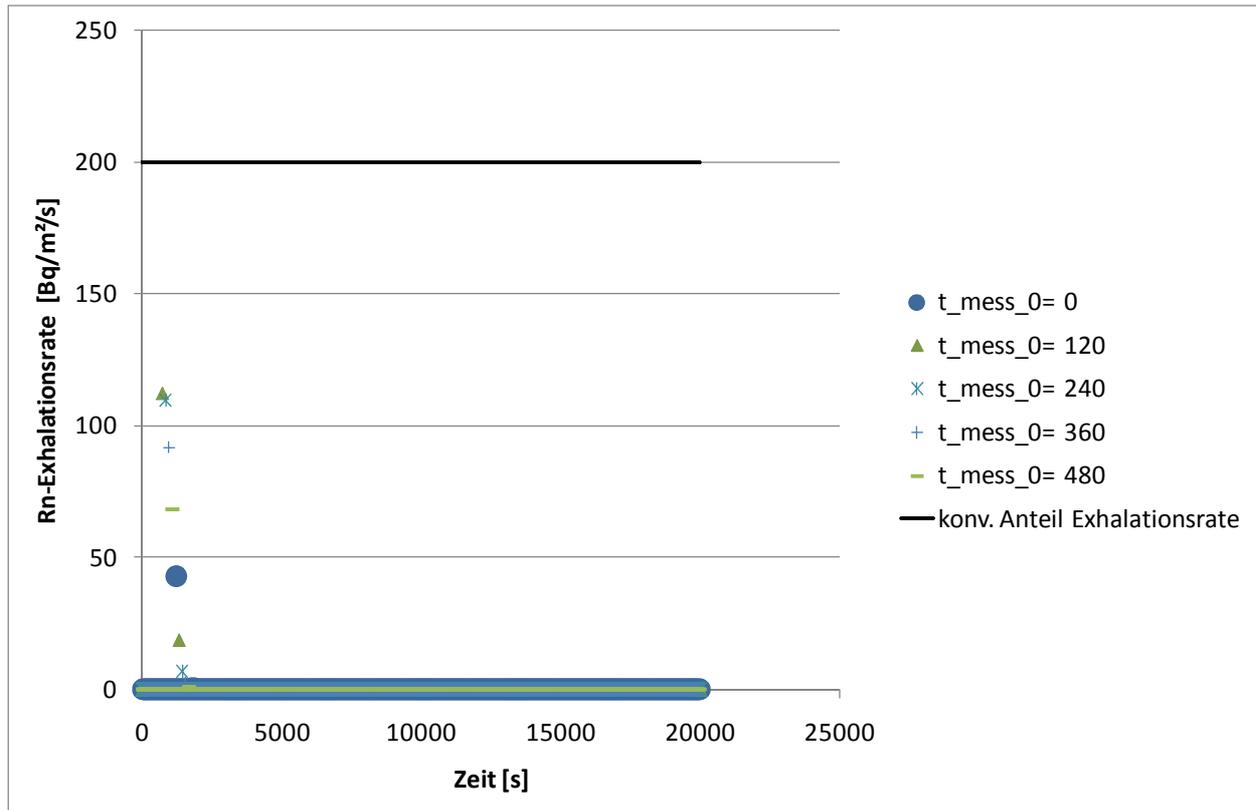


Abbildung 103: Zeitverlauf der aus den simulierten Messergebnissen für den konvektiven und diffusiven Transport für eine Box berechneten Exhalationsraten (Höhe des AlphaGUARDS in der Box von 20 cm) für jeweils unterschiedliche Messzeiten (Zeitverschiebung in Sekunden bezogen auf den Zeitpunkt des Aufsetzens der Box) für eine Volumenstromgeschwindigkeit von  $1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ . Es wurde angenommen, dass die Konzentration am Boden der Box konstant ist und der Deckel im Stundenintervall auf und zu geht. Im Vergleich theoretischer Wert für den rein konvektiven Anteil der Exhalationsrate.

### 10.5.4.5 Diskussion der Messdaten

Die in den vorangegangenen Abschnitten untersuchten Berechnungsergebnisse sollen nunmehr mit realen Messdaten, zumindest qualitativ verglichen werden. Dazu werden die Radonaktivitätskonzentrationen der beiden Messkampagnen herangezogen. Die Konzentrationsverläufe in der Messbox sind in Abbildung 27 und Abbildung 30 dargestellt. Um aus diesen die Exhalationsrate ableiten zu können, müssen noch weitere vereinfachende Annahmen getroffen werden. So ist im Gegensatz zu den durchgeführten Modellierungen das Konzentrationsprofil in der Box unbe-

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

kannt. Deshalb müssen diesbezüglich Zusatzannahmen getroffen werden. Hierbei stellt die ideale Durchmischung die einfachste und plausibelste Annahme dar, weshalb diese für die Auswertung unterstellt wird. Für diese gilt:

$$(F 47) \quad V \frac{dc}{dt} = -v * c * A + E * A - V\lambda c$$

mit:

$V$  - Boxvolumen

$c$  - mittlere Radonaktivitätskonzentration in der Box

$A$  - Grundfläche der Box

$E$  - Radonexhalationsrate

$\lambda$  - Zerfallskonstante für Radon ( $=2,1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ )

Die Änderung der Aktivitätskonzentration resultiert aus dem Einstrom von Haldenluft am Boden und dem Ausstrom der ideal durchmischten Luft in der Box. Die Konzentration nimmt solange zu, bis in der Box asymptotisch die Konzentration der einströmenden Haldenluft erreicht wird. Der Zerfall kann in guter Näherung vernachlässigt werden, da für konvektive Strömungsgeschwindigkeiten im relevanten Bereich von  $1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  gilt  $v/H \gg \lambda$  mit der Boxhöhe  $H$  ( $V = A * H$ ).

Unter der vereinfachenden Annahme der Konstanz von  $v$  und  $E$  kann (F 47) integriert werden:

$$(F 48) \quad c(t) = \frac{E}{v + \lambda H} + \left( c_0 - \frac{E}{v + \lambda H} \right) \exp \left[ - \left( \frac{v}{H} + \lambda \right) (t - t_0) \right]$$

Dabei ist  $c_0$  die Aktivitätskonzentration zum Zeitpunkt  $t_0$ . Wird der Zerfall vernachlässigt, so reduziert sich (F 48) zu:

$$(F 49) \quad c(t) = \frac{E}{v} + \left( c_0 - \frac{E}{v} \right) \exp \left[ - \left( \frac{v}{H} \right) (t - t_0) \right]$$

Diese Gleichung kann genutzt werden, um aus den Messwerten die Parameter  $E$  und  $v$  zu ermitteln. Der Quotient  $E/v$  ergibt sich theoretisch aus dem asymptotischen Verlauf (im Messintervall bis zum nächsten Öffnen des Deckels) und die Geschwindigkeit  $v$  aus der Anpassung der exponentiellen Annäherung. Allerdings zeigen die Messwerte (siehe Abbildung 27 und Abbildung 30) dieses exponentielle Verhalten nicht. Vielmehr beschränken sich signifikante Änderungen der Radonaktivitätskonzentration in der Regel auf ein oder maximal zwei Messintervalle. Unter diesen Bedingungen ist eine Anpassung der Parameter an das exponentielle Verhalten nicht möglich.

Eine Auswertung der Messdaten hinsichtlich der Exhalationsrate und der konvektiven Strömungsgeschwindigkeit kann folglich nur anhand der Änderungen zwischen einzelnen Messinter-

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

vallen erfolgen. Dazu wird wieder die differentielle Schreibweise bemüht und der Zerfall vernachlässigt. Im Ergebnis entsteht folgende Bestimmungsgleichung für E:

$$(F 50) \quad E = \frac{dc}{dt} * H + c * v$$

Da jedoch neben E auch v unbekannt sind, kann diese Gleichung anhand der Messwerte nicht ausgewertet werden. Eine Auswertung ist jedoch möglich, wenn zusätzlich angenommen wird, dass die Exhalationsrate vom konvektiven Anteil dominiert wird und aus der Haldenluftkonzentration in der Nähe der Haldenoberfläche  $c_H$  berechnet werden kann über  $E = v * c_H$ . Somit resultiert:

$$(F 51) \quad E = \frac{dc}{dt} * H * \frac{c_H}{c_H - c}$$

Hier wird noch der Wert der Haldenluftkonzentration in Oberflächennähe benötigt. Um mögliche Bandbreiten aufzuzeigen, wurden für die Haldenluftkonzentration in Oberflächennähe zwei unterschiedliche Annahmen getroffen. Einmal wurde angenommen, dass die Haldenluftkonzentration das Doppelte des maximal in der Box gemessenen Wertes annimmt und einmal, dass die Haldenluftkonzentration lediglich das 1.05-fache des maximal gemessenen Wertes in der Box annimmt. Diese Annahmen sind insofern jeweils sehr stark vereinfachend, da anhand der Modellierungen deutlich geworden ist, dass die Haldenluftkonzentration selbst sehr stark schwankt. Die Auswertung wurde dennoch so durchgeführt, um einen Anhaltspunkt bezgl. der ableitbaren Exhalationsraten aufzuzeigen.

Alternativ zur Annahme, dass die Haldenluftkonzentration vom konvektiven Anteil dominiert wird, kann Gleichung (F 50) auch ausgewertet werden, wenn angenommen wird, dass der asymptotisch erreichbare Wert der Radonaktivitätskonzentration in der Box aus den Messwerten abgeschätzt werden kann. Entsprechend Gleichung (F 49) gilt für den asymptotischen Wert  $\tilde{c}$  :

$$(F 52) \quad c(t \rightarrow \infty) \equiv \tilde{c} = \frac{E}{v}$$

Wird nun  $\tilde{c}$  aus den Messwerten abgelesen, so kann v durch  $\tilde{c}$  und E ausgedrückt werden und es entsteht:

$$(F 53) \quad E = \frac{dc}{dt} * H * \frac{\tilde{c}}{\tilde{c} - c}$$

Dieser Ausdruck ist völlig äquivalent zu Gleichung (F 51). Dies ist auch naheliegend, da die maximal in der Box erreichbare Radonaktivitätskonzentration gleich der Radonaktivitätskonzentration in der Nähe der Haldenoberfläche sein sollte.

## Singuläre Radonfreisetzungen

Die Ergebnisse dieser Auswertung sind für die Messkampagne am Trockenbecken in Abbildung 104 und für die Messkampagne am Steinsee in Abbildung 105 dargestellt.

Rechnerisch negative Exhalationsraten resultieren aus dem Absinken der Konzentration beim Deckelöffnen. Sie wurden hier nicht mit dargestellt.

Es wird deutlich, dass analog wie bei den Berechnungen der für den ersten Messzyklus bestimmte Wert meist deutlich größer ist, als für die restliche Zeit. Dies deutet darauf hin, dass auch hier der konvektive Anteil den größten Beitrag liefert und mit der angewendeten Methodik der exakte Wert für die Exhalationsrate für diese Situation nicht bestimmt werden kann. Die Tatsache, dass in späteren Messzyklen gegenüber den Modellierungen höhere Exhalationsraten auftreten ist wahrscheinlich der Tatsache geschuldet, dass einerseits die Exhalationsrate der Halde schwankt und andererseits beim offenen Deckel ein Austausch stattfindet, der stärker ist als der rein diffusive.

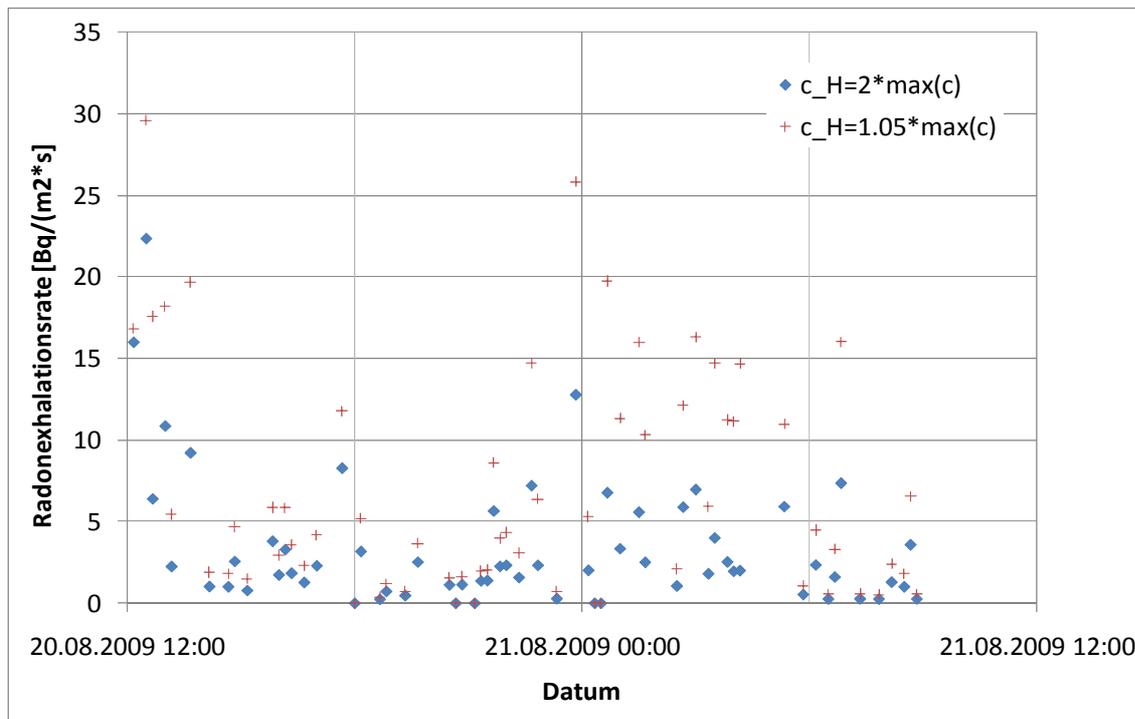


Abbildung 104: Ergebnisse der aus den Messwerten unter verschiedenen Annahmen abgeschätzten Radonexhalationsraten für die Messkampagne am Trockenbecken

## Singuläre Radonfreisetzungen

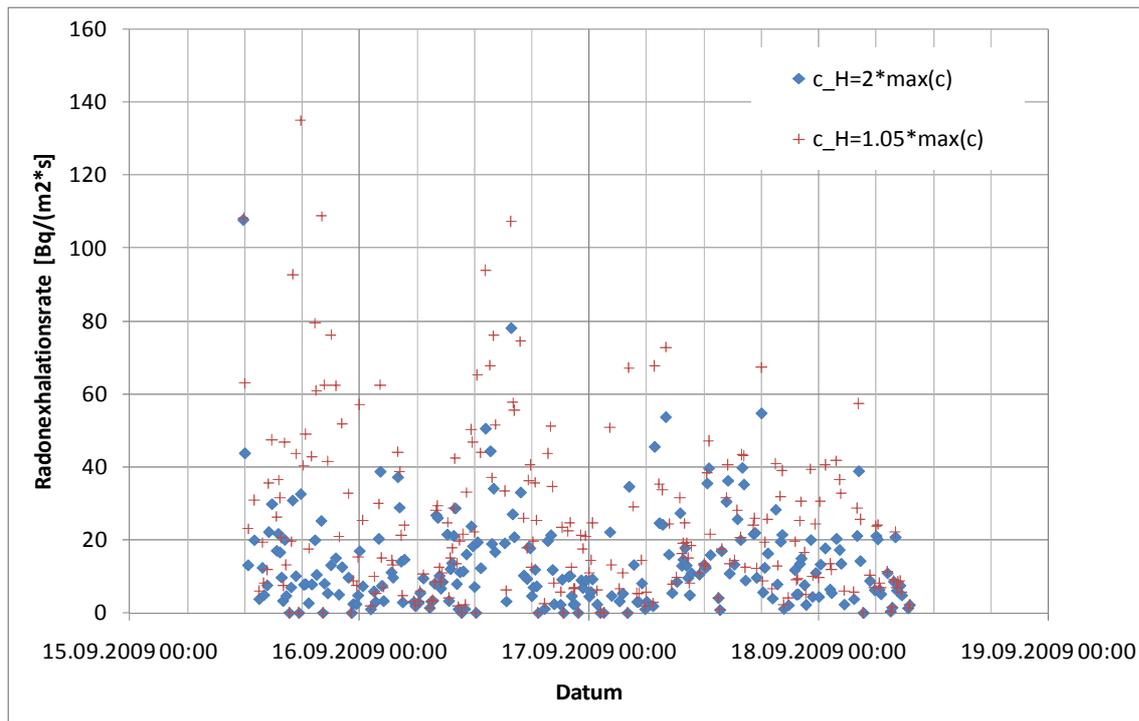


Abbildung 105: Ergebnisse der aus den Messwerten unter verschiedenen Annahmen abgeschätzten Radonexhalationsraten für die Messkampagne am Steinsee

### 10.6 Plausibilitätsabschätzung zur Exhalationsrate

Die Auswertung und Nachrechnung der Messungen mit der Exhalationsbox auf der einen Seite und die Modellierung der gesamten Messkampagnen auf der anderen Seite machen deutlich, dass die aus den Modellierungen resultierenden relative hohen Exhalationsraten, messtechnisch mit der Exhalationsbox so nicht nachgewiesen werden konnten. Dabei ist auch zu beachten, dass bei den Modellierungen zur durchströmten Mächtigkeit der Halde eine Zusatzannahme getroffen werden musste (1 m), so dass bei in Realität höherer Mächtigkeit sich die spezifische Exhalationsrate reduzieren würde.

Um die Plausibilität der aus der Anpassung der Modellparameter bestimmten Exhalationsraten dennoch zu prüfen, sollen hier stark vereinfachte Abschätzungen durchgeführt werden. Dazu soll lediglich angenommen werden, dass die im Abstrom gemessene Radonaktivitätskonzentration durch Kaltluftabflüsse zu den Abstrommesspunkten transportiert worden ist.

Wie in Abschnitt 9.1.2 dargestellt, bewegen sich die maximalen Kaltluftgeschwindigkeiten im Bereich bis 1 m/s. Dieser Wert wird zwischen 0.5 m/s und 1 m/s variiert. Als Mächtigkeit der gesamten sich hangabwärts bewegenden Kaltluftschicht wurde eine Bandbreite von 1 m bis 5 m angenommen. Für größere Mächtigkeiten ist das Kaltlufteinzugsgebiet für beide Halden zu klein.

## Singuläre Radonfreisetzungen

Nun kann für den Radonfluss eine Bilanzgleichung (Kontinuitätsgleichung) aufgestellt werden die besagt, dass der im Abstrom in einer Entfernung  $x$  vom Haldenfuß vorhandene Radonfluss gleich der gesamten Radonexhalation am Haldenfuß ist:

$$(F\ 54) \quad A_0 * E = c_1(x) * A_1(x) * v$$

Dabei sind:

$A_0 = H_0 * B_0$  - Austrittsfläche am Haldenfuß mit der willkürlich wählbaren Breite  $B_0 = 1\text{ m}$  und der definierten Höhe  $H_0 = 1\text{ m}$

$c_1(x)$  - gemessene Radonaktivitätskonzentration in der Entfernung  $x$

$A_1(x)$  - Fläche, für die die gemessene Radonaktivitätskonzentration repräsentativ ist mit der willkürlich wählbaren Breite  $B_1 = B_0 = 1\text{ m}$  (siehe oben) und der Höhe des Radonmessgerätes von  $H_1 = 0.2\text{ m}$

Als Konzentrationsmesswerte werden die Konzentrationen für repräsentative Abstrommesspunkte in jeweils ca. 100 m Entfernung verwendet in solchen Situationen, in denen offensichtlich ein Radontransport durch Kaltluftströmung stattfindet. Für die Halde Trockenbecken ist das der Messpunkt MP 12, für den jeweils Radonaktivitätskonzentrationen von ca. 2.000 Bq/m<sup>3</sup> gemessen wurden. Für die Halde Steinsee ist wurde der Messpunkt MP 6 ausgewählt, für den jeweils Radonaktivitätskonzentrationen von ca. 20.000 Bq/m<sup>3</sup> gemessen wurden.

Aus dem typischen Kaltluftabflussprofil (siehe Abbildung 39) können für die angenommenen Kaltluftmächtigkeiten und Maximalgeschwindigkeiten jeweils die für die Höhe von 0,2 m die Geschwindigkeiten abgelesen werden mit denen dann für beide Halden nach Gleichung (F 54) auf die spezifische Exhalationsrate rückgerechnet werden kann. Die Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Aus Plausibilitätsbetrachtungen abschätzbare Radonexhalationsraten für die beiden Standorte Halde Trockenbecken und Halde Steinsee

Standort			Trockenbecken		Steinsee	
Messpunkt			MP 9	MP 12	MP 4	MP 6
c(x) [Bq/m <sup>3</sup> ]			2.000	2.000	60.000	20.000
H0 [m]			1	1	1	1
H1 [m]			0,2	0,2	0,2	0,2
H [m]	V_max [m/s]	v [m/s]	E [Bq/(m <sup>2</sup> *s)]			
1	0,5	0,45	180	180	5.400	1.800
5	0,5	0,1	40	40	1.200	400
1	1	0,9	360	360	10.800	3.600
5	1	0,2	80	80	2.400	800

Es wird deutlich, dass anhand dieser sehr stark vereinfachten Abschätzungen durchaus die mit dem Modell ermittelten Bereiche der Exhalationsraten plausibel sind. Dabei ist zu beachten, dass sich diese stets auf eine angenommene Austrittsfläche (= Höhe des durchströmten Kanals) mit einer Höhe von 1 m beziehen. Bei größerer Höhe reduziert sich die spezifische Exhalationsrate entsprechend proportional.

### **10.7 Gesamteinschätzung zu den durchgeführten Exhalationsmessungen und zur Exhalationsrate**

Es wird deutlich, dass selbst bei dem vergleichsweise langsamen diffusiv bedingten Transport in der Box das Öffnen des Deckels nicht ausreicht, um geringe Konzentrationen vergleichbar zum Anfangszustand wieder einzustellen. Die resultierenden messbaren Exhalationsraten sind dabei für rein diffusiv bedingte Rn-Freisetzung in ihrer Größenordnung plausibel. Allerdings scheinen unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen vor allem die am Anfang der Messung bestimmten Werte eher zutreffend zu sein, als die beim Öffnen und Schließen ermittelten Werte. Die Ursache ist darin zu sehen, dass die Konzentration in der Box selbst bei geöffnetem Deckel nicht auf zum Anfangszustand vergleichbar niedrige Werte zurückgeht.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass bei den durchgeführten Berechnungen der Austausch der Luft innerhalb der Box mit der Luft außerhalb bei geöffnetem Deckel nur über Diffusion erfolgt. Wenn in Realität außerhalb der Box konvektive Strömungsanteile vorliegen, so wird dieser Austausch durch Verwirbelung an den Boxkanten sicherlich intensiver sein. Das Problem dabei besteht aber darin, dass dieser Prozess nur sehr schwer belastbar quantifiziert werden kann.

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass mit der angewendeten Messmethode und den verwendeten Messintervallen die Radonexhalationsrate nicht bestimmt werden kann. Auf der Grundlage der durchgeführten Berechnungen und Abschätzungen zu den mit der angewendeten Methode messtechnisch ermittelbaren Exhalationsraten müssen die aus den Messwerten abgeleiteten Werte als Untergrenzen für die tatsächliche Exhalationsrate angesehen werden. Diese Situation war vor Durchführung der Messungen so nicht erkennbar, da veröffentlichte Exhalationsraten lediglich einen Bereich von ca. 20 Bq/(m<sup>2</sup>s) bis max. 50 Bq/(m<sup>2</sup>s) erreicht haben. Daraus musste geschlossen werden, dass der konvektive Anteil der Exhalationsrate in der Regel deutlich kleiner ist, als in den durchgeführten Messkampagnen beobachtet.

