

**Modellierung des  
Verhaltens von Radon  
am Arbeitsplatz**

## Modellierung des Verhaltens von Radon am Arbeitsplatz

Siegfried Arndt  
André Filby  
Maria-Teresa Hussels  
Henrich Meyering  
Claus Spengler  
Holger Wolff

August 2023

### **Anmerkung:**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter dem Förderkennzeichen 3621S12350 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMUV übereinstimmen.

## **Danksagung**

Die Autoren sind Familie E. (die aus Gründen der Anonymisierung nicht genannt werden können) für die Bereitstellung des Messobjektes mit einem Arbeitsplatz zum Dank verpflichtet.

## **Deskriptoren**

COCOSYS, Messungen, Radon

## Kurzfassung

Das vorliegende Eigenforschungsvorhaben befasst sich mit der Ausbreitungsmodellierung von Radon in ausgewählten Gebäuden. Ziel war die Fortentwicklung des GRS-Codes COCOSYS unter Berücksichtigung der im Forschungsvorhaben 3618S12362 gewonnenen Erkenntnisse. Dabei war vorgesehen, die Adaption von COCOSYS zur Modellierung des Radon-Transports in Gebäuden mit Arbeitsplätzen mit erhöhten Radon-Aktivitätskonzentrationen fortzuführen und die Validierung dafür auf ein neues, höheres Niveau zu bringen.

Zunächst sind zwei geeignete Messobjekte identifiziert worden, wobei eines davon als Reserve dienen sollte. Im Messobjekt (ein Einfamilienhaus mit Arbeitsplatz in Oberhelldungen, Thüringen) wurden dann die Radon-Aktivitätskonzentration und andere relevante Parameter (z. B. Temperatur, Luftdruck, Windgeschwindigkeit) zu unterschiedlichen Jahreszeiten für mehrere Wochen mit aktiver Messtechnik aufgezeichnet. Daraus wurden die für COCOSYS notwendigen Eingabedaten bestimmt. Weiterhin wurde mit passiver Messtechnik (Exposimeter) u. a. eine Langzeitbestimmung von zwölf Monaten durchgeführt.

Ziel der COCOSYS-Rechnungen war die Abschätzung eines langzeitigen Mittelwertes der Radon-Konzentration. Im Forschungsvorhaben 3618S12362 waren eine Reihe von Unzulänglichkeiten bezüglich der gemessenen Radon-Aktivitätskonzentrationen und der COCOSYS-Simulationen festgestellt worden. Bis auf einige wenige Punkte konnten im aktuellen Forschungsvorhaben alle Unzulänglichkeiten behoben werden.

Basis für die erfolgreichen Rechnungen waren detaillierte GRS-eigene Messungen durch sechs Radon-Messgeräte und eine Wetterstation. Damit war eine bessere Dokumentation von Randbedingungen als im Forschungsvorhaben 3618S12362 gegeben. Eine neue Qualität bei der Messwerterfassung konnte durch die Installation von Kontaktschaltern an Türen und Fenstern erreicht werden. Diese lieferten wichtige Informationen zu den Randbedingungen beim Lüften des Arbeitsplatzes.

Die mittels COCOSYS bestimmten und auf ein Jahr extrapolierten Mittelwerte der Radon-Konzentration stimmen gut mit den GRS-Messungen und den vom Sachverständigenbüro Kemski ausgewerteten Exposimeter-Ergebnissen überein.

Zusammenfassend wird eingeschätzt, dass der COCOSYS-Code zur Abschätzung eines Jahresmittelwertes der Radon-Aktivitätskonzentration anwendbar ist. Einschränkend muss jedoch ergänzt werden, dass hierfür Informationen zur Radon-Quellrate, zur Grundlüftung und vor allem zum Lüftungsverhalten erforderlich sind.

Sowohl die COCOSYS-Rechnungen als auch die GRS-Messungen über ausgewählte Zeiträume und die daraus abgeleiteten Jahresmittelwerte sowie die Exposimeter-Jahresmessung zeigen eine Überschreitung des Referenzwertes von  $300 \text{ Bq/m}^3$ . Die ausreichende Lüftung in den Sommermonaten, in der die Mittelwerte unter  $300 \text{ Bq/m}^3$  liegen, kann nicht die höheren Aktivitätskonzentrationen im Winterhalbjahr kompensieren. Damit sind baulich-technische oder andere Maßnahmen zur Reduzierung der Radonkonzentration empfohlen. Dies gilt insbesondere für die als Arbeitsplatz genutzten Zimmer. Die bisherige Praxis der aktiven Lüftung über ein Fenster führt zu Jahresmittelwerten von  $\sim 600 \text{ Bq/m}^3$ . Ohne Fensterlüftung sind Mittelwerte von über  $1\ 200 \text{ Bq/m}^3$  zu erwarten.

## **Abstract**

The present research project deals with the dispersion modelling of radon in selected buildings. The objective was to further develop the GRS code COCOSYS taking into account the findings obtained in the preceding project 3618S12362. It was planned to continue the adaptation of COCOSYS for the modelling of radon transport in buildings with workplaces with increased radon activity concentrations and to bring the validation for this to a new, higher level.

Initially, two suitable measurement objects were identified, one of which was to serve as a reserve. In the measurement object (a single-family house with a workplace in Oberheldrungen, Thuringia), the radon activity concentration and other relevant parameters (e. g. temperature, air pressure, wind speed) were then recorded for several weeks at different times of the year using active measurement technology. From this, the input data required for COCOSYS were determined. Furthermore, a long-term determination of 12 months was carried out with passive measurement technology (exposimeter).

The aim of the COCOSYS calculations was to estimate a long-term mean value of the radon concentration. In the previous project, a number of deficiencies had been identified with respect to the measured radon activity concentrations and the COCOSYS simulations. Except for a few issues, all deficiencies were resolved in the current project.

The successful calculations were based on detailed GRS measurements by six radon measuring instruments and a weather station. This provided a better documentation of boundary conditions than in the previous project. A new quality in the recording of measurements was achieved by installing contact switches at doors and windows. These provided important information on the boundary conditions when ventilating the workplace.

The mean values of the radon concentration determined by COCOSYS and extrapolated to one year agree well with the GRS measurements and the exposimeter results evaluated by the expert office J. Kemski.

In summary, it is estimated that the COCOSYS code is applicable for the estimation of an annual mean value of the radon activity concentration. However, it must be added that this requires information on the radon source rate, the basic ventilation and, above all, the ventilation behaviour.

Both the COCOSYS calculations and the GRS measurements over selected periods and the annual mean values derived from them, as well as the exposimeter annual measurement, showed that the reference value of 300 Bq/m<sup>3</sup> was exceeded. Sufficient ventilation in the summer months, when the mean values are below 300 Bq/m<sup>3</sup>, cannot compensate for the higher activity concentrations in the winter half-year. Thus, structural-technical or other measures to reduce the radon concentration are recommended. This is especially true for rooms used as workplaces. The current practice of active ventilation via a window leads to annual mean values of ~600 Bq/m<sup>3</sup>. Without window ventilation, mean values of over 1,200 Bq/m<sup>3</sup> are to be expected.

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Kurzfassung.....</b>	<b>I</b>
	<b>Abstract .....</b>	<b>III</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielstellung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Darstellung der Forschungsarbeiten und -ergebnisse .....</b>	<b>3</b>
2.1	AP 1.1: Identifizierung geeigneter Gebäude mit Arbeitsplätzen.....	3
2.1.1	Allgemeines .....	3
2.1.2	Ergebnisse.....	4
2.2	AP 1.2: Planung und Instrumentierung der Messungen .....	8
2.2.1	Allgemeines .....	8
2.2.2	Ergebnisse.....	10
2.3	AP 1.3: Durchführung von Detailuntersuchungen, kontinuierliche Messungen und Auswertung der Daten .....	11
2.3.1	Allgemeines .....	11
2.3.2	Ergebnisse.....	12
2.3.2.1	Messkampagne 1 (Winter, Frühjahr).....	13
2.3.2.2	Messkampagne 2 (Sommer).....	17
2.3.2.3	Langzeitbestimmung mittels Exposimetern .....	19
2.4	AP 2: Weitere Adaption von COCOSYS zur Simulation von Radon- Ausbreitungsvorgängen .....	21
2.4.1	Wetter-Randbedingungen.....	21
2.4.1.1	Modellerweiterung .....	21
2.4.1.2	Testrechnung.....	22
2.4.2	Simulation der Strömung durch Fenster und Türen.....	24
2.4.2.1	Modellauswahl .....	24
2.4.2.2	Modellimplementierung.....	29
2.4.2.3	Modellaustestung und erster Schritt der Modellvalidierung .....	32
2.4.3	Raumbezogene kumulierte Mittelwerte der Rn-222 Aktivitätskonzentration .....	38



2.4.3.1	Modellerweiterung .....	38
2.4.3.2	Testrechnungen.....	39
2.4.3.3	Validierung anhand EFH (2019 Messungen) .....	43
2.5	AP 3: Fortsetzung der COCOSYS-Validierung für Radon- Ausbreitungsvorgänge anhand neuer Messdaten .....	45
2.5.1	Erstellung von COCOSYS-Eingabedatensätzen für das Messobjekt Oberheldrungen.....	47
2.5.1.1	Datensatz „Ganze Räume“ .....	49
2.5.1.2	Datensatz „Unterteilte Räume“.....	52
2.5.2	Analyse der Messdaten für Messphase 1 und Festlegung von Basiswerten für Modellparameter .....	56
2.5.3	COCOSYS-Rechnungen zur Messphase 1.....	62
2.5.3.1	Überprüfung des theoretischen Ansatzes für stationäre Bedingungen .....	62
2.5.3.2	Testrechnungen zur Anpassung des COCOSYS-Eingabedatensatzes....	65
2.5.3.3	Untersuchungen zur Fenster-Öffnung.....	82
2.5.3.4	Nachrechnung der Radon-Aktivitätskonzentration und des Mittelwertes ..	87
2.5.4	COCOSYS-Vorausrechnungen zur Messphase 2.....	100
2.5.4.1	Prognoserechnung 1 – „blinde“ Rechnung.....	101
2.5.4.2	Prognoserechnung 2 – Radon-Quellrate und Lüftungszahl.....	103
2.5.4.3	Prognoserechnung 3 – Öffnung Fenster F1 .....	104
2.5.4.4	Prognoserechnung 4 - Wetterrandbedingungen .....	107
2.5.4.5	Vergleich der Rechnungen mit den Messdaten und Einschätzung der Prognosefähigkeit.....	111
2.5.5	COCOSYS-Rechnung zur Messphase 3 – „Sommermessung“.....	118
2.5.6	Abschätzung einen Jahresmittelwertes und Vergleich mit Exposimeter- Messung.....	127
2.6	AP 4: Ableitung von Maßnahmen und Handlungsempfehlungen .....	129
2.6.1	Maßnahme „Fensteröffnung“ .....	132
2.6.2	Maßnahme „Abluftanlage“ .....	137
2.7	AP 5: Verfolgung und Auswertung des internationalen Standes von Wissenschaft und Technik.....	146

2.8	Gegenüberstellung der vorliegenden Ergebnisse mit jenen aus dem Forschungsvorhaben 3618S12362 .....	149
<b>3</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>151</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>153</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>159</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>169</b>



# 1 Einleitung und Zielstellung

Ziel des Forschungsvorhabens war die Fortentwicklung des GRS-Codes COCOSYS unter Berücksichtigung der im Forschungsvorhaben 3618S12362 gewonnenen Erkenntnisse /GRS 20/. Es war vorgesehen, die Adaption und die Validierung von COCOSYS zur Modellierung des Radon-Transports in Gebäuden mit Arbeitsplätzen mit erhöhten Radon-Aktivitätskonzentrationen auf ein neues, höheres Niveau zu bringen. Dabei sollte die Qualität der Nachrechnungen durch genauer bestimmte Randbedingungen (Messungen), die im Forschungsvorhaben 3618S12362 als entscheidende Einflussgrößen identifiziert wurden, wesentlich verbessert werden.

Für das Forschungsvorhaben sollten zwei geeignete Messobjekte identifiziert werden (eines davon diente als Reserve). In einem der identifizierten Gebäude wurde im ersten Schritt die Radon-Aktivitätskonzentration und andere relevante Parameter (z. B. Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchte, Luftwechselrate) für einen gewissen Zeitraum (falls möglich länger als zwei Wochen) und zu unterschiedlichen Jahreszeiten mittels aktiver Messtechnik gemessen (hierbei wird die zeitliche Entwicklung der Radon-Konzentration erfasst). Aus diesen Daten werden die für COCOSYS notwendigen Eingabedaten, insbesondere die Radon-Quellstärke und die meteorologischen Randbedingungen bestimmt. Weiterhin wurde mit passiven Messgeräten eine Langzeitbestimmung (1 bis 12 Monate) der Radon-Aktivitätskonzentrationen in dem Gebäude durchgeführt. Im Rahmen der Messungen sollten möglichst Ganglinien der Radon-Aktivitätskonzentration, z. B. für Tag und Nacht bzw. für Winter und Sommer erfasst werden, da diese Messwerte als Eingabe- bzw. Vergleichsdaten für die Modellrechnungen genutzt werden sollten.

Unter Anwendung von COCOSYS wurde in Variantenanalysen erarbeitet, welche Parameter (u. a. neue Messwerte) die Radon-Aktivitätskonzentration am Arbeitsplatz maßgeblich beeinflussen. Eine entscheidende und praxisrelevante Fragestellung ist, inwieweit die Radon-Aktivitätskonzentration aus den aktiven Messungen mit COCOSYS nachgerechnet werden können. Darüber hinaus wurden mit Hilfe eines neu in COCOSYS zu implementierenden Modells Mittelwerte der Radon-Aktivitätskonzentration, die über Exposimeter und aus den Messdaten der aktiven Messtechnik bestimmt werden, berechnet und verglichen. Diese Untersuchungen dienten der Validierung von COCOSYS.



## **2 Darstellung der Forschungsarbeiten und -ergebnisse**

Im folgenden Kapitel werden die Hintergründe der jeweiligen Arbeitspakete beleuchtet und die Ergebnisse dargestellt.

### **2.1 AP 1.1: Identifizierung geeigneter Gebäude mit Arbeitsplätzen**

#### **2.1.1 Allgemeines**

Als Arbeitsplätze im Sinne dieses Forschungsvorhabens gelten nach § 2 ArbStättV Bereiche von Arbeitsstätten, in denen sich Beschäftigte bei der von ihnen auszuübenden Tätigkeit regelmäßig über einen längeren Zeitraum oder im Verlauf der täglichen Arbeitszeit nicht nur kurzfristig aufhalten müssen. Als Arbeitsstätten gelten

- Orte in Gebäuden oder im Freien, die sich auf dem Gelände eines Betriebes oder einer Baustelle befinden und die zur Nutzung für Arbeitsplätze vorgesehen sind und
- andere Orte in Gebäuden oder im Freien, die sich auf dem Gelände eines Betriebes oder einer Baustelle befinden und zu denen Beschäftigte im Rahmen ihrer Arbeit Zugang haben.

Gemäß der Zielsetzung wurden Arbeitsplätze im Freien von der Untersuchung ausgeschlossen.

In diesem AP erfolgte die Identifizierung der zu instrumentierenden Gebäude (Standortsuche, -bewertung und -auswahl bezüglich bautechnischer, geologischer, orographischer und den Baugrund betreffender Merkmale).

Für das Forschungsvorhaben war die Identifizierung von zwei geeigneten Messobjekten mit Arbeitsplätzen vorgesehen, wobei eines davon als Reserve diente, falls es in einem Messobjekt zu unvorhergesehenen Schwierigkeiten kommt. Hierbei wurden vergleichsweise einfach gestaltete Objekte mit maximal drei Räumen betrachtet, da die Strömungsprozesse in Gebäuden mit mehr als drei in Verbindung stehenden Räumen sehr komplex sind und schwer erfassbar sowie modellierbar sind. Für ihre aussagekräftige und realitätsnahe Modellierung wäre ein messtechnischer Aufwand notwendig, der das Budget dieses Forschungsvorhabens überschritten hätte.

Die Messobjekte mit den Arbeitsplätzen sollten folgende Eigenschaften haben:

- Erhöhte Radon-Aktivitätskonzentration gegenüber dem Referenzwert (bekannt oder vermutet aufgrund der Lage)
- wenige Verbindungen zwischen den Räumen (möglichst geringe Komplexität)
- bekannte bzw. definierte Bedingungen hinsichtlich Raumnutzung

Für die Akquise der Messobjekte wurde ein Unterauftragnehmer beauftragt. Aus der (geographischen) Lage des Messobjekts konnte mittels vorhandener Karten, ergänzt um zusätzliche Informationen zum Standort, u. U. abgeleitet werden, ob hier mit erhöhten Bodenluftkonzentrationen zu rechnen war.

Es erfolgten die Charakterisierung der in Frage kommenden Gebäude mit Arbeitsplätzen (Innenvolumen, Anzahl der Räume, Geometrie des Gebäudes) und der Austausch der Informationen für die erforderliche Nodalisierung für die Untersuchungen mit COCOSYS.

### **2.1.2 Ergebnisse**

Für die Akquise der Messobjekte wurde das Sachverständigenbüro J. Kemski (Bonn) beauftragt. In diesem Zusammenhang wurde von der GRS eine Liste mit Anforderungen der Messobjekte erstellt, auf deren Basis die Suche nach Messobjekten durchgeführt wurde. Die Liste ist in Tab. 2.1 dargestellt.

**Tab. 2.1** Anforderungen an die Messobjekte

Priorisierung: 1: sehr wichtig, 2: wichtig, 3: weniger wichtig

Anforderungen	Priorisierung
Erhöhte Radon-Aktivitätskonzentration gegenüber dem Referenzwert von 300 Bq/m <sup>3</sup> (bekannt oder vermutet aufgrund der Lage). Radoneintritt aus dem Baugrund.	1
Wenige Verbindungen zwischen den Räumen (allgemein möglichst geringe Komplexität), Räume sollten z. B. durch Türen voneinander getrennt sein, keine signifikanten Undichtigkeiten der Fenster.	1
Bekannte bzw. definierte Bedingungen hinsichtlich Raumnutzung (möglichst mit Protokoll mit Zeitpunkten & Aktion)	2
Internetanschluss (WLAN), der von der GRS genutzt werden kann (zum Senden von Messdaten).	1 - 2
Mindestens 2-wöchige Messreihe, aber vorzugsweise 1 Monat (für jede der beiden vorgesehenen Kampagnen)	1
Platzierung von meteorologischen Sensoren im Gebäude (z. B. in Nähe von Heizung und etwa zentral im Raum), um Luftdruck/Temperatur zu erfassen und einer Wetterstation außerhalb des Gebäudes	1
Platzierung von Exposimetern in den Räumen (einer pro Raum)	1 (sind klein und unauffällig und sollten daher kein Problem darstellen)
Anbringung vorgesehener Kontaktschalter an Türen und Fenstern zur Aufzeichnung, wann Fenster und Türen geöffnet wurden.	2 (es müssen nicht unbedingt alle Türen/Fenster ausgestattet werden, aber je mehr desto besser natürlich)
Nutzung der Steckdosen (Strom) des Inhabers	1
Relativ simpler Fall: (Homeoffice) Person, die in Zwei-Zimmer-Wohnung wohnt und vielleicht auch einen Teil der Messzeit in Urlaub ist. So hätte man Vergleichsdaten (Anwesenheit/Abwesenheit des Bewohners). Oder 1-Mann-Ingenieurbüro (Person, die dort nicht wohnt und abends/nachts keine Störungen sind). Erfahrungsgemäß wären klassische Büroarbeitsplätze gut für dieses Forschungsvorhaben, insbesondere Freiberufler.	2 - 3 (zu diskutieren, was alles in Betracht gezogen werden könnte)
Im Fall vorhandener Lüftung: kann diese an- und abgeschaltet werden, je nach Erfordernis? Bzw. für die Messungen ist eine aktivierte Lüftung nicht zielführend.	1
Kein Altbau, je weniger potenzielle unauffindbare Leckagestellen, desto besser. Möglichst mit Grundplatte und evtl. Unterkellerung.	2 - 3



Anforderungen	Priorisierung
Geographische Bedingungen: in NRW oder Ostdeutschland	3
Art der durchgeführten Arbeit	3
Anzahl von Arbeitsplätzen	3
Gute/sichere Platzierung der Messgeräte in den Räumen möglich	2

Das Sachverständigenbüro J. Kemski konnte ein adäquates Messobjekt, das die o. g. Kriterien zu genüge erfüllt, identifizieren. Es handelt sich dabei um ein Einfamilienhaus (EFH) mit einem Arbeitsplatz im Souterrain, das sich in Oberheldringen, Thüringen, befindet. Das EFH besteht aus Souterrain, Erdgeschoss und Dachgeschoss mit schrägen Wänden. Potenziell erhöhte Rn-Aktivitätskonzentrationen waren hier bereits bekannt. Die Abb. 2.1 zeigt die Lage des Messobjekts in Deutschland. Weitere Informationen zur Instrumentierung und zu den Untersuchungen in diesem Messobjekt finden sich in Kapitel 2.2 bzw. 2.3.

## Radon-Vorsorgegebiete

Die Karte bildet den Stand der  
Gebietsausweisungen der einzelnen  
Bundesländer vom 15. Juni 2021 ab.

Das BFS hat diese Angaben mit  
Sorgfalt zusammengestellt; verbindlich sind  
jedoch ausschließlich die amtlichen  
Bekanntmachungen der Bundesländer.



Abb. 2.1 Lage des Messobjekts in Deutschland /BFS 22b/

## 2.2 AP 1.2: Planung und Instrumentierung der Messungen

### 2.2.1 Allgemeines

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes erfolgte die Detailplanung der standortspezifischen Instrumentierung, Abstimmung und Initialisierung der durchzuführenden Messungen, ebenso wie die Formulierung von Randbedingungen und Anforderungen an die Durchführung und Instrumentierung der Messungen. Basierend auf eigenen praktischen Erfahrungen des Forschungsnehmers wurden die für die Zielerreichung geeignete Messtechniken ausgewählt. Sämtliche im Forschungsvorhaben eingesetzten Radon-Messgeräte erhielten vor der Durchführung der Messungen eine Werkskalibrierung nach DIN ISO 17025. Die Tab. 2.2 zeigt die zur Verfügung stehenden Messgeräte.

**Tab. 2.2** Überblick über die einsetzbare Messtechnik

	Bezeichnung	Besonderheit
<b>Messtechnik Radon</b>		
Alphaspektroskopischer Radon/Thoron-Monitor	RTM 1688	aktive Aufnahme des Messgases ein Gerät vorhanden
Alphaspektroskopischer Radon/Thoron-Monitor	RTM 2200	aktive Aufnahme des Messgases zusätzliche Anschlüsse z. B. für Differenzdrucksonde
Alphaspektroskopischer Radon/Thoron-Monitor mit simultaner Bestimmung der Radon/Thoron-Folgeprodukte (FP)	EQF 3220	Angelagerte und unangelagerte Fraktion der Radon-Folgeprodukte, Ausgabe als PAEC, EEC zusätzliche Anschlüsse z. B. für Differenzdrucksonde
Radon-Monitor	Radon Scout Plus (RSCplus)	diffusiver Radonzutritt Alpha-Detektor zwei Geräte vorhanden
Radon-Monitor	Radon Scout PMT (RSCPMT)	szintillometrische Messung mit Hilfe von Lucas-Zellen Grab Sampling Bodenluft/Raumluft/Wasseranalytik 17 Lucas-Zellen à 240 ml, zwei Geräte vorhanden

	Bezeichnung	Besonderheit
<b>Weitere Messfühler</b>		
Wetterstation		Neun Sensoren zur Aufzeichnung von Luftfeuchte, Luftdruck, Sonneneinstrahlung, Temperatur, Windrichtung und -stärke innerhalb und außerhalb des Gebäudes
Kontaktschalter		Zehn Stück vorhanden
Laserdistanzmessgerät		Zur Bestimmung der Abmessungen der Räume
LTE-VPN-Router		Für die Datenfernübertragung

Die Abb. 2.2 zeigt exemplarisch die Wetterstation mit zugehörigen Geräten zur Aufzeichnung von Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Luftdruck, Temperatur und Luftfeuchte.



**Abb. 2.2** Wetterstation (links unten) mit einem Sensor und Display mit Anzeige der Messergebnisse /DNT 22a/

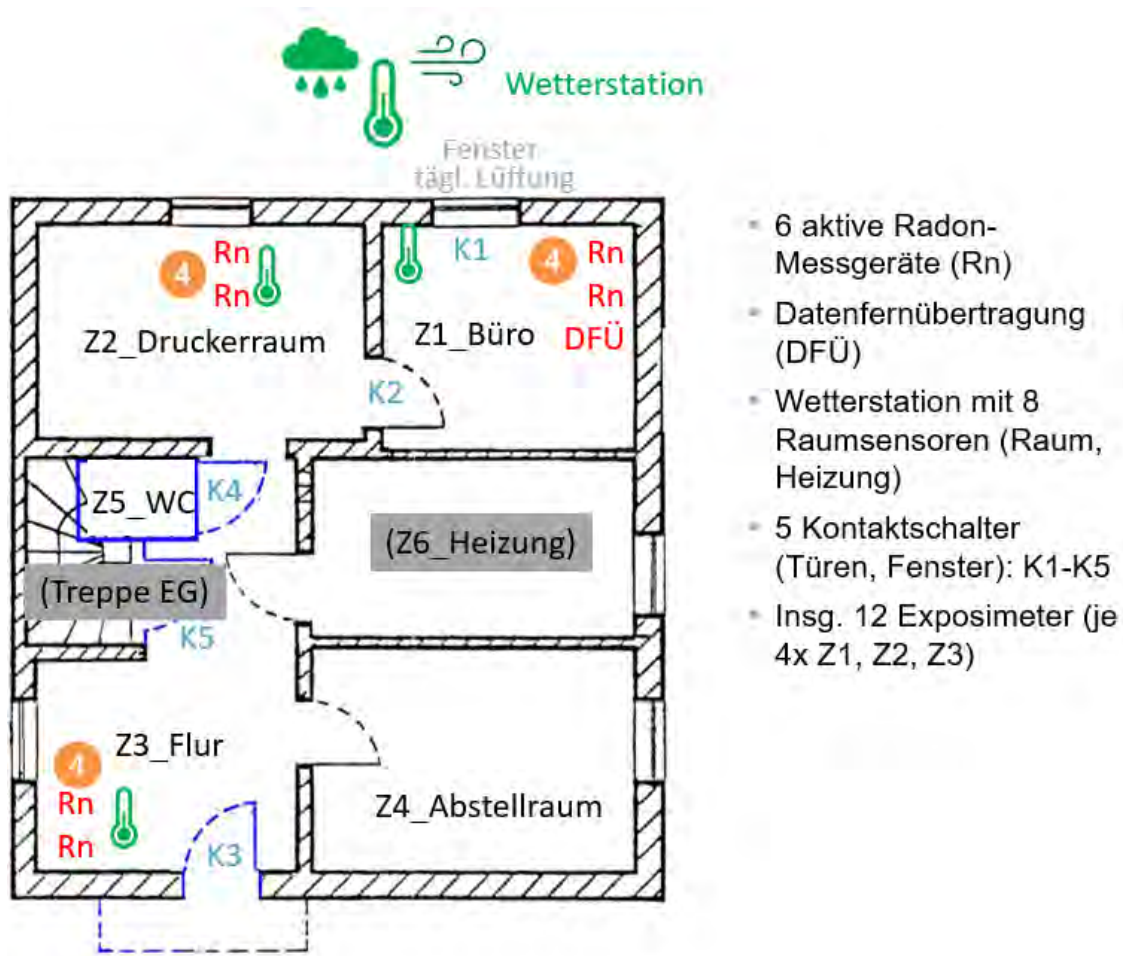
Die Abb. 2.3 zeigt einen der im Forschungsvorhaben genutzten Kontaktschalter. Diese melden über das Internet, sobald eine Tür bzw. ein Fenster geöffnet oder geschlossen wird.



**Abb. 2.3** Kontaktschalter /HAM 22/

### **2.2.2 Ergebnisse**

Die Abb. 2.4 zeigt die Instrumentierung des Messobjekts. Aus vergangenen Messungen durch das beauftragte Sachverständigenbüro war bereits bekannt, dass im Souterrain des Messobjekts erhöhte Radonkonzentrationen vorliegen. Insbesondere in Z1\_Büro war laut Aussage des Gebäudeinhabers mit erhöhten Werten zu rechnen. Weiterhin war es Wunsch des Gebäudeinhabers, die Messungen lediglich im Souterrain durchzuführen.



**Abb. 2.4** Instrumentierung des Messobjekts (im Souterrain)

## 2.3 AP 1.3: Durchführung von Detailuntersuchungen, kontinuierliche Messungen und Auswertung der Daten

### 2.3.1 Allgemeines

Das AP 1.3 beinhaltet die Erhebung, Übernahme und qualifizierte Aufbereitung von Daten der zeitlichen Entwicklung der Radon-Raumluftkonzentration und weiterer Parameter in Gebäuden mit Arbeitsplätzen. Die im Arbeitspaket 1.2 geplante standortspezifische Instrumentierung wurde nach Anpassung an die standortspezifischen Gegebenheiten (Verkabelung, Stromversorgung, Telekommunikation) an den jeweiligen Einsatzorten installiert und nach einer Funktionsprüfung in Betrieb gesetzt. Die Aktivitäten dieses AP umfassten

- ggf. Vorabmessungen der Radon-Raumluftkonzentration/Radon-Bodenluftkonzentration,



- standortspezifische Anpassung und Installation der Messsysteme,
- Inbetriebnahme des Messsystems und Datenfernübertragung,
- regelmäßige Datenübernahme,
- Prüfung der Daten auf Konsistenz,
- Qualitätssicherung der Ergebnisse,
- ggf. die Optimierung oder Modifikation der standortspezifischen Instrumentierung,
- Deinstallation des Messsystems nach Abschluss der Messungen,
- Zusammenfassung und Auswertung der Messdaten und
- Eruiierung einer Methodik zu Mittelwertberechnung der Aktivitätskonzentration.

Im Messobjekt wurden die in AP 1.2 konzipierten Messsysteme installiert und vor-Ort-Untersuchungen durchgeführt. Im Anschluss an die Installation ist eine mindestens 14-tägige Aufzeichnung der Radonkonzentration sowie weiterer Messparameter in den Räumlichkeiten vorgesehen, um möglichst verschiedene Zustände des Objektes zu erfassen. Im Anschluss erfolgte die Deinstallation sowie die Nachuntersuchung einzelner Parameter. Im Objekt wurden zwei Messkampagnen mit unterschiedlicher Instrumentierung durchgeführt, die insgesamt anhand der Witterungsverhältnisse und des Radonkonzentrationsverlaufs in die drei Phasen Winter, Frühjahr und Sommer unterteilt wurden.

Weiterhin wurde mit passiven Messgeräten eine Langzeitbestimmung (1 bis 12 Monate) durchgeführt. Der Unterauftragnehmer ist eine vom BfS anerkannte Messstelle gemäß § 155 StrlSchV und führte diese Langzeitbestimmung in den jeweiligen Messobjekten mit Exposimetern durch.

### **2.3.2 Ergebnisse**

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Messkampagne 1 (Kapitel 2.3.2.1), Messkampagne 2 (Kapitel 2.3.2.2) und jene der Langzeitbestimmung mittels Exposimetern präsentiert (Kapitel 2.3.2.3).

### 2.3.2.1 Messkampagne 1 (Winter, Frühjahr)

Die Messkampagne 1 erfolgte vom 31. März 2022 bis 9. Mai 2022 über einen Zeitraum von ca. fünf Wochen. Sie war so angelegt, dass in diesem Zeitbereich eine Phase der Heizperiode und eine Phase mit ausgeschalteter Heizung erfasst werden sollte. Während der Messkampagne 1 war das Messobjekt, wie in Abb. 2.4 dargestellt, instrumentiert. Die Bezeichnungen und verwendeten Messintervalle der eingesetzten Radon-Messgeräte finden sich in der folgenden Tabelle.

**Tab. 2.3** In den Räumen des Messobjektes eingesetzte Messtechnik zur zeitaufgelösten Messung der Radon-Aktivitätskonzentration und jeweils verwendetes Messintervall sowie Speicherumfang des Gerätes

Raum	Radon-Messgerät	Messintervall	Speicherumfang (Datensätze)
Z1_Büro	RTM 1688-2, Nr. 174	15 min	2.047
Z1_Büro	RSCplus, Nr. 1467	15 min	16.383
Z2_Druckerraum	EQF 3220, Nr. 24	15 min	2.000.000
Z2_Druckerraum	RSCplus, Nr. 1464	15 min	16.383
Z3_Flur	RSCPMT, Nr. 546	30 min	2.047
Z3_Flur	RSCPMT, Nr. 1157	30 min	2.047

Die Daten der zeitaufgelöst messenden Radon-Messgeräte, der Wetterstation mit Raumsensoren und der fünf Kontaktschalter wurden zum Teil während der laufenden Messkampagne über die Datenfernübertragung (zwei Radonmessgeräte in Z1\_Büro) bzw. eine Smartphone-App (Kontaktschalter) sowie am Ende der jeweiligen Messkampagne (Radonmessgeräte, Wetter- und Raumdaten) ausgelesen. Die Daten der Wetterstation konnten zusätzlich laufend über ein vom Hersteller zur Verfügung gestelltes Portal im Internet verfolgt werden.

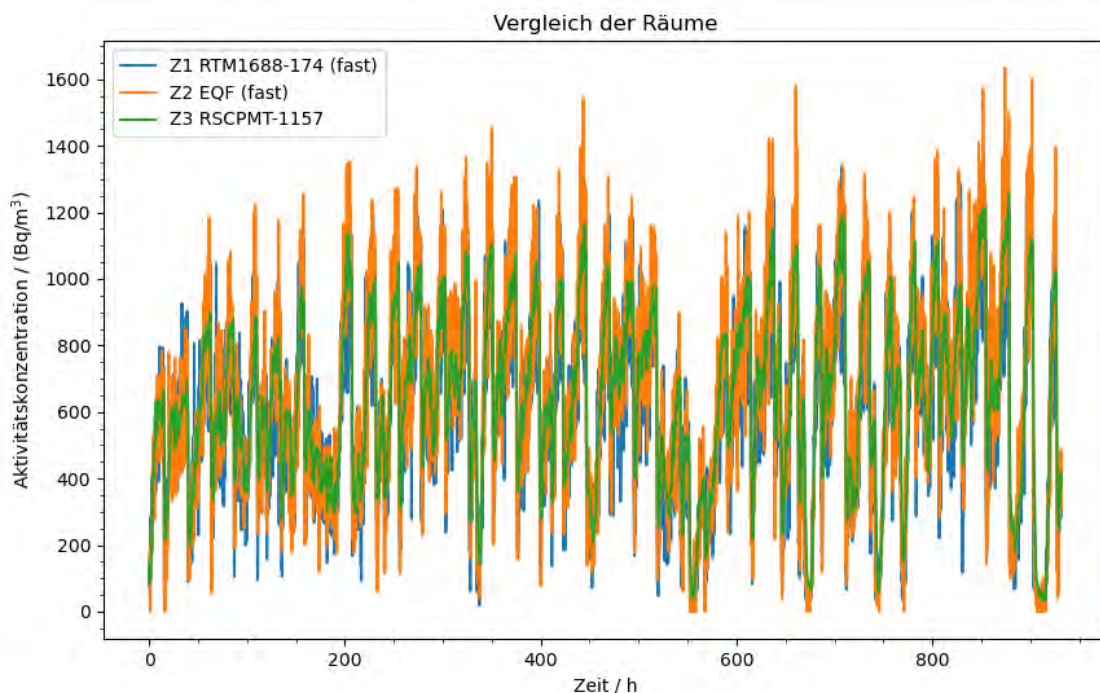
Als Messintervall der Radon-Messgeräte wurde ein relativ kurzes Intervall von 15 Minuten angesetzt, um auch schnelle Änderungen der Radon-Aktivitätskonzentration erfassen zu können. Die Geräte RTM 1688-2 und EQF verfügen über einen sog. „fast-modus“, in dem nur die kurzlebigen Zerfallsprodukte zur Analyse herangezogen werden. Sie sind somit in besonderem Maße für die Erfassung schneller Veränderungen geeignet. Für die beiden RSCPMT-Geräte wurde ein längeres Intervall von 30 Minuten gewählt, da diese über einen geringeren Speicherplatz verfügen und es aufgrund der räumlichen Gegebenheiten nicht möglich war, diese an die Datenfernübertragung (DFÜ) anzuschließen.



Die Geräte im Büroraum (Z1) wurden über die DFÜ während der Messkampagne überwacht und die aktuellen Daten mehrmals ausgelesen. Dies ermöglichte die Verwendung des Messintervalls von 15 Minuten für den RTM 1688-2, welcher ebenfalls über einen geringen Speicherumfang verfügt.

Die Messungen wurden am 31. März 2022 um 15:45 Uhr (entspricht 0 h) gestartet. Zuvor wurden alle Räume gelüftet. Während der Messung blieben alle Fenster bis auf das Fenster im Büro (Z1) geschlossen. Das Bürofenster wurde täglich vom Eigentümer zur Lüftung des Büros für einen gewissen Zeitraum geöffnet. Die Türen wurden entsprechend der Bewegungen im Haus geöffnet und geschlossen, wobei die Tür zwischen Büro (Z1) und Druckerraum (Z2) die meiste Zeit über offenstand, so dass die drei mit Messgeräten ausgestatteten Räume (Z1, Z2, Z3) verbunden waren.

Die aufgenommenen Daten für die Radon-Aktivitätskonzentrationen wurden über die gesamte Messdauer der Messkampagne 1 dargestellt. Bei den Geräten mit unterschiedlichen Auswertemodi „slow“ und „fast“ (RTM 1688-2, EQF) wurde jeweils der „fast“-Modus gewählt. Die Abb. 2.5 zeigt exemplarisch für jeden Raum jeweils die Daten eines der beiden Geräte.



**Abb. 2.5** Vergleich der gemessenen Radon-Aktivitätskonzentration in den verschiedenen Räumen über die gesamte Messkampagne 1

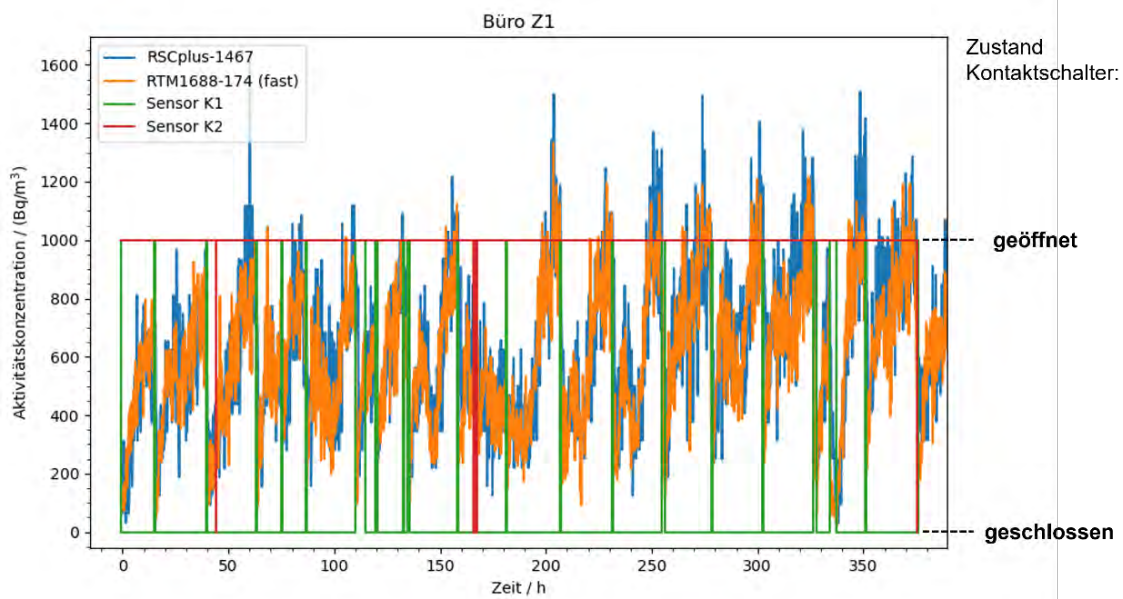
Man erkennt, dass der zeitliche Verlauf der Radon-Aktivitätskonzentration jeweils Tagesgängen folgt und in den drei Räumen synchron erfolgt. In der ersten Woche (bis ca. 158 h) erkennt man ein niedrigeres Niveau der Maximalkonzentrationen (und auch der mittleren Konzentration) als im restlichen Verlauf. Dieser Zeitraum entspricht einer Phase mit noch winterlichen Temperaturen und wird daher als Phase 1 („Winter“) bezeichnet. Die Phase 1 wurde für offene Nachrechnungen mittels COCOSYS ausgewählt. Im weiteren Verlauf der Messkampagne stellten sich frühlingshafte Witterungsbedingungen ein, so dass die sich anschließende zweite Messwoche als Phase 2 („Frühling“) für auf Phase 1 aufbauende Vorausrechnungen mittels COCOSYS ausgewählt wurde. Beide Zeiträume werden in Tab. 2.4 zusammen mit dem Zeitraum der Phase 3 („Sommer“), welche innerhalb der Messkampagne 2 (siehe Kapitel 2.3.2.2) liegt, aufgelistet. Die mittleren Radon-Aktivitätskonzentrationen  $\bar{c}_{Rn-222}$  in Z1\_Büro (RSCplus-1467) der jeweiligen Phase sind ebenfalls dargestellt.

**Tab. 2.4** Zeitraum der für die COCOSYS-Simulation ausgewählten Messphasen innerhalb der beiden Messkampagnen mit den jeweiligen mittleren Radon-Aktivitätskonzentrationen in Z1\_Büro (RSCplus-1467)

Bezeichnung	Zeitraum	Messkampagne	$\bar{c}_{Rn-222}$
Phase 1 („Winter“)	31.03. – 07.04.2022	Messkampagne 1	573 Bq/m <sup>3</sup>
Phase 2 („Frühjahr“)	07.04. – 14.04.2022	Messkampagne 1	670 Bq/m <sup>3</sup>
Phase 3 („Sommer“)	30.07. – 06.08.2022	Messkampagne 2	107 Bq/m <sup>3</sup>

Zur weiteren Analyse der zeitlichen Verläufe der Radon-Aktivitätskonzentration wurden die Phasen in Abschnitte unterteilt. Für Phase 1 und 2 wurden Abschnitte mit Tagesgängen der Radon-Aktivitätskonzentration anhand der Daten des Kontaktschalters K1 am Fenster in Z1\_Büro festgelegt, da dieses in diesem Zeitraum zur regelmäßigen (täglich) Lüftung durch den Eigentümer genutzt wurde, während Kontaktschalter K2 an der Tür zwischen Z1\_Büro und Z2\_Druckerraum eine fast dauerhaft geöffnete Tür anzeigte. Die Daten der Kontaktschalter K3 – K5 konnten nicht für die Auswertung verwendet werden, da es an diesen aufgrund von Vibrationen und Luftzügen durch Bewegungen im restlichen Haus zu zahlreichen Fehlalarmen kam.

Die Abb. 2.6 zeigt eine Darstellung der Öffnungs- und Schließzeiten der Kontaktschalter am Bürofenster (K1) und der Tür zwischen Büro und Druckerraum (K2) mit den gemessenen zeitlichen Verläufen der Radon-Aktivitätskonzentration.



**Abb. 2.6** Zeitlicher Verlauf der Radon-Aktivitätskonzentration im Büro (Z1) während Phase 1 („Winter“) und 2 („Frühjahr“) mit Schaltzeiten der Kontaktsensoren am Bürofenster (K1) und der Tür zwischen Büro und Druckerraum (K2)

In Abb. 2.6 ist ein regelmäßiges tägliches (an wenigen Tagen auch mehrfaches) Lüften über das Fenster im Büro (Z1) erkennbar (grüne Linie), welches jeweils zu einem starken Absinken der Radon-Aktivitätskonzentration führt, die anschließend wieder über den Tagesverlauf ansteigt. An vielen Tagen ist zusätzlich ein weiteres Absinken der Radonkonzentration erkennbar, welches nicht durch eine Fensteröffnung im Büro erklärbar ist. Hier könnten Lüftungsereignisse in anderen Räumen/Etagen des Hauses bzw. an der Haustür eine Rolle spielen, welche jedoch aufgrund der fehlenden Informationen über andere Stockwerke und die Fehlfunktionen der Sensoren K3 – K5 nicht verifizierbar sind.

Zur weiteren detaillierteren Analyse des zeitlichen Verlaufs der Radon-Aktivitätskonzentration wurde ein abschnittsweiser Fit der Konzentrationsanstiege gemäß der Gleichung für die Radonaktivitätskonzentration  $C_{Rn}(t)$

$$C_{Rn}(t) = C_0 e^{-(L+0,0076/h)t} + Q_{Rn} \frac{1 - e^{-(L+0,0076/h)t}}{L + mn0,0076/h}$$

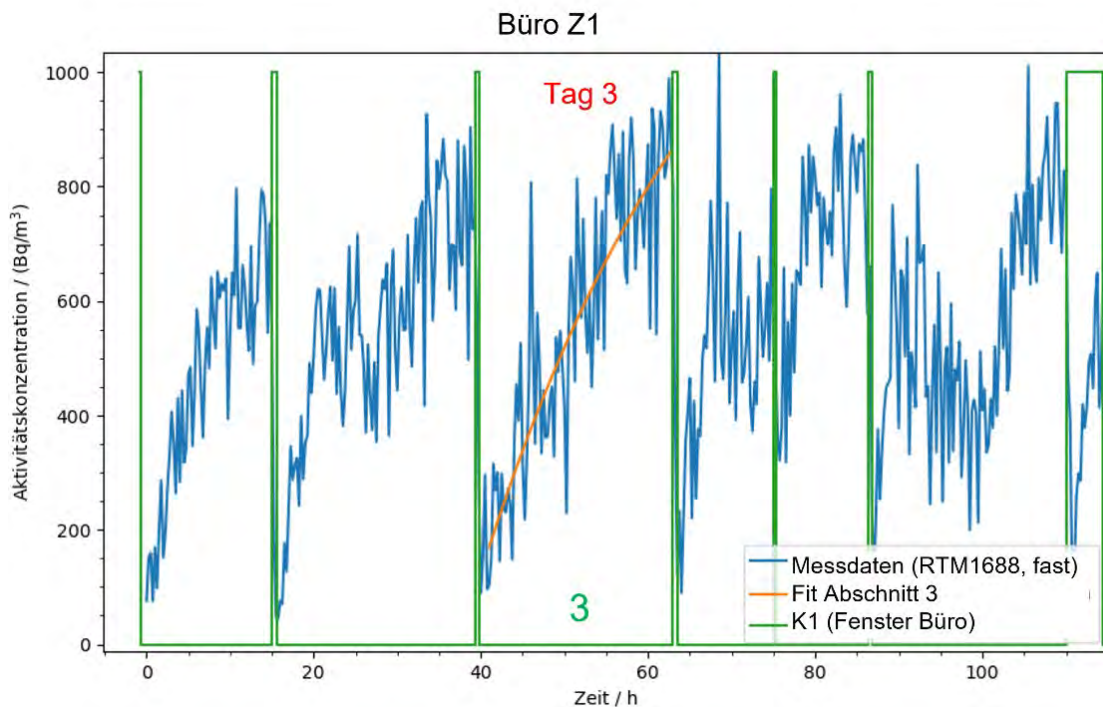
durchgeführt, wenn ein durchgängiger exponentieller Anstieg erkennbar war. Hierbei gehen die Anfangskonzentration  $C_0$ , die Quellrate  $Q_{Rn}$  und die Luftwechselrate  $L$  des jeweiligen Abschnitts als Fitparameter ein. Eine ausführliche Herleitung dieser Gleichung wird

in /GRS 20/ aufgezeigt. Die Quellrate und die Luftwechselrate können im weiteren Verlauf als Inputparameter für die COCOSYS-Simulationen genutzt werden.

In Phase 1 und 2 wurden die Abschnitte für den Fit anhand der Schaltzeiten des Kontaktschalters am Bürofenster K1 festgelegt. In Abb. 2.7 ist beispielhaft der Fit eines Tagesganges in Phase 1 gezeigt, welcher nach Abschluss der morgendlichen Lüftung störungsfrei verlief. Die Fitparameter wurden zu

$$C_0 = (170 \pm 30) \text{ Bq/m}^3, Q_{Rn} = (50 \pm 12) \text{ Bq/m}^3\text{h}, L = (0,03 \pm 0,02) \text{ 1/h}$$

bestimmt.



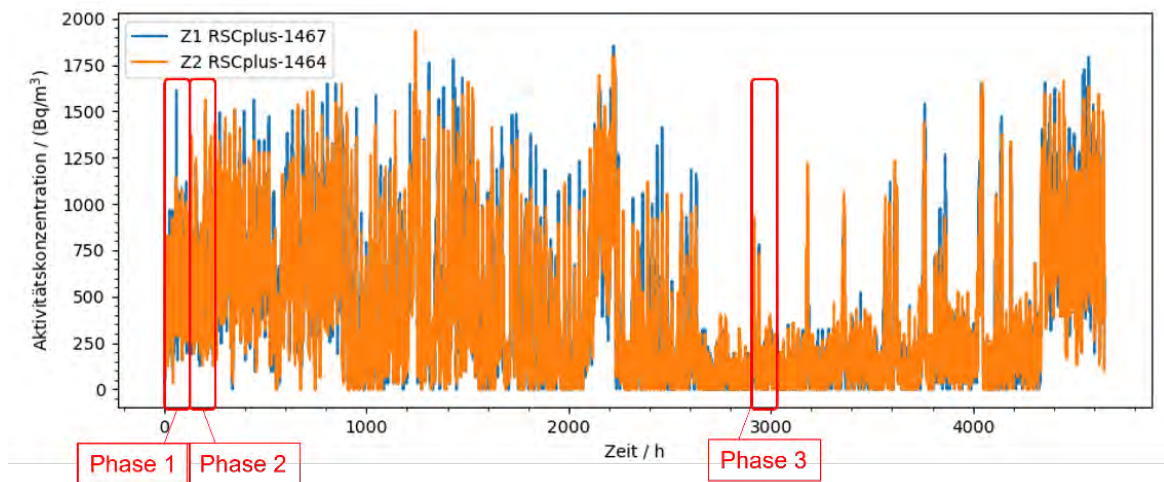
**Abb. 2.7** Beispielhafte Darstellung des Fits eines ungestörten Tagesganges in Phase 1, aus dem die Quellrate  $Q_{Rn} = (50 \pm 12) \text{ Bq/m}^3\text{h}$  und die Luftwechselrate  $L = (0,03 \pm 0,02) \text{ 1/h}$  als COCOSYS-Inputparameter abgeleitet wurden

### 2.3.2.2 Messkampagne 2 (Sommer)

Im Zeitraum 9. Mai 2022 bis 11. Oktober 2022 schloss sich die Messkampagne 2 mit auf Wunsch des Hauseigentümers reduziertem Gerätesatz direkt an die Messkampagne 1 an. Insgesamt fanden demnach zeitaufgelöste Messungen der Radonkonzentration über einen Zeitraum von sechs Monaten statt.

In Messkampagne 2 verblieben die zwei geräuschlos arbeitenden Radon-Messgeräte (RSCplus, Nr. 1467, RSCplus, Nr. 1464) in den Räumen Z1\_Büro und Z2\_Druckerraum. Die anderen Radon-Messgeräte, Datenfernübertragung, Kontaktschalter sowie die Wetterstation mit Raumsensoren wurden am 9. Mai 2022 abgebaut. Für den Zeitraum der Messkampagne 2 wurden Daten einer in der Nähe befindlichen Wetterstation verwendet, welche über das zuvor zur Fernübertragung genutzte Wetterportal im Internet abrufbar waren.

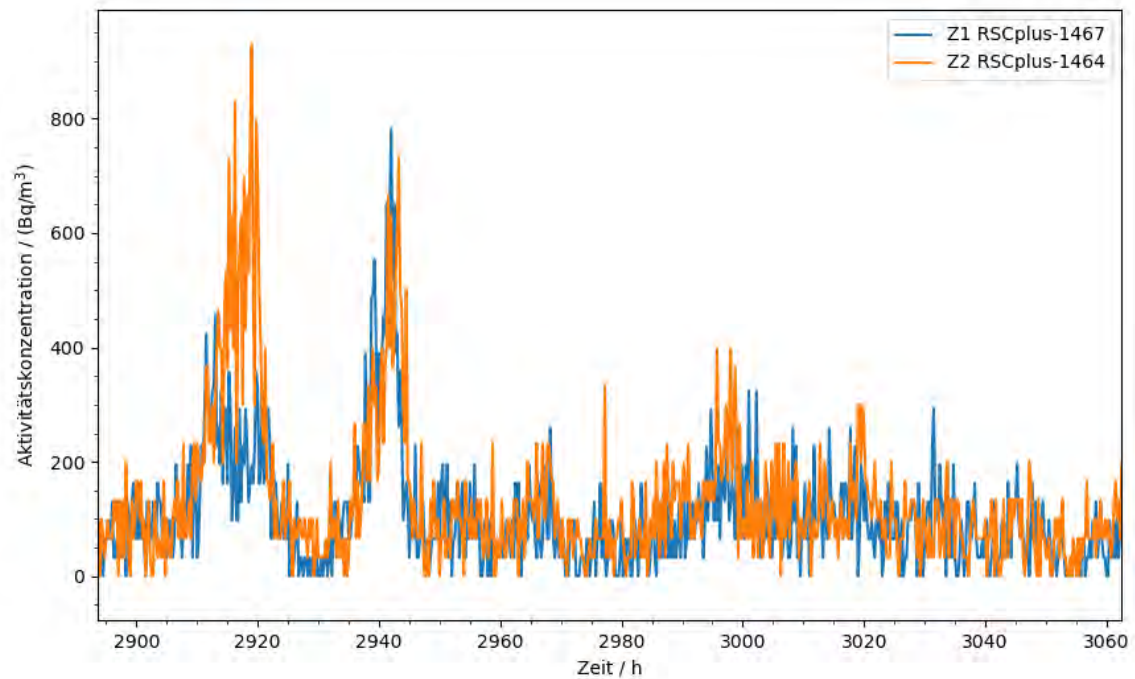
Die Abb. 2.8 zeigt die in Z1 und Z2 über den Gesamtzeitraum vom 31. März 2022 bis 11. Oktober 2022 gemessenen Radon-Aktivitätskonzentration zusammen mit den Messphasen 1 bis 3, welche für die Nach- und Vorausrechnungen mittels COCOSY ausgewählt wurden. In Phase 3 standen keine Daten von Kontaktschaltern mehr zur Verfügung.



**Abb. 2.8** Im Büro (Z1) und im Druckerraum (Z2) über den Gesamtzeitraum der beiden Messkampagnen von ca. 6 Monaten gemessene Radonaktivitätskonzentration mit eingezeichneten Messphasen 1 bis 3, welche für die Nach- und Vorausrechnungen mittels COCOSY ausgewählt wurden

Über den Sommerzeitraum (ca. Juli bis September) traten deutlich abgesenkte Radon-Aktivitätskonzentrationen auf. Weiterhin sind in diesem Bereich nur wenige vereinzelte Tagesgänge erkennbar. So werden in Phase 3 (30. Juli bis 6. August 2022) nur zwei Tagesgänge mit ansteigender und anschließend abfallender Konzentration beobachtet, während über den restlichen Zeitraum eine relativ gleichbleibende Konzentration auf vergleichsweise niedrigem Niveau herrschte (siehe Abb. 2.9). Dies ist mit einem im Sommer veränderten Lüftungsverhaltens des Eigentümers (über längere Zeiträume geöffnetes/gekipptes Fenster in Z1\_Büro) erklärbar.





**Abb. 2.9** Zeitlicher Verlauf der Radon-Aktivitätskonzentration im Büro (Z1) und im Druckerraum (Z2) während Phase 3 („Sommer“)

### 2.3.2.3 Langzeitbestimmung mittels Exposimetern

Begleitend zu den zeitaufgelösten Messreihen wurde eine Langzeitbestimmung mittels Exposimetern mit Festkörperspurdetektoren nach DIN ISO 11665-4 durchgeführt. Zu Beginn der ersten Messkampagne am 31. März 2022 wurden in jedem der drei Räume Z1\_Büro, Z2\_Druckerraum und Z3\_Flur jeweils vier Exposimeter ausgelegt. Diese wurden sukzessive über den Zeitraum eines Jahres an das beauftragte Sachverständigenbüro zur Auswertung als anerkannte Messstelle geschickt, um Vergleichswerte der mittleren Radon-Aktivitätskonzentration zu erhalten. Die Termine, an denen jeweils drei Exposimeter (aus jedem der drei Räume eines) zur Auswertung verschickt wurden, waren:

- 9. Mai 2022 (ca. fünf Wochen, Abschluss Messkampagne 1)
- 2. Juli 2022 (ca. drei Monate, während Messkampagne 2)
- 11. Oktober 2022 (ca. sechs Monate, Abschluss Messkampagne 2)
- 31. März 2023 (zwölf Monate)

Die Messzeiträume sowie die über den jeweiligen Zeitraum ausgewerteten mittleren Radon-Aktivitätskonzentrationen werden in Tab. 2.5 zusammengefasst. Zum Vergleich werden die Mittelwerte aus den zeitaufgelösten Messungen gegenübergestellt.

**Tab. 2.5** Messzeiträume sowie mittlere Radon-Aktivitätskonzentrationen aus der Langzeitbestimmung mit Exposimetern im Vergleich zu den entsprechenden Mittelwerten aus den zeitaufgelösten Messungen

Zeitraum	Messkampagnen	Raum	$C_{Rn}$ (Exposimeter)/ (Bq/m <sup>3</sup> )	$U_{Rn}$ (2 $\sigma$ )/ (Bq/m <sup>3</sup> )	$C_{Rn}$ (zeitaufgelöst)/ (Bq/m <sup>3</sup> )
ca. 5 Wochen	1	Z1	815	110	593/652
ca. 5 Wochen	1	Z2	720	100	635/641
ca. 5 Wochen	1	Z3	719	100	643/638
ca. 3 Monate	1, teilw. 2	Z1	734	100	549
ca. 3 Monate	1, teilw. 2	Z2	688	100	540
ca. 3 Monate	1, teilw. 2	Z3	639	90	-
ca. 3 Monate	1, 2	Z1	435	60	403
ca. 6 Monate	1, 2	Z2	440	60	399
ca. 6 Monate	1, 2	Z3	461	70	-
1 Jahr	-	Z1	594	110	-
1 Jahr	-	Z2	581	110	-
1 Jahr	-	Z3	580	110	-

Die mittels Exposimeter bestimmten Werte liegen hier durchgängig oberhalb der Mittelwerte aus den zeitaufgelösten Messungen, wobei meist eine Übereinstimmung im Rahmen der Messunsicherheit besteht. Die beobachteten Abweichungen werden für größere Mittelungszeiträume geringer.

Alle hier ausgewerteten mittleren Radon-Aktivitätskonzentrationen, insbesondere auch jene aus der Jahresmessung mittels Exposimetern, liegen oberhalb des Referenzwertes von 300 Bq/m<sup>3</sup>.

## **2.4 AP 2: Weitere Adaption von COCOSYS zur Simulation von Radon-Ausbreitungsvorgängen**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Erweiterungen und neue Modelle in das COCOSYS-Programm /ARN 22/, /GRS 22b/ implementiert, die der verbesserten Simulation der Verteilung von Radon an Arbeitsplätzen dienen sollen. Sie betreffen die folgenden drei Modelle:

- Berücksichtigung von detaillierten Wetter-Randbedingungen
- Berechnung der Volumenströme durch Fenster und Türen in Abhängigkeit von Wetter-Randbedingungen und Öffnungszuständen
- Berechnung raumbezogener Mittelwerte der Rn-222 Aktivitätskonzentration

Die Implementierung der neuen Modelle bzw. Modellerweiterungen erfolgte im COCOSYS-Hauptmodul THY /ARN 22/. Entsprechend des GRS-Qualitätshandbuches für die Programmentwicklung wurden die beschriebenen Erweiterungen des Quelltextes in GitLab – der GRS-weiten Plattform zur Verwaltung von Softwareprojekten – auf einem zentralen Server als gesonderte Issues (Aspekte) nachverfolgbar dokumentiert und gesichert. Die neuen Modelle wurden in die COCOSYS-Entwicklerversion eingebracht, so dass sie nach Herausgabe des GRS-Programmpaketes „AC<sup>2</sup>-2023“ und dessen Bestandteil COCOSYS 3.2 für externe Anwender nutzbar werden.

Die Beschreibung und die Ergebnisse der Austestung/Validierung der Modelle sind in den folgenden Kapiteln beschrieben.

### **2.4.1 Wetter-Randbedingungen**

#### **2.4.1.1 Modellerweiterung**

In COCOSYS war es bisher bereits möglich, für eine Umgebungszone unter dem Eingabeblock „WEATHER\_BOUNDARY“ /ARN 22/ den Gesamtdruck und die Atmosphärentemperatur mit Hilfe einer zeitabhängigen Tabelle vorzugeben. Um bei dieser Vorgabe für solch eine Umgebungszone die Massen- und Energiebilanz zu wahren, wird unter Einhaltung der thermodynamischen Gesetze das entsprechende Zonenvolumen während einer Rechnung dynamisch angepasst.



Im neuen Fenster-Strömungsmodell WINDOW (siehe Kapitel 2.4.2) erfolgte im Forschungsvorhaben eine Erweiterung der definierbaren Wetter-Randbedingungen. Hier war auch die Luftfeuchte in Betracht gezogen worden. In keiner der bisher gefundenen Modellansätze für die Fenster-Simulation ist die Luftfeuchte als Parameter enthalten. Zudem besteht das Problem, dass die Änderung der Luftfeuchte in einer Umgebungszone mit Wetter-Randbedingungen nicht berücksichtigt ist. Ihre Berücksichtigung wäre durch iterative Änderung mehrerer Parameter prinzipiell möglich, aber nicht eindeutig definiert – neben Druck und Temperatur könnte dabei z. B. entweder die Dampf- oder die Luftmasse geändert werden. Jedoch würde diese Änderung den im Forschungsvorhaben für die COCOSYS-Modellerweiterung vorgesehenen Aufwand überschreiten. Folglich wurde die Luftfeuchte nicht in der Modellerweiterung berücksichtigt.

Entsprechend den Modellanforderungen im neuen WINDOW-Strömungsmodell für die Fenster-Simulation wurde die Vorgabe einer zeitabhängigen Windgeschwindigkeit umgesetzt. Der entsprechende Abschnitt im COCOSYS User Manual zur der Beschreibung der neuen Eingabedaten wurde erweitert.

Es sei noch darauf hingewiesen, dass die Definition einer Windgeschwindigkeit außer bei Verwendung des WINDOW-Modell keinen Effekt auf die COCOSYS-Ergebnisse hat. Da die Windgeschwindigkeit nicht in die Berechnung des thermohydraulischen Zustandes in einer Umgebungszone eingeht, gibt es im Standardfall auch keine Plot-Ausgabe für diesen Wert. Eine Ausgabe erfolgt nur, wenn auch das WINDOW-Strömungsmodell angewendet wird (siehe Kapitel 2.4.2).

#### **2.4.1.2 Testrechnung**

Die Erweiterung der möglichen vorzugebenden Wetterrandbedingungen wurde mit einem Testbeispiel mit drei Zonen überprüft (siehe Abb. 2.10). Für die Umgebungszone **ENVIR-I** werden hier mit Hilfe der Tabelle **BR\_EI** zeitabhängige Verläufe für Druck, Temperatur und Windgeschwindigkeit vorgegeben, die dann im Verlauf einer Simulation von COCOSYS in dieser Zone eingestellt bzw. für das WINDOW-Modell bereitgestellt werden. Die Umgebungszone ist durch die Verbindung W1 (Fenster) mit der Zone R1 verbunden, so dass je nach Druckverhältnis ein Gasaustausch mit R1 und weiter über Verbindung J1 (Türspalt) mit ENVIR-O erfolgt. Der Testdatensatz ist adiabat angelegt, d. h. es sind keine Wärmeleitstrukturen berücksichtigt.

Die Abb. 2.11 zeigt die letztendlich in COCOSYS verwendeten Wetterbedingungen, die während der Simulation verwendet werden. Diese entsprechen exakt den vorgegeben Tabellenwerten.

Der aufgetretene Energiebilanzfehler der Simulation über einen Zeitraum von einem Tag erreicht bis zu 6.200 kJ (siehe Abb. 2.12). Dies erscheint hoch, liegt aber bezogen auf den Energieinhalt der Umgebungszone mit 10 Mio. m<sup>3</sup> Volumen im Rahmen der vorgegebenen Fehlergrenzen. Der Massenbilanzfehler ist mit kleiner 1 µg praktisch null.

Bei zukünftigem Bedarf kann in COCOSYS die Definition von weiteren Wetter-Randbedingungen, wie z. B. der Windrichtung, analog zur Windgeschwindigkeit (d. h. ohne Rückwirkung auf die Thermohydraulik) mit geringen Programmieraufwand ermöglicht werden.

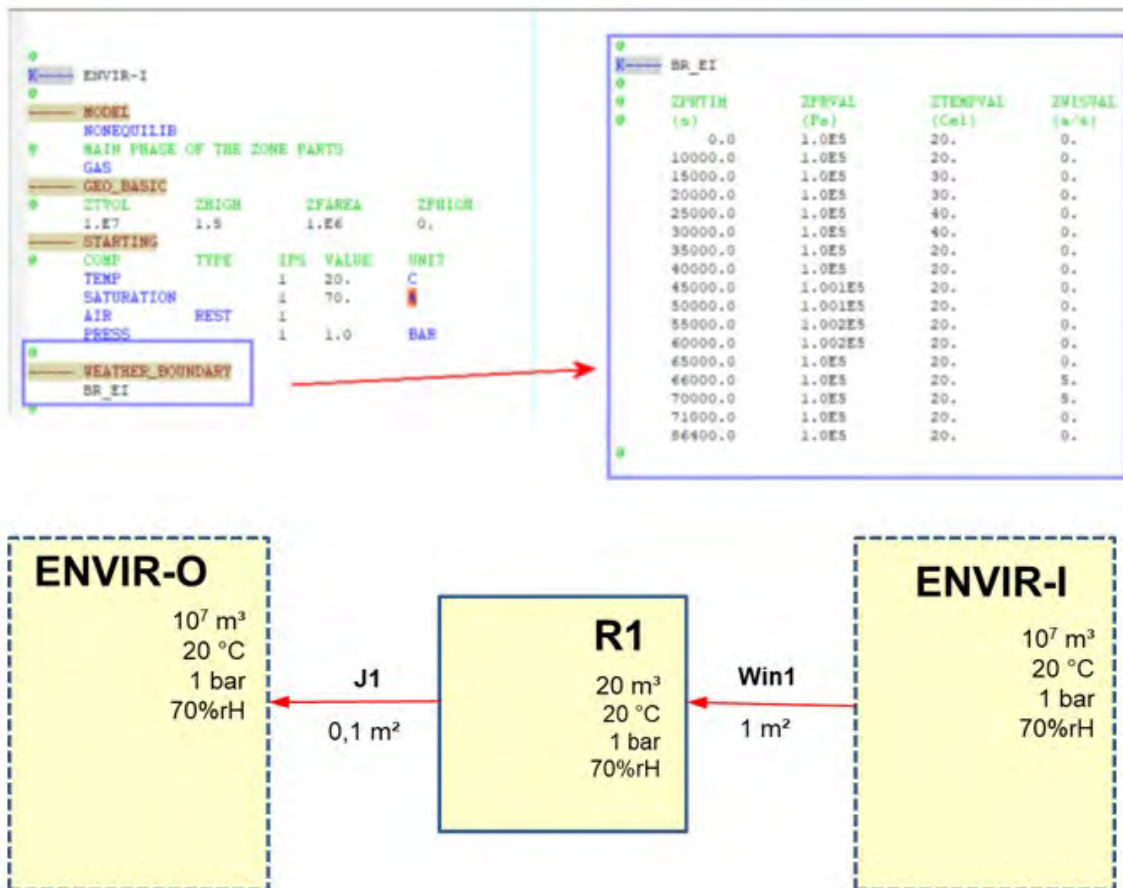
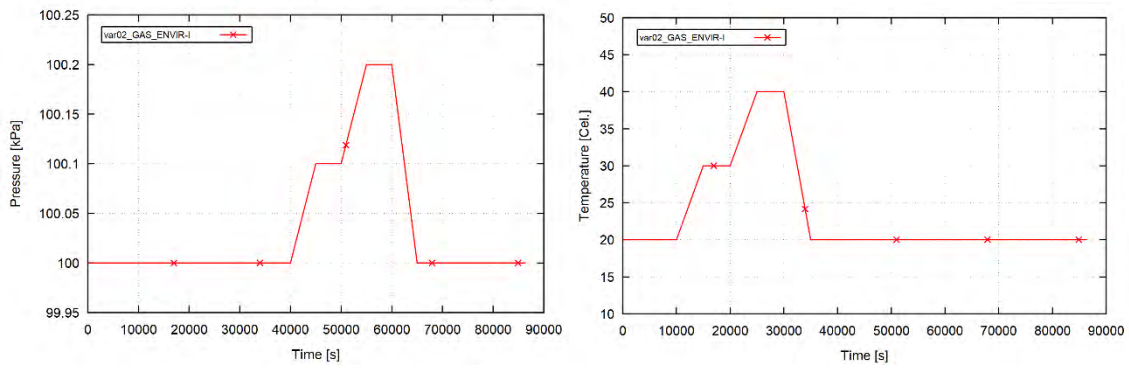
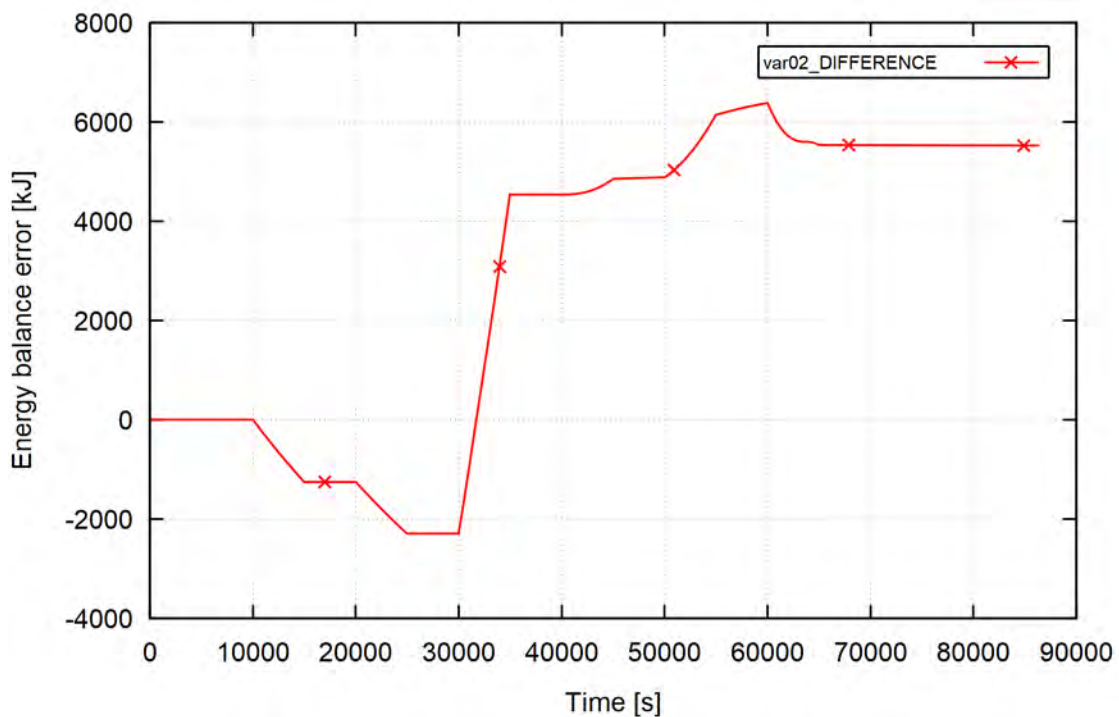


Abb. 2.10 COCOSYS, Wetter-Randbedingungen, Eingabebeispiel und 3-Zonen-Notdalisierung



**Abb. 2.11** COCOSYS, Wetter-Randbedingungen, verwendete Werte für Druck und Temperatur in der Umgebungszone ENVIR-I



**Abb. 2.12** COCOSYS, Wetter-Randbedingungen, Energiebilanzfehler

## 2.4.2 Simulation der Strömung durch Fenster und Türen

### 2.4.2.1 Modellauswahl

Zur Verbesserung der Simulation der Verteilung von Radon an Arbeitsplätzen mit COCOSYS ist der Luft- und damit der Rn-222-Austausch von Gebäuden mit der Umgebung durch ein entsprechendes Modell zu erfassen.

