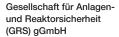


Fortentwicklung von Programmen und Codes zu Modellierungen des Verhaltens von Radon am Arbeitsplatz und Validierung der Codeanpassung





Fortentwicklung von
Programmen und Codes
zu Modellierungen des
Verhaltens von Radon
am Arbeitsplatz und
Validierung der
Codeanpassung

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

Oktober 2020

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) unter dem Kennzeichen 3618S12362 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

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

GRS - 607 ISBN 978-3-947685-93-6

Danksagung

Die Bearbeiter sind – neben dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) für die Förderung und dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) für die Fachbetreuung – Familie G. und Familie S., dem Wasserwerk (die aus Gründen der Anonymisierung nicht genannt werden können) und dem Sachverständigenbüro Dr. Thomas Haumann, zum Dank verpflichtet.

Kurzfassung

Das vorliegende Forschungsvorhaben befasst sich mit der Ausbreitungsmodellierung von Radon in ausgewählten Gebäuden. Im ersten Schritt erfolgte die Erstellung eines generischen Radon-Ausbreitungsmodells zur vereinfachten Modellierung der Ausbreitung von Radon in Gebäuden. Zugleich sollten die mit diesem generischen Modell gewonnenen Ergebnisse als Vergleichsgrundlage für die komplexeren Modellrechnungen mittels des GRS-Rechenprogramms COCOSYS dienen.

Darauf aufbauend wurde ein Eingabedatensatz für COCOSYS erstellt. Dieser Eingabedatensatz berücksichtigte bereits vorliegende Informationen und Randbedingungen aus Blower-Door-Versuchen in sechs unterschiedlichen Objekten, die in den Rechnungen mit dem generischen Radon-Ausbreitungsmodell genutzt wurden. Speziell für ein Objekt wurde eine Reihe von COCOSYS-Testrechnungen mit diesen bereits vorliegenden Messdaten durchgeführt. Diese dienten der Überprüfung und Verbesserung des generischen Eingabedatensatzes selbst. Daneben wurden in Testrechnungen die Modellierungsmöglichkeiten als auch die Grenzen des COCOSYS-Programmes zur Simulation von geringen Gasmassen geprüft, wie sie typischerweise bei der Analyse der Rn-222-Verteilung in Gebäuden auftreten. Damit wurde bestätigt, dass COCOSYS prinzipiell in der Lage ist, die Ausbreitung eines beliebigen Gases auch bei sehr geringen Konzentrationen und damit auch Rn-222 zu simulieren.

Im nächsten Schritt fanden die Modellanwendung und ein Ergebnisvergleich statt. Dabei wurden die Ergebnisse des generischen Ausbreitungsmodells für die Rn-222-Gleichgewichtsaktivitätskonzentration mit den von COCOSYS berechneten Werten verglichen. Die Ergebnisse für die stationäre Aktivitätskonzentration stimmten sehr gut überein, was die Schlussfolgerung erlaubte, dass COCOSYS in der Lage ist, Rn-222-Aktivitätskonzentrationen auch in Raumsystemen zu berechnen.

Anschließend erfolgte die Adaption von COCOSYS durch Implementierung von als notwendig festgestellten Programmerweiterungen zur Simulation von Radon-Ausbreitungsvorgängen.

Parallel zu diesen Arbeiten mussten für die in diesem Vorhaben geplanten Messungen geeignete Räumlichkeiten mit potenziell vorhandenen Arbeitsplätzen identifiziert werden. Insgesamt wurden in drei Messobjekten (zwei Einfamilienhäuser, eines davon mit Arbeitsplatz und ein Wasserwerk) mehrtägige Messungen der Radon-Aktivitätskonzentrationen und weiterer relevanter Parameter vorgenommen.

Diese erhobenen Messwerte stellten die Datenbasis für die Validierung von COCOSYS bezüglich der Simulation von Rn-222-Verteilungsvorgängen bereit. Mittels der erhobenen Messwerte zu Rn-222 Aktivitätskonzentrationen wurden für zwei Messobjekte (Einfamilienhäuser) und für ausgewählte Zeitphasen Nachrechnungen und damit erste Schritte zur COCOSYS-Validierung für die Radonverteilung in Gebäuden durchgeführt. Diese zeigten gute bzw. akzeptable Übereinstimmungen mit den gemessenen Radon-Aktivitätskonzentrationen. Daraus konnte abgeleitet werden, dass COCOSYS zeitabhängige Rn-222-Aktivitätskonzentrationen in Raumsystemen berechnen kann und die im Code vorgenommenen Anpassungen dabei die Anwendung des Programms für Fragestellungen zur Radon-Verteilung in Arbeitsräumen erleichtern.

Neben anfänglichen Einraum-Simulationen sind anschließend weitere Nachrechnungen für Mehrraum-Geometrien unter Nutzung von aus Messdaten gefitteten Luftwechselzahlen als auch mit Strömungsberechnungen auf Grund von Druckdifferenzen erfolgt. Dies waren Validierungsschritte für eine echte dynamische Rn-222-Verteilung innerhalb eines Objektes mit Strömungsvorgängen über Türen und Undichtigkeiten. Dabei zeigte sich deutlich, dass die berechnete lokale Radon-Aktivitätskonzentration unmittelbar von der angenommenen (d. h. gefitteten) Luftwechselzahl bzw. den berechneten Strömungszuständen abhängt. Es zeigte sich, dass ohne die Kenntnis der exakten Randbedingungen verlässliche Vorhersagen nicht möglich sind.

Auf Basis der Messergebnisse wurden weiterhin Maßnahmen und Handlungsempfehlungen für ein ausgewähltes Messobjekt erstellt. Weiterhin wurde während der gesamten Vorhabensdauer der Stand von Wissenschaft und Technik für die Zwecke des Vorhabens verfolgt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Planung und Ablauf des Vorhabens	3
3	Darstellung der Projektarbeiten und -ergebnisse	5
3.1	AP 1.1: Generisches Ausbreitungsmodell	5
3.1.1	Allgemeines	5
3.1.2	Ergebnisse	6
3.2	AP 1.2: Erstellung eines COCOSYS-Datensatzes	10
3.2.1	COCOSYS-Nodalisation	12
3.2.2	Testrechnungen mit dem erstellten Datensatz	16
3.3	AP 1.3: Modellanwendung und Ergebnisvergleich	21
3.3.1	Nachrechnung mit COCOSYS	21
3.3.2	Vergleich der Ergebnisse von COCOSYS mit dem generischen Ausbreitungsmodell	29
3.4	AP 2: Adaption von COCOSYS zur Simulation von Radon- Ausbreitungsvorgängen	
3.4.1	Klärung der Ursachen für den unteren Grenzwert einer	
0.4.0	Gaseinspeisung	
3.4.2	Adaption von COCOSYS für die Komponente TRACER_GAS	
3.5	AP 3: Messung und Datenerhebung	
3.5.1	Eingesetzte Messtechnik	51
3.5.2	AP 3.1: Identifikation und Beschreibung geeigneter Gebäude mit Arbeitsplätzen	52
3.5.3	AP 3.2: Planung der Instrumentierung und der Messungen	
3.5.4	AP 3.3: Durchführung von Detailuntersuchungen und kontinuierlichen	
	Messungen	65
3.6	AP 4: COCOSYS-Validierung anhand erhobener Messwerte	98
3.6.1	Variantenrechnungen zu Daten vom Sachverständigenbüro Haumann	98
3.6.2	COCOSYS-Nachrechnungen für das EFH Dresden-Freital	. 103
3.6.3	COCOSYS-Nachrechnungen zum Messobjekt 2 (EFH mit	
	Gewölbekeller)	. 137

3.6.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der COCOSYS-Validierung	151
3.7	AP 5: Ableitung von Maßnahmen und Handlungsempfehlungen	156
3.8	AP 6: Verfolgung und Auswertung des internationalen Standes von Wissenschaft und Technik	162
4	Forschungs- und Handlungsbedarf	169
	Literaturverzeichnis	. 171
	Abbildungsverzeichnis	. 177
	Tabellenverzeichnis	.185
	Abkürzungsverzeichnis	. 187

1 Einleitung

Gemäß §5 Abs. 4 des Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) /SSG 20/ wird jeder Ort, an dem sich eine Arbeitskraft während ihrer Berufsausübung regelmäßig oder wiederholt aufhält, als Arbeitsplatz definiert. Der Referenzwert für die über das Jahr gemittelte Rn-222 Aktivitätskonzentration in der Luft an Arbeitsplätzen beträgt 300 Bq/m³. Wer in einem nach §121 Absatz 1 Satz 1 StrlSchG festgelegtem Gebiet für einen Arbeitsplatz in einem Innenraum verantwortlich ist, der sich im Erd- oder Kellergeschoss befindet, oder die Art des Arbeitsplatzes einem der Arbeitsfelder nach Anlage 8 zuzuordnen ist, muss zukünftig Messungen der Rn-222 Aktivitätskonzentration in der Luft veranlassen /SSG 20/. Ziel der Messungen muss es dabei sein, zuverlässig die jährliche Durchschnittsaktivitätskonzentration des Rn-222 zu bestimmen und somit eine Gefährdung der Arbeitnehmer durch Radon auszuschließen bzw. entsprechende Maßnahmen zur Einhaltung der Grenzwerte einzuleiten.

Der Fokus dieses Forschungsvorhabens lag auf der Messung und Ausbreitungsmodellierung von Radon am Arbeitsplatz. Das Vorhaben orientiert sich dabei an den Ergebnissen bisheriger Vorhaben, z. B. Untersuchungen der GRS zur Entwicklung, Verifikation, Validierung und Anwendung des Containment-Codes COCOSYS. Zielsetzung bei der Anwendung von COCOSYS ist die Simulation aller wesentlichen Phänomene, Prozesse und Zustände im Sicherheitsbehälter (Containment) von Kernkraftwerken /ARN 19/. COCOSYS wurde bisher von der GRS für die umfassende Simulation von Stör- und Unfällen im Sicherheitsbehälter von Leichtwasserreaktoren entwickelt und validiert und durch die GRS in nationalen als auch in internationalen Projekten eingesetzt. Dieses Vorhaben griff mit der Fortentwicklung des von der GRS entwickelten Programmsystem COCOSYS zum Zwecke der Modellierung der Radon-Ausbreitung in Gebäuden mit Arbeitsplätzen einen neuen Ansatz auf.

Im ersten Schritt dieses Vorhabens wurde ein generisches Modell zur Beschreibung des Transports von Radon aus dem Untergrund in ein Gebäude mit Arbeitsplätzen und für die Ausbreitung von Radon im Gebäudeinneren entwickelt. Dieses generische Modell sollte hauptsächlich als Werkzeug zum Vergleich der erhobenen Messdaten mit den von COCOSYS berechneten Ergebnissen dienen. Zugleich konnten mittels des generischen Modells aus den Messwerten Eingabeparameter für die COCOSYS-Modellrechnungen bestimmt werden.

Im darauf aufbauenden Schritt sollte COCOSYS zur Modellierung des Verhaltens von Radon am Arbeitsplatz adaptiert, unter Nutzung neu aufgenommener Messdaten validiert und somit weiterentwickelt werden. Es war angestrebt, mittels der Fortentwicklung des für die Abbildung komplexer Transportprozesse etablierten Codes COCOSYS und dessen erweiterter Validierung das Ausbreitungsverhalten von Radon am Arbeitsplatz zukünftig realistischer abbilden zu können.

2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im ersten Schritt erfolgte eine umfangreiche Literaturrecherche zu der Thematik "Radon in Gebäuden". Hierbei wurden neben den gängigen Formeln zur Berechnung der Radonkonzentration auch Informationen zu den wesentlichen Einflussfaktoren (z. B. Radonquellterme, Luftwechselrate) gesichtet. Basierend auf den Ergebnissen wurde daraufhin ein generisches Modell aufgestellt, welches für eine erste Anpassung des GRS-Rechenprogramms COCOSYS benutzt wurde. Weiterhin sollten die mit dem generischen Modell gewonnenen Ergebnisse als Vergleichsgrundlage für die komplexeren Modellrechnungen mittels COCOSYS dienen und Eingabedaten für die Modellrechnungen bereitstellen.