Eine sachgerechte Messung der konvektiv bedingten Exhalationsrate wäre nur dann möglich, wenn der Luftstrom durch die Box gemessen werden würde.

Aus der Sicht der Autoren haben die durchgeführten Abschätzungen erhebliche Auswirkungen auf die Notwendigkeit der Verbesserung der verwendeten Messmethode für Exhalationssituationen mit einem wahrscheinlich konvektiven Anteil.

Den Autoren ist bekannt, dass es alternative Messmethoden für Situationen mit konvektivem Anteil in der Exhalationsrate gibt. So wurden bspw. Tracergasmethoden für die Bestimmung der Konvektionsgeschwindigkeit erfolgreich eingesetzt.

Insgesamt muss festgestellt werden, dass die anhand der Modellierungen berechneten lokalen Exhalationsraten von  $200 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  bzw.  $1.000 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  deutlich höher als die bisher gemessenen Exhalationsraten sind. Die Auswertung der Messungen erlaubt keine Bestimmung der Radonexhalationsrate. Anhand einer Reihe von Abschätzungen wurde gezeigt, dass mit der verwendeten Messmethode Exhalationsraten mit einem deutlichen konvektiven Anteil nicht bestimmt werden können. Allerdings wurde ebenfalls deutlich, dass die aus den Messwerten ableitbaren Exhalationsraten von  $30 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  bzw.  $140 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  eine Untergrenze bzgl. der tatsächlich auftretenden Exhalationsraten darstellen. Der Unterschied zu den aus den Modellierungen abgeleiteten Werten beträgt jedoch jeweils ungefähr einen Faktor 7.

Die aus den Modellierungen abgeleiteten Exhalationsraten haben das Manko, dass zusätzliche Annahmen zur Höhe des durchströmten Bereiches getroffen werden mussten. Hier wurde ein Wert von 1 m angenommen. Ist der tatsächlich durchströmte Bereich um einen Faktor  $N$  mächtiger, so reduziert sich entsprechend die flächenspezifische Exhalationsrate, da anhand der Modellierungen lediglich die konvektiv bedingte Gesamtexhalation angepasst werden kann.

Für die Belastbarkeit der Modellierung spricht allerdings die Tatsache, dass die langjährig vom BfS ermittelten Radonaktivitätskonzentrationen im Abstrom in Ihrer Größenordnung gut reproduziert werden können. Das bedeutet, dass die konvektiv bedingte Gesamtexhalation mit der dargestellten Methode relativ belastbar abgeschätzt werden kann, während die spezifische Exhalationsrate aufgrund der messtechnisch schwer zugänglichen Höhe des durchströmten Bereiches eher unsicher ist.

## **11 Vorläufiges Beurteilungskonzept für weitere Standorte**

### **11.1 Erläuterung der Vorgehensweise**

Eine wesentliche Zielstellung des Forschungsauftrages bestand darin, eine Methodik zu entwickeln, die es erlaubt, entsprechende Prognosen auch für weitere Standorte bzw. Objekte mit einem vertretbaren Aufwand durchzuführen. Diese Methode wird nachfolgend dargestellt. Als Eingangsdaten werden sowohl Standortparameter (Abschnitt 11.2), als auch Klimadaten (Abschnitt 11.3) benötigt. Die Standortparameter müssen teilweise aus Felduntersuchungen gewon-

nen werden, teilweise können sie aus topografischen Informationen und Altunterlagen zum Objekt abgeleitet werden.

Auf der Grundlage dieser Daten kann dann mit dem dargestellten Modellkonzept eine Prognose für den Zeitverlauf der Konzentration und für die entsprechenden Jahresmittelwerte erfolgen (Abschnitt 11.4).

### **11.2 Felduntersuchungen und Standortparameter**

Eine Reihe von Parametern müssen trotz aller Vereinfachungen in Felduntersuchungen ermittelt werden. Diese sind mindestens:

- Temperaturverlauf
- Windgeschwindigkeiten
- Radonkonzentration der Luft am Haldenfuß in geringer Höhe und mittels Anreicherungsbox
- Radonkonzentration in geringer Höhe (0,2 m) an 1 Messpunkt im Anstrom
- Radonkonzentration in geringer Höhe (0,2 m) an 2 - 3 Messpunkten im Abstrom

Verzichtet werden kann auf Messungen der Boden- bzw. Haldenluft im Haldeninneren, da infolge der nicht erfassbaren Strömungsbahnen keine repräsentativen Werte gewonnen werden können. Die Radiumaktivitätskonzentration des Haldenmaterials weist eine extrem große Bandbreite auf.

### **11.3 Klimadaten**

Die klimatischen Daten stellen die wesentliche Randbedingung für die Simulation dar. Wie in den Abschnitten 9 und 10 dargestellt, werden für eine Simulation die nachfolgenden Klimadaten von einer für den Standort repräsentativen Wetterstation in der Nähe (oder auf den Standort übertragene Daten) benötigt. Die Lage muss hinsichtlich geographischer Höhe vergleichbar sein. Dabei handelt es sich um folgende Parameter über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr, besser mehrere Jahre:

- Stundenwerte der Temperatur
- Windgeschwindigkeit als Stundenwerte, falls nicht verfügbar als Tagesmittelwerte

Diese Parameter stellen die zeitabhängigen Randbedingungen für die Simulation dar.

### **11.4 Modellprognosen**

Die Erstellung von Prognosen erfolgt analog zu den für die beiden Objekte dargestellten Berechnungen für das Jahr 2009.

Dazu werden die Standortparameter und die klimatischen Randbedingungen in das Modell eingegeben.

Danach wird der Radiumgehalt so variiert, dass die Radonaktivitätskonzentration in der Anreicherungsbox und am Haldenfuß, die in einer Messkampagne aufgenommen wurden, nachvollzogen werden können. Dazu sind erfahrungsgemäß die bei dieser Messkampagne gewonnenen Klimadaten anstelle der Daten der Wetterstation zu verwenden.

Im Anschluss daran werden anhand der Wetterstatistik Prognosen für die mittlere Radonaktivitätskonzentration an den zu betrachtenden Immissionspunkten im Abstrom erstellt. Diese werden für die Messkampagnen mit den Messwerten verglichen.

## **12 Erkannte Defizite und Vorschläge für weitere Arbeiten**

Die Messpunkte im Abstrom werden zum Teil von Kaltluftabflüssen aus anderen Bereichen der Täler beeinflusst. Da diese einem ähnlichen Zeitgang unterliegen wie die lokal vorhandenen Hangabflüsse und sich dort ebenfalls Radonquellen befinden, konnte dieser Einfluss nicht separiert werden.

Die quasi-zweidimensionale Beschreibung von Kaltluftabflüssen ist eine sehr starke Abstraktion gegenüber den realen dreidimensionalen Verhältnissen. Für deren korrekte Einbeziehung sind in der Literatur Ansätze vorhanden, die dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Allerdings ist der für einen konkreten Standort notwendige Aufwand für eine Umsetzung erheblich und liegt außerhalb des Projektrahmens. Zudem haben die vorliegenden Arbeiten gezeigt, dass das instationäre Verhalten der Quelle gekoppelt an die klimatischen Randbedingungen konsistent zu berücksichtigen ist. Es wird empfohlen, derartige Untersuchungen beispielhaft durchzuführen.

Die Bildung von Kaltluft wurde empirisch im Modell umgesetzt. Grundsätzlich ist eine stärker physikalisch begründete Vorgehensweise denkbar. Dazu sind jedoch detailliertere klimatische Daten für den Standort notwendig. U.a. handelt es sich um den zeitlichen Verlauf (Stundenwerte) der Bewölkung insbesondere in den Nachtstunden. Derartige Daten waren für den Standort nicht verfügbar.

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

Als weiterhin verbesserungswürdig wird die ebenfalls empirisch behandelte Beschreibung der turbulenten Diffusion im Kaltluftabfluss gesehen. Auch hier sind stärker physikalisch begründete Ansätze für den Dispersions-Diffusions-Tensor denkbar.

Anhand der durchgeführten Modellierungen wird deutlich, dass eine messtechnische Erfassung der Radonkonzentration von durchströmten Bereichen einer Halde nahezu unmöglich ist. Dies hat folgende Ursachen:

- Die Radonkonzentration in durchströmten Bereichen unterliegt extremen zeitlichen Schwankungen
- Es scheint messtechnisch kaum möglich, die Strömungsbahnen im Inneren der Halde räumlich genau zu lokalisieren. Das ist insbesondere deshalb relevant, weil sich die Aktivitätskonzentrationen zwischen durchströmten und nicht durchströmten Bereichen um mehrere Größenordnungen unterscheiden.

Als besonders bedeutsam für die Interpretation der Ergebnisse hat sich die Tatsache erwiesen, dass die Radonexhalationsrate mit der verwendeten Messmethode (Messbox) und den verwendeten Messintervallen für Exhalationssituationen mit hohem konvektiven Anteil nicht belastbar bestimmt werden kann. Einerseits ist durch das Messintervall der Anstieg der Radonaktivitätskonzentration in der Messbox nicht messbar, andererseits wurde durch Abschätzungen und anhand der Messdaten gezeigt, dass das Öffnen des Deckels bei hohen Exhalationsraten nicht ausreicht, um eine deutlich messbare Konzentrationsabnahme in der Box zu erreichen. Letzteres ist jedoch die Voraussetzung dafür, beim Schließen des Deckels einen messbaren Konzentrationsanstieg zu messen. Zur Verbesserung der Messmethode werden folgende Ansatzpunkte gesehen:

- Das Messintervall des Radonmessgerätes in der Box sollte deutlich reduziert werden. Dies scheint zwar aufgrund der hohen gemessenen Konzentrationen möglich, jedoch sollten die geräteinternen physikalisch bedingten Zeitkonstanten geprüft werden.
- Beim Öffnen des Deckels sollte durch geeignete Zusatzeinrichtungen (Ventilator o. ä.) dafür gesorgt werden, dass ein intensiver Luftaustausch mit der Außenluft stattfindet und die Radonaktivitätskonzentration in der Box deutlich absinkt.
- Es sollte geprüft werden, ob die Messung des die Box durchströmenden Volumenstromes zusätzlich zur Radonaktivitätskonzentration möglich ist.

Insgesamt sollte das in Abschnitt 11 vorgeschlagene Konzept zur Bewertung von Standorten noch anhand weiterer Standorte verifiziert werden. Dazu kann das im Rahmen des Projektes entwickelte Modell verwendet werden.

## Singuläre Radonfreisetzungen

---

Außerdem muss an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen werden, dass mit der Methode die konvektiv bedingte Gesamtexhalation mit der dargestellten Methode relativ belastbar abgeschätzt werden kann, während die spezifische Exhalationsrate aufgrund der messtechnisch schwer zugänglichen Höhe des durchströmten Bereiches eher unsicher ist. Für diese Höhe wurde ein plausibel erscheinender Wert von 1 m angenommen. Die rechnerisch resultierende Exhalationsrate ist umgekehrt proportional zu dieser angenommenen Höhe. Bspw. würde eine Verzehnfachung der Höhe zu einer Exhalationsrate von einem Zehntel führen.

Die Größenordnung der Gesamtexhalation als Produkt von Exhalationsrate und Austrittsfläche wurde anhand von einfach nachvollziehbaren Abschätzungen bestätigt.

## 13 Literatur- und Quellennachweis

- [1] [www.saphymo.com](http://www.saphymo.com)
- [2] Philipsborn, H. v.; Geipel, R. (2006): Radioaktivität und Strahlungsmessung. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, 8. Aufl., München 2006
- [3] ÖNORM S 5280-1 (Vornorm) Radon - Messverfahren und deren Anwendungsgebiete 1998
- [4] Schulz, H.; Funke, L.; Knittel, B.; Koschemann, A.; Rothe, S. (2003): Schellenberger, A.; Vogel, W.: Entwicklung einer Messmethodik zur Bestimmung der Radonquellstärke großer Flächen und Bewertung der Radondämmwirkung von Abdeckschichten. Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz BMU-2003-622, Bonn 2003
- [5] VDI-Richtlinie 3787: Umweltmeteorologie – Lokale Kaltluft., Berlin Dez. 2003
- [6] Sievers, U. (2005): Das Kaltluftabflussmodell KLAM\_21 – Theoretische Grundlagen, Anwendung und Handhabung des PC-Modells. Deutscher Wetterdienst Offenbach, 2005
- [7] Kümmel, M. (2009): mündl. Mitt. auf Anlaufberatung am 04.06.2009
- [8] Ferry, C.; Richon, P.; Beneito, A.; Robé, M.-C. (2001): Radon exhalation from uranium mill tailings: experimental validation of a 1-D model. J. Env. Radioactivity 54 (2001)
- [9] Ferry, C.; Richon, P.; Beneito, A.; Robé, M.-C. (2001): Evaluation of the effect of a cover layer on radon exhalation from uranium mill tailings: transient radon flux analysis. J. Env. Radioactivity 54 (2001)
- [10] Ielsch, G.; Ferry, C.; Tymen, G.; Robé, M.-C. (2002): Study of a predictive methodology for quantification and mapping of the radon-222 exhalation rate. J. Env. Radioactivity 63 (2002)
- [11] Maßmeyer, K.; Martens, R.; Bendick, R.; Dushe, C.; Kümmel, M. (1997): Modelling the atmospheric dispersion of radon originating from area sources connected with uranium milling and mining facilities. Kerntechnik 62 (1997) 5-6
- [12] Considine, D.B.; Bergmann, D.J.; Liu, H. (2005): Sensitivity of Global Modelling Initiative chemistry and transport model simulations of radon-222 and lead-210 to input meteorological data. Atmos. Chem. Phys. 5 (2005)
- [13] Nishizawa, M.; Nagai, H.; Chino, M. (2007): Development of three-dimensional numerical model for  $^{222}\text{Rn}$  and its decay products coupled with a mesoscale meteorological model I. Model description and validation. J. Nucl. Sc. and Technol. 44 (2007) 11
- [14] Nishizawa, M.; Nagai, H.; Chino, M. (2008): Development of three-dimensional numerical model for  $^{222}\text{Rn}$  and its decay products coupled with a mesoscale meteorological model II. Numerical analysis on the increase in gamma dose rate observed in the coastal area of Fukushima prefecture. J. Nucl. Sc. and Technol. 45 (2008) 11
- [15] Dushe, C., Kümmel, M. (1999): Untersuchungen zur Ermittlung der Ursachen der erhöhten Radonkonzentration im Freien in Johanngeorgenstadt, Ortsteil Steigerdorf. BfS, interner Bericht AS 1-02/1999, Berlin 1999

## Singuläre Radonfreisetzungen

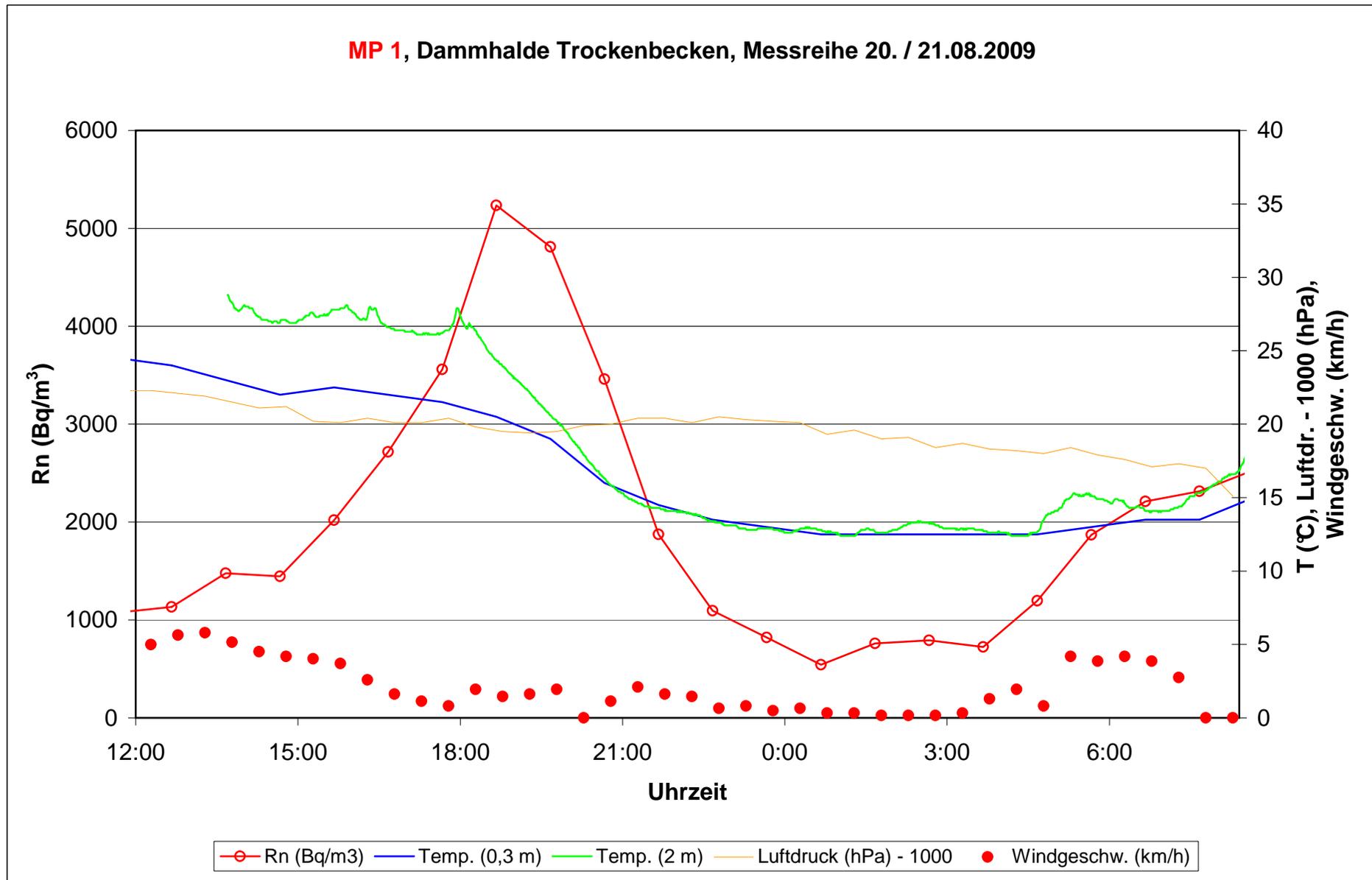
---

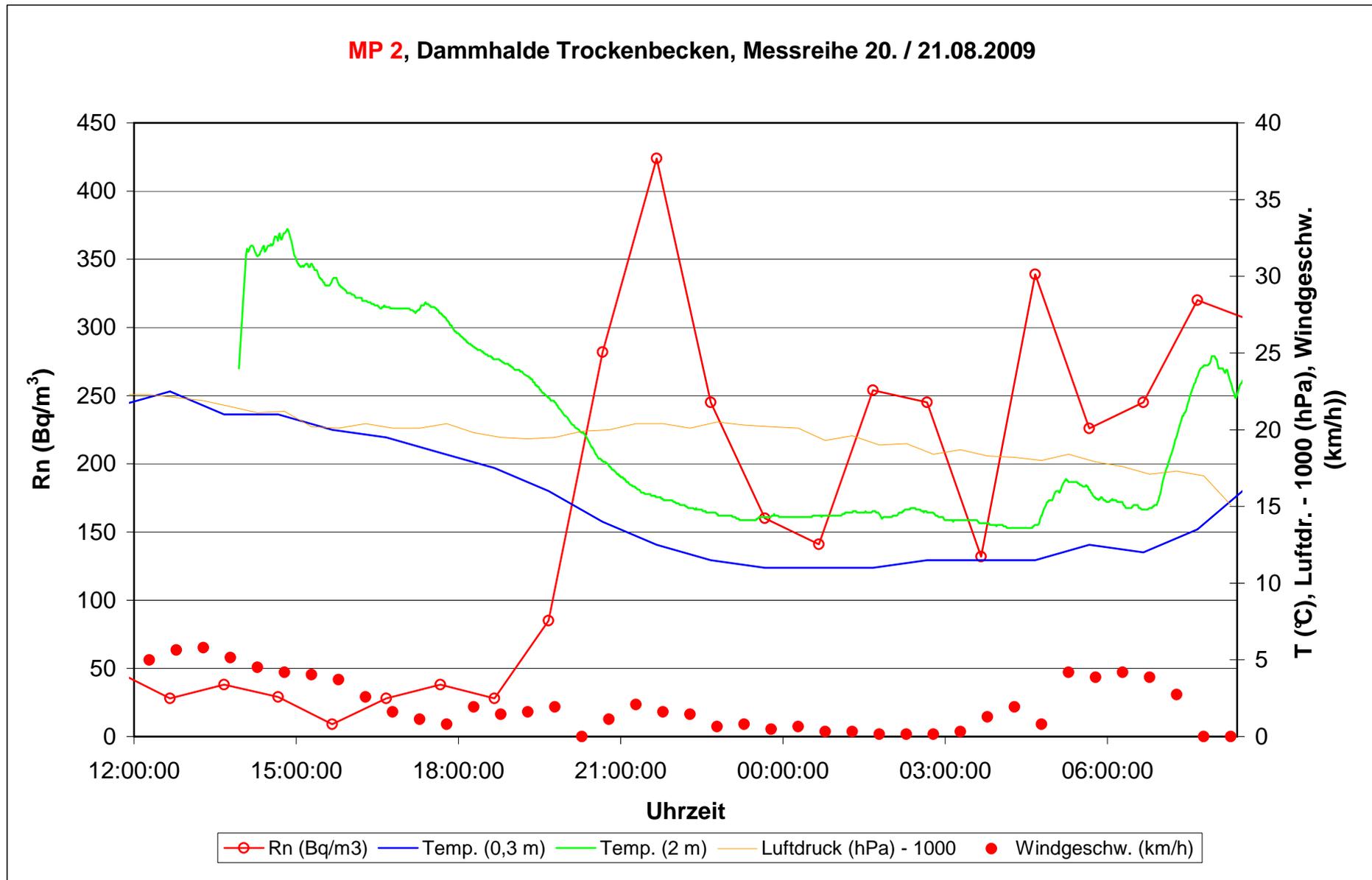
- [16] Dushe, C.; Ettenhuber, E.; Kümmel, M. (2003): Untersuchungen zur Ermittlung der bergbaubedingten Radonexposition in Wohnungen in Johanngeorgenstadt, Gebiet Steigerdorf. Berlin 2003
- [17] Dushe, C.; Ettenhuber, E.; Gehrcke, K.; Kümmel, M.; Schulz, H. (2007): Ein neues Verfahren zur Ermittlung der Radonexhalation großer Flächen. Schriften Bundesamt für Strahlenschutz 42/07, Salzgitter 2007
- [18] Kümmel, M.: Ergebnisse der Radonkonzentrationsmessungen des BfS auf der Dammhalde Trockenbecken in 0,15 m über Grund mit Kernspurdetektoren 1999 - 2008.
- [19] Regner, J.; Hinz, W.; Arndt, A. (2006): Umweltbewertung zum Ist-Zustand der Dammhalde Trockenbecken in Johanngeorgenstadt. Wismut Reg.-Nr. Z 155/1, Chemnitz 2006 (unveröff.)
- [20] Regner, J.; Schmidt, P.; Arndt, A. (2007): Untersuchung zur Radonfreisetzung an sanierten Halden der Niederlassung Aue. Wismut Reg.-Nr. WIS-A 321/2, Chemnitz 2007 (unveröff.)
- [21] Schellenberger, A.; Schulz, H.; Flesch, K.; Rothe, S.; Vogel, W. (2005): Charakterisierung der Radon-Situation für die Dammhalde IAA Trockenbecken in Johanngeorgenstadt. IAF - Radioökologie GmbH, Dresden 2005 (unveröff.)
- [22] Dushe, C.; Kümmel, M.; Schulz, H. (2003): Investigations of enhanced outdoor radon concentration in Johanngeorgenstadt (Saxony). Health Phys. 84 (2003) 5
- [23] Ketzler, M.; Haase, M.; Lohmeyer, A. (1999): Numerische Modellierung der Radonausbreitung im topografisch gegliederten Sanierungsgebiet Aue/Schlema (Erzgebirge) und Vergleich mit Messungen. Immissionsschutz 2 (1999)
- [24] Wismut GmbH: Chronik der Wismut. Chemnitz 1999
- [25] Credner, H. (Hrsg.) (1900): Geologische Specialkarte des Königreichs Sachsen Section Johanngeorgenstadt. Leipzig 1900
- [26] Teller, F. (2009): Umbruch Aufbruch Abbruch - Johanngeorgenstadt 1945 - 1961. Förderverein Pferdegöpel Johanngeorgenstadt e.V., Johanngeorgenstadt 2009
- [27] Meteomedia GmbH Bochum: Meteorologische Daten Wetterstation Erlabrunn
- [28] Verein zur Förderung der applikativen Mechanikforschung e. V.; FAM Chemnitz, e. V. (1996): Modellierung von Strömungsfeldern in der Hammerberghalde und der Halde 66/207 in Schlema zur Untersuchung des gasförmigen Stoffaustrags dieser Halden, Abschlussbericht Phase 1, Chemnitz 1996
- [29] Verein zur Förderung der applikativen Mechanikforschung e. V.; FAM Chemnitz, e.V. (1997): Modellierung von Strömungsfeldern in der Hammerberghalde und der Halde 66/207 in Schlema zur Untersuchung des gasförmigen Stoffaustrags dieser Halden, Abschlussbericht Phase 2, Chemnitz 1997
- [30] Arya S. Pal (2001): \_Introduction to Micrometeorology\_, International Geophysics Series, Volume 79, Second Edition
- [31] Hantel M., D. Mayer (2006): Skriptum Theoretische Meteorologie 2, Facultas Universitätsverlag