Während bei technischen Belüftungssystemen der Volumenstrom verhältnismäßig gut bestimmbar ist (Förderleistung des Lüfters, Betriebsphasen, Charakteristik des Rohrleitungssystems), ist bei natürlicher Belüftung über Türen und Fenster eine Vielzahl von Parametern von entscheidendem Einfluss. Der sich einstellende Volumenstrom hängt u. a. ab von

- der Luftdruck- und Temperaturdifferenz zwischen der Innen- und Außenluft,
- der Windgeschwindigkeit und Windrichtung bezogen auf die Lage eines Gebäudes,
- der Geometrie des Gebäudes und der Anordnung der Fenster in der Fassade,
- der Größe der Öffnungsfläche eines Fensters (Höhe und Breite) sowie von der Laibungstiefe und dem Laibungsabstand zum Fenster,
- der Anordnung eines Heizkörpers zum Fenster,
- vorhandenen Gardinen oder Pflanzen, die die Strömungsfläche reduzieren und
- dem Lüftungsverhalten des Nutzers, d. h. der Öffnungsart und -dauer in Abhängigkeit von Raumlufttemperatur, Umgebungslärm, Niederschlag usw.

Diese Komplexität verdeutlicht, dass die Erstellung eines universellen und alle Randbedingungen präzise umfassenden Modelles mit vertretbarem Aufwand nicht möglich ist.

Die Recherche nach verfügbaren Modellansätzen für die Berechnung von Volumenströmen durch Fenster führte u. a. zu einem Bericht der Hochschule für Technik Stuttgart, in dem mehrere entsprechende Ansätze gegeben sind /EIC 16/. Von diesen Ansätzen wurde die Korrelation nach *Phaff und De Gids* zur Implementierung in COCOSYS ausgewählt. Diese beschreibt den Volumenstrom durch Dreh- oder Kippfenster bei einseitiger Lüftung in Abhängigkeit von der Fenstergeometrie, dem Öffnungszustand sowie der Temperaturdifferenz zur und der Windgeschwindigkeit in der Umgebung. Für eine weitere geeignete Korrelation nach *Larsen*, die neben der Windgeschwindigkeit auch dessen Richtung berücksichtigt, konnten Widersprüche zwischen in verschiedenen Veröffentlichungen angegebenen Modellgleichungen und insbesondere fehlende Angaben zu einem Term in den Gleichungen bisher nicht gelöst werden.

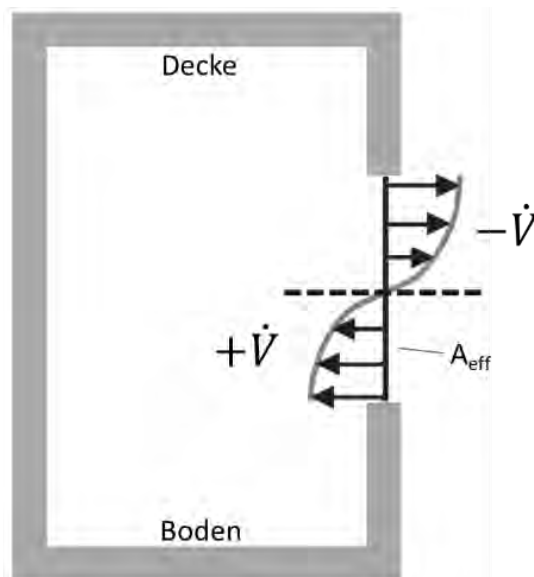
Die Korrelation nach *Phaff und De Gids* beruht (ebenso wie andere verfügbare Ansätze) auf experimentellen Ergebnissen aus Messungen zum Volumenstrom durch geöffnete

Fenster. Diese Korrelation zur Berechnung des stationären Volumenstroms berücksichtigt neben der effektiven Fläche der Fensteröffnung die Windgeschwindigkeit, die Temperaturdifferenz innen/außen sowie empirische Geschwindigkeits-, Temperaturdifferenz- und Turbulenz-Korrelationskoeffizienten /EIC 16/:

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \cdot A_{eff} \cdot \sqrt{C_1 \cdot u^2 + C_2 \cdot h_{eff} |\Delta T| + C_3} \quad (2.1)$$

mit	$\dot{V}$	Volumenstrom [m <sup>3</sup> /s]
	$A_{eff}$	effektive Fensteröffnungsfläche [m <sup>2</sup> ]
	$u$	Windgeschwindigkeit (Referenzgeschwindigkeit in 10 m Höhe) [m/s]
	$h_{eff}$	effektive Fensterhöhe [m]
	$\Delta T$	Temperaturdifferenz innen-außen [K]
	$C_1$	Geschwindigkeitskoeffizient [-]
	$C_2$	Temperaturkoeffizient [m/s <sup>2</sup> K]
	$C_3$	Turbulenzkoeffizient [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]

Der Term  $\frac{1}{2}$  in Gleichung (2.1) basiert auf der Annahme der einseitigen Fensterlüftung, d. h. der Luftaustausch durch das Fenster findet (gleichzeitig) im Gegenstrom über die jeweils halbe effektive Fläche  $A_{eff}$  statt (siehe Abb. 2.13).



**Abb. 2.13** Volumenstrom bei einseitiger Fensterlüftung

Die effektive Öffnungsfläche  $A_{eff}$  (Gleichung (2.2), entsprechend Abb. 2.14) wird für Kipp- und Drehfenster (auch als Flügelfenster bezeichnet) durch die Gleichungen (2.3) und (2.5) in Abhängigkeit von der Fensterhöhe, der Fensterbreite und dem Öffnungswinkel entsprechend dem Ansatz von *van Passen* ermittelt /EIC 16/:

$$A_{eff} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{(2 \cdot A_2 + A_3)^2}}} \quad (2.2)$$

Kippfenster:

$$A_{eff_{kipp}} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{(h \cdot b)^2} + \frac{1}{\left(2 \cdot h \cdot b \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) + h^2 \cdot \sin(\alpha)\right)}}} \quad (2.3)$$

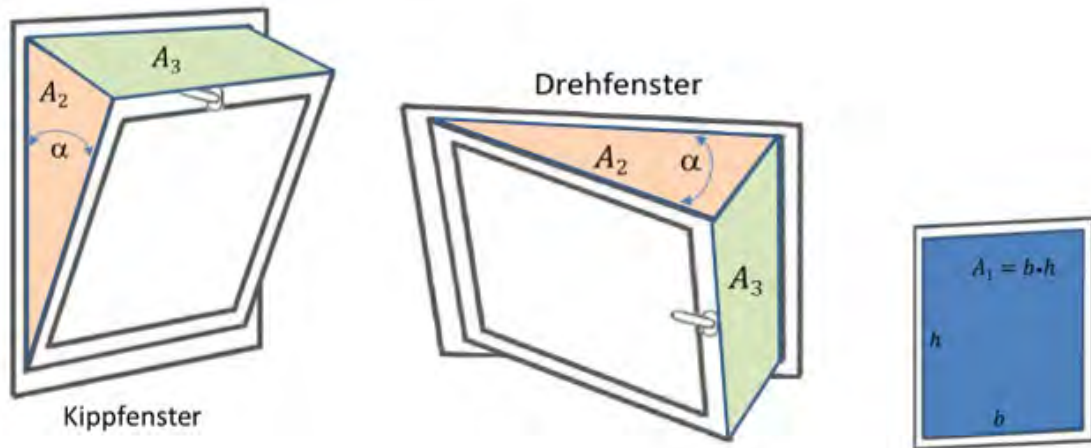
$$h_{eff} = \frac{A_{eff_{kipp}}}{b} \quad (2.4)$$

Drehfenster:

$$A_{eff_{dreh}} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{(b \cdot h)^2} + \frac{1}{\left(2 \cdot b \cdot h \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) + b^2 \cdot \sin(\alpha)\right)}}} \quad (2.5)$$

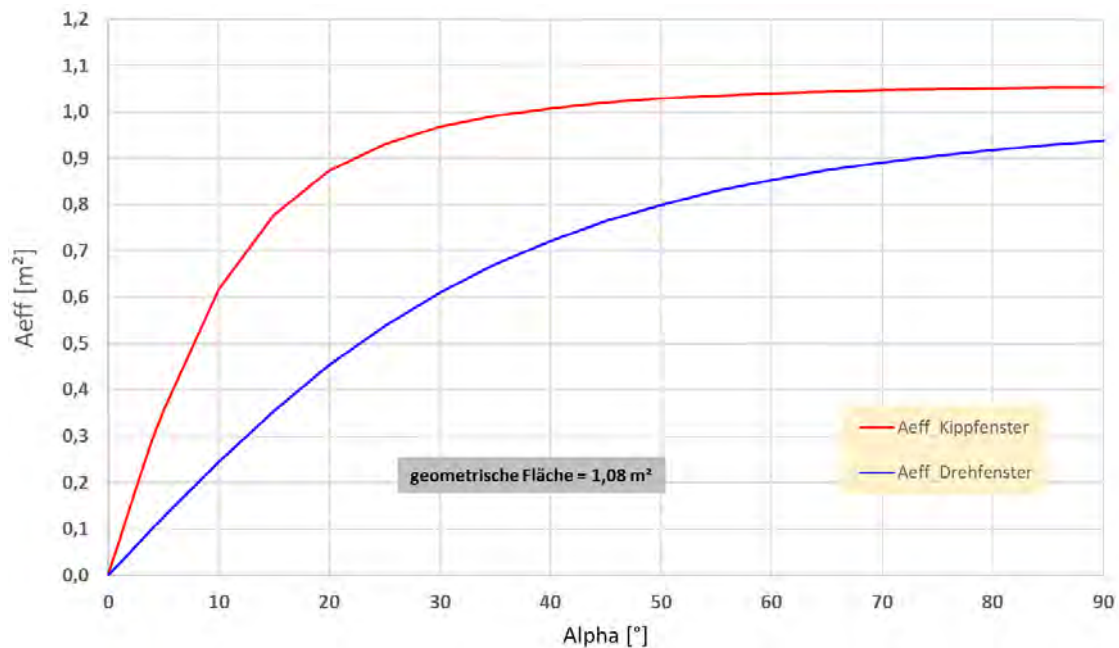
$$h_{eff} = h \quad (2.6)$$

mit      b      Fensterbreite [m]  
           h      Fensterhöhe [m]  
            $\alpha$       Öffnungswinkel [°]



**Abb. 2.14** Öffnungsteilflächen für Kipp- und Drehfenster

Anhand der Gleichungen (2.3) und (2.5) lassen sich für ein exemplarisches Kipp- bzw. Drehfenster mit 0,6 m Breite und 1,8 m Höhe die effektiven Flächen in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel entsprechend berechnen (siehe Abb. 2.15).



**Abb. 2.15** Darstellung der effektiven Öffnungsfläche  $A_{\text{eff}}$  für ein Kipp- bzw. Drehfenster in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel  $\alpha$  ( $b = 0,6$  m,  $h = 1,8$  m)

Die in Gleichung (2.1) verwendeten empirischen Koeffizienten  $C_1$  bis  $C_3$  wurden von *Phaff und De Gids* 1982 auf Basis von Messungen ermittelt. Sie sind in Tab. 2.6 aufgeführt. Im Rahmen einer Doktorarbeit wurden von *Maas* 1995 neue Messungen zu Volumenströmen durch Fenster durchgeführt und auf deren Basis die Koeffizienten in der

*Phaff und De Gids* - Korrelation neu bestimmt /MAA 95/. Entsprechend diesen Ergebnissen ist danach insbesondere der Koeffizient  $C_1$  deutlich größer.

**Tab. 2.6** Empirische Korrelationskoeffizienten für die Volumenstrom-Gleichung nach *Phaff und De Gids* bzw. *Maas*

Koeffizient	Phaff und De Gids /EIC 16/ Option <sup>*)</sup> : PHAFF	Maas /MAA 95/ Option <sup>*)</sup> : PHAFF_MOD
$C_1$ [-]	0,001	0,0056
$C_2$ [m/s <sup>2</sup> K]	0,0035 <sup>**)</sup>	0,0037
$C_3$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	0,01	0,012
<sup>*)</sup> Option bedeutet Eingabe in COCOSYS (Parameter CWJMODEL, Kapitel 2.4.2.2) <sup>**)</sup> In /EIC 16/ ist ein Schreibfehler enthalten für $C_2$ (0,035, d. h. eine Null fehlt!), der durch den Vergleich mit anderen Quellen identifiziert wurde.		

Bei der Strömung durch geöffnete Türen gibt es im Unterschied zu Drehfenstern nur einen oberen und seitlichen Flächenanteil. Somit entfällt in Gleichung (2.2) der untere, durch den Boden verschlossenen Anteil, d. h. einmal  $A_2$  (siehe Abb. 2.14).

#### 2.4.2.2 Modellimplementierung

Zur Simulation der einseitigen Lüftung über Fenster und Türen wurde in COCOSYS als atmosphärisches Strömungsmodell der neue Verbindungstyp WINDOW eingeführt. Von den in der Literatur verfügbaren Modellansätzen wurde dabei die Korrelation nach *Phaff und De Gids* mit originalen und modifizierten Korrelationskoeffizienten umgesetzt. Die Tab. 2.7 gibt einen Überblick über erweiterte bzw. neue Unterprogramme im COCOSYS Hauptmodul THY.

Die Implementierung erfolgte dabei so, dass prinzipiell mehrere Modelle/Optionen vom Nutzer auswählbar sind. Dies ermöglicht es, später mit begrenztem Aufwand weitere alternative Korrelationen zu programmieren. Die Korrelation von *Phaff und De Gids* liefert einen stationären und damit direkt auflösbaren Volumenstrom. Da zu Beginn der Programmierarbeiten noch nicht klar war, ob auch dynamische Modelle verwendet werden müssen/können, wurde die Definition von Integrationsvariablen und ihren zusätzlichen Differentialgleichungen (ordinary differential equations, ODE) bereits mit implementiert (siehe Spalte „Bemerkungen“ in Tab. 2.7).



**Tab. 2.7** Modifizierte bzw. neue Unterprogramme für das WINDOW-Strömungsmodell in COCOSYS THY

Programmteil	Aufgabe	Unterprogramm	Bemerkung
data input	main routine to read junction related input data and print them out after reading	RIJUN POJUNC	
	Add new type in input test routines	CRJUNC CHECK_ITEM	
	input of WINDOW type junction model related data and print input data	READ_WINDOW PRINT_WINDOW WINDOW_ALLOC	
	re-ordering of junctions (arrays) according used junction models	SRTJU	
initialisation	initialise general junction data – consider WINDOW specific data	VINI	
	implementation of WINDOW equations into the THY network structure	RANET	ODE not used yet
	definition of the WINDOW junction ODEs	VDEQ_UNLOCK	ODE not used yet
general set-up	steering of calculation	RSERV VFKT_WINDOW	
	activation / deactivation of ODEs and of junctions	VCHG_WINDOW	
	define U-LOCK ODE error boundaries into the solver	SFEER VEEQ_WINDOW	ODE not used yet
	transfer data from THY to COCOSYS main driver/data base	ITHYINT_M THY_INTERFACE_M Store_THY_Junction_Data	
integration	calculation of WINDOW related values and derivatives	AEFF_WINDOW VDER_WINDOW	
	transfer of integration variables and derivatives between physical arrays and FEBE arrays	STTYV STTVY	no additional values needed since ODE not used yet
output of results	print output and plot data	VIDX VPOUT	
save/read restart data	restart data	VREST	no additional values needed since ODE not used yet
miscellaneous		CHECK_ITEM LIST_VTYPE	
WINDOW-Modell bezogene Variablen und Unterprogramme sind im FORTRAN-Modul <b>v_window_mod.f90</b> zusammengefasst (Rot – neue Unterprogramme)			

In der COCOSYS-Eingabe wird das Modell als PHAFF (mit originalen) bzw. PHAFF\_MOD (mit angepassten Koeffizienten nach *Maas*) bezeichnet. Die Eingabe für eine neue Verbindung vom Typ WINDOW ist exemplarisch in Abb. 2.16 dargestellt. Der

Wert CWJMODEL dient dabei der Korrelationskoeffizienten-Anwahl, WJHEIGHT und WJWIDTH definieren Höhe und Breite der Verbindung und CWJHUNG den Typ Kippfenster (BOTTOM), Drehfenster (SIDE) oder Tür (DOOR). Über die Tabelle CWJATAB wird der zeitabhängige Öffnungszustand (Öffnungswinkel) der Verbindung angegeben.

```

@
C----  JUNCTIONS
...
P----  W1           @ Window type junction
        WINDOW
        WINDOW_JUN
@      VZBEG      VZEND
        ENVIR-I   R1
@      CWJMODEL
        PHAFF     @ creates two junctions in- and outlets!
@      WJHEIGHT  WJWIDTH  CWJHUNG  CWJATAB
        1.8      0.6      BOTTOM   A-TAB1
@

```

**Abb. 2.16** Eingabebeispiel für eine WINDOW Verbindung mit PHAFF-Korrelationskoeffizienten

COCOSYS-intern wird eine WINDOW-Verbindung mit jeweils zwei Ein- und Ausgängen definiert. Der berechnete Volumenstrom transportiert dann im Gegenstrom die Gase und zugehörigen Energieströme entsprechend der Atmosphärenzusammensetzung in der Ausgangs- und Zielzone. Diese werden dann für die Lösung der Zustandsgleichungen in den verbundenen Zonen verwendet. Die Diffusion von Gas ist in einer WINDOW-Verbindung nicht berücksichtigt, da diese in der Regel um Größenordnungen kleiner ist als der Volumenstrom nach PHAFF.

Als Ausgabewerte stehen für eine WINDOW-Verbindung die Massen- und Volumenströme in positiver und negativer Strömungsrichtung (\*\_1 bzw. \*\_2), die aktuelle effektive Öffnungsfläche nach Gleichung (2.2) sowie zur Kontrolle die aktuellen Werte für eingegebene Öffnungswinkel und Windgeschwindigkeit (siehe Kapitel 2.4.1.1) zur Verfügung. Ein Beispiel dafür ist in Abb. 2.17 gegeben.

```

(WINDOW      ) MASS FLOW RATES WJG_1/2 (KG/S), VOLUME FLOW RATES WJV_1/2 (M**3/H)
-----
NO.  JUNC          WJG_1          WJG_2          WJV_1          WJV_2
      MASSFLOW      MASSFLOW      VOLFLOW      VOLFLOW
  1  W1          0.42249D-01  -0.43517D-01  0.13267D+03  -0.13267D+03

(WINDOW      ) EFFECTIVE AREA (M**2), OPENING ANGLE (DEG), WIND SPEED (M/S)
-----
NO.  JUNC          AEFF          WJALP          WJU
      EFF.AREA      OPEN.ANGLE      WINDSPEED
  1  W1          0.61651D+00  0.10000D+02  0.00000D+00

```

**Abb. 2.17** Beispiel für die Ergebnisausgabe zu einer WINDOW-Verbindung

Die oben aufgeführten Beschreibungen wurde entsprechend in einen neu eingeführten Abschnitt in das COCOSYS 3.2 User Manual (in Englisch) übertragen.

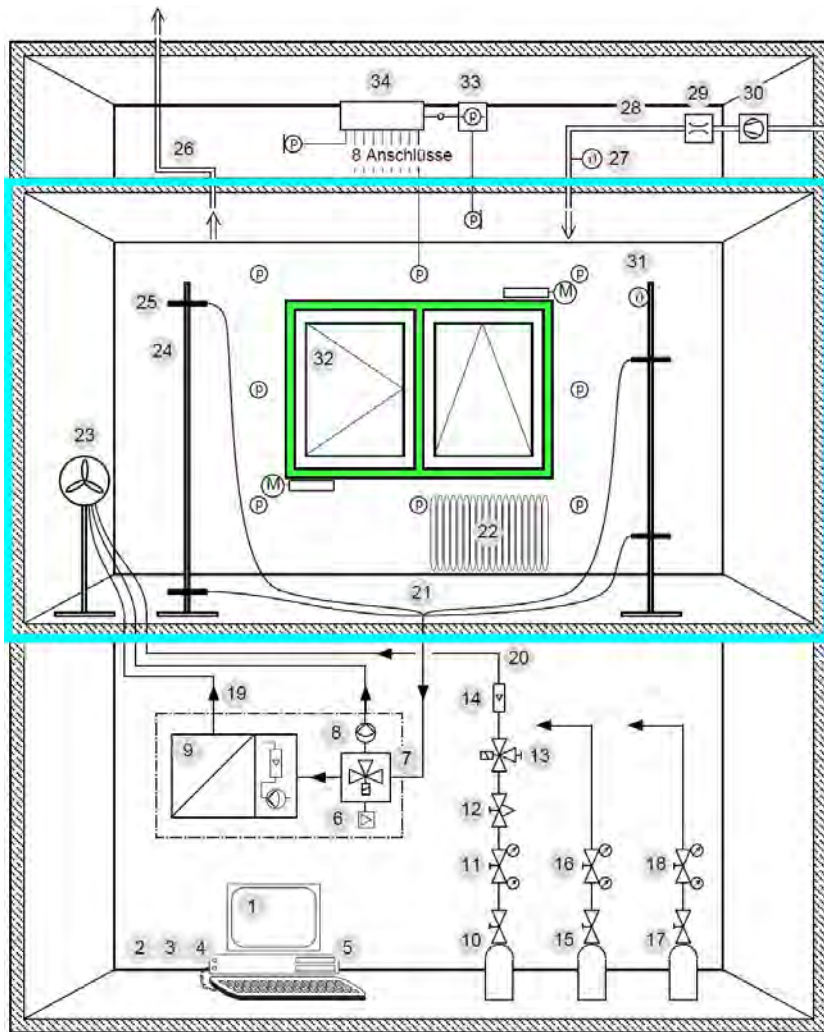
### 2.4.2.3 Modellaustestung und erster Schritt der Modellvalidierung

Das WINDOW-Modell, d. h. die implementierte PHAFF-Korrelation inklusive ihrer Modifikation PHAFF\_MOD, wurde in COCOSYS-Testrechnungen auf Ablauffähigkeit und Konsistenz der Ergebnisse überprüft. Dabei wurde neben der Kontrolle der Eingabedaten auf zulässige Bereiche inklusive entsprechender Warnungen/Fehlermeldungen an den Nutzer z. B. auch die Simulation einzelner und paralleler Fenster oder auch die Restart-Fähigkeit des Modells getestet.

Eine erste Validierung des Modells erfolgte anschließend anhand von Messungen zur einseitigen Fensterströmung, die in /MAA 95/ verfügbar sind. Maas hat dabei in einem Versuchsraum mit einem Fenster (siehe Abb. 2.18) Messungen zu verschiedenen Fenstertypen unter einem Spektrum von Randbedingungen durchgeführt. Davon wurde ein Versuch ausgewählt, für den in /MAA 95/ Randbedingungen und experimentelle Ergebnisse in Grafik-Form für einen Zeitbereich von 24 Stunden angegeben sind. Diese wurden digitalisiert und mit einem COOSYS-Datensatz mit zwei Zonen (Versuchsraum R1 und Umgebung ENVIR-I) und einer WINDOW-Verbindung (W1) nachgerechnet.

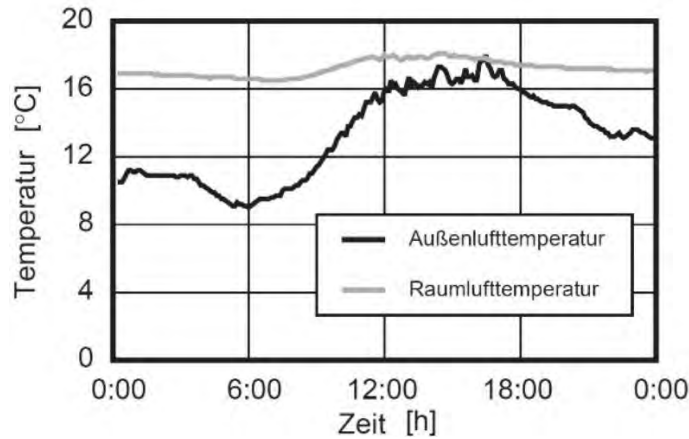
Aus dem angegebenen Volumen des Versuchsraums von 58,8 m<sup>3</sup> wurden auf Basis der Zeichnung die für COCOSYS notwendigen Daten wie Höhe und Bodenfläche abgeschätzt (2,56 m und 22,97 m<sup>2</sup>). Die sich daraus ergebenden Wandoberflächen (ohne Fenster und Stahltür 1,8 m x 0,8 m) sind als Betonwände angenommen worden (verputzter armierter Porenbeton). Das Fenster war in diesem Versuch als Kippfenster

(Breite mal Höhe 1,98 m x 1,33 m) mit 8 cm Öffnungsweite (4,09°) angeordnet. Eine Heizung war in Betrieb, Daten sind hierzu aber nicht verfügbar. Für den Anfangsdruck und die relative Luftfeuchte wurden plausible Werte abgeschätzt. Als Randbedingungen sind die Innen- und Außentemperatur (siehe Abb. 2.19) sowie die Windgeschwindigkeit als Funktion der Zeit verfügbar (Windrichtung ist im PHAFF Modell nicht relevant). Als Versuchsergebnis ist der gemessene Volumenstrom durch das Fenster verfügbar.



**Abb. 2.18** Schematischer Aufbau des Versuchsraums und der Messeinrichtung von Maas /MAA 95/

(Versuchsraum blau und Fenster mit Kipp- und Drehflügel grün markiert)

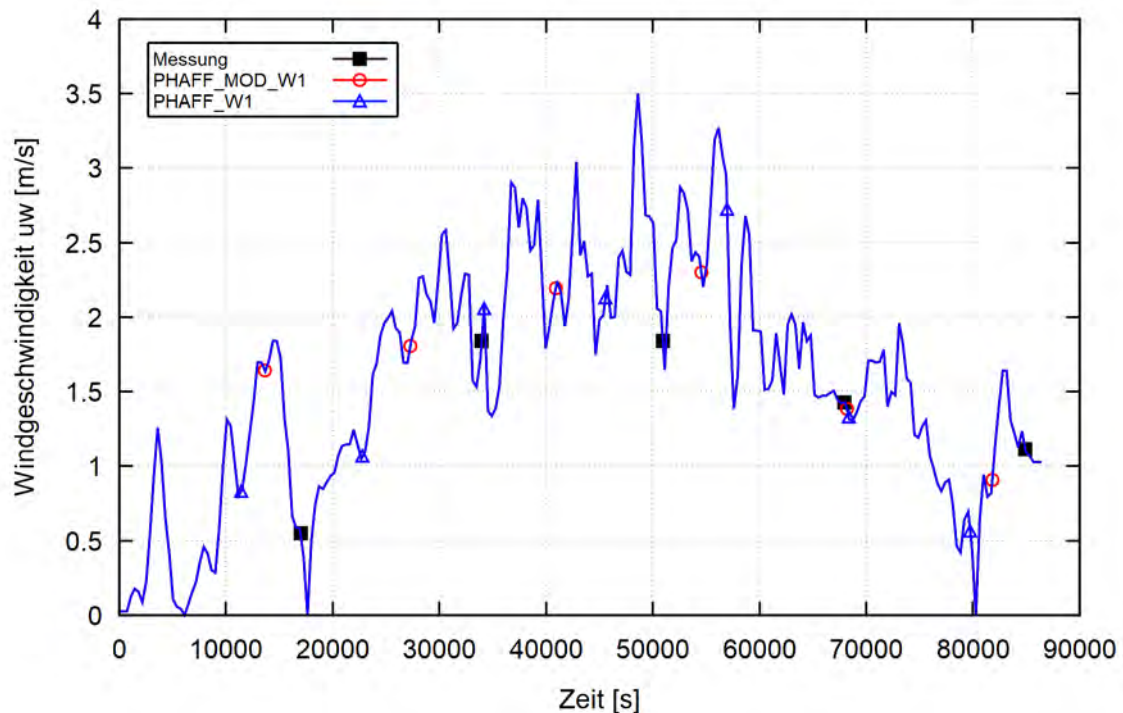


**Abb. 2.19** Temperatur-Randbedingungen für Versuch „Kippfenster mit 8 cm Öffnung“ /MAA 95/

In ersten Nachrechnungen wurde der von COCOSYS berechnete Volumenstrom durch das angekippte Fenster gegenüber dem angegebenen signifikant überschätzt. Als plausibelste Ursache wurde letztendlich herausgearbeitet, dass nur einer der zwei Fensterflügel, der Kippflügel, geöffnet war. Dies ist in /MAA 95/ nicht explizit beschrieben.

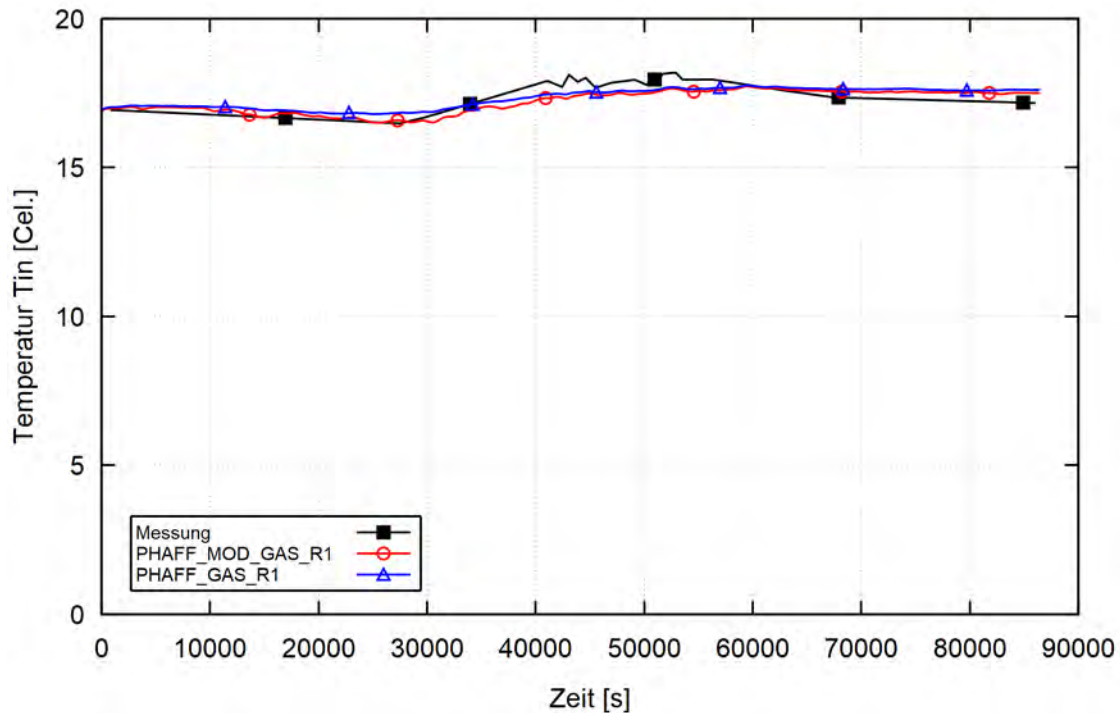
Die Ergebnisse der COCOSYS-Nachrechnung sind in Abb. 2.20 bis Abb. 2.22 dargestellt. In den Abbildungen sind den Messwerten (schwarze Kurven) die COCOSYS-Rechnungen mit dem neuen WINDOW-Modell und der *Phaff und De Gids*-Korrelation unter Auswahl der originalen PHAFF- (blau) sowie der von *Maas* modifizierten PHAFF\_MOD-Koeffizienten (rot) gegenübergestellt.

Die Abb. 2.20 zeigt exemplarisch anhand der Windgeschwindigkeit, dass die vorgegebenen (Wetter-)Randbedingungen von COCOSYS exakt berücksichtigt werden.



**Abb. 2.20** COCOSYS, Nachrechnung Versuch „Kippfenster mit 8 cm Öffnung“, Windgeschwindigkeit

Die Lufttemperatur im Innenraum, Zone R1, die in der COCOSYS-Simulation im Gegensatz zur Außentemperatur **nicht** als Randbedingung vorgegeben ist, wird gut reproduziert (siehe Abb. 2.21). Dies war in den ersten Rechenläufen nicht der Fall. Dort näherte sich diese Temperatur aufgrund des eintretenden Volumenstromes sehr schnell der kälteren Umgebungsluft an. Die Definition der Betonwände zur Berücksichtigung des entsprechenden Wärm austausches verbesserte dieses Ergebnis nur zum Teil. Die Simulation der Raumheizung ist problematisch, da weder die Leistung noch Heizintervalle bekannt sind. Letztendlich wurde die Heizung als wärmeabgebende Struktur simuliert, deren Leistung zwischen 0 und 0,4 kW entsprechend der Differenz zwischen der aktuellen berechneten und der gemessenen Innenraumtemperatur (siehe Abb. 2.19) in R1 gesteuert wird. Die Erhöhung der Leistung, z. B. auf 1 kW ändert nichts am prinzipiellen Ergebnis, lediglich die in COCOSYS umgesetzten Heizzeiten verkürzen sich jeweils etwas.



**Abb. 2.21** COCOSYS, Nachrechnung Versuch „Kippfenster mit 8 cm Öffnung“, Innenraum-Temperatur

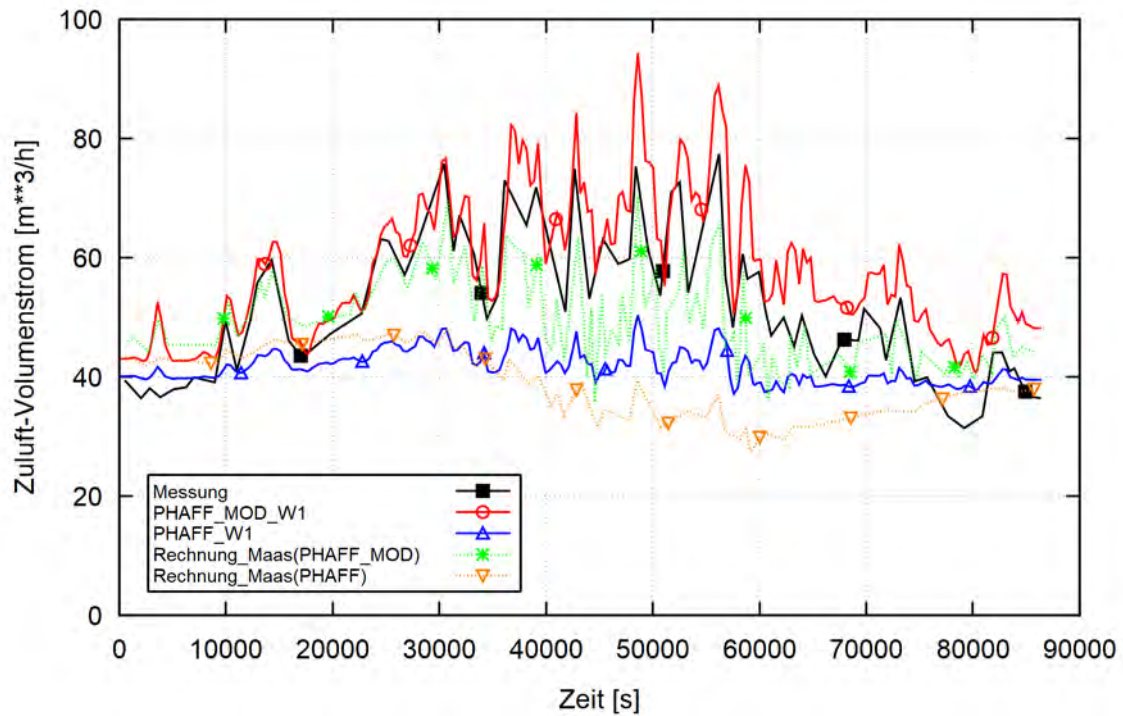
Das wesentliche Ergebnis aus der COCOSYS-Nachrechnung ist der zeitabhängige Volumenstrom. Die mit PHAFF und PHAFF\_MOD berechneten Verläufe sind in Abb. 2.22 zusammen mit der Messkurve aufgetragen. Die Rechnung mit den von *Maas* modifizierten Koeffizienten stimmt gut mit der Messung überein. Die originale Korrelation liegt sichtbar tiefer. Dies und die stärkeren Schwingungsamplituden im berechneten Volumenstrom in PHAFF\_MOD, die deutlicher als PHAFF der vorgegebenen Windgeschwindigkeit folgen (vgl. Abb. 2.20) sind im 5,6-mal größeren Koeffizienten  $C_1$  (siehe Tab. 2.6) begründet.

Zusätzlich sind in Abb. 2.22 die von *Maas* selbst berechneten und in /MAA 95/ angegebenen Ergebnisse mit modifizierten und originalen Koeffizienten aufgeführt (grüne und orange Kurven). Beide Ergebnisse liegen unter den mit COCOSYS berechneten Verläufen. Aber auch in den damaligen Rechnungen von *Maas* liegt der Volumenstrom mit der PHAFF-Korrelation unter der modifizierten und in der modifizierten Korrelation treten größere Schwingungsamplituden auf.

Da die aus /MAA 95/ bestimmbaren Randbedingungen dies nicht zulassen, wurde auf eine verbesserte Anpassung der COCOSYS- an die ursprünglichen *Maas*-Ergebnisse



verzichtet. Windstärke und Außentemperatur werden auf Basis der Messdaten als ausreichend genau angesehen. Die Modifikation der Randbedingungen wie Druck oder relative Luftfeuchte oder auch von wärmeübertragenden Wänden in realistischen Bereichen hatte nur geringen Einfluss. Die Heizungsmodellierung bestimmt die Innentemperatur, ist aber von wesentlich geringerem Einfluss auf den Volumenstrom als die Fenstergröße. Leider sind keine Information zur exakten Fenstergröße oder zur Rahmenbreite angegeben.



**Abb. 2.22** COCOSYS, Nachrechnung Versuch „Kipfenster mit 8 cm Öffnung“, Volumenstrom

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit den durchgeführten COCOSYS-Nachrechnungen ein erster Validierungsschritt des WINDOW-Modells als Voraussetzung auf seine erstmalige praktische Anwendung in den Rechnungen zum Messobjekt Oberheldrungen (siehe Kapitel 2.5) erfolgt ist. Der Volumenstrom von „Frischlufte“ durch ein geöffnetes Fenster ist eine entscheidende Einflussgröße für die zeitliche Änderung der Rn-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen.



### 2.4.3 Raumbezogene kumulierte Mittelwerte der Rn-222 Aktivitätskonzentration

Ziel dieser Modellerweiterung ist es, aus einer COCOSYS-Analyse für ein TRACER\_GAS (hier Rn-222) in jedem abgebildeten Raum (Zone) direkt den Mittelwert der Aktivitätskonzentration ablesen zu können.

#### 2.4.3.1 Modellerweiterung

Je COCOSYS Zone  $i$  wird für jeden vom Programm automatisch bestimmten Integrationszeitschritt  $dt$  aus der aktuellen Rn-222-Aktivitätskonzentration  $c_{Rn-222,i}(t)$  die mittlere Konzentration berechnet und integriert. Mit fortschreitender Simulationszeit  $t$  (von  $t_{begin}$  bis  $t_{aktuell}$ ) ergibt dies einen sich laufend ändernden, d. h. kumulierten Wert, der zum Ende der Simulation ( $t_{end}$ ) dann dem gesuchten Mittelwert  $\bar{c}_{Rn-222,i}$  entspricht:

$$\bar{c}_{Rn-222,i} = \frac{1}{t_{end} - t_{begin}} \int_{t_{begin}}^{t_{end}} c_{Rn-222,i}(t) dt \quad (2.7)$$

Dieser kumulierte Mittelwert ist dann z. B. mit dem arithmetischen Mittelwert aller Messpunkte  $n$  für diesen Raum  $i$  zwischen  $t_{begin}$  bis  $t_{end}$  als

$$\bar{c}_i = \sum_{j=1}^n c_{Mess,j,i} \frac{1}{n} \quad (2.8)$$

vergleichbar (unter der Voraussetzung eines konstanten Messintervalls).

Das COCOSYS User Manual wurde um die Beschreibung der neuen Ausgabegröße TG\_AVE (Mittelwert) ergänzt:

```
(ZONES      ) AVERAGE TRACER_GAS ACTIVITY (BQ/M**3) (ALREADY DIVIDED BY SCALING FACTOR)

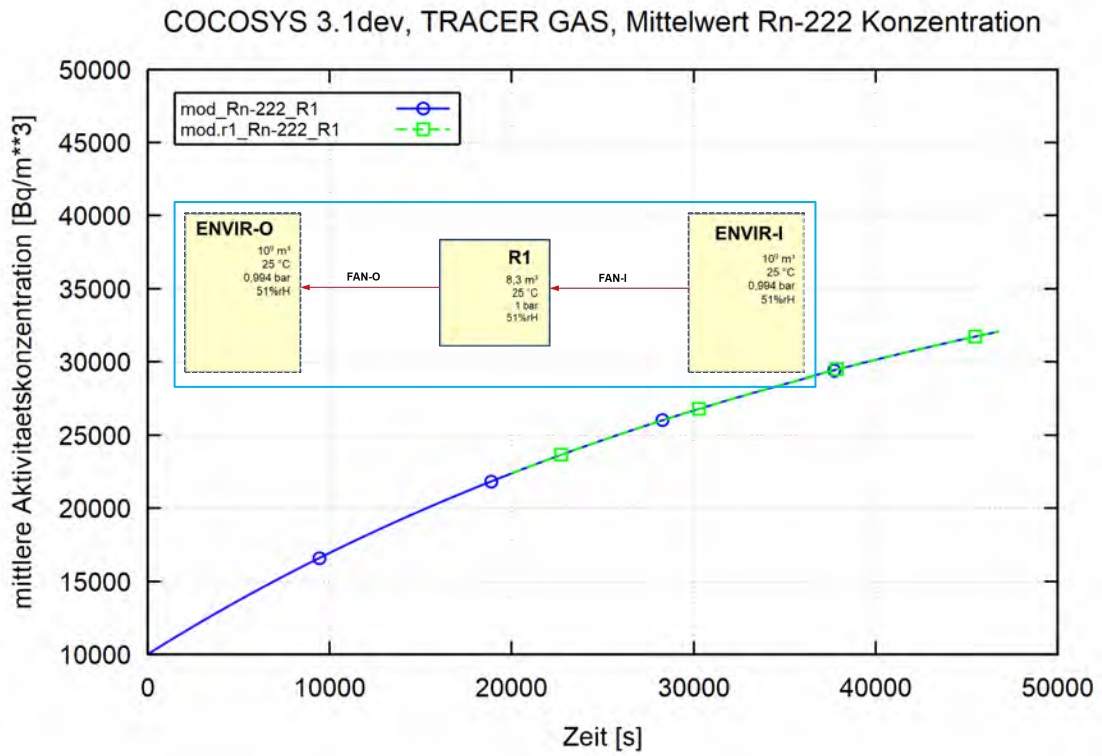
-----
NO.  ZONE                TG_AVE
      Rn-222
  1  ENV-505             0.20100D-01
  .  .  .
157 403-125B             0.91450D+04
158 403-215B             0.10820D+05
```

Variable	Args	Unit	Print level	Comment
...				
TG_AVE	c,z	Bq/m <sup>3</sup>	1	average cumulative volume activity concentration (according to TG_ACT) for the time phase t <sub>begin</sub> to t as: $\bar{c}_{c,z} = \frac{1}{t - t_{begin}} \int_{t_{begin}}^t c_{c,z}(t) dt$

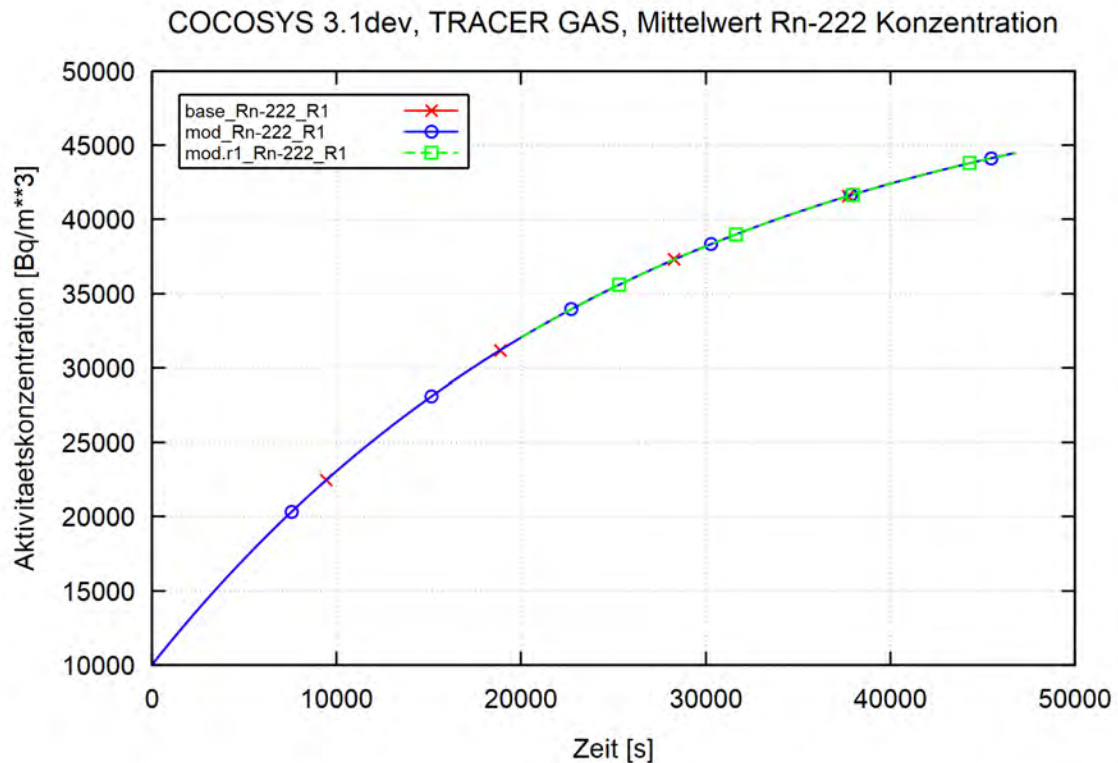
### 2.4.3.2 Testrechnungen

Die Implementierung wurde anhand eines einfachen Testbeispiels mit drei Zonen überprüft. Raum R1 (siehe Abb. 2.23) wird mit Hilfe der Lüftungssysteme FAN-I und FAN-O durchströmt und gleichzeitig wird ein konstanter Rn-222-Massenstrom in R1 eingespeist. Der Rn-222-Isotopenzerfall ist im Datensatz berücksichtigt.

Damit wurde neben dem neuen kumulierten Mittelwert der Aktivitätskonzentration (siehe Abb. 2.24) auch die nach allen oben beschriebenen Programmänderungen weiterhin korrekte Berechnung der Rn-222-Aktivitätskonzentration kontrolliert (siehe Abb. 2.24, Varianten base und mod). Bezüglich der Mittelwertberechnung wurde außerdem die Funktionalität von Restart-Läufen (Variante mod\_r1) sowie die Simulation mit negativen Zeiten überprüft (typischerweise benutzt für die Simulation von Einschwingphasen von Experimenten).



**Abb. 2.23** COCOSYS, Drei-Zonen-Modell, Test der implementierten Mittelwertberechnung der Rn-222-Aktivitätskonzentration



**Abb. 2.24** COCOSYS, Drei-Zonen-Modell, berechnete Rn-222-Aktivitätskonzentration

Aus dem Forschungsvorhaben 3618S12362 /GRS 20/ liegt für das Objekt „Gewölbekeller“ (GWK) ein komplexerer COCOSYS-Datensatz mit acht Modellzonen vor. Dieser Fall wurde mit der aktuellen Version nachgerechnet, um ungewollte Nebeneffekte der Modellerweiterungen auszuschließen. Die berechneten Ergebnisse zur Rn-222-Aktivitätskonzentrationen aus 2021 (siehe Abb. 2.25, Variante V26) werden identisch reproduziert (Variante V26mod) und die zeitabhängigen kumulierten Mittelwerte (siehe Abb. 2.26) sind plausibel.

In Abb. 2.27 ist mit einem Pfeil ↓ der Zeitpunkt markiert, an dem die aktuelle Aktivitätskonzentration in Zone F1 unter die mittlere kumulierte Konzentration fällt. Ab diesem Punkt ändert sich das Zeitverhalten der kumulierten Aktivitätskonzentration – aus einem positiven wird ein negativer Gradient.

BMUV Radon, COCOSYS 3.mod, GWK, 8-Zonen-Modell, mittl. Akt.-Konz.

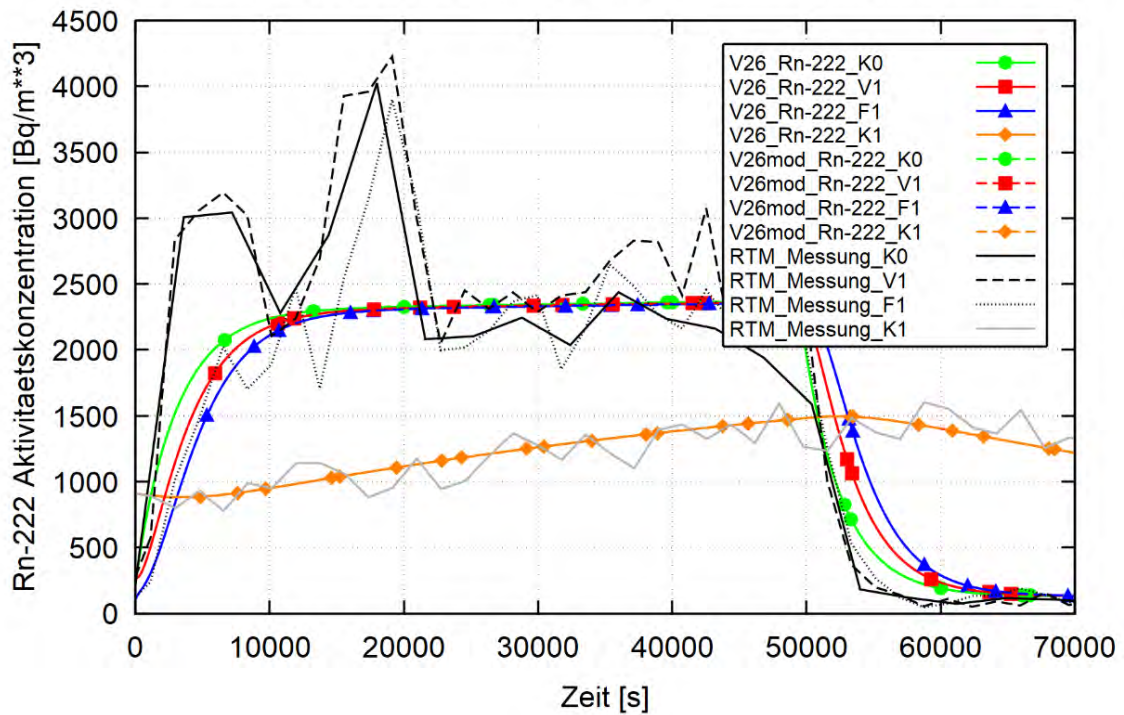


Abb. 2.25 COCOSYS, GWK, Vergleich gemessene und berechnete Rn-222-Aktivitätskonzentrationen

BMUV Radon, COCOSYS 3.mod, GWK, 8-Zonen-Modell, mittl. Akt.-Konz.

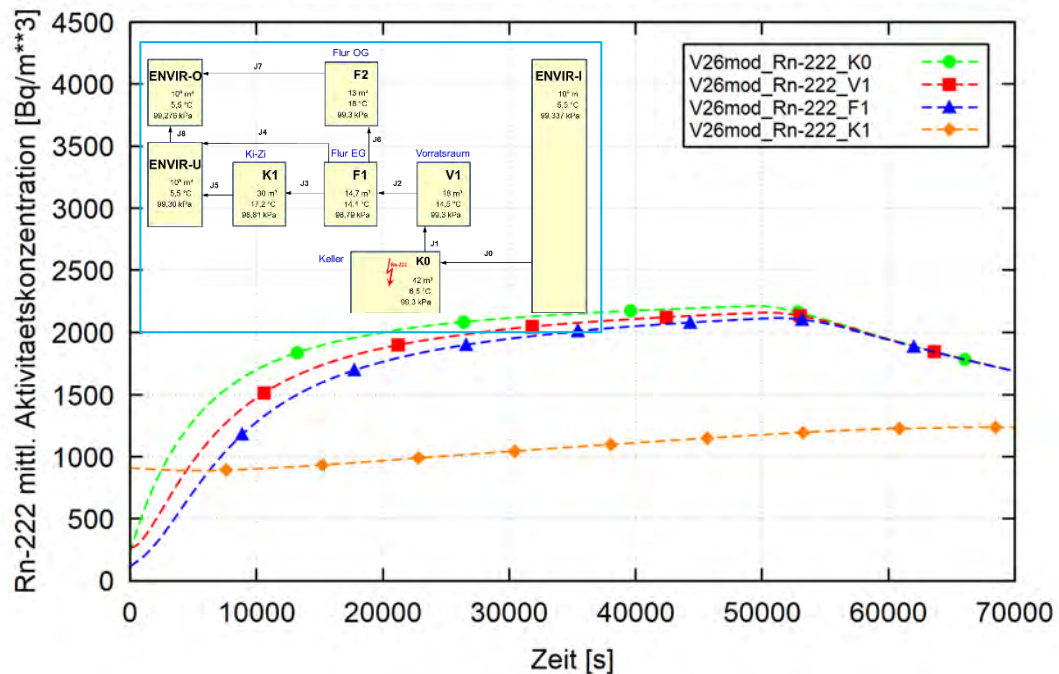
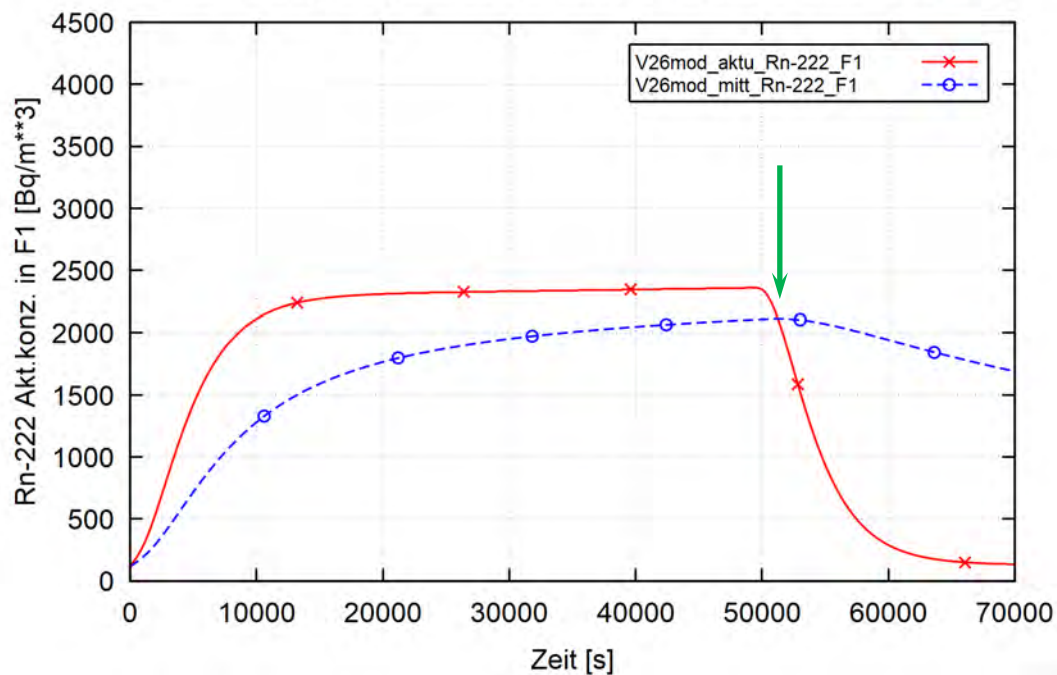


Abb. 2.26 COCOSYS, GWK, kumulierte Rn-222-Aktivitätskonzentrationen

BMUV Radon, COCOSYS 3.mod, GWK, 8-Zonen-Modell, mittl. Akt.-Konz.



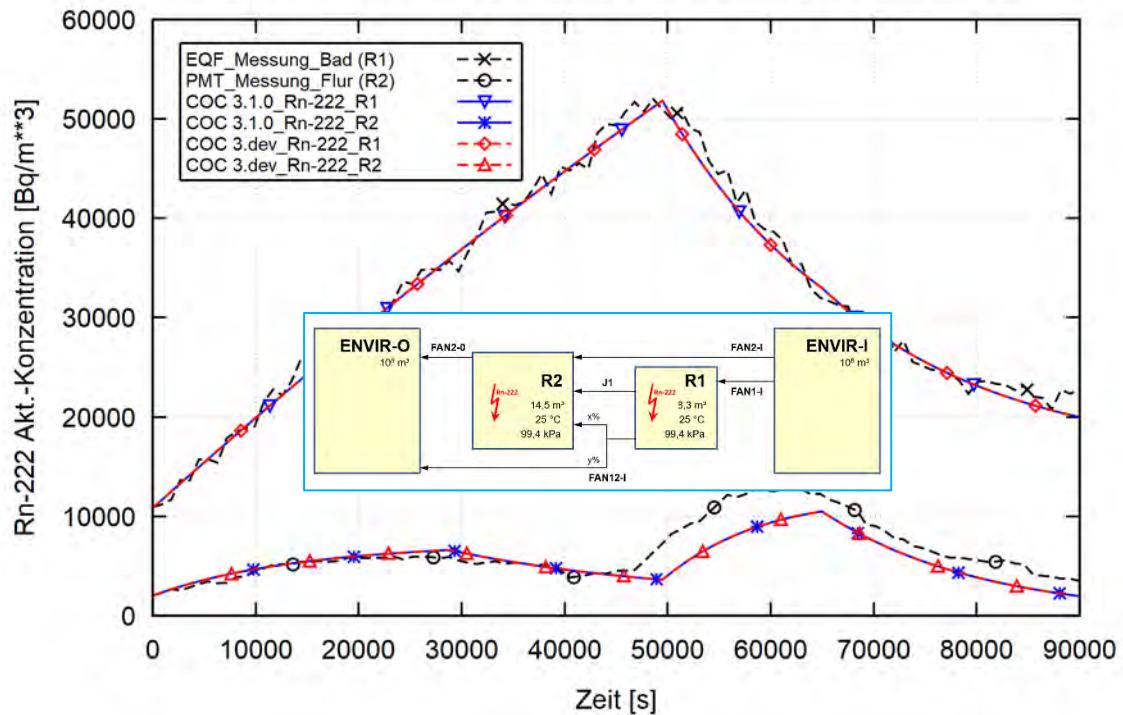
**Abb. 2.27** COCOSYS, GWK, aktuelle und kumulierte Rn-222-Aktivitätskonzentration in Zone F1

### 2.4.3.3 Validierung anhand EFH (2019 Messungen)

Für das Objekt „Einfamilienhaus“ (EFH) wurden im Forschungsvorhaben 3618S12362 Nachrechnungen der Rn-222-Konzentration durchgeführt (Bild 3.83 in /GRS 20/) die hier (Variante COC\_3.1.0) mit der modifizierten COCOSYS-Version wiederholt wurden (siehe Abb. 2.28, Variante COC\_3.dev).



COCOSYS, Rn-222 distribution, EFH summer 2019, Var.105



**Abb. 2.28** COCOSYS, EFH, Rn-222-Aktivitätskonzentrationen in Bad (R1) und Flur (R2), Ergebnisvergleich mit alter und modifizierter COCOSYS-Version

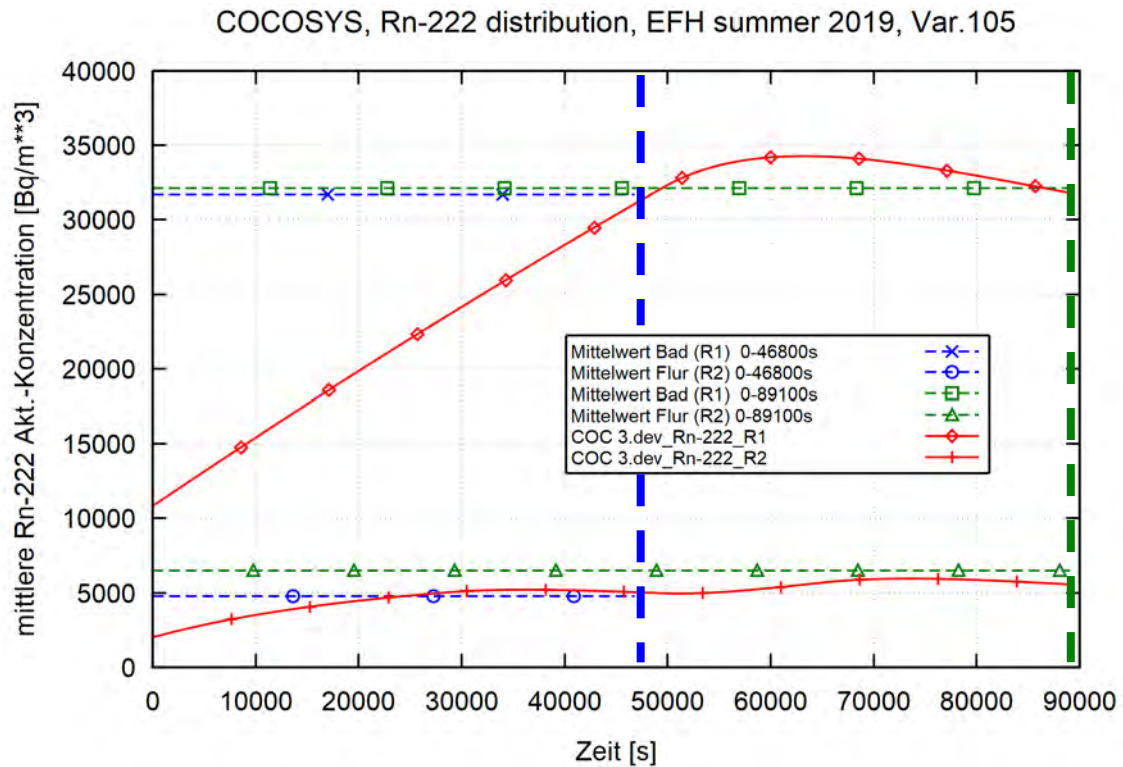
Bei der damaligen Auswertung der Messdaten zum EFH wurden für bestimmte Zeitabschnitte auch mittlere Konzentrationen im Quellraum ermittelt (siehe Bad, Tabelle 3.27 in /GRS 20/). Zur Validierung der neuen Mittelwertberechnung in COCOSYS wurde diese Auswertung jetzt auch für einen weiteren Nachbarraum (Flur) vorgenommen, und zwar für Messphase 2 sowie die Phase 2 und 3 (siehe Tab. 2.8).

**Tab. 2.8** EFH, aus den Messwerten abgeleitete und mit COCOSYS berechnete mittlere Rn-222-Konzentrationen in Bad und Flur

Phase	t_start (s)	t_ende (s)	Mittelwerte Messung		Mittelwerte COCOSYS		Abweichung	
			Bad (Bq/m³)	Flur (Bq/m³)	Bad (R1) (Bq/m³)	Flur (R2) (Bq/m³)	Bad (%)	Flur (%)
2	0	48.600	31.684	4.766	31.785	4.988	0,3	4,6
2+3	0	89.100	32.138	6.507	31.797	5.551	-1,1	-14,7

Die von COCOSYS für den Zeitbereich 0 bis 89.100 s für den Quellraum (Zone R1, Bad) und den benachbarten Raum (R2, Flur) berechneten kumulierten Mittelwerte sind in Abb. 2.29 (rote Kurven) dargestellt. Dem sind die Mittelwerte aus den Messdaten (s. Tab. 2.8) gegenübergestellt (gestrichelte blaue und grüne Linien).

Vergleichbar sind die COCOSYS-Zeitverläufe mit den Messdaten nur zu den zwei Zeitpunkten 48.600 s und 89.100 s.



**Abb. 2.29** COCOSYS, EFH, mittlere Rn-222-Aktivitätskonzentrationen in Bad (R1) und Flur (R2) und akkumulierte Mittelwerte aus COCOSYS

Die exakten COCOSYS-Zahlen inklusive der Abweichung der COCOSYS-Ergebnisse von den Messdaten sind in Tab. 2.8 aufgeführt. Generell kann eine sehr gute (Bad) bzw. gute Übereinstimmung (Flur) mit den Messdaten festgestellt werden. Während die Mittelwerte für das Bad exakt reproduziert werden, sind diese für den Flur unterschätzt mit der größeren Abweichung nach 89.100 s. Das ist die logische Konsequenz aus der Tatsache, dass in der COCOSYS-Rechnung auch die Aktivität im Flur im Zeitbereich ab 46.000 s unterschätzt ist. Die Mittelwertberechnung kann also immer nur so gut sein, wie die berechnete zeitabhängige Aktivitätskonzentration in einer Zone getroffen wird.

## 2.5 AP 3: Fortsetzung der COCOSYS-Validierung für Radon-Ausbreitungsvorgänge anhand neuer Messdaten

Im AP 1 erfolgten Messungen an einem Arbeitsplatz (laut /DIN 21/ ein Innenraum, an dem sich eine Arbeitskraft während ihrer Berufsausübung regelmäßig oder wiederholt



auffält) im Messobjekt in Oberheldrungen/Thüringen zur Radon-Aktivitätskonzentration inklusive der Erfassung von Anfangs- und Randbedingungen (Wetterdaten, Öffnungszuständen von Fenstern und Türen). Parallel dazu wurden im AP 2 in COCOSYS spezielle Modellerweiterungen zur Simulation der Radon-Verteilung implementiert. Aufbauend auf diesen Forschungsarbeiten wurde die Validierung von COCOSYS fortgesetzt. Dafür sind aus den Messdaten drei Phasen für Nach- und Voraussrechnungen ausgewählt worden, die sich durch unterschiedlich hohe Rn-222-Konzentrationen in den Räumen auszeichnen, wobei die erste Phase Umgebungsbedingungen im „Winter“, die zweite „Frühling“ und die dritte Phase „Sommer“ repräsentieren (siehe auch Tab. 2.4). In der Vorhabensplanung waren nur Rechnungen zu zwei Phasen vorgesehen; die 3. Phase wurde nachträglich mit aufgenommen.