Darauf aufbauend wurde ein Eingabedatensatz für COCOSYS erstellt. Dieser Eingabedatensatz berücksichtigte bereits vorliegende Informationen und Randbedingungen (aus Blower-Door-Versuchen in sechs unterschiedlichen Objekten), die in den Rechnungen mit dem generischen Radon-Ausbreitungsmodell genutzt wurden. Speziell für ein Objekt wurde eine Reihe von COCOSYS-Testrechnungen mit diesen bereits vorliegenden Messdaten durchgeführt.

Parallel zu diesen Arbeiten mussten für die in diesem Vorhaben geplanten Messungen geeignete Räumlichkeiten mit potenziell vorhandenen Arbeitsplätzen identifiziert werden. Dabei war in erster Linie auf eine ausreichend hohe Radon-Aktivitätskonzentration und auf eine gute messtechnische Erfassung und Dokumentation der Einflussfaktoren zu achten. Insgesamt wurden Messungen der Radon-Aktivitätskonzentrationen und weiterer relevanter Parameter in drei Messobjekten (zwei Einfamilienhäuser, eines davon mit Arbeitsplatz und ein Wasserwerk) für eine mehrtägige Dauer vorgenommen.

Neben der Prüfung der Eignung von COCOSYS für die Simulation von Rn-222-Ausbreitungsvorgängen und der Implementierung von als notwendig identifizierten Programmadaptionen und -erweiterungen erfolgte mit Hilfe der eigenen Messungen sowie weiterer gut dokumentierter Messdaten, die Validierung von COCOSYS für diese Fragestellungen.

Auf Basis der Messergebnisse wurden weiterhin Maßnahmen und Handlungsempfehlungen für ein ausgewähltes Messobjekt erstellt.

Während der gesamten Vorhabensdauer wurde weiterhin der Stand von Wissenschaft und Technik für die Zwecke des Vorhabens verfolgt. Dazu wurden hauptsächlich Artikel aus wissenschaftlichen Zeitschriften gesichtet, aber auch ausgewählte Veranstaltungen besucht, wie das alljährlich stattfindende Radon-Fachgespräch in Berlin.

3 Darstellung der Projektarbeiten und -ergebnisse

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

3.1 AP 1.1: Generisches Ausbreitungsmodell

3.1.1 Allgemeines

Im Rahmen dieses Arbeitspakets erfolgte die Erstellung eines generischen Ausbreitungsmodells zur vereinfachten Modellierung der Ausbreitung von Radon in Gebäuden. Weiterhin sollten die mit dem generischen Modell gewonnenen Ergebnisse als Vergleichsgrundlage für die komplexeren Modellrechnungen mittels COCOSYS dienen.

Im generischen Ausbreitungsmodell wurden die grundlegenden abzubildenden Transportphänomene (bspw. Zutritt von Radon aus dem Untergrund in das Gebäude bzw. Transport innerhalb des Gebäudes) sowie die relevanten Prozesse und Eigenschaften der Ausbreitung und des Verhaltens von Radon in Gebäuden implementiert.

Ziel der Erstellung des generischen Modells war, zunächst relativ einfache Berechnungen des Radonzutritts, der Radonausbreitung bzw. der maximal möglichen Radonkonzentration (im "steady state") durchzuführen.

Im ersten Schritt der Bearbeitung dieses AP wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt. Hierbei wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Herangehensweisen unterschiedlicher Komplexität recherchiert. Zunächst wurde jedoch auf eine möglichst einfache, in der Literatur jedoch etablierte Herangehensweise zurückgegriffen.

Im generischen Modell werden folgende Prozesse berücksichtigt:

- die Zufuhr von Radon aus dem Untergrund und zwar über den Parameter "Quellstärke"
- Radon-Zerfall
- Reduzierung der Radonkonzentration infolge von Luftwechseln (über den Parameter "Luftwechselrate"

3.1.2 Ergebnisse

Nach /NAZ 88/ hängt die ²²²Rn-Konzentration von drei Faktoren ab:

- die Eintrittsrate bzw. Bildungsrate, wobei es verschiedene Quellen geben kann,
- die Lüftungsrate,
- den Raten für chemische bzw. physikalische Umwandlung bzw. Entfernung.

Im Gegensatz dazu ist das Verhalten der Radon-Zerfallsprodukte deutlich komplizierter. Es hängt von der Radon-Konzentration, der Lüftungsrate, der Wechselwirkung zwischen Zerfall und chemischen Reaktionen, Partikelkonzentrationen und den Eigenschaften der Grenzfläche zwischen der Innenraumatmosphäre und den einschließenden Oberflächen ab /NAZ 88/.

Nach /NAZ 88/ lässt sich im einfachsten Falle die Gleichgewichts-Konzentration ("steady state") eines nicht-reaktiven Gases (Radon) in einem Raum bei konstanter Quellstärke nach (3.1) ermitteln:

$$C_{Rn} = \frac{(Q_{Rn} + C_0 L)}{(L + \lambda_{Rn})} \tag{3.1}$$

wobei

C_{Rn} Aktivitätskonzentration [Bq/m³],

Q_{Rn} Radon-Quellstärke [Bq/(m³h)],

L Luftwechselrate [1/h],

C₀ Radon-Aktivitätskonzentration in der Außenluft [Bq/m³],

 λ_{Rn} Zerfallskonstante ²²²Rn (= 0,0076/h).

Bei den gängigen Lüftungsraten von > 0,1/h kann nach /NAZ 88/ der Radon-Zerfall in (3.1) ignoriert werden. Dies vereinfacht (3.1) zu (3.2):

$$C - C_0 = \frac{Q_{Rn}}{L} \tag{3.2}$$

Falls erwartungsgemäß die Außenluft-Aktivitätskonzentration von Radon deutlich kleiner als jene im Gebäude ist, lässt sich die (3.2) weiter vereinfachen zu (3.3) /NAZ 88/:

$$C_{Rn} = \frac{Q_{Rn}}{L} \tag{3.3}$$

Zeitabhängige Veränderungen können mit den o. g. Gleichungen nicht beschrieben werden. Dennoch sind sie geeignet, um grundlegende Abschätzungen bezüglich der Radon-Aktivitätskonzentration zu treffen.

Zu Beginn des Vorhabens war es noch nicht möglich, im COCOSYS-Code den Zerfall von Rn-222 zu berücksichtigen. Daher wurde für die Abschätzung der Raumluftkonzentration von Radon (Gleichgewichtskonzentration) zunächst der einfache Zusammenhang (3.3) gewählt.

Zur Beschreibung des zeitlichen Verlaufs der Radon-Aktivitätskonzentration wurde zunächst gemäß /NAZ 88/ unter Vernachlässigung der Außenluftkonzentration folgender Ansatz gewählt:

$$\frac{\mathrm{d}C_{\mathrm{Rn}}(t)}{\mathrm{d}t} = -\left(L + \frac{0,0076}{\mathrm{h}}\right) \cdot C(t) + Q_{\mathrm{Rn}} \tag{3.4}$$

Ähnliche Ansätze finden sich in /SCH 18/ zur Beschreibung der Radonkonzentrationsentwicklung bei Blower-Door-Tests und in /LAU 11/ zur allgemeinen Beschreibung der Konzentration von Gasen in einem definierten Volumen als Funktion der Zeit.

Bei der Lösung dieser Differentialgleichung wurde zunächst von einer verschwindenden Anfangskonzentration ausgegangen, also $C_0 = C(t=0) = 0$. Die Rn-222 Aktivitätskonzentration in Abhängigkeit der Zeit zeigt dann:

$$C_{Rn}(t) = Q_{Rn} \cdot \frac{1 - e^{-(L+0.0076/\text{h}) \cdot t}}{L + 0.0076}$$
(3.5)

Q_{Rn} Quellstärke [Bq/(m³h)]

C_{Rn}(t) Radon-Aktivitätskonzentration zum Zeitpunkt t in [Bq/m³]

L Luftwechselrate [1/h]

t Zeit [h]

In erster Näherung kann die Quellstärke über die Anstiege der Rn-Aktivitätskonzentration ermittelt werden, indem diese jeweils abschnittsweise betrachtet und linear approximiert werden. Dies ergibt sich aus der Näherung des exponentiellen Konzentrationsanstiegs für kleine *t*:

$$C_{\rm Rn} = Q_{\rm Rn} \frac{1 - e^{-(L+0.0076/h)t}}{L + 0.0076/h}$$
(3.6)

$$C_{\rm Rn} \approx Q_{\rm Rn} \frac{1 - (1 - (L + 0.0076/h)t)}{L + 0.0076/h} = Q_{\rm Rn} \cdot t$$
 (3.7)

Wie oben erwähnt, wird weiterhin die Kenntnis der Luftwechselrate L benötigt. Diese wurde im Rahmen des Vorhabens über Messungen des Tracergases CO₂ ermittelt. Die Herangehensweise wird in Kapitel 3.5.4 näher erläutert. Grundsätzlich beruht sie auf der Beimpfung des betrachteten Raumes mit CO₂ zu Beginn der Messreihe und der Auswertung des darauffolgenden Konzentrationsabfalls.

Im Verlauf des Projektes zeigte sich allerdings bei der Datenerhebung und -analyse, dass einige hier gemachte Annahmen und Voraussetzungen nicht immer zutrafen:

- Die Anfangskonzentration C₀ zu Beginn der beobachteten Anstiege der Rn-Aktivitätskonzentration war im Allgemeinen nicht vernachlässigbar und hing vom Nutzungsverhalten des Gebäudes ab. Insbesondere bei dauerhaft geschlossenen Türen traten zum Teil erhebliche Anfangskonzentrationen auf.
- Sowohl Quellstärke als auch Luftwechselrate erwiesen sich über die Messdauer als zeitabhängig. Während dieser Zeitabhängigkeit im Falle der Quellstärke durch die Durchführung von abschnittsweisen Fits Rechnung getragen werden konnte, war dies im Fall der Bestimmung der Luftwechselrate durch Messungen des Tracergase nicht möglich, da hier jeweils eine erneute Beimpfung des Raumes mit CO₂ nötig gewesen wäre.
- Zudem erwies sich die Durchführung der Tracergasversuche als experimentell schwierig und fehleranfällig, da hier eine möglichst homogene Verteilung des Gases im Raum zu Beginn der Messung nötig ist und der folgende Konzentrationsabfall ungestört (möglichst ohne Öffnung der Türen, z. B. zum Verlassen des Raumes) erfolgen sollte. Weiterhin war die Durchführung dieser Messungen aufgrund der Raumvolumina und Verfügbarkeit von CO₂-Sensoren nicht in allen Räumen und Versuchsobjekten möglich.

Daher wurde im weiteren Verlauf des Projektes der obige Ansatz um die Anfangskonzentration der Rn-Aktivität erweitert:

$$C_{\rm Rn}(t) = C_0 e^{-(L+0.0076/h)t} + Q_{\rm Rn} \frac{1 - e^{-(L+0.0076/h)t}}{L + 0.0076/h}$$
(3.8)

Mit dieser Gleichung wurde dann jeweils ein abschnittsweiser Fit des vollständigen exponentiellen Kurvenverlaufs für geeignete monoton steigende (Konzentrationsanstiege) bzw. fallende (Konzentrationsabfälle) Abschnitte durchgeführt. Bei dieser Vorgehensweise werden drei Fitparameter angesetzt: die Anfangskonzentration C_0 , die Quellstärke Q_{Rn} und die Luftwechselrate L. Die Luftwechselrate kann somit direkt aus der Messung der Aktivitätskonzentration ermittelt werden, so dass keine separate Bestimmung über die Tracergasmessung nötig ist.

Abb. 3.1 zeigt ein Beispiel der exponentiellen Fits mit 3 Fitparametern an Messwerte.