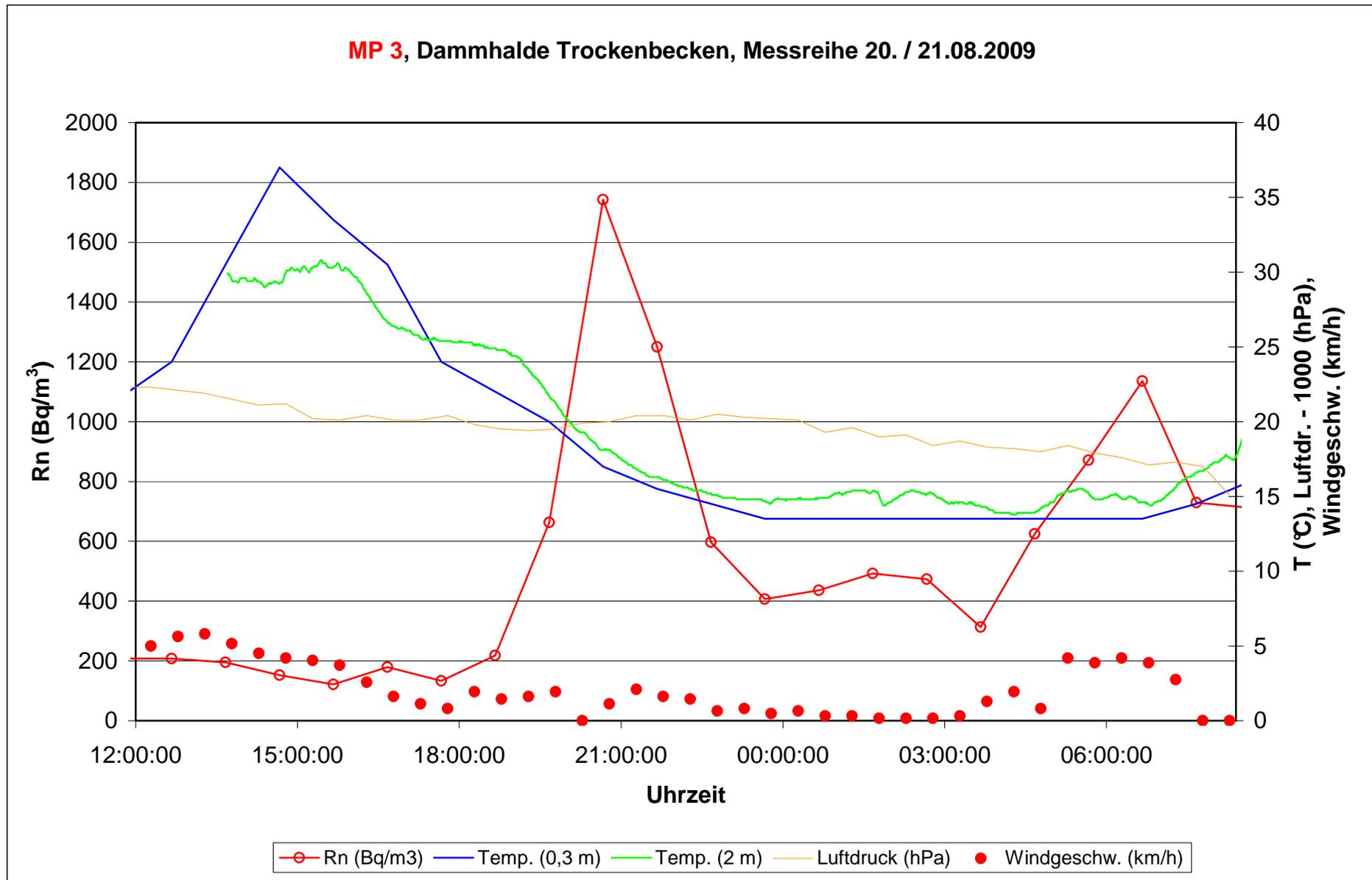
## Singuläre Radonfreisetzungen

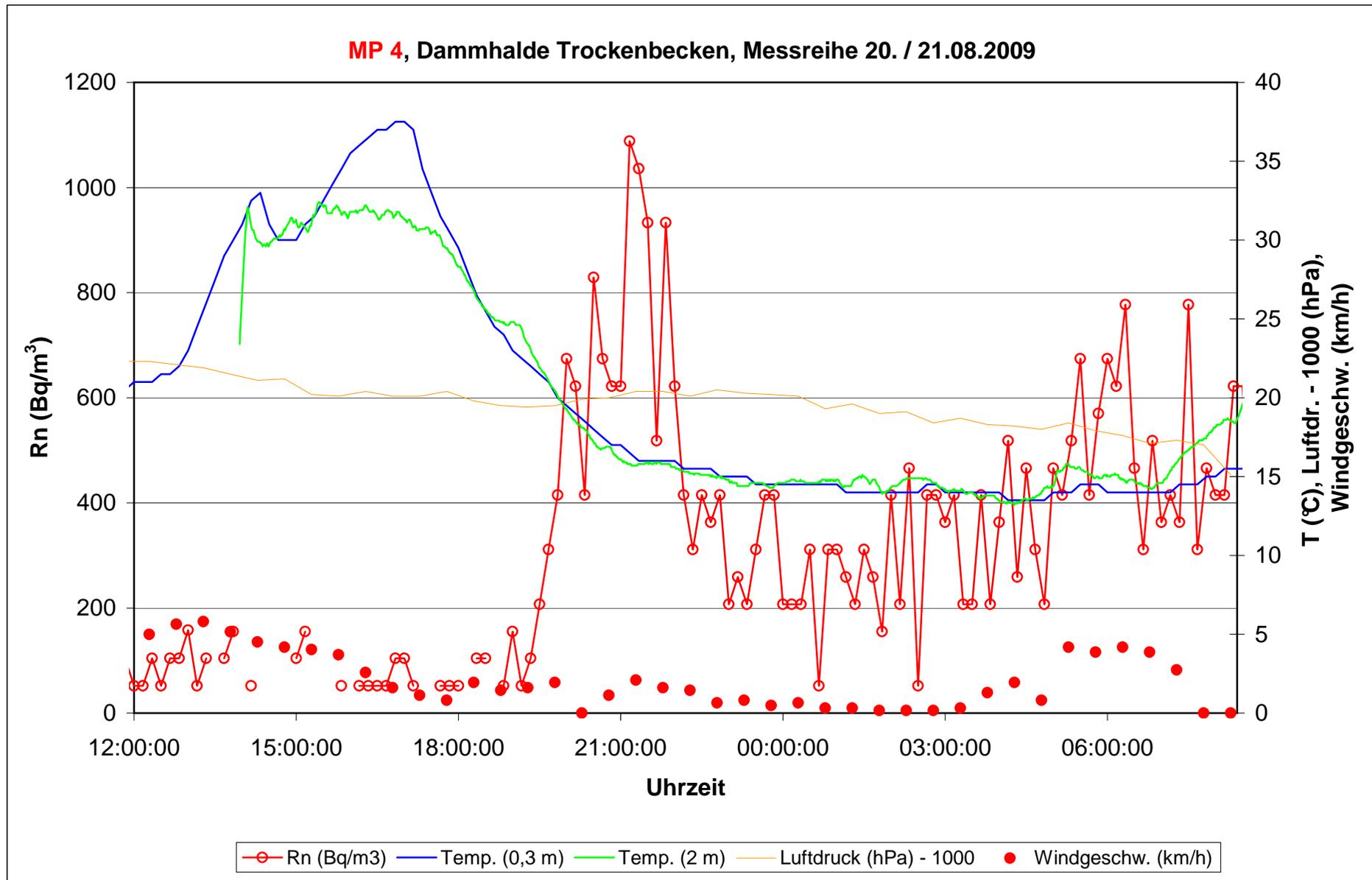
---

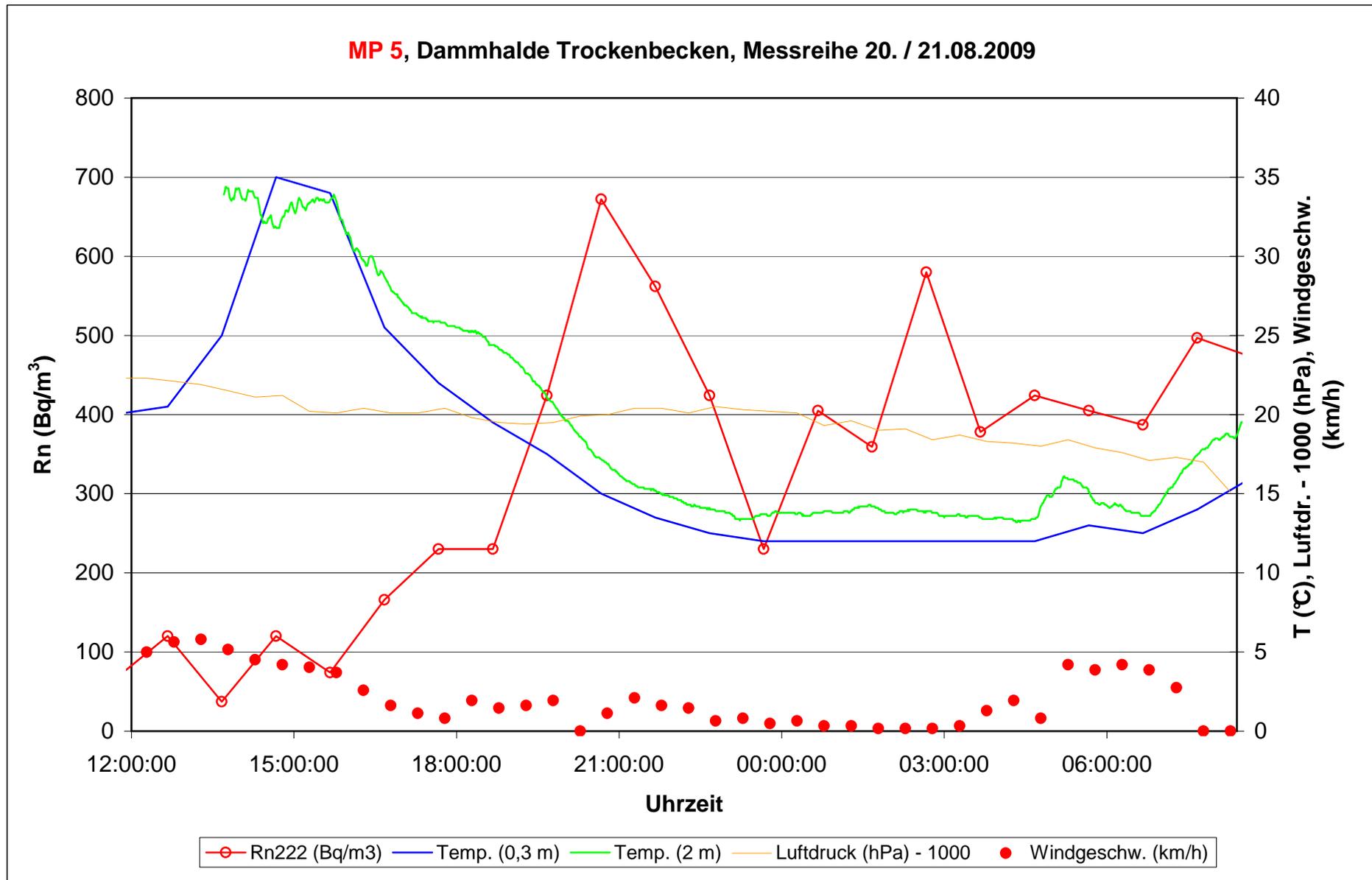
- [32] Pichler H. (1997): Dynamik der Atmosphäre, Spektrum Akademischer Verlag
- [33] Schulz, H.; Funke, L.; Schellenberger, A.; Löbner, W.; Leichsenring, B.; Regner, J. (2003): Untersuchung des Einflusses der Bioturbation von Abdeckungen und kontaminierten Materialien auf Radondämmwirkung mittels Bleispurmethode, Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz BMU-2004-643, Bonn 2003
- [34] Lau, S. „Radon als Indikator für Non-Aqueous Phase Liquids (NAPL) in der ungesättigten Bodenzone: Entwicklung und Eichung eines numerischen eindimensionalen Radontransportmodells“, Dissertation, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften der Naturwissenschaftlichen Fakultät III der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 16/2008
- [35] Bundesamt für Strahlenschutz: Messwerte zum Objekt 3650 und 3651, vom AG übergebener Datenbestand
- [36] M.T. Vilhena, U. Rizza, G.E. Degrazia, C. Mangia, D.M. Moreira and T. Tirabasse, “An analytical air pollution model: development and evaluation”, Contribution to Atmospheric Physics, 1998
- [37] G.A. Degrazia, U. Rizza, C. Mangia, T. Tirabassi, “Validation of a new turbulent parametrisation for dispersion models in a convective boundary layer”, Boundary Layer Meteorology 85, 1997
- [38] H.A. Panofsky, J.A. Dutton, “Atmospheric Turbulence, John Wiley & Sons, New York, 1988
- [39] J.E. Pleim, J.S. Chang, “A non-local closure model for vertical mixing in the convective boundary layer, Atmos. Environ. 34, 1992
- [40] G.A. Degrazia, D.M. Moreira, M.T. Vilhena, “Derivation of an eddy diffusivity depending on source distance for vertically inhomogeneous turbulence in a convective boundary layer”, Journal Appl. Meteorology, 2001
- [41] Hr. Kümmel, BfS, persönliche Mitteilung, 7.12.2010