Für die ersten beide Phasen sind entsprechend der Vorhabensplanung die folgenden beschriebenen Arbeitsschritte durchgeführt worden:

- Erstellung von COCOSYS-Eingabedatensätzen, d. h. Umsetzung der Geometrie der Räume in eine durch COCOSYS interpretierbare Form
- Zusammenstellung aller notwendigen Randbedingungen entsprechend der für dieses Objekt erhobenen Messdaten (Druck- und Temperaturverläufe, Heizung, Tür-/Fenster-Öffnungen oder Luftwechselzahl, Radon-Quellrate usw.) und deren Implementierung in den Datensatz
- Durchführung von COCOSYS-Nachrechnungen inklusive Variantenrechnungen
- Vergleich der COCOSYS-Ergebnisse mit den aufgenommenen Messdaten und daraus abgeleiteten Größen (Rn-222-Quellstärke, raumspezifischer Mittelwerte der Aktivitätskonzentration) sowie die Diskussion und Bewertung der Analyseergebnisse

Im Unterschied zur ersten Phase wurden die COCOSYS-Rechnungen für Phase 2 zunächst als Voraussrechnungen zur Prüfung der Prognosefähigkeit von COCOSYS für Radon-Ausbreitungsvorgänge durchgeführt. Diese, im ursprünglichen Anwendungsgebiet von COCOSYS (d. h. für Kernenergieanlagen) als „blinde Nachrechnungen“ bezeichneten Analysen erfolgten in verschiedenen Stufen jeweils ohne Kenntnis der gemessenen Aktivitätskonzentrationen: komplett blind, mit der aus den Messdaten ermittelten Radon-Quellrate, unter Berücksichtigung der Randbedingungen sowie offen. Geprüft wurde dabei insbesondere, ob von COCOSYS berechnete Mittelwerte der Rn-222-Aktivitätskonzentration mit Hilfe von Exposimetern direkt gemessenen bzw. aus Messdaten abgeleiteten Werten übereinstimmen.

Zusätzlich zum Arbeitsprogramm sind Rechnungen zu einer Phase 3 („Sommer“) erfolgt, um mit COCOSYS einen Mittelwert für diese Bedingungen zu berechnen und damit aus der Kombination aller drei Phasen auf einen Jahresmittelwert schließen zu können (siehe Kapitel 2.5.5 und 2.5.6). Für diese 3. Phase liegt allerdings nur ein reduzierter Satz von Radon-Messdaten und keine eigenen Messungen der Wetter- und Raumparameter vor (siehe Kapitel 2.3.2.2).

### 2.5.1 Erstellung von COCOSYS-Eingabedatensätzen für das Messobjekt Oberheldrungen

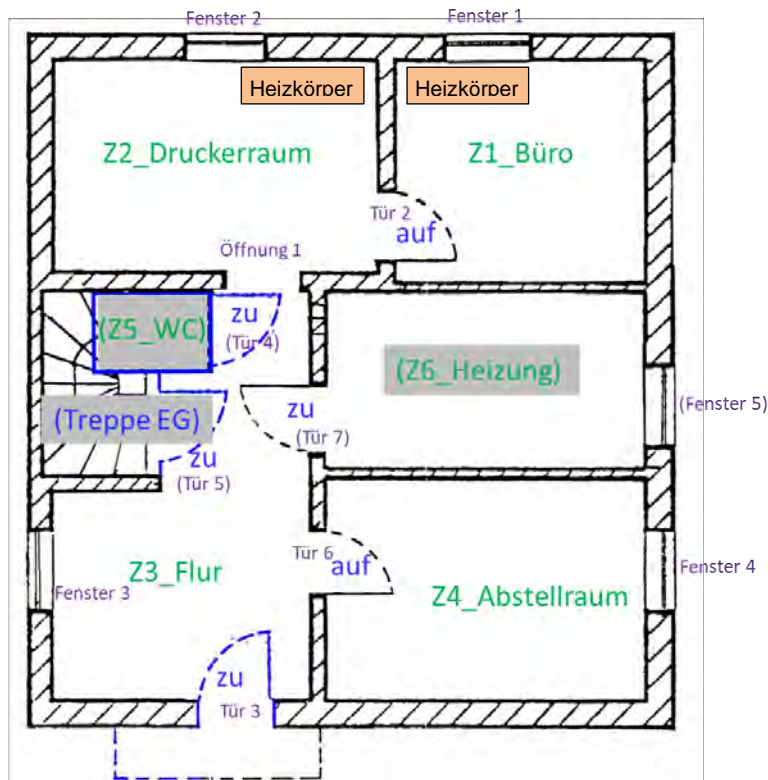
Grundlage für die Erstellung von COCOSYS-Datensätzen war ein Grundriss des Messobjektes mit Roh-Maßen (Souterrain eines Einfamilienhauses). Ergänzend dazu wurden während der Begehung und Installation der Radon-Messtechnik im März 2022 mit einem Laser-Entfernungsmessgerät eigene Nachmessungen zu erforderlichen Geometriedaten wie Volumina, Raumhöhen, Bodenflächen (siehe Abb. 2.30) und Flächen von Überströmöffnungen vorgenommen.

<i>Maße bestimmt mit Laser-Messgerät, 31.3.2022, ARN</i>						
Zone	Breite (m)	Länge (m)	Höhe (m)	Brutto-Volumen (m³)	Brutto-Bodenfläche (m²)	
Z1_Büro	2,837	3,243	2,208	20,314	9,200	
Z2_Druckerraum	2,708	4,096	2,208	24,491	11,092	
Z3_Flur	(3 Teile)	5,282	2,174	26,785	12,321	
Z4_Abstellraum	2,851	4,058	2,222	25,707	11,569	
<b>Hilfsrechnungen</b>						
Volumen:						
Z3_Flur	<b>b</b>	<b>l</b>	<b>h</b>	<b>V</b>	<b>A</b>	
	3,203	2,593	2,174	18,056	8,305	
	1,771	1,309	2,174	5,040	2,318	
	1,214	1,398	2,174	3,690	1,697	
		5,300		26,785	12,321	
	gemessen	5,282				

**Abb. 2.30** Messobjekt Oberheldrungen, während der Begehung aufgenommene Geometriedaten

Insbesondere erfolgten dabei Korrekturen zwischen Grundriss und Ist-Zustand (siehe Abb. 2.31, in Blau gezeichnete Details) sowie die Identifizierung von geschlossenen und damit für die Simulation nicht relevanten Räumen bzw. Verbindungen (in der Abbildung in Klammern gesetzt).

Zimmerbezeichnung laut Messgeräten (Rn-222, Tür-/Fenster Sensoren)  
korrigierte Angaben aus Begehung



**Abb. 2.31** Messobjekt Oberheldungen, Grundriss der relevanten Zimmer im Souterrain des EFH

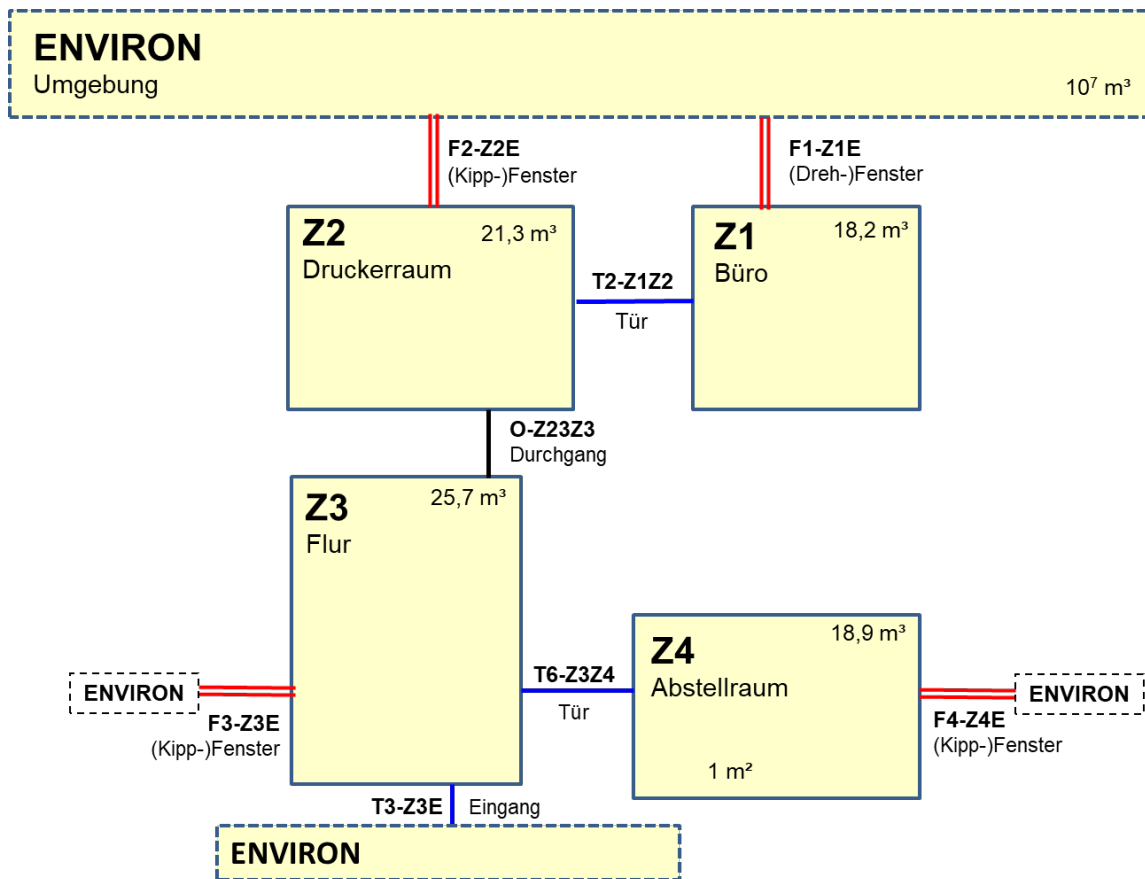
Während der Begehung wurden Fotos zu Objekt-Details aufgenommen (siehe Abb. 2.32), die aber ohne Zustimmung des Eigentümers nur für den GRS internen Gebrauch nutzbar sind.



**Abb. 2.32** Messobjekt Oberheldrungen, Fenster über dem Schreibtisch in Zimmer 1 mit Öffnungssensor (rot markiert) und Empfangsteil der Wetterstation

#### 2.5.1.1 Datensatz „Ganze Räume“

Die Forschungsarbeiten zur COCOSYS-Validierung wurden mit einem Datensatz begonnen, in dem jedes Zimmer durch eine Modellzone modelliert ist. Die Umgebung ENVIRON berücksichtigt die gemessenen Wetter-Randbedingungen. Die Nodalisierung ist in Abb. 2.33 dargestellt.



**Abb. 2.33** COCOSYS, Nodalisierung „Ganze Räume“ mit fünf Modellzonen für das Messobjekt Oberheldungen

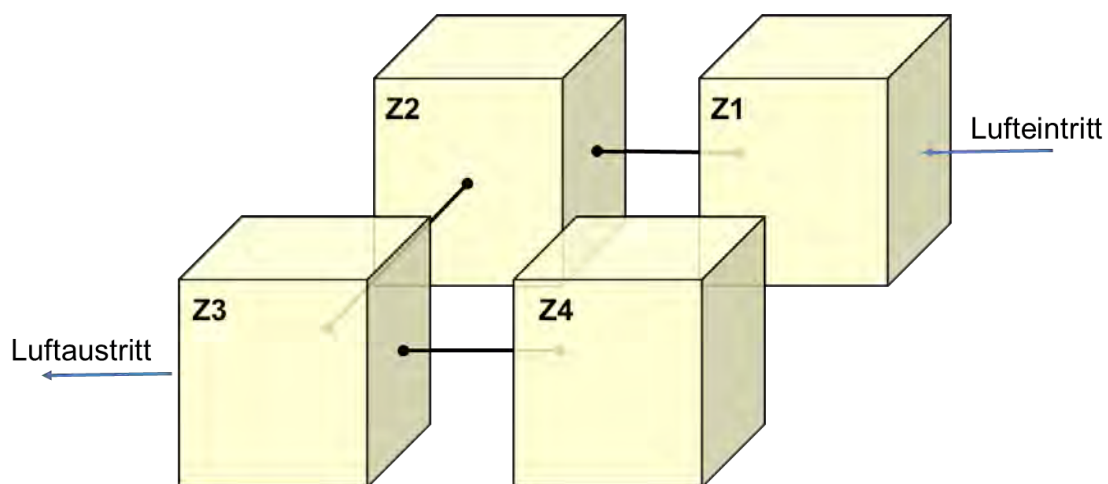
Dieses 5-Zonen-Modell beinhaltet nicht die Türen/Fenster, die laut Eigentümer während der normalen Nutzung geschlossen sind (Türen 4, 5 und 7, siehe Abb. 2.31) und somit auch nicht die dadurch abgetrennten Zimmer (Heizungsraum als „praktisch ungenutzter Innenraum“ nach /DIN 21/, sowie WC und Treppe zum Erdgeschoß als „wenig genutzte Innenräume“).

Die Start- und Randbedingungen in den Räumen inklusive Rn-222-Quellraten wurden entsprechend der gemessenen Parameter zu Beginn der Messphasen gesetzt. In der Umgebung wurde eine Radon-Außenluftkonzentration von 10 Bq/m<sup>3</sup> angenommen (basierend auf 9 bis 12 Bq/m<sup>3</sup> in der Umgebung des Messobjektes Oberheldungen in 1,5 m Höhe entsprechend /BFS 22a/). Für die Umgebungszone wurden zeitabhängige Tabellen mit Luftdruck, Außentemperatur und Windgeschwindigkeit entsprechend den Messdaten definiert.

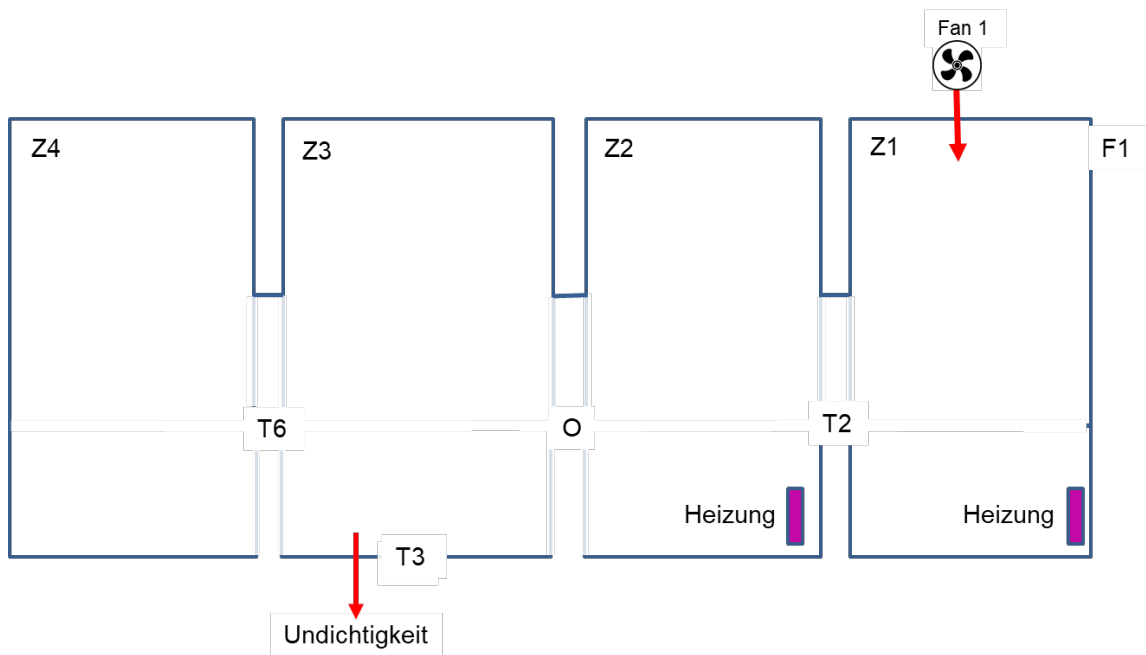
Die Nodalisierung umfasst acht Strömungsverbindungen, von denen die Fenster F1 bis F4 durch den neuen WINDOW-Verbindungstyp (einseitige Lüftung, siehe Kapitel 2.4.2)

abgebildet sind. Ihr Öffnungszustand ist über eine Zeit-Öffnungswinkel-Tabelle angegeben. Die Türen T2 (geöffnet), T3 und T6 (geschlossen, deaktiviert) sind durch atmosphärische Standard-Verbindungen modelliert.

Zwischen den Zimmern wurde jeweils eine einzige Strömungsverbindung simuliert, die zu jedem Zeitpunkt eine Gasströmung in nur eine Richtung ermöglicht. Wenn der Luftwechsel über einen Lufteintritt aus der Umgebung durch eine Undichtigkeit im Zimmer Z1 erfolgt, so würde beispielsweise eine gerichtete Strömung durch alle Zimmer  $Z1 \rightarrow Z2 \rightarrow Z3$  berechnet werden. In Z3 wird ein möglicher Austritt der Strömung zur Umgebung (über eine Undichtigkeit an der Tür T3, siehe Kapitel 2.5.1.2) oder zu den oberen Geschossen (über eine Undichtigkeit an der Tür T5 zum Treppenaufgang) erwartet (vgl. Abb. 2.34 und Abb. 2.35). Dies führte letztendlich zur Nodalisierung mit Modellierung einer „Grundlüftung“ des Messobjektes entsprechend des aus den Messdaten abgeleiteten Luftwechsels bei geschlossenen Fenstern und Türen (siehe Abb. 2.7) über ein Zuluft-System in Z1 (siehe Fan 1, Abb. 2.35) und den Luftaustritt in Z3 durch eine Undichtigkeit unterhalb der Tür T3.



**Abb. 2.34** Strömungsverbindungen zwischen den Zimmern bei Verwendung des Modells mit ganzen Räumen mit unterstelltem Lufteintritt in Z1 und Luftaustritt aus Z3



**Abb. 2.35** COCOSYS, Nodalisierung „Ganze Räume“, Zonen Z1 bis Z4

Die Wände, Decken und Böden der Zimmer sind durch 20 wärmeleitende Strukturen berücksichtigt, die entweder mit anderen Zimmern (Zwischenwände) oder der Umgebung gekoppelt sind. Die Wände sind aus Hohlblocksteinen aufgemauert und auf den Innenseiten mit Gipskarton verkleidet. Die Beton-Fußböden sind gefliest und haben Kontakt zum Erdreich. Die entsprechenden Materialdaten wurden mit typischen Werten für die entsprechenden Baustoffe definiert.

In Zimmer Z1 und Z2 sind Plattenheizkörper installiert (siehe Abb. 2.31). Ihre genauen Betriebsdaten (abgegebene Leistung sowie Betriebszeiten) sind nicht bekannt. Sie wurden deshalb als wärmeabgebende Strukturen definiert, die gesteuert über die Differenz zwischen aktueller und gemessener Raumtemperatur maximal 1 kW Leistung abgeben.

### 2.5.1.2 Datensatz „Unterteilte Räume“

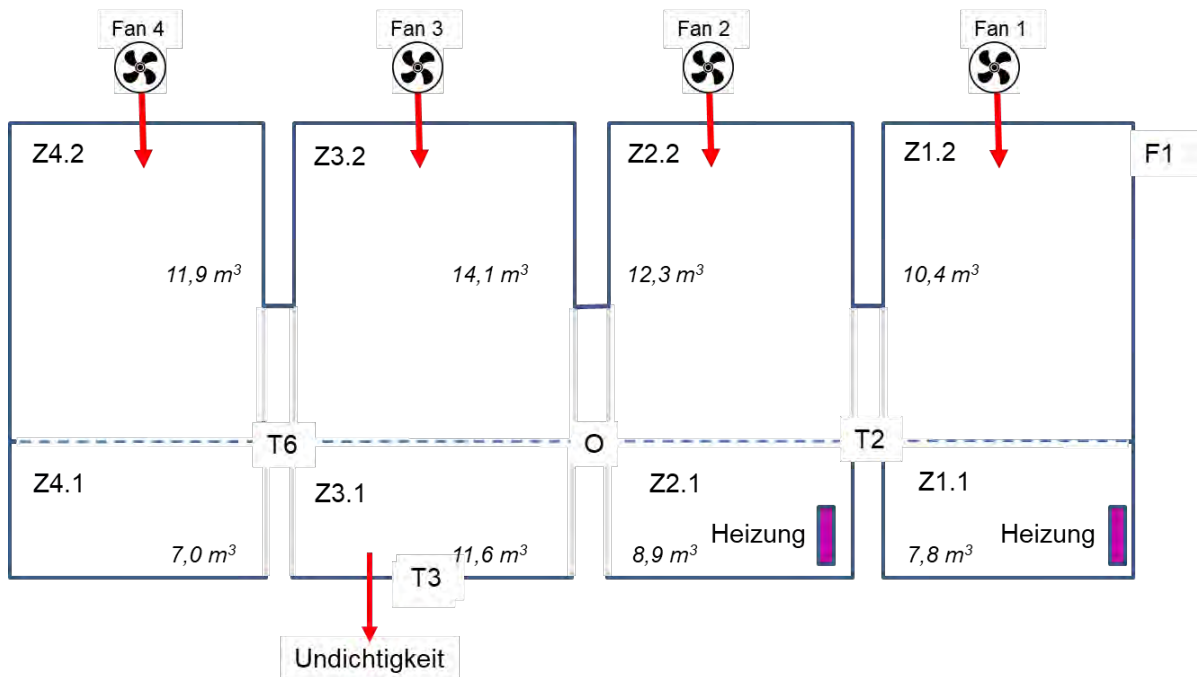
Der im vorhergehenden Kapitel beschriebene Datensatz „Ganze Räume“, in dem die Zimmer des Objektes mit jeweils einer Modellzone beschrieben werden, eignet sich, um erste Orientierungsrechnungen zur Prognose der Aktivitätskonzentrationen im Objekt zu ermöglichen. Dabei werden Rn-222-Quellstärken, Raumvolumina und Luftwechsel mit der Umgebung bereits in einem realistischen Verhältnis berücksichtigt. Für diese Parameter konnten Basis-Eingabewerte aus der Begehung des Objektes (Volumina, Geo-

metrie der möglichen Strömungsverbindungen) bzw. aus den Messdaten (Anfangskonzentrationen, Quellstärke, Luftwechsel) abgeleitet werden, so dass erste Simulationen möglich waren.

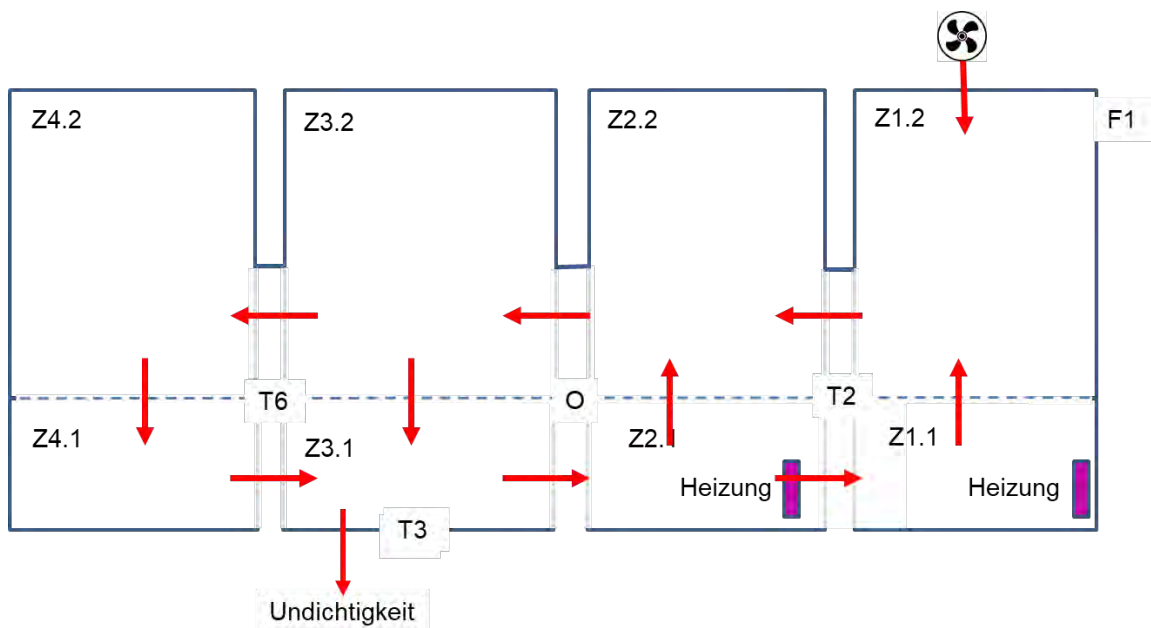
In dieser Situation, mit unterstelltem Luft Eintritt in Z1 und unterstelltem Luftaustritt aus Z3, wäre das Zimmer Z4 nicht am Luftaustausch beteiligt. In der Realität bilden sich aber in großen Öffnungsquerschnitten wie z. B. Türen oder Gängen gegensinnig gerichtete Strömungen entlang der Höhe des Querschnittes aus. Damit findet ein effektiver Luftaustausch zwischen Räumen statt und ein solcher wäre auch in der in Abb. 2.34 gezeigten Situation zu erwarten. Um dieses Verhalten simulieren zu können, wurde das COCOSYS-Modell erweitert (siehe Abb. 2.36), in dem die Zimmer  $Z_x$  (d. h. Z1, Z2, Z3 oder Z4) jeweils in eine untere ( $Z_x.1$ ) und eine obere Zone ( $Z_x.2$ ) unterteilt sind. Die Trennebene zwischen unterer und oberer Zone wurde dabei jeweils auf die mittlere Türhöhe gelegt. Zwischen oberer und unterer Zimmerzone ist somit eine vertikale Strömungsverbindung mit einer Fläche entsprechend dem Zimmerquerschnitt modelliert. Während der Simulation können diese vertikalen Strömungen gegensinnig gerichtet sein (Beispiel während aktivierter Heizung in Abb. 2.37). Jede horizontale Strömungsverbindung zwischen den Zimmerteilen basiert auf der halbierten Strömungsquerschnittsfläche des jeweiligen Türbereiches.

Da keine direkten Messdaten für die Betriebszeiten sowie die abgegebene Wärmeleistung der Heizungen in Zimmer Z1 und Z2 vorliegen, wurden diese analog zum Kapitel 2.4.2.3 simuliert: als wärmeabgebende Strukturen mit einer maximalen Leistung von 1 kW, die entsprechend der Differenz zwischen der aktuellen berechneten und der gemessenen Innenraumtemperatur gesteuert wird.





**Abb. 2.36** COCOSYS, Nodalisierung „Unterteilte Räume“, Z1 bis Z4 jeweils durch eine untere (Zx.1) und eine obere Zone (Zx.2) simuliert



**Abb. 2.37** COCOSYS, „Unterteilte Räume“, exemplarischer Strömungszustand innerhalb der Zimmer bei aktiver Heizung und Simulation des Luftwechsels mit einem Fan in Z1.2

Das Modell in Abb. 2.36 berücksichtigt das Fenster F1 im Büro Z1 und die Tür T3 im Zimmer Z3 als mögliche Verbindungen zur Umgebung. Andere Fenster zur Umgebung, die in Abb. 2.33 gezeigt sind, werden entsprechend der Auskunft des Eigentümers als

geschlossen verbleibend betrachtet. Zum Fenster F1 liegen Daten zu Öffnungs- und Schließungszeiten vor (siehe Abb. 2.6); zur Tür T3 sind die aufgezeichneten Öffnungs- bzw. Schließungszeiten, wie in Kapitel 2.3.2.1 erläutert, nicht verwertbar. Sie wird deshalb als permanent geschlossen betrachtet. Während der Begehung des Objektes zeigte sich, dass die Eingangstür T3 die potenziell größte Undichtigkeit aufweist. Diese Undichtigkeit wurde vereinfachend als Spalt unter der Tür mit einer abgeschätzten Querschnittsfläche von 3 mm x 900 mm definiert. Alle anderen internen Türen (T2, T6) bzw. der Durchgang (O) werden als permanent offenstehend betrachtet.

Die freien Volumina der Zimmer wurden nach der Begehung wie folgend abgeschätzt (vgl. Abb. 2.33):  $V_{Z1} = 18,2 \text{ m}^3$ ,  $V_{Z2} = 21,3 \text{ m}^3$ ,  $V_{Z3} = 25,7 \text{ m}^3$ ,  $V_{Z4} = 18,9 \text{ m}^3$ . Das freie Volumen berücksichtigt Möbel und Einbauten in den Räumen und ist kleiner als das geometrische Volumen der Zimmer, das sich aus den Böden-, Decken- und Wandstrukturen als Produkt aus Grundfläche und Höhe ergibt. Diese freien Volumina wurden nun entsprechend auf die untere bzw. obere Zone aufgeteilt. Dabei wurde angesetzt, dass die Differenz zwischen jeweiligem geometrischem Volumen des gesamten Raumes und des abgeschätzten freien Volumens zu 2/3 von dem geometrischen Volumen der unteren Zone abgezogen wird und zu 1/3 von der oberen. Auf diese Weise wurden die in Abb. 2.36 genannten Teilvolumen der vier Zimmer ermittelt.

### **Grundlüftung**

Auch bei geschlossenen Fenstern und Türen zwischen Gebäuden und Umgebung bilden sich innerhalb von Gebäuden Strömungen aufgrund von existierenden Undichtigkeiten und dem Antrieb durch Naturkonvektion (Kamineffekt) aus. Um diese Grundlüftung rechnerisch genau zu simulieren wäre es in letzter Konsequenz erforderlich, das gesamte Gebäude strömungstechnisch zu berücksichtigen und alle Details, vom Souterrain bis zum Dach, im Modell zu erfassen. Dies war im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht vorgesehen. Stattdessen wurde diese Grundlüftung vereinfacht simuliert: In jedem Zimmer Z1 bis Z4 wird mittels jeweils eines Ventilators (Fan 1 bis Fan 4, vgl. Abb. 2.36) ein Volumenstrom aus der Umgebung (mit einer niedrigen Radon-Aktivitätskonzentration von  $10 \text{ Bq/m}^3$ ) entsprechend dem Vorgabewert der Luftwechselzahl zugeführt. Die Luftwechselzahl  $L$  wird für alle Zimmer vereinfachend auf den in Kapitel 2.5.2 ermittelten Basiswert eingestellt und in den für Fan 1 bis Fan 4 erforderlichen Volumenstrom ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) umgerechnet ( $\text{Volumenstrom}_{\text{Fan } x} = L * V_{Zx} / 3.600$ ). Ein Druckausgleich mit der Umgebung (Luftabströmung) erfolgt über die Undichtigkeit an der Tür T3 (siehe Abb. 2.36 unten). Lufteintritt und -austritt wird aus unterschiedlichen Umgebungszonen (ENVIR\_I und

ENVIR\_O) berechnet, um abgeführte Aktivitätskonzentrationen nicht auf den Eintritt bzw. den Luftwechsel rückwirken zu lassen.

### **Quellstärke**

Als Quellort für das eintretende Radon wurde jeweils der Boden in jedem Zimmer angesehen. Die Radonquelle wurde in jedem Zimmer als volumenspezifische Quelle (Bq/(m<sup>3</sup>h)) in der jeweils unteren Zone der Zimmer (Zx.1) angesetzt. Der aus Kapitel 2.5.2 ermittelte Basiswert für die Quellstärke wurde dort jeweils für einen ganzen Raum ermittelt, auf den sich die Luftwechselrate bezieht, und gilt pro m<sup>3</sup>. Da in der Simulation die Quellstärke nur im unteren Teilvolumen der Zimmer angesetzt wird, muss der Basiswert der Quellstärke  $Q_x$  für jedes Zimmer x mit dem Verhältnis zwischen freiem Volumen des Zimmers  $V_x$  und dem der unteren Zone  $V_{Zx.1}$  hochskaliert werden, um dieselbe integrale Quelle  $Q \cdot V$  zu simulieren:

$$Q_{x.1} = Q_x \frac{V_x}{V_{Zx.1}} \quad (2.9)$$

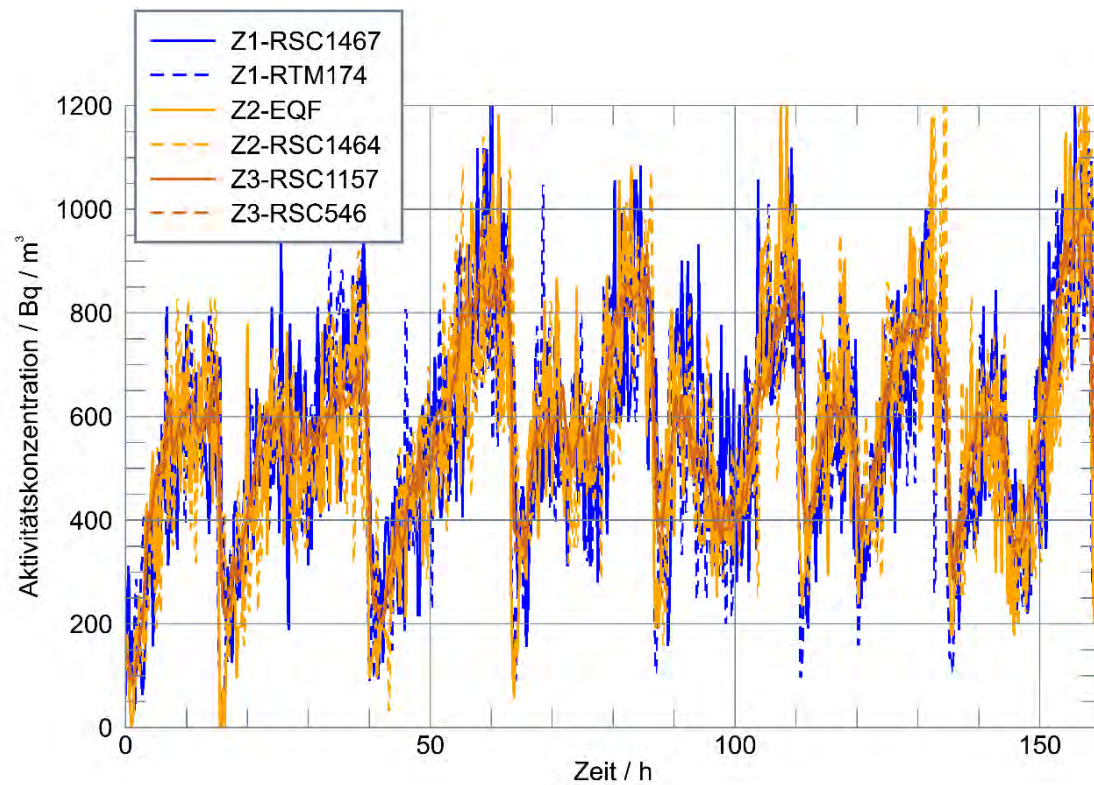
Dies ist jeweils im Kopf des COCOSYS-Eingabedatensatzes, im Abschnitt C---- PARAMETERS, definiert.

Der letztendlich verwendete Datensatz „Unterteilte Räume“ enthält insgesamt zehn Zonen (vier Zimmer mit jeweils zwei Zonen, sowie eine Umgebungszone ENVIR\_I für die Luftzufuhr als auch eine weitere Umgebungszone ENVIR\_O für die Luftabfuhr), 15 Strömungsverbindungen und vier Ventilationssysteme (FANs) sowie 30 Strukturen inklusive der beiden Heizkörper in Z1.1 und Z2.1 (siehe Abb. 2.36).

### **2.5.2 Analyse der Messdaten für Messphase 1 und Festlegung von Basiswerten für Modellparameter**

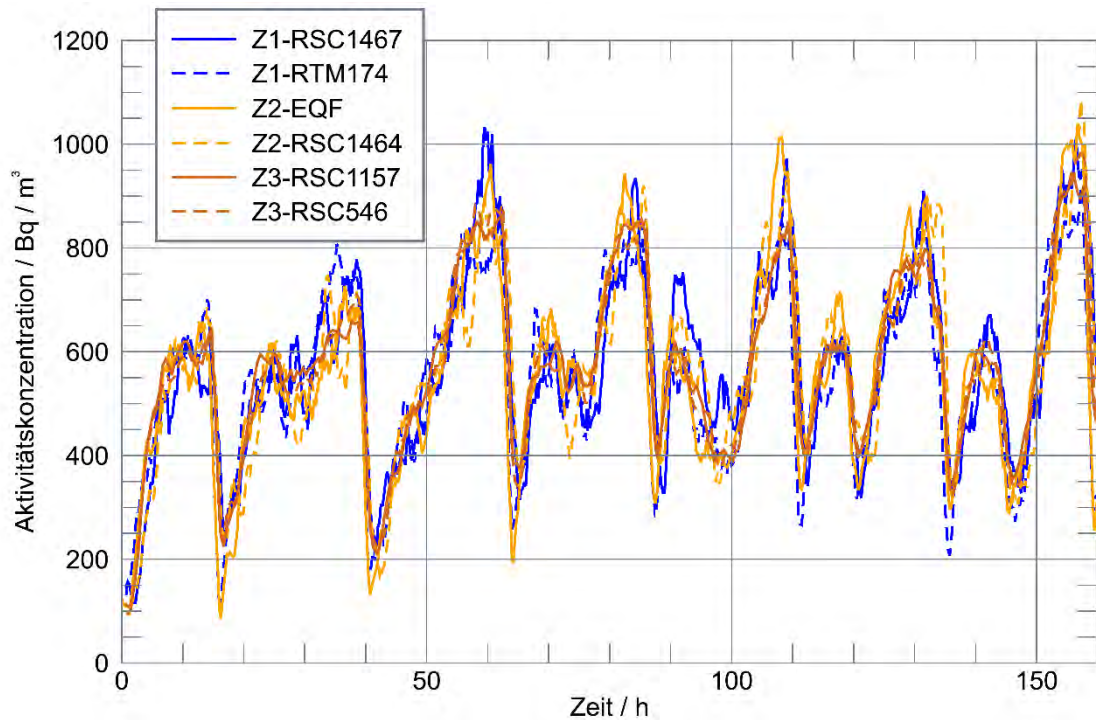
Die Daten aus Messphase 1 dienen der Ermittlung von Basisparametern für die Simulation des zeitlichen Aktivitätskonzentrationsverlaufes.

Die originalen Messdaten der Aktivitätskonzentrationen in den drei Räumen Z1, Z2, und Z3 (siehe Abb. 2.38) sind aufgrund der starken Schwankungen nur schwierig zur Identifikation von klaren Trends beim zeitlichen Verhalten der Aktivitätskonzentrationen zu verwenden.



**Abb. 2.38** Aktivitätsmessungen in den Räumen Z1, Z2 und Z3 ohne Filterung

Aus diesem Grund wurden geglättete Messdaten erzeugt, um Basiswerte für anzunehmende Modellparameter aus den Messungen abzuleiten. Hierfür wurden gleitende, zentrale Mittelwerte unter Einbezug der nächsten sechs (in den Räumen Z1 und Z2) bzw. drei (im Zimmer Z3) Nachbarpunkte im Zeitbereich bereitgestellt. Da die Messdaten im Abstand von 900 s (Z1 und Z2) bzw. 1.800 s (Zimmer 3) vorliegen, entspricht das für das Glätten verwendete Zeitfenster einem Zeitraum von 1,5 h, über den jeweils gemittelt wird. Die so geglätteten Daten für die ersten 160 h der Messungen sind in Abb. 2.39 dargestellt.



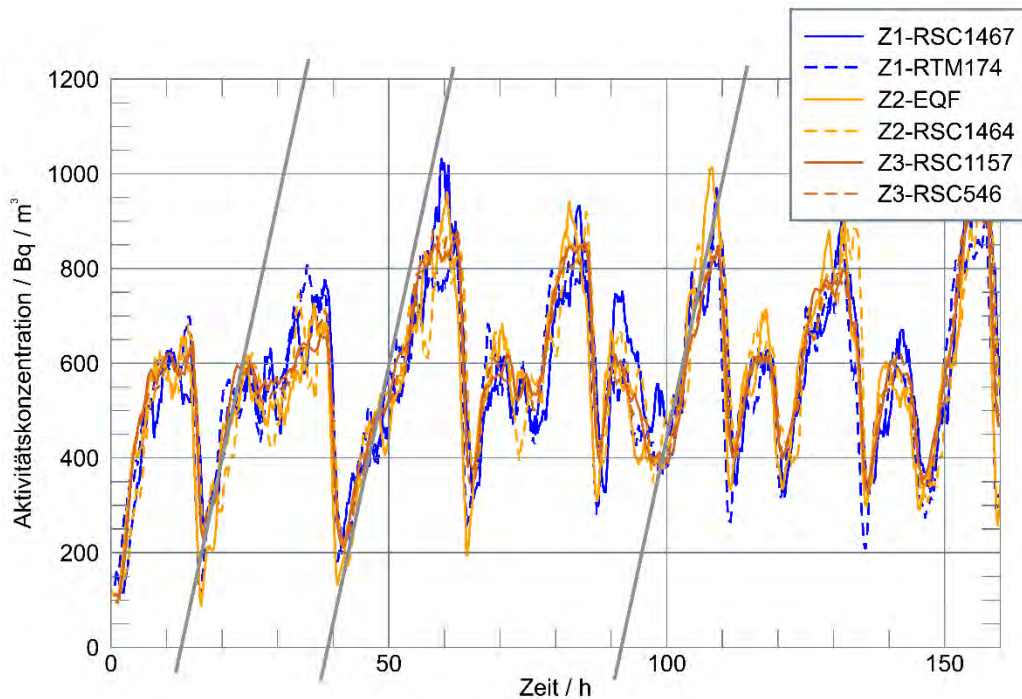
**Abb. 2.39** Komposit-Plot der geglätteten Aktivitätsmessdaten in den Räumen Z1, Z2 und Z3 mit einem Glättungsfenster von 1,5 h

Es fällt auf, dass die Konzentrationen in allen Räumen Z1, Z2 und Z3 synchron verlaufen. Unterschiedliches zeitliches Verhalten in den Räumen kann aus den Messdaten nicht abgeleitet werden. Auch die jeweils zwei Messgeräte in einem Raum sind synchron und zeigen keine systematischen Unterschiede.

In den Messdaten existieren mehrere Zeitbereiche, in denen die Konzentrationen nahezu linear zunehmen. Diese werden unterbrochen von Zeiten, in denen (nach Öffnung des Fensters in Z1) die Konzentrationen abfallen. Längere Plateauphasen, die Rückschlüsse auf Gleichgewichtskonzentrationen liefern, können nicht identifiziert werden. Unklar in Abb. 2.39 sind jedoch die Zeitbereiche zwischen 25 h und 35 h, zwischen 70 h und 80 h, sowie zwischen 90 h und 100 h. In diesen Zeitbereichen kann eine eindeutige Unterscheidung des Verhaltens zwischen Anstieg, Abfall oder Plateau nicht vorgenommen werden. Spezielle Analysen zu diesen Zeitbereichen sind in Kapitel 2.5.3.3 beschrieben.

Wenn die Zeitbereiche der Konzentrationsanstiege, wie in Abb. 2.40, gezeigt linear approximiert werden, lässt sich als Steigung (am Beispiel des Anstiegs bei  $t = 50$  h) ein

ungefährer Wert von  $\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\frac{1200 \text{ Bq}}{\text{m}^3}}{(62-38)\text{h}} = 50 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3\text{h}}$  ablesen. Ähnliche Steigungen liegen auch in anderen Zeitbereichen vor, z. B. bei  $t = 20 \text{ h}$ ,  $100 \text{ h}$ , u. a.



**Abb. 2.40** Graphische Bestimmung von Steigungen unter Annahme eines abschnittsweisen linearen Verlaufes

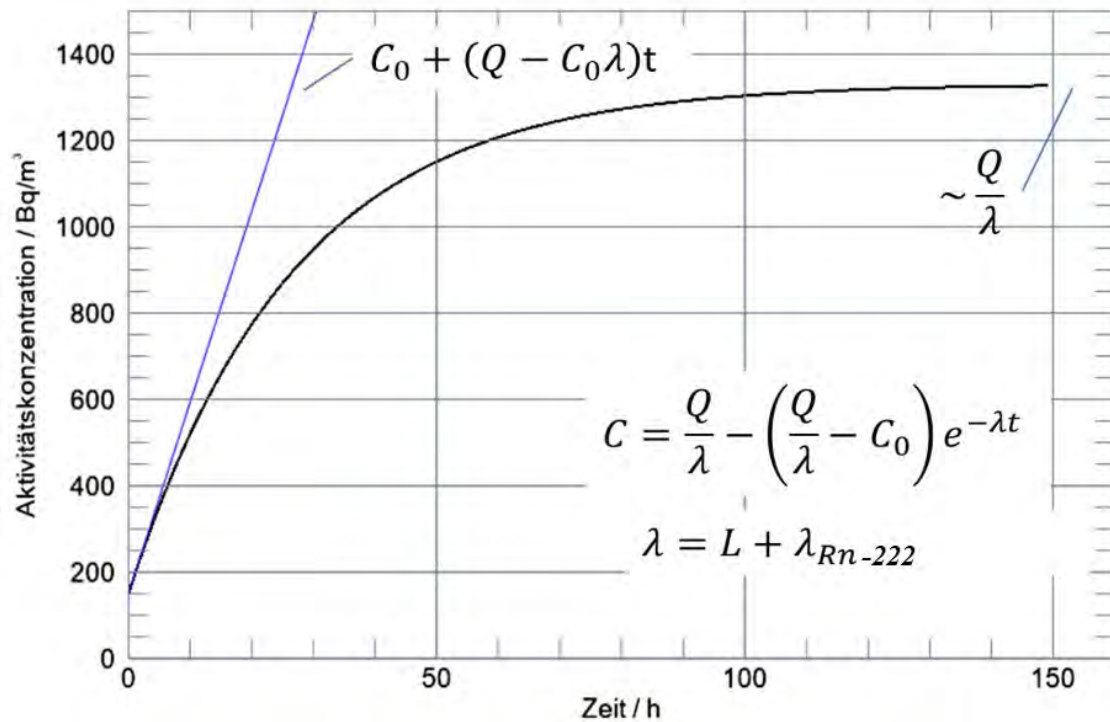
Die theoretische Lösung der Differentialgleichung für die Aktivitätskonzentration in einem Raum unter Berücksichtigung der Effekte von Quellrate  $Q$ , Luftwechsel  $L$  und Zerfallskonstante  $\lambda_{Rn-222}$  unter konstanten Bedingungen lautet

$$C = \frac{Q}{\lambda} - \left( \frac{Q}{\lambda} - C_0 \right) e^{-\lambda t} \quad (2.10)$$

und folgt einem zeitlichen Verlauf wie in Abb. 2.41 gezeigt. Darin ist

$$\lambda = L + \lambda_{Rn-222} \quad (2.11)$$





**Abb. 2.41** Theoretisches Verhalten der Aktivitätskonzentration für konstante Parameter  $Q= 50 \text{ Bq}/(\text{m}^3\text{h})$ ,  $L = 0,03 \text{ h}^{-1}$ ,  $\lambda_{\text{Rn-222}} = 0,0076 \text{ h}^{-1}$

Die Steigungen der linearen Abschnitte in Abb. 2.40 können mit der Steigung des exponentiellen Kurvenverlaufes in Abb. 2.41 für kleine Zeiten verglichen werden. Dieser kann aus der Taylorentwicklung der Exponentialfunktion bis zum ersten Grad bestimmt werden:

$$C(t) = C_0 + (Q - C_0\lambda)t \quad (2.12)$$

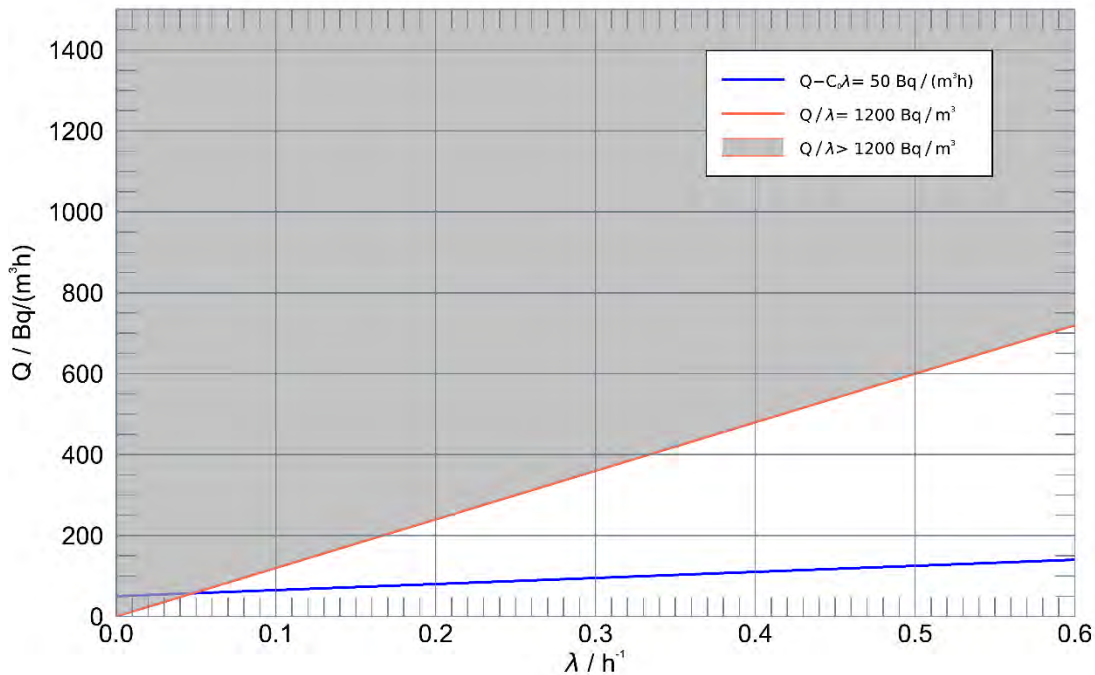
Aus Abb. 2.40 kann entnommen werden, dass diese Steigung etwa  $50 \text{ Bq}/(\text{m}^3\text{h})$  beträgt:

$$Q - C_0\lambda = 50 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3\text{h}} \quad (2.13)$$

Andererseits ist in Abb. 2.39 zu sehen, dass in Zeitabschnitten mit ansteigenden Konzentrationen keine Plateauphasen (mit einer Gleichgewichtskonzentration  $C_G = Q/\lambda$ , vgl. asymptotischer Wert der schwarzen Kurve in Abb. 2.41) erreicht werden, diese also ggf. noch höher als die gemessenen Maximalwerte von etwa  $1\,200 \text{ Bq}/\text{m}^3$  liegen müssten:

$$C_G = \frac{Q}{\lambda} > 1\,200 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \quad (2.14)$$

Beide Bedingungen sind nur für kleine Werte von  $\lambda < 0,05 \text{ h}^{-1}$  erreichbar, wie in Abb. 2.42 ersichtlich. Mögliche Werte müssen auf der blauen Linie und im grau eingefärbten Bereich liegen.



**Abb. 2.42** Bedingungen für Quellrate  $Q$  und Zeitkonstante  $\lambda$  basierend auf der Auswertung des Zeitverhaltens der Messwerte

Daraus folgt wegen Gleichung (2.11) ein ungefähr maximal wirksamer Basisluftwechsel bei geschlossenem Fenster (durch Undichtigkeiten bzw. Leckagen) von:

$$L = \lambda - \lambda_{Rn-222} \leq 0,042 \text{ h}^{-1} \quad (2.15)$$

Die zeitgleich anzunehmende Quellrate liegt bei:

$$Q \approx 50 \text{ Bq}/(\text{m}^3\text{h}) \quad (2.16)$$



Da die so ermittelten Parameterwerte für die Quellstärke und die effektive Luftwechselrate gut mit Werten übereinstimmen, die mit einem numerischen, abschnittswisen Anpassung der Exponentialfunktion an Messdaten für den Zeitbereich zwischen 41 h und 63 h, gewonnen wurden (siehe Abb. 2.7), werden im Folgenden als Basiswerte für die Quellstärke  $Q$  und Luftwechselrate  $L$  (für den Luftaustausch über Undichtigkeiten und Leckagen in der Hülle des Gebäudes bei geschlossenen Fenstern im Souterrain) festgelegt:

$$Q = 50 \text{ Bq}/(\text{m}^3\text{h}) \quad (2.17)$$

$$L = 0,03 \text{ h}^{-1} \quad (2.18)$$

**Bemerkung:** Die Luftwechselzahl von  $0,03 \text{ h}^{-1}$  ist im Vergleich zu üblicherweise in der Literatur angegebenen Werten für geschlossene Räume von  $0,2$  bis  $0,8 \text{ h}^{-1}$  eine Größenordnung niedriger. Allerdings beruhen diese Werte in der Regel auf Messungen mit Unterdruck (Blower-Door - Verfahren mit  $50 \text{ Pa}$  Unterdruck). Der Wert von  $0,03 \text{ h}^{-1}$  ist dagegen in guter Übereinstimmung mit einem Wert von  $0,045 \text{ h}^{-1}$ , wie er von *Maas* in einem Versuchsstand mit geschlossenen Türen und Fenstern bei Normaldruck bestimmt wurde /MAA 95/.

### 2.5.3 COCOSYS-Rechnungen zur Messphase 1

In diesem Kapitel (inkl. Unterkapiteln) werden die Forschungsarbeiten und Ergebnisse der offenen Nachrechnungen mit COCOSYS zur Phase 1 der Messkampagne, Objekt Oberheldrungen (siehe Tab. 2.4) beschrieben. Die Phase 1 repräsentiert dabei typische Umgebungsbedingungen im „Winter“.

Als Startpunkt der Phase 1 wurde entsprechend der aufgenommenen Messdaten der 31. März 2022, 15:46 h definiert (Zeitpunkt 0 s in den COCOSYS-Rechnungen). Die Phase endet am 7. April 2022 6:01 h. Sie umfasst damit  $158,25 \text{ h}$  ( $569.700 \text{ s}$ ).

#### 2.5.3.1 Überprüfung des theoretischen Ansatzes für stationäre Bedingungen

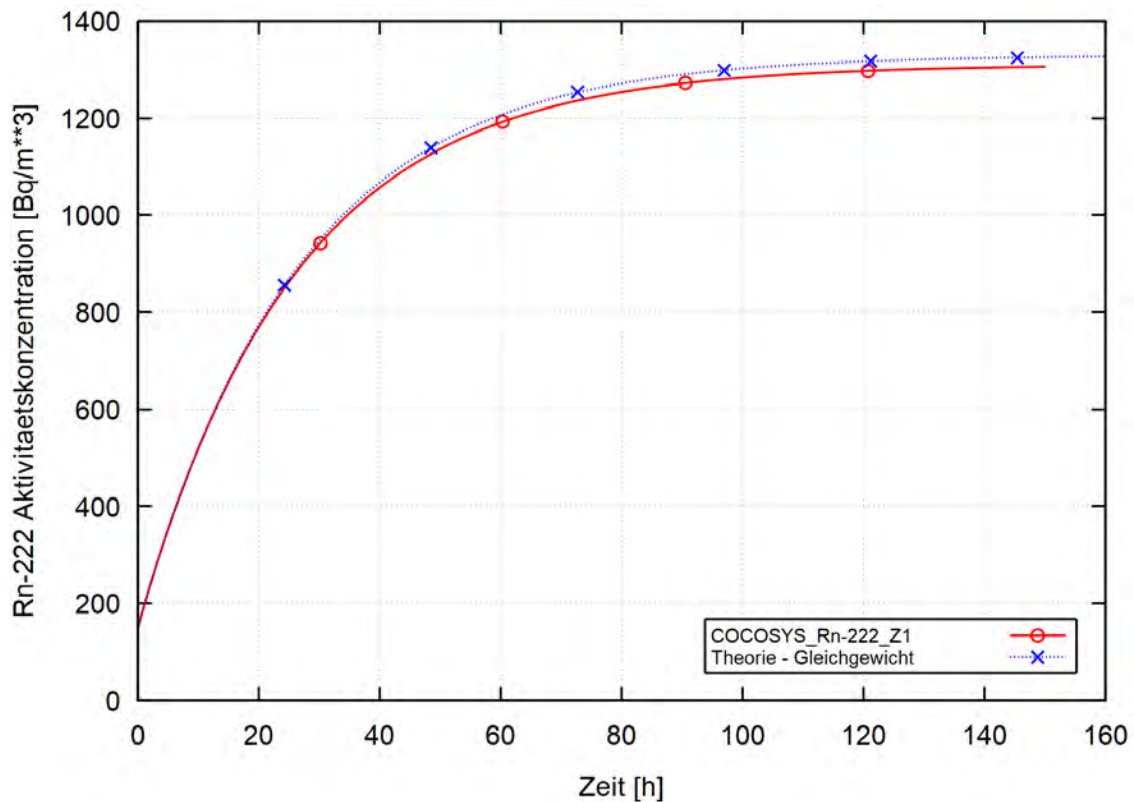
Wenn in einem Raum mit einer anfänglichen Aktivitätskonzentration von  $C_0$  eine konstante Quellstärke  $Q$  vorliegt und ein konstanter Luftwechsel  $L$  wirksam ist, ergibt sich

die theoretisch erwartete, zeitliche Annäherung an eine stationäre Konzentration der Radonaktivität entsprechend der Formel (2.10). Diese Funktion ist für die ermittelten Basisparameter  $Q$  und  $L$  mit den Werten (2.17) und (2.18) in Abb. 2.41 abgebildet. In einem ersten Schritt wurde überprüft, dass diese Funktion mit den COCOSYS-Nodalierungen für die betreffenden Räume nach Kapitel 2.5.1 entsprechend reproduziert werden.

#### **2.5.3.1.1 Überprüfung mit dem Nodalierungsschema „Ganze Raumzonen“**

Mit der Nodalierung aus Abb. 2.34 wurde eine COCOSYS-Rechnung durchgeführt, bei der der Volumenzustrom in Z1 aus der Umgebung mit konstanter Umgebungstemperatur mit dem Ventilator Fan 1 so eingestellt wurde, dass das Volumen von Z1 in jeder Stunde entsprechend dem Vorgabewert von  $L = 0,03 \text{ h}^{-1}$  ausgetauscht wird. Die Anfangstemperatur der Räume beträgt  $18 \text{ °C}$ . Es wurde keine Heizung in den Räumen simuliert. Die Abströmung erfolgt über Z2 und Z3 und von dort über die Undichtigkeit der Tür T3 in die Umgebung. Die Quellstärke in Z1 wurde auf den Vorgabewert von  $Q_{Z1} = 50 \text{ Bq}/(\text{m}^3\text{h})$  gesetzt.

Das Ergebnis der Rechnung weist eine gute Übereinstimmung mit dem theoretischen Verlauf der Gleichung (2.10) auf (siehe Abb. 2.43). Der Grund für die geringe Abweichung ist die unterschiedliche Temperatur zwischen den Räumen ( $18 \text{ °C}$  bei  $t = 0 \text{ s}$ ) und der Umgebung ( $7,5 \text{ °C}$ ); die einströmende Luft erwärmt sich also beim Durchströmen der Räume.



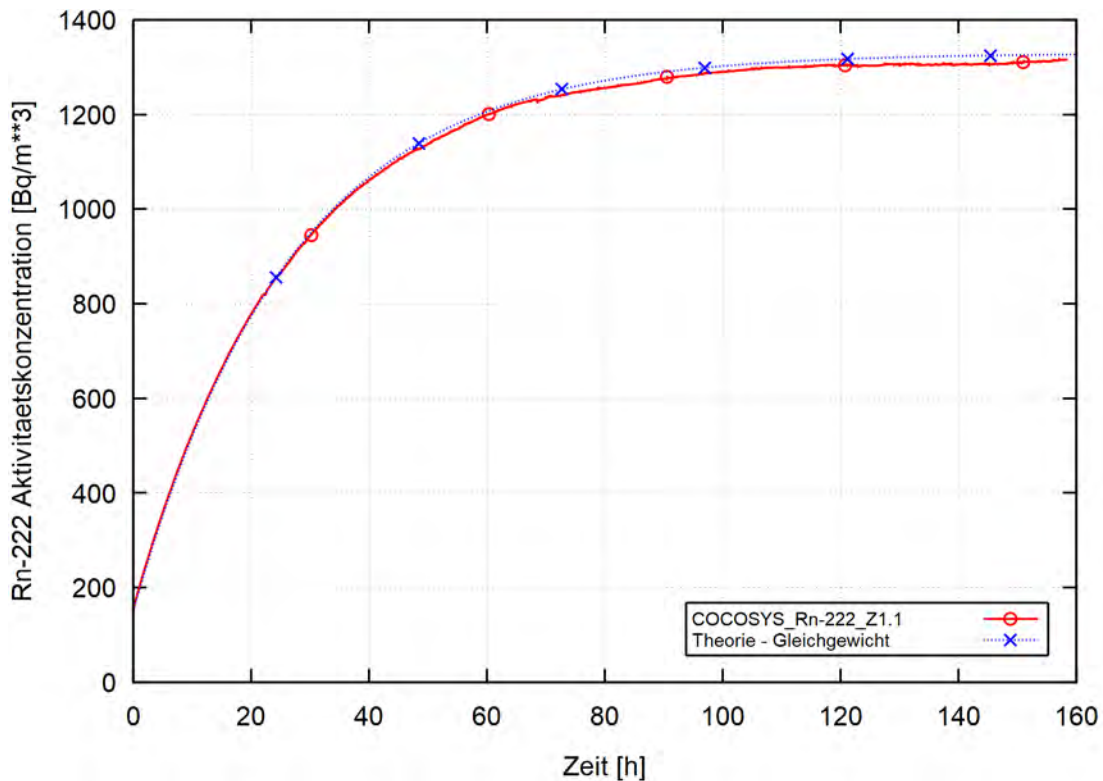
**Abb. 2.43** Überprüfung des theoretischen Verlaufes der Aktivitätskonzentration in Zimmer Z1 mit einer COCOSYS-Rechnung unter Verwendung der „Ganze Räume“ - Nodalisierung

### 2.5.3.1.2 Überprüfung mit dem Nodalisierungsschema „Unterteilte Räume“

Um den effektiven Luftaustausch zwischen Räumen realistisch zu simulieren, ist wie in Kapitel 2.5.1.2 diskutiert, eine Erweiterung des Datensatzes mit einer Unterteilung der Räume in mindestens jeweils zwei Zonen nötig: Datensatz „Unterteilte Räume“. Mit der Nodalisierung aus Abb. 2.36 wurde eine COCOSYS-Rechnung durchgeführt, bei der der Volumenzustrom in Z1 bis Z4 mit den Ventilatoren Fan 1 bis Fan 4 so eingestellt wurde, dass ein Volumenstrom aus der Umgebung in jedem Raum in jeder Stunde entsprechend dem Vorgabewert von  $L = 0,03 \text{ h}^{-1}$  je Raum zugeführt wird. Der Abstrom erfolgt über die Undichtigkeit unter der Tür in Z3 an die Umgebung. Die Quellstärke in Z1.1 bis Z4.1 wurde auf den Vorgabewert von  $Q_{Z1.1} = Q_{Z2.1} = Q_{Z3.1} = Q_{Z4.1} = 50 \text{ Bq}/(\text{m}^3\text{h})$  gesetzt.

Das Ergebnis der Rechnung weist eine ebenfalls gute Übereinstimmung mit dem theoretischen Verlauf der Gleichung (2.10) auf (siehe Abb. 2.44). Verbleibende Unterschiede

sind wie in Kapitel 2.5.3.1.1 auf unterschiedliche Temperaturniveaus zwischen Souterrain und Umgebung zurückzuführen. Um dieses Ergebnis zu erreichen, mussten gleiche Quellstärken in jedem Zimmer vorgegeben werden und die Grundlüftung mittels je eines Ventilators (Fan 1 bis Fan 4) in jedem Raum aufgeprägt werden. Diese Art der Simulation wurde letztendlich in den Nachrechnungen zu Phase 1 (Kapitel 2.5.3.4) sowie in den Vorausrechnungen zu Phase 2 (Kapitel 2.5.4) angewendet.



**Abb. 2.44** Überprüfung des theoretischen Verlaufes der Aktivitätskonzentration in Zone Z1.1 mit einer COCOSYS-Rechnung unter Verwendung der „Unterteilte Räume“-Nodalisierung

### 2.5.3.2 Testrechnungen zur Anpassung des COCOSYS-Eingabedatensatzes

Da die gemessenen Aktivitätskonzentrationen in den Zimmern Z1, Z2 und Z3 im Zeitbereich sehr synchron laufen, kann aus den Messungen kein Hinweis auf eine heterogene Verteilung der Quellstärken in den genannten Räumen abgeleitet werden.

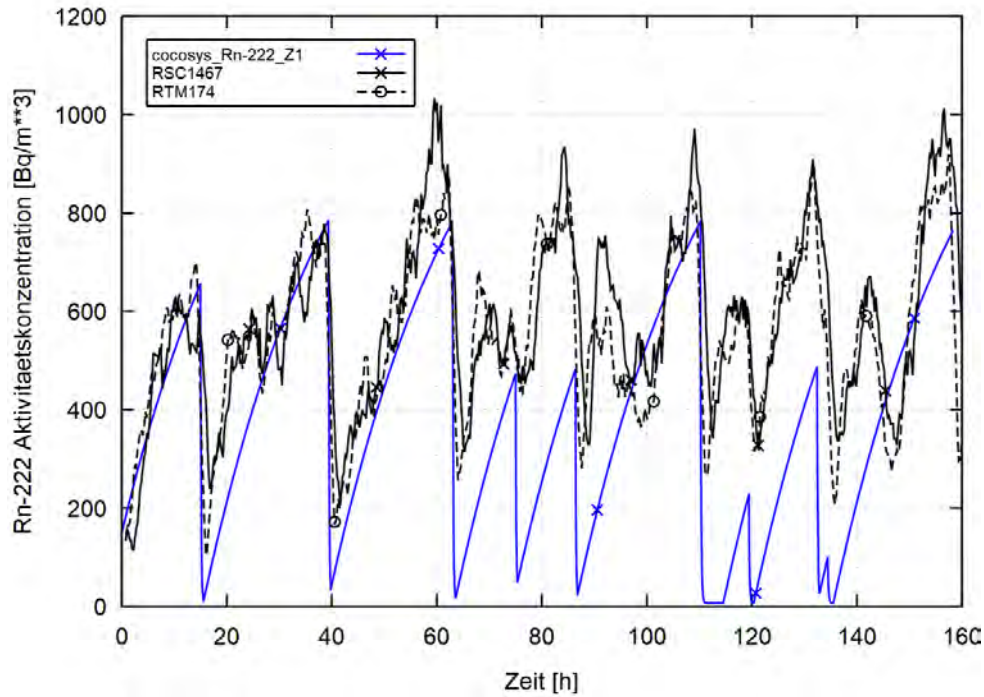
Aus diesem Grund wurden zunächst orientierende Rechnungen mit COCOSYS durchgeführt, um zu untersuchen, ob trotz einer unterstellten heterogenen Vorgabe einer Radonquelle im Messobjekt, z. B. einer Radonquelle nur in Zimmer Z1, d. h. im Büro, der synchrone, gemessene Verlauf der Aktivitätskonzentration in allen Zimmern, errechnet

werden könnte. Die orientierenden Rechnungen wurden sowohl mit dem Nodalisierungsschema „Ganze Raumzonen“ aus Kapitel 2.5.1.1, mit gerichteter Durchströmung der Zimmer Z1, Z2 und Z3, als auch mit dem Schema „Unterteilte Räume“ aus Kapitel 2.5.1.2, mit Ausgleichsströmungen zwischen den Zimmern durchgeführt. Dabei wurden die Basiswerte für die Quellstärke  $Q$  und die Luftwechselzahl  $L$  aus Gl. (2.17) und (2.18) verwendet.

Ferner wurden der Einfluss der Lüftung durch Öffnen des Fensters F1 in Zimmer Z1 in der Simulation berücksichtigt, in dem zu den ermittelten Öffnungs- und Schließungszeiten des Fensters (basierend auf der Auswertung des Kontaktschalters, siehe Abb. 2.6) das Fenster in Zimmer Z1 jeweils in vollem Maße (d. h. in einem 90°-Winkel) geöffnet bzw. wieder geschlossen wurde. Es wurde angenommen, dass der Öffnungs- und Schließvorgang jeweils ca. eine halbe Sekunde benötigt. Der Lüftungseffekt auf die Rn-Aktivitätskonzentrationen im Messobjekt wurde durch das Fenstermodell in COCOSYS simuliert (vgl. Kapitel 2.4.2).