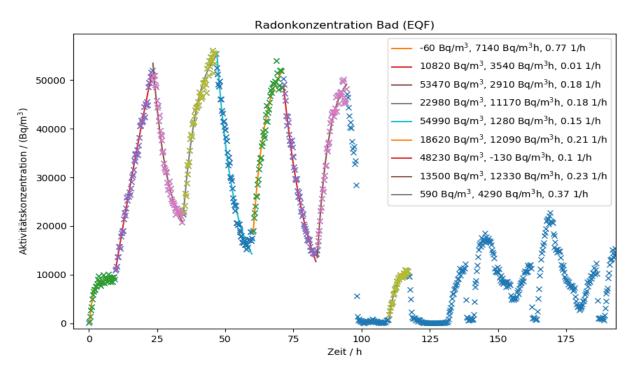


Abb. 3.1 Messwerte des zeitlichen Verlaufes der ²²²Rn-Aktivitätskonzentrationen; farbig markiert sind die für den Fit gewählten Abschnitte von Messwerten bzw. die zugehörigen Fits mit resultierenden Werten der Fitparameter

3.2 AP 1.2: Erstellung eines COCOSYS-Datensatzes

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde ein Eingabedatensatz für das GRS-Rechenprogramm COCOSYS /GRS 20/ erstellt. Der Eingabedatensatz berücksichtigt Informationen und Randbedingungen, die auch in den Rechnungen mit dem generischen Radon-Ausbreitungsmodell genutzt wurden (siehe AP 1.1, Kapitel 3.1.2). Diese bereits existierenden Messdaten und Informationen sind das Ergebnis von Blower-Door-Versuchen zur Ermittlung der Rn-222 Quellstärke in Wohnhäusern und Schulen (als Objekt 1 bis 6 bezeichnet), die vom Sachverständigenbüro Dr. Thomas Haumann ermittelt wurden – siehe Tab. 3.1 bis Tab. 3.3.

Die in den Tabellen angegebenen Rn₅₀ bzw. Rn₄ - Werte (Rn-Aktivitätskonzentration bei 50 Pa Unterdruck (Blower-Door-Test) bzw. Rn-Konzentration bei "natürlichem" Unterdruck von 4 Pa) für die Aktivitätskonzentration wurden dabei vom Autor anhand von (3.3) aus gemessener Luftwechselrate und Quellstärke bestimmt.

 Tab. 3.1
 Blower-Door-Messergebnisse für 6 Objekte in der Übersicht /HAU 17/

	L ₅₀ [1/h]	Rn ₅₀ [Bq/m³]	Quellstärke [Bq/(m³h)]					
Objekt 1, Wohnhaus 1 in Stuttgart, Wohn- und Kellerbereich UG.								
Raumvolumen: 157 m³; Bodenfläche: 65 m²								
Sommer 2016	2,1 90 190							
Winter 2016/17	Vinter 2016/17 2,3 150 345							
	Objekt 2, Wohnhaus 2 in Stuttgart, Büro- und Kellerbereich UG. Raumvolumen 110 m³, Bodenfläche: 50 m²							
Sommer 2016	16,4	600	9.800					
Winter 2016/17	12,7	500	6.400					
Objekt 3, Wohnh	aus in Fürth, Musik	studio im UG.						
Raumvolumen 1	59 m³; Bodenfläche	60 m²						
Sommer 2016	2,5	2,5 80 200						
Winter 2016/17	Vinter 2016/17 1,9 90 170							
Objekt 4, Schule in Nürnberg, Pausenraum im UG. Raumvolumen: 185 m³; Bodenfläche 71 m².								
Sommer 2016	1,1	110	115					
Winter 2016/17	1,0	220	220					
	fschule in Nürnber 170 m³, Bodenfläche	g, Turn- und Comput e: 170 m²	erraum im UG.					
Sommer 2016	0,64	125	80					
Winter 2016/17	0,6	140	85					
Objekt 6, Schule in Ansbach, Kreativraum im UG. Raumvolumen: 99 m³; Bodenfläche: 28 m²								
Winter 2016/17	3,8	520	1.970					
L ₅₀ = Luftwechselrate und Rn ₅₀ = Rn-Aktivitätskonzentration bei 50 Pa Unterdruck								

Tab. 3.2 Mittlere Radon-Aktivitätskonzentration Rn₅₀ ermittelt mit Hilfe der Quellstärken und Lufteintrittsraten anhand (3.3) /HAU 17/

		Objekt					
Parameter	Einheit	1	2	3	4	5	6
L ₅₀	1/h	2,2	14,6	2,2	1,1	0,62	3,8
Quellstärke	Bq/(m³h)	267	8.100	185	165	133	1.970
Rn ₅₀	Bq/m³	121	555	84	150	83	520

Bei Radon Blower-Door-Messung mit 50 Pa (Mittelwerte Sommer-Winter, Objekt 6 nur Winter)

Bei normaler Nutzung (4 Pa Unterdruck im Jahresmittel und Annahme eines linearen Zusammenhangs der Werte) ergeben sich die in Tab. 3.3 genannten Werte (Faktor 12,5, d. h. alles berechnet).

Tab. 3.3 Berechnete Radon-Aktivitätskonzentration Rn₄ bei normaler Nutzung bei 4 Pa im Jahresmittel (Faktor 12,5) /HAU 17/

		Objekt					
Parameter	Einheit	1	2	3	4	5	6
L ₄	1/h	0,18	1,17	0,18	0,09	0,05	0,3
Quellstärke	Bq/(m³h)	21,4	648	14,8	13,2	10,64	157,6
Rn ₄	Bq/m³	119	554	82	147	133	530
4 Pa Unterdruck (Mittelwerte Sommer-Winter, Objekt 6 nur Winter)							

3.2.1 COCOSYS-Nodalisation

Ein typischer COCOSYS-Eingabedatensatz /ARN 19/ enthält Angaben zur Nodalisation wie z. B. Volumina, Höhenkoten, Flächen, Überströmflächen, Wärmeleitstrukturen und zu Anfangsbedingungen wie Luftdruck und -temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wandtemperaturen usw. Diese Angaben sind zu den Messobjekten in Tab. 3.1 nicht verfügbar, sodass auf Basis der Raumvolumina und Bodenflächen bzw. "Sommer" oder "Winter" alle für einen ablauffähigen COCOSYS-Datensatz unbedingt notwendigen Informationen durch plausible Annahmen aufgefüllt wurden. Insbesondere durch das Fehlen von Temperaturrandbedingungen und Verbindungsdaten sind damit keine dynamischen Rechnungen, die das Transportverhalten von Rn-222 simulieren, möglich. Adäquat zu Kapitel 3.1.2 wird somit nur eine stationäre Rn-222 Konzentration im simulierten Objekt berechnet.

Da für alle 6 Objekte in Tab. 3.1 nur jeweils 1 Gesamtvolumen verfügbar ist, wurde ein generischer COCOSYS-Datensatz mit 3 Raumzonen erstellt. Damit wird das relevante Objekt durch eine Zone plus zwei Umgebungszonen abgebildet – siehe Abb. 3.2.

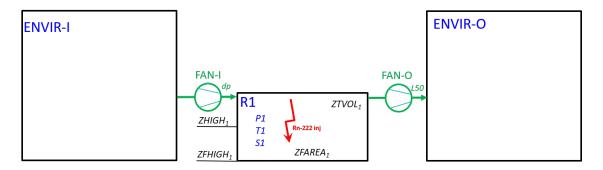


Abb. 3.2 COCOSYS, 3-Zonen-Modell

Zone R1 simuliert dabei das ausgewählte Objekt. Alle erforderlichen geometrischen Angaben werden aus dem verfügbaren Gesamtvolumen und der Bodenfläche laut Tab. 3.1 ermittelt. Die bei den Blower-Door-Versuchen eingestellte bzw. auf 50 Pa normierte Luftwechselzahl L₅₀ wird durch das Lüftungssystem FAN-O mit konstantem Volumenstrom abgebildet. Die Raumluft wird dabei aus R1 in die Umgebungszone ENVIR-O transportiert. Der Unterdruck von 50 Pa in R1 wird mittels des Zuluft-Systems FAN-I eingestellt, dass dabei über eine Druckdifferenz-Steuerung Frischluft aus der ENVIR-I nach R1 einspeist. Anstatt wie in der Realität, in der beim Blower-Door-Verfahren die Luft durch eine Vielzahl von verteilten Öffnungen eingesaugt wird, geschieht dies hier vereinfachend über einen effektiven Gesamtvolumenstrom über FAN-I. Die Umgebungszonen sind so groß definiert, dass im simulierten Zeitraum nur vernachlässigbare Parameteränderungen auftreten.

Die Rn-222 Quellstärke entsprechend Tab. 3.1 in Bq/(m³h) wird als Radon-Quelle in R1 berücksichtigt, wobei es über Umrechnungsfaktoren als Rate in kg/s eingespeist wird.

Da entsprechende Angaben fehlen, ist das COCOSYS-Modell adiabat, d. h. Wärmeaustauch mit Wänden, Böden und Decken ist nicht berücksichtigt. Ebenso ist für "Winter"-Bedingungen die sicherlich vorhandene Raumheizung vernachlässigt.

Weil keine Anfangsbedingungen vorliegen, wurden Normaldruck sowie plausible Temperaturwerte entsprechend "Sommer" bzw. "Winter" genutzt. Es wurden gleiche Anfangsbedingungen in R1 und in den Umgebungszonen definiert.

Dieser Datensatz kann mit Hilfe von PARAMETER /ARN 19/ leicht an das jeweils zu simulierende Objekt angepasst werden. Entsprechende Parameter, die entweder die Angaben aus Tab. 3.1 berücksichtigen oder plausible Anfangsbedingungen darstellen, sind in Tab. 3.4 aufgelistet.

Für die Testrechnungen sowie den Vergleich mit den Ergebnissen des generischen Modells aus Kapitel 3.1.2 wurden die Objekte 2 (Sommer und Winter, Tab. 3.1) und 5 (Sommer) ausgewählt, weil sie von den vorliegenden Objekten die höchste und die geringste Luftwechselzahl und Rn-Quellstärke aufweisen und damit für alle anderen Objekte abdeckend sind. Die in den 3 Testfällen verwendeten Anfangs- und Randbedingungen sind in Tab. 3.4 aufgelistet.

Tab. 3.4 Anfangs- und Randbedingungen für die COCOSYS-Rechnungen mit dem 3-Zonen-Modell

PARA- METER	Beschreibung	Einheit	Objekt 2 Sommer	Objekt 2 Winter	Objekt 5 Sommer			
Informationen aus Tab. 3.1								
ZTVOL1	R1 Zonenvolumen	m³	110	110	470			
ZFAREA1	R1 Bodenfläche	m²	50	50	170			
L50	Luftwechselzahl (mit FAN-O)	1/h	16,4	12,7	0,64			
QSV	Rn-222 Quellstärke	Bq/m³/h	9.800	6.400	80			
Plausible An	Plausible Annahmen							
TIMEE	Simulationszeit	S	3.000	3.000	40.000			
PNORM = PINI1	Normaldruck	Pa	101.325	101.325	101.325			
TINI1	Anfangstemperatur	°C	20	5	20			
RINI1	Relative Luftfeuchte	%	50	10	50			
COCOSYS Modellparameter								
SF	Skalierungsfaktor	-	10 ⁸	10 ⁸	10 ¹⁰			
RUN-NAME	Datensatz-Name	-	Objekt2_Som- mer_3Z-Mo- del_06	Objekt2_Win- ter_3Z-Model_06	Objekt5_Som- mer_3Z-Mo- del_06			

Die Unterdrucksteuerung in R1 erfolgt mit Hilfe eines druckabhängigen Volumenstromfaktors FFAKP für das Lüftungssystems FAN-I (siehe Abb. 3.3), wobei der Volumenstrom gleich dem des FAN-O-Systems ist. Um Rechnungen für Luftwechselzahlen bei einem von 50 Pa Unterdruck abweichenden Wert zu berechnen, ist diese Tabelle anzupassen (insbesondere der rot markierte Wert).

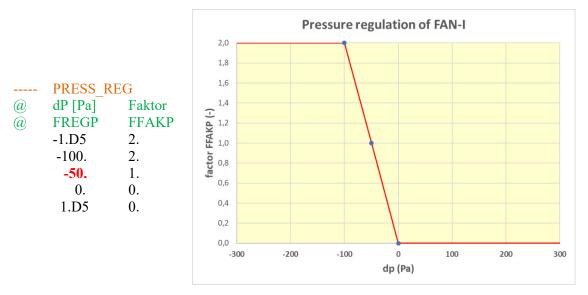


Abb. 3.3 Drucksteuerung des FAN-I Lüftungssystems

3.2.2 Testrechnungen mit dem erstellten Datensatz

Während der Erstellung des 3-Zonen-Modells wurde speziell für das Objekt 2 eine Reihe von COCOSYS-Testrechnungen durchgeführt. Diese dienten der Überprüfung und Verbesserung des generischen Datensatzes selbst. Hier sind u. a. die Umrechnung von Aktivitäten und Quellraten (Bq/m³ oder Bq/m³h) in für COCOSYS handhabbare Massen bzw. Massenströme (kg, kg/s) zu nennen. Diese Umrechnungen erfolgten manuell außerhalb von COCOSYS, z. B. mit Hilfe von Excel.