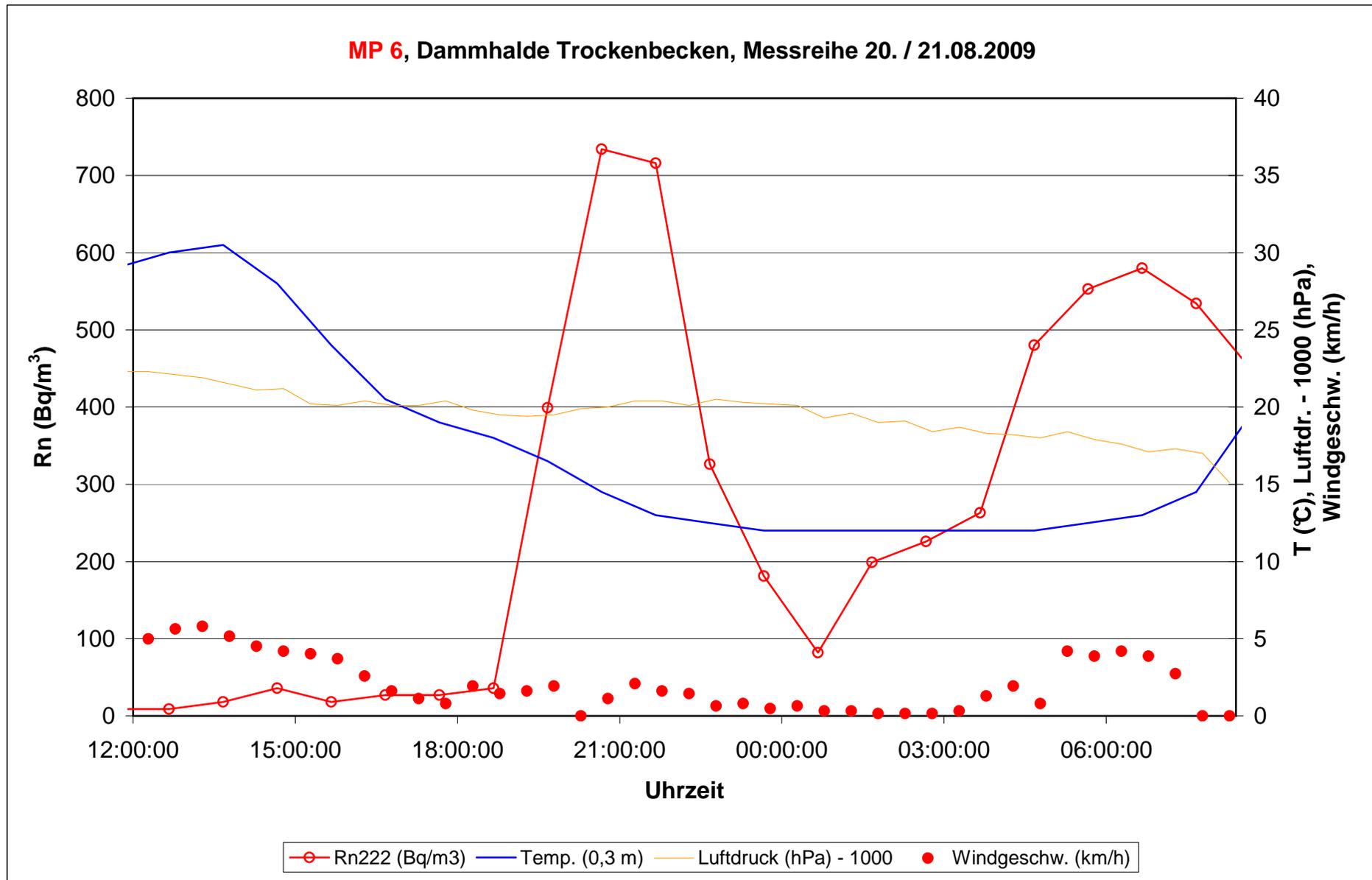


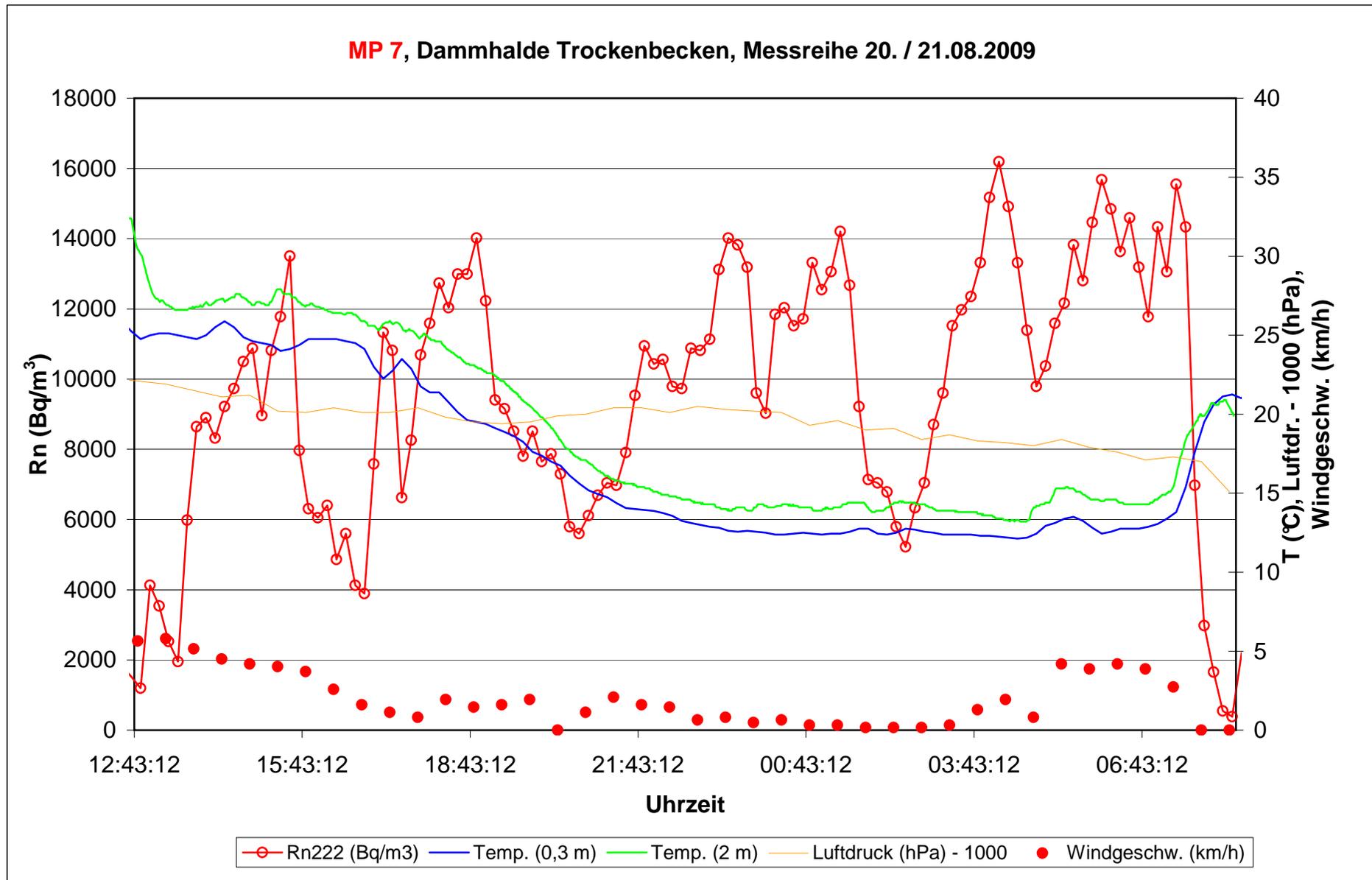


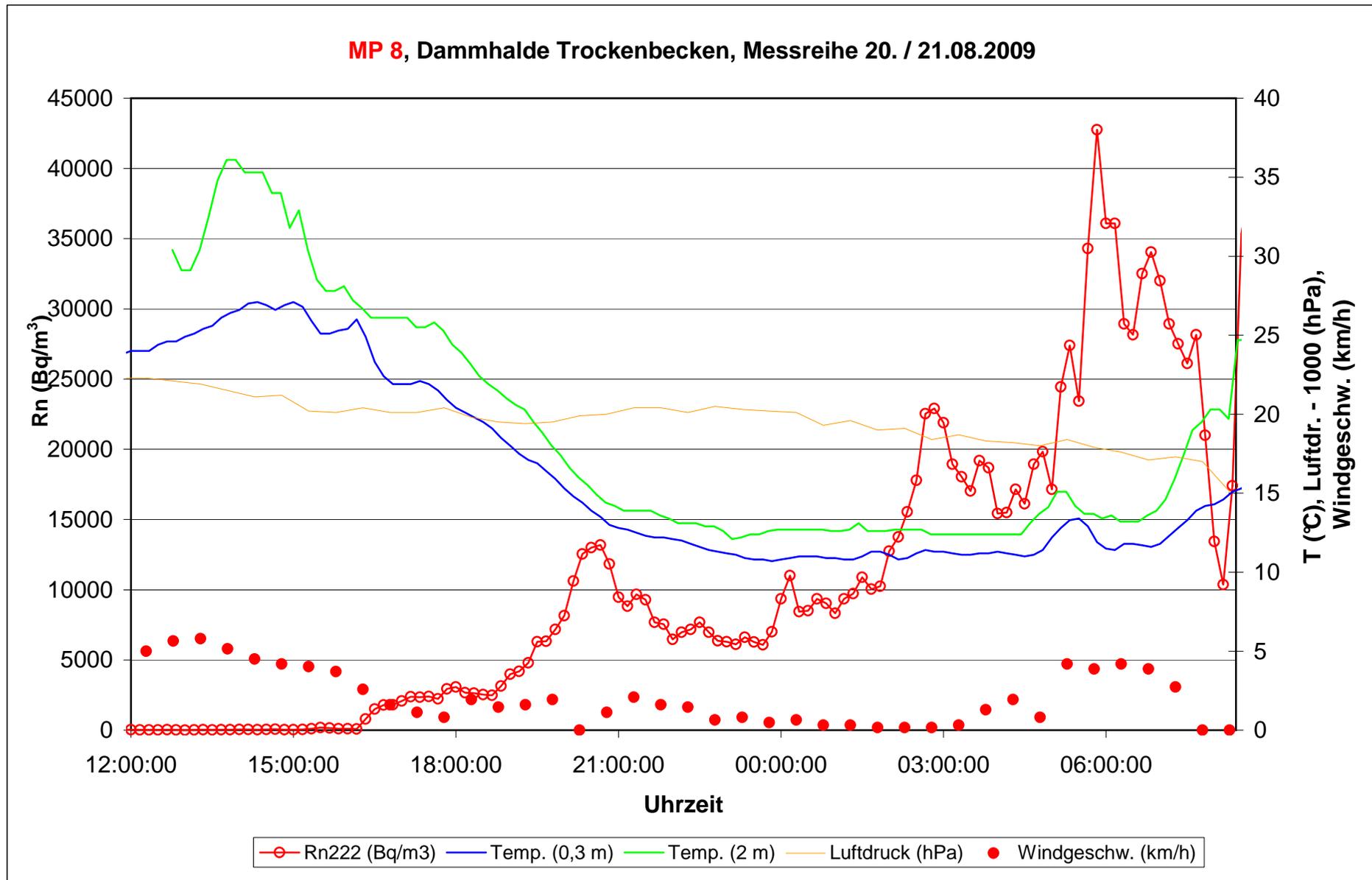


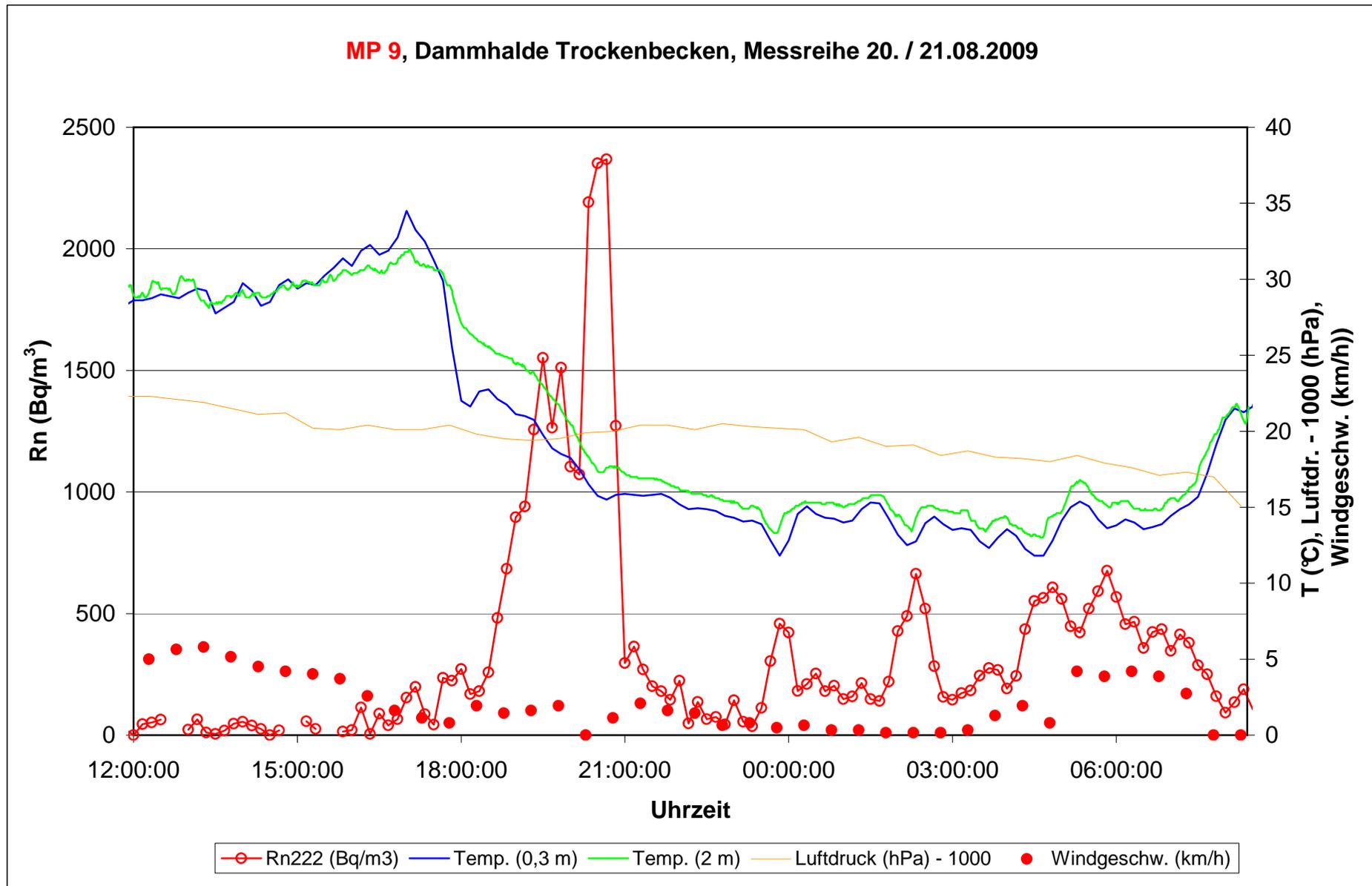


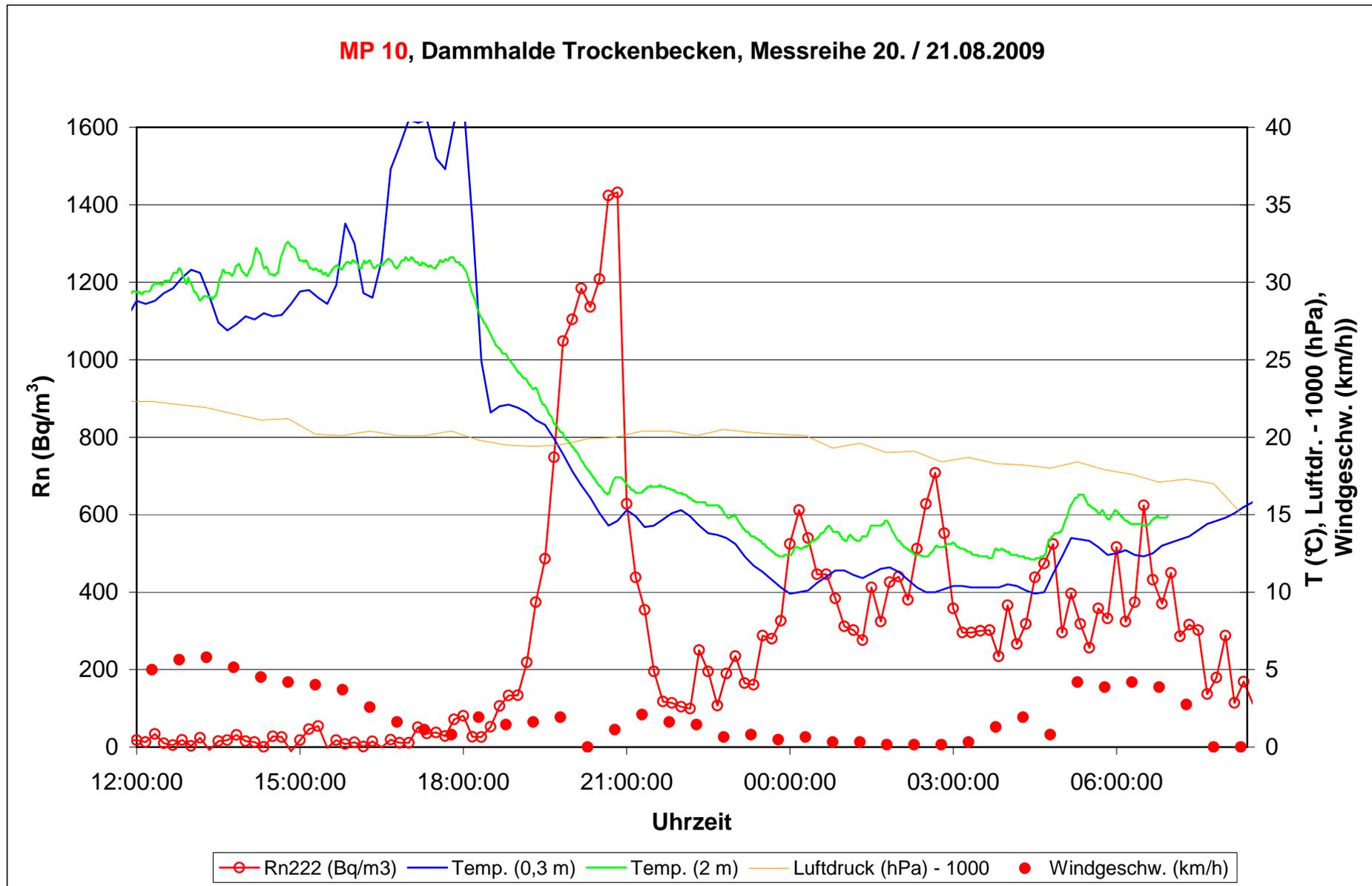


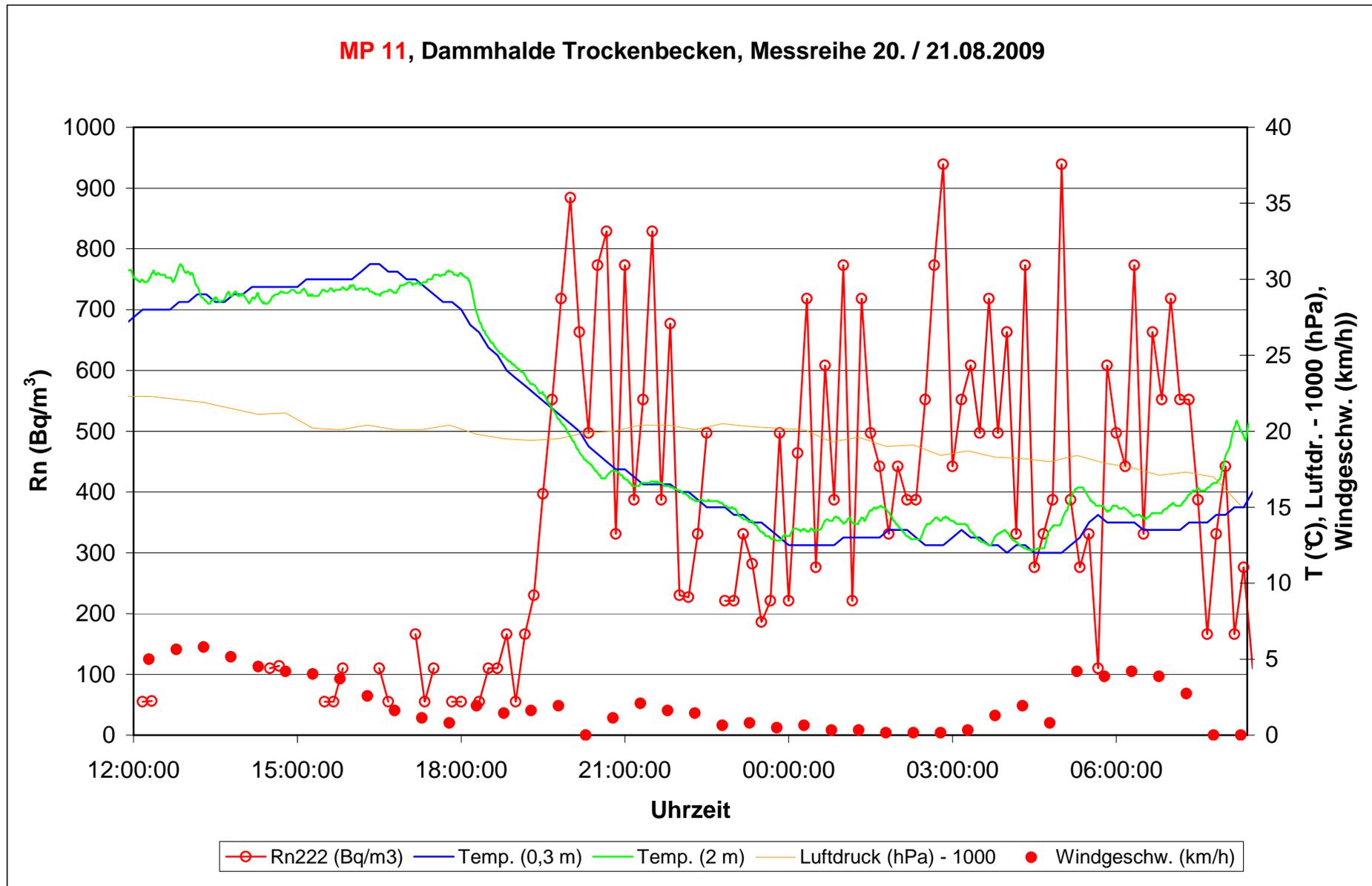


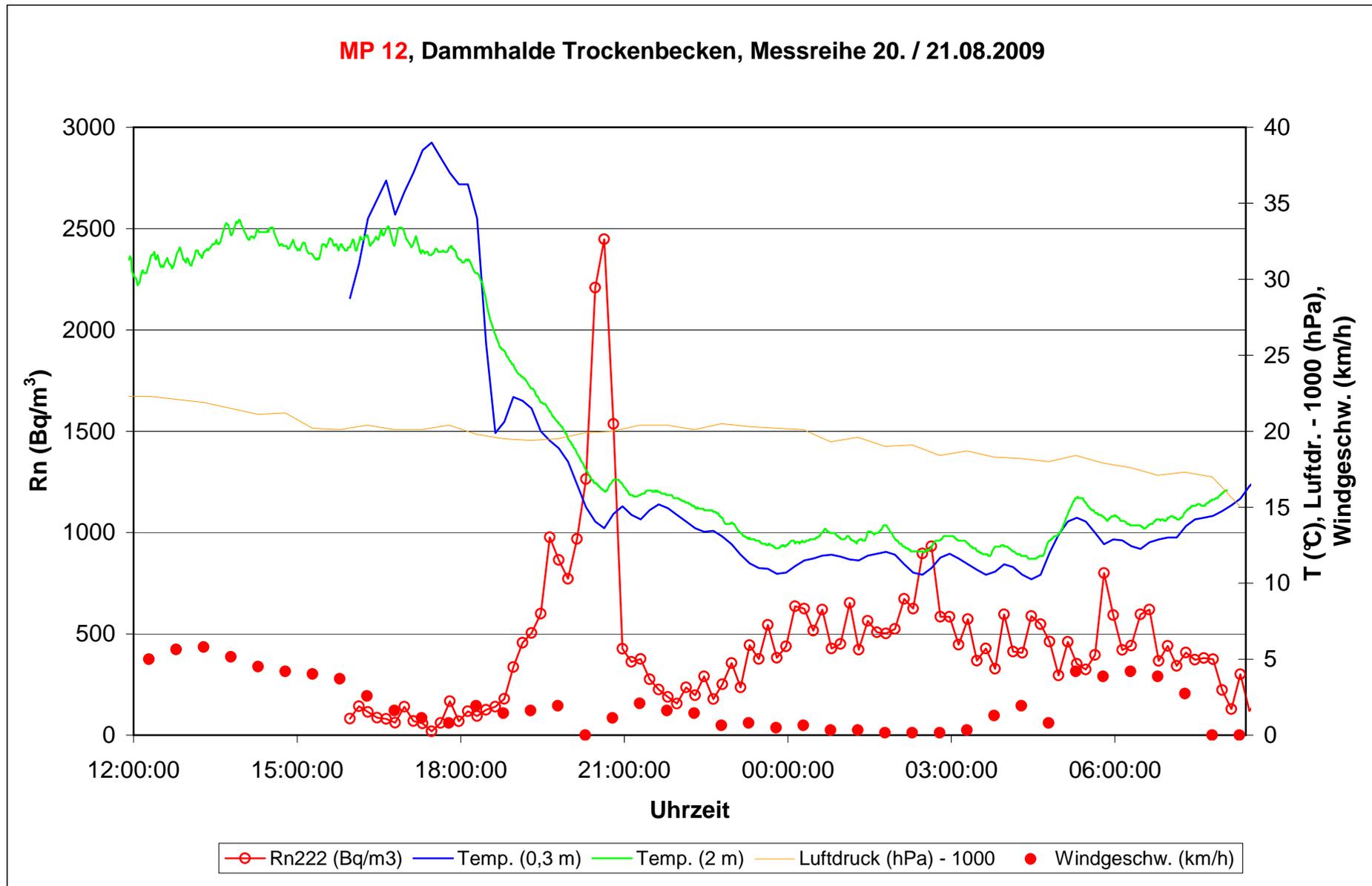


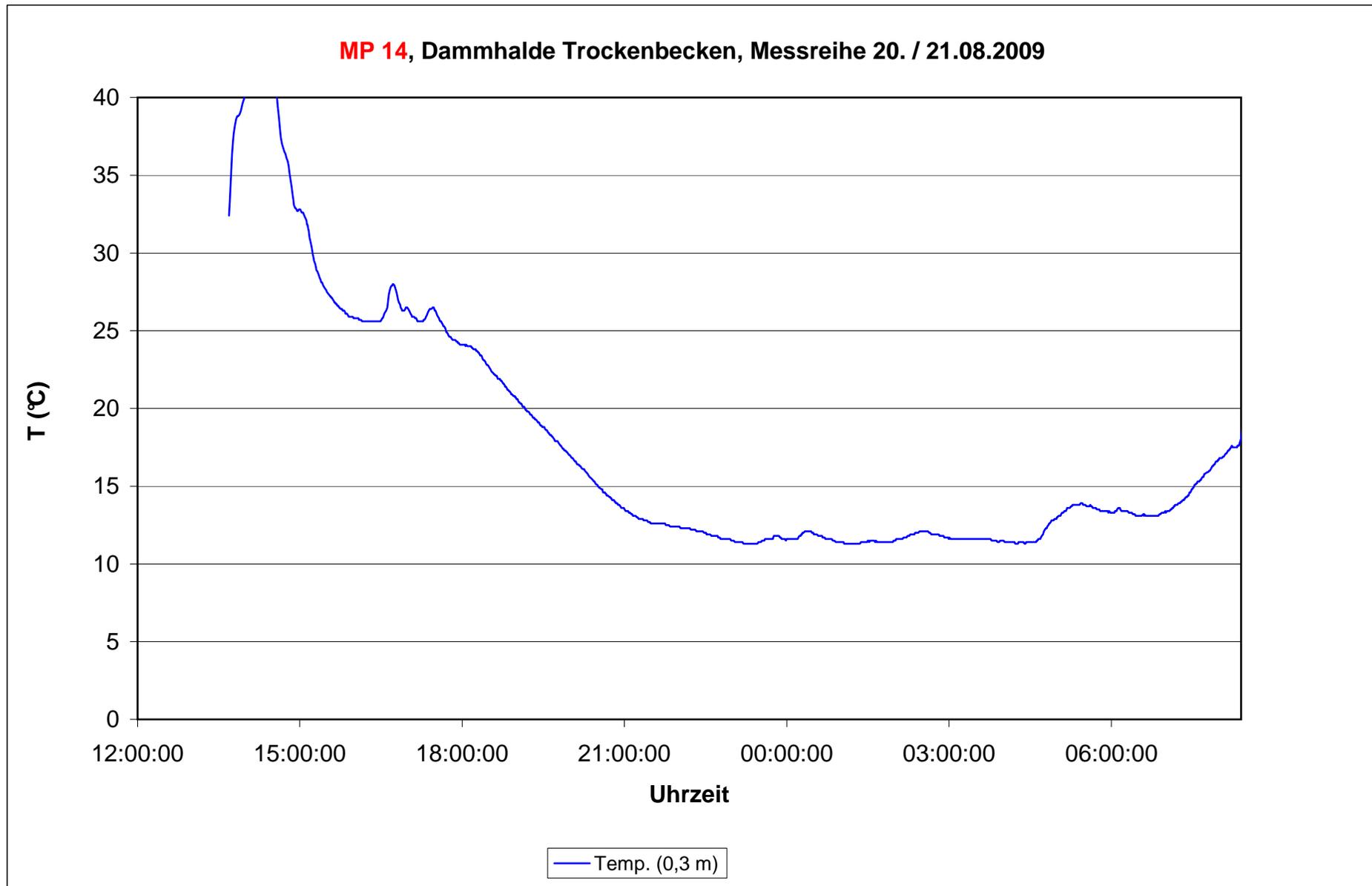