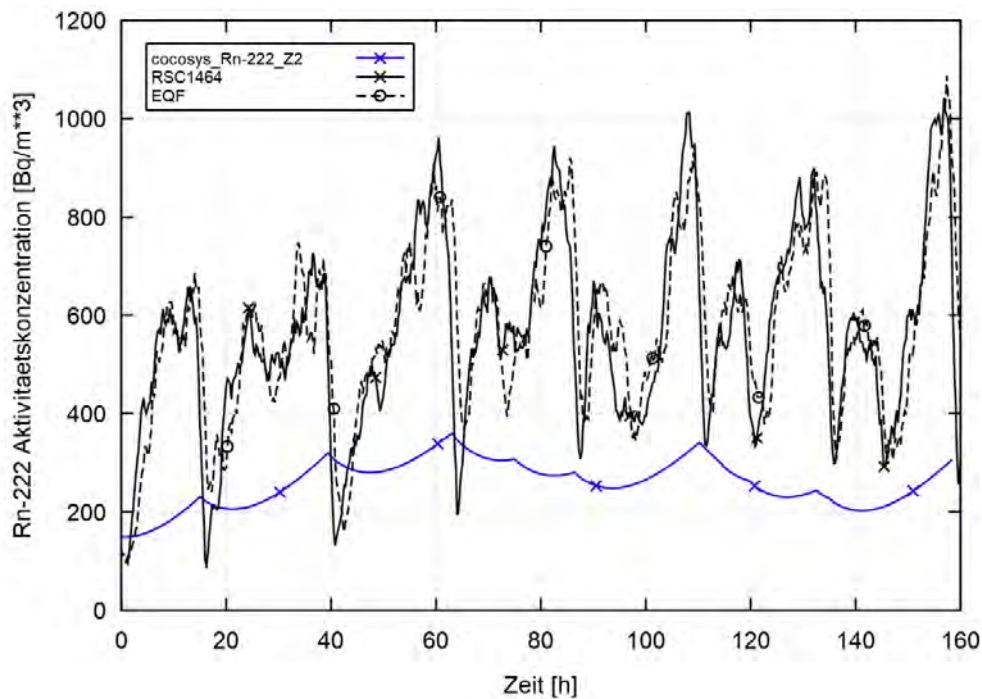
#### **2.5.3.2.1 Radonquelle nur in Zimmer Z1 und ganze Raumzonen**

In dieser Rechnung wurde ein Volumenstrom mit einem Fan in Z1 mit der auf das Volumen von Z1 bezogenen Basis-Luftwechselrate entsprechend Gl. (2.18) eingespeist. In der Simulation unter Verwendung ganzer Raumzonen aus Kapitel 2.5.1.1 werden unter diesen Bedingungen gegenüber Z1 in den nacheinander durchströmten Zimmern Z2 und Z3 sukzessiv gedämpfte Verläufe der Aktivitätskonzentrationen berechnet (vgl. blaue Linien in Abb. 2.45, Abb. 2.46 und Abb. 2.47). Die signifikante Unterschätzung der Konzentrationen in Z2 und Z3 zeigt, dass von einer Radon-Freisetzung über den Boden in allen Räumen auszugehen ist.



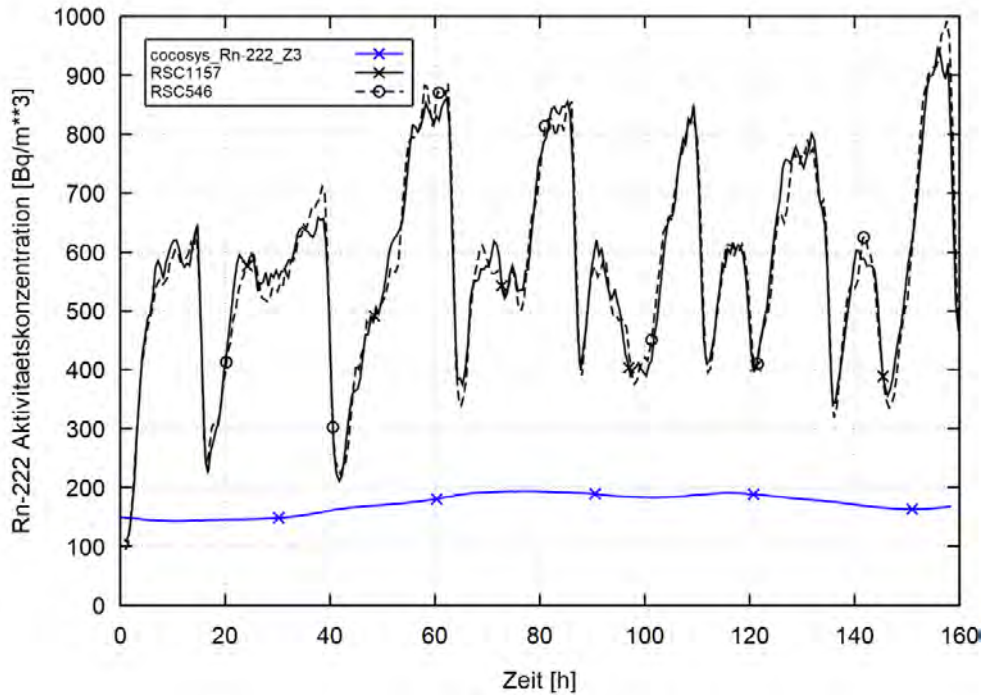
**Abb. 2.45** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z1; ganze Raumzonen, Quelle nur in Z1

(Schwarz – Messung, Blau – COCOSYS Simulation)



**Abb. 2.46** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z2; ganze Raumzonen, Quelle nur in Z1

(Schwarz – Messung, Blau – COCOSYS Simulation)



**Abb. 2.47** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z3; ganze Raumzonen, Quelle nur in Z1

(Schwarz – Messung, Blau – COCOSYS Simulation)

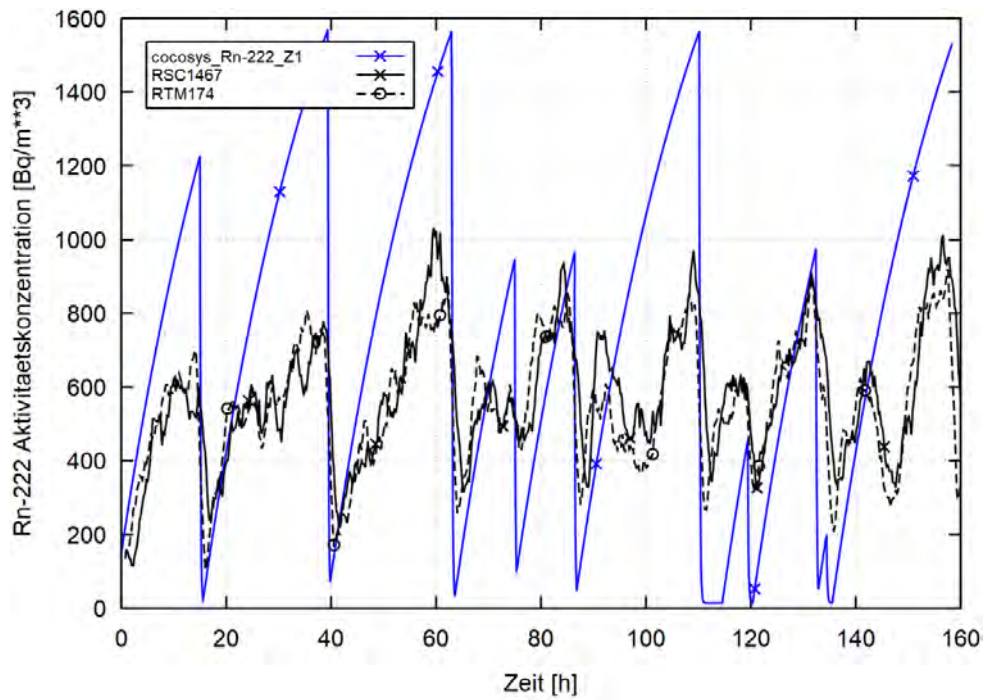
### 2.5.3.2.2 Radonquelle in Zimmern Z1 bis Z4 und ganze Raumzonen

Wird nun, im Unterschied zu Kapitel 2.5.3.2.1, die Quellstärke in allen Räumen identisch gesetzt,

$$Q_{Z1} = Q_{Z2} = Q_{Z3} = Q_{Z4} = 50 \text{ Bq}/(\text{m}^3\text{h}) \quad (2.19)$$

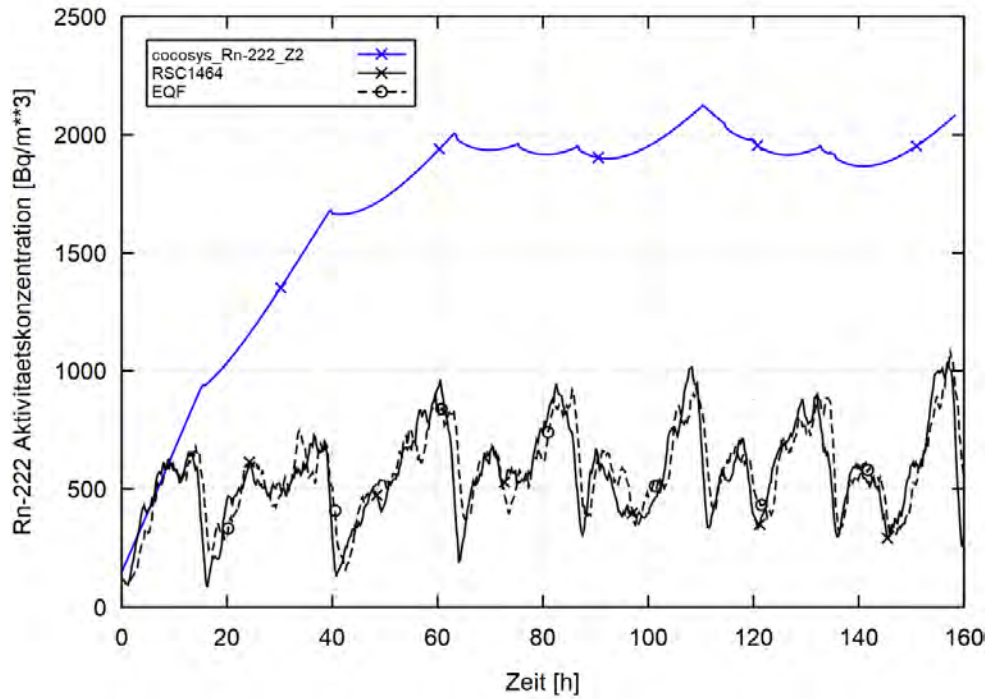
weil Hinweise auf eine Eingrenzung der Radonquelle auf nur ein Zimmer fehlen, so würde mit dem Nodalisierungsschema „Ganze Raumzonen“ und unterstelltem Lufteintritt in Z1 und Luftaustritt in Z3 eine zu hohe Konzentration von Radon in den Zimmern Z1 bis Z4 berechnet werden. Der zugeführte Volumenstrom in Z1, der basierend auf dem Vorgabewert der Luftwechselrate  $L$  und dem Zimmervolumen von Z1 definiert wurde, reicht nicht aus, um die Konzentrationen im ganzen Souterrain im Mittel auf dem Niveau der Messung zu halten. In den Zimmern ergeben sich im Mittel zu große Konzentrationen, weil Z4 nicht effizient am Luftwechsel beteiligt ist und mit seiner Quelle ein Reser-

voir von Radonaktivität darstellt. Dabei sind wiederum die Effekte der F1-Fensteröffnungen auf die Konzentrationen in den Zimmern Z2, Z3 und Z4 stark gedämpft (vgl. Abb. 2.48 bis Abb. 2.51 (Bemerkung: In Zimmer 4 waren keine Messgeräte installiert.)).



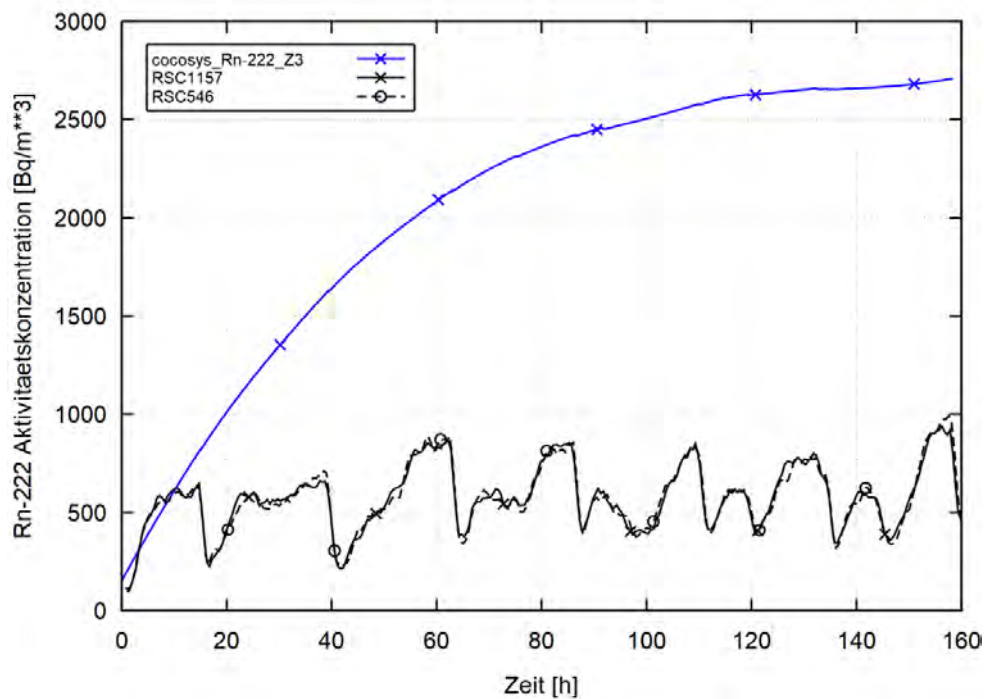
**Abb. 2.48** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z1; ganze Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4  
(Schwarz – Messung, Blau – COCOSYS Simulation)





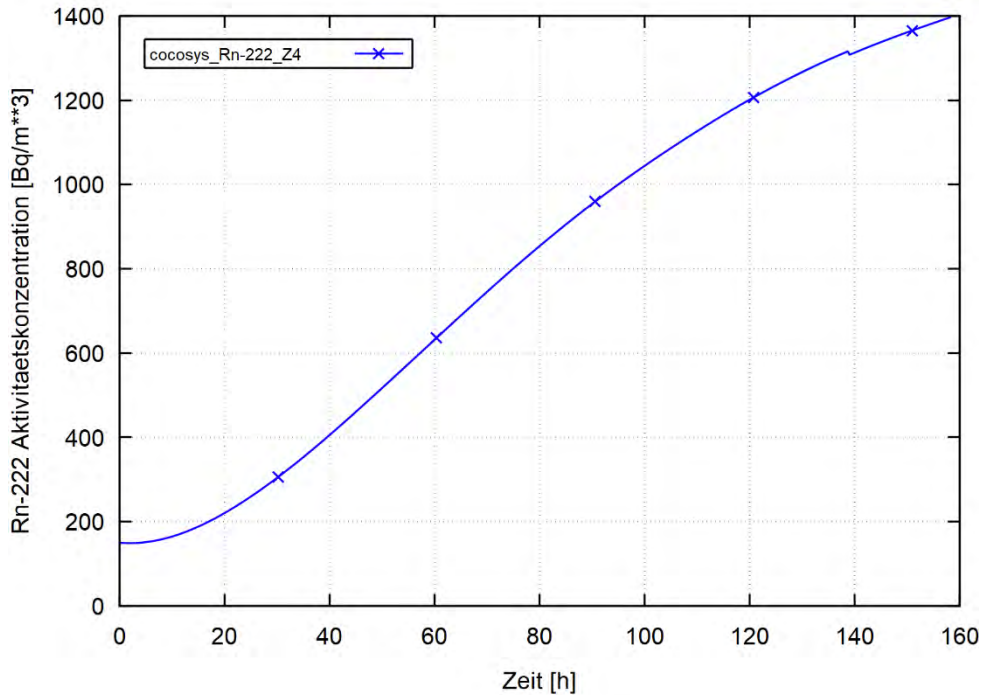
**Abb. 2.49** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z2; ganze Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4

(Schwarz – Messung, Blau – COCOSYS Simulation)



**Abb. 2.50** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z3; ganze Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4

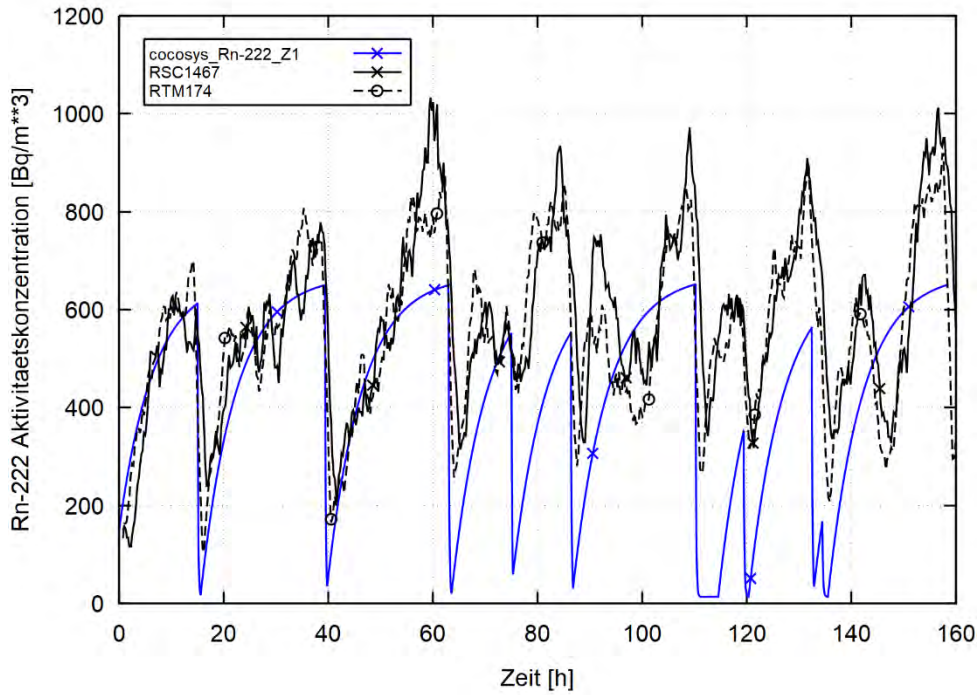
(Schwarz – Messung, Blau – COCOSYS Simulation)



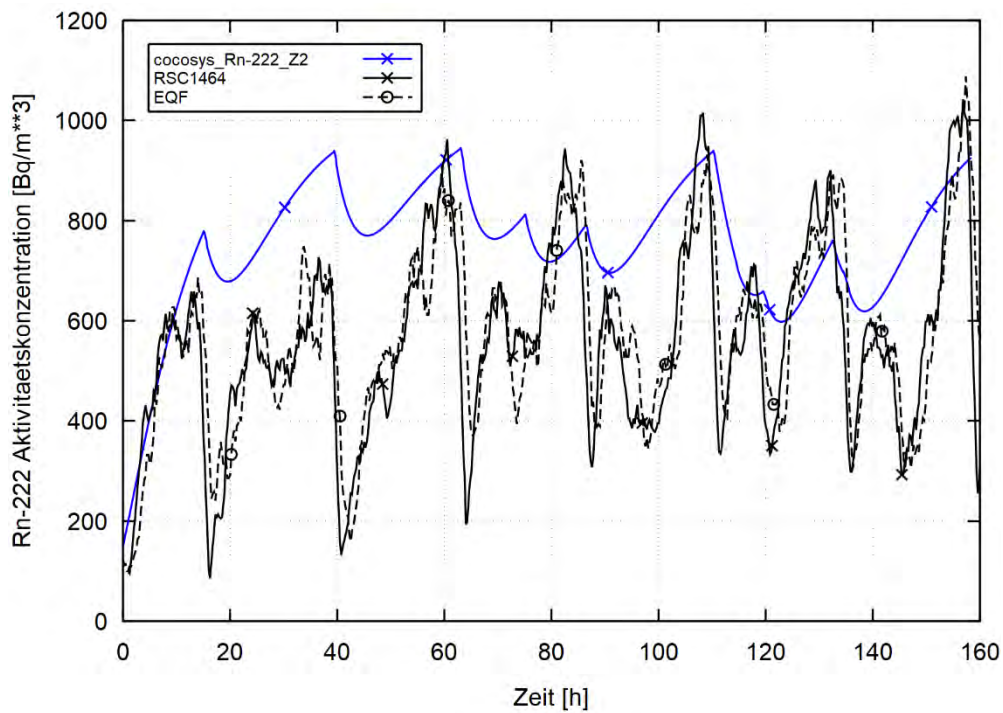
**Abb. 2.51** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z4; ganze Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4

### 2.5.3.2.3 Radonquelle in Z1 bis Z4, ganze Raumzonen, Grundlüftung bzw. Volumenstrom in Z1 bezogen auf das gesamte Souterrainvolumen

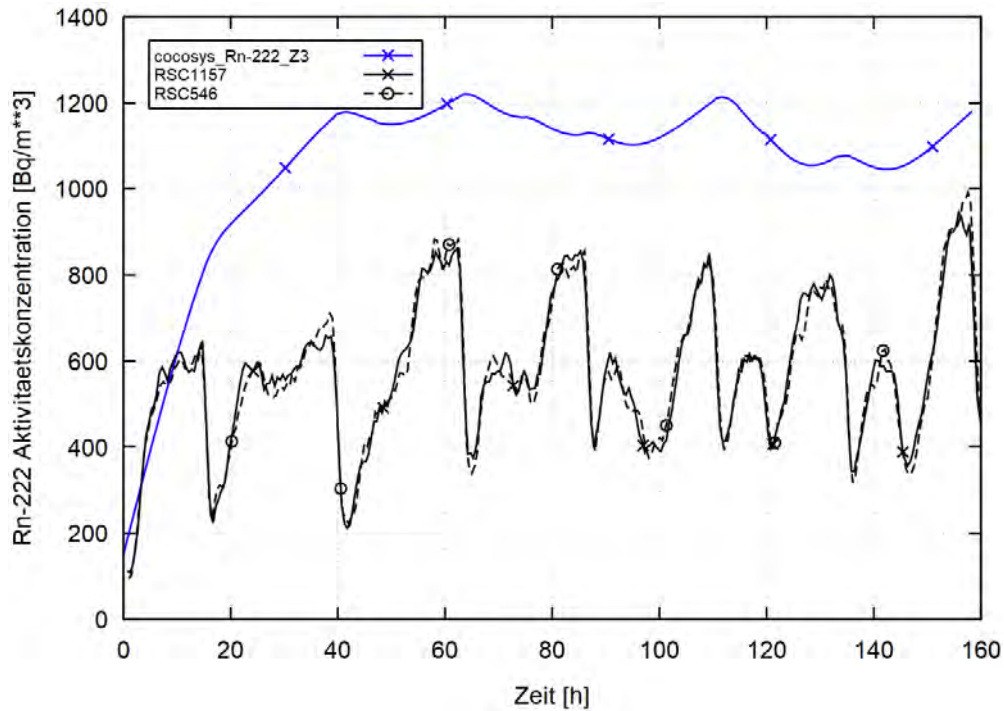
In dieser Variante wurde im Unterschied zu den vorhergehenden Kapiteln 2.5.3.2.1 und 2.5.3.2.2 der Luftvolumenstrom in Z1 erhöht, so dass dieser äquivalent der zugrunde gelegten Luftwechselzahl  $L$  bezogen auf das gesamte Souterrainvolumen ist. Dies führt zur Überschätzung des Einflusses vom Luftwechsel auf die Radon-Konzentration in Z1 (siehe Abb. 2.52). Dabei sind wiederum die Effekte der Fensteröffnungen auf die Konzentrationen in den Zimmern Z2, Z3 und Z4 stark gedämpft (vgl. Abb. 2.53 bis Abb. 2.55).



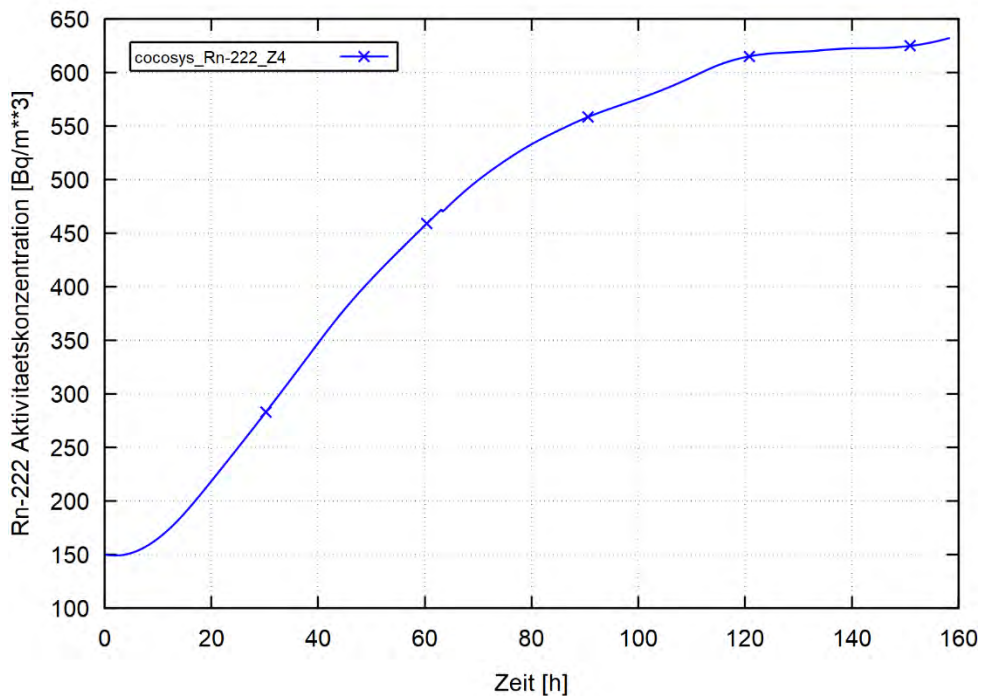
**Abb. 2.52** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z1; ganze Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1 bezogen auf gesamtes Souterrainvolumen (Schwarz – Messung, Blau – COCOSYS Simulation)



**Abb. 2.53** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z2; ganze Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1 bezogen auf gesamtes Souterrainvolumen (Schwarz – Messung, Blau – COCOSYS Simulation)



**Abb. 2.54** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z3; ganze Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1 bezogen auf gesamtes Souterrainvolumen (Schwarz – Messung, Blau – COCOSYS Simulation)



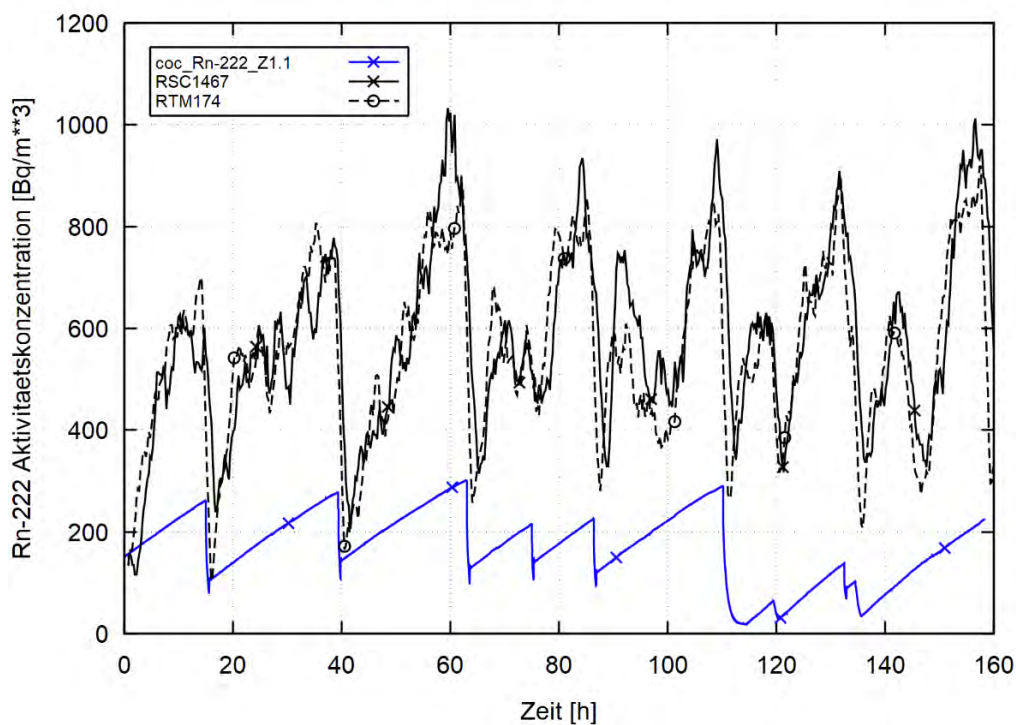
**Abb. 2.55** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z4; ganze Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1 bezogen auf gesamtes Souterrainvolumen

## Schlussfolgerung zu den Rechnungen mit dem Nodalisierungsschema „Ganze Raumzonen“

Basierend auf den Rechnungsvarianten in den Kapiteln 2.5.3.2.1 bis 2.5.3.2.3 kann zusammenfassend gefolgert werden, dass der gemessene synchrone Verlauf der Aktivitätskonzentrationen von Radon in den Zimmern des Souterrains mit dem Nodalisierungsschema „Ganze Raumzonen“ nicht in guter Übereinstimmung wiedergegeben werden kann und es hierfür Analysen mit dem Nodalisierungsschema „Unterteilte Räume“ bedarf.

### 2.5.3.2.4 Radonquelle in Z1, unterteilte Raumzonen, Luftwechsel/Volumenstrom nur in Z1

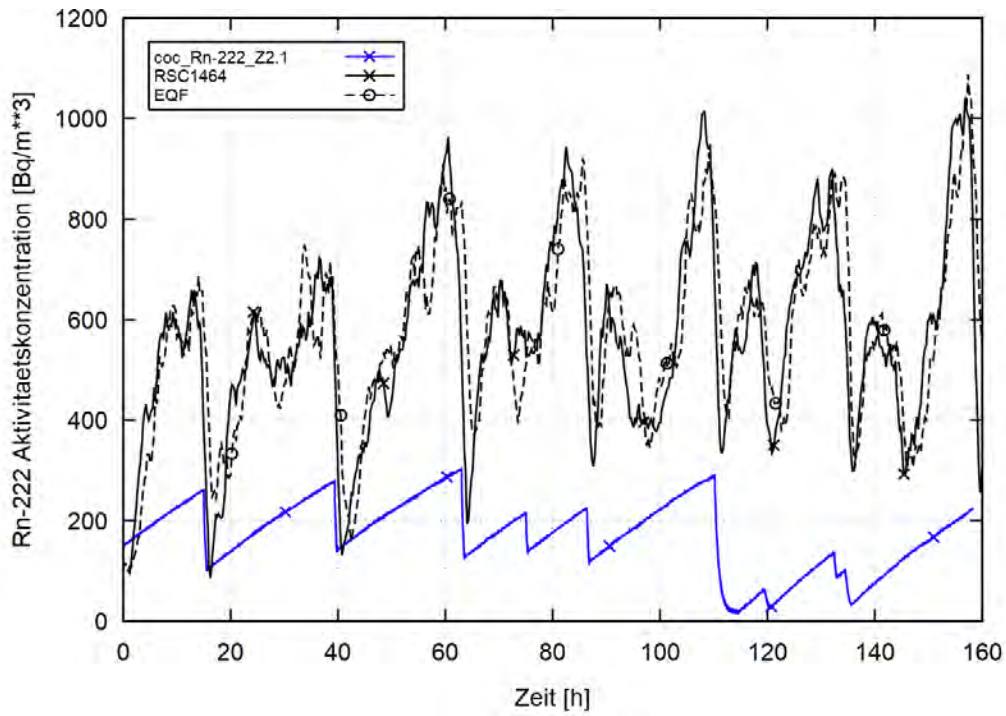
Hier wurde die Quellrate  $Q$  aus Gleichung (2.17) in der unteren Zone Z1.1 nur in Zimmer Z1 vorgegeben. Wie in Kapitel 2.5.3.2.1 wurde dabei der Volumenstrom mit einem Fan in Z1.2 mit der auf das Volumen von Z1 bezogenen Luftwechselrate nach Gl. (2.18) eingespeist. Aufgrund des sehr effektiven Luftaustausches mit den Nachbarräumen werden in den Zimmern Z1 bis Z3 im Vergleich zu den Messungen zu geringe Radonaktivitätskonzentrationen errechnet (vgl. Abb. 2.56 bis Abb. 2.58). Dabei werden synchrone Aktivitätskonzentrationen in den Zimmern Z1 bis Z4 erzielt (siehe zusätzlich Abb. 2.59).



**Abb. 2.56** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z1.1; unterteilte Raumzonen, Quelle nur in Z1, Luftwechsel in Z1

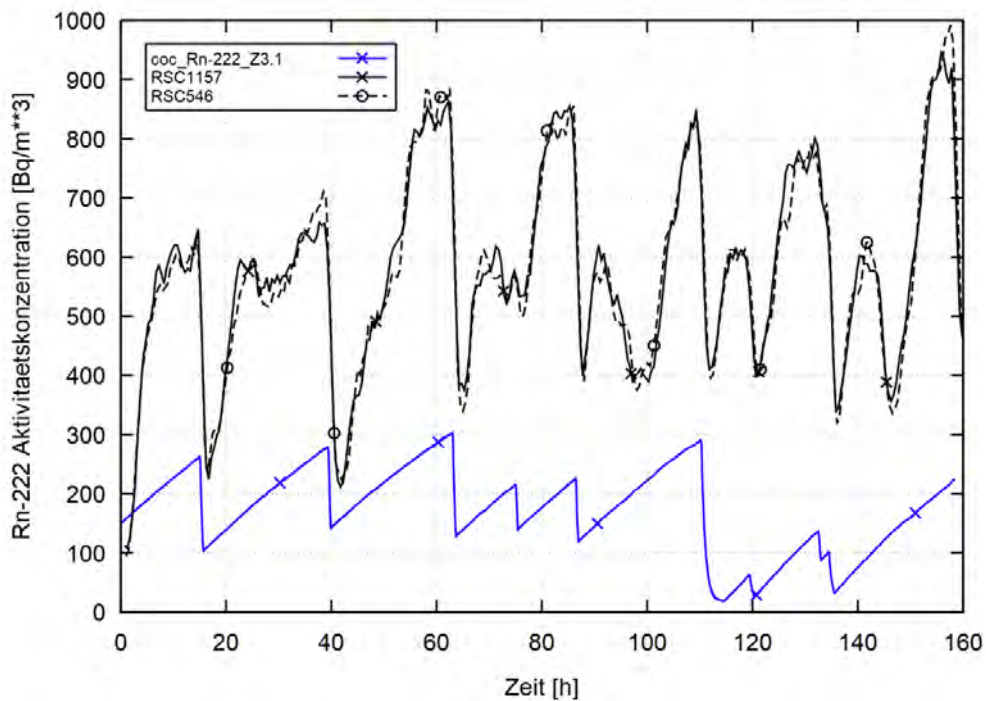
(Schwarz – Messung, Blau – COCOSYS Simulation)





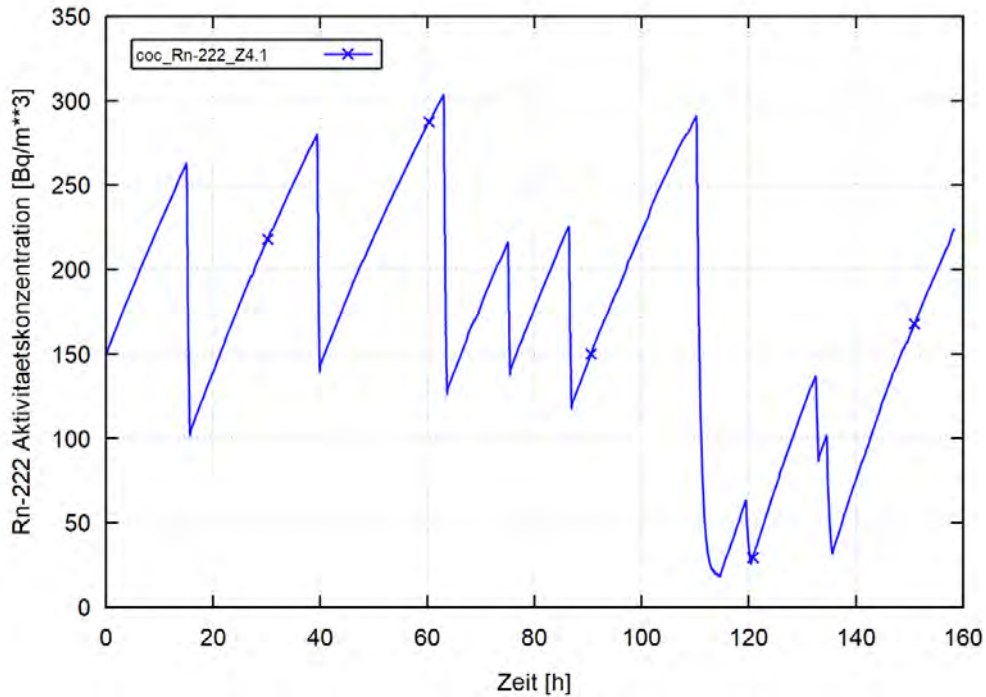
**Abb. 2.57** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z2.1; unterteilte Raumzonen, Quelle nur in Z1, Luftwechsel in Z1

(Schwarz – Messung, Blau – COCOSYS Simulation)



**Abb. 2.58** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z3.1; unterteilte Raumzonen, Quelle nur in Z1, Luftwechsel in Z1

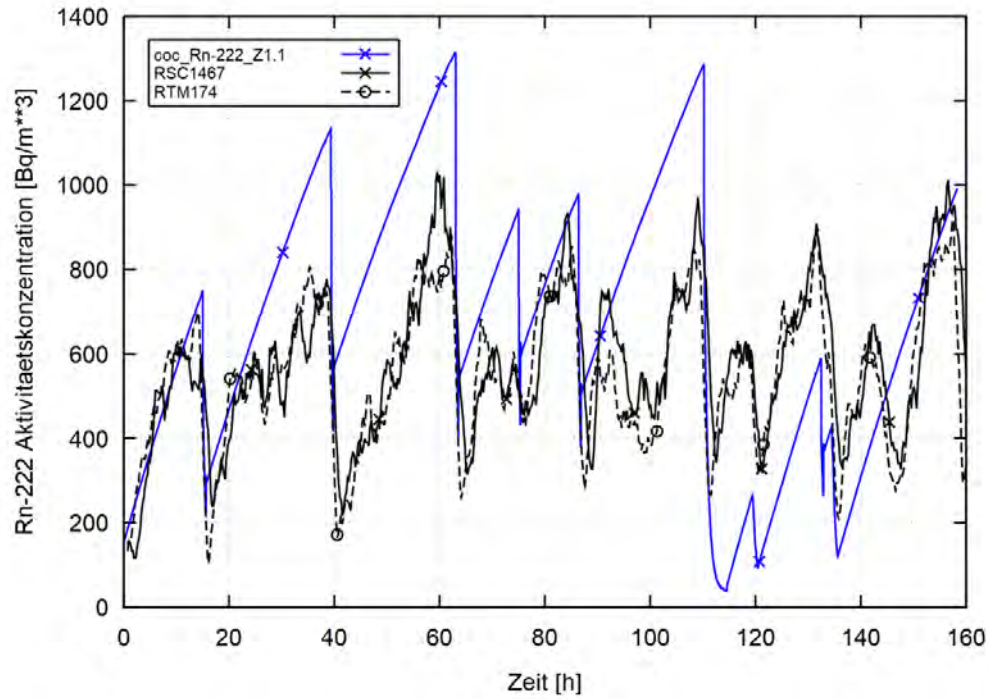
(Schwarz – Messung, Blau – COCOSYS Simulation)



**Abb. 2.59** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z4.1; unterteilte Raumzonen, Quelle nur in Z1, Luftwechsel in Z1

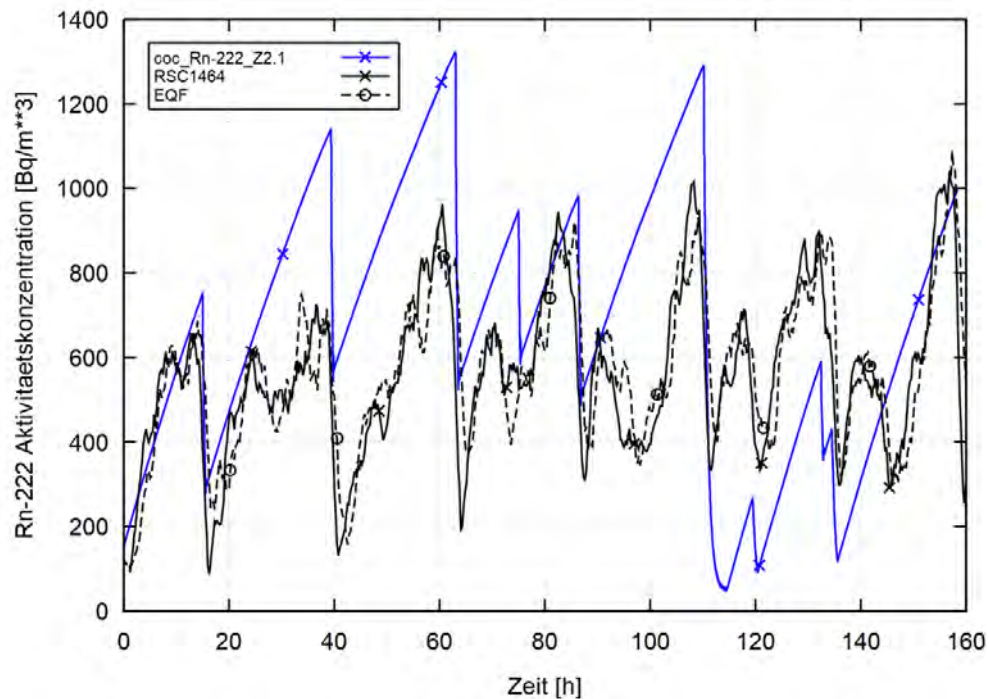
### 2.5.3.2.5 Radonquelle in Z1 bis Z4, unterteilte Raumzonen, Luftwechsel/Volumenstrom nur in Z1

In dieser orientierenden Rechnung wurde im Unterschied zu Kapitel 2.5.3.2.4 die Quellrate  $Q$  entsprechend Gl. (2.18) in allen Zimmern Z1 bis Z4 identisch in der jeweils unteren, bodennahen Zone Z1.1 bis Z4.1 vorgegeben. Berechnete Rn-Aktivitätskonzentrationen in den Zimmern Z1 bis Z4 laufen synchron, überschätzen allerdings die gemessenen Konzentrationen (siehe Abb. 2.60 bis Abb. 2.63). Die Überschätzung der Konzentrationen ist darauf zurückzuführen, dass der in der Rechnung nur auf einen mittels eines Ventilators modellierten Luftzustrom in Zimmer Z1 zurückgeführte Basis-Luftwechsel (für die Bedingungen bei geschlossenem Fenster) den integral benötigten Luftaustausch im Souterrain, wenn  $L$  auf das gesamte Souterrainvolumen bezogen ist, unterschätzt.



**Abb. 2.60** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z1.1; unterteilte Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1

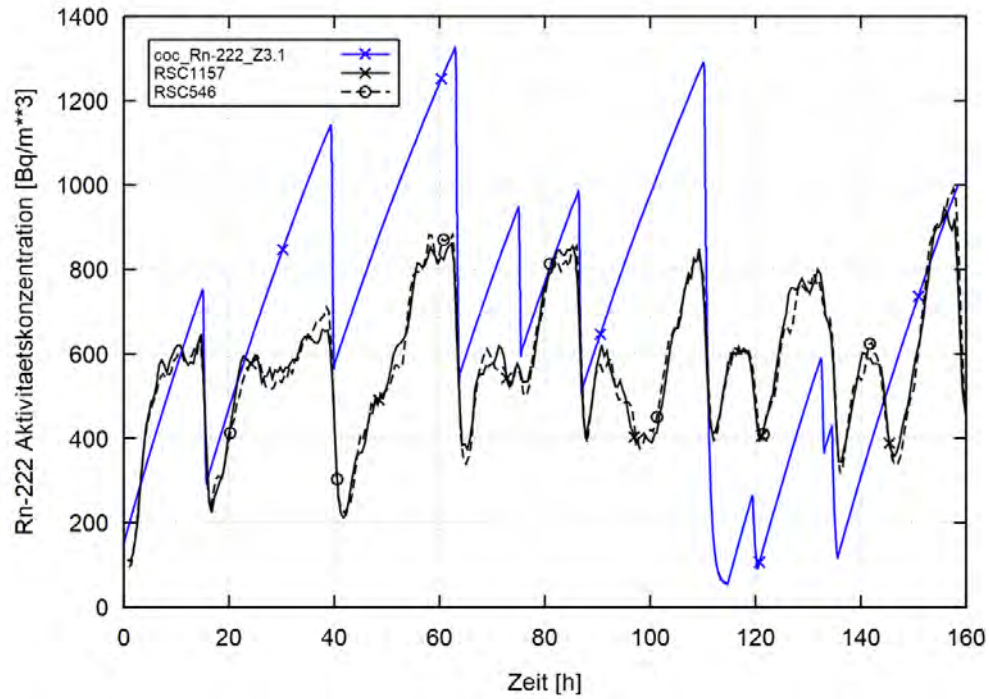
(Schwarz – Messung, Blau – COCOSYS Simulation)



**Abb. 2.61** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z2.1; unterteilte Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1

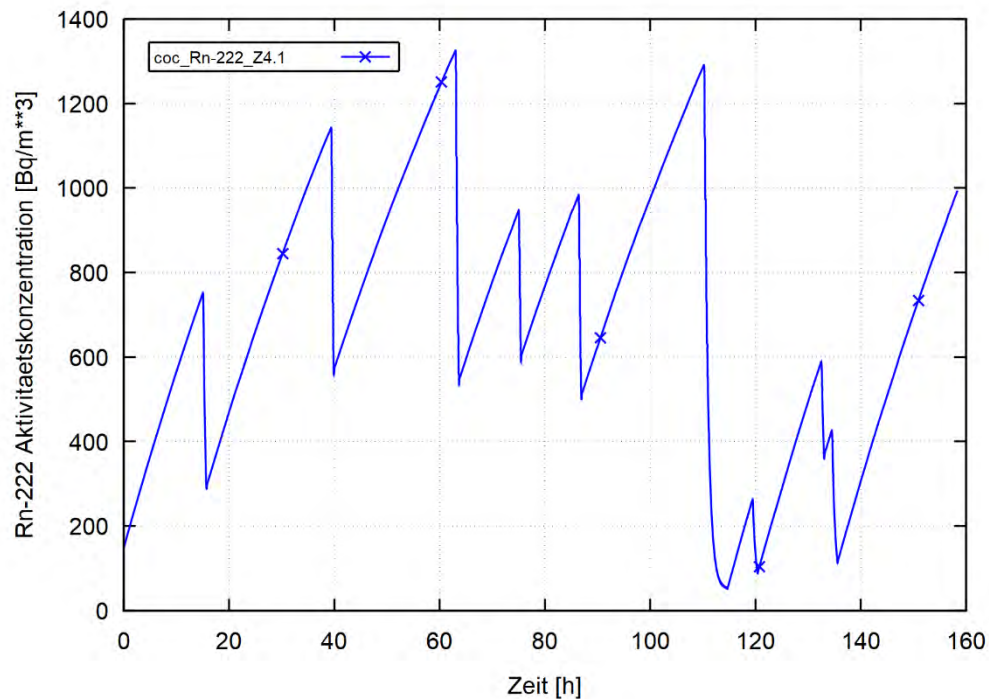
(Schwarz – Messung, Blau – COCOSYS Simulation)





**Abb. 2.62** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z3.1; unterteilte Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1

(Schwarz – Messung, Blau – COCOSYS Simulation)

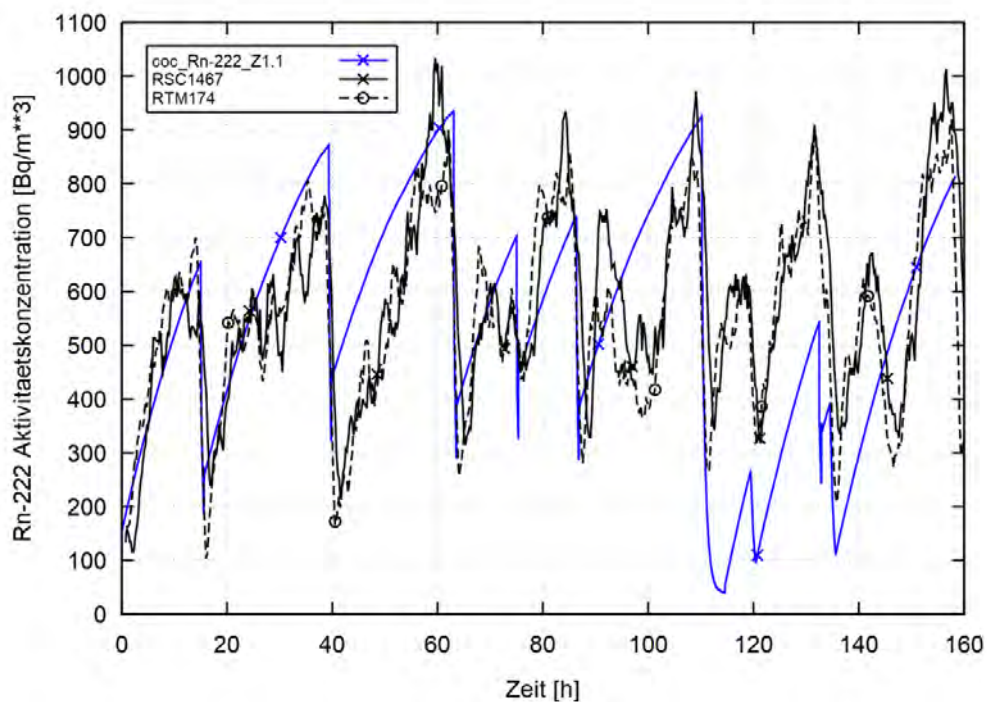


**Abb. 2.63** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z4.1; unterteilte Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1

### 2.5.3.2.6 Radonquelle in Z1 bis Z4, unterteilte Raumzonen, Luftwechsel/Volumenstrom in allen Räumen Z1 bis Z4 jeweils bezogen auf das Raumvolumen

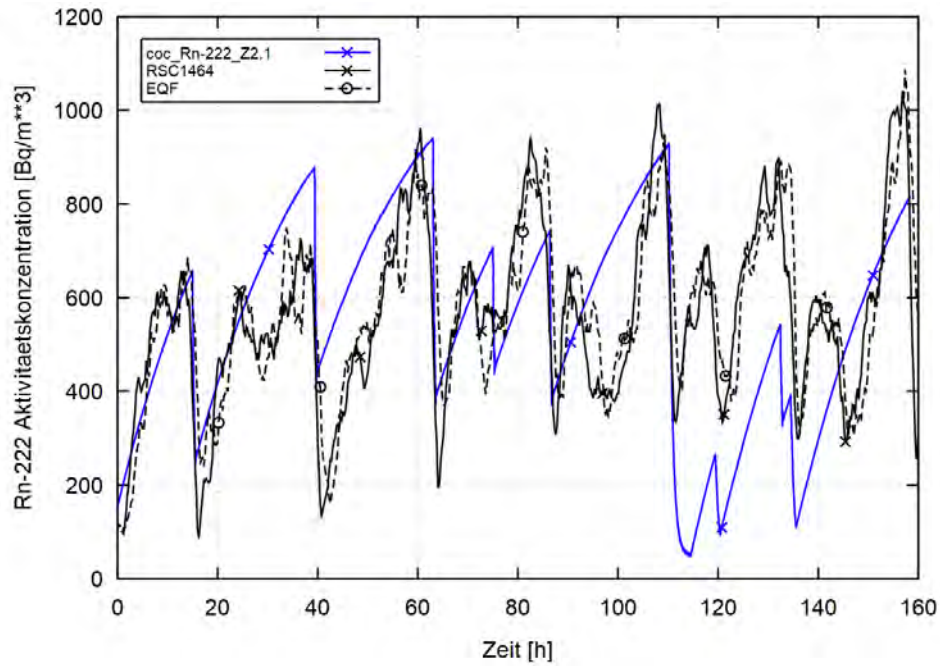
Eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten unter Verwendung der Basiswerte von Quellstärke  $Q$  und Luftwechselrate  $L$  aus den Gl. (2.17) und (2.18) erhält man, wenn die Quellstärke identisch in allen bodennahen Zonen Z1.1 bis Z4.1 vorgegeben wird, und die Grundlüftung im Souterrain aufgrund von Naturzirkulation durch Leckagen und Spalte im Unterschied zu Kapitel 2.5.3.2.5 durch Zustrom jetzt nicht nur in Z1, sondern in allen Räumen Z1 bis Z4 mit einer Luftwechselzahl  $L$  bezogen auf das jeweilige Raumvolumen (mittels je eines an die obere Zone  $Zx.2$  angeschlossenen Ventilators) simuliert wird. Der Druckausgleich zwischen Souterrain und Umgebung bzw. die Luftabströmung aus dem Souterrain erfolgt über die Undichtigkeit in Zimmer Z3 (siehe Abb. 2.36).

Dieses Modellierungskonzept dient somit letztendlich als Grundlage für die Nachrechnung für die Messphase 1 in Kapitel 2.5.3.4.



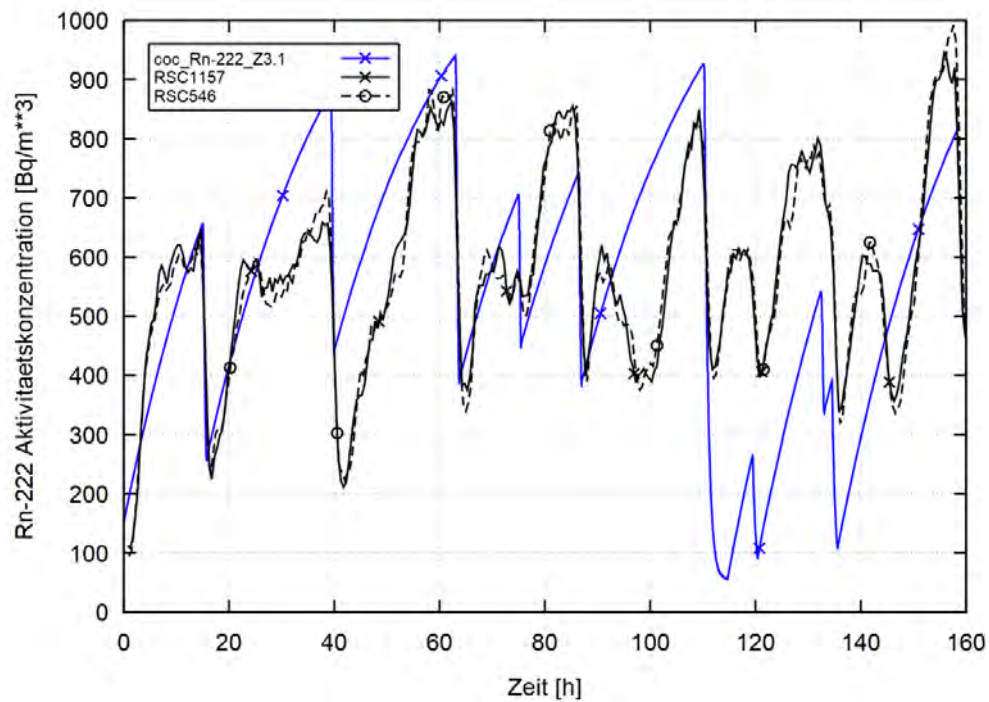
**Abb. 2.64** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z1.1; unterteilte Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1 bis Z4 jeweils bezogen auf das Raumvolumen

(Schwarz – Messung, Blau – COCOSYS Simulation)



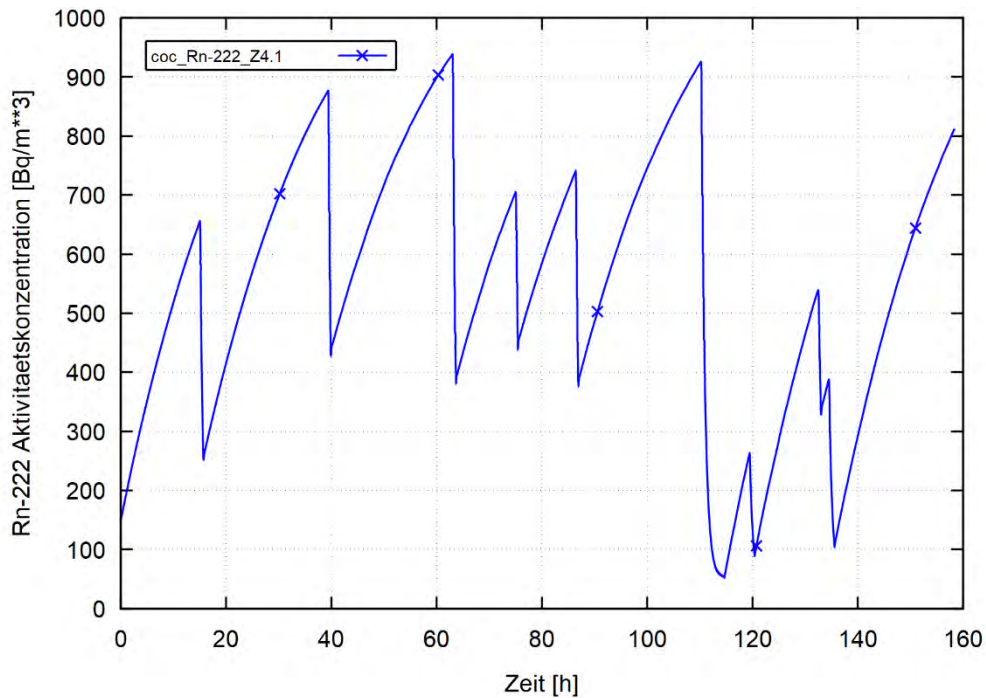
**Abb. 2.65** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z2.1; unterteilte Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1 bis Z4 jeweils bezogen auf das Raumvolumen

(Schwarz – Messung, Blau – COCOSYS Simulation)



**Abb. 2.66** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z3.1; unterteilte Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1 bis Z4 jeweils bezogen auf das Raumvolumen

(Schwarz – Messung, Blau – COCOSYS Simulation)



**Abb. 2.67** Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z4.1; unterteilte Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1 bis Z4 jeweils bezogen auf das Raumvolumen

### 2.5.3.2.7 Schlussfolgerungen

Unter Annahme einer Rn-222-Quelle in nur einem Raum und unter Verwendung der in Kapitel 2.5.2 ermittelten Basisparameter für Quellstärke und Luftwechselzahl kann ein synchroner Verlauf der Radon-Aktivitätskonzentrationen in der tatsächlich gemessenen Höhe nicht hinreichend genau reproduziert werden. Die so von COCOSYS berechneten Konzentrationen insbesondere in den Räumen Z2 und Z3 sind im Vergleich zu den Messdaten zu niedrig. Aus diesem Grund ist eine gleich große Quellstärke in allen Räumen zu unterstellen.

Unter Verwendung eines Nodalisierungsschemas mit ganzen Raumzonen wird der Einfluss der Öffnung des Fensters F1 in Zimmer Z1 auf die Aktivitätskonzentrationen in Z2 und Z3 nur gedämpft wiedergegeben (siehe Kapitel 2.5.3.2.1 bis 2.5.3.2.3). Dies widerspricht dem gemessenen Verlauf. Grund dafür ist, dass das Nodalisierungsschema „Ganze Raumzonen“ keine parallelen Ausgleichsströmungen zwischen benachbarten Räumen im Bereich der Türen und Verbindungen erlaubt. Um solche Zirkulationsströmungen zu simulieren, wird eine Raumunterteilung in vertikaler Richtung in eine jeweils

obere Zone und eine untere Zone benötigt. Die mit diesem Nodalisierungsschema „Unterteilte Räume“ durchgeführten Rechnungen (siehe Kapitel 2.5.3.2.4 bis 2.5.3.2.6) zeigen sehr effiziente Ausgleichsströmungen zwischen den Räumen, die – im Einklang mit den Messdaten – zu einem synchronen Verlauf der Radon-Aktivitätskonzentration führen.

Die Ausgleichsströmungen im Bereich der Türen bzw. Gangverbindungen haben allerdings zur Folge, dass der resultierende Luftwechsel in einem Raum nun nicht mehr vereinfachend mittels eines vorgegebenen Luftzustroms im Zimmer Z1, der sich aus Luftwechselzahl entsprechend der Auswertung in Kapitel 2.5.2 und dem Raumvolumen von Z1 ergibt, simuliert werden kann: Die Änderung der Konzentration in Z1 erfolgt nicht nur aufgrund des Zustromes von außen, sondern auch durch die Ausgleichsströmungen zwischen den Räumen. Eine angepasste Alternative ist die Vorgabe einer Zuströmung in allen Räumen Z1 bis Z4, wobei sich der Volumenstrom jeweils aus der Luftwechselzahl  $L$  und dem jeweiligen Raumvolumen ergibt. In diesem Ansatz werden die vorhandenen Undichtigkeiten, die auch bei geschlossenem Fenster aufgrund von Naturzirkulation zur Grundlüftung im Souterrain führen, mangels detaillierter Kenntnis gleichmäßig auf die Räume verteilt. Ferner wird unterstellt, dass der Druckausgleich mit der Umgebung über eine identifizierte große Undichtigkeit der Tür T3 zwischen Z3 und Umgebung erfolgt.

Dieser Ansatz stellt deshalb die für die weiteren Rechnungen (Nachrechnungen, Vorausrechnungen) verwendete Nodalisierung dar. Wie die Testrechnungen zeigen, können nur bei Annahme des Rn-222 Eintritts über den Boden aller vier Zimmern (Quelle) die in Z1 bis Z3 gemessenen Konzentrationen reproduziert werden. Diese Annahme wurde deshalb ebenfalls in den weiteren Analysen unterstellt.

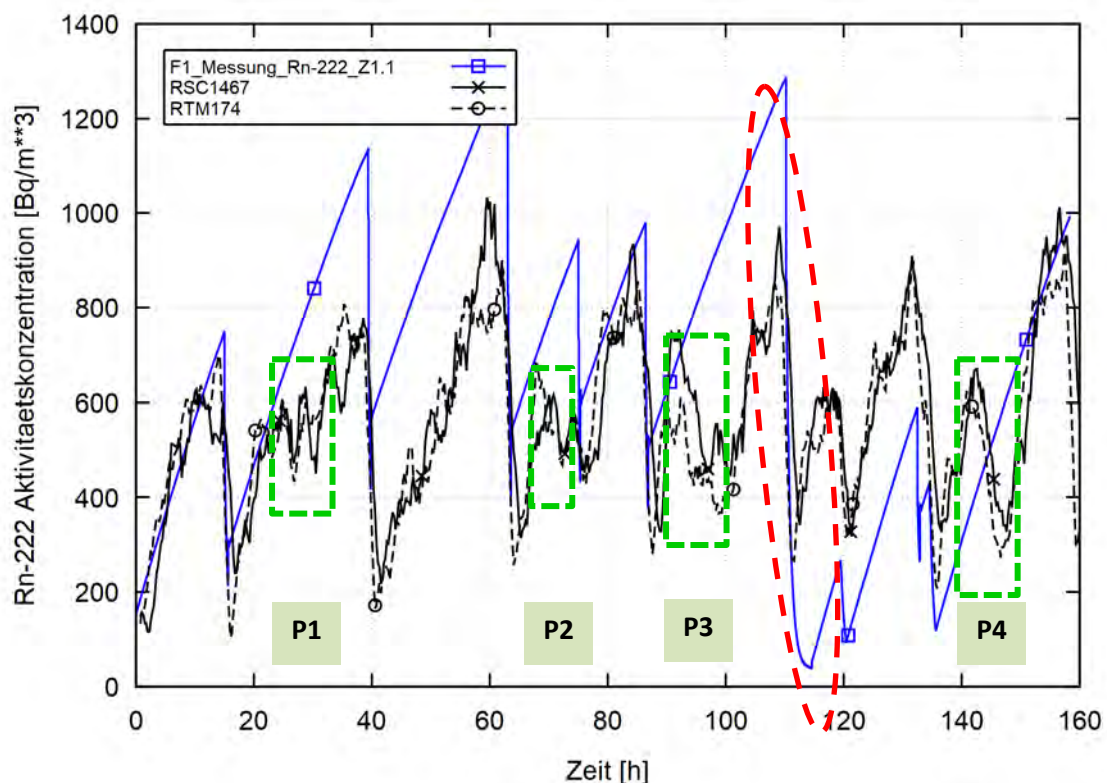
### **2.5.3.3 Untersuchungen zur Fenster-Öffnung**

In den COCOSYS Testrechnungen zur Phase 1 über 158,25 h mit der Nodalisierung „Unterteilte Räume“ (siehe Kapitel 2.5.3.2.5) gibt es nach wie vor Zeitbereiche, in denen deutliche Abweichungen zwischen der berechneten und der gemessenen Rn-222 Aktivitätskonzentration in allen Räumen auftreten. Diese sind in Abb. 2.68 für Zone Z1.1 in Grün markiert (P1 bis P4), in denen die gemessene Konzentration nicht so stark ansteigt, wie in der Rechnung oder auch im Unterschied zur Rechnung fällt.

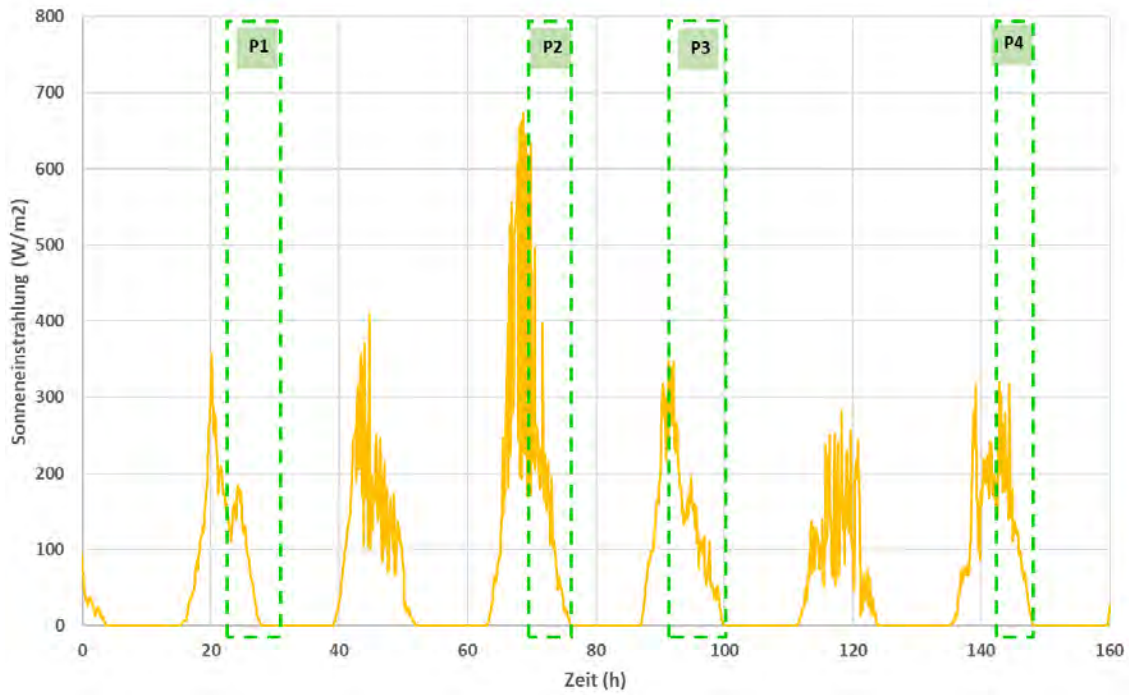
Die Überprüfung der Auswertung der Fenstersensoren (siehe Abb. 2.6) bestätigte noch einmal, dass entsprechend den Aufzeichnungen in diesen Phasen kein Fenster geöffnet



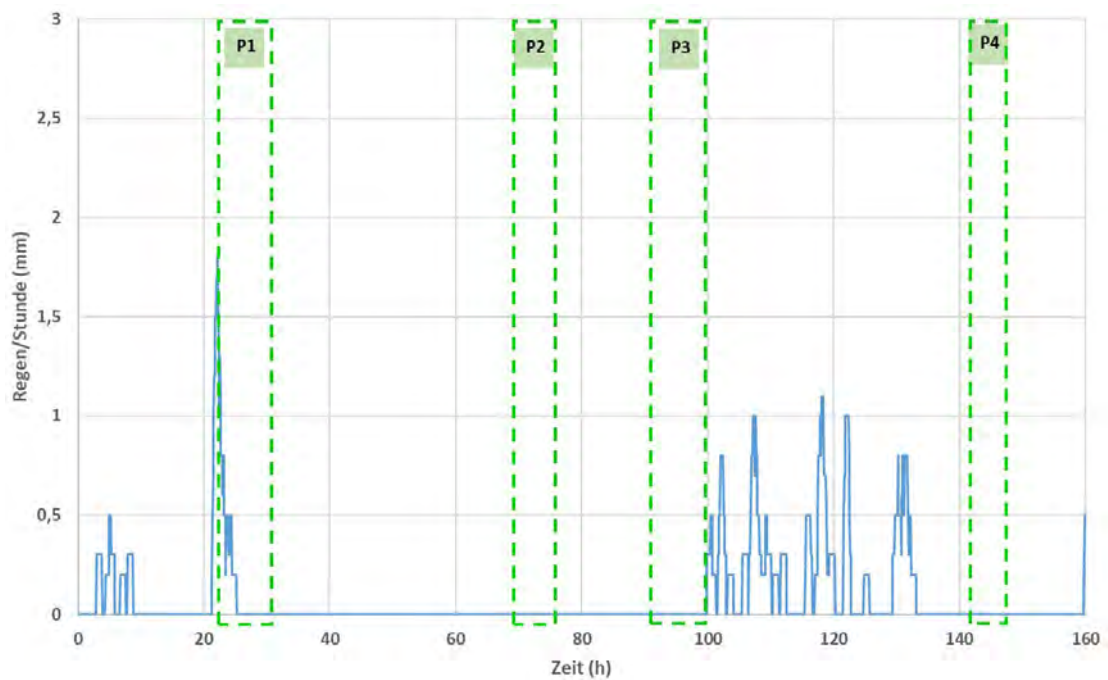
wurden. Die Abweichungen müssen entweder durch eine Veränderung der Quellrate oder des Luftwechsels bzw. einer Kombination beider hervorgerufen sein. Diese hängen wiederum von den meteorologischen Bedingungen ab. Daraufhin wurden die aufgezeichneten Wetterdaten dahingehend überprüft, ob es eine zeitliche Korrelation zu diesen Zeitbereichen P1 bis P4 gibt. Dies erfolgte für die Temperatur und die Luftfeuchte in der Umgebung, für Windstärke und Windrichtung, Luftdruck, Sonneneinstrahlung und sowie den Niederschlag. Exemplarisch ist dies für die Sonneneinstrahlung und den Niederschlag in Abb. 2.69 und Abb. 2.71 dargestellt. Die Außentemperatur (Tagesmaxima) und die Luftfeuchte (Minima) laufen relativ synchron zum Tagesgang der Sonneneinstrahlung. Die vier Zeitbereiche P1 bis P4 beginnen alle etwa beim bzw. kurz nach dem Sonnenmaximum. Im Widerspruch dazu treten bei den Sonnenscheinmaxima bei 45 und 120 h aber keine Rn-222-Konzentrationsabfälle auf, womit der Sonnenschein keine eindeutige Ursache darstellt. Daneben hat es nur während P1 geregnet, was auch keine Schlussfolgerungen zur eventuellen Veränderung der Quellrate erlaubt (im Gegensatz dazu ist in /FEG 22/, Folie 15, ein deutlicher Einfluss des Niederschlages auf die gemessene Radonkonzentration festgestellt worden, d. h. ein sichtbarer Anstieg nach Regen).