Daneben wurden in Testrechnungen die Modellierungsmöglichkeiten als auch die Grenzen des COCOSYS-Programmes zur Simulation von geringen Gasmassen ausgelotet, wie sie typischerweise bei der Analyse von Rn-222 Verteilung in Gebäuden auftreten.

Die dabei gewonnenen Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

 Rn-222 kann prinzipiell als thermohydraulische Gaskomponente im COCOSYS THY Hauptmodul /ARN 19/ simuliert werden. Als Rn-222 Materialeigenschaften wurden folgende Daten verwendet:

```
(a)
K---- Rn-222
    CPHASE
    GAS
   CMLMAS
                                      CDISSC
                CDIFFC
                           CSTDIF
    222.
                1.1D-5
                           1.D-5
                                      0.
   CPTAB [J/kgK]
    93.55
   DLTAB [W/mK]
    0.0036
   ETTAB [kg/ms]
    2.445D-5 E
```

Allerdings sind die auftretenden Rn-222-Massen so gering, dass sie im Prinzip thermohydraulisch keinen Einfluss haben und im Vergleich zu Änderungen des Hauptatmosphärenbestandteils Raumluft (Masse, Dampfgehalt) vernachlässigbar sind. Damit sind die genauen Rn-222-Stoffwerte von nachrangigem Interesse.

- Die Umrechnung von Aktivität in Masse und zurück ist zu einem gewissen Teil über PARAMETER im COCOSYS-Datensatz möglich. Hier ist im AP 2 eine entsprechende Erweiterung von COCOSYS vorgesehen, um dies nutzerfreundlicher zu gestalten. Dazu soll die Eigenschaft "tracer gas" eingeführt und für tracer gas die Ausgabe um Plot-Werte wie die Aktivität erweitert werden.
- Entsprechend Tab. 3.4 hat man es mit problem-typischen Rn-222 Einspeiseraten von 5·10-17 kg/s bis 2·10-18 kg/s zu tun, die sich aus QSV = 9.800 Bq/m³/h in Objekt 2 im Sommer bzw. 80 Bq/m³/h in "Objekt 5 Sommer" ergeben. Testrechnungen zeigten, dass bezogen auf die erstellten Datensätze für beide Objekte (d. h. Objektvolumina oder die in COCOSYS erreichten Zeitschrittweiten im Integrationsverfahren) die Gaseinspeisungen größer als 10-12 kg/s sein müssen. Kleinere Einspeiseraten werden nicht berücksichtigt die Rn-222 Masse in der Einspeisezone erhöht sich nicht (Abb. 3.4; -05, -07, ... in der Variantenbezeichnung entsprechen der Potenz im Wert der Radoneinspeisung). Bei Einspeisungen kleiner als 10-12 kg/s tritt ein systematischer Massenbilanzfehler auf (Abb. 3.5).

Bemerkung zu Abb. 3.4:

Im Bild beträgt die Rn-222 Masse für die Variante "Inj_-13" Null, ist aber vom Graphikprogramm JSPLOT auf Grund der logarithmischen Ordinate als 5*10⁻¹² dargestellt. Dies wird in der kleinen Graphik mit linearer Achse deutlich.)

Bemerkung zu Abb. 3.5:

Die Abbildung zeigt im Zeitbereich der ersten 500 s Schwankungen, deren Ausmaß sich mit zunehmender Einspeiserate verringert. Es handelt sich um numerische Ungenauigkeiten, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll.

In Testrechnungen mit verschiedenen Genauigkeitskriterien und Optionen (CLIMAS, EPSREL, IFTRIX, FEBE_EXP – siehe /ARN 19/) des FTRIX/FEBE Paketes zur Lösung der Differentialgleichungen in COCOSYS konnte der Massenbilanzfehler bei kleinen Raten prinzipiell nicht verhindert werden. Hierzu werden im AP 2 weitere Analysen erfolgen. Für den anschließenden Rechnungen stellte sich eine Größenordnung von 10-9 kg/s als gut handhabbare minimale Einspeiserate heraus. Allerdings ist dies kein "universeller" Wert, da eine Anhängigkeit von den Zonenvolumina und Verbindungsflächen sowie der Zeitschrittweite in der Simulation besteht. Diese Rate war deshalb für jedes Objekt durch den Vergleich des Massenbilanzfehlers mit der Einspeisung zu prüfen und ggf. anzupassen.

- Der Unterschied der oben genannten problem-typischen Einspeiseraten zum handhabbaren Wert beträgt ca. 9 Größenordnungen. Deshalb erfolgt in den COCOSYS-Rechnungen eine "Hochskalierung" der Einspeisung um den entsprechenden Faktor (PARAMETER SF, siehe Tab. 3.4) sowie der entsprechenden Verringerung der berechneten Konzentration/Aktivität.
- In den Testrechnungen zeigte sich, dass bei Verwendung des Skalierungsfaktors bezüglich der Fehlerkriterien der FTRIX/FEBE Integrationsroutine für die Massengleichungen (EPSREL und CLIMAS, siehe /ARN 19/) sowie der verbindungsbezogenen Fehlerkriterien (ICLIG) keine Anpassung notwendig ist und typische Werte, allerdings strengere als für große Kühlmittelverluststörfälle in KKW, verwendet werden können.
- Die in einem Datensatz modellierten Verbindungen dürfen im offenen Zustand keine Querschnittsflächen < 10⁻⁶ m² haben. COCOSYS begrenzt solche Flächen auf diesen minimalen Wert, um unrealistisch hohe Verlustbeiwerte in Verbindungen zu verhindern (siehe "head loss Ki" in Kapitel 5.9, /ARN 19/) und damit stabile Lösungen zu gewährleisten. Diese Begrenzung wird hier nicht verändert, da im Rahmen dieses Projektes kein umfassender Test auf mögliche Konsequenzen (Programmstabilität, Rechenzeit) in der klassischen COCOSYS-Anwendung auf KKW bzw. Testanlagen möglich ist. Berechnete Massenströme, die kleiner als 10⁻⁶ kg/s sind, werden oftmals instabil und sind zu vermeiden. Da in den Rechnungen zu Objekt 2 und 5 auf Grund fehlender Informationen die Strömungsflächen vereinfachend als Lüftungssysteme modelliert sind, konnten die Grenzen der Verbindungssimulation hier nicht überprüft werden.

Zusammenfassend wurde bestätigt, dass COCOSYS in der Lage ist, ein beliebiges Gas und damit auch Rn-222 zu simulieren. Auf Grund von programminternen Grenzen ist eine Hochskalierung der Einspeisung erforderlich. Durch entsprechende Programmmodifikationen, die im Weiteren unter AP 2 in COCOSYS vorgenommen werden sollen, ist die Nutzerfreundlichkeit bzgl. Eingabe und Ergebnisauswertung zu erhöhen.

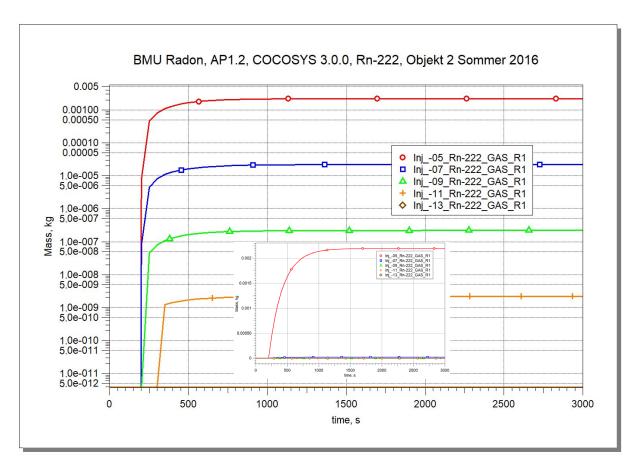


Abb. 3.4 COCOSYS, Testrechnung tracer gas Einspeisung, Rn-222 in Zone R1

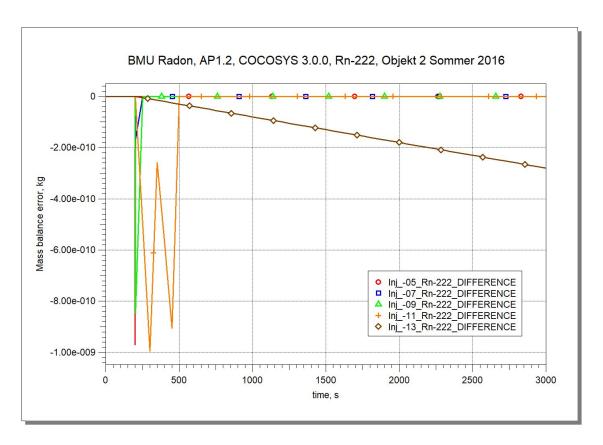


Abb. 3.5 COCOSYS, Testrechnung tracer gas Einspeisung, Rn-222 Massenbilanzfehler

Mit COCOSYS können Strömungen durch Verbindungen zwischen Modellzonen sowohl durch erzwungene Konvektion (Druckdifferenz getrieben) als auch durch freie Konvektion (Dichte-unterschiede in verbundenen Zonen) berechnet werden. Aus der allgemeinen Anwendung von COCOSYS ist bekannt, dass auf Grund des lumped-parameter Ansatzes hierfür eine genügend detaillierte Nodalisation erforderlich ist. Dabei sind die COCOSYS-Nodalisationsregeln und -empfehlungen zu befolgen (Kapitel 13 in /ARN 19/). Unter Umständen sind auch eine Höhenstaffelung des Raumdruckes sowie Temperaturprofile durch wärmeleitende Strukturen zu berücksichtigen. Da entsprechende Informationen in den Unterlagen zu den Objekten 1 bis 6 nicht verfügbar sind, konnten diese Punkte nicht getestet werden.

3.3 AP 1.3: Modellanwendung und Ergebnisvergleich

3.3.1 Nachrechnung mit COCOSYS

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse der Nachrechnung zu "Objekt 2 Sommer" und "Objekt 5 Sommer" diskutiert. Diese stellen hinsichtlich der verfügbaren Daten der Rn-222 Konzentrationen (siehe Tab. 3.4) die minimalen und maximalen Werte dar. Wenn beide Objekte von COCOSYS korrekt nachgerechnet werden können, sind sie für alle anderen Fälle abdeckend. Dies wurde zusätzlich für "Objekt 2 Winter" überprüft (hier nicht ausführlich dargestellt).

In den Nachrechnungen kam der in Kapitel 3.2 beschriebene generische COCOSYS-Datensatz mit jeweils adaptierten Randbedingungen entsprechend Tab. 3.4 zur Anwendung.

Objekt 2 Sommer

Die für das Objekt gemessene Luftwechselzahl L_{50} wird durch das Abluft-Ventilationssystem FAN-O eingestellt (siehe Abb. 3.2). Das Lüftungssystem wurde in der Rechnung ab 100 s aktiviert. Die Luftwechselzahl von 16,4 h⁻¹ entspricht auf das Raumvolumen von 110 m³ bezogen einem Volumenstrom von 0,5 m³/s (Abb. 3.6).

Durch die Druckdifferenz-gesteuerte Zuluft (FAN-I), die zeitgleich mit FAN-O in Betrieb geht, wird in R1 ein Unterdruck von 50 Pa gegenüber der Umgebung eingestellt (Abb. 3.7).

Die Quellrate des Rn-222 (QSV = 9.800 Bq/(m³h)) wird ab 200 s als Einspeisung in R1 simuliert, wobei diese Einspeisung in kg/s umgerechnet und mit dem Skalierungsfaktor SF multipliziert ist. Die in Abb. 3.8 dargestellte Radon-Aktivitätskonzentration in Bq/m³ (im weiteren auch als Rn-222-Aktivität oder -Konzentration bezeichnet) ist die "reale" Konzentration, d. h. die von COCOSYS berechnete Masse ist unter Berücksichtigung des SF und des Volumens von Raum R1 bereits umgerechnet. Am COCOSYS-Ergebnis ist ersichtlich, dass sich nach 2.000 s (d. h. 1.800 s nach Beginn der Rn-222 Eisspeisung) eine Gleichgewichtskonzentration von 598 Bq/m³ eingestellt hat. Bereits 800 s nach Einspeisungsbeginn wird die 97% Gleichgewichtskonzentration erreicht, was gut mit dem in /HAU 17/ angegebenem Wert übereinstimmt (97 % Gleichgewichtskonzentration bei Luftwechselzahl 4 h-¹ in /HAU 17/ auf 16 h-¹ in Objekt 2 extrapoliert).