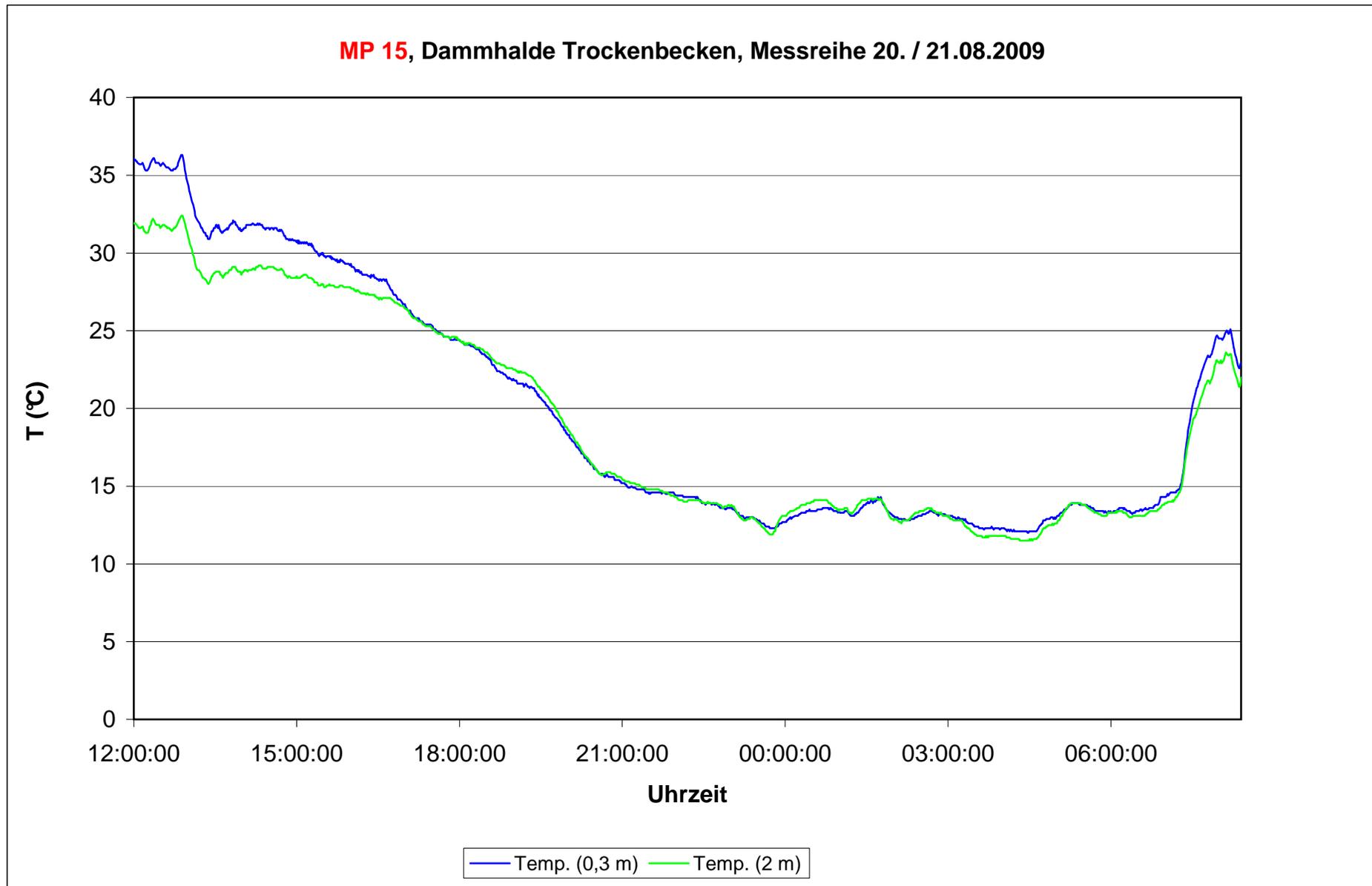


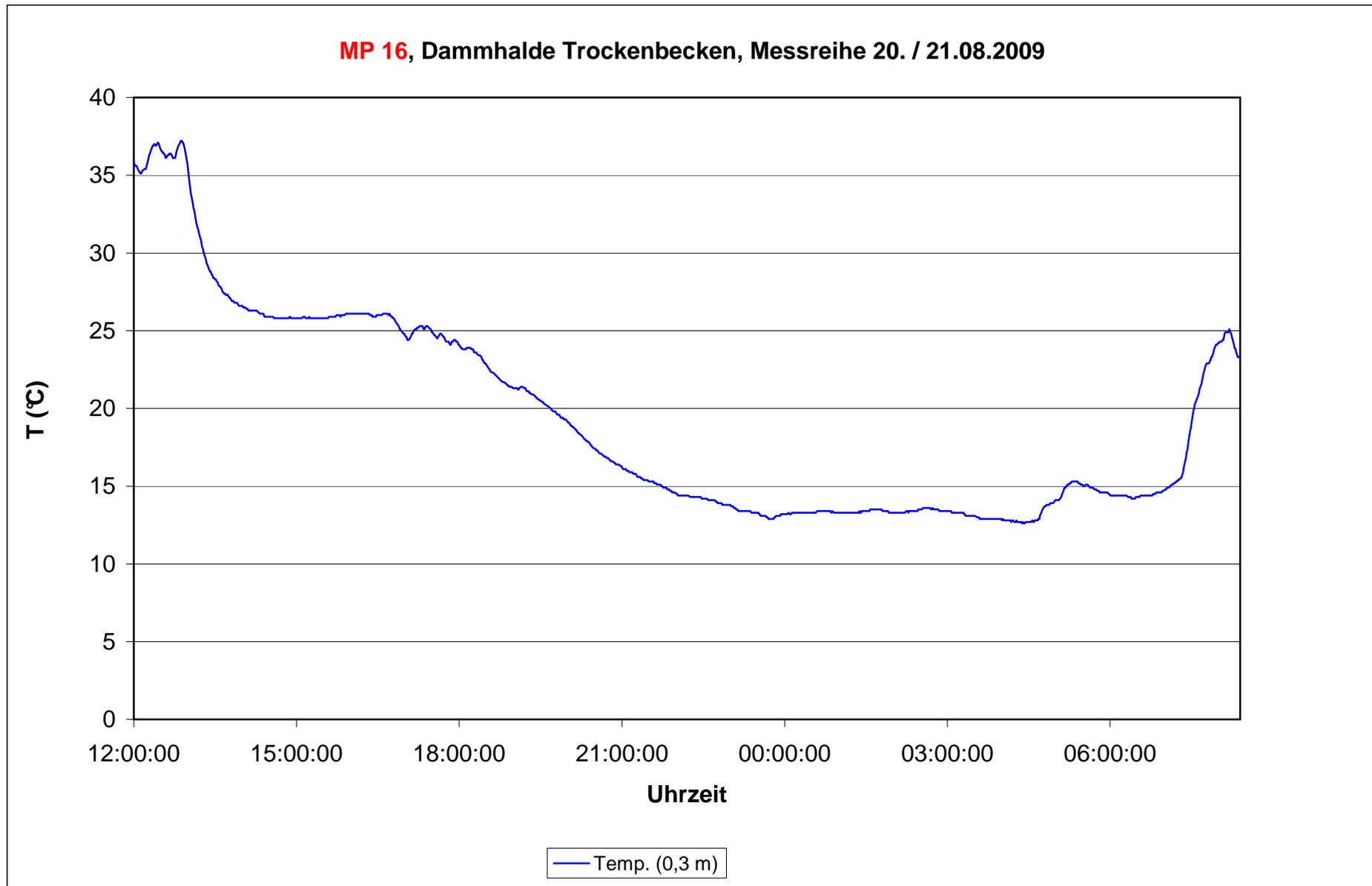


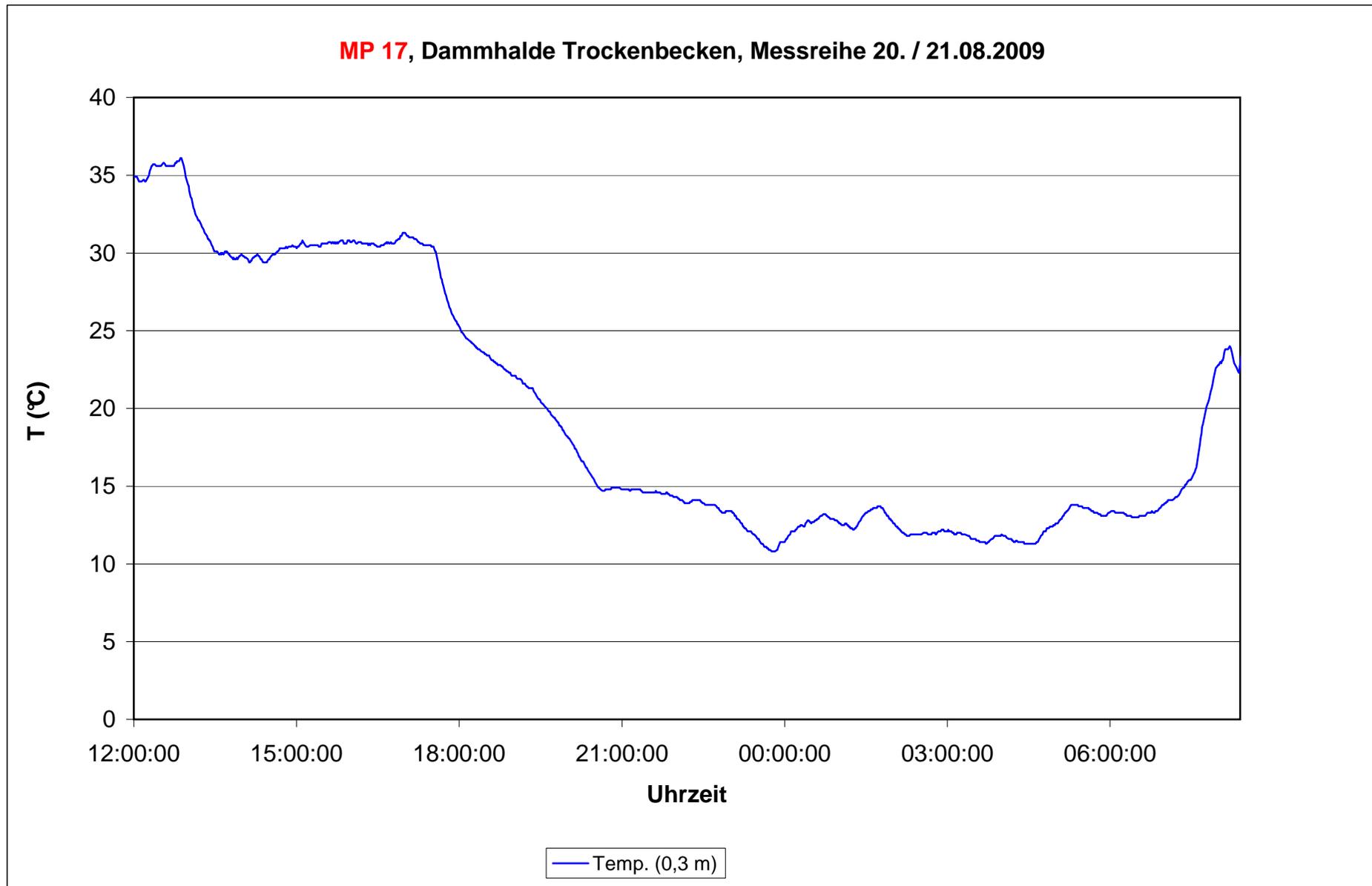


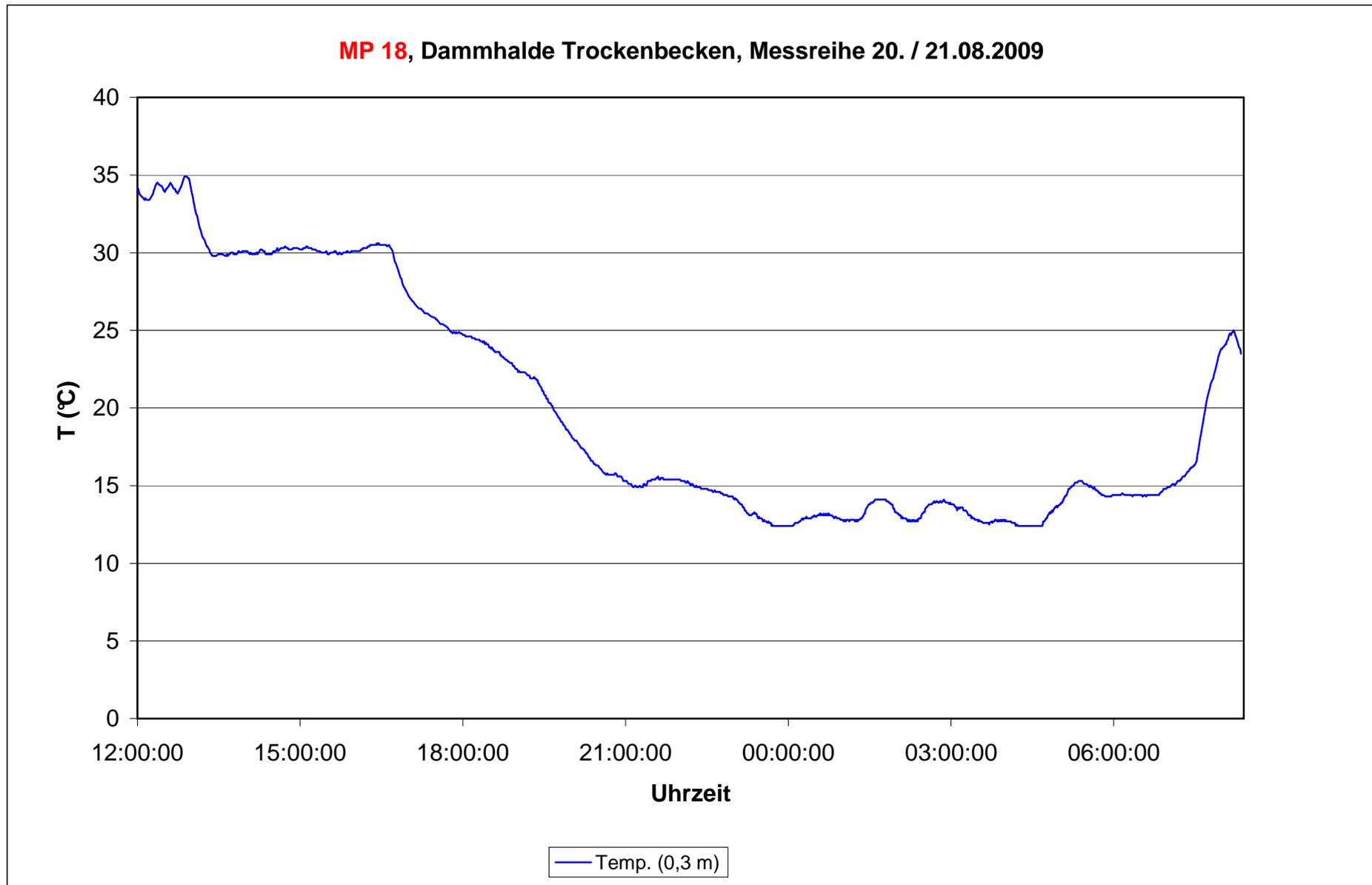


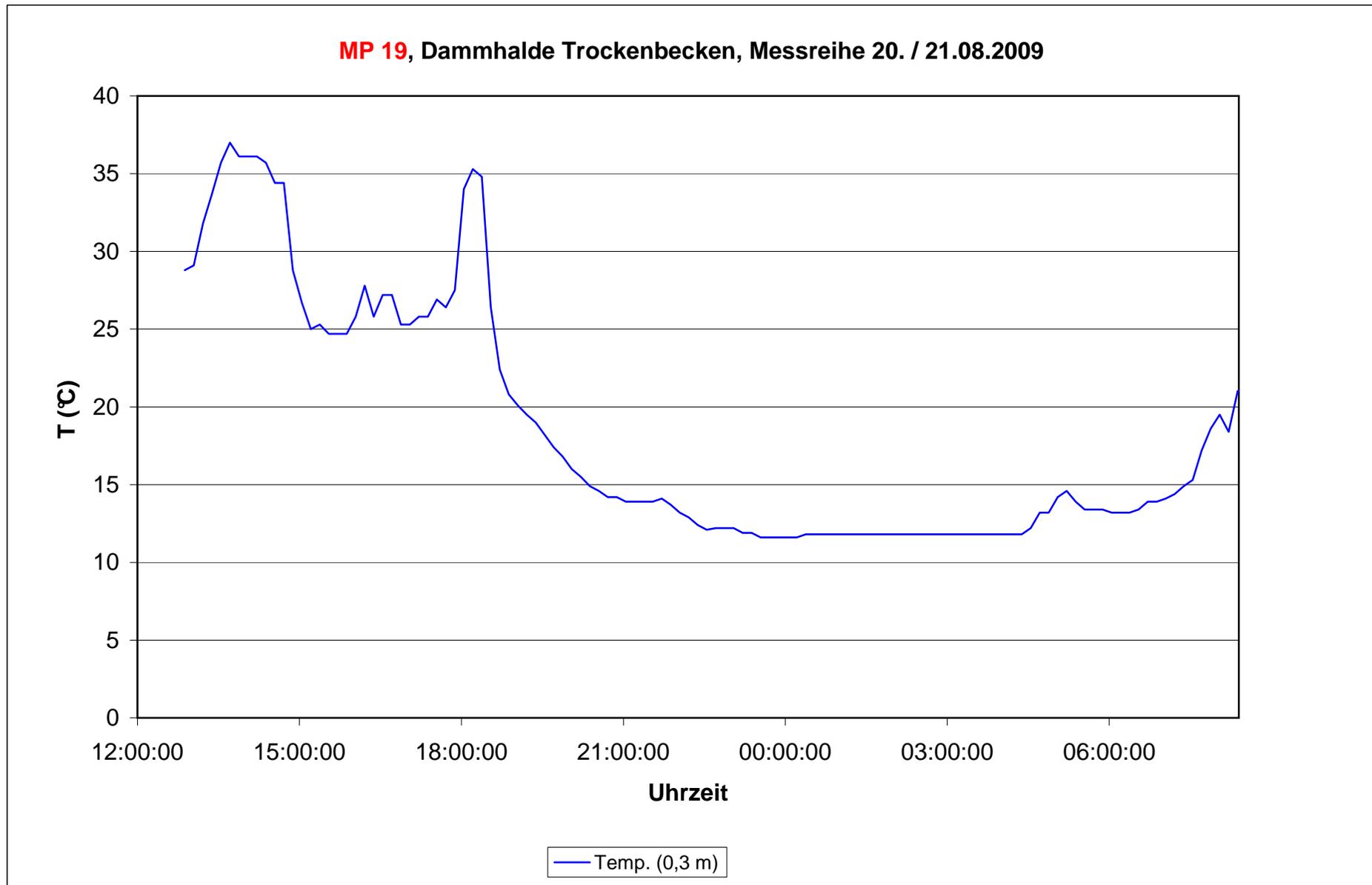


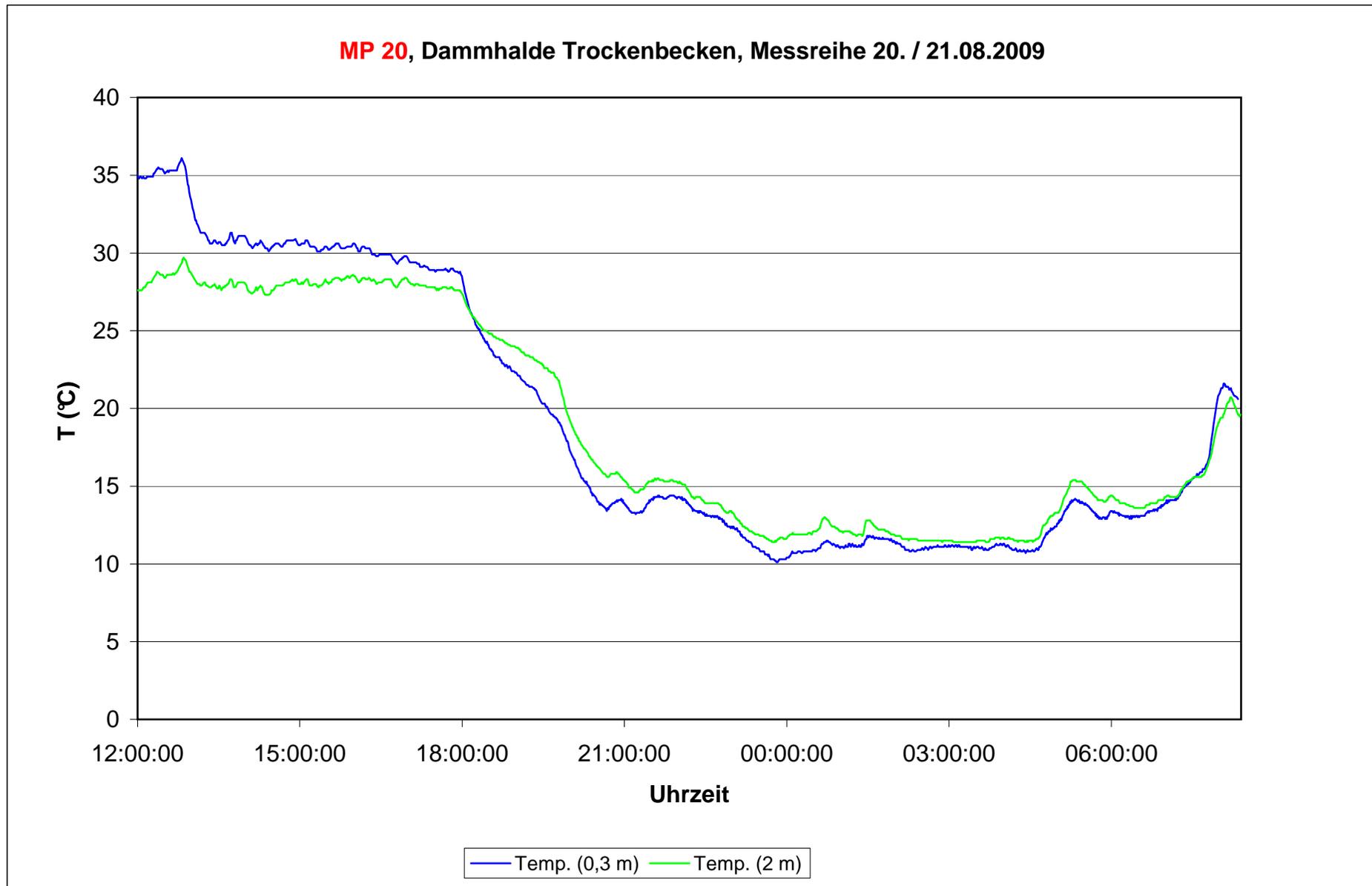


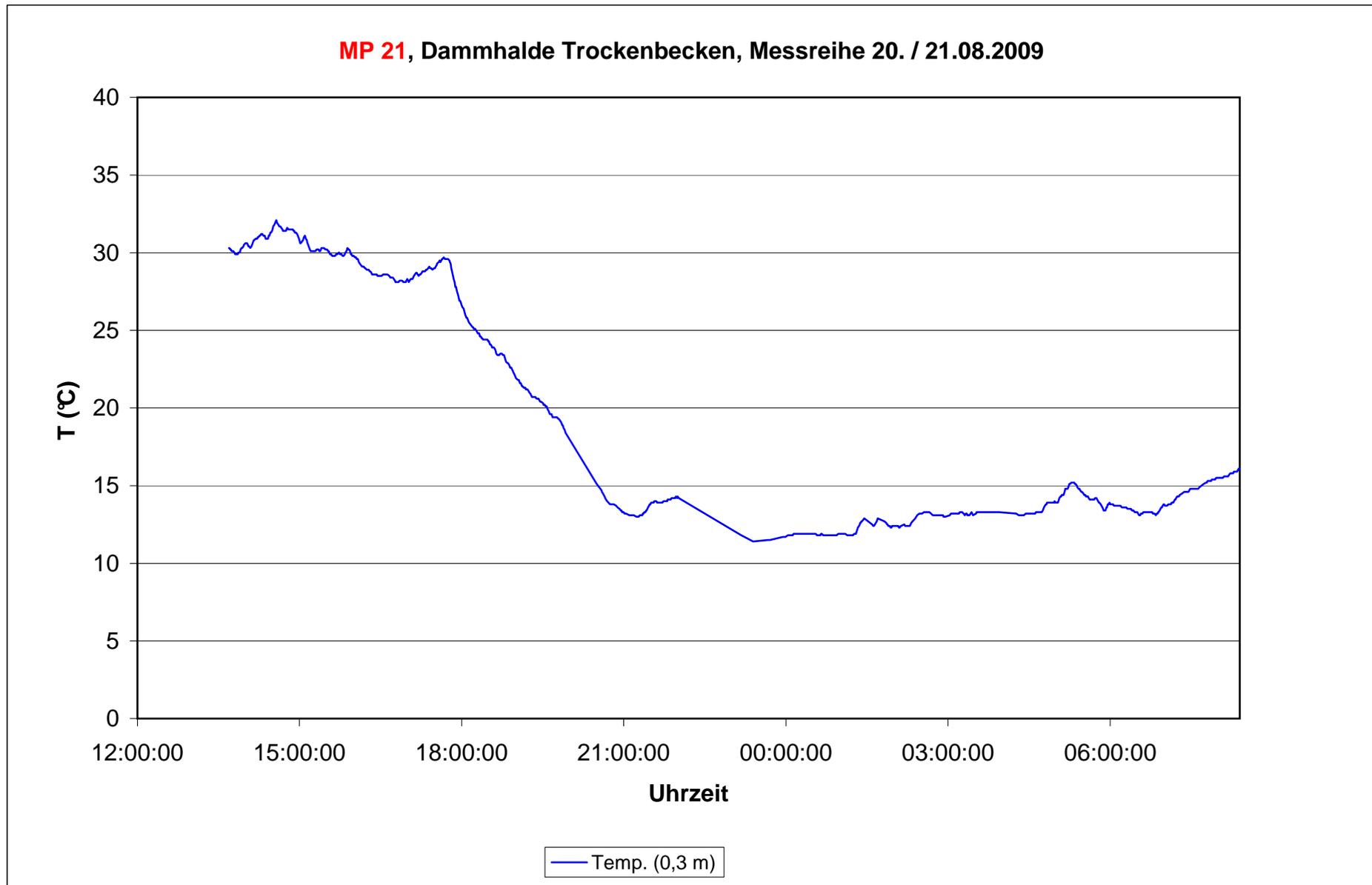


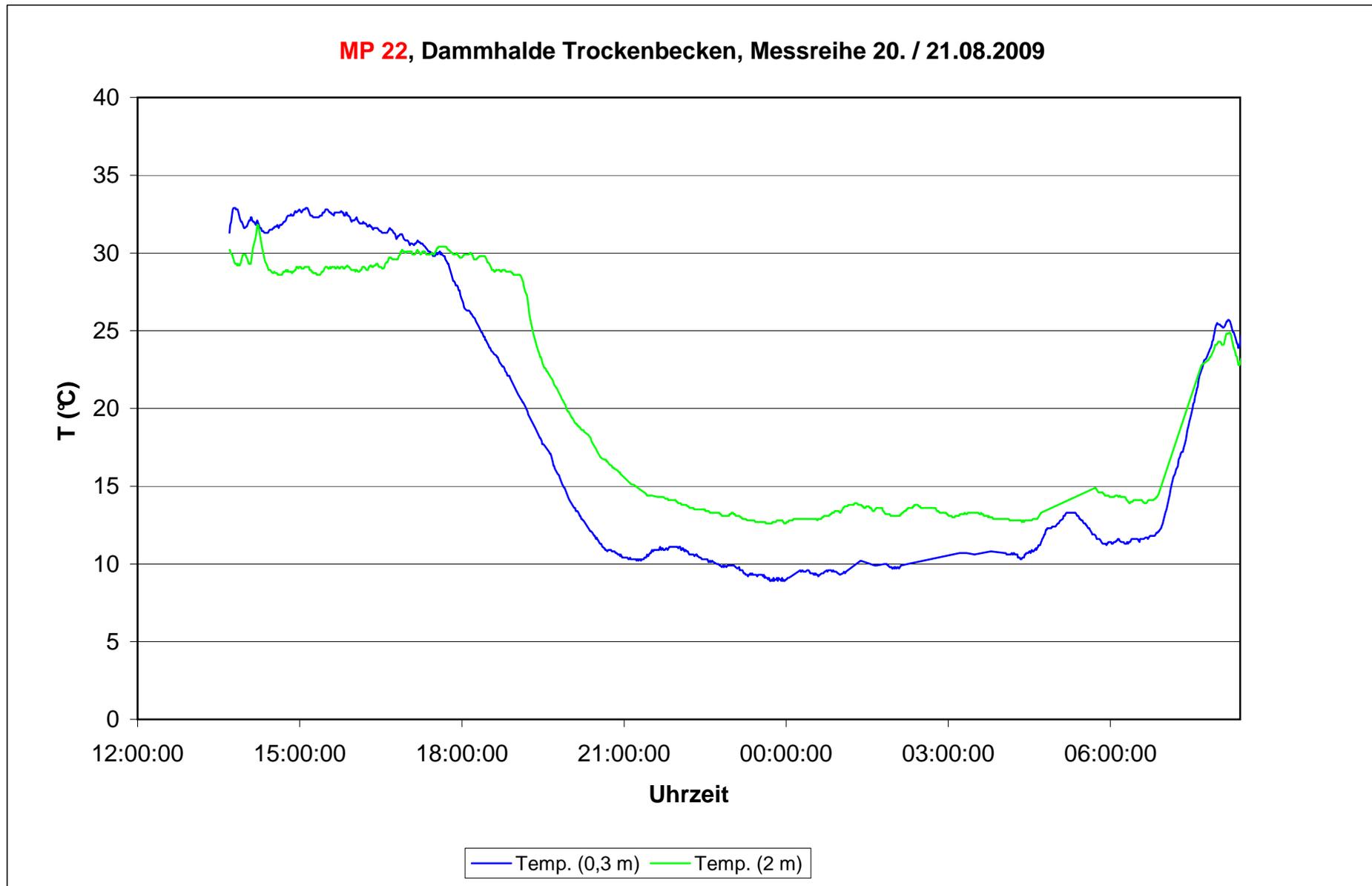