**Abb. 2.68** COCOSYS-Untersuchung zur Fensteröffnung in Phase 1, Rn-Aktivitätskonzentrationsverlauf in Zone Z1.1



**Abb. 2.69** Messobjekt Oberheldungen, Wetterdaten Phase 1 - Sonneneinstrahlung, Zuordnung der Zeitbereiche P1 – P4 der COCOSYS Nachrechnung



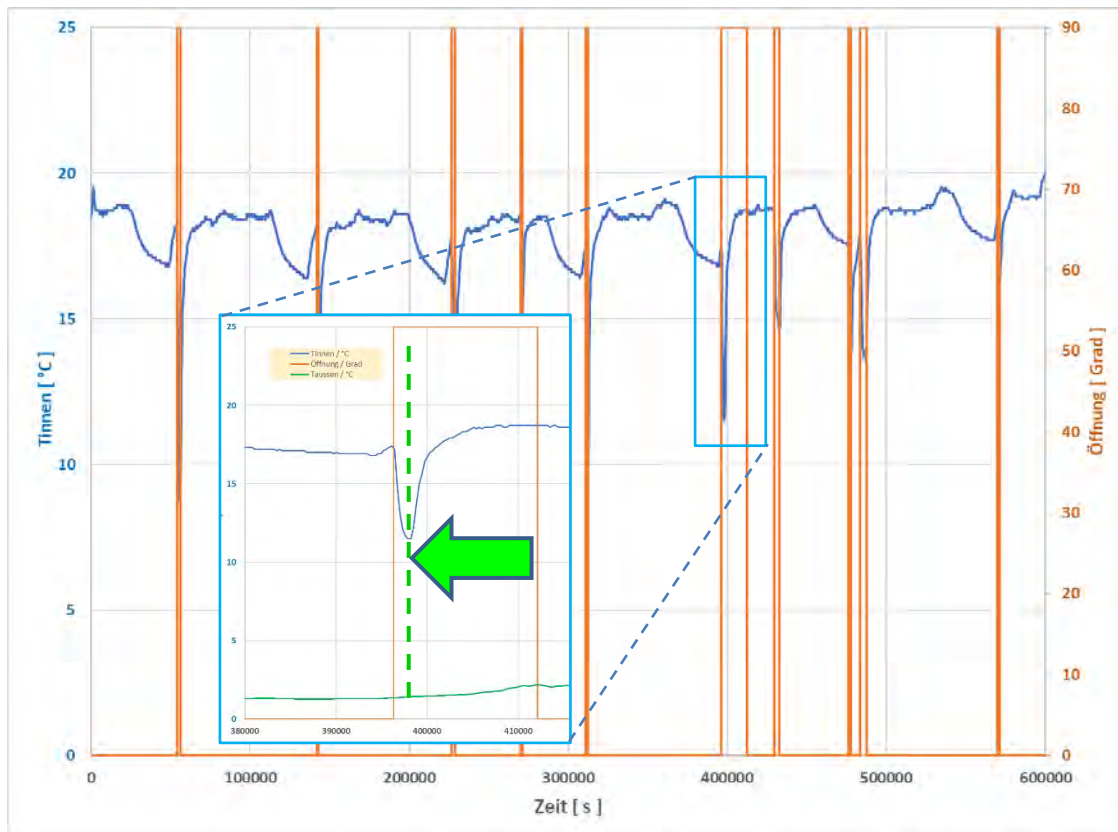
**Abb. 2.70** Messobjekt Oberheldungen, Wetterdaten Phase 1 - Regenmenge, Zuordnung der Zeitbereiche P1 – P4 der COCOSYS Nachrechnung

Als wahrscheinliche Ursache für die Änderungen in der Radonkonzentration in den Räumen wird der Luftwechsel durch thermische Konvektion angesehen. Türöffnungen im

Erd- und/oder Obergeschoss (dieser Bereich des Messobjektes durfte nicht betreten/messtechnisch überwacht werden) während des Tages sowie erhöhte Temperaturen in Folge der Sonnenstrahlung und der damit mögliche Kamineffekt können eine verstärkte Grundlüftung bewirken. Für diese Zeitbereiche liefern aber weder die Türsensoren K3 noch K5 verwertbare Aussagen zur Öffnung der Türen T3 und T5. Auf den Versuch der möglichen besseren Übereinstimmung der Nachrechnung durch Annahme von spekulativen, zeitweise erhöhten und zudem in den Zeitbereichen unterschiedlichen Lüftungszahlen wurde verzichtet.

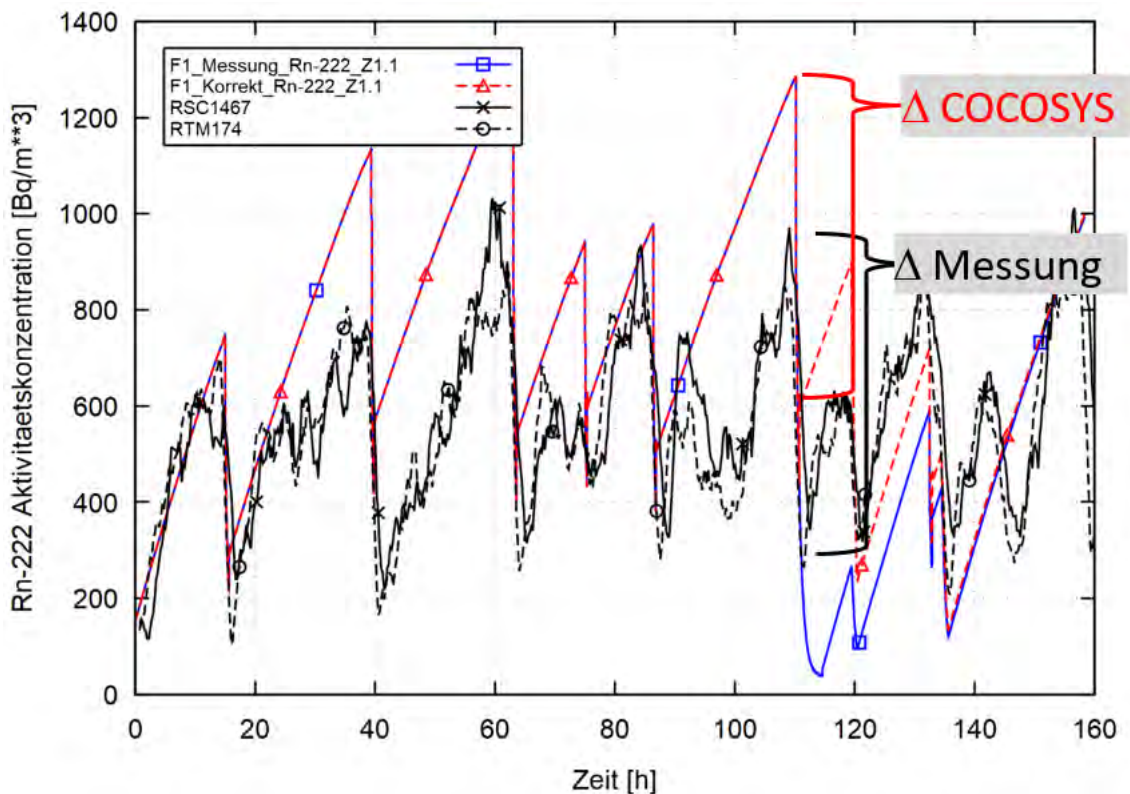
Neben den Grün markierten Zeitbereichen P1 bis P4 in Abb. 2.68 ist ein weiterer, in Rot markierter Bereich um 110 h auffällig. Die zu diesem Zeitpunkt in der Rechnung überschätzte berechnete Konzentration fällt während einer Öffnung des Fensters F1 sehr schnell unter die Messwerte ab und der nachfolgende Anstieg beginnt deutlich später. Die Datenanalyse zeigte, dass es eine direkte Korrelation der unterhalb des Fensters gemessenen Innentemperatur in Z1 mit den Öffnungszeiten des entsprechenden Kontaktschalters K1 gibt (siehe Abb. 2.71). Der gemessene Temperaturabfall wird durch den Eintritt kalter Außenluft hervorgerufen. Eine Ausnahme bildet die Fensteröffnung bei ~110 h – hier liefert Sensor K1 offensichtlich einen falschen Schließzeitpunkt. Der für 412.100 s (114,5 h) angegebene Zeitpunkt wurde anhand der Innentemperatur zu 398.400 s (110,7 h) korrigiert. Anstatt 263 min war das Fenster damit nur 35 min geöffnet, was damit innerhalb der „typischen“ täglichen Öffnungsdauer liegt (18 bis 64 min).





**Abb. 2.71** Messobjekt Oberheldrungen, Innentemperatur in Z1 und Öffnungswinkel Fenster F1, Korrektur der Schließzeit von F1 bei 110,7 h (398.400 s)

Unter Verwendung dieses neuen Fensterschließzeitpunktes zeigte sich ab diesem Zeitpunkt ein näher an der Messung liegender Verlauf der simulierten Radonkonzentration in Zone Z1.1 (siehe Abb. 2.72). Im Öffnungszyklus bei 110 h entspricht jetzt der Wert des Rn-Konzentrationsabfalls dem der Messung (von einem höheren Niveau ausgehend). Der korrigierte Fensterschließzeitpunkt wurde deshalb in allen weiteren Simulationen verwendet.



**Abb. 2.72** Messobjekt Oberhldrungen, Rn-Aktivitätskonzentrationsverlauf in Zone Z1.1 mit gemessener (Blau) und korrigierter (Rot) Öffnungsdauer des Fensters F1

### 2.5.3.4 Nachrechnung der Radon-Aktivitätskonzentration und des Mittelwertes

Die folgenden Nachrechnungen der Messphase 1 mit COCOSYS basieren auf dem Datensatz, der für die Testrechnung in Kapitel 2.5.3.2.6 benutzt wurde. Dabei kam die Nodalisierung mit den unterteilten Räumen sowie des Rn-222 Eintritts (Quelle) über den Boden in allen Zimmern zur Anwendung.

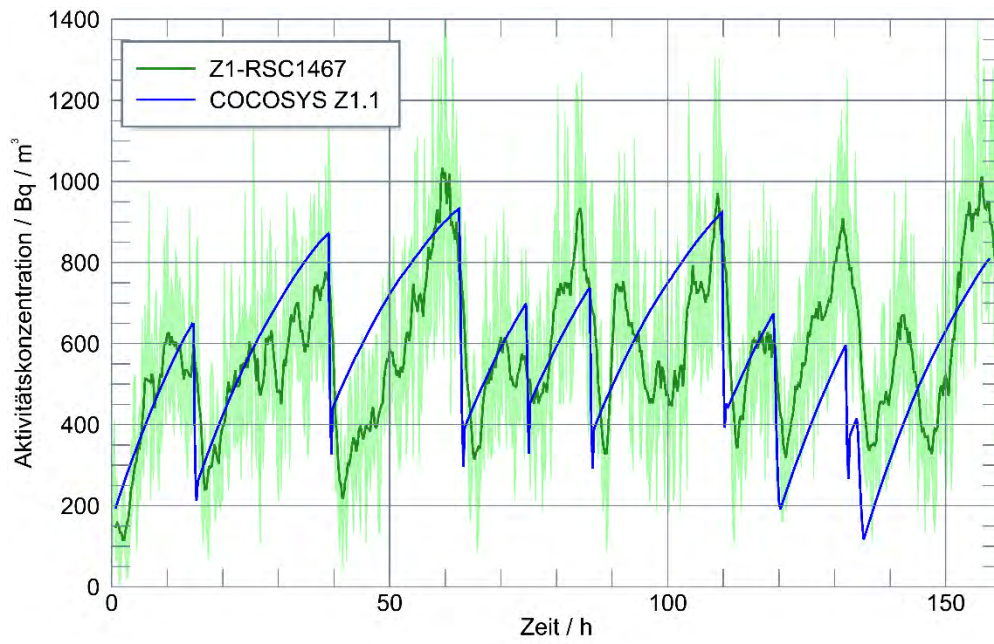
#### 2.5.3.4.1 Verwendung konstanter Basiswerte für Q und L

Es wurde in den bodennahen Zonen der Zimmer Z1, Z2, Z3 und Z4, d. h. in den Zonen Z1.1, Z2.1, Z3.1 und Z4.1 (vgl. Abb. 2.36), eine identische, konstante Quellstärke von  $Q = 50 \text{ Bq}/(\text{m}^3 \text{ h})$  vorgegeben. Ferner wurden für die vier Ventilatoren Fan 1 bis Fan 4 in jedem Zimmer ein konstanter Volumenstrom als Zustrom eingestellt, der sich aus dem angenommenen Basiswert für den Luftwechsel bei geschlossenem Fenster  $L = 0,03 \text{ h}^{-1}$  sowie dem jeweiligen Raumvolumen ergibt.

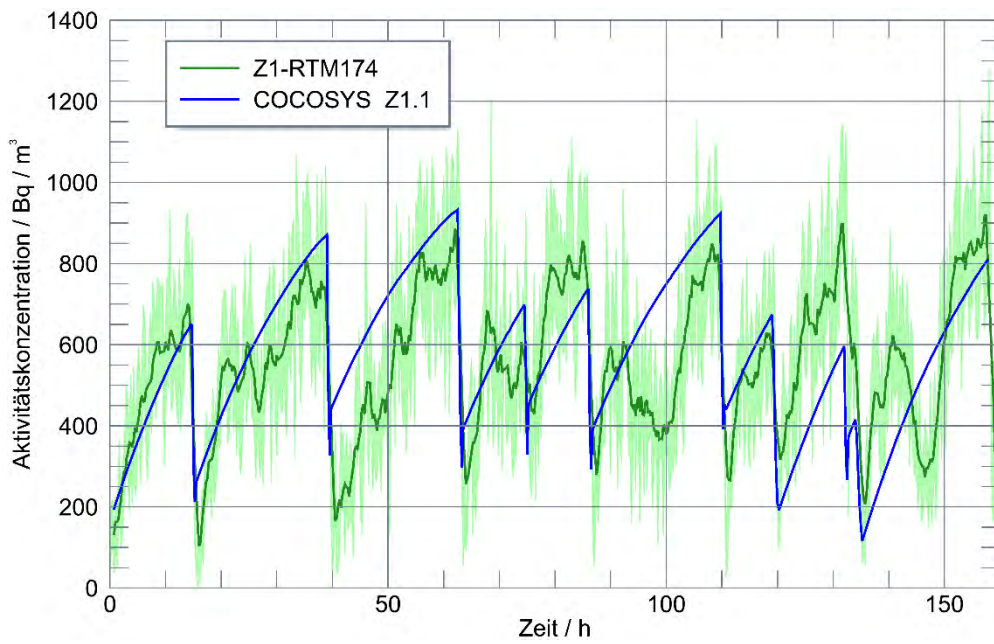
Zudem wurde im Unterschied zur Testrechnung aus Kapitel 2.5.3.2.6 die in Kapitel 2.5.3.3 beschriebene Korrektur für die F1-Fensteröffnung bei ca. 110 h benutzt.

Die Nachrechnungen zeigen eine gute Approximation des zeitlichen Konzentrationsverlaufes in den Räumen (siehe Abb. 2.73 bis Abb. 2.78) sowie der kumulierten Mittelwerte (siehe Abb. 2.79 bis Abb. 2.81). Dem Unsicherheitsband der kumulierten Mittelwerte liegen die relativen Fehler der Einzelmesspunkte zugrunde. Es wurde entsprechend den Grundsätzen der Statistik erstellt (Regeln zur Verrechnung von Varianzen sowie dem zweiten Grenzwertsatz, mit dem angenommen wird, dass für eine große Anzahl von Messungen der Gesamtfehler für das Integral zur Kumulation normalverteilt ist). Mit zunehmender Anzahl der Messpunkte wird das Unsicherheitsband dabei schmaler und der Rechenwert somit sicherer.

Die kumulierten Mittelwerte (berechnet mit der Modellerweiterung lt. Kapitel 2.4.3) werden im Zeitraum 40 h bis 130 h leicht überschätzt. Diese Überschätzung ergibt sich zum einen aufgrund einer nicht ausreichend großen Absenkung der Aktivitätskonzentration durch das Lüften bei ca. 40 h. Zum anderen ist das Verhalten bei ca. 100 h nicht adäquat wiedergegeben: Die Rechnung zeigt bei geschlossenem Fenster (lt. Kontaktschalter, inklusive der Zeitkorrektur nach Kapitel 2.5.3.3) einen Anstieg der Radon-Aktivitätskonzentration, während die Messungen zwischen 90 h und 100 h eine Absenkung ausweisen. Die Ursachen konnten auf Basis der verfügbaren Messdaten und Randbedingungen nicht eindeutig aufgeklärt werden. Vermutet wird ein erhöhter Luftaustausch durch Öffnung von Türen/Fenstern im Erd- und/oder Obergeschoß (Kamin-Effekt), wozu aber keine Angaben vorliegen.

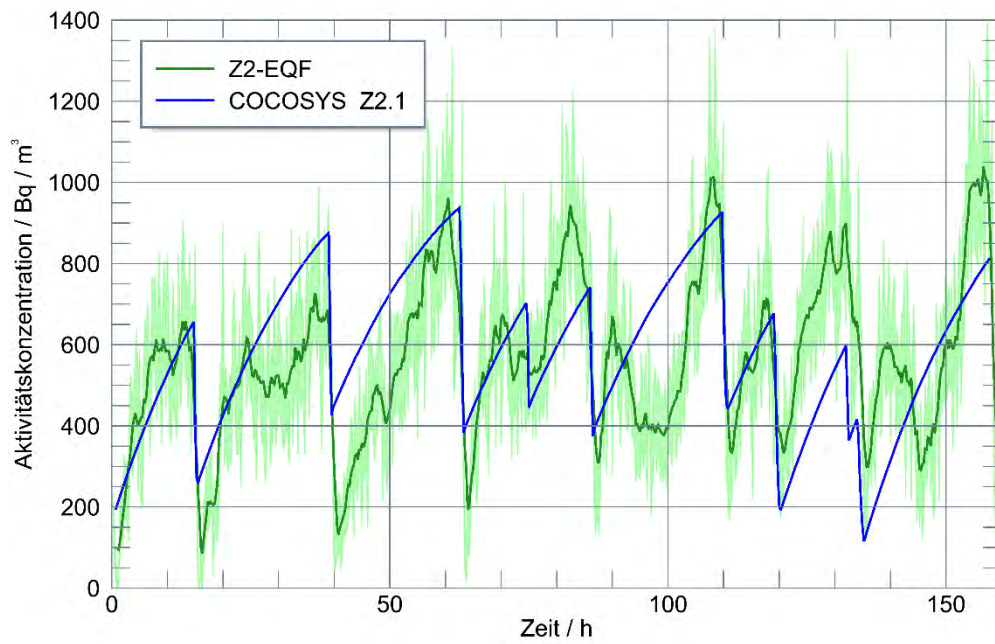


**Abb. 2.73** COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1: Aktivitätskonzentration in Z1.1 im Vergleich zur Messung RSC1467 (mit Messunsicherheiten)

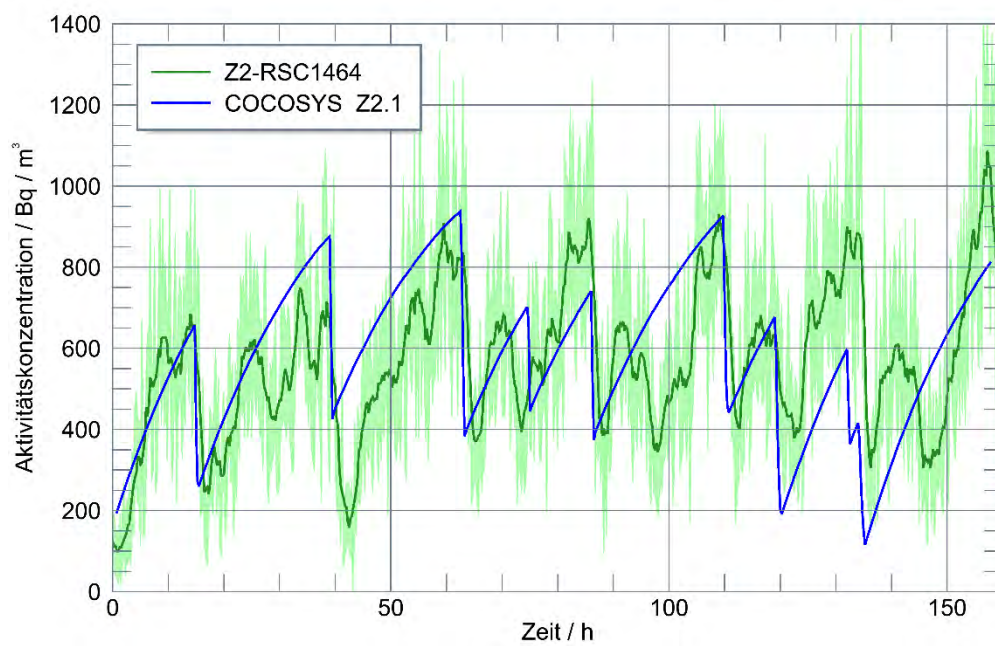


**Abb. 2.74** COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1: Aktivitätskonzentration in Z1.1 im Vergleich zur Messung RTM 174 (mit Messunsicherheiten)

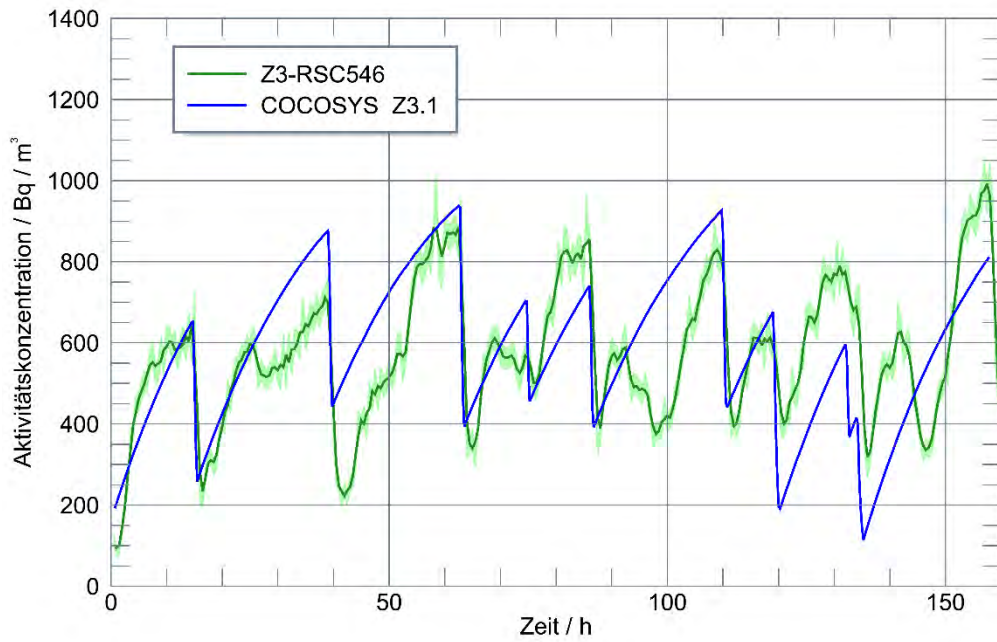




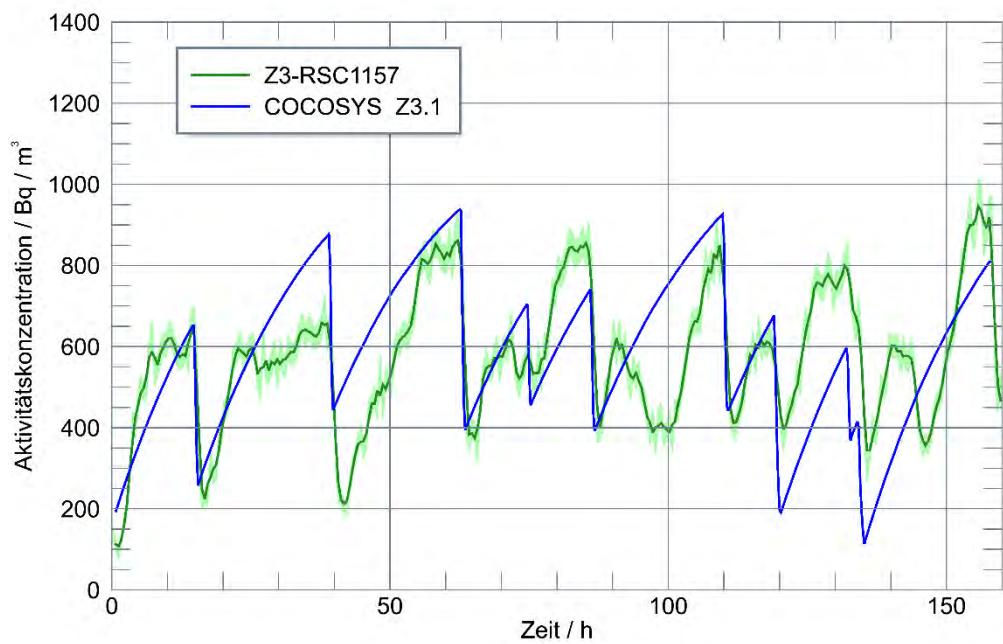
**Abb. 2.75** COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1: Aktivitätskonzentration in Z2.1 im Vergleich zur Messung EQF (mit Messunsicherheiten)



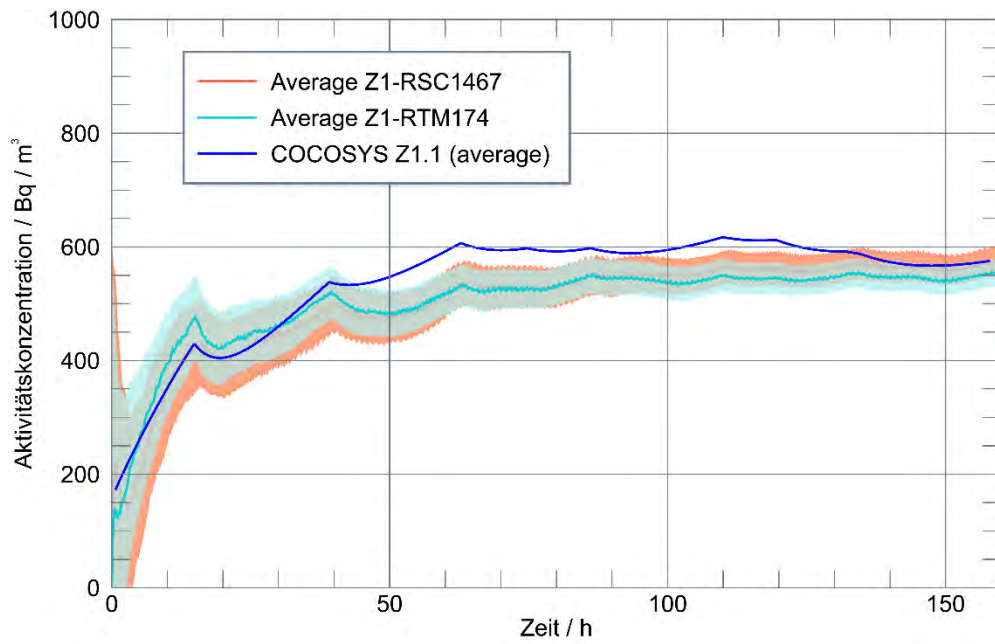
**Abb. 2.76** COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1: Aktivitätskonzentration in Z2.1 im Vergleich zur Messung RSC1464 (mit Messunsicherheiten)



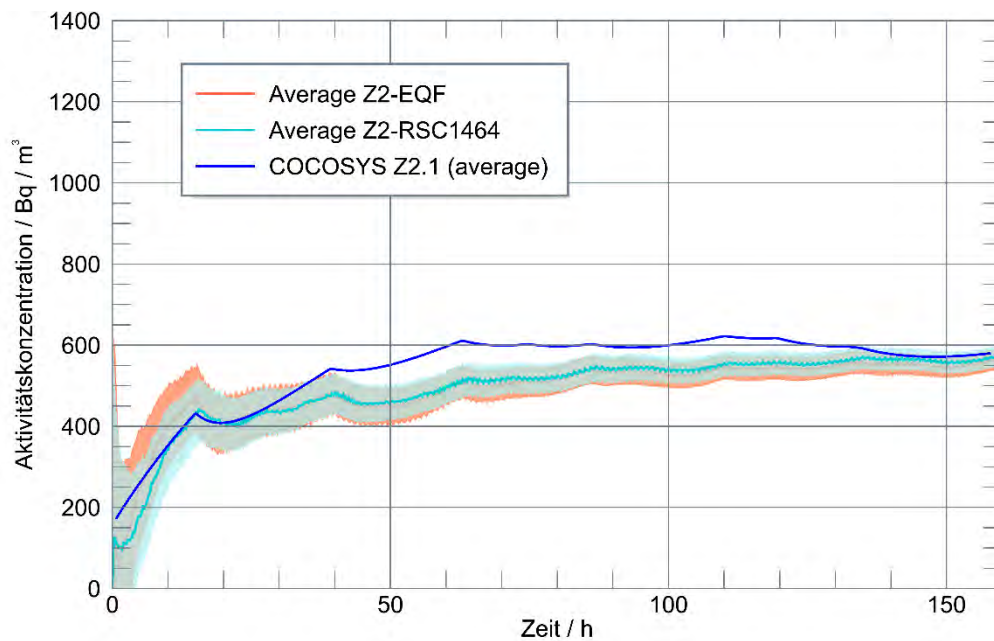
**Abb. 2.77** COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1: Aktivitätskonzentration in Z3.1 im Vergleich zur Messung RSC546 (mit Messunsicherheiten)



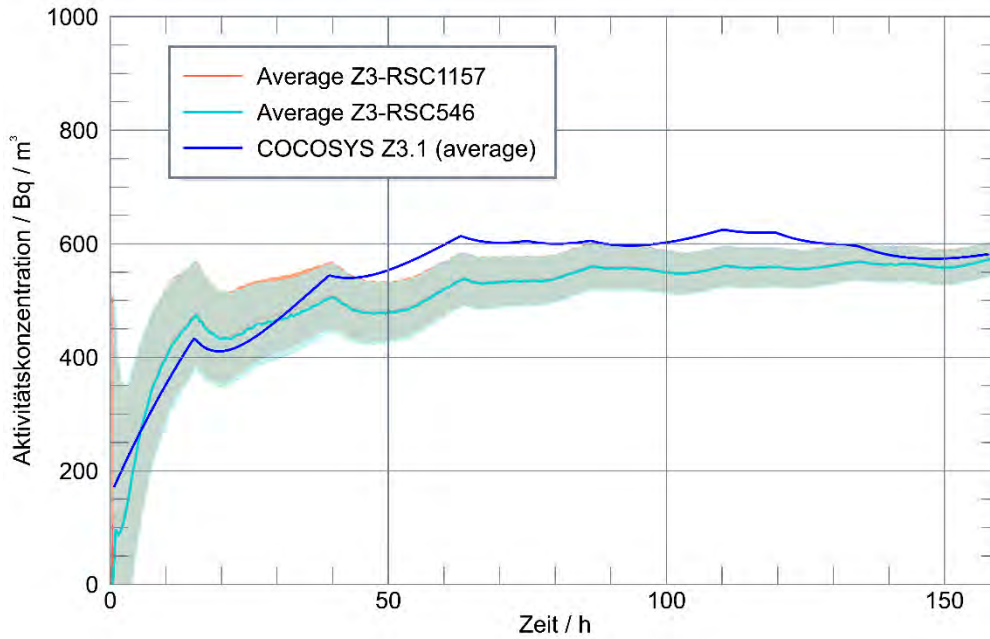
**Abb. 2.78** COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1: Aktivitätskonzentration in Z3.1 im Vergleich zur Messung RSC1157 (mit Messunsicherheiten)



**Abb. 2.79** COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1: Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z1.1 im Vergleich zur Messung (mit statistischer Messunsicherheit)



**Abb. 2.80** COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1: Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z2.1 im Vergleich zur Messung (mit statistischer Messunsicherheit)



**Abb. 2.81** COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1: Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z3.1 im Vergleich zur Messung (mit statistischer Messunsicherheit)

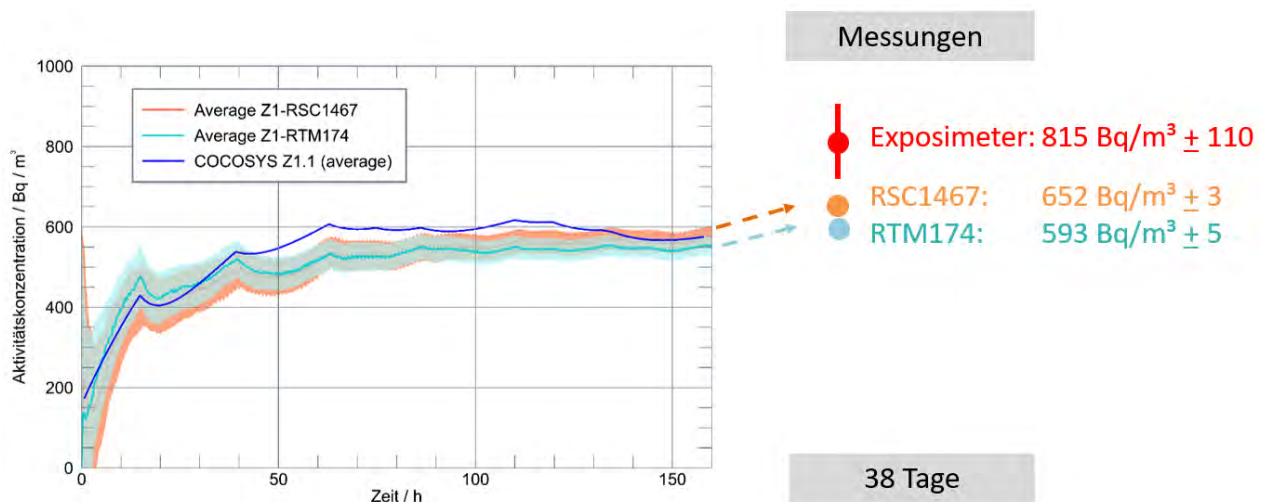
Die Tab. 2.9 zeigt den Vergleich der von COCOSYS für die Messphase 1 berechneten kumulierten Mittelwerte der Radonaktivitätskonzentration mit den aus den Messdaten abgeleiteten Mittelwerten in Zimmer Z1 bis Z3 nach 158,25 h. Es ist ersichtlich, dass zu diesem Zeitpunkt die mittleren gemessenen Konzentrationen in den drei Zimmern nahezu gleich sind. Dies wird durch COCOSYS reproduziert (Abweichungen kleiner als 4 %), wobei in der Nachrechnung die Unterschiede zwischen den Zimmern noch geringer als in der Messung sind.



**Tab. 2.9** Vergleich der von COCOSYS berechneten kumulierten Mittelwerte mit den Messwerten in Zimmer Z1 bis Z3 nach 158,25 h

COCOSYS Zone Zimmer	Messung [Bq/m <sup>3</sup> ], Messgerätename	Kumulierter Mittelwert aus COCOSYS [Bq/m <sup>3</sup> ]	Abweichung be- zogen auf Mess- wert [%]
Z1.1 Z1 - Büro	553,8 RTM1688-174	575,3	+3,9
	573,2 RSCplus-146		+0,4
Z2.1 Z2 - Druckerraum	562,1 EQF	580,0	+3,2
	569,5 RSCplus-146		+1,8
Z3.1 Z3 - Flur	573,0 RSCPMT-54	581,8	+1,5
	573,8 RSCPMT-1157		+1,4

Zur Bewertung der berechneten Aktivitätskonzentration ist für Zone Z1.1 (dem Arbeitsplatz) dem kumulierten COCOSYS-Wert und den beiden Messwerten nach 158,25 h auch der aus den Messwerten für einen Zeitraum von 38 Tagen bestimmte kumulierte Mittelwert gegenübergestellt (siehe Abb. 2.82). Die 38 Tage umfassen dabei die gesamte Zeitdauer der Messkampagne 1 vom 31. März bis 9. Mai 2022 (siehe Kapitel 2.3.2.1). Zusätzlich zu den elektronischen Messungen wurde ein Exposimeter (Filmdosimeter), das über 38 Tage in Zimmer Z1 ausgelegt war, ausgewertet (siehe Kapitel 2.3.2.3). Die aus den elektronischen Messungen abgeleiteten Mittelwerte nach 38 Tagen (d. h. nach 912 h) liegen etwas höher als die Werte nach 158,25 h (siehe auch Tab. 2.5 bzw. Kapitel 2.5.4.5). Der COCOSYS-Mittelwert für Z1.1 aus Messphase 1 stimmt immer noch recht gut mit diesen 38-Tage-Werten überein: die Abweichung beträgt -3,0 % bzw. 11,8 % bezogen auf die Messungen von 593 und 652 Bq/m<sup>3</sup> (für RTM1688-174 und RCS-plus146). Das Exposimeter zeigt einen sichtbar höheren Wert von 815 Bq/m<sup>3</sup> bei einem deutlich größeren Unsicherheitsband von  $\pm 110$  Bq/m<sup>3</sup> /KEM 22/. Maximale Überschätzungen des durch diesen Typ von Exposimeter (Festkörperspurdetektoren) gemessenen Mittelwertes der Rn-222 Aktivitätskonzentration können je nach Exposition bis zu 30 % betragen /BFS 21/. Das Exposimeter erlaubt also trotz der Abweichung zur GRS-eigenen Messung die Bewertung, dass die COCOSYS-Rechnung einen verwendbaren, „realistischen“ Mittelwert ergibt.



**Abb. 2.82** COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1: Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z1.1, Vergleich COCOSYS für 158,25 h mit elektronischer Messung nach 38 Tagen und Exposimeter über 39 Tage

#### 2.5.3.4.2 Verwendung abschnittsweiser Fits für Q und L anhand der Messdaten

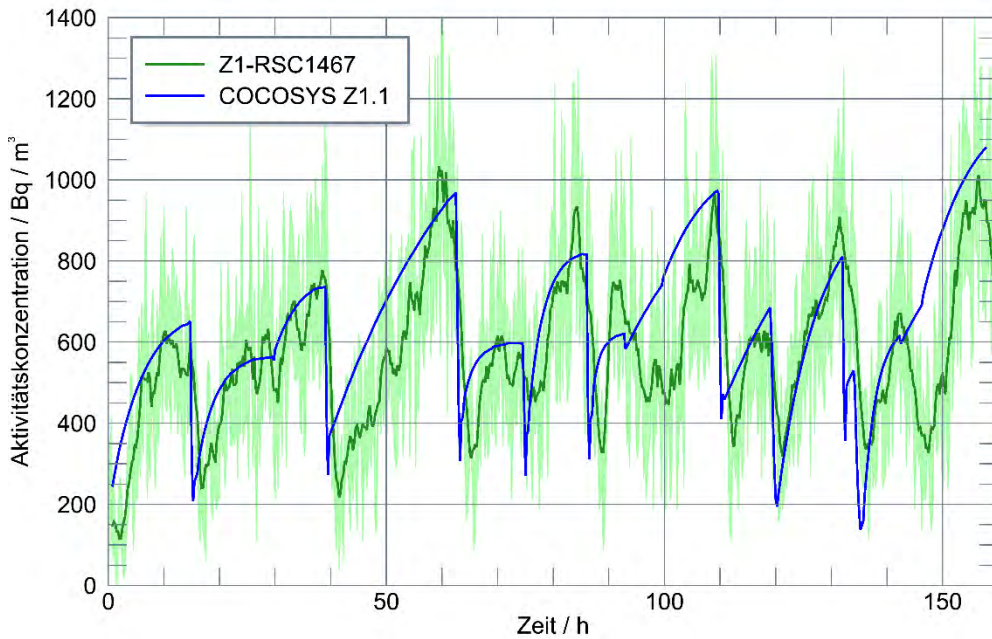
In dieser Variante wird untersucht, ob durch eine genauere Auflösung der Modellparameter Q und L im Zeitverhalten eine prinzipielle Qualitätsverbesserung der Nachrechnung ermöglicht wird. Zu diesem Zweck wurden im Unterschied zur Rechnung im vorherigen Kapitel keine konstanten, sondern entsprechend den Ergebnissen von abschnittsweisen Anpassungen der Messwerte die Modellparameter Q und L für die betrachteten Zeitabschnitte vorgegeben (siehe Kapitel 2.3.2.1).

Die Ergebnisse zeigen für den Zeitverlauf der Rn-222-Aktivitätskonzentrationen genauere Übereinstimmung mit den Messungen (siehe z. B. den Zeitbereich zwischen 20 h und 40 h in Abb. 2.83). Der Zeitbereich zwischen 90 und 100 h wird aber auch damit nicht gut reproduziert. Allerdings werden die Mittelwerte ähnlich überschätzt wie in der Rechenvariante mit konstanten Parametern.

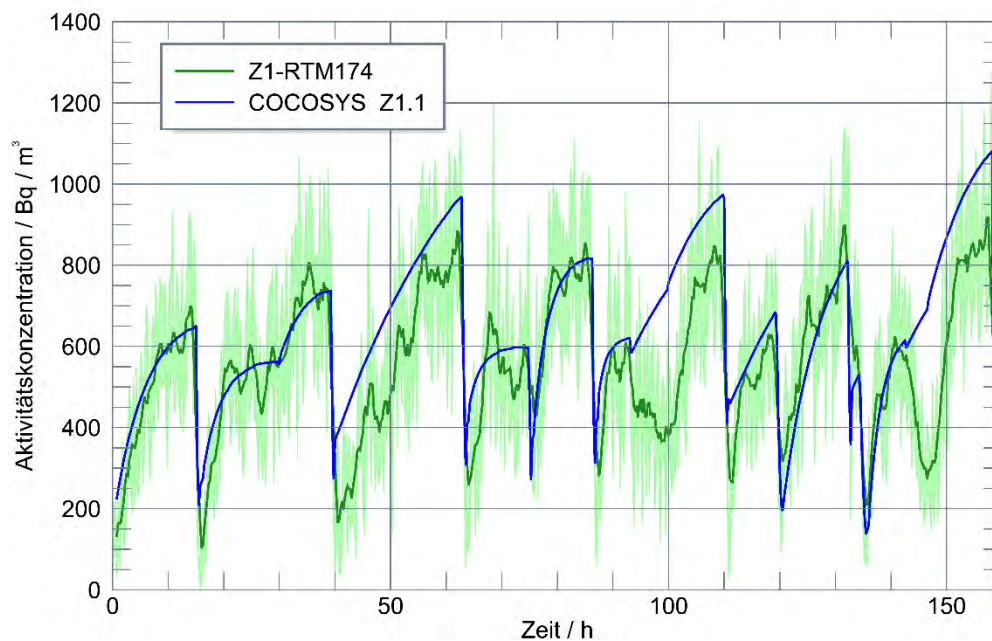
Da es in COCOSYS kein Modell für die zeitliche Entwicklung der Quellstärke Q und der Grundlüftung L (für geschlossene Fenster) gibt, werden für die blinde Vorausrechnung der Messphase 2 im nächsten Abschnitt wie in Kapitel 2.5.3.4.1 konstante Modellparameter verwendet.

Es sei aber auch erwähnt, dass Probleme bei der Bestimmung der Quellrate kein COCOSYS-spezifisches Problem sind, sondern generell alle Simulationen betrifft, da es

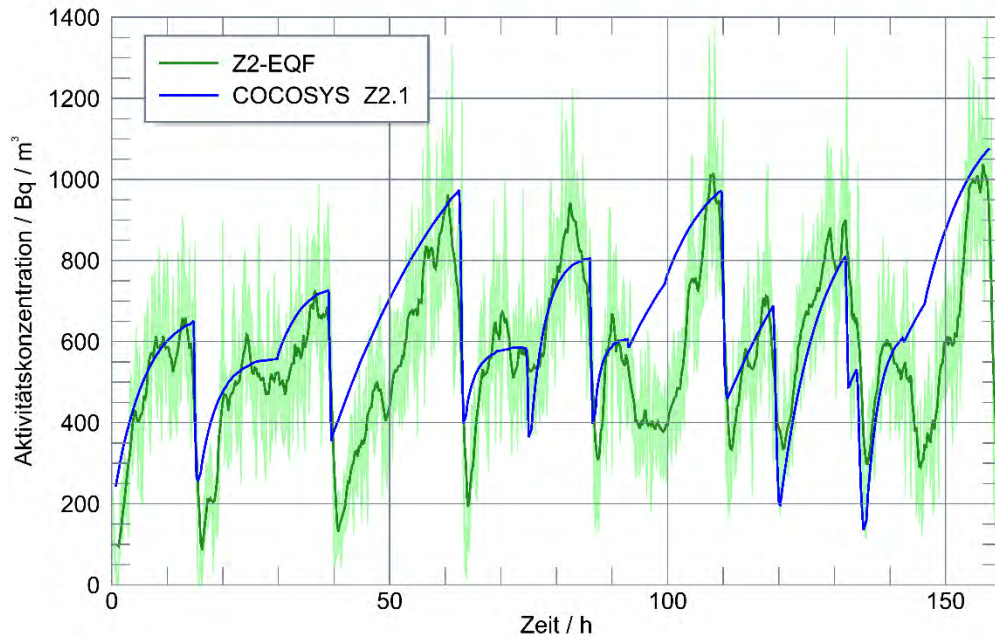
noch kein anerkanntes universelles Modell zur Freisetzung von Rn-222 aus dem Boden in Abhängigkeit von Wetterrandbedingungen, Bodenzustand etc. gibt.



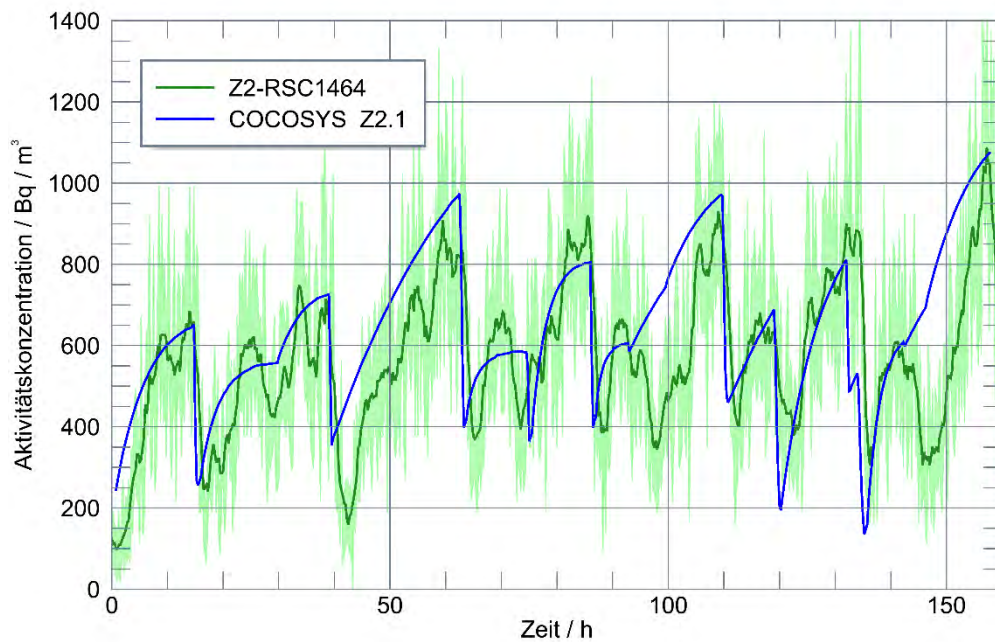
**Abb. 2.83** COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1 (Verwendung von Fits): Aktivitätskonzentration in Z1.1 im Vergleich zur Messung RSC1467 (mit Messunsicherheiten)



**Abb. 2.84** COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1 (Verwendung von Fits): Aktivitätskonzentration in Z1.1 im Vergleich zur Messung RTM174 (mit Messunsicherheiten)

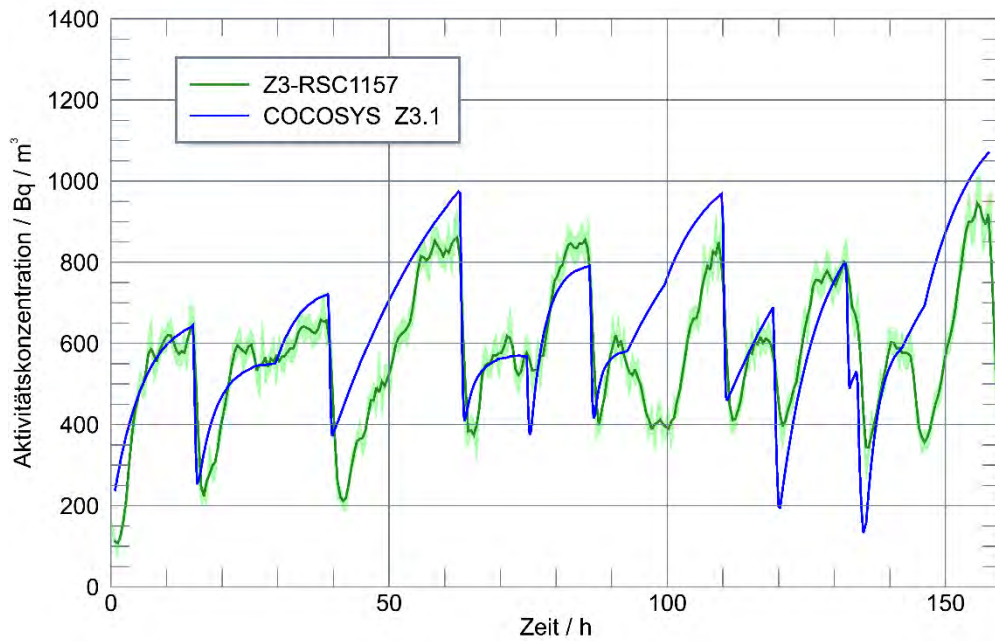


**Abb. 2.85** COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1 (Verwendung von Fits): Aktivitätskonzentration in Z2.1 im Vergleich zur Messung EQF (mit Messunsicherheiten)

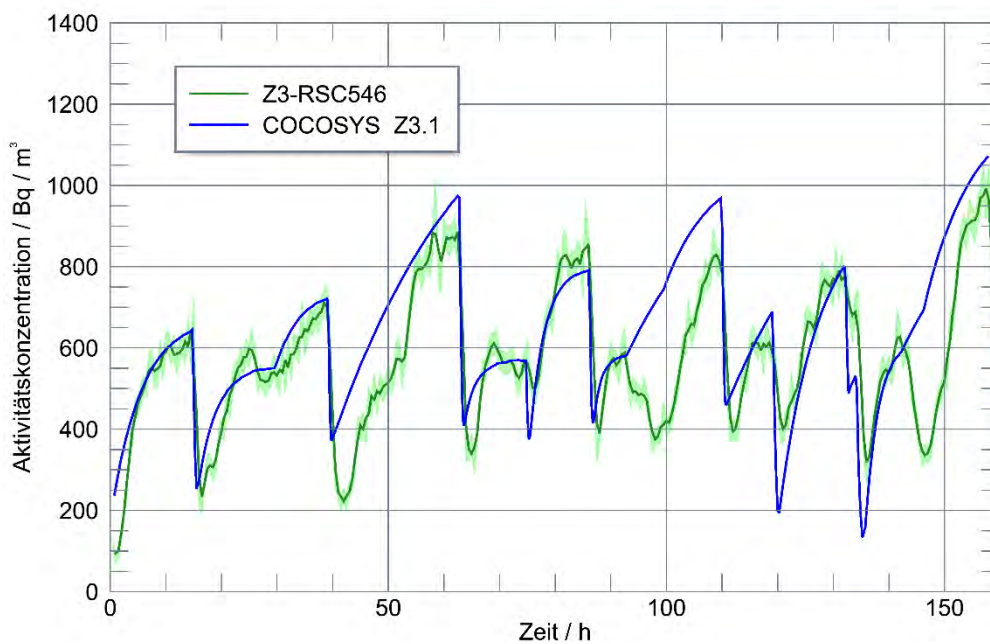


**Abb. 2.86** COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1 (Verwendung von Fits): Aktivitätskonzentration in Z2.1 im Vergleich zur Messung RSC1464 (mit Messunsicherheiten)

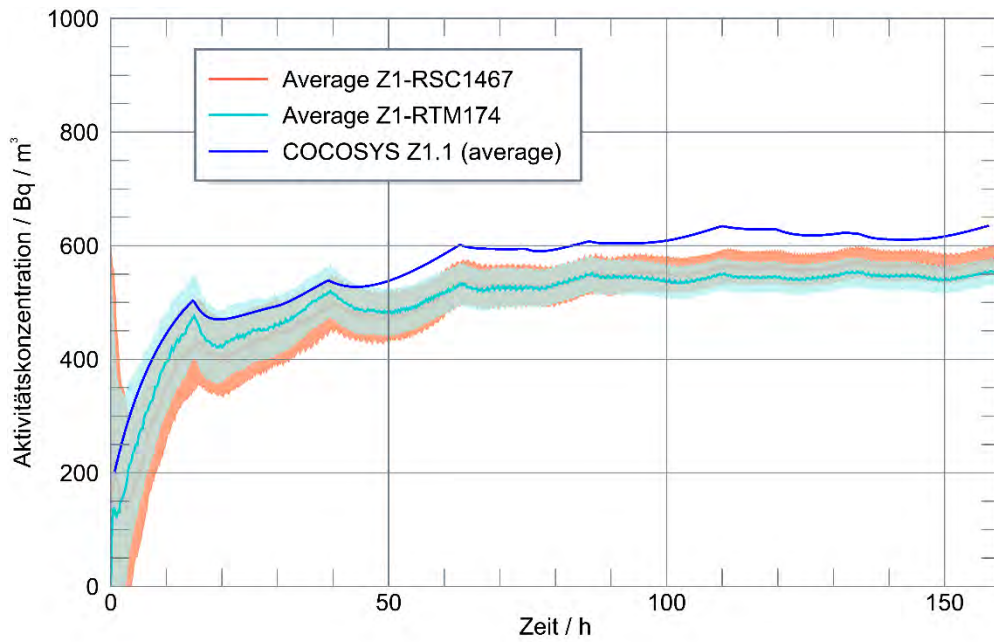




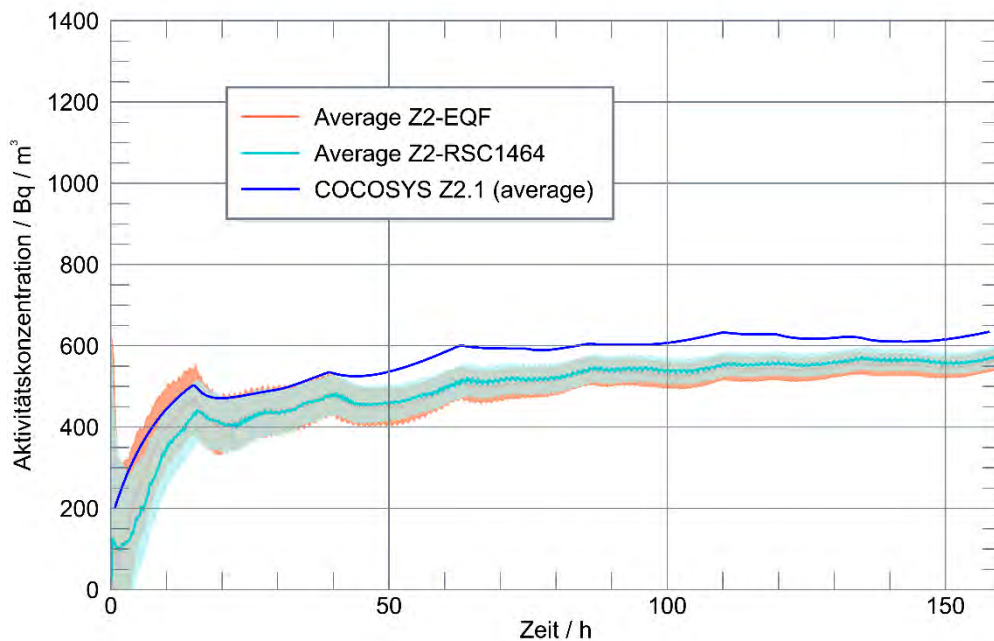
**Abb. 2.87** COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1 (Verwendung von Fits): Aktivitätskonzentration in Z3.1 im Vergleich zur Messung RSC1157 (mit Messunsicherheiten)



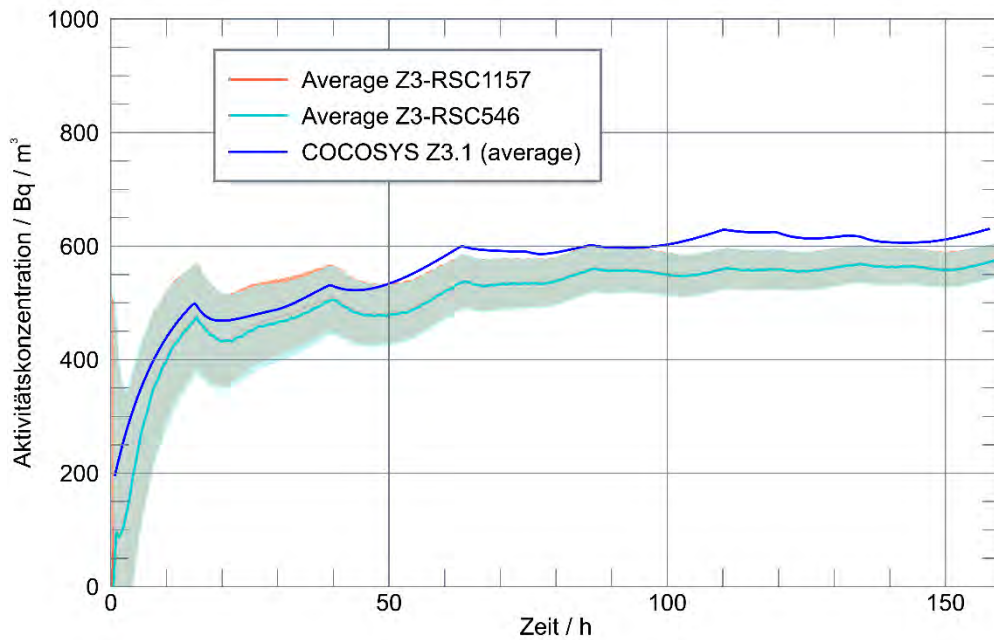
**Abb. 2.88** COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1 (Verwendung von Fits): Aktivitätskonzentration in Z3.1 im Vergleich zur Messung RSC564 (mit Messunsicherheiten)



**Abb. 2.89** COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1 (Verwendung von Fits): Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z1.1 im Vergleich zur Messung (mit statistischer Messunsicherheit)



**Abb. 2.90** COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1 (Verwendung von Fits): Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z2.1 im Vergleich zur Messung (mit statistischer Messunsicherheit)



**Abb. 2.91** COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1 (Verwendung von Fits): Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z3.1 im Vergleich zur Messung (mit statistischer Messunsicherheit)

#### 2.5.4 COCOSYS-Vorausrechnungen zur Messphase 2

Ziel der Vorausrechnungen („blinde“ Voraus- oder Prognoserechnungen) ist die Prüfung der Fähigkeit von COCOSYS zur Vorhersage von Radon-Ausbreitungsvorgängen. Im Fokus steht dabei der durch COCOSYS berechnete kumulierte Mittelwert der Rn-222 Aktivitätskonzentration für dieses Zeitintervall, da dieser – bei Extrapolation auf ein Jahr – für die Beurteilung der Einhaltung des Referenzwertes (Jahresmittelwert) von 300 Bq/m<sup>3</sup> verwendet werden soll.

Der Zeitbereich für die Prognoserechnung (als „Messphase 2“ bezeichnet) wurde direkt anschließend an Messphase 1 definiert, d. h. innerhalb der 38 Tage der Messkampagne vom 31. März bis 9. Mai 2022 /GRS 22a/. Nur in diesem Zeitintervall konnte in Absprache mit dem Eigentümer die **gesamte** Messtechnik vor Ort aufgestellt und betrieben werden (inkl. Kontaktschalter und Wetterdaten). Als Startpunkt der Phase 2 wurde der Endzeitpunkt von Phase 1 festgelegt. Die Messphase 2 startet somit am 7. April 2022 um 6:00 Uhr (Zeitpunkt 158,25 h in den COCOSYS-Rechnungen, 569.700 s) und endet am 14. April um 6:00 Uhr (Zeitpunkt 326,5 h, d. h. 1.175.400 s). Sie umfasst damit 168 h.

Die Vorausrechnungen setzen auf den Ergebnissen von Phase 1 auf, d. h. es wird der gleiche Ansatz für die Darstellung der Geometrie und daraus abgeleitete Annahmen von Randbedingungen verwendet. Diese Rechnungen erfolgten zunächst „blind“, d. h. ohne Kenntnis der Messdaten und tatsächlichen Randbedingungen für den ausgewählten Zeitbereich der Messphase 2. Die Aktivitäten zur Berechnung des Mittelwertes für die Phase 2 und der Einschätzung der Prognosefähigkeit von COCOSYS umfassen folgende Schritte:

1. „Blinde“ Prognoserechnung ohne Kenntnis von Messdaten mit Annahme einer konstanten Quellrate  $Q$  sowie der Grundlüftung  $L$  entsprechend Phase 1, der zum Ende von Phase 1 gemessenen Rn-222 Aktivitätskonzentrationen, der Verwendung typischer Wetterbedingungen sowie einer "normierten" Fenster-Öffnung (Lüftung am Morgen  $\frac{1}{2}$  h)
2. Rechnung wie 0, aber mit aus Messdaten abgeleiteter Quellrate und Lüftungszahl
3. Rechnung wie 0 plus detektierte Fenster-/Türöffnungen
4. Rechnung wie 0 plus gemessene Raum- und Wetterdaten
5. Vergleich der Rechnungen 0 bis 0 mit den Messdaten (Radonkonzentration und insbesondere Mittelwert) mit Einschätzung der Prognosefähigkeit von COCOSYS

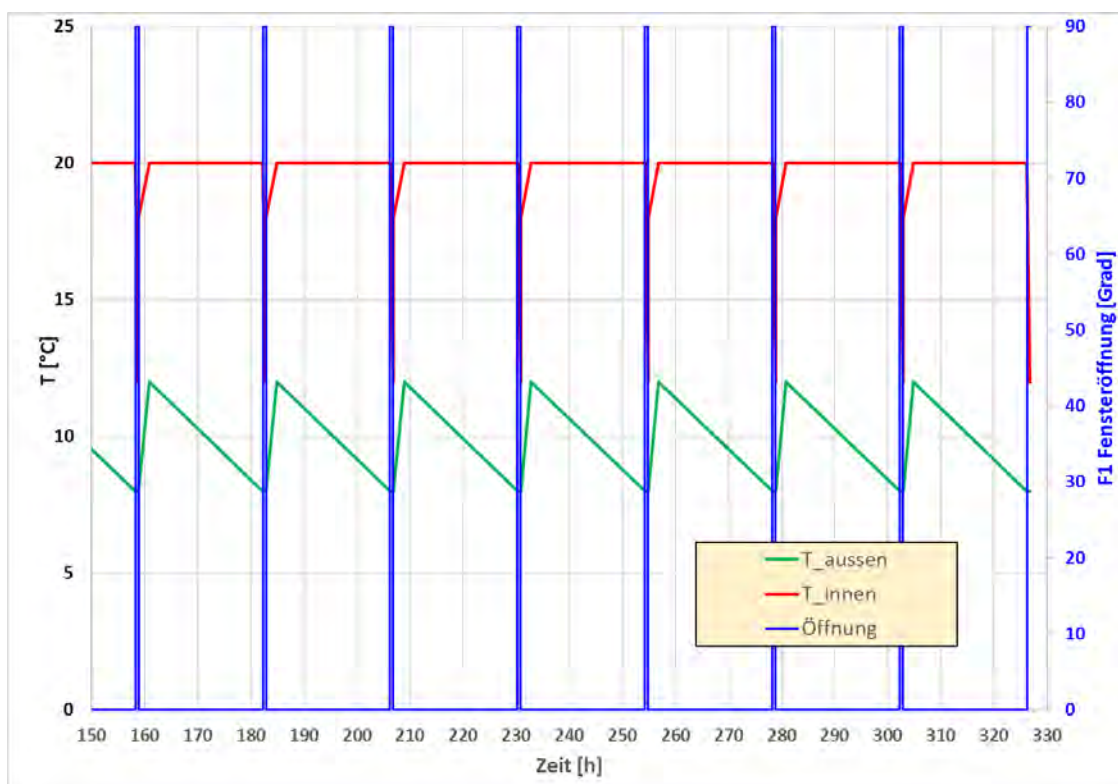
#### **2.5.4.1 Prognoserechnung 1 – „blinde“ Rechnung**

Diese erste komplett „blinde“ Prognoserechnung erfolgte ohne Kenntnis von Messdaten für die Messphase 2. Es wurden die Basisparameter für Quellstärke  $Q = 50 \text{ Bq}/(\text{m}^3\text{h})$  sowie die Lüftungszahl  $L = 0,03 \text{ h}^{-1}$  für die Grundlüftung (durch Undichtigkeiten bei geschlossenem Fenster) wie in der Nachrechnung von Messphase 1 verwendet und typische Wetterbedingungen sowie eine normierte, periodische Öffnung des Fensters F1 angenommen.

Als Wetterrandbedingungen wurden konstante Werte für Windgeschwindigkeit (1 m/s) und Umgebungsdruck (0,985 kPa) sowie Tagesgänge für die Außentemperatur unterstellt (siehe Abb. 2.92). Zur Steuerung der Raumheizungen (siehe Kapitel 2.5.1.2) wurden zusätzlich Tagesgänge für die Innentemperatur vorgegeben (gleiche Werte in Zimmer Z1 und Z2).



In Phase 1 betrug die mittlere Öffnungszeit von Fenster F1 im Büro (Zimmer Z1) ca. 32 min. Diese mittlere Zeitspanne basiert auf den Kontaktschalter-Messungen und berücksichtigt alle Fensteröffnungen unabhängig von deren Verteilungen auf die Tage, aber auch die Korrektur des Zeitraums der Fensteröffnung in Phase 1 bei ca. 110,7 h (vgl. Kapitel 2.5.3.3). Nach Auskunft des Objekteigentümers wurde bestätigt, dass üblicherweise eine Lüftung durch Öffnen des Fensters F1 einmal pro Tag am Morgen um ca. 6 Uhr erfolgt. Vor diesem Hintergrund wurde ein periodisches Öffnen des Fensters auf volle 90° einmal am Tag, um 6 Uhr morgens, für 35 min als Ansatz für diese Prognoserechnung gewählt (siehe Abb. 2.92). Die Phase 2 beginnt demnach direkt mit einer Öffnung des Fensters F1.