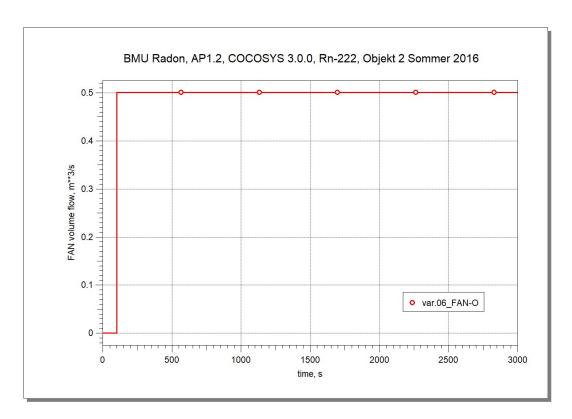


Abb. 3.6 COCOSYS, Nachrechnung Objekt 2 Sommer, aus R1 abgesaugter Volumenstrom

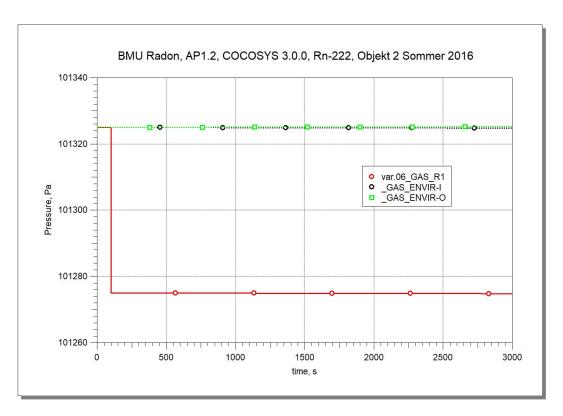


Abb. 3.7 COCOSYS, Nachrechnung Objekt 2 Sommer, berechnete Druckverläufe für Zone R1 und die zwei Umgebungszonen

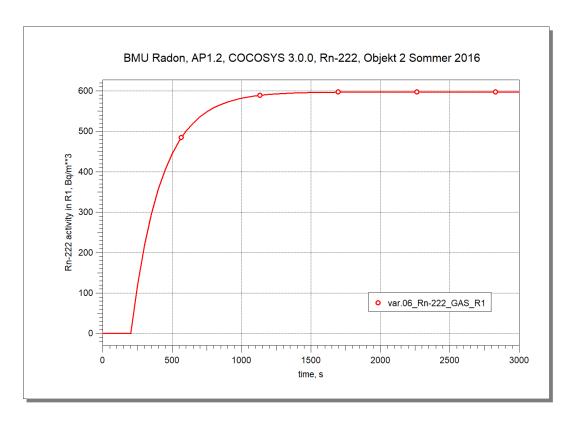


Abb. 3.8 COCOSYS, Nachrechnung Objekt 2 Sommer, Zeitverlauf der berechneten Rn-222 Aktivitätskonzentration in Zone R1

Die für die COCOSYS-Rechnung ermittelten Massen- und Energiebilanzfehler sind in Abb. 3.9 und Abb. 3.10 dargestellt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sich die Fehler auf die um den Faktor SF = 10⁹ hochskalierte eingespeiste Rn-222 Masse beziehen. Während der Simulation wurde über 2.800 s eine (hochskalierte) Rn-222 Masse von 1,5 · 10⁻⁵ kg eingespeist. Der Massenbilanzfehler (Abb. 3.9) ist mit 10⁻²⁰ kg absolut vernachlässigbar. Die (hochskalierte) eingespeiste Masse von Rn-222 zu Umgebungsbedingungen bedeutet eine Energie von 3 Joule. Der absolute Energiefehler summiert sich am Ende der Rechnung auf etwa 1 Joule (d. h. 30 %). Die ist aber hinsichtlich seines Einflusses auf die thermohydraulischen Parameter vernachlässigbar. Zugleich ist zu berücksichtigen, dass das COCOSYS-Modell adiabat ist.

Abb. 3.11 zeigt den Real Time Factor (RTF) der COCOSYS-Rechnung, der sich aus der Prozesszeit geteilt durch die benötigte Rechenzeit (CPU Zeit) ergibt. RTF = 330 bedeutet einerseits, dass die Rechnung schneller als Echtzeit (real time) ist und für die 3.000 s Prozesszeit (ca. 50 Minuten) lediglich 9 s Rechenzeit erforderlich waren. RTF ist Hardware-abhängig – hier wurde auf einem PC mit Intel I7 CPU mit 3.6 GHz und 8 GByte RAM unter Windows 10 gerechnet.

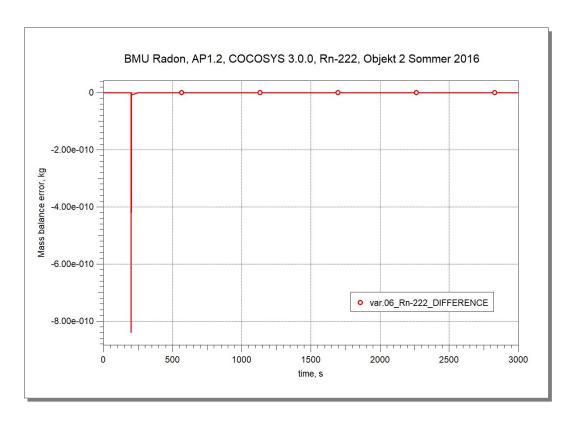


Abb. 3.9 COCOSYS, Nachrechnung Objekt 2 Sommer, Rn-222 Massenbilanzfehler

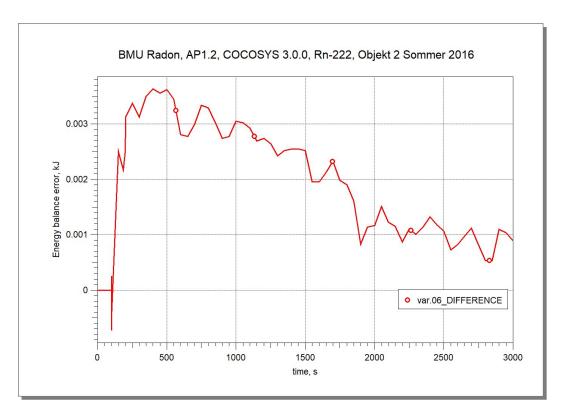


Abb. 3.10 COCOSYS, Nachrechnung Objekt 2 Sommer, Rn-222 Energiebilanzfehler

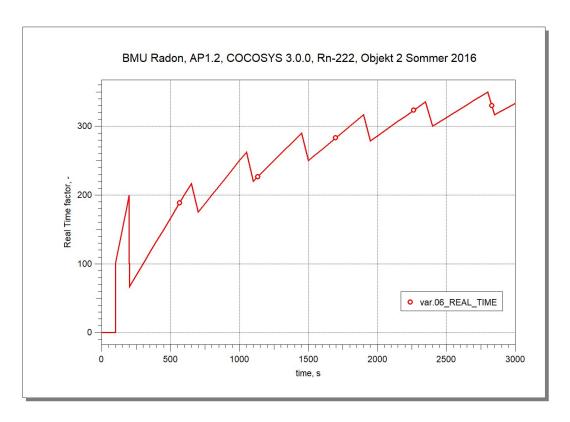


Abb. 3.11 COCOSYS, Nachrechnung Objekt 2 Sommer, Real Time Factor

Das COCOSYS-Modell kann keinen Kernzerfall von Rn-222 berücksichtigen, d. h. keine entsprechende Massenverringerung. Dies ist in Übereinstimmung mit dem generischen Modell in Kapitel 3.1. Um den Einfluss der Kernzerfalls trotzdem zu überprüfen, wurde in Rechnung var.07 eine Rn-222-Senke in R1 simuliert, die entsprechend der Halbwertszeit von 3,824 Tagen, der angenommenen stationären Rn-222 Aktivitätskonzentration von 600 Bq/m³ und dem SF etwa 2,4 10⁻¹² kg/s beträgt. Die Absenkung der Rn-222-Masse erfolgte mit konstantem Wert ab Beginn der Einspeisung. Der Kernzerfall führt zu einer um 0,3 Bq/m³ geringeren Rn-222 Aktivitätskonzentration (Abb. 3.12) und ist vernachlässigbar – insbesondere, wenn man die in /HAU 17/ aufgeführten Messungenauigkeiten für die Radon-Konzentration von ± 11 % bzw. ± 24 % berücksichtigt. Bezüglich der Aussagen zur Rn-Konzentration ist die Vernachlässigung des Kernzerfalls konservativ.

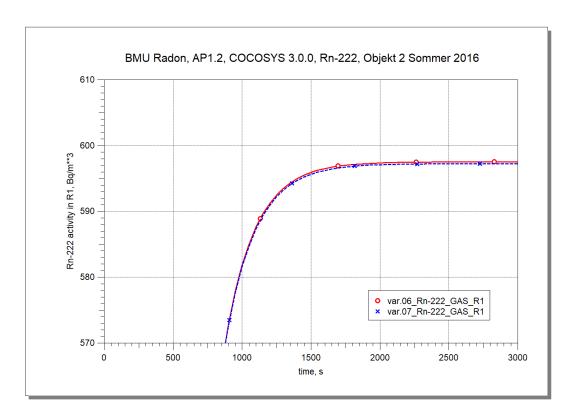


Abb. 3.12 COCOSYS, Nachrechnung Objekt 2 Sommer, berechnete Rn-222 Aktivitätskonzentration in Zone R1 ohne (var.06) und mit Kernzerfall (var.07)

Objekt 5 Sommer

Die Rechnung zu "Objekt 5 Sommer" erfolgten analog zu Objekt 2 mit den in Tab. 3.4 aufgelisteten abweichenden Anfangs- und Randbedingungen. Auf Grund des größeren Raumvolumens, der geringeren Luftwechselzahl und Rn-222 Quellstärke musste die betrachtete Prozesszeit dabei auf 40.000 s (ca. 11 Stunden) erhöht werden. Die Einschaltzeitpunkte der Lüftungen sowie der Einspeisung sind identisch zur Rechnung für "Objekt 2 Sommer". Außerdem wurde aus numerischen Gründen (Reduzierung des Rn-222 Massenbilanzfehlers) der verwendete Skalierungsfaktor im Vergleich zu Objekt 2 um zwei Größenordnungen auf SF = 10^{10} erhöht.

Die Luftwechselzahl L_{50} des Objektes 5 von 0,64 h⁻¹ bedeutet hier einen Volumenstrom von 0,084 m³/s (Abb. 3.13) bei 50 Pa Unterdruck in Raum 1.

Laut COCOSYS-Rechnung ist die Radon-Gleichgewichtskonzentration in Raum R1 von 125 Bg/m³ nach ca. 40.000 s (ca. 11 h) erreicht (Abb. 3.14).

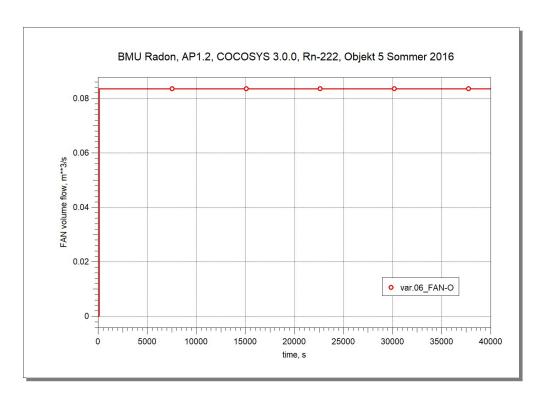


Abb. 3.13 COCOSYS, Nachrechnung Objekt 5 Sommer, aus R1 abgesaugter Volumenstrom

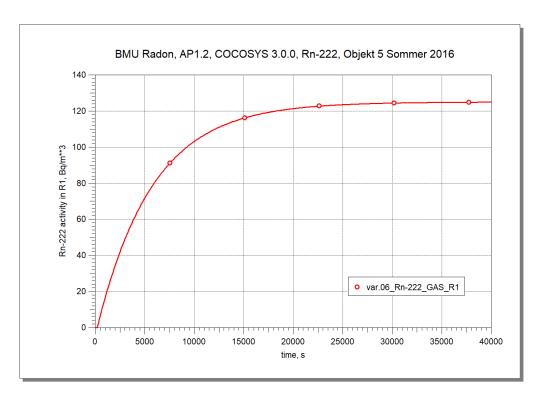


Abb. 3.14 COCOSYS, Nachrechnung Objekt 5 Sommer, Zeitverlauf der berechneten Rn-222 Aktivitätskonzentration in Zone R1

Die Massen- und Energiebilanzfehler liegen in ähnlichen Größenordnungen wie für Objekt 2 und sind vernachlässigbar. RTF beträgt ca. 820 (hier nicht graphisch dargestellt), d. h. für die 40.000 s Prozesszeit wurden etwa 50 s CPU Zeit benötigt.