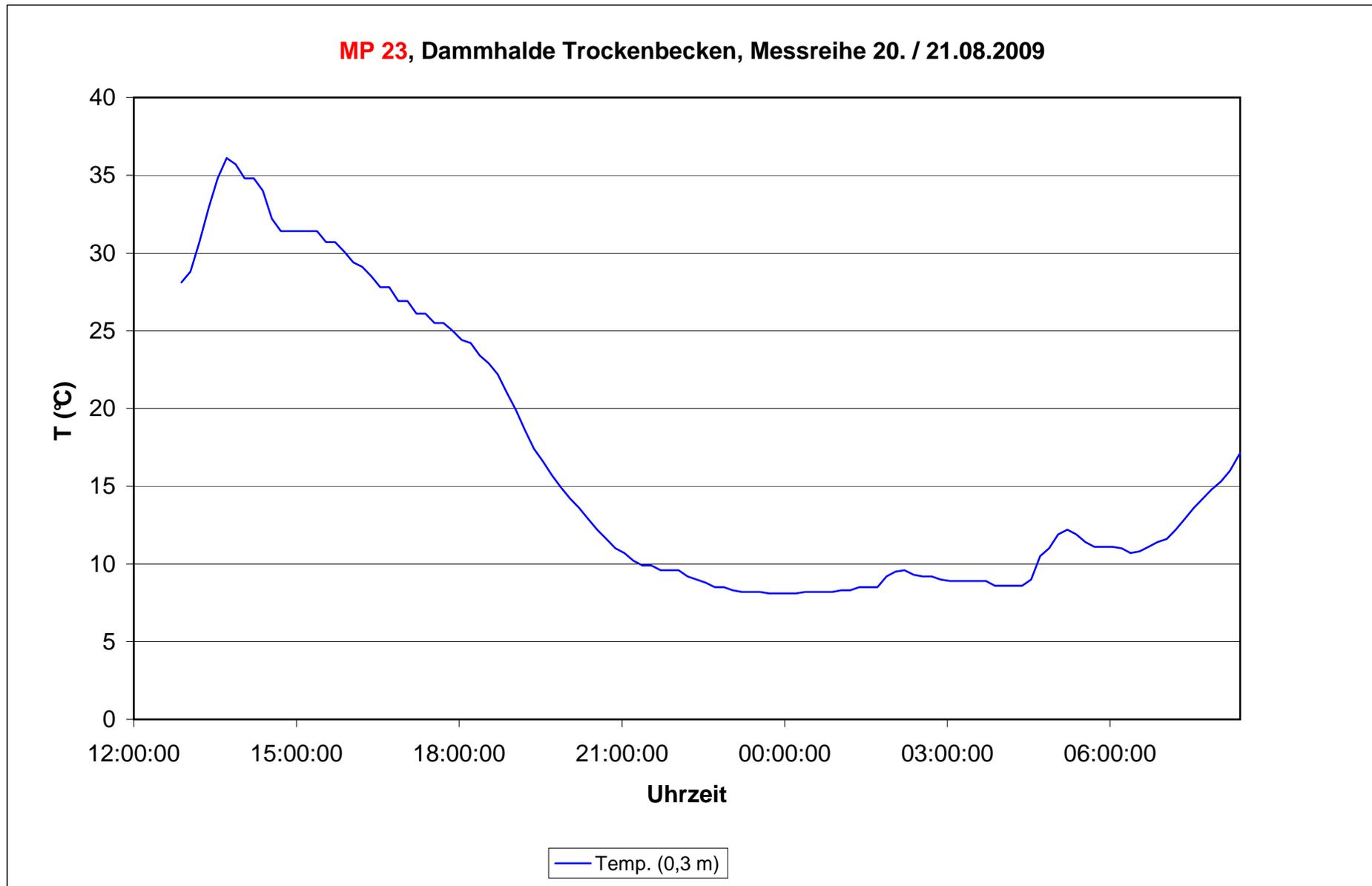


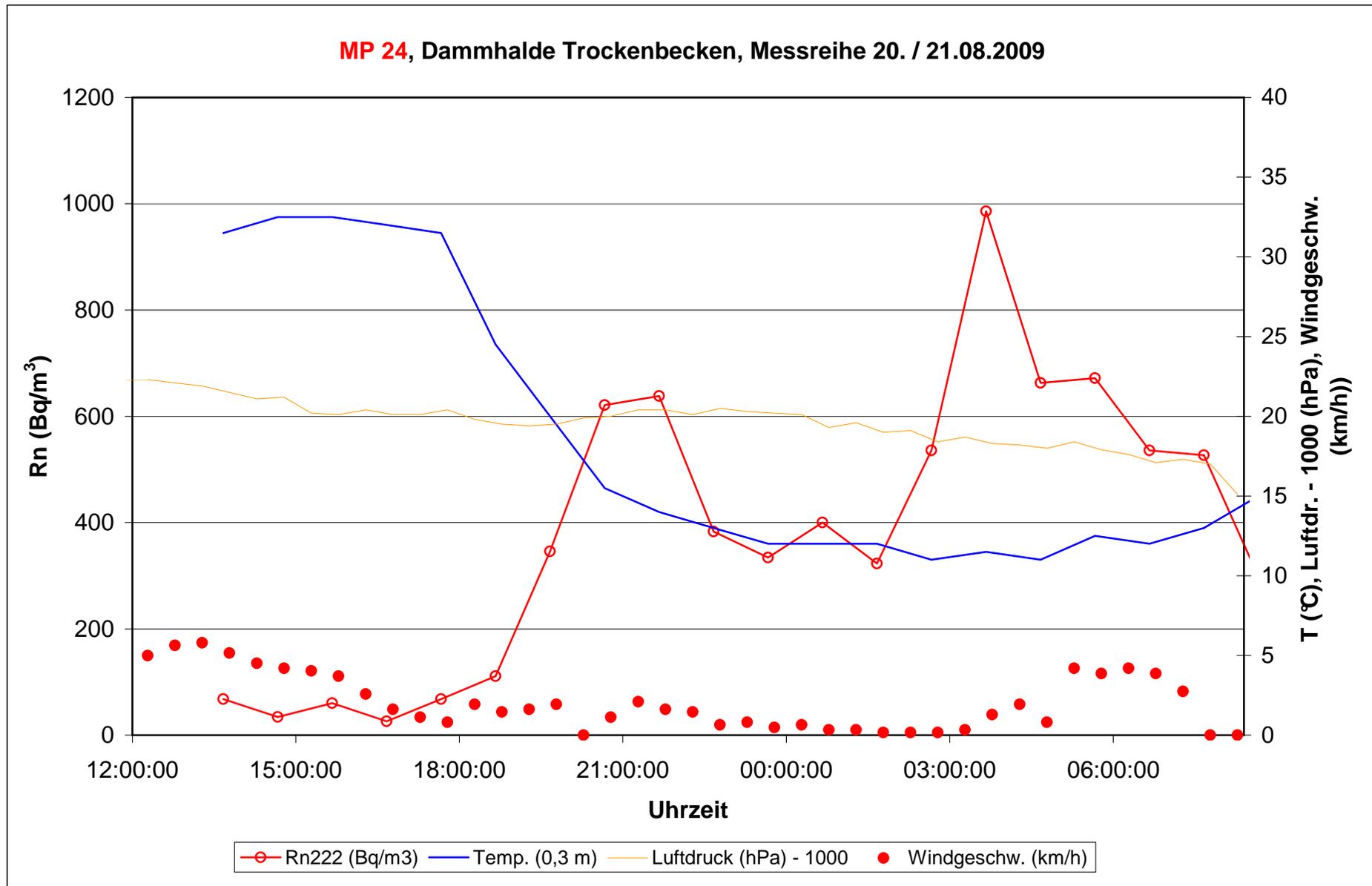


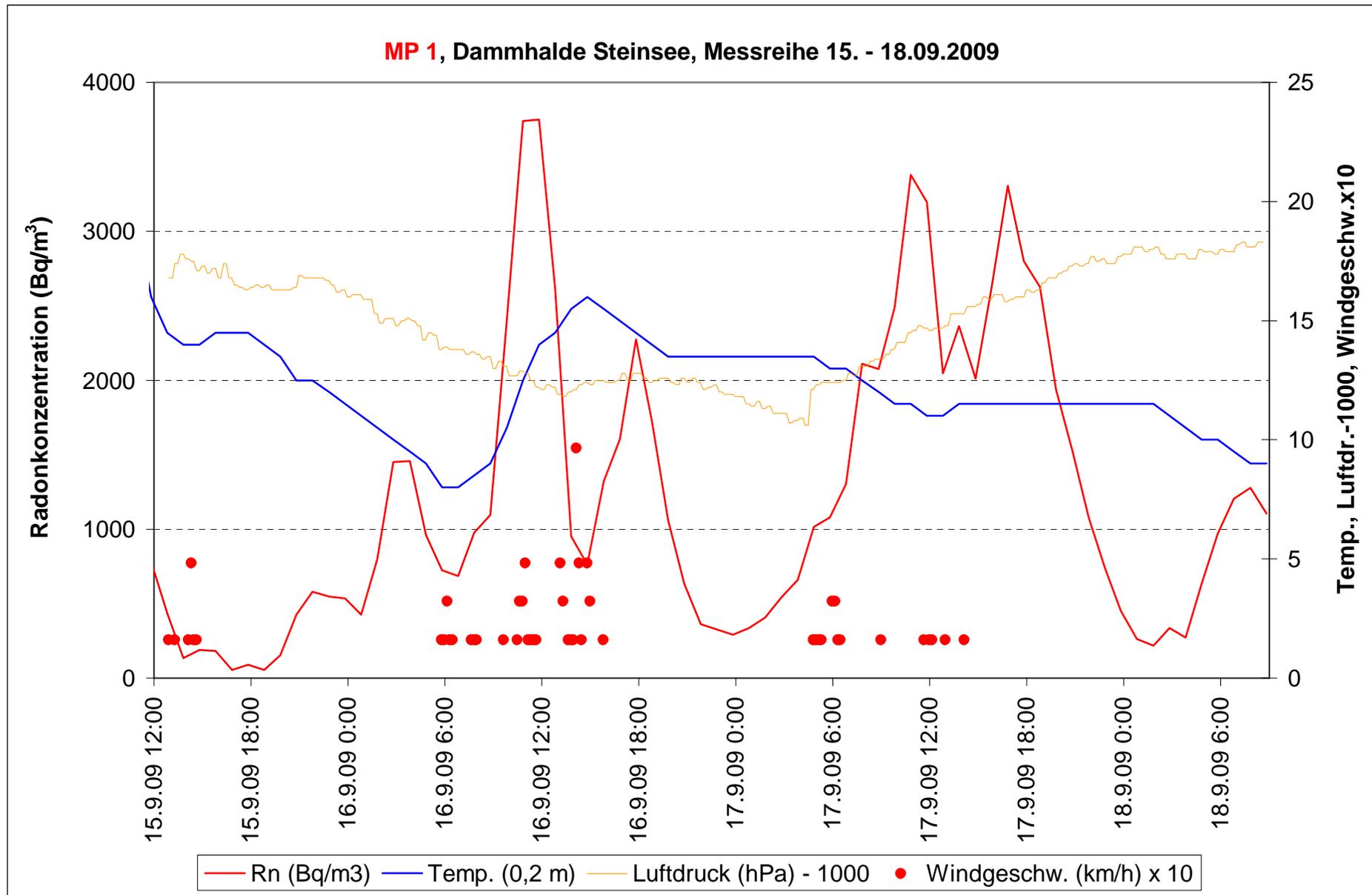


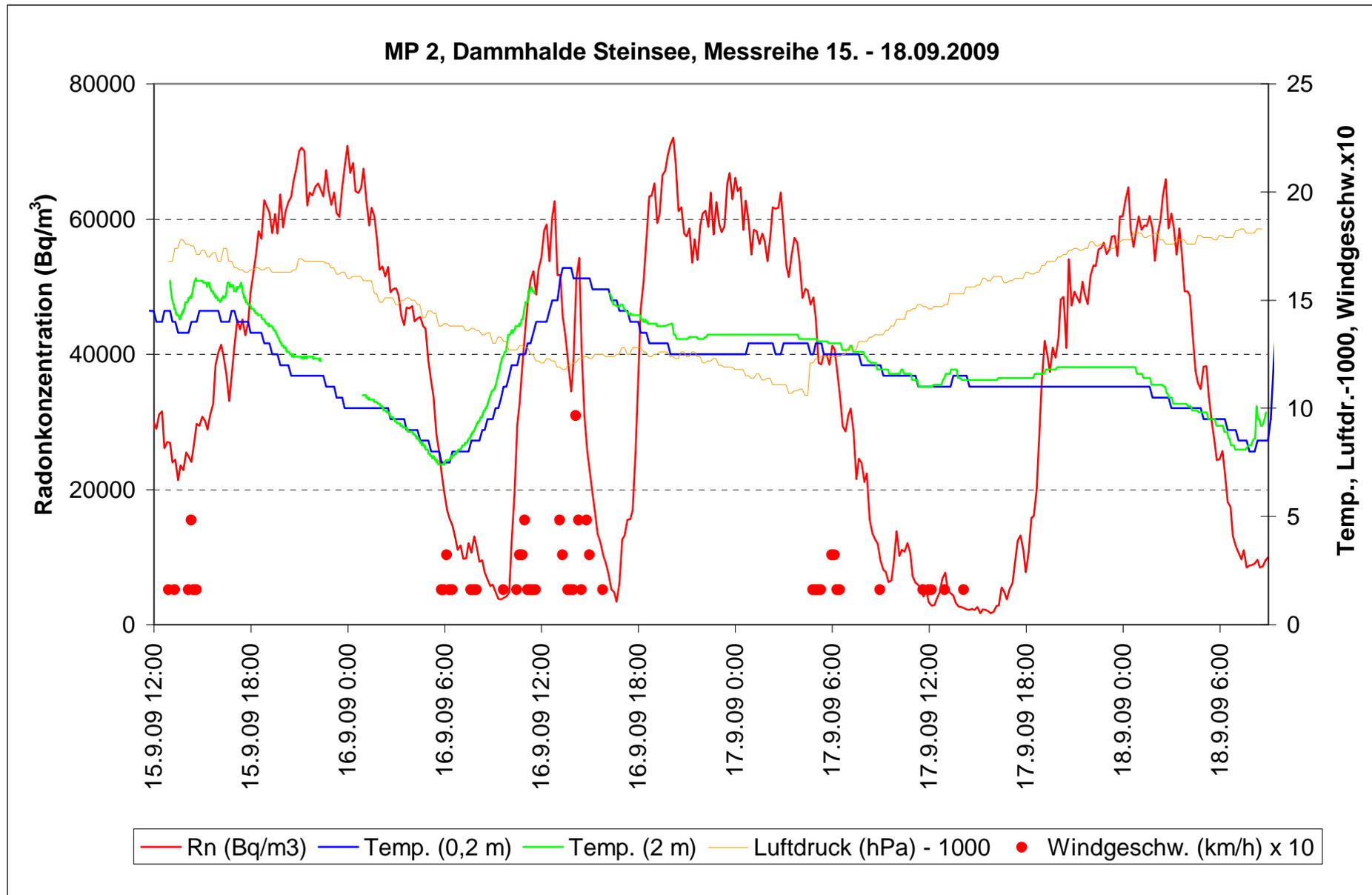


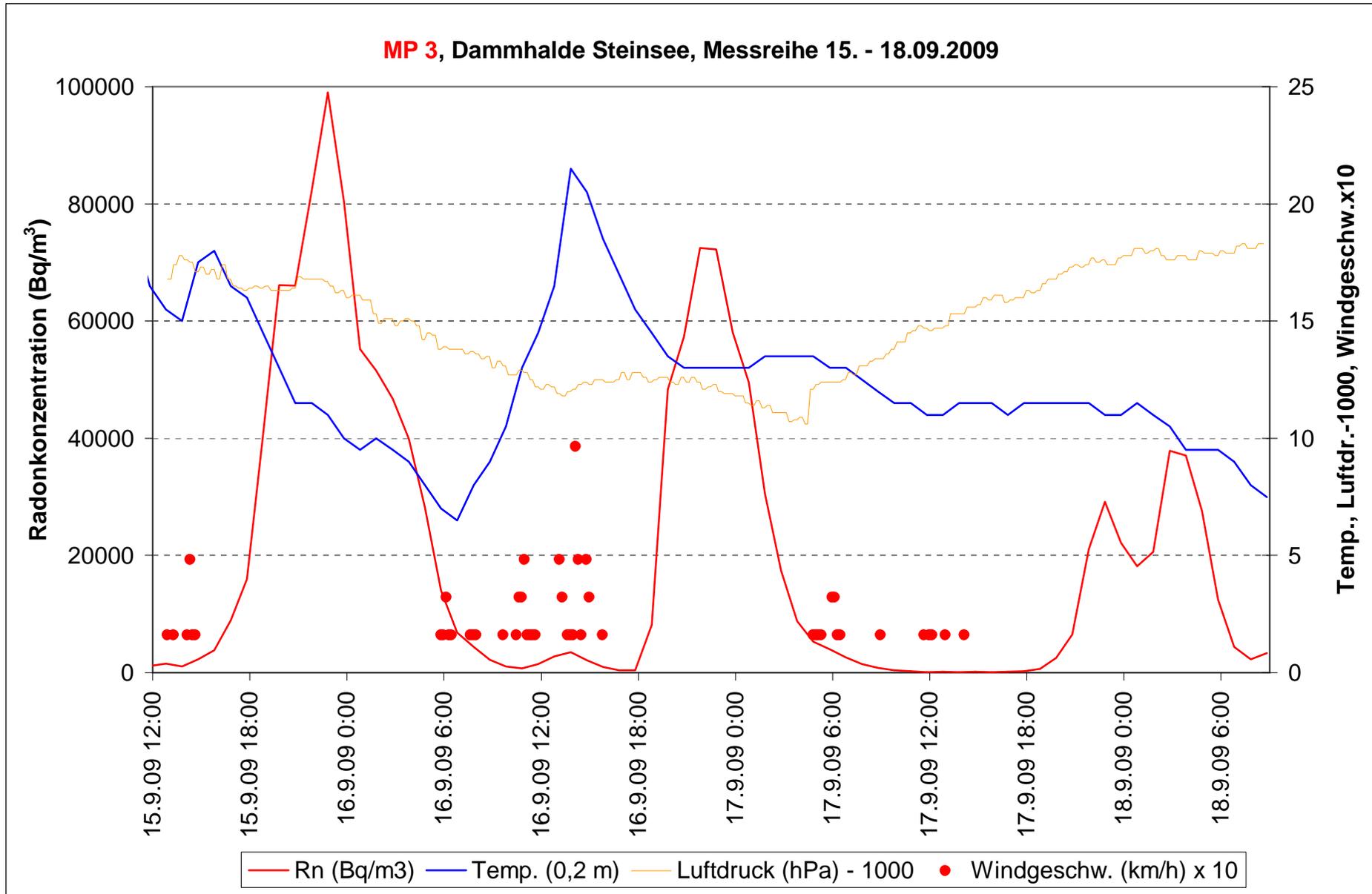


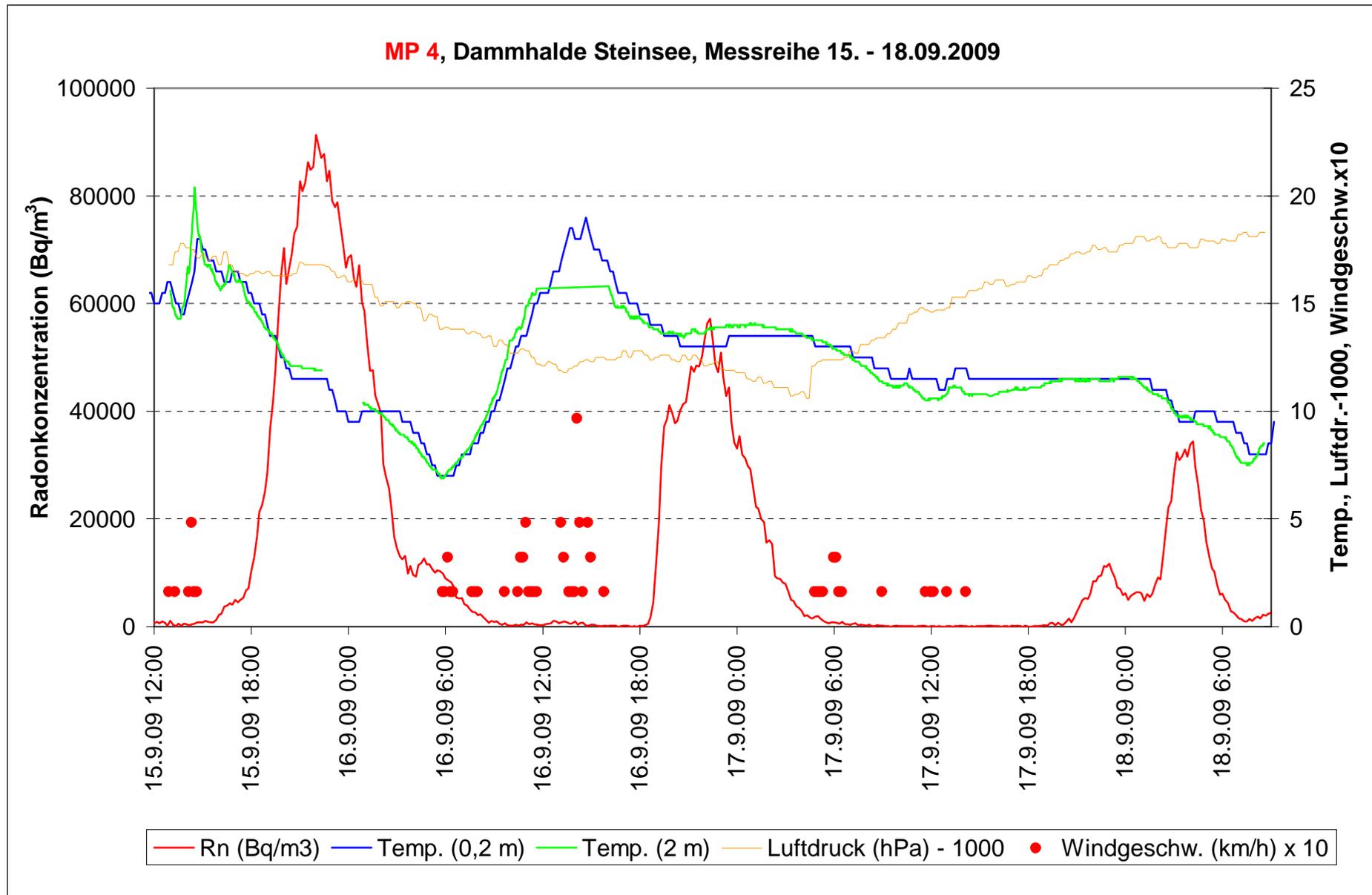


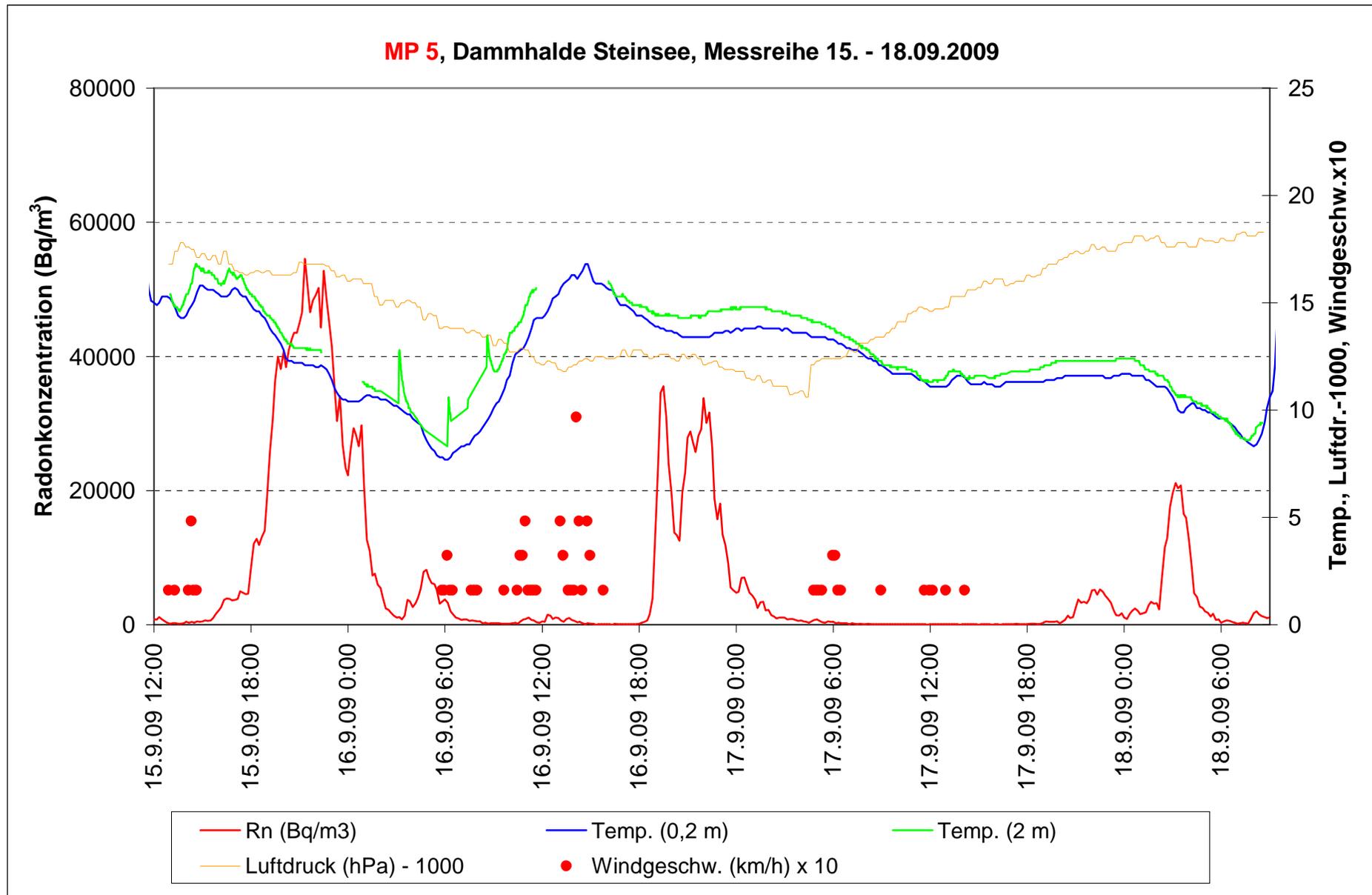


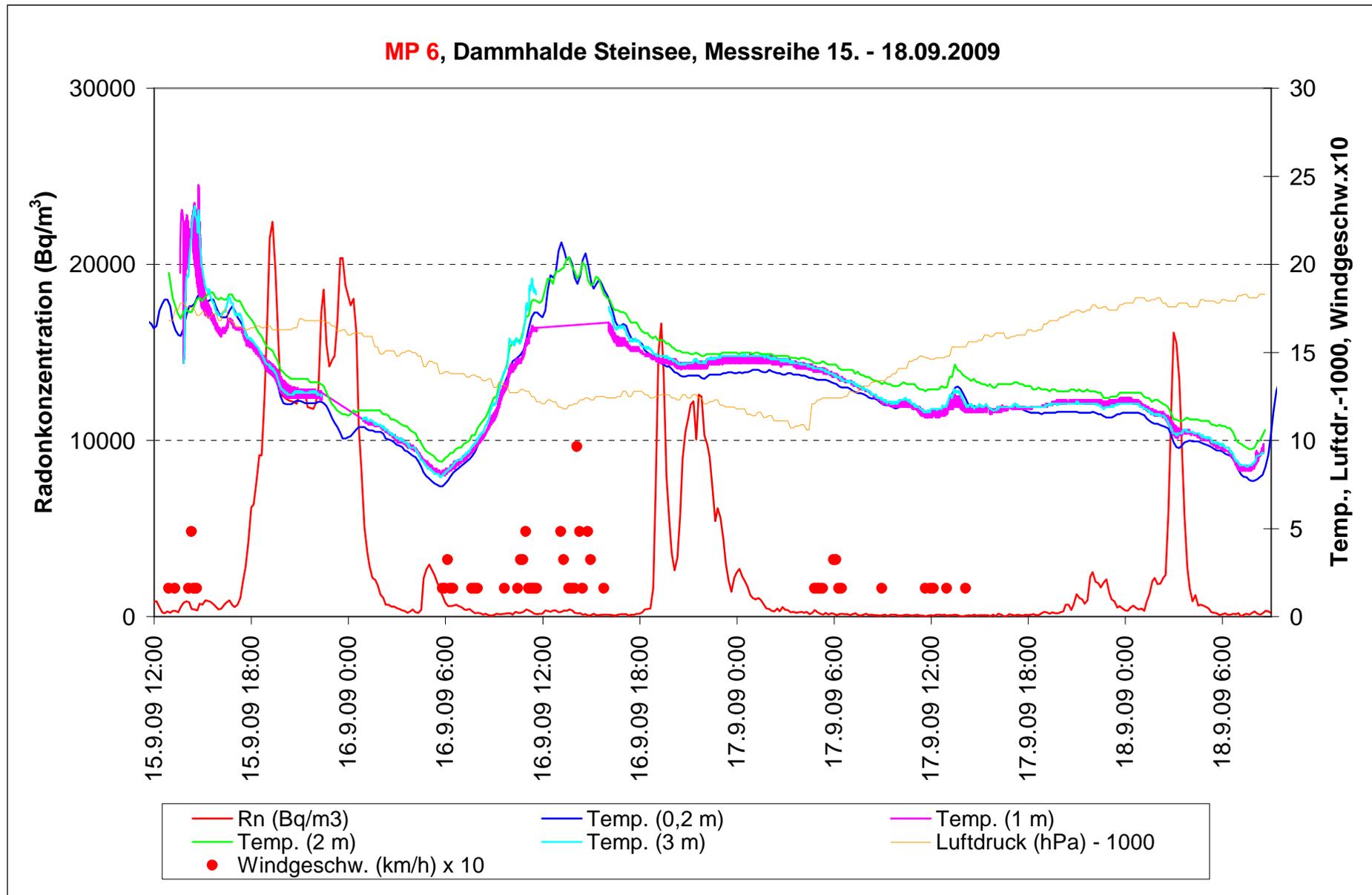


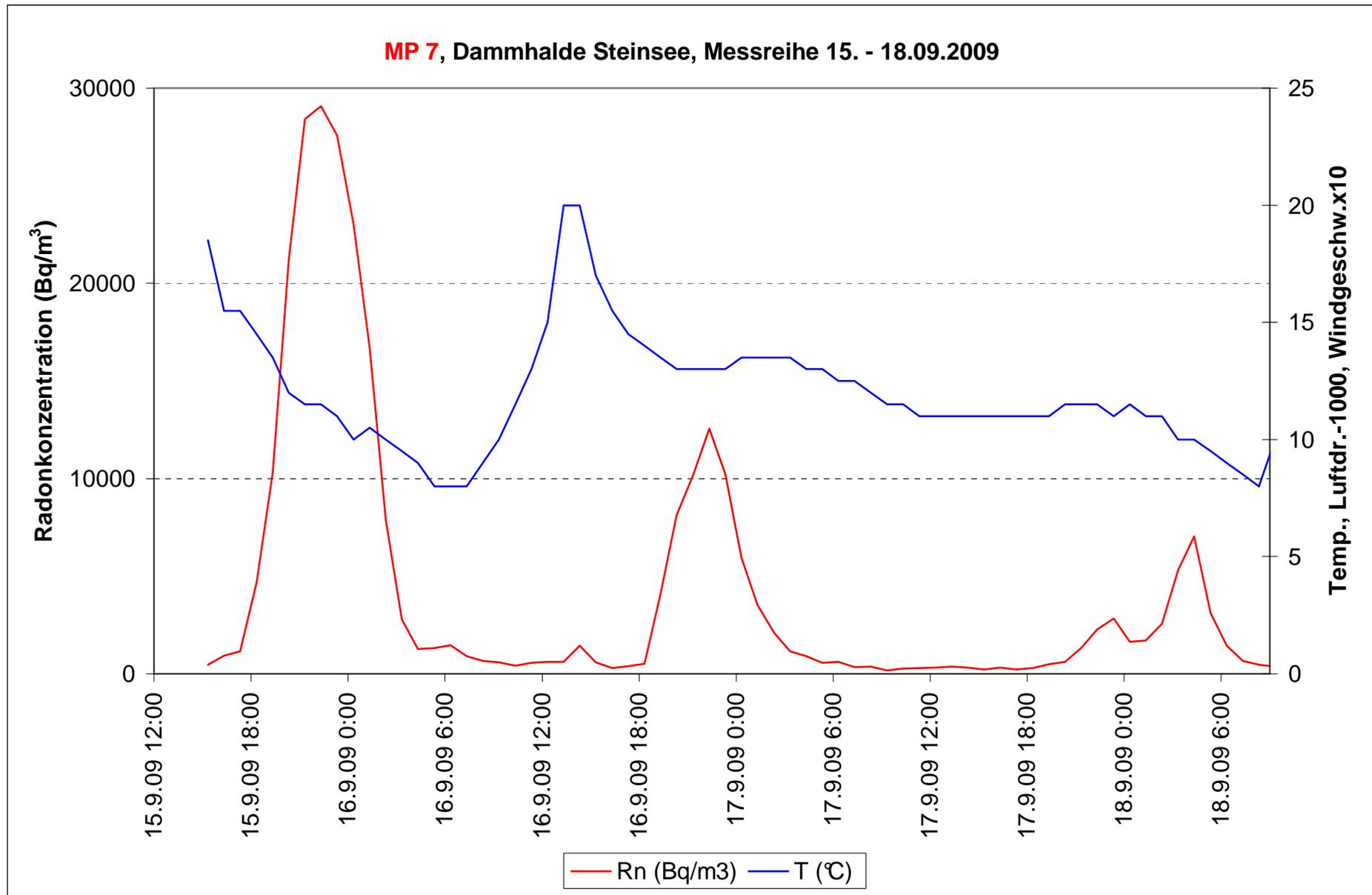