**Abb. 2.92** Prognoserechnung 1, Annahme: Fenster F1 einmal täglich für 35 min volle 90° Öffnungswinkel geöffnet sowie Tagesgänge für Außen- und Innentemperaturen

Für die Phase 2 wurde als Startwert der Anfangsaktivitätskonzentrationen in den Räumen der mittlere Wert aus den jeweils zwei Messgeräten zum Ende von Phase 1 verwendet: Z1 = 909,9 Bq/(m<sup>3</sup>h), Z2 = 975,3 Bq/(m<sup>3</sup>h), Z3 = 936,9 Bq/(m<sup>3</sup>h). Für Zimmer Z4, zu dem keine Messungen vorliegen, wurde die Konzentration aus der COCOSYS-Rechnung zum Ende der Phase 1 unterstellt: Z4 = 808,4 Bq/(m<sup>3</sup>h).

Die Ergebnisse der Prognoserechnung 1 sind im Kapitel 2.5.4.5 in den Abb. 2.103 bis Abb. 2.111 dargestellt und diskutiert.

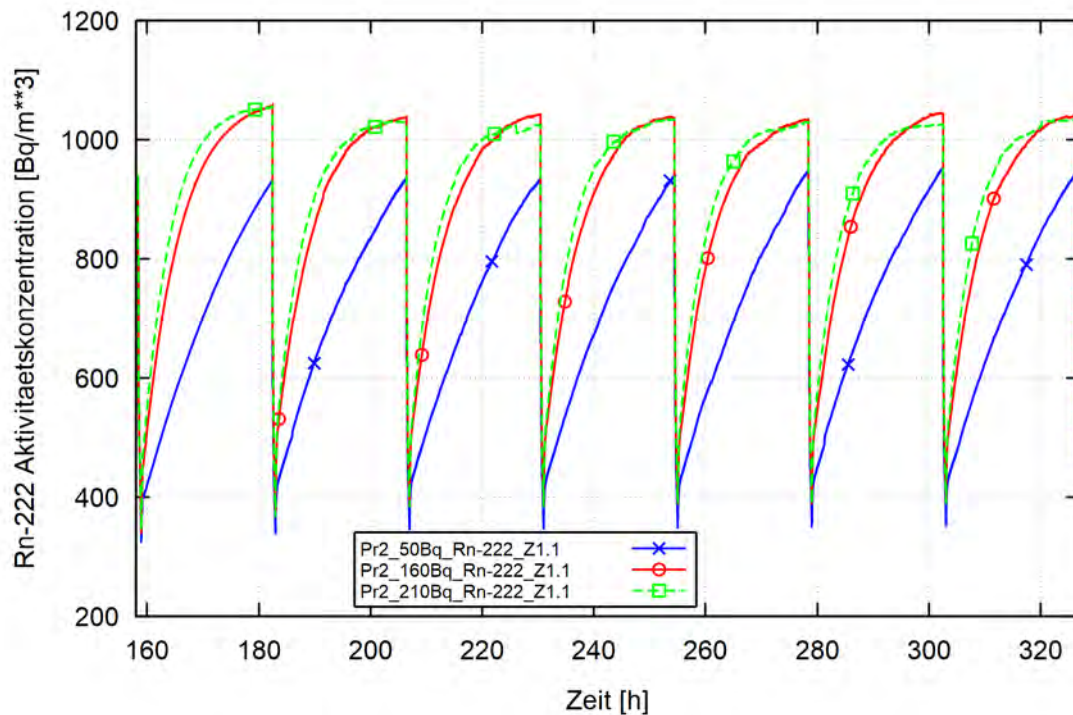
#### 2.5.4.2 Prognoserechnung 2 – Radon-Quellrate und Lüftungszahl

In Vorbereitung der zweiten Prognoserechnung wurden für drei repräsentative Zeitabschnitte aus Phase 2 mit monoton ansteigender Radonaktivitätskonzentration (d. h. ohne Fensteröffnung) analog zum Vorgehen in Kapitel 2.3.2 die jeweilige Quellrate  $Q$  und Lüftungszahl  $L$  ermittelt. Für das Messgerät RTM1688-174 im Büro (Zimmer Z1) ist dies in Tab. 2.10 aufgelistet.

**Tab. 2.10** Bestimmung von  $Q$  und  $L$  durch numerisches Fitting an Messwerte im Zimmer Z1 (Messgerät RTM1688-174) für Phase 2

Abschnitt	$t_{\text{start}}$ [h]	$t_{\text{ende}}$ [h]	$Q_{\text{Rn}}$ [Bq/m <sup>3</sup> h]	$L$ [1/h]
1	192	206,5	160	0,14
2	337,75	350,75	210	0,19
3	352	374,75	50	0,03

Wie bereits für Messphase 1 erhält man je nach Auswahl der Abschnitte unterschiedliche Quellraten und Luftwechselzahlen. Der 3. Abschnitt entspricht den bisherigen Annahmen. Zur Bewertung der Fits wurden Rechnungsvarianten mit diesen Werten und dem Datensatz aus Prognoserechnung 1 durchgeführt. Die für Zimmer Z1 ermittelten Verläufe der Radon-Aktivitätskonzentration sind in Abb. 2.93 verglichen. Die höheren Quellraten und Lüftungszahlen entsprechend Abschnitt 1 und 2 verursachen einerseits einen wesentlich schnelleren Anstieg in den Zeitbereichen nach dem Schließen des Fensters F1. Zum anderen führen sie zu einer deutlichen Ausbildung von Plateaus der Konzentration (Annäherung an die entsprechende stationäre Konzentration). Beide Ergebnisse widersprechen dem gemessenen Verlauf in Messphase 1 (siehe Abb. 2.38 bzw. Abb. 2.39). Die Öffnung von Fenster F1 beeinflusst nur den jeweiligen Konzentrationsabfall, aber nicht die Anstiegsphasen. Da keine Veränderungen am Objekt vorgenommen wurden, ist somit in Phase 2 eine analoge Charakteristik wie in Phase 1 zu erwarten. Für die weiteren Rechnungen wurden deshalb  $Q = 50 \text{ Bq}/(\text{m}^3\text{h})$  und  $L = 0,03 \text{ h}^{-1}$  unterstellt.

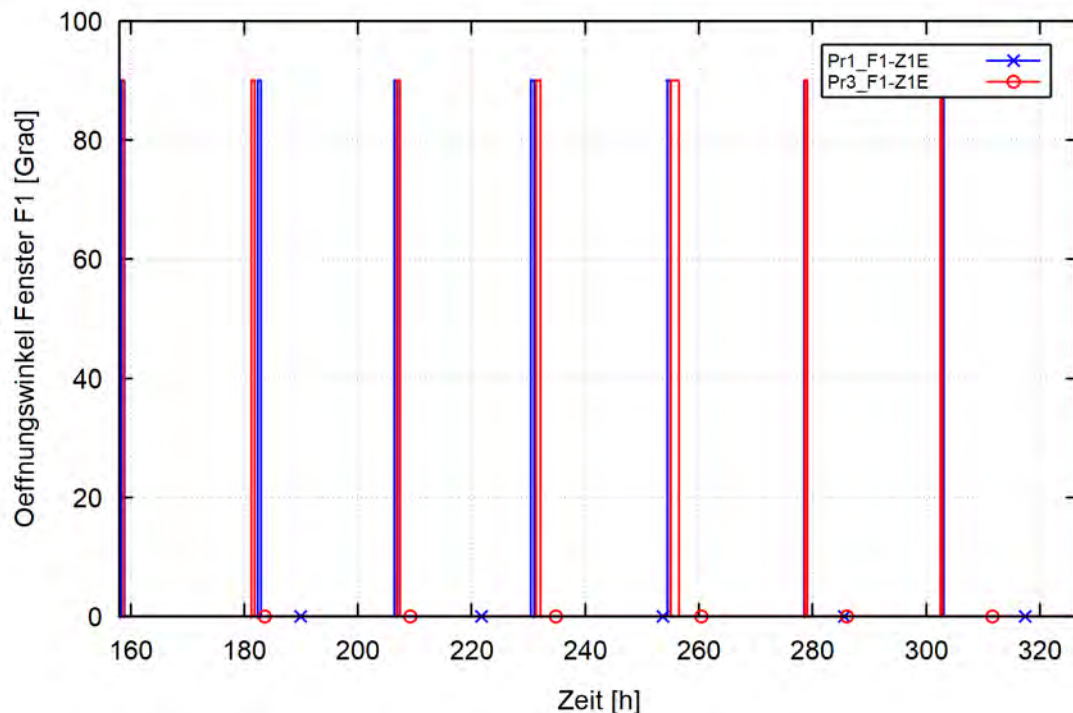


**Abb. 2.93** Prognoserechnung 2, Einfluss der aus den Messdaten für drei Zeitabschnitte abgeleiteten Q und L auf die Aktivitätskonzentration in Zimmer 1

### 2.5.4.3 Prognoserechnung 3 – Öffnung Fenster F1

Im 3. Schritt wurden die Daten der installierten Kontaktschalter bereitgestellt. Wie auch bereits in Messphase 1 (siehe Kapitel 2.5.3.3) waren nur die Angaben zum Öffnen und Schließen des Fensters F1 verwertbar. Vor dem morgendlichen Öffnen von F1 muss zwangsläufig aber die Tür T3 oder die Tür T5 betätigt werden, da nur hierüber der Zutritt zu Zimmer Z2 und Z1 möglich ist. Leider lieferten die Kontaktschalter-Daten zu T3 und T5 keine realistischen Werte.

Die Auswertung des F1-Kontaktschalters zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit der Annahme für die Prognoserechnung 1, d. h. der Eigentümer nimmt sehr regelmäßig morgens die Lüftung seines Arbeitsplatzes vor. Dies erfolgt augenscheinlich auch an Wochenenden (siehe Abb. 2.94, Öffnung bei 206 h und 230 h in, entsprechend Samstag und Sonntag, den 9. bzw. 10. April 2022).



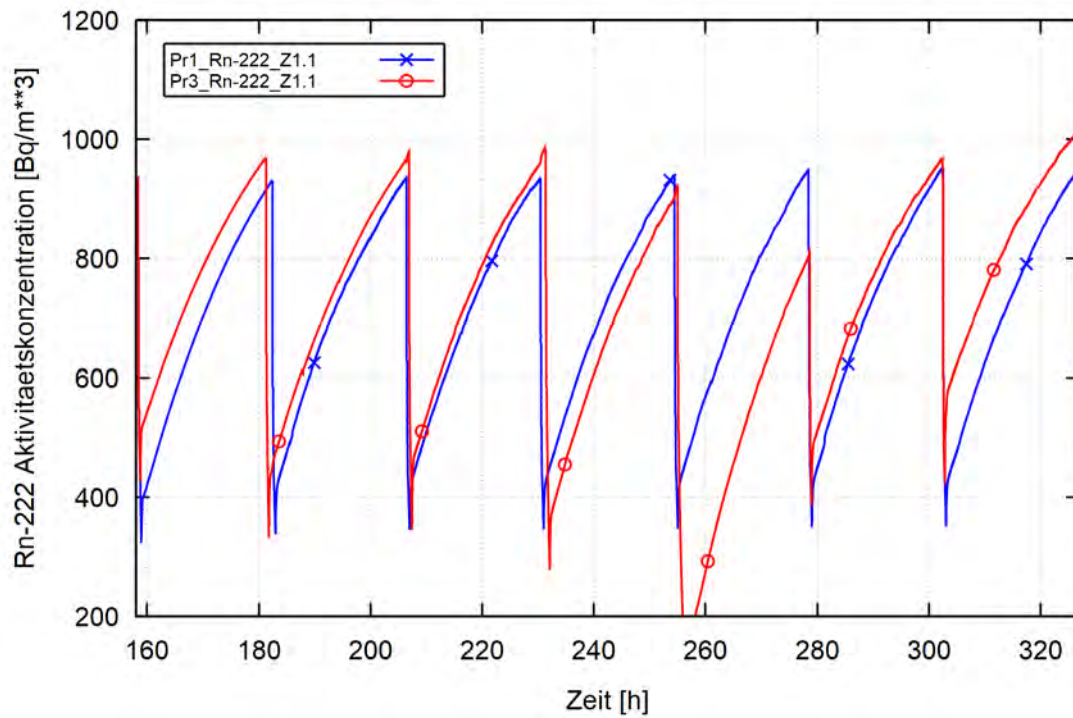
**Abb. 2.94** Vergleich zwischen der Annahme für die Öffnungen von F1 in der Prognoserechnung 1 (Pr1) und den gemessenen Kontaktzeiten (Pr3)

Dementsprechend gibt es in den berechneten zeitlichen Konzentrationen unter Verwendung dieser Informationen nur kleine Unterschiede zur Prognoserechnung 1 (siehe exemplarische Ergebnisse für Zone Z1.1 in Abb. 2.95 und Abb. 2.96). Während sich kleine Verschiebungen der Öffnungsphasen kaum auswirken, ist die Länge der Phasen jedoch signifikant (siehe Untersuchungen in Kapitel 2.5.3.3 für Messphase 1). In den Ergebnissen erkennt man folgende Unterschiede:

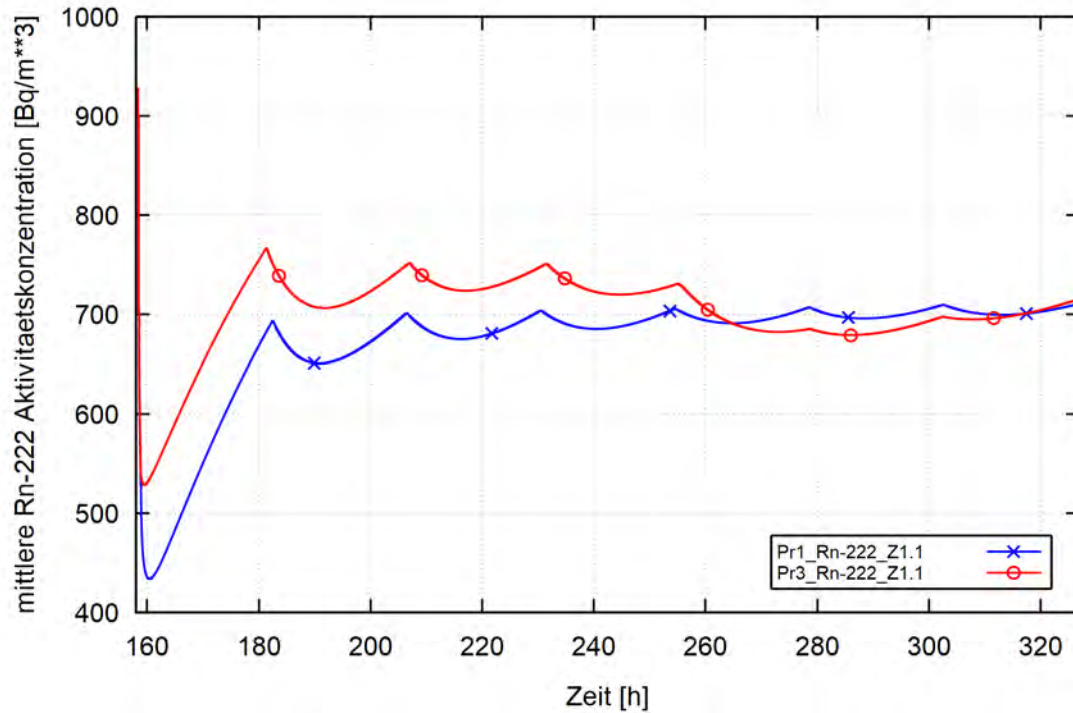
- Die um ca. 10 min kürzere Öffnung bei 158 h begrenzt den Abfall der Konzentration in Objekt (siehe Abb. 2.95) und erhöht damit anschließend den kumulierten Mittelwert (siehe Abb. 2.96). Das Gleiche ist bei 302 h zu sehen.
- Den umgekehrten Effekt hat eine tatsächlich längere Fensteröffnungszeit wie angenommen, z. B. bei 230 h (9 min länger) und insbesondere bei 255 h (58 min länger). Die 58 min längere Lüftung senkt die Konzentration im Büro Z1 deutlich ab, sodass es im Zeitbereich 255 h bis 278 h zu einem zwischenzeitlichen Versatz der beiden Kurven kommt (siehe Abb. 2.95). Damit fällt dann auch der kumulierte Mittelwert unter den in Rechnung 1 (siehe Abb. 2.96).

Ein stark von den Annahmen abweichendes Lüftungsverhalten würde sich signifikant auf die Radonkonzentration und damit auch den kumulierten Mittelwert auswirken (dies wird auch aus den Analysen zu Handlungsempfehlungen in Kapitel 2.6.1 deutlich).

Die Darstellung der Ergebnisse der Rechnung 3 für die drei mit Messgeräten ausgestatteten Zimmer ist in den Vergleichsbildern in Kapitel 2.5.4.5 zu finden.



**Abb. 2.95** Vergleich der Prognoserechnungen 3 und 1 (Pr3 und Pr1), Verlauf der Rn-Aktivitätskonzentration in Z1.1



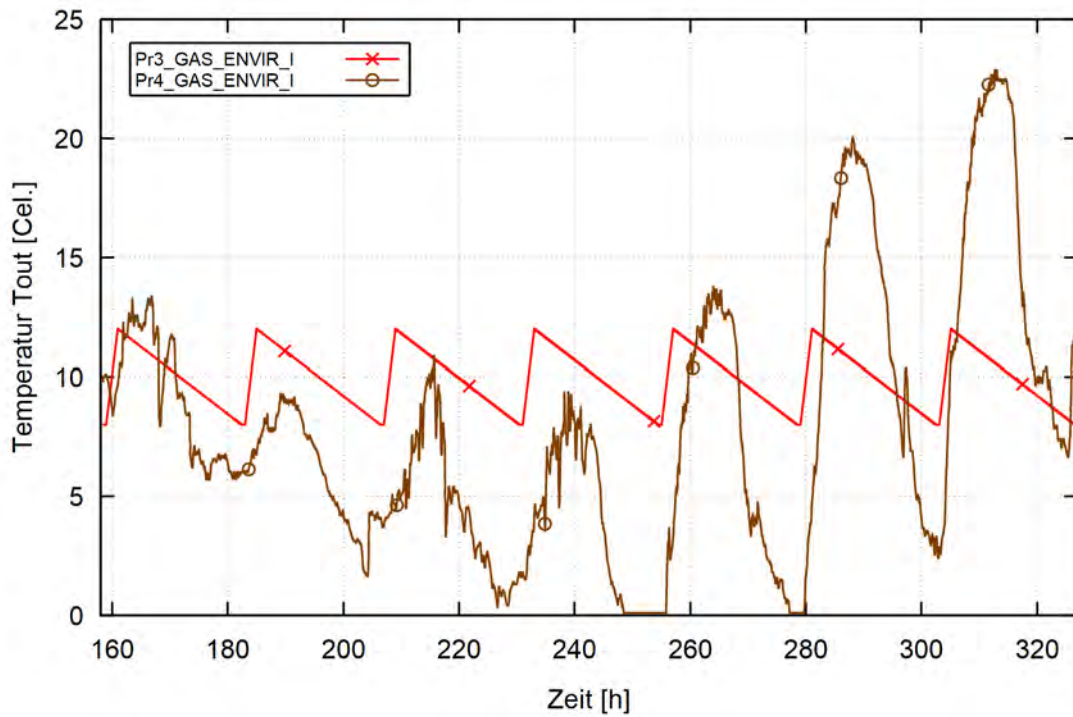
**Abb. 2.96** Vergleich der Prognoserechnungen 3 und 1 (Pr3 und Pr1), Verlauf der kumulierten Mittelwerte der Rn-Aktivitätskonzentration in Z1.1

#### 2.5.4.4 Prognoserechnung 4 – Wetterrandbedingungen

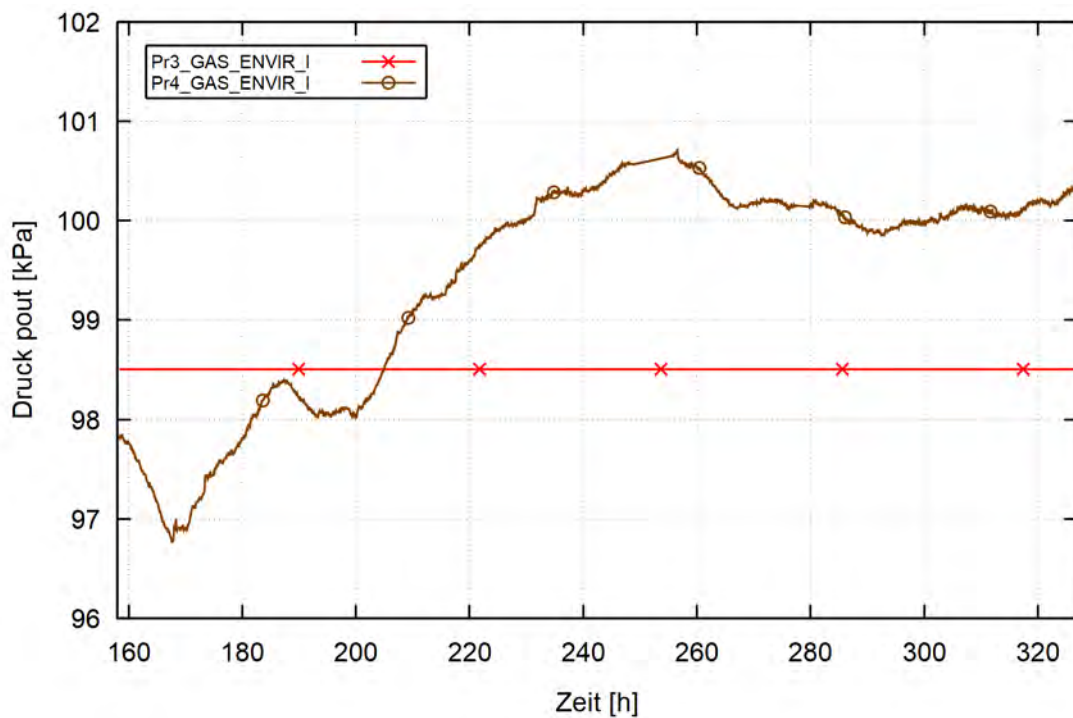
Im letzten 4. Schritt wurden dann noch die gemessenen Daten der Wetterrandbedingungen sowie die Temperaturverläufe in Z1 und Z2 (Einfluss auf Raumheizung) in der Rechnung berücksichtigt.

Die Abb. 2.97 bis Abb. 2.100 zeigen den Vergleich der in Prognoserechnung 1 bis 3 unterstellten Randbedingungen (Pr3) mit den in Rechnung 4 verwendeten exakten Verläufen (Pr4). Es ist ersichtlich, dass Annahmen in realistischen Größenordnungen liegen (sie orientierten sich an den Bedingungen in Messphase 1). Zum Ende der Woche kam es zu einem tendenziellen Temperatur- und Druckanstieg („Frühjahrsbedingungen“), der mit einer Verringerung der mittleren Windstärke verbunden war.

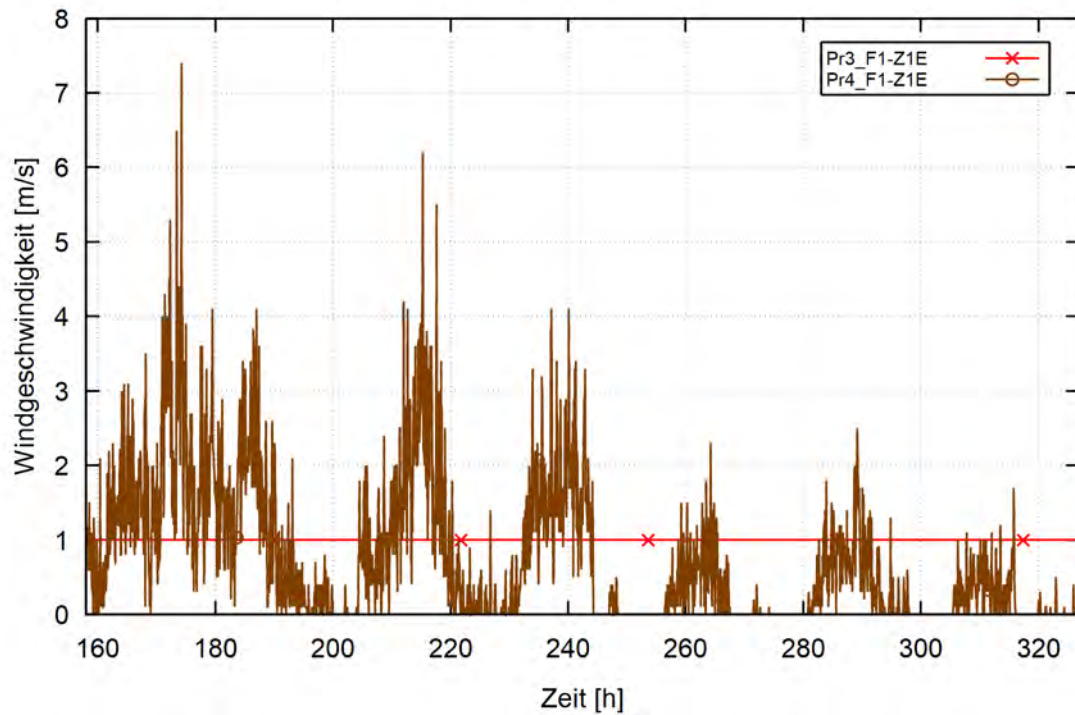




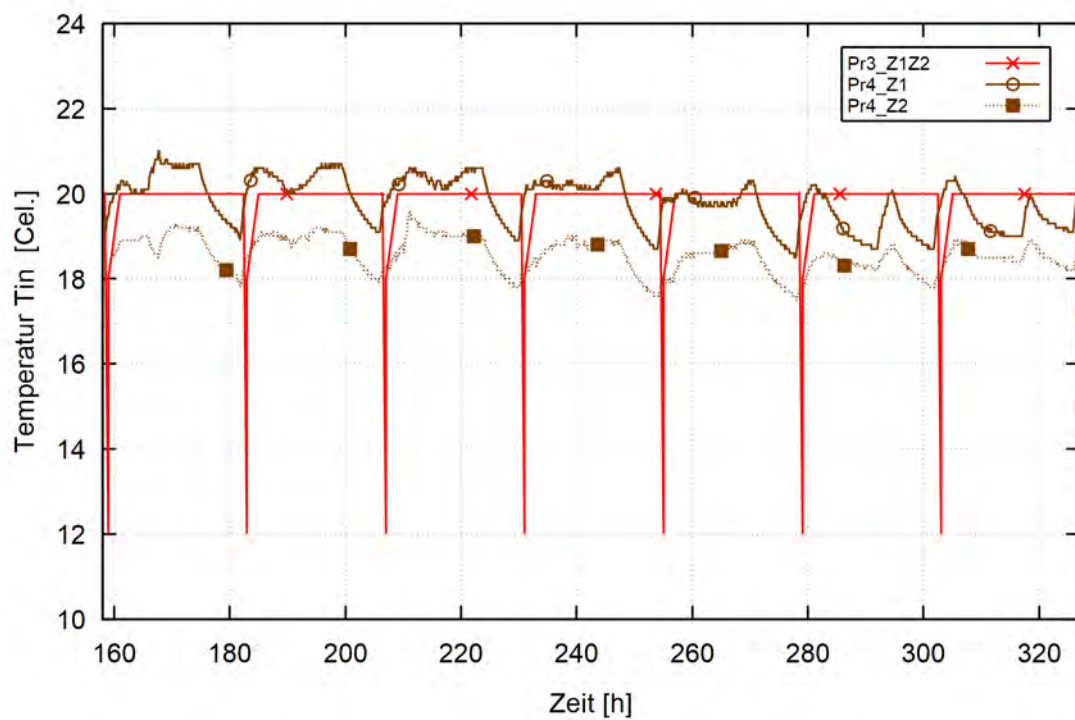
**Abb. 2.97** Prognoserechnung 4, Vergleich der in Rechnung 1 – 3 angenommenen mit den gemessenen Randbedingungen, Außentemperatur



**Abb. 2.98** Prognoserechnung 4, Vergleich der in Rechnung 1 – 3 angenommenen mit den gemessenen Randbedingungen, Umgebungsdruck



**Abb. 2.99** Prognoserechnung 4, Vergleich der in Rechnung 1 – 3 angenommenen mit den gemessenen Randbedingungen, Windgeschwindigkeit

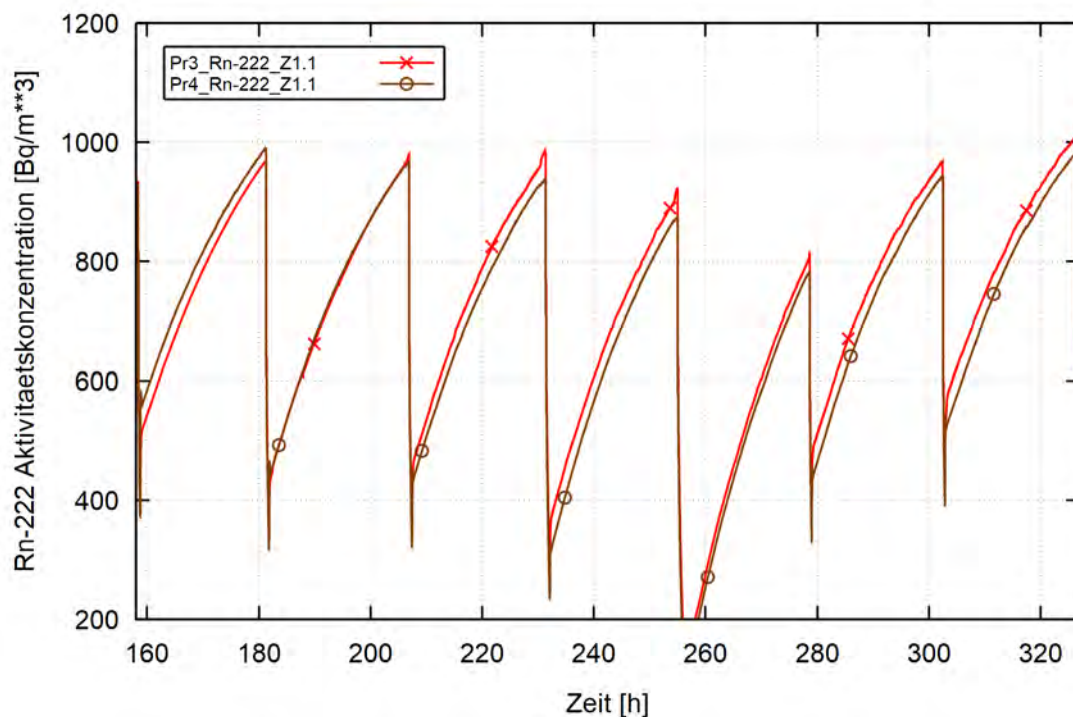


**Abb. 2.100** Prognoserechnung 4, Vergleich der in Rechnung 1 – 3 angenommenen mit den gemessenen Randbedingungen, Innentemperaturen in Z1 und Z2

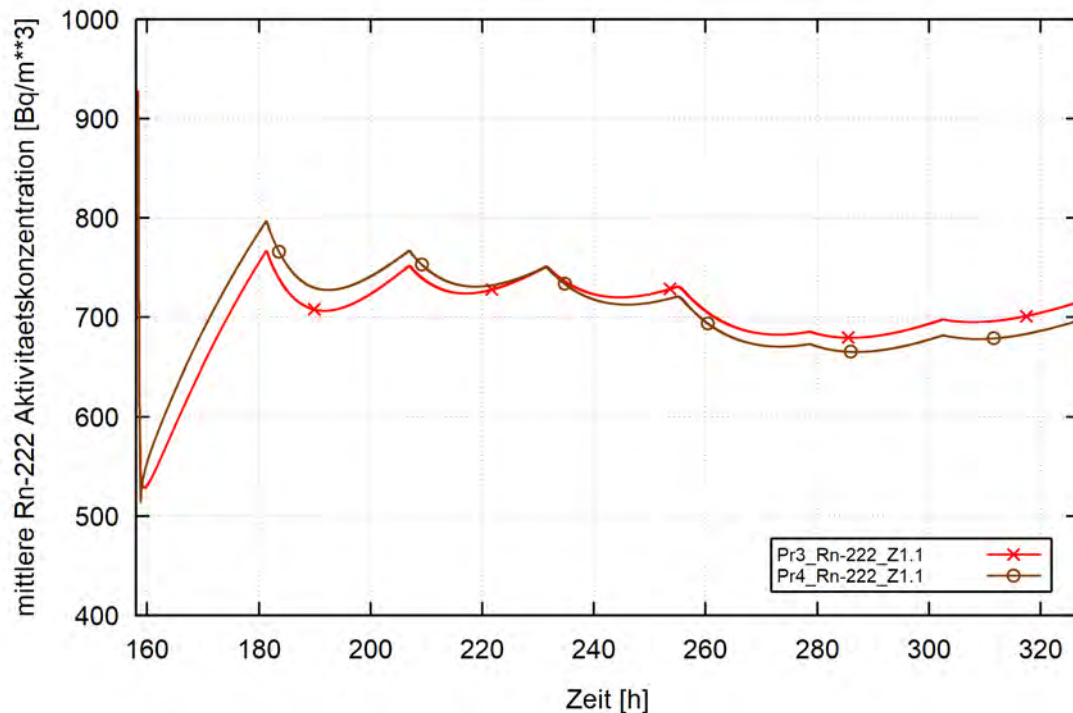


Der Einfluss der Randbedingungen auf den berechneten Konzentrationsverlauf sowie den kumulierten Mittelwert ist in Abb. 2.101 und Abb. 2.102 exemplarisch für Raum Z1 dargestellt. Wie auch schon in Messphase 1 gesehen, hat die Variation der Wetterrandbedingungen geringeren Einfluss als die Unsicherheiten bei Lüftungszahl und Quellrate (Rechnung 2) sowie von Abweichungen bei der aktiven Lüftung mittels Fenster F1. Der Einfluss des Fensters ist hier verhältnismäßig gering, da aufgrund der regelmäßigen morgendlichen Lüftung durch den Eigentümer die Annahme sehr gut mit der Messung übereinstimmt. Weitere Ergebnisse sind in Kapitel 2.5.4.5 dargestellt.

In der Validierungsrechnung zum neuen Fenster-Modell WINDOW (siehe Kapitel 2.4.2.3) wurde bereits gezeigt, dass bezüglich der Einflussparameter Druck, Temperatur und Windgeschwindigkeit hierbei die Windgeschwindigkeit den größten Einfluss auf den Gasaustausch über das geöffnete Fenster haben. In Abb. 2.101 ist der Abfall der Konzentration bei geöffnetem Fenster aber so stark, dass Unterschiede im berechneten Gasaustausch durch das Fenster aufgrund verschiedener Windgeschwindigkeiten nicht sichtbar sind.



**Abb. 2.101** Vergleich der Prognoserechnungen 4 und 3 (Pr4 und Pr3), Verlauf der Rn-Aktivitätskonzentration in Z1.1



**Abb. 2.102** Vergleich der Prognoserechnungen 4 und 3 (Pr4 und Pr3), Verlauf der kumulierten Mittelwerte der Rn-Aktivitätskonzentration in Z1.1

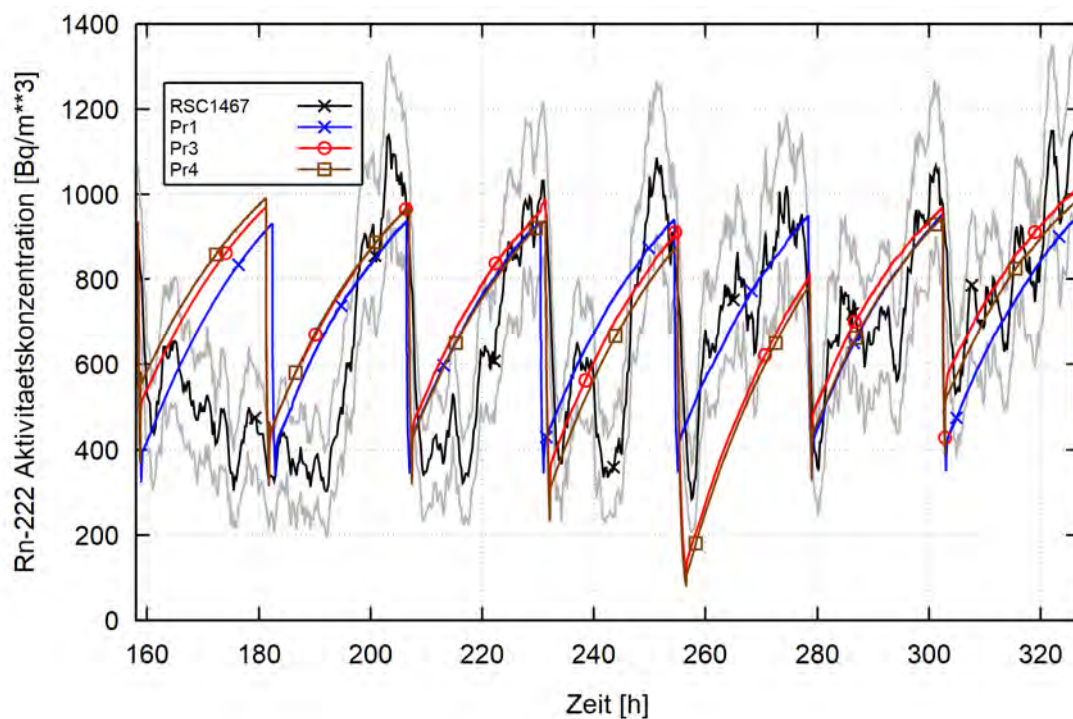
#### 2.5.4.5 Vergleich der Rechnungen mit den Messdaten und Einschätzung der Prognosefähigkeit

Nach Bereitstellung der Messdaten können jetzt die gemessenen Radonaktivitätskonzentrationen und die daraus abgeleiteten kumulierten Mittelwerte für den Zeitbereich 158,25 bis 326,5 h mit den COCOSYS-Ergebnissen der Vorausrechnungen 1, 3 und 4 verglichen werden. Die Rechnung 2 ist sehr ähnlich zu Rechnung 1 und wird deshalb hier nicht weiter diskutiert.

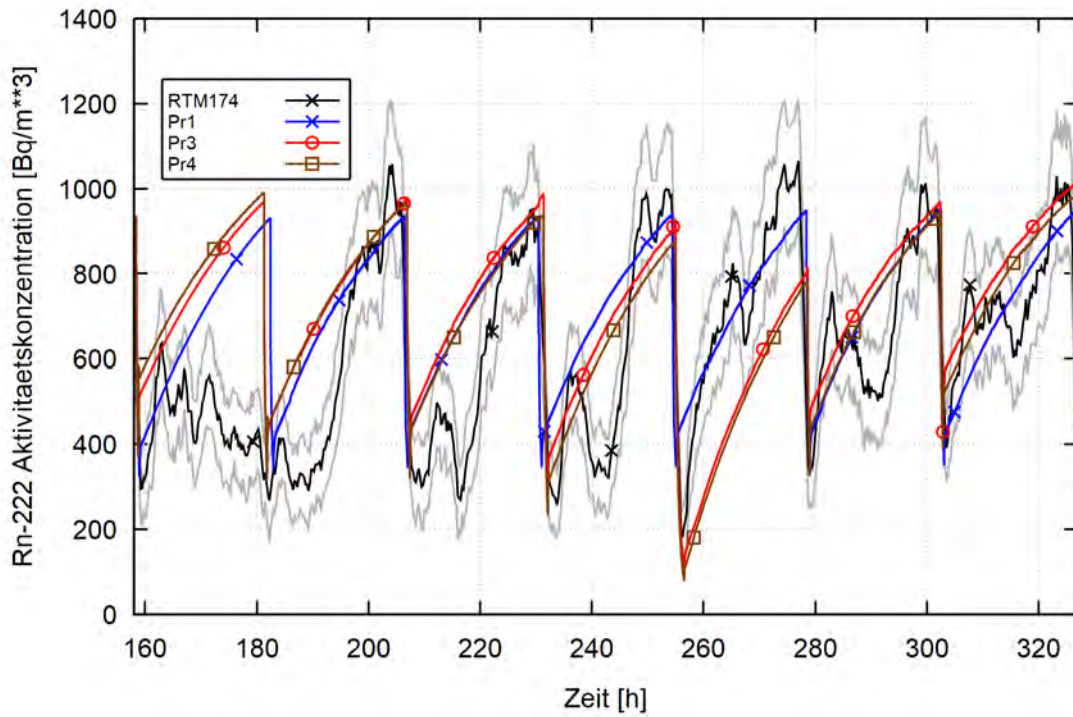
Die prognostizierten zeitlichen Verläufe der Rn-Aktivitätskonzentrationen (siehe Abb. 2.103 bis Abb. 2.108) zeigen generell eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten, insbesondere wenn man auch die Messunsicherheiten berücksichtigt. Der wesentliche Grund dafür ist die Tatsache, dass der Eigentümer die Lüftung seines Arbeitsplatzes sehr regelmäßig vornimmt, so dass die prognostizierten sehr nahe an den tatsächlichen Fensteröffnungsintervallen liegen. Stärkere Abweichungen im Lüftungsverhalten oder anderen wesentlichen Randbedingungen werden zwangsläufig zu signifikant anderen Ergebnissen führen (siehe offene Nachrechnungen in Kapitel 2.5.3). Ohne genaue Kenntnis von zeitabhängigen Lüftungsdaten, d. h. Daten zur Öffnung von Fenstern

und Türen, sowie der Quellrate, sind keine realistische Prognosen von lokalen zeitvariablen Konzentrationen möglich. Dies ist kein COCOSYS-spezifisches, sondern ein generelles Problem jeder numerischen Simulation; hier liegen die Grenzen von Prognose-rechnungen.

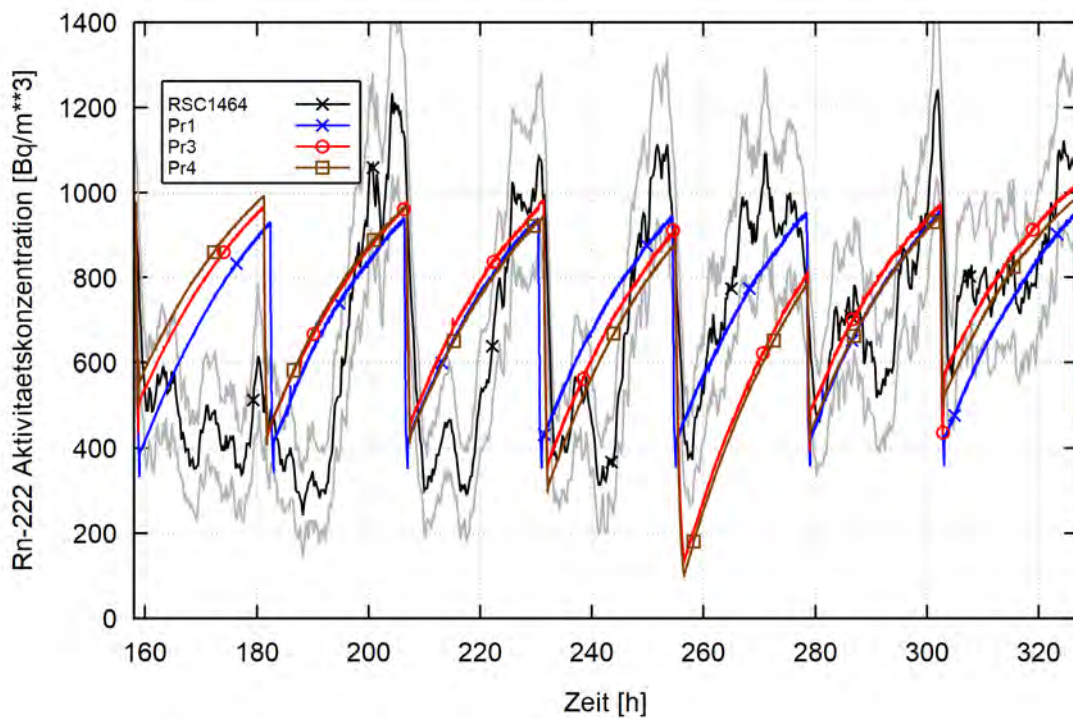
Die Ergebnisse der Prognoserechnungen 1 bis 4 weichen relativ wenig voneinander ab. Dies verdeutlicht für das gewählte Messobjekt den Haupteinfluss von Quellstärke  $Q$ , Lüftungszahl  $L$  und F1-Fensteröffnung, die in allen Rechnungsvarianten gleich bzw. sehr ähnlich sind. Die Wetterrandbedingungen (Atmosphärendruck, Temperaturen, Windgeschwindigkeit) sind hier von untergeordneter Bedeutung.



**Abb. 2.103** Prognoserechnungen der Messphase 2, Aktivitätskonzentration in Z1.1 im Vergleich zur Messung RSC1467 (mit Messunsicherheiten)

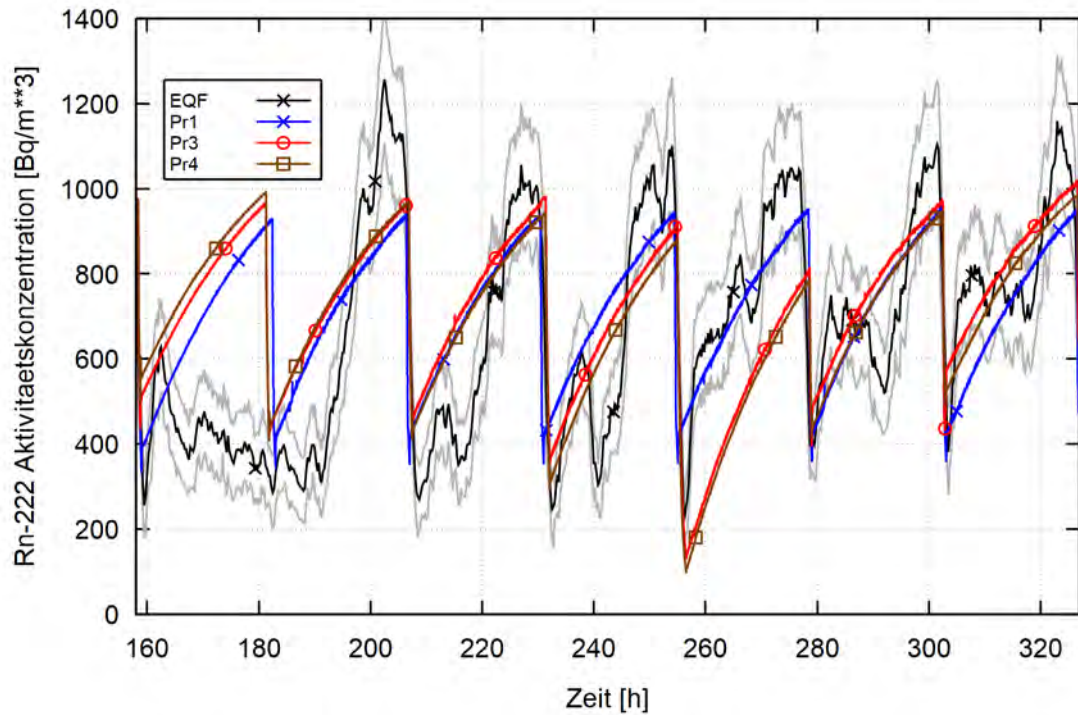


**Abb. 2.104** Prognoserechnungen der Messphase 2, Aktivitätskonzentration in Z1.1 im Vergleich zur Messung RTM174 (mit Messunsicherheiten)

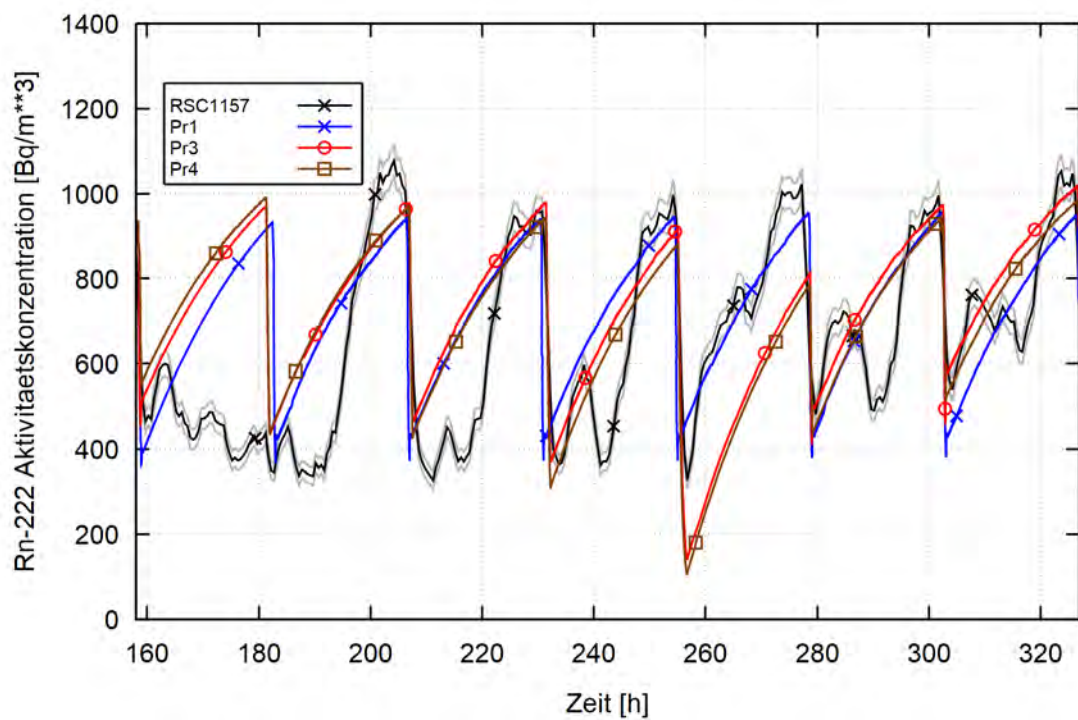


**Abb. 2.105** Prognoserechnungen der Messphase 2, Aktivitätskonzentration in Z2.1 im Vergleich zur Messung EQF (mit Messunsicherheiten)

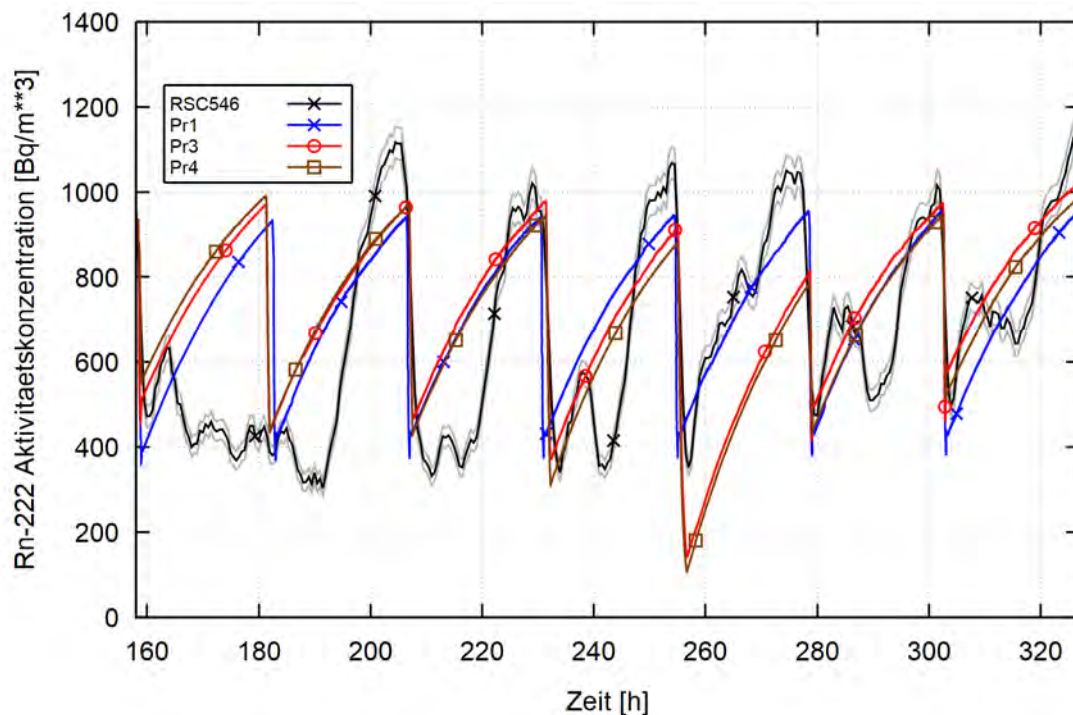




**Abb. 2.106** Prognoserechnungen der Messphase 2, Aktivitätskonzentration in Z2.1 im Vergleich zur Messung RSC1464 (mit Messunsicherheiten)



**Abb. 2.107** Prognoserechnungen der Messphase 2, Aktivitätskonzentration in Z3.1 im Vergleich zur Messung RSC1157 (mit Messunsicherheiten)



**Abb. 2.108** Prognoserechnungen der Messphase 2, Aktivitätskonzentration in Z3.1 im Vergleich zur Messung RSC546 (mit Messunsicherheiten)

Eine detailliertere Betrachtung der Rechenergebnisse ergibt aber auch, dass in verschiedenen Zeitphasen keine gute Übereinstimmung der Prognosen mit den Messungen erreicht werden konnte. Am größten sind diese Abweichungen zu Beginn im Zeitraum 165 h bis 195 h. Die Rechnungen prognostizieren für diesen Zeitraum eine zunehmende Konzentration bei geschlossenem Fenster bis zur nächsten angenommenen Öffnung bei etwa 183 h (siehe z. B. Abb. 2.103), während die Messdaten nach einem kleinen Anstieg eher abnehmende Konzentrationen (mit Schwankungen) zeigen. Dieser Zeitbereich, in dem COCOSYS zu hohe Aktivitätskonzentrationen berechnet, führt auch zum Anstieg der berechneten kumulierten über die gemessenen Mittelwerte (siehe Abb. 2.109 bis Abb. 2.111) (Bemerkung: der ermittelte Unsicherheitsbereich wurde analog zur Verfahrensweise in Kapitel 2.5.3.4.1 erstellt und basiert allein auf den Werten im Zeitbereich 158,25 bis 326,5 h). Diese Überschätzung wird bis zum Ende des Rechnungszeitraumes der Messphase 2 (326,5 h) beibehalten.

Wie bereits in Kapitel 2.5.3.4.1 erläutert, kann ein langsamer Abfall der gemessenen Aktivitätskonzentration wie zwischen 165 h und ~192 h bei geschlossenem Fenster F1 auf Basis der verfügbaren Messdaten nicht eindeutig aufgeklärt werden. Ein ähnliches Verhalten, allerdings nicht so ausgeprägt, tritt zwischen 210 und 218 h, zwischen 238 und 243 h oder zwischen 285 h und 295 h auf. Vermutet wird ein erhöhter Luftaustausch

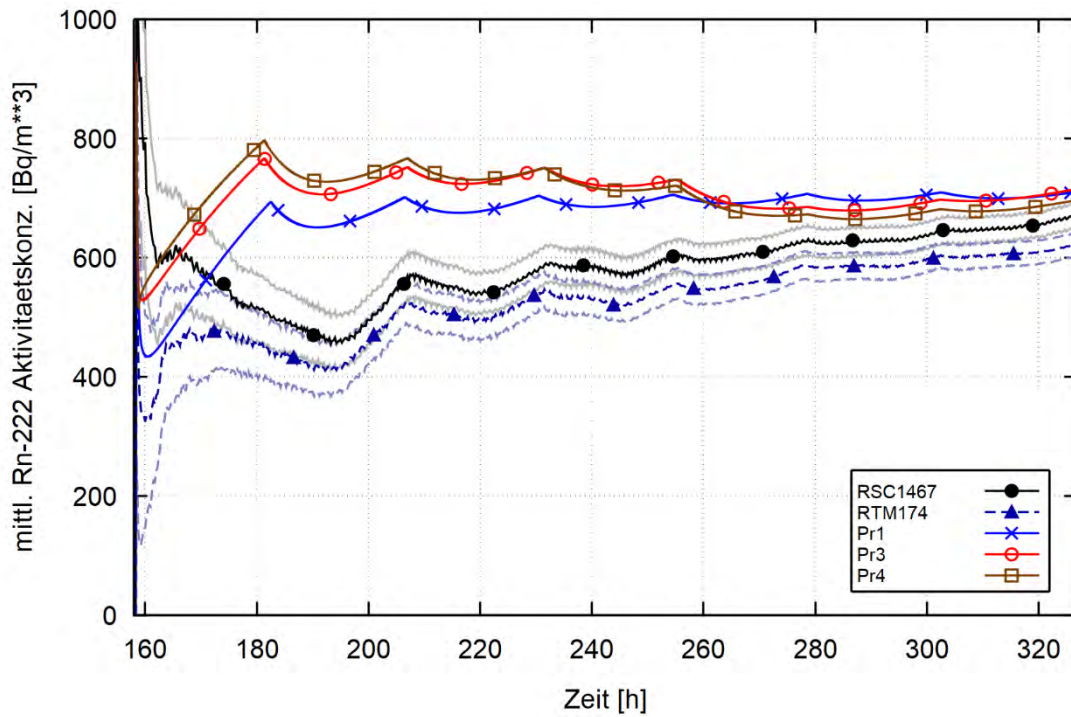
durch Öffnung von Türen/Fenstern im Erd- und/oder Obergeschoß (Kamin-Effekt), wozu aber keine Angaben vorliegen.

Die von COCOSYS vorhergesagten kumulierten Mittelwerte liegen damit etwas oberhalb des Unsicherheitsbereiches der Messwerte. Die Überschätzung beträgt in der finalen Rechnung Pr4 für die einzelnen Messwerte und Zimmer zwischen 3,3 und 12,1 % (siehe Tab. 2.11).

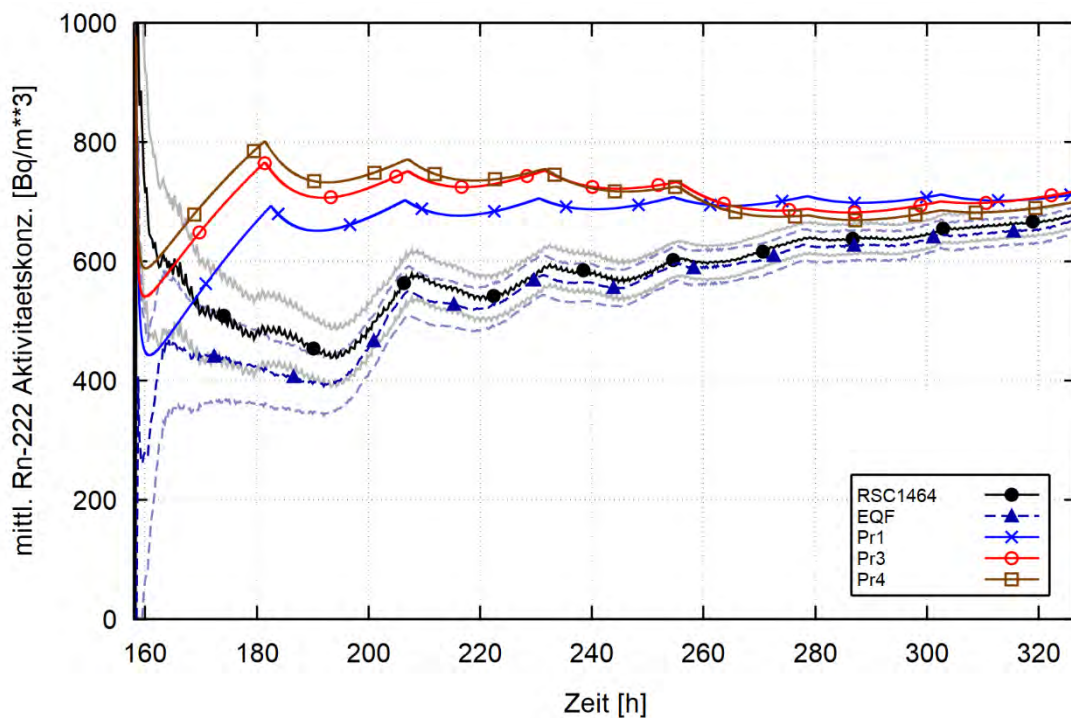
Der Mittelwert auf Basis des über 38 Tage (d. h. 912 h) im Zimmer Z1 ausgelegten Exposimeters beträgt  $815 \pm 110 \text{ Bq/m}^3$ ; damit liegt der von COCOSYS prognostizierte Wert 14,6 % unterhalb des Exposimeters und knapp außerhalb des angegebenen Unsicherheitsbereiches. In den Zimmern Z2 und Z3 stimmen die von COCOSYS berechneten Werte sehr gut mit den Exposimeter-Daten von  $720 \pm 100$  bzw.  $719 \pm 100 \text{ Bq/m}^3$  überein. Ihre Abweichung von  $-20 \text{ Bq/m}^3$  (-2,8 %) bzw.  $-15,6 \text{ Bq/m}^3$  (-2,2 %) ist deutlich kleiner als der Unsicherheitsbereich dieser Exposimeter.

**Tab. 2.11** Prognoserechnungen der Messphase 2: kumulierte Mittelwerte der COCOSYS Aktivitätskonzentration in Rechnung Pr4 im Vergleich zur Messung 158,25 h bis 326,5 h bzw. Exposimeter /KEM 22/

Zimmer	Messung		Mittelwerte COCOSYS (Bq/m <sup>3</sup> )	Abweichung zum Messwert (%)
	Messgerät	Mittelwert (Bq/m <sup>3</sup> )		
Z1	RSC1467	671,8	696,1	3,6
	RTM174	620,9		12,1
	<i>Exposimeter 103125324 (nach 38 Tagen)</i>	<i>815,0</i>		<i>-14,6</i>
Z2	RSC1464	677,4	700,0	3,3
	EQF	664,7		5,3
	<i>Exposimeter 103118311 (nach 38 Tagen)</i>	<i>720</i>		<i>-2,8</i>
Z3	RSC1157	653,5	703,4	7,6
	RSC546	664,7		5,8
	<i>Exposimeter 103121851 (nach 38 Tagen)</i>	<i>719</i>		<i>-2,2</i>

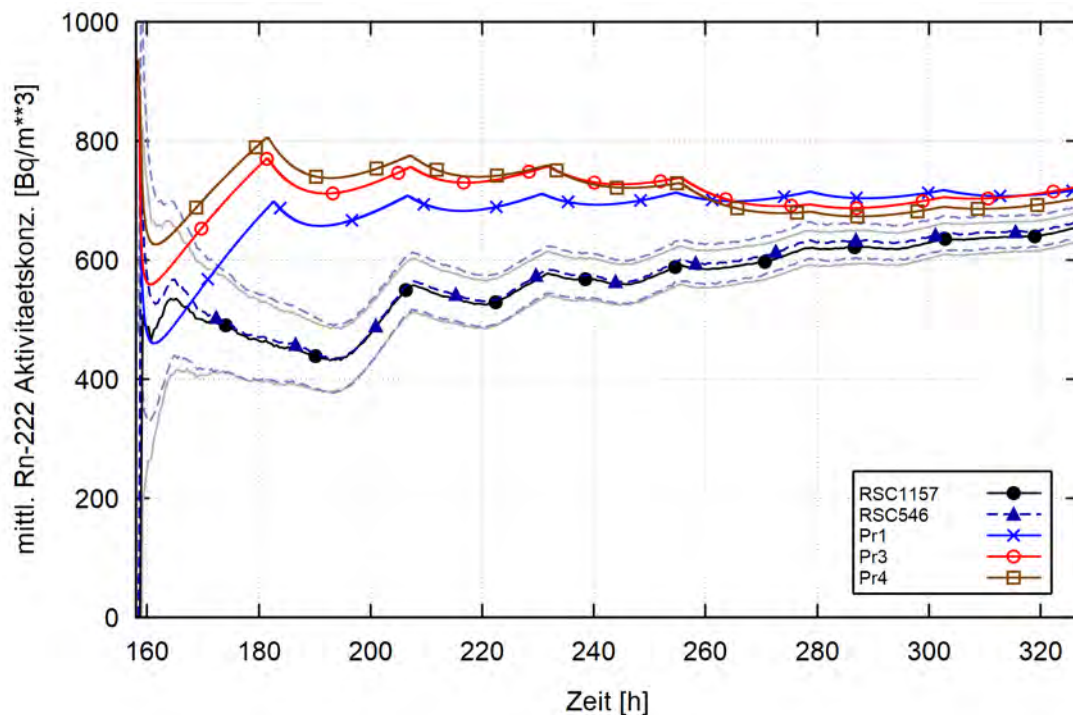


**Abb. 2.109** Prognoserechnungen der Messphase 2, kumulierter Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z1.1 im Vergleich zur Messung (mit statistischer Messunsicherheit)



**Abb. 2.110** Prognoserechnungen der Messphase 2, kumulierter Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z2.1 im Vergleich zur Messung (mit statistischer Messunsicherheit)





**Abb. 2.111** Prognoserechnungen der Messphase 2, kumulierter Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z3.1 im Vergleich zur Messung (mit statistischer Messunsicherheit)

### 2.5.5 COCOSYS-Rechnung zur Messphase 3 – „Sommermessung“

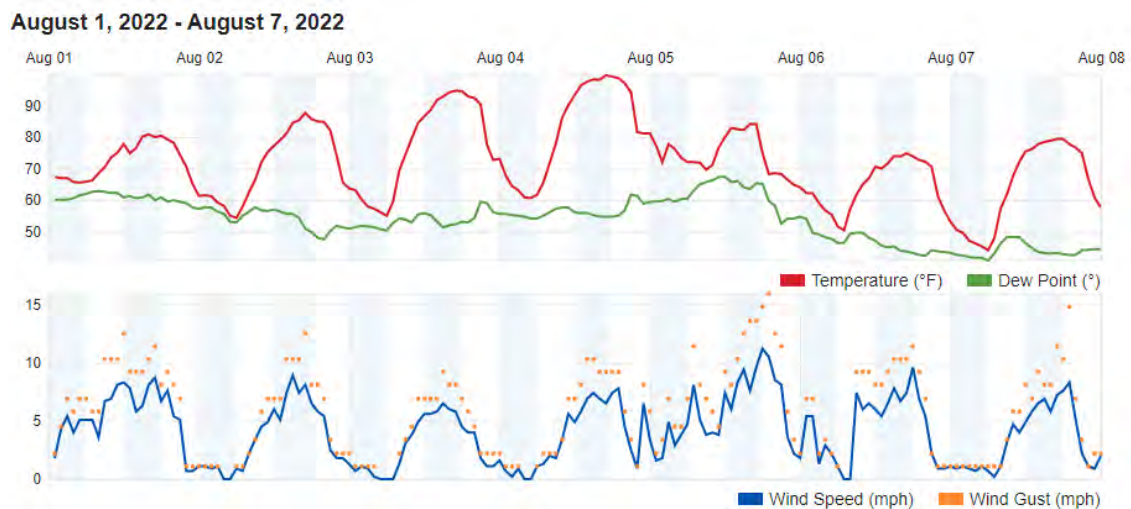
Die Analysen zur Messphase 3 „Sommer“ wurden zusätzlich zum ursprünglichen Arbeitsprogramm durchgeführt. Durch diese Nachrechnungen sollte mit COCOSYS ein Mittelwert für diese Bedingungen im Objekt Oberheldungen berechnet und so die Voraussetzung geschaffen werden, um aus der Kombination aller drei Phasen einen Jahresmittelwert der Radonaktivitätskonzentration abschätzen zu können.

Für diese dritte Messphase liegt allerdings nur ein reduzierter Satz von Messdaten vor, da nach 38 Tagen die Mehrzahl der Geräte auf Verlangen des Objekteigentümers abgebaut werden musste. Lediglich 2 Radon-Messgeräte im Büro und Druckerraum (Zimmer Z1 und Z2, Geräte RSC1467 und RSC1464 mit geräuschloser Messung) konnten weiter betrieben werden (siehe Kapitel 2.3.2.2). Damit liegen für diese Phase zwei Messreihen zur Radon-Aktivitätskonzentration sowie Angaben zur Innentemperatur und zum Druck vor (Datenaufzeichnung in Radon-Messgeräten). Da die Tür- und Fenster-Sensoren ebenfalls demontiert werden mussten, standen für diese „Sommer“-Phase keine Infor-

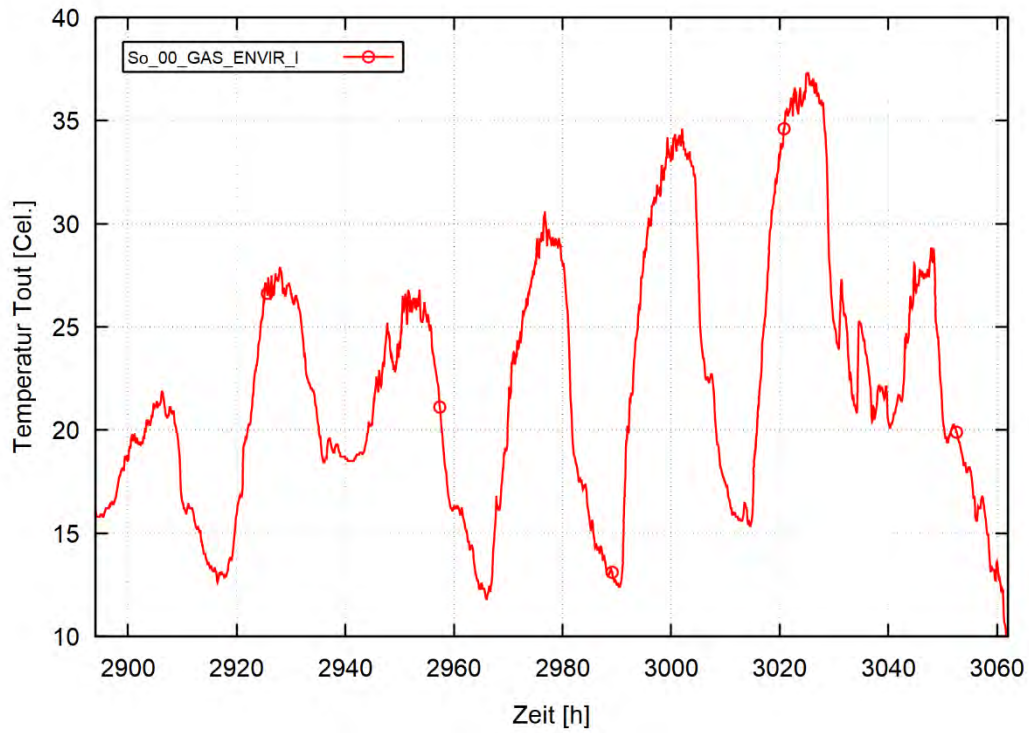
mationen zur Öffnung des Fensters F1 zur Verfügung. Auf Nachfrage der GRS zum Lüftungsverhalten informierte der Eigentümer über „das *größtenteils tagsüber geöffnete Kellerfenster*“ (siehe Abb. 2.32) /HRE 22/.