Da sich die Zeit bis zum Erreichen der stationären Rn-222 Konzentration im Vergleich zu Objekt 2 mehr als verzehnfacht, wurde auch hier der Einfluss des Kernzerfalls überprüft. In Rechnung var.07 wurde eine entsprechende Rn-222 Senke im Raum R1 von 2,2 · 10⁻¹⁰ kg/s simuliert. Diese ist scheinbar größer als für Objekt 2, was aber im Wesentlichen auf den größeren SF zurückzuführen ist. Der Kernzerfall führt zu einer 1,5 Bq/m³ geringeren Rn-222 Konzentration (Abb. 3.15). Wie erwartet, nimmt mit geringer Luftwechselzahl und Rn-222 Quellstärke und damit längerer Zeit bis zum Erreichen der Gleichgewichtskonzentration der Einfluss des Kernzerfalls zu. Allerdings ist die Verringerung mit etwas über 1 % im Vergleich zu anderen Unsicherheiten wie der in /HAU 17/ genannten Messunsicherheit von ± 11 % bzw. ± 24 % auch vernachlässigbar.

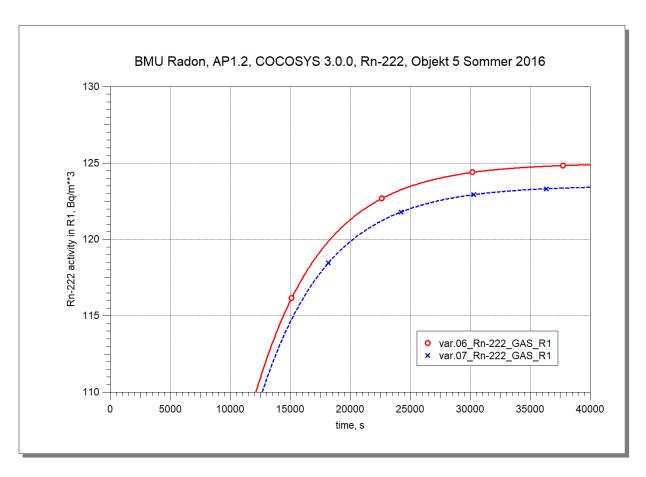


Abb. 3.15 COCOSYS, Nachrechnung Objekt 5 Sommer, berechnete Rn-222 Aktivitäts-konzentration in Zone R1 ohne (var.06) und mit Kernzerfall (var.07)

3.3.2 Vergleich der Ergebnisse von COCOSYS mit dem generischen Ausbreitungsmodell

Die Ergebnisse des generischen Ausbreitungsmodells für die Rn-222 Gleichgewichtskonzentration entsprechend Sachverständigenbüro Haumann /HAU 17/ sind in Tab. 3.5 mit den von COCOSYS für die Objekte 2 und 5 berechneten Werten verglichen.

Die COCOSYS-Ergebnisse für die stationäre Rn-222 Konzentration stimmen sehr gut mit denen des generischen Modells überein. Die geringen Unterschiede von max. 3,9 Bq/m³ sind höchstwahrscheinlich auf vorgenommene Rundungen in den Ergebnissen des generischen Modells zurückzuführen.

Bemerkung: Weitere Rechnungen zu den Haumann-Daten sind im AP 4 durchgeführt worden (siehe Abschnitt 3.6.1).

Tab. 3.5 Vergleich der Radon-Aktivitätskonzentration Rn₅₀ /HAU 17/ mit GRS-Ergebnissen (COCOSYS)

Parameter	Einheit	Objekt 2 Sommer	Objekt 2 Winter	Objekt 5 Sommer		
L ₅₀	1/h	16,4	12,7	0,64		
Quellstärke	Bq/(m³h)	9.800	6.400	80		
Rn ₅₀ gen. Modell	Bq/m³	600	500	125		
Rn₅₀ COCOSYS Bq/m³ 597,5 503,9 124,9						
Bei Radon Blower-Door-Messung mit 50 Pa Unterdruck						

Zusammenfassend können auf Basis der durchgeführten Rechnungen die Aussagen in Kapitel 3.2.2 bestätigt werden: COCOSYS ist in der Lage Rn-222 Aktivitätskonzentrationen in Raumsystemen zu berechnen.

Die Bewertung von Simulationsergebnissen zu einer echten dynamischen Rn-222 Verteilung innerhalb eines Objektes mit Strömungsvorgängen über Türen, Fenster oder Undichtigkeiten sowie der Berücksichtigung von Wärmeübertragung an Strukturen war auf Basis der Informationen zu Objekt 1 bis 6 bisher nicht möglich und ist eines der Hauptziele von AP 4 (siehe Kapitel 3.6).

Die oben dargestellten COCOSYS-Rechnungen und insbesondere die Berechnung der gezeigten Rn-222 Aktivitätskonzentrationen waren nur möglich durch Eingabe speziell ermittelter

Größen, die außerhalb von COCOSYS z. B. mit Hilfe von Excel berechnet wurden und auf das jeweils simulierte Objekt zugeschnitten sind. Anpassungen/Ergänzungen am COCOSYS-Programm sollen das Programmhandling für solche Anwendungen erleichtern und sind im folgenden Kapitel beschrieben.

3.4 AP 2: Adaption von COCOSYS zur Simulation von Radon-Ausbreitungsvorgängen

Mit Hilfe der Rechnungen in Kapitel 3.2.2 bzw. 3.3.2 wurde bestätigt, dass COCOSYS geeignet ist, Rn-222-Aktivitätskonzentrationen in Raumsystemen zu berechnen. Ob COCOSYS auch den Transport von Kleinstmengen von Rn-222 innerhalb eines Objektes bzw. eines Raumes simulieren kann, war anhand der Daten zur stationären Konzentration in Kapitel 3.3 nicht zu klären und wird in AP 4 untersucht.

Als erster Arbeitsschritt unter AP 2 erfolgte die Klärung der COCOSYS-Begrenzung für Einspeisemassenströme (Kapitel 3.4.1). Anschließend wurden die Arbeiten zur Implementierung der als notwendig festgestellten Erweiterungen am Programm durchgeführt (Kapitel 3.4.2). Diese Erweiterungen umfassen:

- die Einführung der neuen Komponente TRACER GAS,
- die Einspeisung von TRACER GAS,
- eine neue Option für Lüftungssysteme und
- die Ergänzung der Ergebnisausgabe.

Sie wurden in der Entwicklerversion von COCOSYS vorgenommen, sodass sie mit dem Release der nächsten Version COCOSYS 3.1 allgemein verfügbar sein werden inklusive der Beschreibung der Erweiterungen im zu aktualisierenden User Manual /ARN 19/.

3.4.1 Klärung der Ursachen für den unteren Grenzwert einer Gaseinspeisung

In den bisherigen Rechnungen mit COCOSYS war die Frage offengeblieben, warum im Programm sehr kleine Einspeiseraten von Gasen vernachlässigt werden.

Zu ihrer Klärung wurden spezielle Tests durchgeführt, mit deren Hilfe die Stellen im COCOSYS-Quelltext identifiziert wurden, die dazu führen, dass Gaseinspeisungen < 10⁻¹² kg/s unterdrückt werden. Als Ursache stellten sich die Initialisierungen der Gasmassen in den COCOSYS-Zonen während der Integration heraus. Das FTRIX/FEBE-Lösungspaket für die

Differentialgleichungen im Hauptmodul THY schlägt auf Basis der aktuellen Zustandsdaten und deren ermittelten Gradienten für einen Zeitschritt einen neuen Systemzustand vor. Dazu werden in THY bzgl. der Zonendaten die Integrationsvariablen (Temperaturen und Massen aller Komponenten) auf physikalische Gültigkeit überprüft. In den Unterprogrammen *zini*.f* werden kleine negative Komponentenmassen auf null gesetzt bzw. bei einer Masse kleiner - 1.0 kg der Rechenschritt mit entsprechender Rückmeldung an den Nutzer abgebrochen und die Integrationsschrittweite verringert. Zusätzlich werden – ohne Information an den Nutzer – auch Komponentenmassen kleiner 10⁻⁹ kg auf null gesetzt.

Diese Begrenzung wurde deaktiviert und damit unter Nutzung des Objekt 2-Datensatzes mit 3 Zonen aus AP 1.2 (Kapitel 3.2.2) Testrechnungen vorgenommen. Somit war dann auch die Verwendung kleiner Einspeiseraten von Rn-222 möglich. Allerdings traten in den Rechnungen bezogen auf die Einspeisung von Rn-222 große Massenbilanzfehler auf. Diese konnten durch die Definition strengerer Fehlerkriterien für die Komponentenmassen CLIMAS /ARN 19/ vermieden werden, d. h. nachdem diese von der bisherigen Größenordnung 10⁻⁵ kg auf 10⁻²⁰ kg verringert wurden.

Um den Einfluss dieser Änderung auf eine klassische COCOSYS-Anwendung zu überprüfen, wurde eine verfügbare Rechnung zum Störfalllokalisierungssystem eines russischen KKW-Typs mit RBMK-1000 unter der Annahme eines Äquivalentlecks mit sehr kleinem Durchmesser gewählt. Dieses Testbeispiel ist besonders geeignet, da hierbei nach einer bestimmten Zeit ebenfalls eine geringe Rn-222 Masse in das Raumsystem eingespeist wird. Zudem ist die verwendete RBMK-1000-Nodalisation mit 331 Zonen, 750 Verbindungen und 209 wärmeleitenden Strukturen um Größenordnungen komplexer als das 3-Zonen-Modell. Unter Anwendung dieses RBMK-1000 - Datensatzes kristallisierten sich dann allerdings die zwei folgenden Probleme heraus:

 Im Unterschied zum 3-Zonen-Modell brachte die Aufhebung der Nullsetzung von kleinen Massen in der RBMK-1000-Nodalisation ein unerwartetes Ergebnis. Bereits <u>vor</u> Beginn der Einspeisung von Rn-222 mit 10⁻¹⁴ kg/s ab 10 s "generierte" COCOSYS im System eine geringe, aber leider in der Größenordnung nicht mehr vernachlässigbare Gasmasse (Abb. 3.16).

Damit wurde der Grund für die im Quelltext vorgenommene Nullsetzung von kleinen Massen deutlich. Massen kleiner 10⁻⁹ kg sind thermohydraulisch ohne Einfluss; ihre Nullsetzung verhindert aber in der klassischen Anwendung auf KKW das Auftreten von derartigem "numerischen Rauschen", was auch im überarbeiteten COCOSYS User Manual

beschrieben ist. Zusätzlich traten in einigen Rechnungen bei hohen Atmosphärentemperaturen und solch geringen Gasmassen (geringen Partialdrücken) Probleme in den Stoffwertfunktionen z. B. bei CO₂ auf, die zum Abbruch der Rechnungen führten.

2. Die Masse des "generierten" Rn-222 konnte durch sehr genaue Vorgaben für CLIMAS (10⁻²⁵ kg) wesentlich verringert, aber leider nicht vollständig verhindert werden. Das Auftreten einer Gaskomponente vor seiner Einspeisung ist unphysikalisch und insbesondere von unerfahrenen Nutzern schwer zu kontrollieren. Es zeigte sich außerdem, dass die Verwendung von solch kleinen CLIMAS eine extreme Erhöhung der Rechenzeit um mehr als 2 Größenordnungen bewirkt. Dies ist ein k. o. Kriterium, dass das lumped-parameter Programm COCOSYS eines wesentlichen Vorteils beraubt – der im Vergleich zu CFD-Codes kurzen Rechenzeit.