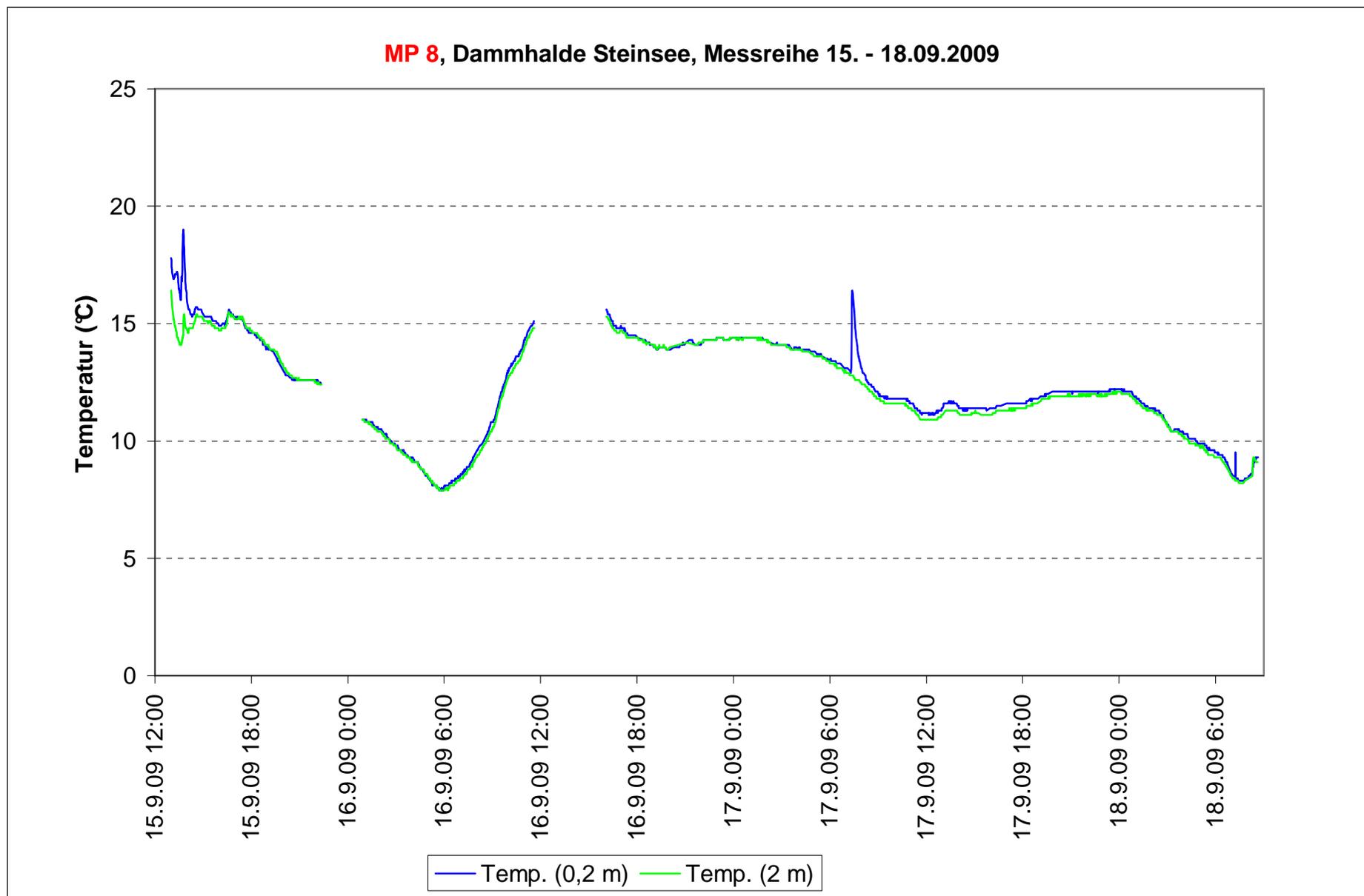


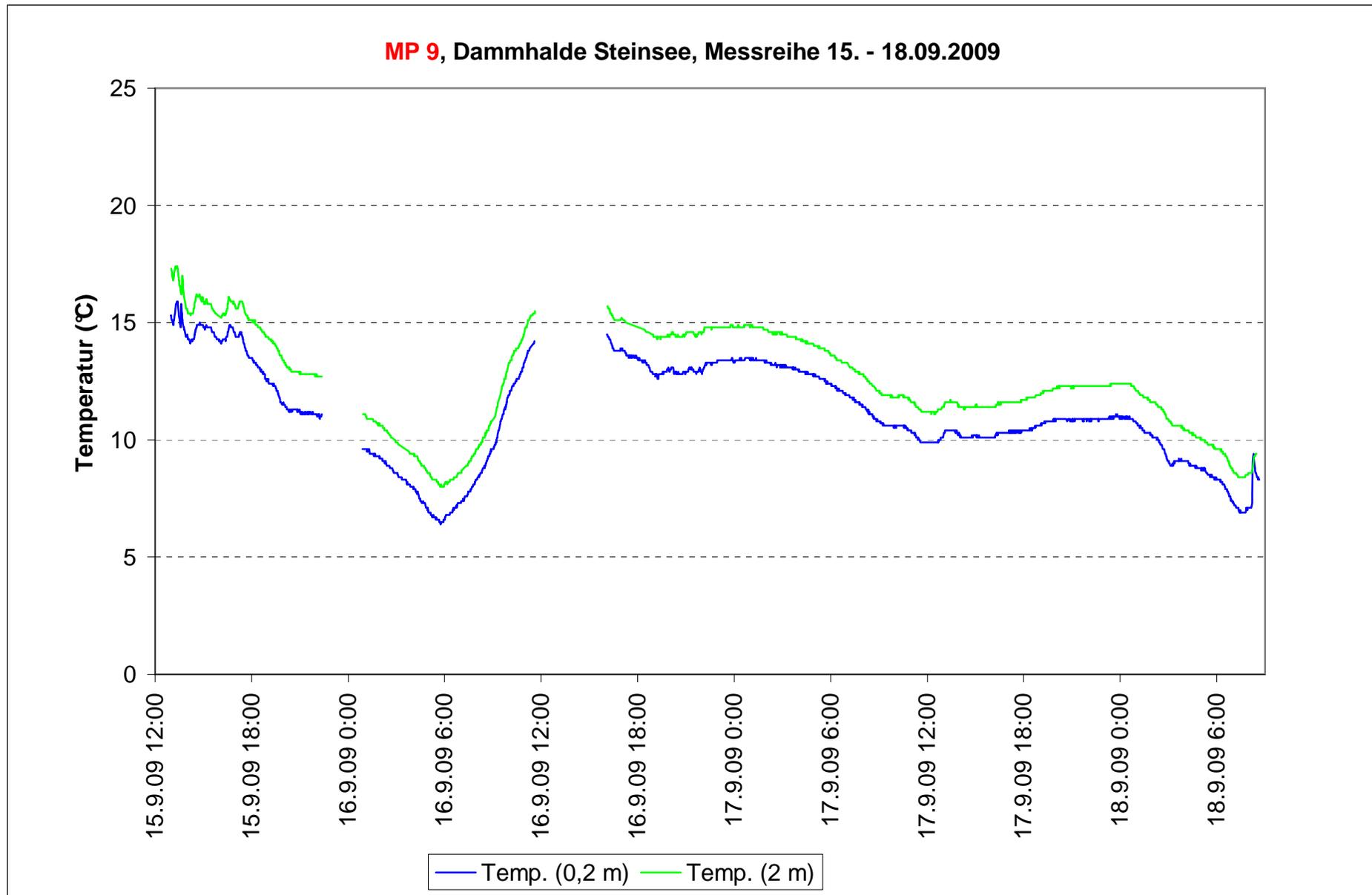


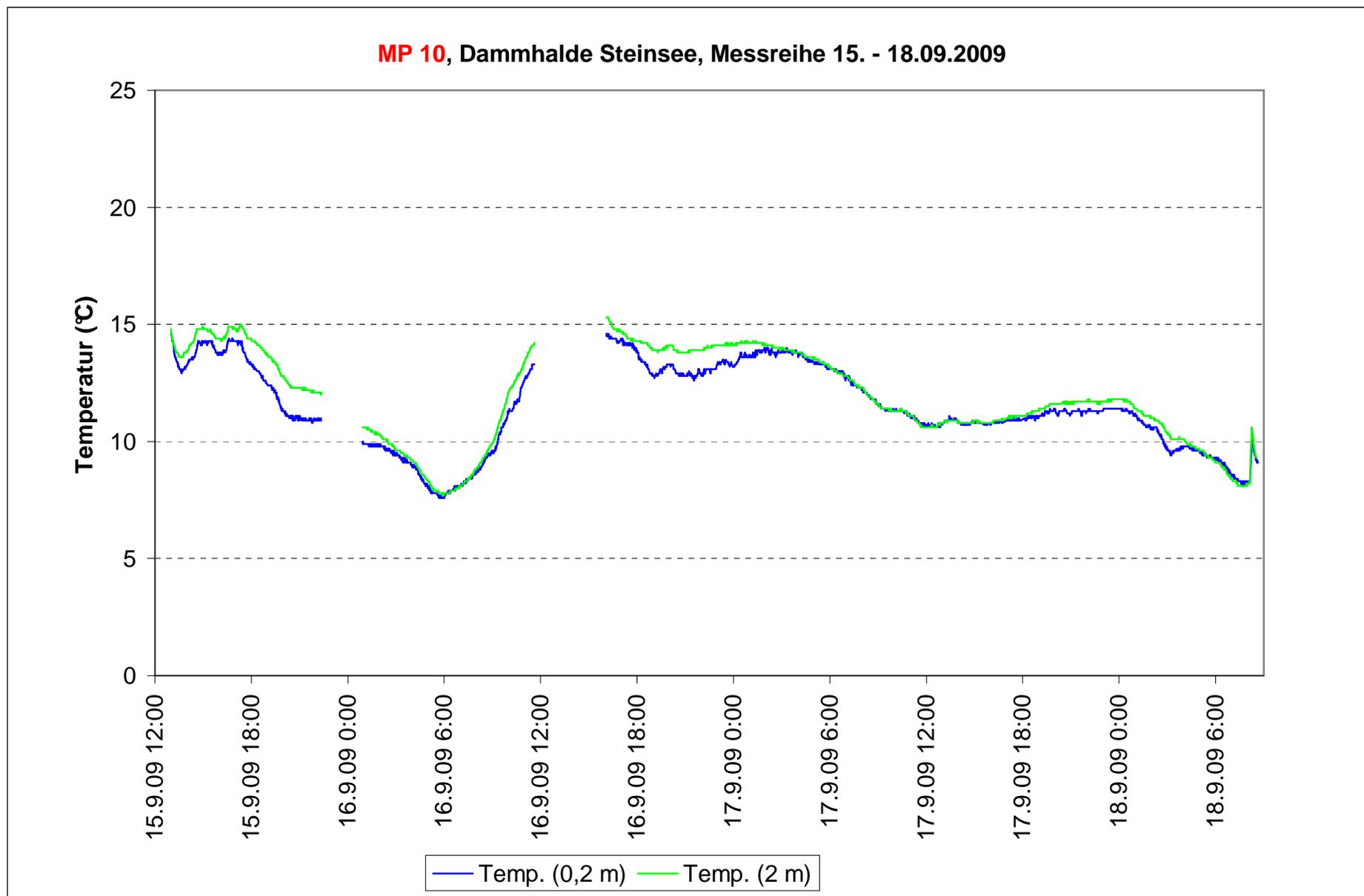


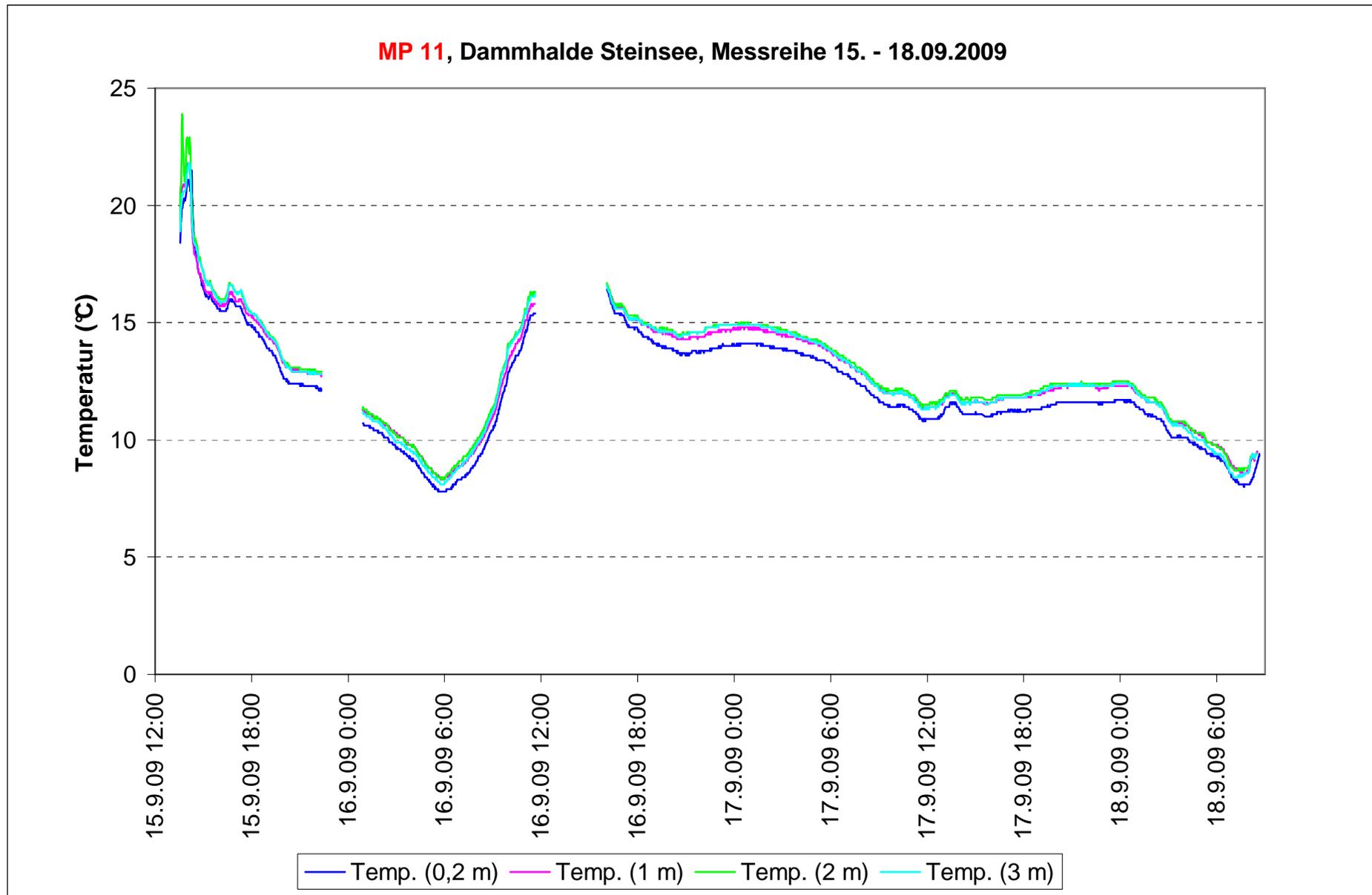


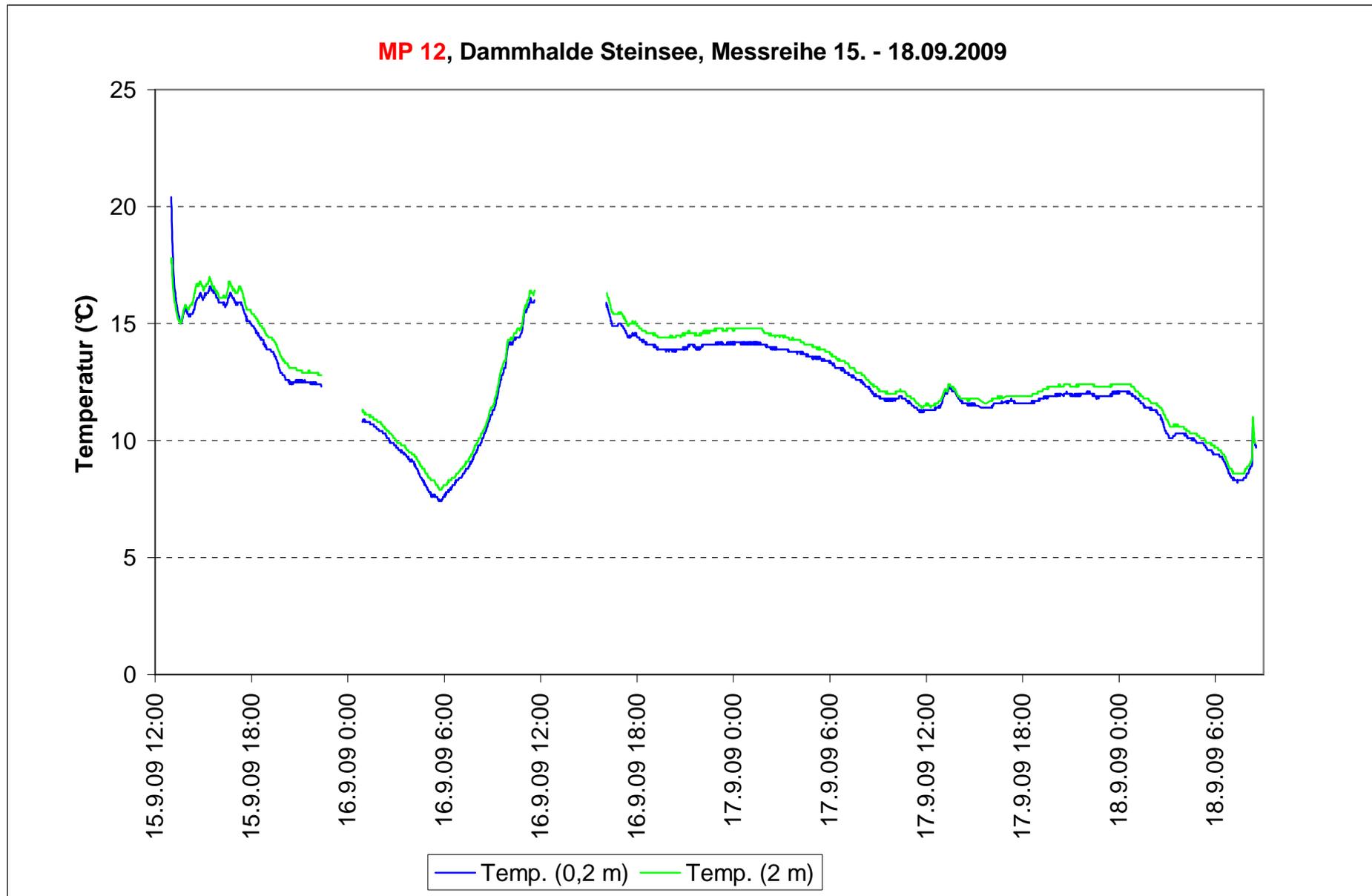


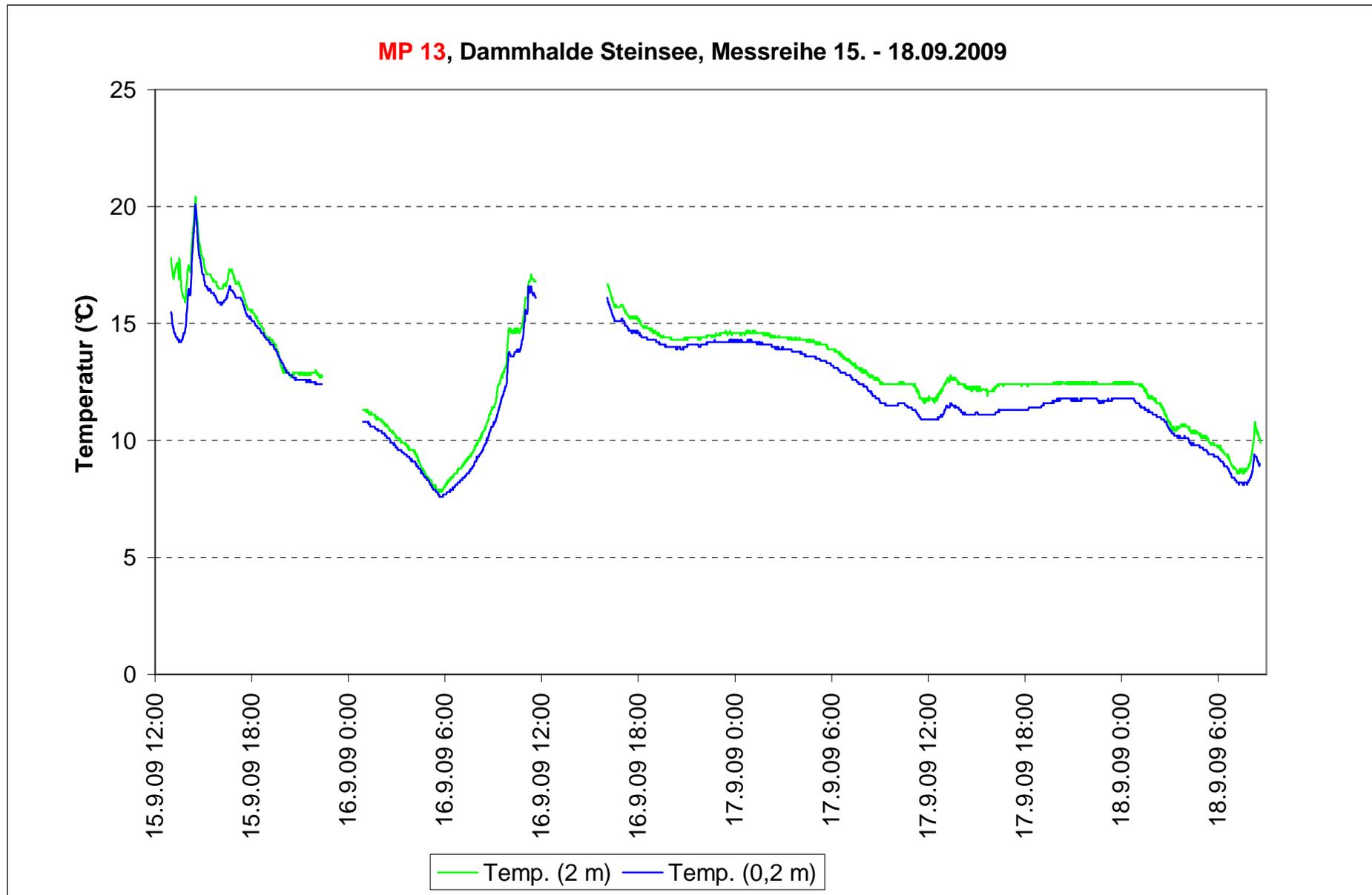


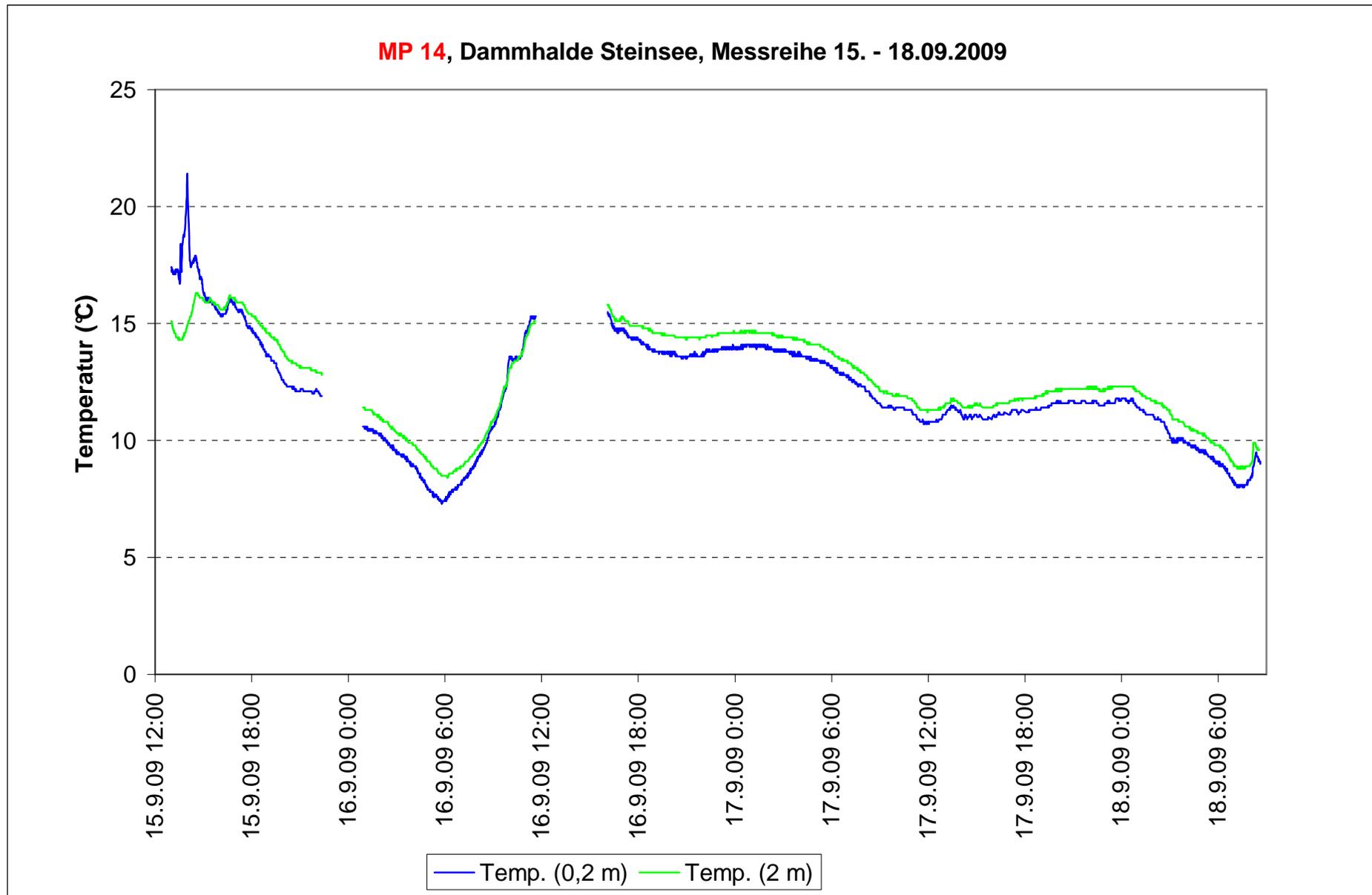


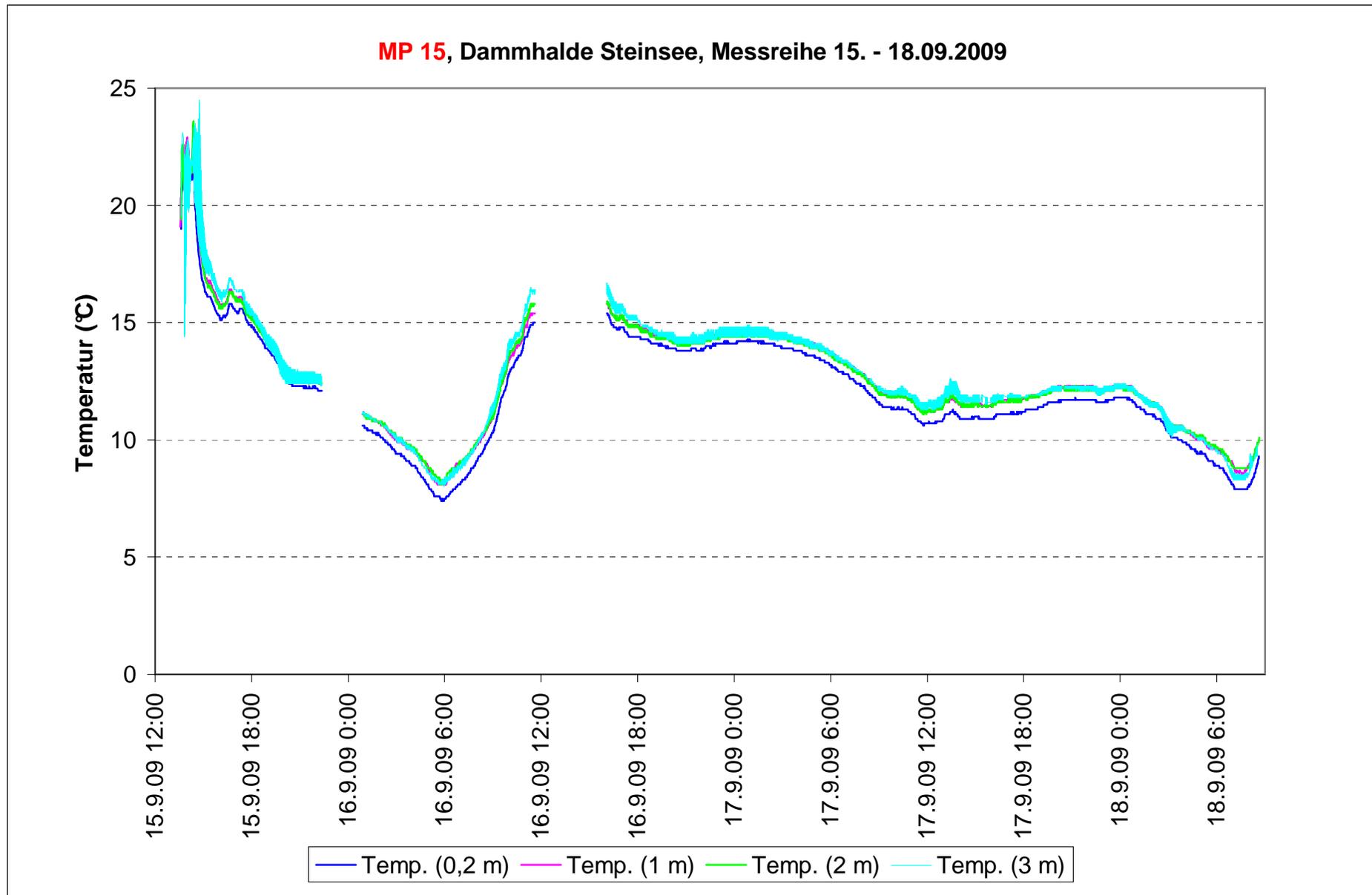












# | Verantwortung für Mensch und Umwelt |

**Kontakt:**

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 30 18333 - 0

Telefax: + 49 30 18333 - 1885

Internet: [www.bfs.de](http://www.bfs.de)

E-Mail: [ePost@bfs.de](mailto:ePost@bfs.de)

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



**Bundesamt für Strahlenschutz**