Da die GRS-eigene Wetterstation ebenfalls entfernt werden musste und somit keine eigenen Messungen der Wetterparameter vorgenommen werden konnten, wurde im Internet nach frei verfügbaren Daten einer Station in der Nähe des Objektes Oberheldrungen recherchiert /DNT 22b/. Diese Daten zu Druck, Außentemperatur und Windgeschwindigkeit (siehe z. B. Abb. 2.112, Messungen im Internet sind nur wochenweise dargestellt) wurden als Wetter-Randbedingung für COCOSYS verwendet (siehe Abb. 2.113 bis Abb. 2.115).

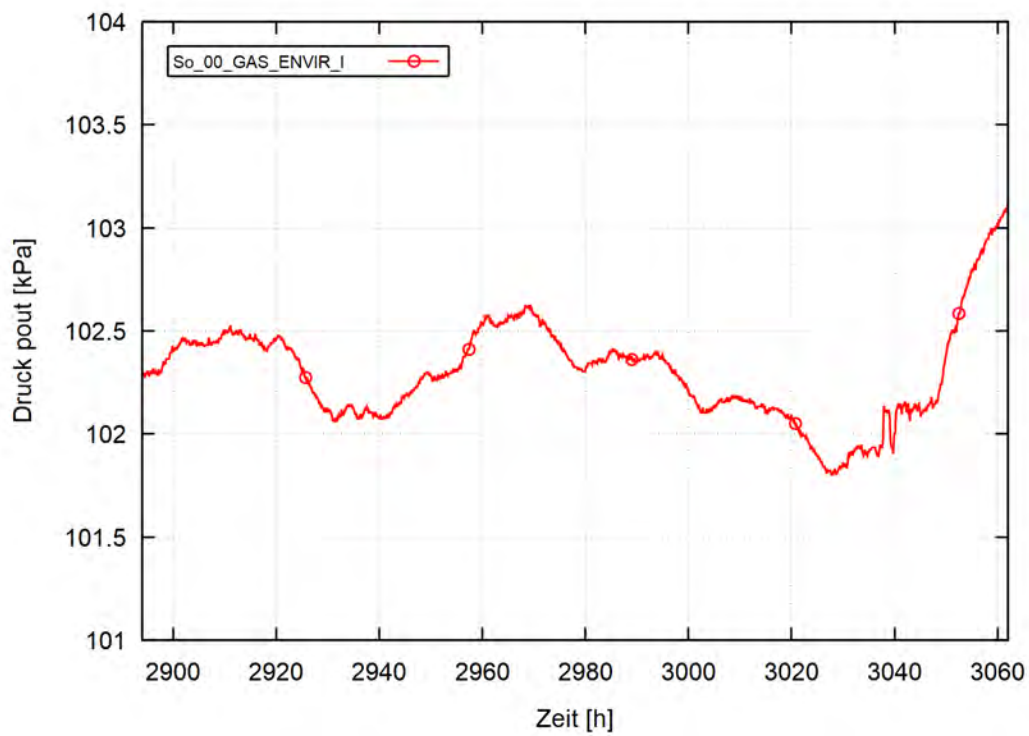
Zu Beginn dieser Periode traten Tageshöchsttemperaturen um 20 °C auf, die gegen Ende der Woche bis auf 37 °C stiegen. Deshalb wurde der Start der COCOSYS-Simulation zur 3. Phase auf den 30. Juli 2022, 5:46 Uhr (2 894 h ab Beginn der Messungen) gesetzt und das Ende auf den 6. August 2022, 5:31 Uhr (3 062 h), so dass der simulierte Zeitraum 168 h umfasst.



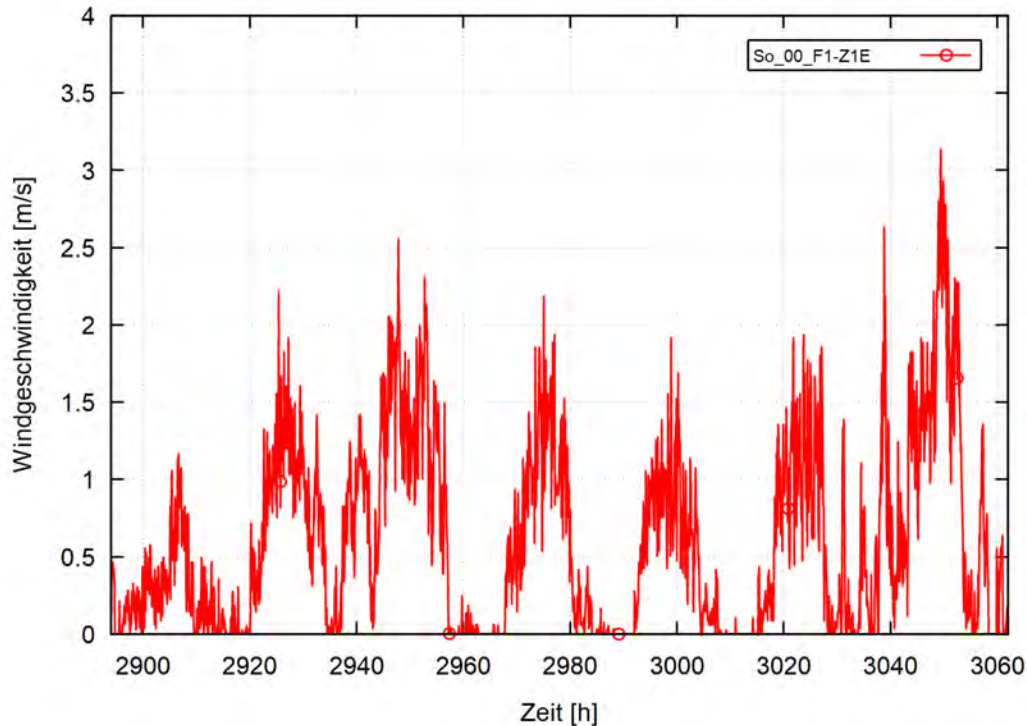
**Abb. 2.112** Wetterstation Oberheldrungen IOBERH132, ausgewählte Wetterdaten vom 1. bis 7. August 2022 /DNT 22b/



**Abb. 2.113** Nachrechnung Messphase 3 „Sommer“, Randbedingung Außentemperatur  
30. Juli bis 6. August



**Abb. 2.114** Nachrechnung Messphase 3 „Sommer“, Randbedingung Umgebungsdruck  
30. Juli bis 6. August

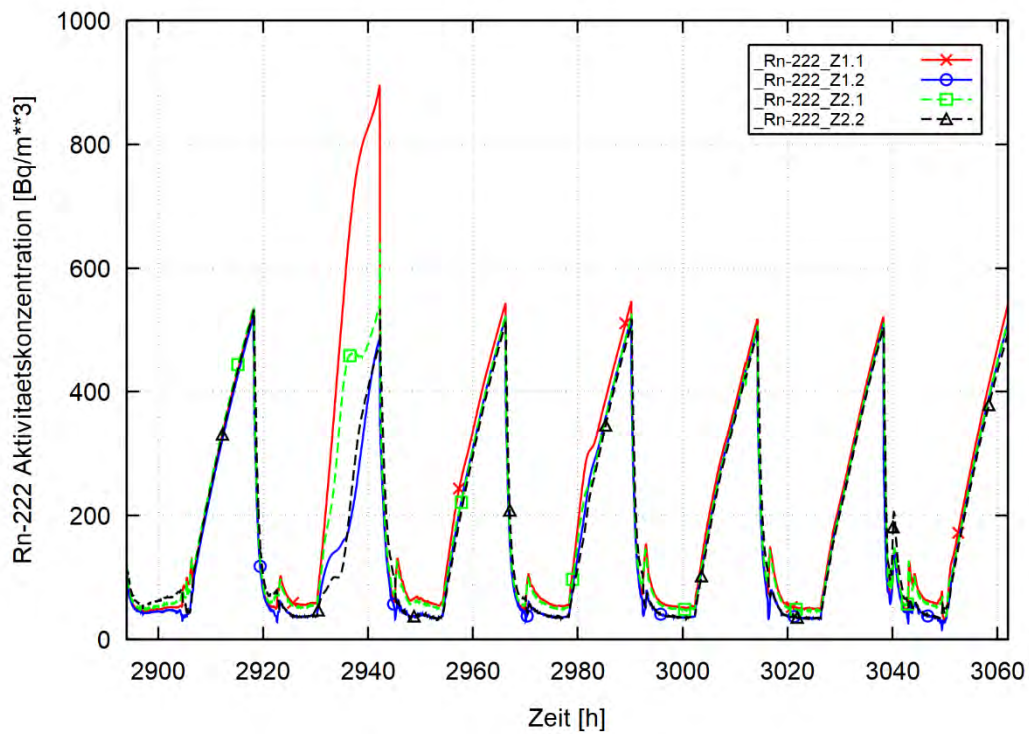


**Abb. 2.115** Nachrechnung Messphase 3 „Sommer“, Randbedingung Windgeschwindigkeit 30. Juli bis 6. August

Auf Grund der Sommer-Bedingungen und der hohen Umgebungstemperaturen wird davon ausgegangen, dass die Heizung im Objekt nicht betrieben wurde. Für die Rn-222 Quellstärke  $Q$  sowie die Lüftungszahl  $L$  (Grundlüftung durch Undichtigkeiten bei geschlossenem Fenster) wurden die gleichen Daten wie in Messphase 1 und 2 verwendet ( $Q = 50 \text{ Bq}/(\text{m}^3\text{h})$ ,  $L = 0,03 \text{ h}^{-1}$ ). Als COCOSYS-Raummodell kam die detaillierte Nodalisierung mit Unterteilung der Zimmer zur Anwendung (Abb. 2.36). Die Radon-Anfangskonzentrationen in den Räumen wurden entsprechend den Messwerten in Zimmer Z1 und Z2 gesetzt (64,9 bzw. 99,0  $\text{Bq}/\text{m}^3$  zum Anfangszeitpunkt 2.894 h), für Z3 und Z4 wurde der Wert aus Z2 verwendet. Entsprechend der Aussage des Eigentümers /HRE 22/ wurde für das Fenster F1 eine tägliche, 12-stündige volle  $90^\circ$ -Öffnung angesetzt. In Übereinstimmung mit der typischen Lüftungspraxis in den Messphasen 1 und 2 wurde es jeweils um 6:00 Uhr geöffnet.

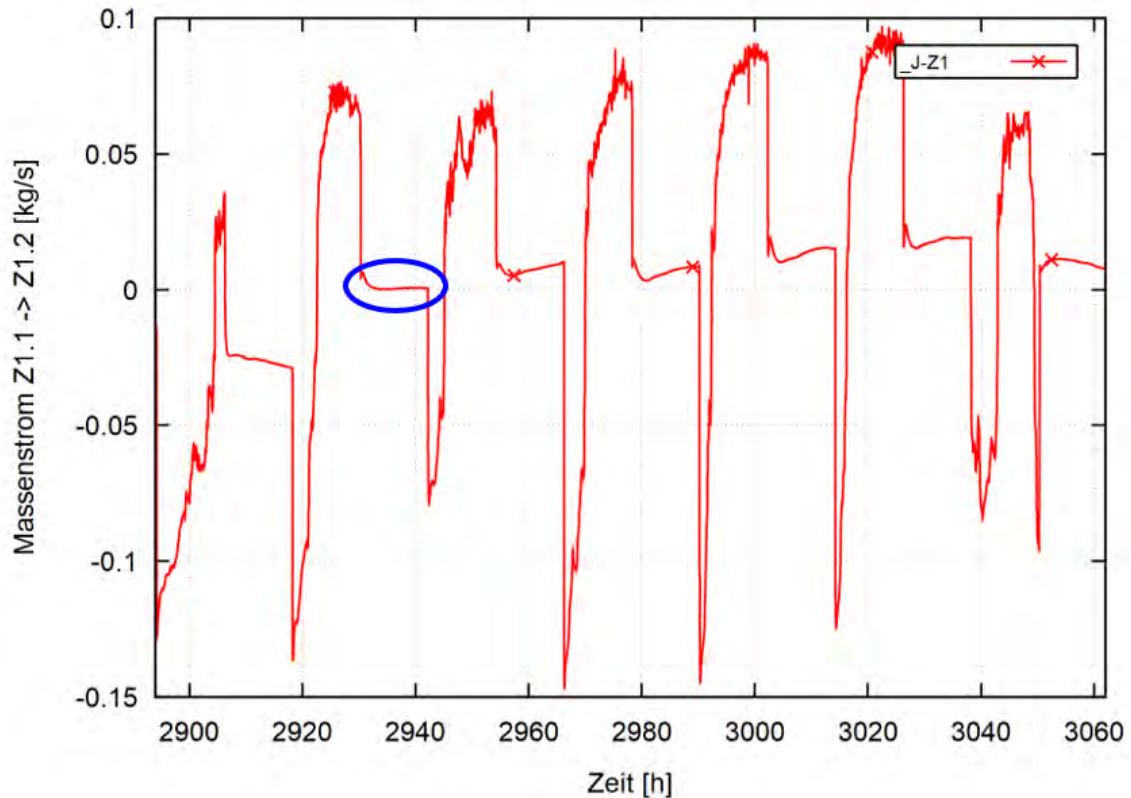
Mit diesen Anfangs- und Randbedingungen wurde eine erste Rechnung, Variante „So\_00“, durchgeführt. Diese zeigte auf Grund der regelmäßigen Öffnung von Fenster F1 logischerweise einen streng periodischen Verlauf der Radonkonzentrationen (siehe Tagesgänge, Abb. 2.116). Eine Ausnahme ist der Zeitbereich 2.930 – 2.942 h (zweiter

Tag; nach dem Schließen des Fensters F1). In der COCOSYS-Rechnung kommt es unter den vorliegenden thermohydraulischen Randbedingungen für eine gewisse Zeit zur Stagnation der Atmosphärenkonvektion in Zimmer Z1 (siehe Abb. 2.117), sodass sich das über den Boden in Z1.1 eintretende Rn-222 vorübergehend im unteren Raumbereich Z1.1 ansammelt. Generell kann festgestellt werden, dass sich auch in dieser „Sommer“-Periode eine homogene Radon-Konzentration innerhalb des Messobjektes einstellt.



**Abb. 2.116** Erste Nachrechnung Messphase 3, Radon-Aktivitätskonzentration in Z1.1 bis Z2.2

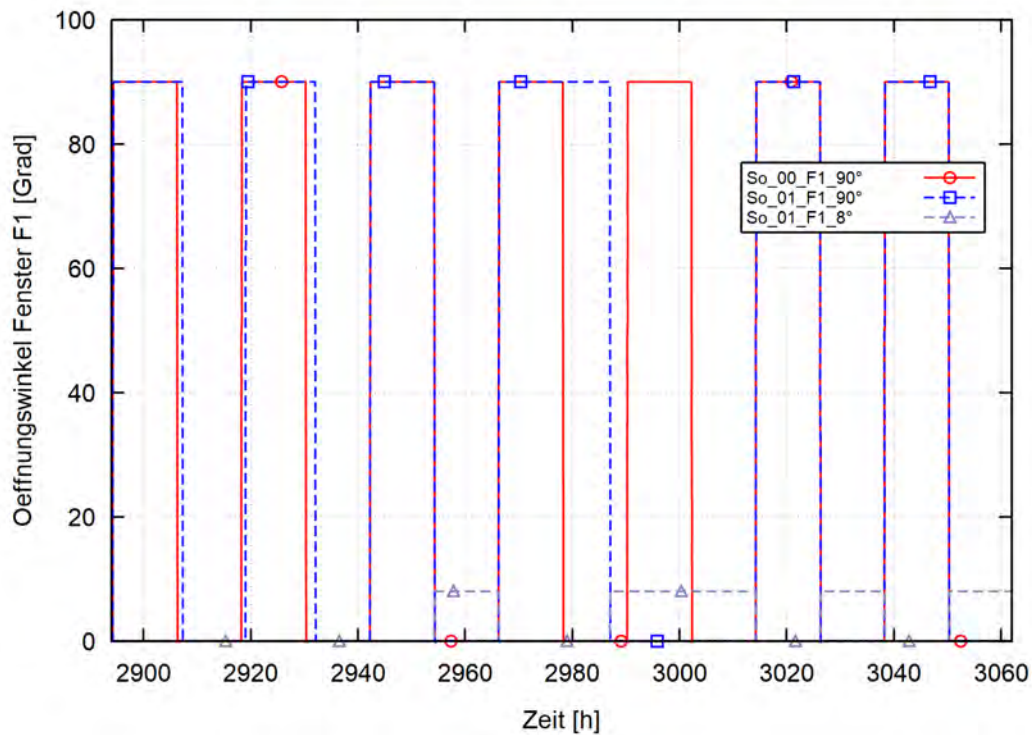




**Abb. 2.117** Erste Nachrechnung Messphase 3, Atmosphärenströmung durch Verbindung J-Z1 (von Zone Z1.1 nach Z2.1), Stagnation zwischen 2.930 und 2.940 h

Der Vergleich der COCOSYS Variante „So\_00“ mit den Messdaten zeigt, dass diese innerhalb der ersten zwei Tage gut mit der Rechnung übereinstimmen (siehe Abb. 2.119 und Abb. 2.120), aber nachfolgend deutlich unterhalb der Rechnung liegen und keine so ausgeprägten Tagesgänge mehr aufweisen. Der Hauptgrund für die Abweichungen wird geänderten Lüftungsbedingungen zugeschrieben; für eine abrupt verringerte Quellrate liegen keine Indizien vor. Weder aus Messungen noch nach Rückfrage an den Eigentümer gibt es dazu weitere über /HRE 22/ hinausgehende Informationen, d. h. ob z. B. die Tür 5 zum Erdgeschoss (siehe Abb. 2.31) offen stand und/oder Fenster im Wohnbereich geöffnet waren. Deshalb wurde als Arbeitshypothese die Lüftung über das Fenster F1 untersucht. Im Unterschied zur Phase 1 und 2 war es nicht möglich, aus den Temperaturmessungen Rückschlüsse auf die Öffnungszeiten des Fensters F1 zu ziehen. Verschiedene Variantenrechnungen mit permanent angekippten Fenstern F1 oder/und F2 mündeten in zu hohen Konzentrationen. Letztendlich wurde in der finalen Rechnung „So\_01“ eine Kombination aus am Tag geöffnetem (90° Öffnung) und nachts angekipptem (8°) Fenster F1 unterstellt, mit der die Messdaten gut reproduziert werden konnten.

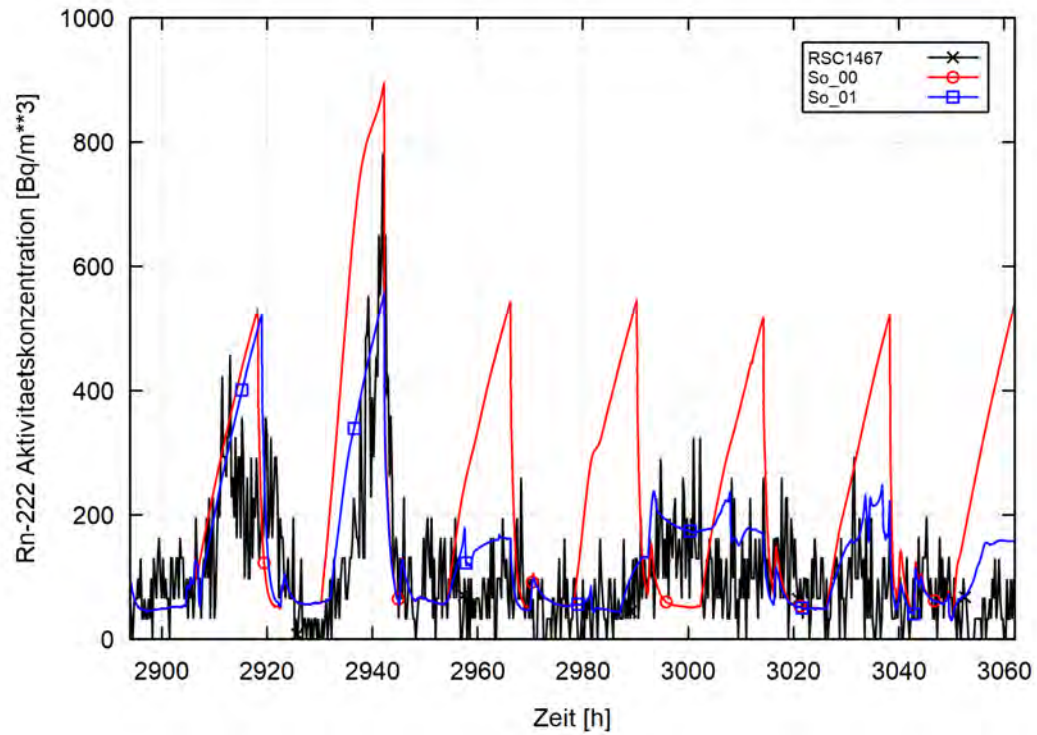
Das Ankippen wurde ab der 3. Nacht angenommen (Nachtlüftung wegen Tagestemperaturen über 30 °C, vgl. Abb. 2.113). Der Vergleich der unterstellten F1 Fensteröffnung in der ersten und der finalen Rechnung ist in Abb. 2.118 dargestellt. Von wesentlichem Einfluss ist dabei die Kippstellung ab der 3. Nacht.



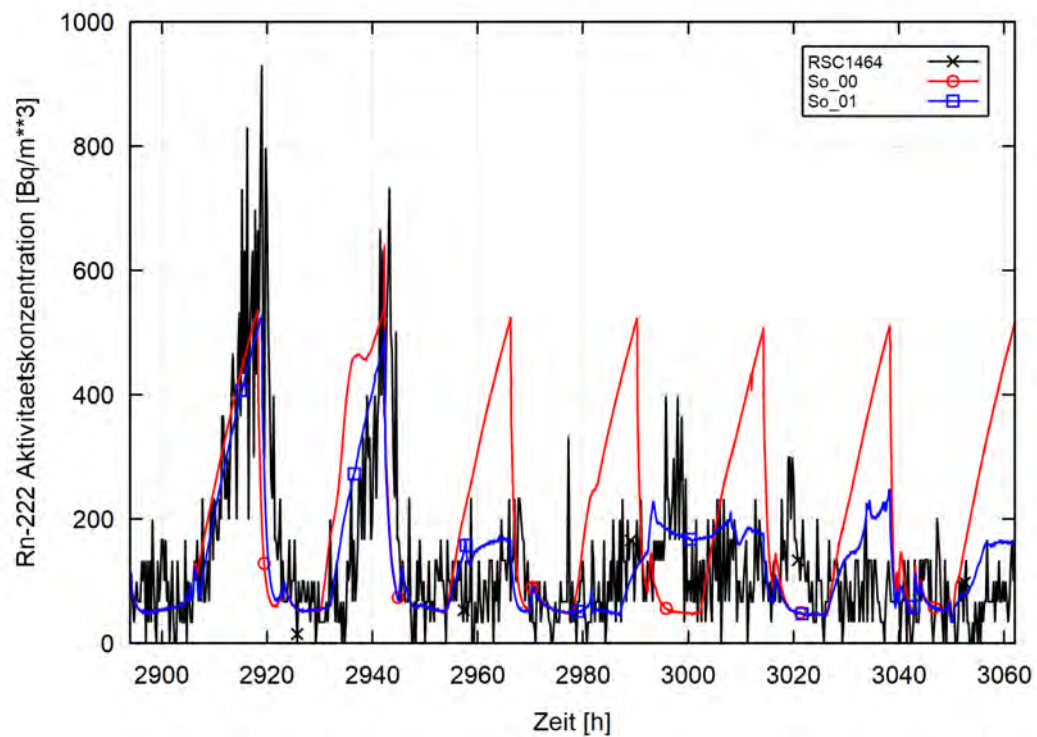
**Abb. 2.118** Öffnungen von Fenster F1 für die „Sommer“-Rechnung, Annahme in der ersten Variante So\_00 und den gefitteten Zeiten in Variante So\_01

Die Ergebnisse der ersten Rechnung (So\_00) sowie der gefitteten Rechnung (So\_01) sind in Abb. 2.119 und Abb. 2.120 im Vergleich zu den zwei Messungen in Zimmer Z1 und Z2 dargestellt. Die Messwerte in Z1 und Z2 sind ähnlich, was die gute Durchmischung der Raumluft im Messobjekt belegt. Dies wird so auch in beiden COCOSYS-Varianten berechnet. Während die erste Rechnungsvariante die Messwerte deutlich überschätzt, konnte nach Anpassung der Fensteröffnung die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung wesentlich verbessert werden. Natürlich treffen auch hier die in Kapitel 2.5.4.5 dargelegten Aussagen zum entscheidenden Einfluss der Lüftung sowie der anderen Randbedingungen zu.





**Abb. 2.119** Nachrechnung Messphase 3, Aktivitätskonzentration in Z1.1, Varianten So\_00 (in Rot) und So\_01 (in Blau) im Vergleich zur Messung RSC1467

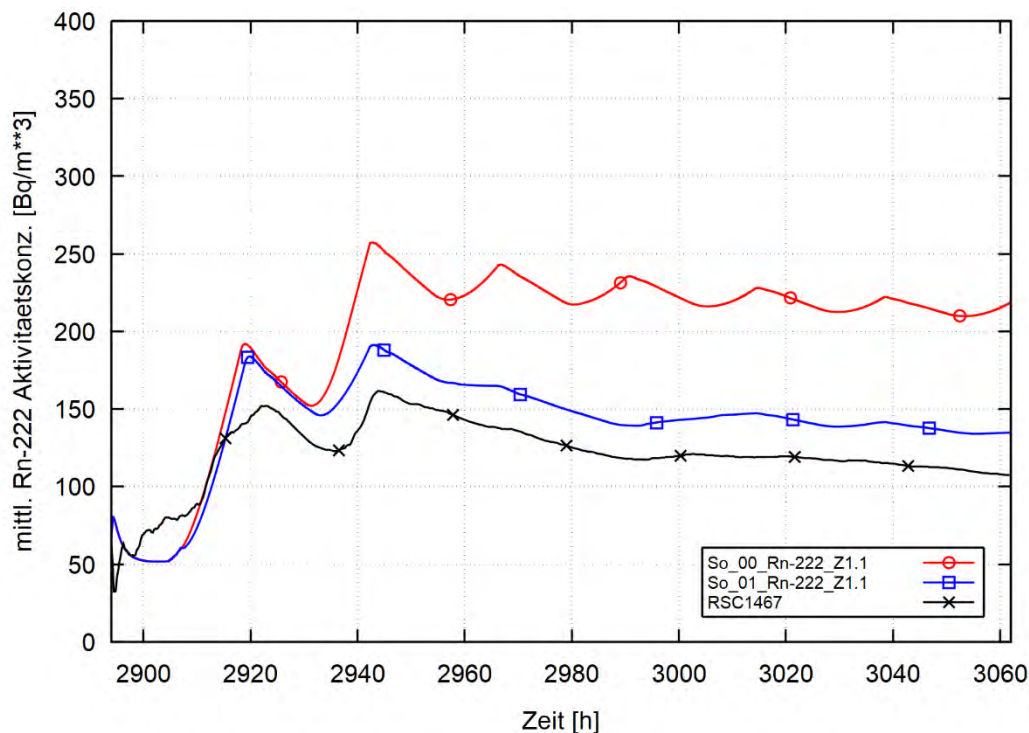


**Abb. 2.120** Nachrechnung Messphase 3, Aktivitätskonzentration in Z2.1, Varianten So\_00 (in Rot) und So\_01 (in Blau) im Vergleich zur Messung RSC1464

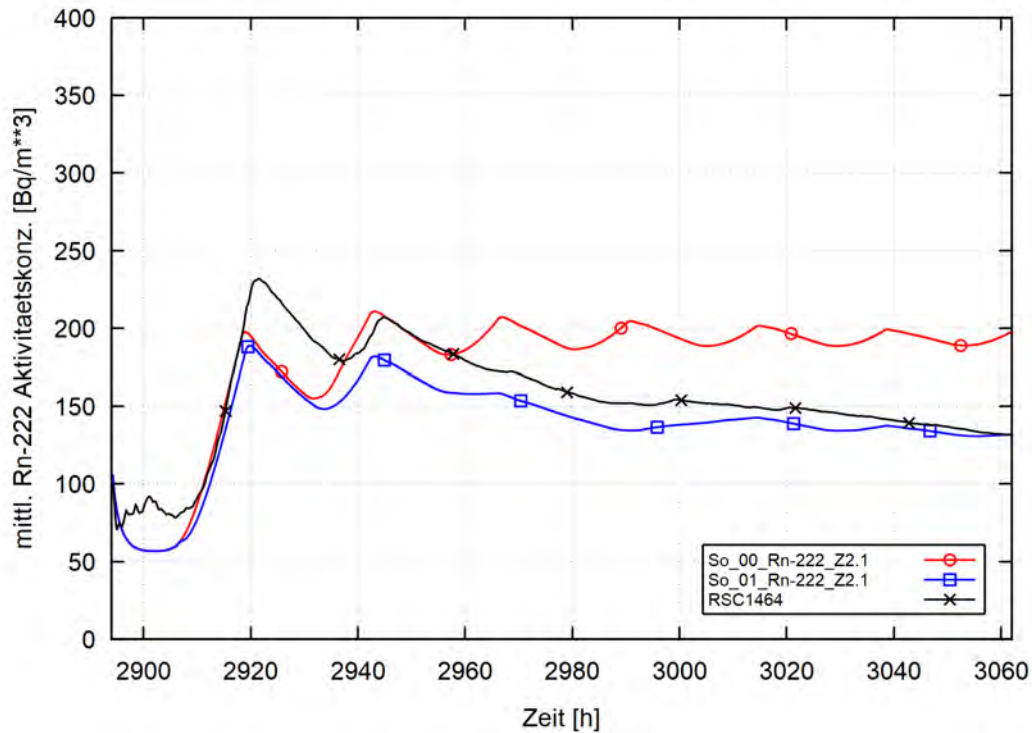
Aus den zwei Messkurven sind für den Zeitbereich 2.894 h bis 3.062 h raumspezifische kumulierte Mittelwerte der Radon-Aktivitätskonzentration abgeleitet und in Tab. 2.12 bzw. in Abb. 2.121 und Abb. 2.122 mit den Ergebnissen der COCOSYS-Varianten verglichen. Sowohl die Messung als auch die Rechnungen zeigen Mittelwerte, die für diese „Sommer“-Phase deutlich unter dem Referenzwert von 300 Bq/m<sup>3</sup> liegen. Die ab dem 3. Tag deutlich niedrigeren Rn-222 Aktivitätskonzentrationen führen dazu, dass die kumulierten Mittelwerte in beiden Zimmern tendenziell abnehmen. In Zimmer Z1 überschätzt COCOSYS den Mittelwert etwas; dagegen wird in Z2 nach anfänglicher Unterschätzung der Mittelwert zum Rechnungsende getroffen.

**Tab. 2.12** Nachrechnung Messphase 3, kumulierte Mittelwerte der Aktivitätskonzentration der COCOSYS-Variante So\_01 im Vergleich zur Messung

Zimmer/ COCOSYS Zone	Messung		Mittelwerte COCOSYS (Bq/m <sup>3</sup> )	Abweichung zum Messwert (%)
	Messgerät	Mittelwert (Bq/m <sup>3</sup> )		
<b>Z1</b> Z1.1	RSC1467	107,3	134,8	25,6
<b>Z2</b> Z2.1	RSC1464	131,7	131,8	0,1
<b>Z3</b> Z3.1	-	-	136,6	-



**Abb. 2.121** Nachrechnung Messphase 3, kumulierter Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z1.1, Varianten So\_00 und S0\_01 im Vergleich zur Messung



**Abb. 2.122** Nachrechnung Messphase 3, kumulierter Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z2.1, Varianten So\_00 und S0\_01 im Vergleich zur Messung

### 2.5.6 Abschätzung eines Jahresmittelwertes und Vergleich mit Exposimeter-Messung

Aus den COCOSYS-Analysen ist damit als Ergebnis der für den jeweiligen Simulationszeitraum bestimmte kumulierte Mittelwert verfügbar (siehe Kapitel 2.4.3).

Zur Abschätzung eines Jahresmittelwertes für das Objekt Oberheldrungen ist deshalb folgendes Vorgehen gewählt worden. Mit COCOSYS wurden Analysen für drei Phasen durchgeführt (siehe Kapitel 2.5.3, 2.5.4 und 2.5.5). Diese werden als repräsentativ für Bedingungen im Winter, Frühjahr/Herbst und Sommer betrachtet. Die jeweils 1-wöchigen, berechneten Phasen wurden für je drei Monate angesetzt und damit ein Jahresmittelwert extrapoliert (siehe Tab. 2.13).

**Tab. 2.13** Mit COCOSYS für drei Messphasen im Objekt Oberheldrungen berechnete kumulierte Mittelwerte der Radonaktivitätskonzentration und Extrapolation auf Jahresmittelwerte

Zimmer	COCOSYS Zone	Messphase 1 „Winter“ (Tab. 2.9) (Bq/m <sup>3</sup> )	Messphase 2 „Frühjahr“ (Tab. 2.11) (Bq/m <sup>3</sup> )	Messphase 3 „Sommer“ (Tab. 2.12) (Bq/m <sup>3</sup> )	Extrapolierter Jahresmittelwert (Bq/m <sup>3</sup> )
Z1	Z1.1	575,3	696,1	134,8	525,6
Z2	Z2.1	580,0	700,0	131,8	528,0
Z3	Z3.1	581,8	703,4	136,6	531,3

Zur Bewertung dieser COCOSYS-Ergebnisse wurde in analoger Weise mit den Messungen in Zimmer Z1 und Z2 verfahren. Hierzu wurden die Geräte RSC1467 und RSC1464 ausgewertet, da nur für diese Messgeräte Daten zur Phase 3 vorliegen. Damit ergibt sich auf Basis der Messungen ein extrapolierter Jahresmittelwert von 506 bzw. 514 Bq/m<sup>3</sup> (siehe Tab. 2.14). Verwendet man anstatt der einzelnen Phasen die Messungen über den gesamten Zeitraum 31. März bis 11. Oktober 2022 (194 Tage, d. h. ~6 Monatsmittelwert), in dem die Geräte im Objekt Oberheldrungen aufgestellt waren, ergibt dies 403 bzw. 399 Bq/m<sup>3</sup>. Diese Werte sind ca. 20 % niedriger als die aus den drei Abschnitten abgeleiteten Jahresmittelwerte, da in den ~6 Monaten die Sommerbedingungen mit niedrigen Radonkonzentrationen überrepräsentiert sind.

**Tab. 2.14** Für drei Messphasen im Objekt Oberheldrungen berechnete kumulierte Mittelwerte der Radonaktivitätskonzentration und Extrapolation auf Jahresmittelwerte sowie 6-Monatsmittelwert

Zimmer	Gerät	Messphase 1 (Tab. 2.9) (Bq/m <sup>3</sup> )	Messphase 2 (Tab. 2.11) (Bq/m <sup>3</sup> )	Messphase 3 (Tab. 2.12) (Bq/m <sup>3</sup> )	Extrapol. Jahresmittelwert (Bq/m <sup>3</sup> )	6-Monatsmittelwert (Bq/m <sup>3</sup> )
Z1	RSC1467	573,2	671,8	107,3	506,0	403,0
Z2	RSC1464	569,5	677,4	131,7	514,0	399,0

Der Vergleich der COCOSYS- mit den aus der Messung abgeleiteten Jahresmittelwerten (526,6 Bq/m<sup>3</sup> zu 506,0 Bq/m<sup>3</sup> in Zimmer Z1 bzw. 528,0 Bq/m<sup>3</sup> zu 514,0 Bq/m<sup>3</sup> in Z2) zeigt eine gute Übereinstimmung bei leichter Überschätzung der von COCOSYS berechneten Jahresmittelwerte (3,9 % bzw. 2,7 % bezogen auf die Messwerte).

Entscheidender als die zusammengesetzten Messdaten oder das 6-Monatsmittel für die Einschätzung der Prognosefähigkeit von COCOSYS sind die Exposimeter-Messungen über ein Jahr in den Zimmern Z1 bis Z3. Diese berücksichtigen die tatsächlichen Gegebenheiten und sind zugleich die anerkannte Messmethode zur Bewertung der Einhaltung des Radon-Jahresmittelwertes an Arbeitsplätzen. Andererseits ist der Unsicherheitsbereich der Exposimeter deutlich größer als die der kalibrierten GRS-Messgeräte. Die Gegenüberstellung der Exposimeter-Messungen mit den extrapolierten COCOSYS-Jahresmittelwerten erfolgt in Tab. 2.15. Demnach reproduziert COCOSYS den Jahresmittelwert für alle drei Zimmer innerhalb des Unsicherheitsbandes der Messung von  $\pm 110 \text{ Bq/m}^3$  (maximale Abweichung  $-68,4 \text{ Bq/m}^3$  bezogen auf die Messung).

Damit wird die angewendete Prozedur, die 1-wöchigen Rechnungen als repräsentativ für bestimmte Zeitphase anzusetzen und dann auf ein Jahr zu extrapolieren, als eine brauchbare Verfahrensweise zur Abschätzung des Jahresmittelwertes bewertet.

**Tab. 2.15** Vergleich der extrapolierten COCOSYS-Jahresmittelwerte der Radonaktivitätskonzentrationen mit Exposimeter-Messungen (Festkörperspurdetektoren über 356 Tage im Objekt Oberheldrungen /KEM 23/)

Zimmer	Exposimeter			Extrapolierter COCOSYS Jahresmittelwert (Bq/m <sup>3</sup> )	Abweichung COCOSYS (Bq/m <sup>3</sup> )
	Bezeichnung	Jahresmittelwert (Bq/m <sup>3</sup> )	Unsicherheit (Bq/m <sup>3</sup> )		
<b>Z1</b> Büro	103059119	594	$\pm 110$	525,6	-68,4
<b>Z2</b> Druckerraum	103122156	581	$\pm 110$	528,0	-53,1
<b>Z3</b> Flur	103129516	580	$\pm 110$	531,3	-48,7

## 2.6 AP 4: Ableitung von Maßnahmen und Handlungsempfehlungen

Unter diesem Arbeitspaket war zu untersuchen, wie die Radon-Konzentration am Arbeitsplatz im Messobjekt verringert werden kann und welche Maßnahmen dafür zu empfehlen sind. Der AP 4 beinhaltet folgende Arbeitsschritte:

- Zusammenstellung der Randbedingungen und zu untersuchenden Maßnahmen in Anlehnung an DIN 18117

- Untersuchung technischer Maßnahmen mittels des adaptierten COCOSYS-Codes auf Wirksamkeit, Dimensionierung und optimale Position
- Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Auswahl geeigneter Messorte (z. B. Positionierung von Detektoren)

Die Untersuchungen zur Reduktion der Radon-Konzentration im Messobjekt in Oberheldungen/Thüringen erfolgten auf Basis der Messungen und der Nachrechnungen zur Messphase 1 (siehe Kapitel 2.5.3.4.1). Der von COCOSYS bestimmte kumulierte Mittelwert für den Arbeitsplatz (Büro Z1), vor allem aber die durchgeführten Rn-222 Messungen und die darauf basierenden Mittelwerte sowie die Auswertung eines über 39 Tage beaufschlagten Exposimeters legten nahe, dass bei Unterstellung der Beibehaltung der Lüftungsprozedur der Referenzwert der Jahresmittelkonzentration von 300 Bq/m<sup>3</sup> an diesem Arbeitsplatz nicht eingehalten wird. Es sind also Maßnahmen zur Verringerung der Radon-Aktivitätskonzentration am Arbeitsplatz zu ergreifen.

Dieses Ergebnis wird zum Ende der Forschungsvorhabenslaufzeit, wenn auf Basis eines Exposimeters (Beaufschlagung-Zeitraum 31. März 2022 bis Ende März 2023) ein gemessener Jahresmittelwert für Z1 vorliegt, sehr wahrscheinlich bestätigt werden.

Geeignete technische Möglichkeiten zur Reduzierung des Radon-Eintritts in Innenräume sowie zur Verringerung der Radonkonzentration in Räumen und damit zur Einhaltung von Anforderungen aus dem Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) und der Strahlenschutzverordnung sind in der DIN/TS 18117 „Bauliche und Lüftungstechnische Maßnahmen zum Radonschutz“ /DIN 21/ aufgeführt und erläutert. Die DIN beschreibt bauliche und Lüftungstechnische Maßnahmen für neu zu errichtende oder zu sanierende Gebäude und berücksichtigt die Nutzung der Innenräume. Dort ist auch eingeschätzt: *„Die Auswahl oder auch die Kombination von Schutzmaßnahmen ist abhängig von den örtlichen Randbedingungen, der Art des Bauvorhabens, der Nutzung und dem gewünschten Schutzziel.“*

Bauliche Maßnahmen, die eine Reduzierung des Radoneintritts bewirken, sind für das Objekt in Oberheldungen bisher nicht geplant. Sie würden aber einen erheblichen Aufwand erfordern. Die Qualität von Abdichtmaßnahmen selbst kann mit COCOSYS nicht bewertet werden, da die Quellstärke eine vorzugebende **Eingabegröße** ist. Ihr sehr wesentlicher Einfluss wird auch aus den Testrechnungen in Kapitel 2.5.3.2 ersichtlich. Bei der Begehung des Objektes durch GRS-Mitarbeiter im März 2022 konnte keine lokale

Quelle für den Radon-Eintritt identifiziert werden. Dies spiegelt sich deshalb in den COCOSYS-Simulationen wider, in denen eine auch durch Ergebnisse der Testrechnungen in Kapitel 2.5.3.2 plausibilisierte gleichmäßige Quellrate in allen Zimmern angenommen ist.

Die DIN/TS 18117 hat Gültigkeit für Gebäude mit Arbeitsräumen/Arbeitsplätzen und damit für das Messobjekt, in dem sich der Eigentümer in seiner Berufsausübung regelmäßig oder wiederholt aufhält. Von längerfristigen Aufenthalten und damit einem „Arbeitsplatz“ entsprechend der DIN ist im Büro, Zimmer 1, sowie im Druckerraum Z2 auszugehen (siehe Abb. 2.31). Der Abstellraum (Zimmer Z4) ist als „wenig genutzter Innenraum“ anzusehen, aber aufgrund der gemessenen und auch berechneten homogenen Rn-222-Konzentrationen in allen vier Zimmern werden diese im Folgenden gleich behandelt. Zimmer Z6 (Heizungsraum) und Z5 (WC) sind als praktisch ungenutzte Innenräume, in denen sich im Jahresmittel Personen weniger als zehn Minuten je Tag aufhalten, nicht in der COCOSYS-Simulation berücksichtigt.

Das Nutzungsverhalten der Räume (z. B. Aufenthaltszeit) kann nicht signifikant geändert werden, da der Arbeitsplatz in Zimmer Z1 alternativlos ist für den Eigentümer und nur über einen baulich festgelegten Weg erreicht werden kann. Die DIN-Maßnahme „Reduzierung der Radon-Ausbreitung“ durch permanentes Schließen der Tür T2 oder T6 (siehe Abb. 2.31) würde aufgrund der homogenen Radon-Quelle eine lokal erhöhte Konzentration in Z1 verursachen und dazu noch die Grundlüftung durch alle Räume verringern. Ein längeres Öffnen der Tür T5 (Tür zum Erdgeschoss) würde zwar über den Kamineffekt die Lüftung am Arbeitsplatz (Zimmer Z1 und Z2) verstärken und damit die Radon-Konzentration verringern, aber gleichzeitig die Radon-Konzentration in den darüber liegenden Wohnräumen unerwünscht erhöhen.

Also konzentrieren sich die COCOSYS-Untersuchungen auf die in der DIN/TS 18117 genannten Maßnahmen zur Erhöhung des Luftwechsels (siehe Tabelle 6 in /DIN 21/) in den zu schützenden Räumen und dabei im Speziellen auf den direkten Luftwechsel zwischen Raum- und Außenluft. Dies mündete in Untersuchungen zum Öffnen von Fenstern (aktives Nutzerverhalten) sowie in der Installation einer (zeitgesteuerten/programmierbaren) Ventilator-Abluftanlage. Aus energetischen Gründen bietet sich insbesondere bei längerem Betrieb eine Lüftung mit Wärmetauscher zur Rückgewinnung der Raumenergie an, was aber eine höhere Investition erfordert. Da dies keinen signifikanten Einfluss auf die sich ergebende Radon-Konzentration hat (Einfluss der Raumtemperatur über Atmosphärendichte auf den Massenstrom zwischen Umgebung und Zimmern



bzw. die internen Konvektionsströmungen), wird eine Wärmerückgewinnung hier nicht weiterverfolgt. Ebenfalls wurden Fragen der Einbruchssicherheit (lange Phasen der Fensteröffnung) außenvorgelassen.

Aufgrund der gemessenen und auch berechneten gleichmäßigen Rn-222-Konzentrationen in den Zimmern des Objektes erfolgt die Auswahl der Lüftungsorte eher aus praktischen Gründen: die existierenden Fenster 1 und 2 bzw. das Upgrade des im WC (Zimmer Z5) vorhandenen und über Lichtschalter und Zeitverzögerung gesteuerten Abzugslüfters (siehe Abb. 2.31).

In Kapitel 2.5.3.4.1 wurde gezeigt, dass die COCOSYS-Nachrechnung unter Verwendung der detektierten, aber unregelmäßigen Fensteröffnungszeiten gut mit den gemessenen Mittelwerten übereinstimmt. Die systematische Bewertung von Handlungsempfehlungen kann allerdings nur unter Annahme einer gewissen Regelmäßigkeit der Handlungen erfolgen. Dies wurde deshalb in den COCOSYS-Analysen in Kapitel 2.6.1 (regelmäßige Fensteröffnung einmal pro Tag) bzw. in Kapitel 2.6.2 (Lüftung ohne jegliche Fensteröffnung) unterstellt.

### **2.6.1 Maßnahme „Fensteröffnung“**

Im Folgenden sind die Ergebnisse von COCOSYS-Variantenrechnungen mit Fensteröffnungen zu abweichenden Zeitpunkten und bei unterschiedlicher Dauer dargestellt. Hierbei kam das in Kapitel 2.4.2 dokumentierte neue Modell zur einseitigen Fenster-Lüftung zur Anwendung. Neben Zeitpunkt, Dauer und Öffnungswinkel eines Fensters ist die sich ergebende Lüftungswirkung auch von den Randbedingungen abhängig – im implementierten Modell von der Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft und der Windgeschwindigkeit.

Eine Querlüftung, z. B. durch Öffnung des Fensters 1 und der Tür 3 (siehe Abb. 2.31) wurde nicht betrachtet, da sie weder durch die Kontaktschalter belegt noch als übliche Maßnahme des Eigentümers genannt wurde. Daneben ist auch kein entsprechendes Modell für eine Querlüftung in COCOSYS verfügbar, so dass diese über ein Ventilator-System oder eine druckgesteuerte Atmosphärenverbindung zu simulieren wäre.

Die in der Variantenanalyse betrachteten Annahmen zur Fensteröffnung sind in Tab. 2.16 erläutert. Die untersuchten Varianten wurden nach Praktikabilität festgelegt: ein Fenster 1x – 3x am Tag für verschiedene Zeiten öffnen bzw. zwei Fenster oder der

Effekt angekippter Fenster. Die Ergebnisse wurden speziell auf die Einhaltung des Mittelwertes der Radon-Konzentration in Zimmer Z1 (Zone Z1.2) zum Ende der Simulation nach 158,25 h ausgewertet (von COCOSYS ausgegebener kumulierter Mittelwert entsprechend Kapitel 2.4.3 in der letzten Spalte von Tab. 2.16).

In der letzten Tabellenspalte sind zudem diejenigen Varianten in grüner Schrift angegeben, in denen der kumulierte Mittelwert nach 158,25 h unter 300 Bq/m<sup>3</sup> liegt. In weiteren Fällen (in Rot geschrieben, aber Zellen in Grün eingefärbt) liegt der kumulierte Mittelwert leicht über dem Referenzwert, so dass kleinere Änderungen (z. B. eine geringere Quellrate oder erhöhte Grundlüftung) ebenfalls zur Einhaltung des Referenzwertes führen können.

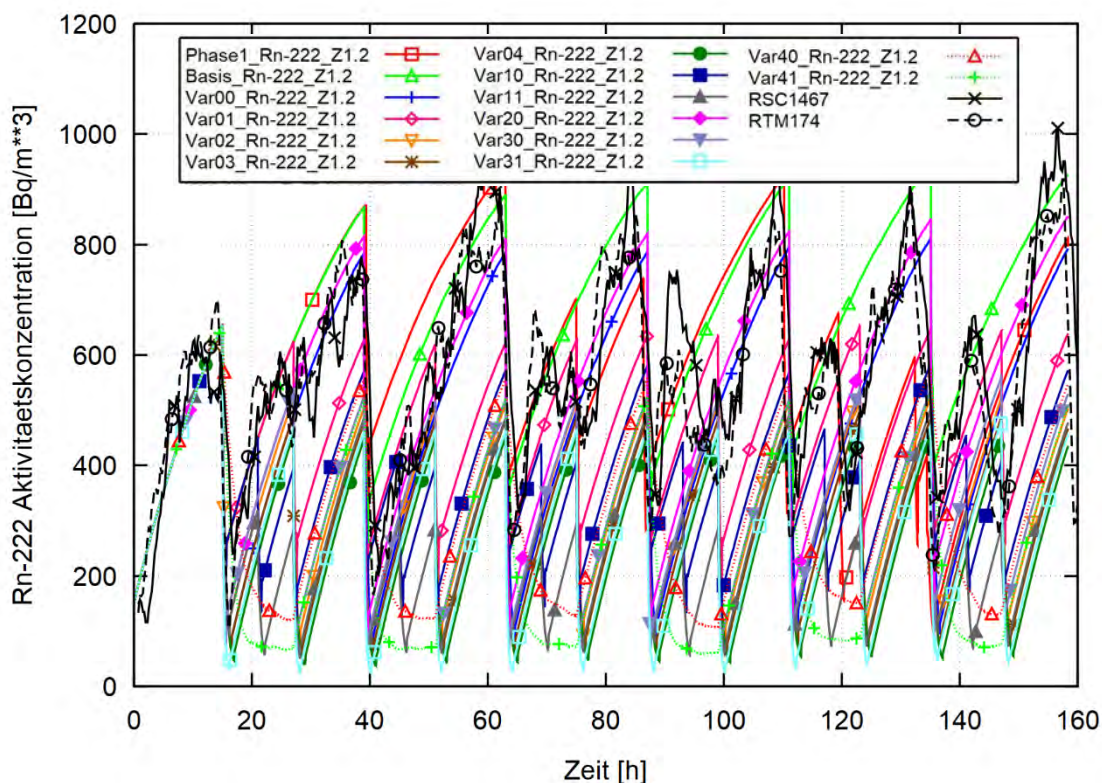
**Tab. 2.16** COCOSYS-Variantenrechnungen zur Maßnahme „Fensteröffnung“, Einfluss auf den berechneten „kumulierten“ Mittelwert der Radon-Konzentration in Zone Z1.2 nach 158,25 Stunden

Variante	Datensatz	Annahme	$\bar{C}_{Rn-222}$ nach 158,25 h [Bq/m <sup>3</sup> ]
Phase 1	HomSource_ARN_F1_korr4FAN	offene Nachrechnung Phase 1 (Kapitel 2.5.3.4) (Mittelwert der zwei Messungen in Z1 nach 158,25 h)	573,2 (553,8 / 573,2)
Basis	HomSource_ARN_F1k_Basis	Phase 1 & „normierte mittlere“ Öffnung Fenster F1, <b>1x pro Tag</b> morgens für <b>35 min voll öffnen</b> (90°) inkl. Grundlüftung L = 0,03 h <sup>-1</sup> und Q = 50 Bq/(m <sup>3</sup> h)	645,8
Var00	HomSource_ARN_F1k_var00	Basis & Öffnung Fenster F1, 1x pro Tag morgens für je 90 min	477,9
Var01	HomSource_ARN_F1k_var01	Basis & Öffnung Fenster F1, 2x pro Tag (morgens & abends) für je 35 min	455,7
Var02	HomSource_ARN_F1k_var02	Basis & Öffnung Fenster F1, 2x pro Tag (morgens & abends) für je 70 min	326,7
Var03	HomSource_ARN_F1k_var03	Basis & Öffnung Fenster F1, 2x pro Tag (morgens & abends) für je 90 min	294,0
Var04	HomSource_ARN_F1k_var04	Basis & Öffnung Fenster F1, 2x pro Tag (morgens & abends) für je 120 min	262,3
Var10	HomSource_ARN_F1k_var10	Basis & Öffnung Fenster F1, 3x pro Tag (morgens, mittags & abends) für je 35 min	359,2

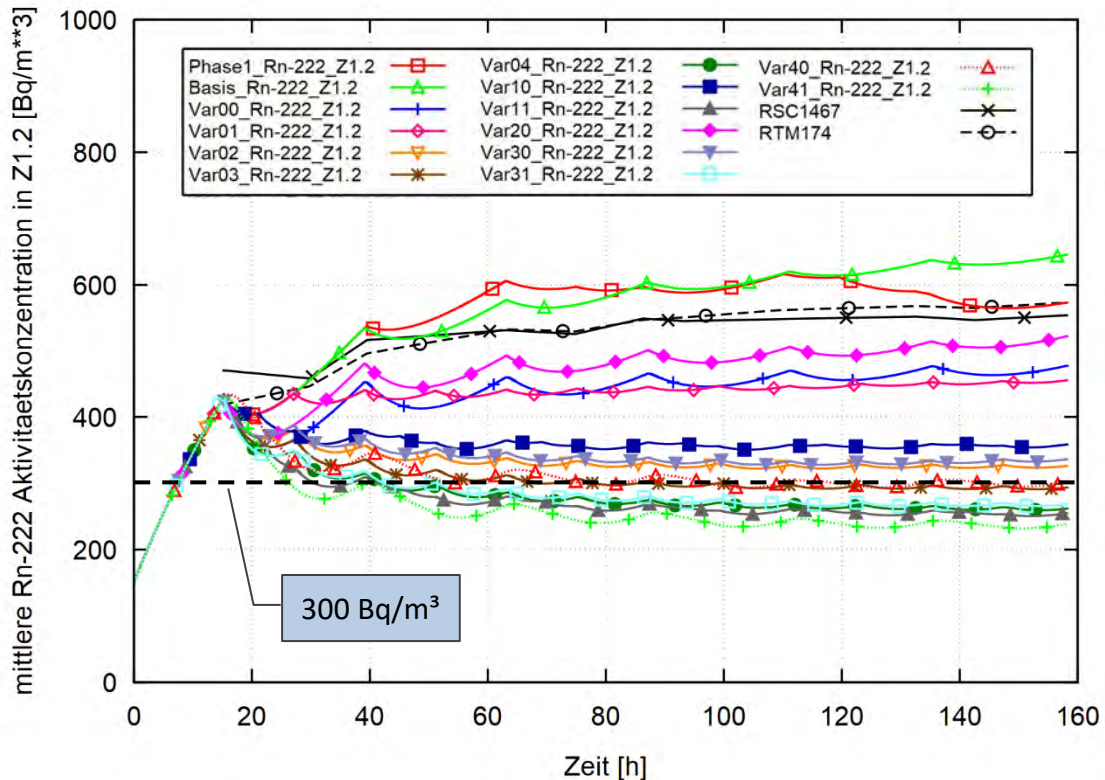
Variante	Datensatz	Annahme	$\bar{C}_{Rn-222}$ nach 158,25 h [Bq/m <sup>3</sup> ]
Var11	HomSource_ARN_F1k_var11	Basis & Öffnung Fenster F1, 3x pro Tag (morgens, mittags & abends) für je 70 min	255,3
Var20	HomSource_ARN_F1k_var20	Basis & Öffnung Fenster F1 & F2, 1x pro Tag morgens für 35 min	522,5
Var30	HomSource_ARN_F1k_var30	Basis & Öffnung Fenster F1 & F2, 2x pro Tag (morgens & abends) für je 35 min	336,7
Var31	HomSource_ARN_F1k_var31	Basis & Öffnung Fenster F1 & F2, 2x pro Tag (morgens & abends) für je 70 min	268,8
Var40	HomSource_ARN_F1k_var40	Basis & Öffnung Fenster F1, (ab morgens) für 12 h angekippt (8° Öffnung)	301,7
Var41	HomSource_ARN_F1k_var41	Basis & Öffnung Fenster F1 & F2, (ab morgens) für 12 h angekippt (8° Öffnung)	239,3

Die Ergebnisse, d. h. die berechnete Radon-Aktivitätskonzentration sowie der kumulierte Mittelwert in Zone Z1.2, für alle Varianten sind in Abb. 2.123 und Abb. 2.124 dargestellt. Die in den Abbildungen als „Phase1“ bezeichnete Variante ist die Nachrechnung entsprechend Kapitel 2.5.3.4 und die Variante „Basis“ die regelmäßige Öffnung des Fensters F1 für 35 min pro Tag. In beiden Varianten liegt der berechnete kumulierte Mittelwert nach 158,25 h deutlich über dem Referenzwert, d. h. das bisherige Öffnungsverhalten ist nicht ausreichend zur Einhaltung des Wertes von 300 Bq/m<sup>3</sup>. Prozeduren mit 2x pro Tag Fenster F1 für 120 min, 3x pro Tag Fenster F1 für 70 min, 2x pro Tag Fenster F1 und F2 für 70 min oder Fenster F1 und F2 angekippt über 12 h führen zur sicheren Einhaltung des Referenzwertes.

Die Varianten belegen, dass eine mehrmalige Öffnung von F1 effektiver ist als einmalige lange Öffnungsphasen. Wird dazu gleichzeitig das Fenster F2 mit geöffnet, reduziert sich die notwendige Öffnungszeit bzw. die Anzahl der notwendigen Öffnungen. Um den gleichen Effekt zu erreichen, müssten beide Fenster den ganzen Tag über angekippt verbleiben (z. B. 8 ° für 12 h).



**Abb. 2.123** Messobjekt Oberheldungen, COCOSYS-Variantenrechnungen „Fensteröffnung“, Verlauf der Rn-222-Aktivitätskonzentration in Zone Z1.2



**Abb. 2.124** Messobjekt Oberheldungen, COCOSYS-Variantenrechnungen „Fensteröffnung“, Verlauf des kumulierten Mittelwertes der Rn-222-Aktivitätskonzentration in Zone Z1.2

## 2.6.2 Maßnahme „Abluftanlage“

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Variantenrechnungen mit einer Abluftanlage erläutert.

Während der Objektbegehung im März 2022 wurde festgestellt, dass im WC (siehe Abb. 2.31, Zimmer Z5) ein Abluftventilator mit 100 mm Rohr-Durchmesser installiert ist, der mit dem Lichtschalter aktiviert wird. Leider konnte der Eigentümer keinerlei technischen Daten (Durchsatz) zu diesem Ventilator bereitstellen. Da die WC-Tür als geschlossen betrachtet wird, wurde dieser Lüfter in den COCOSYS-Simulationen (ebenso wie in Kapitel 2.5.3.4) nicht berücksichtigt.

Hinsichtlich der Kennwerte eines 100 mm Rohrlüfters ergab eine Recherche, dass einfache Badlüfter mit Timer einen Luftstrom von 100, 150 oder 200 m<sup>3</sup>/h erreichen

/LUE 22/. Es sind aber auch preiswerte Rohrlüfter mit 24 h-Modus (33 m<sup>2</sup>/h Dauerbetrieb) und Intervallsteuerung (72 m<sup>3</sup>/h) verfügbar /LUG 22/. Diese Daten wurden verwendet, um verschiedene Betriebsmodi zu definieren.

Dies mündete schließlich in den Varianten entsprechend Tab. 2.17. Ausgangspunkt ist dabei – in Analogie zur Maßnahme „Fensteröffnung“ – die Variante „Phase 1“ entsprechend der Nachrechnung in Kapitel 2.5.3.4. Daraus wurde die „Basis“ - Variante ohne aktive Abluftanlage (und ohne Fensteröffnung) erstellt. Für diese Variante werden deshalb hohe Radonkonzentrationen entsprechend der theoretischen Gleichgewichtskonzentration (siehe Abb. 2.44) und damit ein nach 158,25 h hoher kumulierter Mittelwert berechnet (siehe Abb. 2.125 und Abb. 2.126). Die Varianten Var00 bis Var21 unterstellen die Installation einer permanent oder periodisch arbeitenden Abluftanlage mit verschiedenen Betriebszeiten und Volumenströmen.

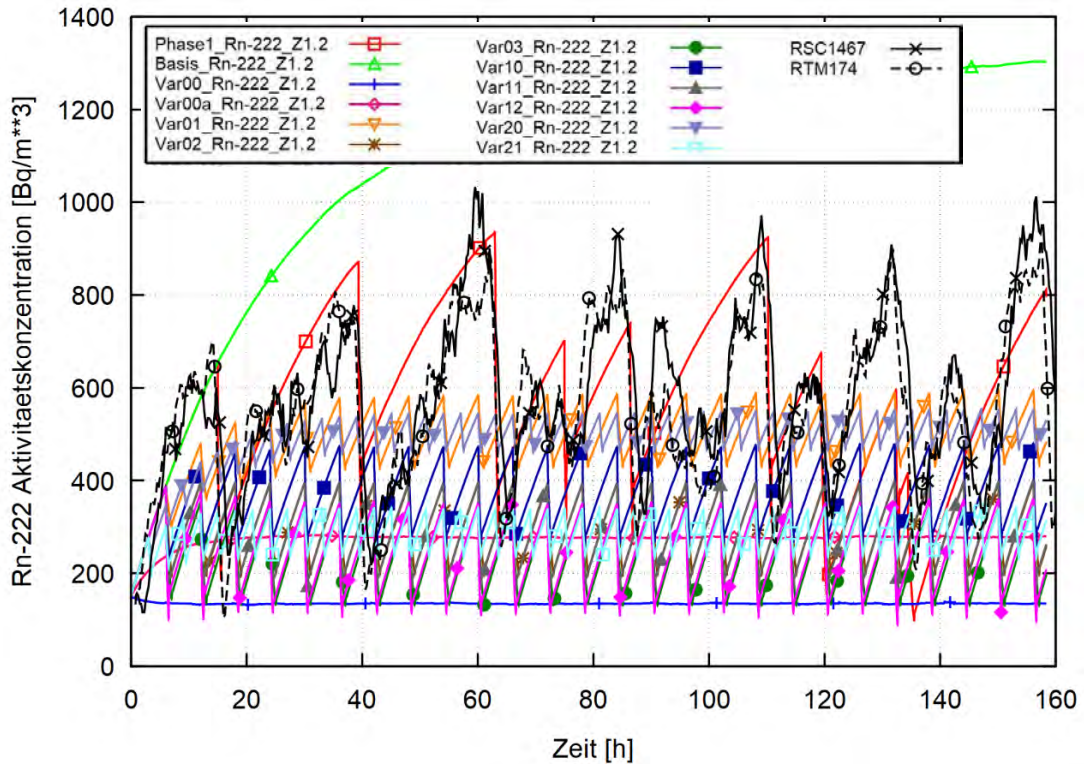
Die für alle Varianten berechneten kumulierten Mittelwerte der Radon-Konzentration in Zimmer Z1 (Zone Z1.2) zum Ende der Simulation sind wiederum in der letzten Spalte der Tab. 2.17 aufgetragen. Die Varianten, in denen der kumulierte Mittelwert nach 158,25 h unter 300 Bq/m<sup>3</sup> liegt, sind in grüner Schrift angegeben.