Während der im folgenden Kapitel beschriebenen Erweiterung von COCOSYS wurde auch untersucht, ob dieser Nachteil durch eine spezielle Modifikation verhindert werden kann. Dabei wurde anstatt eines globalen CLIMAS-Wertes für alle Gaskomponenten nur für das vom Nutzer definierte TRACER_GAS ein strenges Fehlerkriterium T_GAS_CLI angewendet. Leider verringert sich die Rechenzeit dadurch nur unwesentlich (siehe Abb. 3.17, Real Time Factor als Quotient aus Rechenzeit und Prozesszeit; Werte größer 1 bedeuten dabei schnellere Rechnung als Real Time), da die Integrationsschrittweite dann immer noch maßgeblich durch die Differentialgleichungen für die Rn-222 Masse bestimmt wird. Die benötigte Rechenzeit mit T_GAS_CLI = 10⁻²⁵ kg ist dabei zum Ende der Simulation immer noch um den Faktor 175 höher als in der Rechnung mit CLIMAS = 10⁻⁵ kg. Die in beiden Versionen berechneten Aktivitätskonzentrationen für Rn-222 sind dabei gleich.

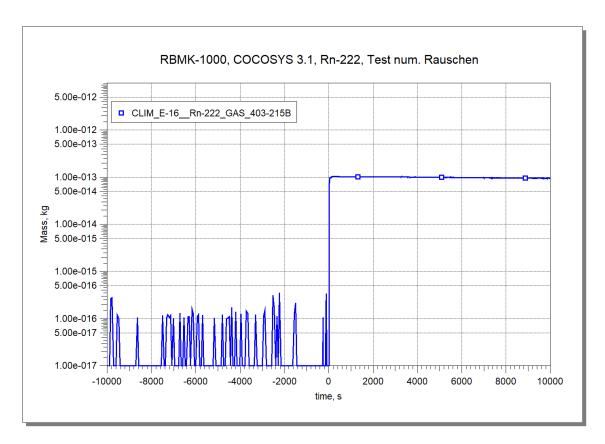


Abb. 3.16 COCOSYS, Testrechnung mit einem komplexen RBMK-1000 – Datensatz, CLIMAS = 10⁻¹⁶ kg, Rn-222 Einspeisung mit 10⁻¹⁴ kg/s ab 10 s, berechnete Rn-222 Masse in der Einspeisezone

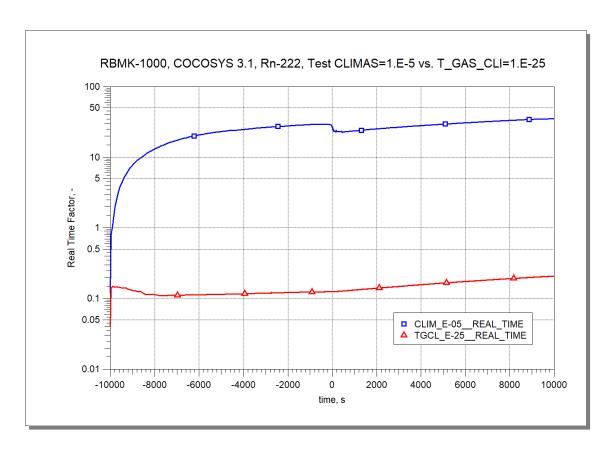


Abb. 3.17 COCOSYS, Testrechnung mit einem komplexen RBMK-1000 – Datensatz, Real Time Factor mit globalem CLIMAS = 10^{-5} kg bzw. individuellem T_GAS_CLI = 10^{-25} kg für die Rn-222 Gasmasse

3.4.2 Adaption von COCOSYS für die Komponente TRACER_GAS

Generell wird Rn-222 in COCOSYS über seine Masse dargestellt.

In Auswertung der in Kapitel 3.4.1 beschriebenen Ergebnisse wurde entschieden, zwei Optionen zur Simulation der Rn-222-Verteilung in Gebäuden in COCOSYS zu implementieren:

Option 1:

Einspeisung des Gases mit dem realen Massenstrom und Definition von entsprechend kleinen Fehlergrenzen CLIMAS für die Rn-222 Massengleichungen

- Anschließend Durchführung der Rechnung und Überprüfung der Ergebnisse inklusive der Massenbilanz (Auftreten numerischen Rauschens, durch das Rn-222 generiert wird? Massenbilanzfehler kleiner ~1 % der Einspeisung, …)
- Beim Auftreten von Problemen Wechsel zur Option 2.

Option 2:

Anwendung eines Skalierungsfaktors, mit dem COCOSYS-intern die Rn-222 Massen hochskaliert werden, unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.2.2 genannten Randbedingungen

In den Rechnungen in Kapitel 3.2.2 und 3.3.1 mussten viele Daten per Hand umgerechnet werden. Um die Durchführung solcher Rechnungen in Zukunft wesentlich zu vereinfachen, wurden Änderungen an COCOSYS vorgenommen, wodurch diese Umrechnungen automatisch erfolgen. Diese Adaptionen sind in den folgenden Kapiteln beschrieben.

3.4.2.1 TRACER_GAS (C---- COMPONENTS)

Im Ergebnis der in diesem Bericht beschriebenen Forschungsarbeiten wurde in COCOSYS eine neue Klasse von radioaktiven Gaskomponenten aufgenommen, das sogenannte "TRACER_GAS". Es unterscheidet sich hinsichtlich seines thermohydraulischen Verhaltens nicht von herkömmlichen "GAS"-Komponenten (programmintern werden beide diesbezüglich gleichbehandelt, erlaubt aber die Angabe weiterer Charakteristika entsprechend der oben genannten zwei Optionen. Diese sind in Abb. 3.18 aufgelistet (in Rot geschriebene Daten). Während in Option 1 mit realen Rn-222 Massen gerechnet wird, werden bei Option 2 intern alle vom Nutzer definierten Einspeisungen hochskaliert (siehe Kapitel 3.4.2.2). Damit ist Option 1 zu bevorzugen.

```
\widehat{a}
C---- COMPONENTS
(a)
K---- Rn-222
     CPHASE
(a)
    TRACER GAS
                            CSTDIF
    CMLMAS
                CDIFFC
                                      CDISSC
(a)
    222.
                 1.1D-5
                            1.D-5
                                       0.
    CPTAB [J/kgK]
(a)
    93.55
    DLTAB [W/mK]
    0.0036
(a)
    ETTAB [kg/ms]
    2.445D-5
    TRACER GAS input option 1
(a)
    T GAS HL T GAS UNIT
                             T_GAS_OPT
                                            T GAS CLI
                                                         T GAS DECAY
(a)
    3.824
                DAYS
                               MASSLIMIT
                                            1.0D-25
                                                         NODECAY
oder
(a)
    TRACER GAS input option 2
    T GAS HL
                T GAS UNIT
                              T GAS OPT
                                            T GAS SF
                                                          T GAS DECAY
(a)
                               UPSCALING
                                                          NODECAY
    3.824
                DAYS
                                            1.0D+09
\widehat{a}
```

Abb. 3.18 COCOSYS 3.1, Eingabestruktur für TRACER_GAS

In den COCOSYS-Rechnungen in AP 1.3 (siehe Kapitel 3.3.1) ist der radioaktive Zerfall von TRACER_GAS, d. h. seiner sich dadurch verringernden Masse beim Zerfall, nicht berücksichtigt. Diese Annahme wurde durch entsprechende Testrechnungen untermauert (Abb. 3.12 und Abb. 3.15). Um aber nicht unnötige Vereinfachungen in COCOSYS-Analysen treffen zu müssen, ist der radioaktive Massenzerfall mit implementiert. Über die Option T_GAS_DECAY = NODECAY (siehe Tab. 3.6) kann der Zerfall allerdings für ein TRACER_GAS deaktiviert werden.

Der Massenänderung eines TRACER_GAS i [kg] durch den radioaktiven Zerfall in einer COCOSYS-Zone j innerhalb des Intervalls t - t₀ wird entsprechend (3.9) berechnet:

$$\Delta m_{i,j}(t) = m_{i,j}(t_0) - m_{i,j}(t_0) \cdot e^{-\lambda_i \cdot (t - t_0)}$$
(3.9)

mit:

- mi,i Masse des TRACER GAS i in Zone (bzw. Zonenteil) j [kg]
- t aktueller Zeitpunkt [s]
- t₀ Beginn des Zeitschrittes [s]
- λ_i Zerfallskonstante des TRACER GAS i [1/s].

Die Zerfallskonstante λ_i wird dabei aus der vom Nutzer eingegebenen Halbwertszeit T_GAS_HL (siehe Tab. 3.6) bestimmt. In den Überprüfungsrechnungen in Kapitel 3.4.2.6) sind Ergebnisse mit und ohne Berücksichtigung des Zerfalls angegeben (Abb. 3.30).

Die Beschreibung der Eingabedaten ist in Tab. 3.6 gegeben. Auf Grund der geplanten Übernahme in das COCOSYS User Manual der Code-Version 3.1 ist sie in Englisch abgefasst.

Tab. 3.6 Beschreibung der Eingabedaten für TRACER_GAS

Parameter	Description
General input dat	a for a GAS component according /ARN 19/
CPHASE	Special name to identify the gas component as a TRACER_GAS
T_GAS_HL	Half-life of the TRACER_GAS in [T_GAS_UNIT], used to determine the conversion between Becquerel and kg and for mass decay.
	Half-life time $t_{0.5}$ can be converted from decay constant λ of a radioactive isotope according to:
	$t_{0.5} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0.693}{\lambda} \qquad (3.10)$
T_GAS_UNIT	Unit of the half-life: - SECONDS - MINUTES - HOURS - DAYS - YEARS
T_GAS_OPT	Tracer gas modelling option: - MASSLIMIT (option 1) definition of individual mass error criterion for the FTRIX/FEBE solver package - UPSCALING (option 2) individual upscaling factor for the TRACER_GAS mass
T_GAS_CLI	In case of T_GAS_OPT = MASSLIMIT: individual mass error criterion for the TRACER_GAS [kg]
T_GAS_SF	In case of T_GAS_OPT = UPSCALING: individual mass scaling factor for the TRACER_GAS [-]
T_GAS_DECAY	Consideration of TRACER_GAS decay: - DECAY mass decay is considered - NODECAY mass decay is not considered

Nach dem Lesen der Eingabe werden die erkannten und interpretierten Daten in den Ausgabefile des THY Hauptmoduls *.prt.thy geschrieben (Abb. 3.19). Der speziell dabei berechnete und ausgedruckte Wert T_GAS_BK gibt für das TRACER-GAS den Umrechnungsfaktor von Aktivität [Bq] zu Masse [kg] an.

```
COMPONENT Rn-222
 CPHASE = TRACER_GAS
 CMLMAS = 0.2220000D + 03 \quad CDIFFC = 0.1100000D - 04 \quad CSTDIF = 0.1000000D - 04 \quad CDISSC = 0.0000000D + 00 \quad CDISSC = 0.000000D + 00 \quad CDISSC = 0.000000D + 00 \quad CDISSC = 0.00000D + 00 \quad CDISSC = 0.00000D + 00 \quad CDISSC = 0.000000D + 00 \quad CDISSC = 0.00000D + 00 \quad CDISSC = 0.000000D + 00 \quad CDISSC = 0.00000D + 0.00000D + 0.0000D + 0.0000D + 0.
                      CP (J/KG*K) AS A FUNCTION OF TEMPERATURE T (C):
                        0.0000000D+00 0.9355000D+02
                      LAMBDA (W/M*K) AS A FUNCTION OF TEMPERATURE T (C):
                                                                                    LAMBDA
                        0.0000000D+00 0.3600000D-02
                      ETA (KG/M*S) AS A FUNCTION OF TEMPERATURE T (C):
                                                                                     ETA
                        0.0000000D+00 0.2445000D-04
  TRACER GAS DATA:
     T GAS HL = 0.3824000D+01 DAYS
Option 1:
                                                                                                                                                                                                                                             Option 2:
     T GAS CLI = 0.1000000D-24
                                                                                                                                                                                                                                                  T GAS SF
                                                                                                                                                                                                                                                                                                           = 0.1000000D+10
     T_GAS_SF
                                                                                                                                                                                                                                                   T GAS DECAY = NODECAY
                                                            = 0.1000000D+01
     T GAS DECAY = NODECAY
DERIVED:
     T GAS BK = 0.1757147D-18 (BQ --> KG)
```

Abb. 3.19 COCOSYS 3.1, Ausgabe der Daten für Rn-222 als TRACER GAS

Insbesondere für KKW-Anwendungen besteht jetzt auch die prinzipielle Möglichkeit, partikelförmige Spaltprodukte wie z. B. I-131 im THY Hauptmodul als TRACER_GAS zu simulieren. Als Bedingung sollte dabei gegeben sein, dass die Partikel so klein sind, dass ihre Ablagerung gegenüber ihrem Transport mit der Gasatmosphäre vernachlässigbar klein ist (Ablagerung ist bei TRACER_GAS nicht berücksichtigt). Dabei stellt sich dann die Frage, wie für diese Partikel die Stoffwerte der "GAS"-Komponente I-131 (CP, LAMBDA und ETA – siehe Abb. 3.19) zu definieren sind.