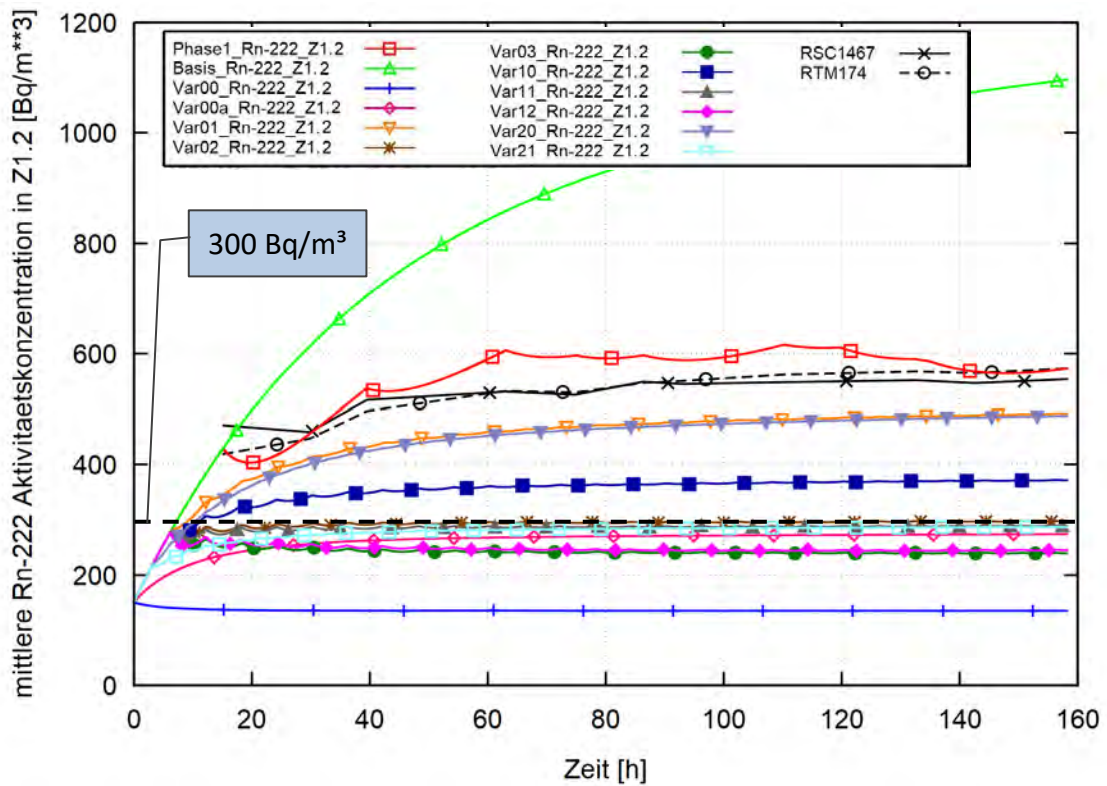
**Tab. 2.17** COCOSYS-Variantenrechnungen zur Maßnahme „Abluftanlage“, Einfluss auf den berechneten „kumulierten“ Mittelwert der Radon-Konzentration in Zone Z1.2 nach 158,25 Stunden

Variante	Datensatz	Annahme	$\bar{C}_{Rn-222}$ nach 158,25 h [Bq/m <sup>3</sup> ]
Phase 1	HomSource_ARN_F1_korr4FAN	offene Nachrechnung Phase 1 (Kapitel 2.5.3.4) (Mittelwert der zwei Messungen in Z1 nach 158,25 h)	573,2 (553,8/573,2)
Basis	HomSource_ARN_F1k_Basis	Phase 1 & <b>ohne</b> Fensteröffnung (inkl. Grundlüftung $L = 0,03 \text{ h}^{-1}$ und $Q = 50 \text{ Bq}/(\text{m}^3\text{h})$ )	1096,4
Var00	HomSource_ARN_F1k_Abluft_Var00	Basis & permanente Abluft aus Z3 mit 33 m <sup>3</sup> /h	134,8
Var00a	Hom-Source_ARN_F1k_Abluft_Var00a	Basis & permanente Abluft aus Z3 mit 15 m <sup>3</sup> /h	273,8
Var01	HomSource_ARN_F1k_Abluft_Var01	Basis & periodische Abluft aus Z3, alle 6 h für 1 h mit 33 m <sup>3</sup> /h	491,6
Var02	HomSource_ARN_F1k_Abluft_Var02	Basis & periodische Abluft aus Z3, alle 6 h für 1 h mit 72 m <sup>3</sup> /h	296,9
Var03	HomSource_ARN_F1k_Abluft_Var03	Basis & periodische Abluft aus Z3, alle 6 h für 1 h mit 100 m <sup>3</sup> /h	238,9
Var10	HomSource_ARN_F1k_Abluft_Var10	Basis & periodische Abluft aus Z3, alle 6 h für 1/2 h mit 100 m <sup>3</sup> /h	371,3
Var11	HomSource_ARN_F1k_Abluft_Var11	Basis & periodische Abluft aus Z3, alle 6 h für 1/2 h mit 150 m <sup>3</sup> /h	288,6

Variante	Datensatz	Annahme	$\bar{C}_{Rn-222}$ nach 158,25 h [Bq/m <sup>3</sup> ]
Var12	HomSource_ARN_F1k_Abluft_Var12	Basis & periodische Abluft aus Z3, alle 6 h für 1/2 h mit 200 m <sup>3</sup> /h	244,5
Var20	HomSource_ARN_F1k_Abluft_Var20	Basis & periodische Abluft aus Z3, alle 3 h für 1/2 h mit 33 m <sup>3</sup> /h	487,4
Var21	HomSource_ARN_F1k_Abluft_Var21	Basis & periodische Abluft aus Z3, alle 3 h für 1/2 h mit 72 m <sup>3</sup> /h	286,6



**Abb. 2.125** Messobjekt Oberheldrungen, COCOSYS-Variantenrechnungen „Abluftanlage“, Verlauf der Rn-222-Aktivitätskonzentration in Zone Z1.2



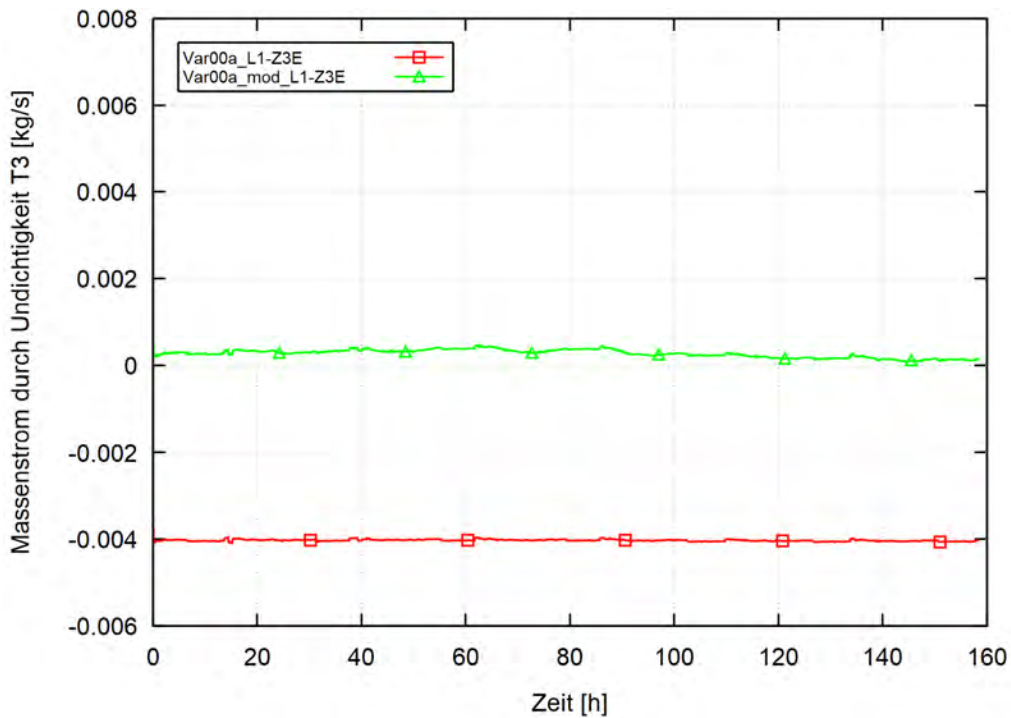
**Abb. 2.126** Messobjekt Oberheldrungen, COCOSYS-Variantenrechnungen „Abluftanlage“, Verlauf des kumulierten Mittelwertes der Rn-222-Aktivitätskonzentration in Zone Z1.2

Entsprechend der COCOSYS-Rechnungen ist die Installation einer permanent arbeitenden Abluftanlage mit 15 m<sup>3</sup>/h ausreichend zur Einhaltung der Referenzwertes der Rn-222-Aktivitätskonzentration. Ein periodischer Betrieb erfordert umso höhere Volumenströme, je weniger Zyklen pro Tag gefahren werden und je kürzer die Zyklen sind. Unregelmäßige Betriebsintervalle wurden nicht untersucht, da hier endlos viele Kombinationen möglich sind. Prinzipiell erlaubt COCOSYS aber die Analyse beliebiger Kombinationen aus Volumenstrom, Zyklenzahl und -dauer.

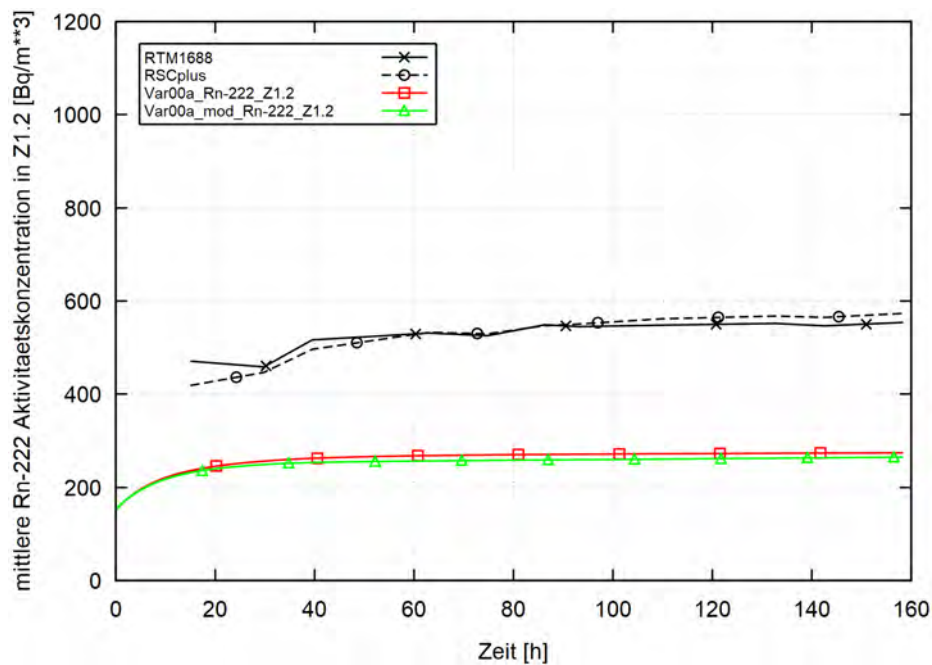
In den Variantenrechnungen zur Maßnahme „Abluftanlage“ wurde die in der Nodalisierung „Ganze Räume“ durch vier FANs eingestellte „Grundlüftung“ beibehalten ( $L = 0,03$  pro Stunde auf alle vier Zimmer verteilt entsprechend ihres Volumenanteils sowie Abströmung über die Hauptleckage – den Türspalt der Tür 3, siehe Kapitel 2.5.1.2). Die für eine genaue (realistischere) Verteilung der Undichtigkeiten erforderlichen Angaben (Größe, Druckabhängigkeit, Ort/Verteilung auf die Zimmer) sind nicht verfügbar. Sie könnten durch zimmerweise Blower-Door-Tests ermittelt werden. Die vier FANs haben eine Zuluft-Kapazität von 2,5 m<sup>3</sup>/h. Diese vorgegebene „Grundlüftung“ bedeutet in den Varianten Var00 bis Var21 mit zusätzlicher Abluftanlage (siehe Tab. 2.17), dass die Differenz zwischen der Zuluft und der vorgegebenen Abluft während des Betriebs der Abluftanlage über den Türspalt T3 angesaugt wird. Dies ist für die Variante Var00a mit permanentem Betrieb mit 15 m<sup>3</sup>/h in Abb. 2.127 (roter Graph) dargestellt. Der negative Massenstrom (Ansaugen aus der Umgebung ENVIR\_O) von -0,004 kg/s entspricht unter Berücksichtigung der Umgebungs- und Zonendichten der verbleibenden Differenz von 12,5 m<sup>3</sup>/h.

Um den Einfluss der Verteilung der Undichtigkeiten qualitativ bewerten zu können, wurde die Kapazität von FAN 1 bis FAN 4 so weit erhöht, dass sie zusammen 15 m<sup>3</sup>/h einspeisen. Ihr Verhältnis untereinander (und damit die generelle Lage und Verteilung der Undichtigkeiten für die Zuluft in Z1 bis Z4) wurde beibehalten. Danach wird im Prinzip keine Luft über den Türspalt T3 angesaugt (siehe grüner Graph in Abb. 2.127). Der Hauptströmungsweg Umgebung ENVIR\_O → Z3 → Abluftanlage (Variante Var00a) wird zu Z1-Z4 → Z3 → Abluftanlage (Variante Var00a\_mod) geändert mit entsprechend modifiziertem Radon-Transport und -Mischung innerhalb des Messobjektes. Der Einfluss auf den berechneten kumulierten Mittelwert nach 158,25 h (siehe Abb. 2.128) ist gering: die Änderung zwischen beiden Varianten beträgt -9 Bq/m<sup>3</sup>. Dies ist dadurch begründet, dass es aufgrund der permanent geöffneten Türen innerhalb des Messobjektes und der inter-

nen Konvektionsströmungen keine wirkliche Trennung der Zimmer gibt. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse der Variantenrechnungen damit auch bei geänderter Verteilung der Undichtigkeiten prinzipiell gültig bleiben.



**Abb. 2.127** Messobjekt Oberheldrungen, COCOSYS Varianten Var00a und Var00a\_mod, Massenstrom durch Undichtheit Tür T3



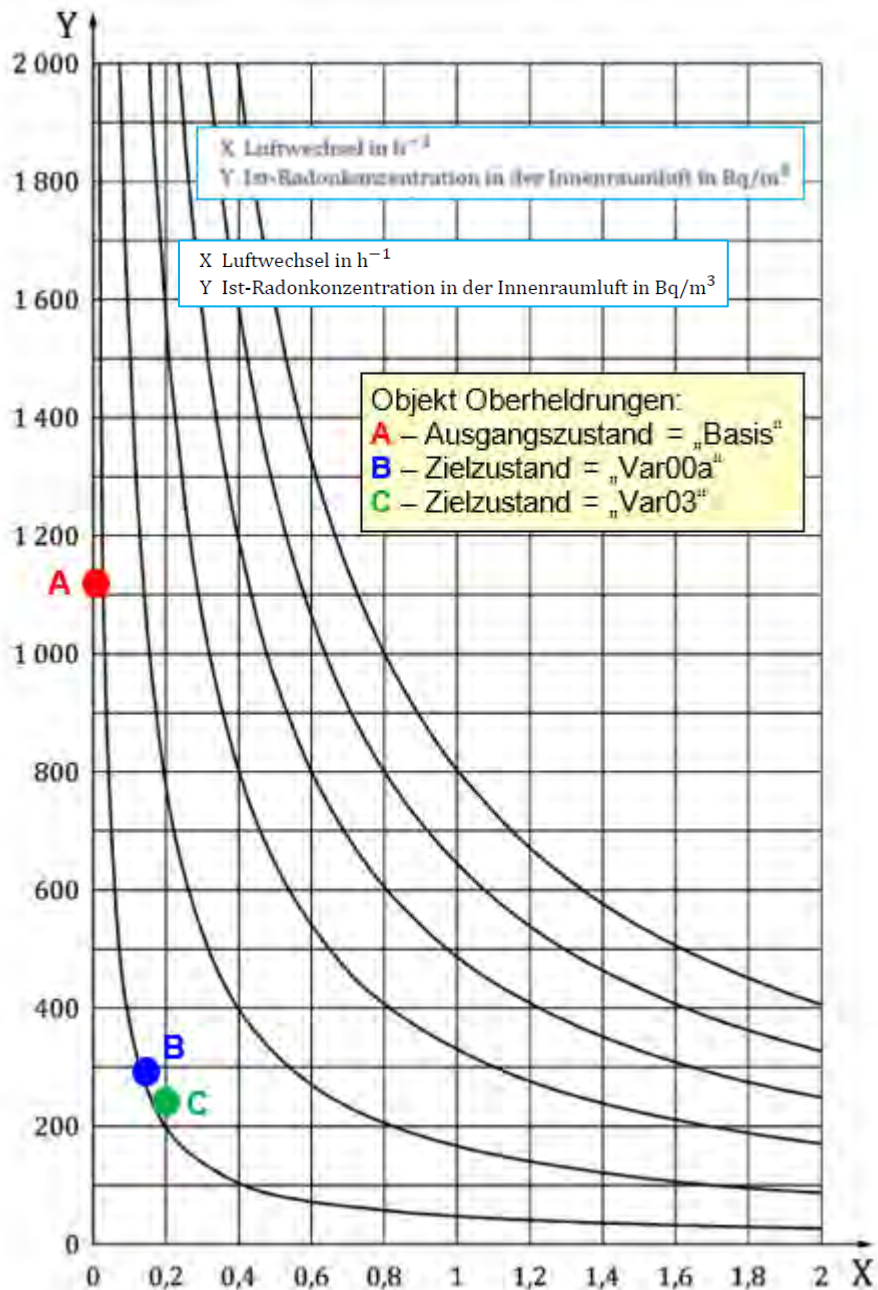
**Abb. 2.128** Messobjekt Oberheldrungen, COCOSYS Varianten Var00a und Var00a\_mod, Verlauf des kumulierten Mittelwertes der Rn-222 Aktivitätskonzentration in Zone Z1.2

Die DIN 18177 /DIN 21/ bietet ein Hilfsmittel an, das „Grunddiagramm“ nach Abb. 2.129, mit dem abgeschätzt werden kann, wie groß die z. B. von einer Lüftungsanlage realisierte Luftwechselzahl sein muss, um ausgehend von einer Radon-Ausgangskonzentration in einem Raum eine bestimmte Zielkonzentration zu erreichen. Dieses Diagramm dient zur „... überschlägige(n) Abschätzung der Auswirkungen von raumweisen Luftwechseländerungen“, ist im strengen Sinne also eigentlich nicht für das gesamte Messobjekt anwendbar. Aufgrund der berechneten guten Durchmischung und auch den in drei Zimmern gemessenen sehr ähnlichen Rn-222-Konzentrationen sollte dieses Diagramm aber auch hier gültige Abschätzungen liefern.

Dieses Hilfsmittel wurde genutzt, um die notwendige Lüftungsleistung für das Objekt in Oberheldrungen entsprechend den Ergebnissen in Tab. 2.17 zu bewerten. Als Variable wird die mittlere Konzentration der einzelnen Varianten zum Ende der Phase 1 nach 158,25 h im Arbeitsraum Zimmer Z1.2 verwendet. Diese liegt in Variante „Basis“ ohne Abluftanlage und ohne Fensteröffnungen bei 1.096 Bq/m<sup>3</sup>. Sie ist als Ausgangszustand „A“ in das Diagramm eingetragen (siehe Abb. 2.129). Die „erhöhte“ Luftwechselzahl ist für die hier ausgewählten Varianten Var00a (Zielzustand B) bzw. Var03 (Zielzustand C) dargestellt. In Var03 wurde dazu für die periodisch betriebene Lüftung eine zeitgewichtete „mittlere“ Lüftungszahl aus Grundlüftung und aktiver Lüftung bestimmt.

Die Zielzustände B und C liegen recht gut auf der durch A vorgegebenen schwarzen Quellstärke-Kurve. Somit bestätigt das Grunddiagramm die mit COCOSYS berechneten, mittleren Radon-Konzentrationen und damit die auf Basis der Rechnungen getroffenen Aussagen zur Auslegung einer für das Objekt Oberheldrungen spezifischen Abluftanlage.





**Abb. 2.129** Grunddiagramm für überschlägige Abschätzung der Auswirkungen von Luftwechseländerungen /DIN 21/, Anwendung auf den kumulierten Mittelwert für Phase 1 zum Messobjekt Oberheldrungen

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die COCOSYS-Ergebnisse zum kumulierten Mittelwert für die Maßnahme „Abluftanlage“ mit einem gewissen Vorbehalt betrachtet werden müssen. Es ist bekannt, dass die Installation einer Abluftanlage und der dadurch erzeugte Unterdruck in den Räumen zu einer höheren Radon-Quellrate führen kann („...Differenzdrücke ... auf das konvektive Einströmen radonhaltiger Bodenluft aufgrund



von Durchlässigkeiten zum Boden auswirken.“ /DIN 21/), so dass trotz erhöhter Lüftungszahl die Konzentration im Raum nicht so stark wie erwartet fällt. Da bisher kein allgemein anerkanntes FreisetzungsmodeLL existiert und die Quellrate in COCOSYS ein festgelegter Eingabeparameter ist, kann dies hier nicht berücksichtigt werden. Eine Alternative wäre die Installation eines Zuluft-Systems, das einen Überdruck in den Räumen erzeugt und damit neben der Erhöhung der Lüftungszahl gleichzeitig den Radon-Eintritt verringert.

## **2.7 AP 5: Verfolgung und Auswertung des internationalen Standes von Wissenschaft und Technik**

Das Edelgas Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) wurde im Jahr 1900 entdeckt und kann für eine Vielzahl von Anwendungen genutzt werden, bspw. zur Vorhersage von Erdbeben oder vulkanischer Aktivität, zur Erkundung von Uranerzen, Lokalisierung von tektonischen Störungen, zur Verfolgung der Migration unterirdischer Gase über große Entfernungen, für Untersuchungen von Grundwasserströmungen und zur Beobachtung der atmosphärischen Zirkulation /KIN 94/, /KHA 11a/, /FLE 80/.

Trotz seiner zahlreichen praktischen Anwendungen liegt das Hauptinteresse der aktuellen Forschung an Radon in seinen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Epidemiologische Studien zeigen, dass Radon in Wohngebäuden das Lungenkrebsrisiko in der Allgemeinbevölkerung erhöht /WHO 09/. Eine statistisch signifikante statistisch signifikante Erhöhung des Lungenkrebsrisikos tritt bei längerer Exposition durch Radon auf (16 % Anstieg pro 100 Bq/m<sup>3</sup> Radon) /DAR 05/, /SKU 19/.

Aus diesem Grund wurden Regelungen zu Radon in vielen internationale Empfehlungen aufgenommen /ICRP 10/, /SKU 19/, /ICRP 14/, /ICRP 17/, /IAEA 96/. Strengere Anforderungen wurden vor einiger Zeit hinzugefügt /EU 14/, /ICRP 19/. Diese verpflichten die europäischen Staaten dazu, Radonkarten und nationale Sanierungspläne zu erstellen und die Radonwerte in Wohnungen und an Arbeitsplätzen zu reduzieren, insbesondere in neuen Bauten. In Übereinstimmung mit dieser Richtlinie des Rates (Council Directive) /EU 14/ sollen Referenzwerte der die durchschnittlichen jährlichen Aktivitätskonzentration in Innenräumen für alle EU-Mitgliedstaaten 300 Bq/m<sup>3</sup> nicht überschreiten.

Das Risiko der Radonexposition erfordert nicht nur umfangreiche Messungen, sondern auch die Entwicklung von Modellen zur Beurteilung der Auswirkungen der Radonexposition in Innenräumen.

Die Komplexität der Radonmodellierung führte in der Vergangenheit zur Entwicklung von Modellen, die nur eine begrenzte Anzahl von Faktoren berücksichtigen. Es gibt nur sehr wenige Modelle, die alle wichtigsten Radonwege und -prozesse berücksichtigen /FON 03/. Um die Radonkonzentration in Innenräumen realistisch bewerten zu können, ist es notwendig, die vielfältigen Wege, auf denen Radon in Gebäude eindringt, und die Prozesse der Migration, Akkumulation und den Austritt von Radon zu berücksichtigen. Idealerweise sollten diese Parameter einstellbar sein oder durch spezielle Funktionen modelliert werden.

Es gibt verschiedene Prozesse, die die Entstehung von Radon, den Transport und die Akkumulation in einer Wohnung beeinflussen. Die wichtigsten sind Emanation, Exhalation, Advektion, Diffusion und Zerfall. Diese Prozesse können mit verschiedenen Parametern und Eigenschaften beschrieben werden /ROG 91/, /OTT 92/, /NAZ 88/, /FON 03/.

Zu den Bodenparametern gehören die Porosität, der Wassergehalt, die Korngröße und das Druckgefälle an der Grenzfläche zwischen Boden und Wohnung. Windgeschwindigkeit und -richtung, die Art der Gebäudekonstruktion, die Belüftung des Gebäudes und die Gewohnheiten (bestimmte Verhaltensweisen) der Bewohner werden ebenfalls berücksichtigt. In der Literatur gibt es verschiedene Studien über den Einfluss von meteorologischen Parametern auf die Radonkonzentration in Innenräumen, und es ist wichtig, diese Einflüsse in das Modell einzubeziehen.

Die Grundprinzipien für die Erstellung physikalisch begründeter mathematischer Modelle der Radonbilanz in Gebäuden sind die folgenden /YAR 2022/:

- die Radonquelle
- die treibende Kraft des Radondiffusionstransports von der Quelle ist der Konzentrationsgradient
- die treibende Kraft des advektiven Radontransports von der Quelle ist der Druckgradient im System Atmosphäre-Boden-Bauwerk
- der Hauptparameter, der die Dynamik der Radonkonzentration bestimmt, ist die Luftaustauschrate

- es müssen Annahmen über die Faktoren getroffen werden, die die Veränderung der Radonkonzentration im Laufe der Zeit bestimmen

Zur Beschreibung des Radoneintrittsprozesses können zwei Arten von Simulationsmethoden verwendet werden: Gleichgewichts- und dynamische (instationäre) Modelle. Das einfachste Gleichgewichtsmodell geht von einer idealisierten Situation aus, in der unter konstanten Bedingungen ein Gleichgewicht zwischen Radoneintritt und -abfuhr durch Zerfall und Luftaustausch erreicht wird. Dieses Gleichgewichtsmodell wird für grobe Schätzungen der Radonakkumulation in Innenräumen in einigen typischen Situationen oder für gemittelte Raum- und Lüftungsparameter verwendet. Das dynamische Modell berücksichtigt Änderungen der Bedingungen für den Radoneintritt und die Akkumulation im Laufe der Zeit. Der Vorteil des dynamischen Modells liegt u. a. in der Möglichkeit, Raumlüftungsszenarien zu berücksichtigen, die der Realität sehr nahekommen.

In einer Reihe von Forschungsarbeiten werden mathematische Modelle des Radoneintritts in Wohngebäuden und Modelle der Raumlüftung verwendet, um die Wirksamkeit verschiedener Radonschutzmaßnahmen zu analysieren, z. B. /MCG 21/, /DIL 15/, /XIE 21/, /DOV 21/, /SAA 21/.

Heutzutage gängig sind Simulationen mit CFD (Computational Fluid Dynamics), wie jene von /XIE 21/. Die Autoren untersuchten die Radondiffusion in Innenräumen unter dreidimensionalen, instationären Bedingungen. Die Radonexhalationsrate von Baumaterialien wurde mit einer Radonsammelkammer in Kombination mit einem RAD7-basierten Radon/Thoron-Detektor gemessen. Die Radondiffusion in Innenräumen unter verschiedenen Belüftungsmustern wurde mit CFD simuliert, wobei die Stabilisierung der Radonkonzentration nach 10 Stunden in einer geschlossenen Umgebung als Ausgangsbedingung diente. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Radonkonzentration in den untersuchten Räumen am besten dadurch verringern lässt, dass der Zuluft einlass an der Oberseite und der Abluftauslass an der Unterseite des untersuchten Raums erfolgt. Mit dieser verbesserten Belüftungsmethode kann die Radonkonzentration in Innenräumen nach 20 Minuten auf ein niedrigeres, konstantes Niveau gesenkt werden.

In /DOV 22/ wurde die Auswirkung der Lüftungseffizienz auf die Radon- ( $^{222}\text{Rn}$ ) und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ )-Konzentration in der Innenraumluft eines Wohngebäudes durch die Anwendung einer instationären Datenanalyse mit dem Programm CONTAM 3.4 untersucht. Hierbei handelt es sich um ein Mehrzonen-Analyseprogramm, mit dem die Qualität der

Raumluft in Bezug auf die ausgewählten Schadstoffe, die Lüftungsraten und die Wirksamkeit der Lüftung analysiert werden kann. Kontinuierliche Messungen der  $^{222}\text{Rn}$ - und  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen wurden zusammen mit grundlegenden meteorologischen Parametern in einer Wohnung (Grundfläche ca. 27 m<sup>2</sup>) in Ljubljana, Slowenien, durchgeführt. Während des gesamten Versuchs (3. bis 15. Oktober 2021) wurden Szenarien mit häufiger Belüftung (mehrmals täglich), schlechter Belüftung (ein- bis zweimal täglich) und keiner Belüftung angewandt, und der genaue Belüftungs- und Belegungsplan wurde aufgezeichnet. Auf der Grundlage der Messungen wurden instationäre Simulationen der  $^{222}\text{Rn}$ - und  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen für sechs Szenarien durchgeführt, bei denen die Auslegungslüftungsraten (entsprechend den Lüftungsanforderungen und -empfehlungen) variierte. An den Tagen mit häufigem Lüften wurde eine mäßige Korrelation zwischen den gemessenen und simulierten Konzentrationen ( $r = 0,62$  für  $^{222}\text{Rn}$ ,  $r = 0,55$  für  $\text{CO}_2$ ) festgestellt. Die Ergebnisse der Simulationen ergaben die optimalen Lüftungsraten, um eine  $\text{CO}_2$ -Konzentration unter 1.000 ppm und eine  $^{222}\text{Rn}$ -Konzentration unter 100 Bq/m<sup>3</sup> zu gewährleisten.

## **2.8 Gegenüberstellung der vorliegenden Ergebnisse mit jenen aus dem Forschungsvorhaben 3618S12362**

Im Forschungsvorhaben 3618S12362 wurde weiterer Forschungsbedarf bezüglich der gemessenen Radon-Aktivitätskonzentrationen und der COCOSYS-Rechenergebnisse ausgewiesen. In Tab. 2.18 sind diese den neuen Ergebnissen aus den Messungen und der Adaption und Validierung von COCOSYS im aktuellen Forschungsvorhaben gegenübergestellt. Bis auf die gekennzeichneten Punkte konnten damit im Forschungsvorhaben alle offenen Punkte adressiert werden.

**Tab. 2.18** Reflektion der erfolgten Aktivitäten zur COCOSYS-Adaption und Validierung gegenüber den Ergebnissen im Forschungsvorhaben 3618S12362

Offene Punkte aus dem Forschungsvorhaben 3618S12362	Status im aktuellen Forschungsvorhaben	erfüllt
Frequenz Messdaten zu klein	15 bzw. 30 min über 38 Tage, bzw. 15 min über 194 Tage (2 Geräte)	✓
Tür/Fensteröffnungen protokollieren	Sensoren (Kontaktschalter) an einem Fenster und an vier Türen installiert: F1 und T2 bis T5, nur F1 verwertbar, Quervergleich $F1 - T_{innen}$ , keine Korrelation der Daten T3/T5 mit F1	✓(F1) ✗(T2 –T5)
Keine Daten zum Heizverhalten	Ableitbar aus $T_{innen}$ (COCOSYS Analysen zeigen, dass nur geringer Einfluss auf $c_{Rn-222}$ )	✓
(lokale) Wetterdaten	Messdaten verfügbar: Wetterstation mit zusätzlichen Raumsensoren, Wetter-Einfluss über Fenster-Modell ( $T_{aussern}$ , $v_{Wind}$ )	✓
Radon-Konzentration in Umgebung	Nicht gemessen (bodennahe Konzentration?), aber angenommener Wert $10 \text{ Bq/m}^3$ ausreichend genau (basiert auf BfS-Karte (Freiluft): <a href="https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/karten/freiluft.html">https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/karten/freiluft.html</a> )	✓
Raumspezifische Quellrate	Kein anerkanntes Freisetzung-Modell verfügbar, COCOSYS-Eingabe basiert auf $c_{Rn-222}$ Messdaten	✗
Mittelwert $c_{Rn-222}$	COCOSYS Modell für "kumulierten" Mittelwert über den simulierten Zeitraum (kein „Jahres“-Mittelwert), Nachrechnungen über mehrere Tage anstatt nur 24 h	✓

### 3 Zusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens war die Fortentwicklung des GRS-Codes COCOSYS unter Berücksichtigung der im Forschungsvorhaben 3618S12362 gewonnenen Erkenntnisse.

Für das Forschungsvorhaben wurden zwei geeignete Messobjekte identifiziert, wobei eines davon als Reserve diente. In einem der identifizierten Gebäude wurde zunächst die Radon-Aktivitätskonzentration und andere relevante Parameter (z. B. Temperatur, Luftdruck, Windgeschwindigkeit) für einen bestimmten Zeitraum und zu unterschiedlichen Jahreszeiten mittels aktiver Messtechnik die Radon-Konzentration aufgezeichnet. Aus diesen Daten wurden dann die für COCOSYS notwendigen Eingabedaten, insbesondere die Radon-Quellstärke und die meteorologischen Randbedingungen bestimmt. Weiterhin ist mit Exposimetern eine Langzeitbestimmung (1 bis 12 Monate) der Radon-Aktivitätskonzentrationen in dem Gebäude durchgeführt worden.

COCOSYS ist ein Simulationsprogramm, mit dem die dynamische Radonverteilung in Räumen in Abhängigkeit von zeitabhängigen Randbedingungen inklusive dem Radonzerfall berechnet werden kann. In den Untersuchungen im Forschungsvorhaben wurde der zur Simulation von Radon weiter adaptierte COCOSYS-Code erfolgreich eingesetzt. Dabei kam zur Beschreibung der Raumbelüftung ein neues Fenstermodell zum Einsatz, das mit Wetterdaten gespeist wurde. Da durch eine umfangreiche Recherche in der Fachliteratur kein universelles Freisetzungsmodell zum Radon-Eintritt in Räume gefunden werden konnte, wurde die zeitabhängige Radon-Quellrate weiterhin als Zeittabelle in COCOSYS vorgegeben. Ziel der COCOSYS-Rechnungen war die Abschätzung eines langzeitigen Mittelwertes. Dazu wurde im adaptierten Code für jede Rechenzone die Ausgabe eines kumulierten Mittelwertes über den simulierten Zeitraum implementiert. Eine exakte deterministische Reproduktion lokaler Radon-Konzentrationen ist aufgrund der äußerst komplexen Randbedingungen und Zusammenhänge nicht möglich.

Die mittels COCOSYS bestimmten und auf ein Jahr extrapolierten Mittelwerte der Radon-Konzentration stimmen gut mit den GRS-Messungen und den Exposimeter-Ergebnissen überein. COCOSYS konnte die Exposimeter-Jahresmittelwerte für alle drei Räume innerhalb des Unsicherheitsbandes der Messungen extrapolieren.

Unter den gegebenen Randbedingungen ist COCOSYS also anwendbar zur Abschätzung eines Jahresmittelwertes der Radon-Aktivitätskonzentration für das Messobjekt

Oberheldrungen. Für diese Abschätzung sind als wesentliche Randbedingungen Informationen zur Quellrate  $Q$  und zur Grundlüftung  $L$  erforderlich sowie vor allem zum Lüftungsverhalten. Hier war hilfreich, dass der Arbeitsplatz konsequent periodisch über ein Fenster belüftet wurde.

Sowohl die COCOSYS-Rechnungen als auch die GRS-Messungen über ausgewählte Zeiträume und die daraus abgeleiteten Jahresmittelwerte als auch die Exposimeter-Jahresmessung durch ein beauftragtes Sachverständigenbüro zeigen eine Überschreitung des Referenzwertes von  $300 \text{ Bq/m}^3$ . Die gute Raumbelüftung in den Sommermonaten, in der die Mittelwerte unter  $300 \text{ Bq/m}^3$  liegen, kann nicht die höheren Aktivitätskonzentrationen im Winterhalbjahr kompensieren. Damit sind baulich-technische oder andere Maßnahmen zur Reduzierung der Radonkonzentration empfohlen. Dies gilt insbesondere für die als Arbeitsplätze genutzten Zimmer. Die bisherige Praxis der Lüftung über das Fenster führt zu Jahresmittelwerten von  $\sim 600 \text{ Bq/m}^3$ . Ohne aktive Fensterlüftung sind Mittelwerte von über  $1\ 200 \text{ Bq/m}^3$  zu erwarten.

Aus allen Messungen geht hervor, dass die Konzentration homogen über die drei Zimmer verteilt ist. Auf der Basis von Variationsrechnungen mit COCOSYS wird geschlossen, dass keine lokale Radon-Quelle vorliegt, sondern das Gas über die gesamte Boden- bzw. über die seitlich vom Erdreich bedeckte Fläche eintritt.

Basis für die erfolgreichen Rechnungen waren detaillierte GRS-eigene Messungen mit Hilfe von sechs Radon-Messgeräten und eine Wetterstation, womit eine verbesserte Dokumentation von Randbedingungen gegenüber dem Forschungsvorhaben 3618S12362 erreicht werden konnte. Eine neue Qualität wurde durch die Installation von Kontaktschaltern an Türen und Fenstern erreicht. Diese lieferten wichtige Informationen zu den Randbedingungen beim Lüften des Arbeitsplatzes durch ein Fenster. Für andere Fenster/Türen waren die Signale aufgrund technischer Probleme nur begrenzt nutzbar.

Weil für eine Prognoserechnung mit COCOSYS detaillierte Kenntnisse von Parametern nötig sind, die hier nur aus vorhergehenden Messungen am Messobjekt bezogen werden konnten, sind Prognoserechnungen für beliebige andere (unbekannte) Objekte nur mit entsprechenden Vorabuntersuchungen zur Ermittlung der benötigten Parameter möglich.



## Literaturverzeichnis

- /ARN 22/ Arndt, S., Band, S., Beck, S., Eschricht, D., Iliev, D., Klein-Heßling, W., Nowack, H., Reinke, M., Sonnenkalb, M., Spengler, C., Weber, G.: Titel, GRS-P-3/Vol. 1. GRS gGmbH, September 2022.
- /BFS 22a/ BfS: Durchschnittliche Radonkonzentrationen in der bodennahen Atmosphäre (Freiluft).
- /BFS 21/ Friedrich-Knees, F., Foerster, E., Schneider, F., Feige, S.: Messgeräte zur Bestimmung der Radon-222-Aktivitätskonzentration oder -Exposition / Instruments to measure radon-222 activity concentration or exposure, Vergleichs- und Eignungsprüfung 2021 / Interlaboratory comparison and proficiency testing 2021. Bundeamt für Strahlenschutz, BfS-38/22, urn:nbn:de:0221-2022030331657: Salzgitter, Dezember 2021.
- /BFS 22b/ BfS: Radon-Vorsorgegebiete, Die Karte bildet den Stand der Gebietsausweisungen der einzelnen Bundesländer vom 15. Juni ab. Erreichbar unter <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/karten/vorsorgegebiete.html>, abgerufen am 23. August 2023.
- /DAR 05/ Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., Barros-Dios, J. M., Baysson, H., Bochicchio, F., Deo, H., Falk, R., Forastiere, F., Hakama, M., Heid, I., Kreienbrock, K., Kreuzer, M., Lagarde, F., Mäkeläinen, I., Muirhead, C., Oberaigner, W., Pershagen, G., Ruano-Ravina, A., Ruosteenoja, E., Rosario, A.S., Tirmarche, M., Tomasek, K., Whitley, E., Wichmann, H.E., Doll, R.: Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *British Medical Journal*, Bd. 330, Nr. 7485, S. 223, 2005.
- /DIL 15/ T.M.O. Diallo, B. Collignan, F. Allard: Air flow models for sub-slab depressurization systems design. *Building and Environment*, Nr. 87, S. 327–341, 2015.
- /DIN 21/ DIN e.V.: Technische Spezifikation DIN/TS 18117-1.2021-09, 2021.

- /DNT 22a/ dnt: Thermo-/Hygrosensor zum kabellosen Übertragen von Temperatur- und Luftfeuchtedaten an Ihre Funk-Raumklimastation RoomLogg PRO sowie WiFi-Wetterstation WeatherScreen PRO. . Erreichbar unter <https://www.dnt.de/Produkte/Zusatz-Thermo-Hygrosensor/>, abgerufen am 23. August 2023.
- /DNT 22b/ dnt WeatherScreen PRO: Wetterstation in Oberheldrungen, IOBERH132. Erreichbar unter <https://www.wunderground.com/dashboard/pws/IOBERH132/graph/2022-08-7/2022-08-7/weekly>, Stand von Daten Juli/August 2022.
- /DOV 21/ M. Dovjak, B. Virant, A. Krainer, M. Š. Zavrl, Vaupotic J: Determination of optimal ventilation rates in educational environment in terms of radon dosimetry. International Journal of Hygiene Environ Health, Nr. 234, 2021.
- /DOV 22/ M. Dovjak, O. Vene, Vaupotic, J.: Analysis of ventilation efficiency as simultaneous control of radon and carbon dioxide levels in indoor air applying transient modelling, IJERPH 19. IJERPH, Bd. 19, Nr. 2125, 2022.
- /EIC 16/ Eicker U., Erhart T., Gürlich D., Haag M., Schulze T.: KonLuft – Energieeffizienz von Gebäuden durch kontrollierte natürliche Lüftung, Abschlussbericht. Hrsg.: Hochschule für Technik Stuttgart, 122-004-13P V1.2, 31. Oktober 2016.
- /EU 14/ Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom und 2003/122/Euratom (Council Directive 2013/59/Euratom) in der Fassung vom 5. Dezember 2013 (Office Journal of the European Union), zuletzt geändert 6. Februar 2014 (Office Journal of the European Union 2014, Nr. L 13, S. 1–73).
- /FEG 22/ Feige, S.: Wir wollten es wissen - Radonmessungen an den Arbeitsplätzen im BfS. Präsentation, Strahlenschutzgespräch Radon 2022: Spreespeicher Berlin, 5. Dezember 2022.

- /FLE 80/ Fleisher, R. L., Hart, H. R., Mogro-Campero, A.: Radon emanation over an ore body: search for long-distance transport of radon. Nr. 173, S. 169–181, 1980.
- /FON 03/ Font L., Baixeras C.: The RAGENA dynamic model of radon generation, entry and accumulation indoors. Science of The Total Environment, Nr. 307, S. 95–121, 2003.
- /GRS 20/ Filby, A., Arndt, S., Hussels, M.-T., Meyering, H., Wolff, H.: Fortentwicklung von Programmen und Codes zur Modellierungen des Verhaltens von Radon am Arbeitsplatz und Validierung der Codeanpassung. GRS, GRS, Bd. 607, ISBN 978-3-947685-93-6, GRS, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig, Oktober 2020.
- /GRS 22a/ GRS gGmbH: Fachinformationsgespräch BfS – GRS zum Vorhaben 3621S12350 Modellierung des Verhaltens von Radon am Arbeitsplatz, Mitschrieb. November 2022.
- /GRS 22b/ GRS gGmbH: COCOSYS Web Page. Erreichbar unter <https://user-codes.grs.de/node/7>, Stand vom August 2023.
- /HAM 22/ Hama: Hama WiFi Tür-Fenster-Kontakt (ohne Hub, Fenster-/Tür-Sensor mit Magnetkontakt, Alarm-Benachrichtigung aufs Handy, 2,4GHz, gratis App, Batterie-Betrieb) WLAN Fensteralarm/Türalarm. Erreichbar unter <https://www.amazon.de/Hama-T%C3%BCr-Fenster-Kontakt-Magnetkontakt-Alarm-Benachrichtigung-Batterie-Betrieb/dp/B07GVV7N77?th=1>, Stand von 2022.
- /HRE 22/ Herr E.: Aw: Fragen zur Lüftung im Sommer. An H. Meyering, E-Mail, 11. November 2022.
- /IAEA 96/ International Atomic Energy Agency (IAEA) (Hrsg.): International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. IAEA Safety Series, No. 115: Vienna, Februar 1996.

- /ICRP 10/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon, ICRP Publication 115. Annals of the ICRP, Bd. 40, Nr. 1, S. 1–64, DOI 10.1016/j.icrp.2011.08.011, 2010.
- /ICRP 14/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Radiological Protection against Radon Exposure, ICRP Publication 126. Annals of the ICRP, Bd. 43, Nr. 3, 2014.
- /ICRP 17/ International Commission on Radiological Protection: Occupational intakes of radionuclides. ICRP publication, Bd. 134, 351 S., ISBN 9781526408310, SAGE: London, 2017.
- /ICRP 19/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Radiological protection from naturally occurring radioactive material (NORM) in industrial processes, ICRP Publication 142. Annals of the ICRP, Bd. 48, Nr. 4, 2019.
- /KEM 22/ Kemski, J.: Radonmessungen: Ergebnisse, Objekt in Oberheldrungen, im Auftrag der GRS, Anhang "Rn\_GRS Ergebnisprotokoll\_2022-06-02.pdf". An GRS gGmbH, E-Mail, 4. Juni 2022.
- /KEM 23/ Kemski, J.: Radonmessungen: Ergebnisse Objekt in Oberheldrungen, im Auftrag der GRS, Anhang "Rn\_GRS Ergebnisprotokoll\_2023-04-20.pdf". An GRS gGmbH, E-Mail, 20. April 2023.
- /KHA 11a/ Khattak, N. U., Asif, K. M., Ali N., Muntazir, S. A.: Radon monitoring for geological exploration: a review. Journal of Himalayan Earth Science, Bd. 44, Nr. 2, S. 91–102, 2011.
- /KIN 94/ King, C. Y., Minissale, A.: Seasonal variability of soil-gas radon concentration in central California. Radiation Measurements, Bd. 23, Nr. 4, S. 683–692, 1994.
- /LUE 22/ Lüftungsland GmbH: Bad-Ventilatoren. 21. November 2022.
- /LUG 22/ Die Lüftungsgurus: Bad-Lüfter mit Zeitsteuerung. 21. November 2022.

- /MAA 95/ Maas, A.: Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung. Dissertation an der Universität Gesamthochschule Kassel, 1995.
- /MCG 21/ J.A. McGrath, R. Aghamolaei, J. O'Donnell, M.A. Byrne: Factors influencing radon concentration during energy retrofitting in domestic buildings: a computational evaluation. *Building and Environment*, Nr. 194, 2021.
- /NAZ 88/ Nazaroff, W. W., Nero, A. V.: Radon and its decay products in indoor air. ISBN 0-471-62810-7, John Wiley & Sons, Inc, 1988.
- /OTT 92/ Otton, J. K.: The Geology of Radon, U.S. Geological Survey Open File Report. 1992.
- /ROG 91/ Rogers, V. C., Nielson, K. K.: Multiphase radon generation and transport in porous materials. *Health Physics*, Nr. 60, S. 807–815, 1991.
- /SAA 21/ Z. Saadi, N. Mansouri, L. Marie, G. Ielsch: Towards a better assessment model of transient radon concentrations in dwellings basements for the study of the effectiveness of soil radon mitigation systems designs. *Journal of Environmental Radioactivity*, Nr. 106651, S. 235–236, 2021.
- /SKU 19/ Skubacz, K., Wysocka, M., Michalik, B., Dziurzyński, W., Krach, A., Krawczyk, J., Pałka, T.: Modelling of radon hazards in underground mine workings. *Science of The Total Environment*, Nr. 695, S. 1–8.
- /WHO 09/ World Health Organization (WHO): WHO Handbook on Indoor Radon, A Public Health Perspective. 110 S., ISBN 978 92 4 154767 3.
- /XIE 21/ D. Xie, Y. Wu, C. Wang, C.W. Yu, L. Tian, H. Wang: study on the three-dimensional unsteady state of indoor radon diffusion under different ventilation conditions. *Sustainable Cities Society*, Nr. 66, 2021.
- /YAR 2022/Ilia V. Yarmoshenko, Aleksandra D. Onishchenko, Georgy P. Malinovsky, Aleksey V. Vasilyev: MODELING and justification of indoor radon prevention and remediation measures in multi-storey apartment buildings. *Results in Engineering*, Nr. 100754, S. 1–10, 2022.



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Lage des Messobjekts in Deutschland /BFS 22b/ .....	7
Abb. 2.2	Wetterstation (links unten) mit einem Sensor und Display mit Anzeige der Messergebnisse /DNT 22a/.....	9
Abb. 2.3	Kontaktschalter /HAM 22/ .....	10
Abb. 2.4	Instrumentierung des Messobjekts (im Souterrain) .....	11
Abb. 2.5	Vergleich der gemessenen Radon-Aktivitätskonzentration in den verschiedenen Räumen über die gesamte Messkampagne 1 .....	14
Abb. 2.6	Zeitlicher Verlauf der Radon-Aktivitätskonzentration im Büro (Z1) während Phase 1 („Winter“) und 2 („Frühjahr“) mit Schaltzeiten der Kontaktsensoren am Bürofenster (K1) und der Tür zwischen Büro und Druckerraum (K2) .....	16
Abb. 2.7	Beispielhafte Darstellung des Fits eines ungestörten Tagesganges in Phase 1, aus dem die Quellrate $Q_{Rn} = (50 \pm 12) \text{ Bq/m}^3\text{h}$ und die Luftwechselrate $L = (0,03 \pm 0,02) \text{ 1/h}$ als COCOSYS-Inputparameter abgeleitet wurden .....	17
Abb. 2.8	Im Büro (Z1) und im Druckerraum (Z2) über den Gesamtzeitraum der beiden Messkampagnen von ca. 6 Monaten gemessene Radonaktivitätskonzentration mit eingezeichneten Messphasen 1 bis 3, welche für die Nach- und Vorausrechnungen mittels COCOSY ausgewählt wurden.....	18
Abb. 2.9	Zeitlicher Verlauf der Radon-Aktivitätskonzentration im Büro (Z1) und im Druckerraum (Z2) während Phase 3 („Sommer“) .....	19
Abb. 2.10	COCOSYS, Wetter-Randbedingungen, Eingabebeispiel und 3-Zonen-Nodalisierung .....	23
Abb. 2.11	COCOSYS, Wetter-Randbedingungen, verwendete Werte für Druck und Temperatur in der Umgebungszone ENVIR-I.....	24
Abb. 2.12	COCOSYS, Wetter-Randbedingungen, Energiebilanzfehler .....	24
Abb. 2.13	Volumenstrom bei einseitiger Fensterlüftung .....	26
Abb. 2.14	Öffnungsteilflächen für Kipp- und Drehfenster .....	28
Abb. 2.15	Darstellung der effektiven Öffnungsfläche $A_{\text{eff}}$ für ein Kipp- bzw. Drehfenster in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel $\alpha$ ( $b = 0,6 \text{ m}$ , $h = 1,8 \text{ m}$ ) .....	28



Abb. 2.16	Eingabebeispiel für eine WINDOW Verbindung mit PHAFF-Korrelationskoeffizienten.....	31
Abb. 2.17	Beispiel für die Ergebnisausgabe zu einer WINDOW-Verbindung .....	32
Abb. 2.18	Schematischer Aufbau des Versuchsraums und der Messeinrichtung von Maas /MAA 95/ .....	33
Abb. 2.19	Temperatur-Randbedingungen für Versuch „Kippfenster mit 8 cm Öffnung“ /MAA 95/ .....	34
Abb. 2.20	COCOSYS, Nachrechnung Versuch „Kippfenster mit 8 cm Öffnung“, Windgeschwindigkeit .....	35
Abb. 2.21	COCOSYS, Nachrechnung Versuch „Kippfenster mit 8 cm Öffnung“, Innenraum-Temperatur .....	36
Abb. 2.22	COCOSYS, Nachrechnung Versuch „Kippfenster mit 8 cm Öffnung“, Volumenstrom .....	37
Abb. 2.23	COCOSYS, Drei-Zonen-Modell, Test der implementierten Mittelwertberechnung der Rn-222-Aktivitätskonzentration .....	40
Abb. 2.24	COCOSYS, Drei-Zonen-Modell, berechnete Rn-222-Aktivitätskonzentration .....	41
Abb. 2.25	COCOSYS, GWK, Vergleich gemessene und berechnete Rn-222-Aktivitätskonzentrationen .....	42
Abb. 2.26	COCOSYS, GWK, kumulierte Rn-222-Aktivitätskonzentrationen .....	42
Abb. 2.27	COCOSYS, GWK, aktuelle und kumulierte Rn-222-Aktivitätskonzentration in Zone F1 .....	43
Abb. 2.28	COCOSYS, EFH, Rn-222-Aktivitätskonzentrationen in Bad (R1) und Flur (R2), Ergebnisvergleich mit alter und modifizierter COCOSYS-Version .....	44
Abb. 2.29	COCOSYS, EFH, mittlere Rn-222-Aktivitätskonzentrationen in Bad (R1) und Flur (R2) und akkumulierte Mittelwerte aus COCOSYS .....	45
Abb. 2.30	Messobjekt Oberheldrungen, während der Begehung aufgenommene Geometriedaten .....	47
Abb. 2.31	Messobjekt Oberheldrungen, Grundriss der relevanten Zimmer im Souterrain des EFH .....	48
Abb. 2.32	Messobjekt Oberheldrungen, Fenster über dem Schreibtisch in Zimmer 1 mit Öffnungssensor (rot markiert) und Empfangsteil der Wetterstation .....	49

Abb. 2.33	COCOSYS, Nodalisierung „Ganze Räume“ mit fünf Modellzonen für das Messobjekt Oberheldrungen .....	50
Abb. 2.34	Strömungsverbindungen zwischen den Zimmern bei Verwendung des Modells mit ganzen Räumen mit unterstelltem Lufteintritt in Z1 und Luftaustritt aus Z3 .....	51
Abb. 2.35	COCOSYS, Nodalisierung „Ganze Räume“, Zonen Z1 bis Z4 .....	52
Abb. 2.36	COCOSYS, Nodalisierung „Unterteilte Räume“, Z1 bis Z4 jeweils durch eine untere (Zx.1) und eine obere Zone (Zx.2) simuliert.....	54
Abb. 2.37	COCOSYS, „Unterteilte Räume“, exemplarischer Strömungszustand innerhalb der Zimmer bei aktiver Heizung und Simulation des Luftwechsels mit einem Fan in Z1.2.....	54
Abb. 2.38	Aktivitätsmessungen in den Räumen Z1, Z2 und Z3 ohne Filterung .....	57
Abb. 2.39	Komposit-Plot der geglätteten Aktivitätsmessdaten in den Räumen Z1, Z2 und Z3 mit einem Glättungsfenster von 1,5 h .....	58
Abb. 2.40	Graphische Bestimmung von Steigungen unter Annahme eines abschnittswise linearen Verlaufes .....	59
Abb. 2.41	Theoretisches Verhalten der Aktivitätskonzentration für konstante Parameter $Q = 50 \text{ Bq}/(\text{m}^3\text{h})$ , $L = 0,03 \text{ h}^{-1}$ , $\lambda_{\text{Rn-222}} = 0,0076 \text{ h}^{-1}$ .....	60
Abb. 2.42	Bedingungen für Quellrate $Q$ und Zeitkonstante $\lambda$ basierend auf der Auswertung des Zeitverhaltens der Messwerte.....	61
Abb. 2.43	Überprüfung des theoretischen Verlaufes der Aktivitätskonzentration in Zimmer Z1 mit einer COCOSYS-Rechnung unter Verwendung der „Ganze Räume“ - Nodalisierung .....	64
Abb. 2.44	Überprüfung des theoretischen Verlaufes der Aktivitätskonzentration in Zone Z1.1 mit einer COCOSYS-Rechnung unter Verwendung der „Unterteilte Räume“-Nodalisierung.....	65
Abb. 2.45	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z1; ganze Raumzonen, Quelle nur in Z1 .....	67
Abb. 2.46	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z2; ganze Raumzonen, Quelle nur in Z1 .....	67
Abb. 2.47	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z3; ganze Raumzonen, Quelle nur in Z1 .....	68
Abb. 2.48	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z1; ganze Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4.....	69

Abb. 2.49	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z2; ganze Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4.....	70
Abb. 2.50	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z3; ganze Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4.....	70
Abb. 2.51	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z4; ganze Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4.....	71
Abb. 2.52	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z1; ganze Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1 bezogen auf gesamtes Souterrainvolumen.....	72
Abb. 2.53	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z2; ganze Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1 bezogen auf gesamtes Souterrainvolumen.....	72
Abb. 2.54	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z3; ganze Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1 bezogen auf gesamtes Souterrainvolumen.....	73
Abb. 2.55	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z4; ganze Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1 bezogen auf gesamtes Souterrainvolumen.....	73
Abb. 2.56	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z1.1; unterteilte Raumzonen, Quelle nur in Z1, Luftwechsel in Z1.....	74
Abb. 2.57	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z2.1; unterteilte Raumzonen, Quelle nur in Z1, Luftwechsel in Z1.....	75
Abb. 2.58	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z3.1; unterteilte Raumzonen, Quelle nur in Z1, Luftwechsel in Z1.....	75
Abb. 2.59	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z4.1; unterteilte Raumzonen, Quelle nur in Z1, Luftwechsel in Z1.....	76
Abb. 2.60	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z1.1; unterteilte Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1 .....	77
Abb. 2.61	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z2.1; unterteilte Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1 .....	77
Abb. 2.62	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z3.1; unterteilte Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1 .....	78
Abb. 2.63	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z4.1; unterteilte Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1 .....	78

Abb. 2.64	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z1.1; unterteilte Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1 bis Z4 jeweils bezogen auf das Raumvolumen .....	79
Abb. 2.65	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z2.1; unterteilte Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1 bis Z4 jeweils bezogen auf das Raumvolumen .....	80
Abb. 2.66	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z3.1; unterteilte Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1 bis Z4 jeweils bezogen auf das Raumvolumen .....	80
Abb. 2.67	Testrechnung zur Aktivitätskonzentration in Z4.1; unterteilte Raumzonen, Quelle in Z1 bis Z4, Luftwechsel in Z1 bis Z4 jeweils bezogen auf das Raumvolumen .....	81
Abb. 2.68	COCOSYS-Untersuchung zur Fensteröffnung in Phase 1, Rn-Aktivitätskonzentrationsverlauf in Zone Z1.1 .....	83
Abb. 2.69	Messobjekt Oberheldrungen, Wetterdaten Phase 1 - Sonneneinstrahlung, Zuordnung der Zeitbereiche P1 – P4 der COCOSYS Nachrechnung.....	84
Abb. 2.70	Messobjekt Oberheldrungen, Wetterdaten Phase 1 - Regenmenge, Zuordnung der Zeitbereiche P1 – P4 der COCOSYS Nachrechnung.....	84
Abb. 2.71	Messobjekt Oberheldrungen, Innentemperatur in Z1 und Öffnungswinkel Fenster F1, Korrektur der Schließzeit von F1 bei 110,7 h (398.400 s).....	86
Abb. 2.72	Messobjekt Oberheldrungen, Rn-Aktivitätskonzentrationsverlauf in Zone Z1.1 mit gemessener (Blau) und korrigierter (Rot) Öffnungsdauer des Fensters F1 .....	87
Abb. 2.73	COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1: Aktivitätskonzentration in Z1.1 im Vergleich zur Messung RSC1467 (mit Messunsicherheiten).....	89
Abb. 2.74	COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1: Aktivitätskonzentration in Z1.1 im Vergleich zur Messung RTM 174 (mit Messunsicherheiten).....	89
Abb. 2.75	COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1: Aktivitätskonzentration in Z2.1 im Vergleich zur Messung EQF (mit Messunsicherheiten) .....	90
Abb. 2.76	COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1: Aktivitätskonzentration in Z2.1 im Vergleich zur Messung RSC1464 (mit Messunsicherheiten).....	90

Abb. 2.77	COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1: Aktivitätskonzentration in Z3.1 im Vergleich zur Messung RSC546 (mit Messunsicherheiten) .....	91
Abb. 2.78	COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1: Aktivitätskonzentration in Z3.1 im Vergleich zur Messung RSC1157 (mit Messunsicherheiten).....	91
Abb. 2.79	COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1: Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z1.1 im Vergleich zur Messung (mit statistischer Messunsicherheit) .....	92
Abb. 2.80	COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1: Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z2.1 im Vergleich zur Messung (mit statistischer Messunsicherheit) .....	92
Abb. 2.81	COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1: Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z3.1 im Vergleich zur Messung (mit statistischer Messunsicherheit) .....	93
Abb. 2.82	COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1: Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z1.1, Vergleich COCOSYS für 158,25 h mit elektronischer Messung nach 38 Tagen und Exposimeter über 39 Tage .....	95
Abb. 2.83	COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1 (Verwendung von Fits): Aktivitätskonzentration in Z1.1 im Vergleich zur Messung RSC1467 (mit Messunsicherheiten).....	96
Abb. 2.84	COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1 (Verwendung von Fits): Aktivitätskonzentration in Z1.1 im Vergleich zur Messung RTM174 (mit Messunsicherheiten).....	96
Abb. 2.85	COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1 (Verwendung von Fits): Aktivitätskonzentration in Z2.1 im Vergleich zur Messung EQF (mit Messunsicherheiten).....	97
Abb. 2.86	COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1 (Verwendung von Fits): Aktivitätskonzentration in Z2.1 im Vergleich zur Messung RSC1464 (mit Messunsicherheiten).....	97
Abb. 2.87	COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1 (Verwendung von Fits): Aktivitätskonzentration in Z3.1 im Vergleich zur Messung RSC1157 (mit Messunsicherheiten).....	98
Abb. 2.88	COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1 (Verwendung von Fits): Aktivitätskonzentration in Z3.1 im Vergleich zur Messung RSC564 (mit Messunsicherheiten).....	98

Abb. 2.89	COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1 (Verwendung von Fits): Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z1.1 im Vergleich zur Messung (mit statistischer Messunsicherheit).....	99
Abb. 2.90	COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1 (Verwendung von Fits): Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z2.1 im Vergleich zur Messung (mit statistischer Messunsicherheit).....	99
Abb. 2.91	COCOSYS-Nachrechnung der Messphase 1 (Verwendung von Fits): Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z3.1 im Vergleich zur Messung (mit statistischer Messunsicherheit).....	100
Abb. 2.92	Prognoserechnung 1, Annahme: Fenster F1 einmal täglich für 35 min volle 90° Öffnungswinkel geöffnet sowie Tagesgänge für Außen- und Innentemperaturen .....	102
Abb. 2.93	Prognoserechnung 2, Einfluss der aus den Messdaten für drei Zeitabschnitte abgeleiteten Q und L auf die Aktivitätskonzentration in Zimmer 1 .....	104
Abb. 2.94	Vergleich zwischen der Annahme für die Öffnungen von F1 in der Prognoserechnung 1 (Pr1) und den gemessenen Kontaktzeiten (Pr3)...	105
Abb. 2.95	Vergleich der Prognoserechnungen 3 und 1 (Pr3 und Pr1), Verlauf der Rn-Aktivitätskonzentration in Z1.1 .....	106
Abb. 2.96	Vergleich der Prognoserechnungen 3 und 1 (Pr3 und Pr1), Verlauf der kumulierten Mittelwerte der Rn-Aktivitätskonzentration in Z1.1 .....	107
Abb. 2.97	Prognoserechnung 4, Vergleich der in Rechnung 1 – 3 angenommenen mit den gemessenen Randbedingungen, Außentemperatur.....	108
Abb. 2.98	Prognoserechnung 4, Vergleich der in Rechnung 1 – 3 angenommenen mit den gemessenen Randbedingungen, Umgebungsdruck.....	108
Abb. 2.99	Prognoserechnung 4, Vergleich der in Rechnung 1 – 3 angenommenen mit den gemessenen Randbedingungen, Windgeschwindigkeit .....	109
Abb. 2.100	Prognoserechnung 4, Vergleich der in Rechnung 1 – 3 angenommenen mit den gemessenen Randbedingungen, Innentemperaturen in Z1 und Z2.....	109
Abb. 2.101	Vergleich der Prognoserechnungen 4 und 3 (Pr4 und Pr3), Verlauf der Rn-Aktivitätskonzentration in Z1.1 .....	110

Abb. 2.102	Vergleich der Prognoserechnungen 4 und 3 (Pr4 und Pr3), Verlauf der kumulierten Mittelwerte der Rn-Aktivitätskonzentration in Z1.1 .....	111
Abb. 2.103	Prognoserechnungen der Messphase 2, Aktivitätskonzentration in Z1.1 im Vergleich zur Messung RSC1467 (mit Messunsicherheiten) .....	112
Abb. 2.104	Prognoserechnungen der Messphase 2, Aktivitätskonzentration in Z1.1 im Vergleich zur Messung RTM174 (mit Messunsicherheiten).....	113
Abb. 2.105	Prognoserechnungen der Messphase 2, Aktivitätskonzentration in Z2.1 im Vergleich zur Messung EQF (mit Messunsicherheiten) .....	113
Abb. 2.106	Prognoserechnungen der Messphase 2, Aktivitätskonzentration in Z2.1 im Vergleich zur Messung RSC1464 (mit Messunsicherheiten) .....	114
Abb. 2.107	Prognoserechnungen der Messphase 2, Aktivitätskonzentration in Z3.1 im Vergleich zur Messung RSC1157 (mit Messunsicherheiten) .....	114
Abb. 2.108	Prognoserechnungen der Messphase 2, Aktivitätskonzentration in Z3.1 im Vergleich zur Messung RSC546 (mit Messunsicherheiten) .....	115
Abb. 2.109	Prognoserechnungen der Messphase 2, kumulierter Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z1.1 im Vergleich zur Messung (mit statistischer Messunsicherheit) .....	117
Abb. 2.110	Prognoserechnungen der Messphase 2, kumulierter Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z2.1 im Vergleich zur Messung (mit statistischer Messunsicherheit) .....	117
Abb. 2.111	Prognoserechnungen der Messphase 2, kumulierter Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z3.1 im Vergleich zur Messung (mit statistischer Messunsicherheit) .....	118
Abb. 2.112	Wetterstation Oberheldrungen IOBERH132, ausgewählte Wetterdaten vom 1. bis 7. August 2022 /DNT 22b/ .....	119
Abb. 2.113	Nachrechnung Messphase 3 „Sommer“, Randbedingung Außentemperatur 30. Juli bis 6. August .....	120
Abb. 2.114	Nachrechnung Messphase 3 „Sommer“, Randbedingung Umgebungsdruck 30. Juli bis 6. August .....	120
Abb. 2.115	Nachrechnung Messphase 3 „Sommer“, Randbedingung Windgeschwindigkeit 30. Juli bis 6. August.....	121
Abb. 2.116	Erste Nachrechnung Messphase 3, Radon-Aktivitätskonzentration in Z1.1 bis Z2.2.....	122



Abb. 2.117	Erste Nachrechnung Messphase 3, Atmosphärenströmung durch Verbindung J-Z1 (von Zone Z1.1 nach Z2.1), Stagnation zwischen 2.930 und 2.940 h.....	123
Abb. 2.118	Öffnungen von Fenster F1 für die „Sommer“-Rechnung, Annahme in der ersten Variante So_00 und den gefitteten Zeiten in Variante So_01 .....	124
Abb. 2.119	Nachrechnung Messphase 3, Aktivitätskonzentration in Z1.1, Varianten So_00 (in Rot) und So_01 (in Blau) im Vergleich zur Messung RSC1467.....	125
Abb. 2.120	Nachrechnung Messphase 3, Aktivitätskonzentration in Z2.1, Varianten So_00 (in Rot) und So_01 (in Blau) im Vergleich zur Messung RSC1464.....	125
Abb. 2.121	Nachrechnung Messphase 3, kumulierter Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z1.1, Varianten So_00 und S0_01 im Vergleich zur Messung .....	126
Abb. 2.122	Nachrechnung Messphase 3, kumulierter Mittelwert der Aktivitätskonzentration in Z2.1, Varianten So_00 und S0_01 im Vergleich zur Messung .....	127
Abb. 2.123	Messobjekt Oberheldrungen, COCOSYS-Variantenrechnungen „Fensteröffnung“, Verlauf der Rn-222-Aktivitätskonzentration in Zone Z1.2 .....	136
Abb. 2.124	Messobjekt Oberheldrungen, COCOSYS-Variantenrechnungen „Fensteröffnung“, Verlauf des kumulierten Mittelwertes der Rn-222-Aktivitätskonzentration in Zone Z1.2 .....	137
Abb. 2.125	Messobjekt Oberheldrungen, COCOSYS-Variantenrechnungen „Abluftanlage“, Verlauf der Rn-222-Aktivitätskonzentration in Zone Z1.2 .....	141
Abb. 2.126	Messobjekt Oberheldrungen, COCOSYS-Variantenrechnungen „Abluftanlage“, Verlauf des kumulierten Mittelwertes der Rn-222-Aktivitätskonzentration in Zone Z1.2 .....	141
Abb. 2.127	Messobjekt Oberheldrungen, COCOSYS Varianten Var00a und Var00a_mod, Massenstrom durch Undichtheit Tür T3.....	143
Abb. 2.128	Messobjekt Oberheldrungen, COCOSYS Varianten Var00a und Var00a_mod, Verlauf des kumulierten Mittelwertes der Rn-222 Aktivitätskonzentration in Zone Z1.2 .....	143

Abb. 2.129 Grunddiagramm für überschlägige Abschätzung der Auswirkungen von Luftwechseländerungen /DIN 21/, Anwendung auf den kumulierten Mittelwert für Phase 1 zum Messobjekt Oberheldrungen.... 145

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Anforderungen an die Messobjekte .....	5
Tab. 2.2	Überblick über die einsetzbare Messtechnik .....	8
Tab. 2.3	In den Räumen des Messobjektes eingesetzte Messtechnik zur zeitaufgelösten Messung der Radon-Aktivitätskonzentration und jeweils verwendetes Messintervall sowie Speicherumfang des Gerätes.....	13
Tab. 2.4	Zeitraum der für die COCOSYS-Simulation ausgewählten Messphasen innerhalb der beiden Messkampagnen mit den jeweiligen mittleren Radon-Aktivitätskonzentrationen in Z1_Büro (RSCplus-1467).....	15
Tab. 2.5	Messzeiträume sowie mittlere Radon-Aktivitätskonzentrationen aus der Langzeitbestimmung mit Exposimetern im Vergleich zu den entsprechenden Mittelwerten aus den zeitaufgelösten Messungen .....	20
Tab. 2.6	Empirische Korrelationskoeffizienten für die Volumenstrom-Gleichung nach <i>Phaff und De Gids</i> bzw. <i>Maas</i> .....	29
Tab. 2.7	Modifizierte bzw. neue Unterprogramme für das WINDOW-Strömungsmodell in COCOSYS THY .....	30
Tab. 2.8	EFH, aus den Messwerten abgeleitete und mit COCOSYS berechnete mittlere Rn-222-Konzentrationen in Bad und Flur.....	44
Tab. 2.9	Vergleich der von COCOSYS berechneten kumulierten Mittelwerte mit den Messwerten in Zimmer Z1 bis Z3 nach 158,25 h.....	94
Tab. 2.10	Bestimmung von Q und L durch numerisches Fitting an Messwerte im Zimmer Z1 (Messgerät RTM1688-174) für Phase 2 .....	103
Tab. 2.11	Prognoserechnungen der Messphase 2: kumulierte Mittelwerte der COCOSYS Aktivitätskonzentration in Rechnung Pr4 im Vergleich zur Messung 158,25 h bis 326,5 h bzw. Exposimeter /KEM 22/.....	116
Tab. 2.12	Nachrechnung Messphase 3, kumulierte Mittelwerte der Aktivitätskonzentration der COCOSYS-Variante So_01 im Vergleich zur Messung.....	126
Tab. 2.13	Mit COCOSYS für drei Messphasen im Objekt Oberheldrungen berechnete kumulierte Mittelwerte der Radonaktivitätskonzentration und Extrapolation auf Jahresmittelwerte .....	128

Tab. 2.14	Für drei Messphasen im Objekt Oberheldrungen berechnete kumulierte Mittelwerte der Radonaktivitätskonzentration und Extrapolation auf Jahresmittelwerte sowie 6-Monatsmittelwert .....	128
Tab. 2.15	Vergleich der extrapolierten COCOSYS-Jahresmittelwerte der Radonaktivitätskonzentrationen mit Exposimeter-Messungen (Festkörperspurdetektoren über 356 Tage im Objekt Oberheldrungen /KEM 23/) .....	129
Tab. 2.16	COCOSYS-Variantenrechnungen zur Maßnahme „Fensteröffnung“, Einfluss auf den berechneten „kumulierten“ Mittelwert der Radon-Konzentration in Zone Z1.2 nach 158,25 Stunden .....	134
Tab. 2.17	COCOSYS-Variantenrechnungen zur Maßnahme „Abluftanlage“, Einfluss auf den berechneten „kumulierten“ Mittelwert der Radon-Konzentration in Zone Z1.2 nach 158,25 Stunden .....	139
Tab. 2.18	Reflektion der erfolgten Aktivitäten zur COCOSYS-Adaption und Validierung gegenüber den Ergebnissen im Forschungsvorhaben 3618S12362 .....	150

**Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

**85748 Garching b. München**

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

**10719 Berlin**

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

**38122 Braunschweig**

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

[www.grs.de](http://www.grs.de)