Diese Frage ist auch für Rn-222 interessant, um eine Aussage zu erhalten, ob es besondere Anforderungen an die Genauigkeit bzw. eventuell sogar an die Notwendigkeit einer Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte gibt. Deshalb wurden in einer Testrechnung unter Nutzung des Datensatzes zum "Objekt 2 Sommer" (siehe Tab. 3.1) die genannten drei Rn-222 Gaseigenschaften jeweils um den Faktor 100 erhöht. Das Ergebnis zeigt, dass die Stoffwerte in thermohydraulischer Sicht nicht von Bedeutung sind – die berechneten Drücke, Temperaturen

oder Luftfeuchtigkeit sind nicht beeinflusst. Gleiches gilt auch für die berechnete Aktivitätskonzentration (Abb. 3.20). Dieses Ergebnis stützt noch einmal die grundlegende Idee bei der Rn-222 - Simulation: bei genügend kleiner Rn-222 - Masse (im konkreten Fall <10⁻⁵ kg) hat diese keinen Einfluss auf das Verhalten der Raumparameter.

In COCOSYS THY gibt es zur Identifizierung von Eingabefehlern einen Test, mit dem der Gültigkeitsbereich von LAMBDA und ETA für Gaskomponenten grob überprüft wird. Dieser Test wurde so geändert, dass er für TRACER_GAS nur eine Warnung ausgibt, anstatt wie bisher zum Stopp der Rechnung zu führen.

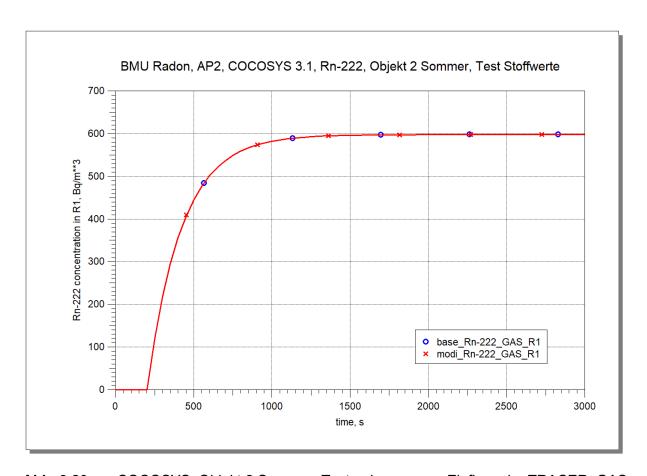


Abb. 3.20 COCOSYS, Objekt 2 Sommer, Testrechnung zum Einfluss der TRACER_GAS Stoffwerte auf die Rn-222 Aktivitätskonzentration in Zone R1, base = korrekte Stoffwerte, modi = Stoffwerte*100

3.4.2.2 Anfangskonzentration

In COCOSYS Nachrechnungen im AP 4 war es erforderlich, in einigen Räumen die entsprechend der Messwerte vorliegende Anfangskonzentration von Rn-222 zu berücksichtigen. Um diese Simulationen zu unterstützen, wurde COCOSYS dahingehend erweitert, dass nunmehr

für TRACER_GAS auch solchen Anfangskonzentrationen direkt in der Eingabe definiert werden können. Dazu wurde der neue Typ "ACTCON" mit der Unit "BQ/M**3" definiert. Beim Einlesen der Anfangskonzentration erfolgt eine Kontrolle auf Gültigkeit (nur für TRACER_GAS erlaubt, Werte müssen größer null sein). Ein vom Nutzer definierter Skalierungsfaktor wird automatisch berücksichtigt.

Ein Beispiel für solch eine Definition zeigt Abb. 3.21. Neue Daten sind in Rot geschrieben; alle anderen Eingabedaten sind COCOSYS-Standard und in /ARN 19/ zu finden.

```
C---- ZONES
    . . .
K---- R1
(a)
---- MODEL
    NONEQUILIB
    MAIN PHASE OF THE ZONE PARTS
    GAS
---- GEO BASIC
    ZTVOL
                 ZHIGH
                           ZFAREA
                                      ZFHIGH
    110.
                 0.0
                           50.
                                      1.1
---- STARTING
                                  VALUE
    COMP
                  TYPE
                             IPS
                                          UNIT
    TEMP
                                  20.
                                           \mathbf{C}
                             1
    SATURATION
                                  50.
                             1
    Rn-222
                  ACTCON
                                  150.
                                           BQ/M**3
                            1
    AIR
                  REST
                             1
    PRESS
                             1
                                  101325. PA
(a)
```

Abb. 3.21 COCOSYS 3.1, Eingabe zur Definition einer Rn-222 - Anfangskonzentration

Nach dem Lesen der Einspeisedaten werden diese in den Ausgabefile des THY Hauptmoduls *.prt.thy ausgedruckt (Abb. 3.22). Dabei wird nur die Rn-222-Masse in der Zone und nicht die Anfangskonzentration ausgegeben. Wenn ein Skalierungsfaktor > 1. verwendet wird, ist dies in der Ausgabe kenntlich gemacht.

```
ZONE R1
ZONE MODEL USED IS NONEQUILIB
MAIN PHASES OF THE ZONE PARTS
GAS
GEOMETRY OF THE ZONE:
ZTVOL = 0.1100000D+03 (M**3) ZELEV = 0.1100000D+01 (M)
ZFAREA = 0.5000000D+02 (M**2) ZFELEV = 0.0000000D+00 (M) REL. ZCLHGT = 0.2200000D+01 (M)
START CONDITIONS OF THE ZONE
OF THE PART NO. 1
 ZTEMP = 0.2000000D+02 (C)
ZTOPRE = 0.1013250D+01 (BAR)
ZSATUR = 0.5000000D+02 (%)
 ZVOL = 0.1100000D+03 (M**3)
 ZFVOL = 0.1100000D+03 (M**3)
COMPONENT MASS (KG) PARTIAL PRESS (BAR) PARTIAL PRESS (%)
 STEAM
             0.9509037D+00 0.1168914D-01
                                                   0.1153629D+01
 AIR
             0.1309040D±03
                            0.1001561D+01
                                                   0.9884637D+02
 Rn-222
             0.2899293D-06
                             0.2893757D-09
                                                   0.2855916D-07
             TRACER_GAS scaling factor T_GAS_SF = 0.10000D+09 is considered.
```

Abb. 3.22 COCOSYS 3.1, Ausgabe der Daten zu einer Rn-222 TRACER_GAS Einspeisung

3.4.2.3 Einspeisung (C---- INJECTION)

Zur Simulation von TRACER_GAS - Quellen können in COCOSYS sogenannte INJECTIONs verwendet werden /ARN 19/. Um die besondere Behandlung von TRACER_GAS zu gewährleisten (Skalierungsfaktor), ist von den in COCOSYS THY verfügbaren Möglichkeiten nur der Einspeise-Typ "STANDARD" und die Einspeise-"Einheit" CIJUNT = TEMP_PRESS anwendbar, d. h. die Definition von zeitabhängigen Tabellen mit Massenstrom, Druck und Temperatur des eingespeisten Gases. Hierbei kann der Massenstrom auch negativ sein, d. h. eine Senke simuliert werden.

Daneben wurde eine neue nur für TRACER_GAS anwendbare Einheit implementiert: "BQ_M3H_T_P". Sie erlaubt im Unterschied zu TEMP_PRESS die Vorgabe einer zeitabhängigen Volumenquellrate CIJEXH in [Bq/(m³h)], wie sie z. B. auch in /HAU 17/ angegeben ist.

Intern wird dann diese Aktivität unter Verwendung des Volumens der Einspeisezone (anfängliches freies Gasvolumen des Hauptgas-Zonenteils NZMGAS, siehe /ARN 19/) sowie von T_GAS_BK (siehe Kapitel 3.4.2.1) in einen Massenstrom umgerechnet, wobei abhängig von der TRACER_GAS Option der Skalierungsfaktor T_GAS_SF automatisch mit eingerechnet wird. Im Prinzip ist auch eine negative Quellrate möglich. Dabei wird in COCOSYS überprüft, ob in der Entnahmezone zum Entnahmezeitpunkt genügend Gas vorhanden ist. Anderenfalls wird während der Rechnung die Rate auf null gesetzt und ein Fehler ausgegeben.

Ein Beispiel für die Einspeisung mit der neuen "BQ_M3H_T_P" Einheit ist in Abb. 3.23 gegeben (neue Daten in Rot geschrieben). Während in Option 1 mit realen Rn-222 Massen gerechnet wird, werden bei Option 2 intern alle vom Nutzer definierten Einspeisungen hochskaliert (siehe Kapitel 3.4.2).

```
C---- INJECTION
(a)
K---- Rn-222 inj
(a)
(a)
    CIJCOM
                CIJOBJ
                           CIJTYP
                                           CIJUNT
     Rn-222
                ZONE
                           STANDARD
                                           BQ M3H T P
(a)
---- OBJECTS
(a)
    CIJOB
              IJELE
                         CIJDIS
(a)
     R1
              1
                         1.0
---- TABLE
    CIJTIM
               CIJEXH
                           CIJTEMP
                                        CIJPRE
(a)
               (Bq/m*3/h) (Cel.)
                                        (bar)
(a)
    (s)
        0.
                           20.
                                        1.01325
                 0.
                                        1.01325
     200.
                 0.
                           20.
     200.5
                80.
                           20.
                                        1.01325
   40000.
                80.
                           20.
                                        1.01325
```

Abb. 3.23 COCOSYS 3.1, Eingabestruktur einer Einspeisung mit "BQ_M3H_T_P" für Rn-222

Die Beschreibung der unveränderten Eingabedaten ist /ARN 19/ zu entnehmen. Die neue Einheit "BQ_M3H_T_P" dient zur Identifizierung der speziellen Eingabe CIJEXH, d. h. der Vorgabe der Volumenquellrate (exhalation rate).

Nach dem Lesen der Einspeisedaten werden diese in den Ausgabefile des THY - Hauptmoduls *.prt.thy ausgedruckt (Abb. 3.24). Abhängig von der TRACER_GAS Option wird der aus der Volumenquellstärke berechnete Massenstrom mit dem Skalierungsfaktor multipliziert, was im Ausdruck kenntlich gemacht ist.

```
INJECTION TABLE Rn-222 inj
COMPONENT NAME IS Rn-222
CIJOBJ -> ZONE CIJTYP -> STANDARD CIJUNT -> BQ_M3H_T_P
INJECTION OBJECTS AND DISTRIBUTION FACTORS
        NO. FACTOR/POINTER
R1
        1
             0.1000000D+01
TABLE VALUES
                 EXH.RATE(BQ/M3/H) --> MASS FL.(KG/S) TEMPERATURE(C) PRESSURE(BAR)
NO. TIME(S)
 1 0.0000000D+00 0.0000000D+00 --> 0.0000000D+00
                                                    0.2000000D+02
                                                                     0.1013250D+01
 2 0.2000000D+03 0.0000000D+00
                                 --> 0.0000000D+00
                                                    0.2000000D+02
                                                                     0.1013250D+01
 3 0.2005000D+03 0.8000000D+02
                                 --> 0.1835243D-07
                                                    0.2000000D+02
                                                                     0.1013250D+01
 4 0.4000000D+05 0.8000000D+02 --> 0.1835243D-07
                                                    0.2000000D+02
                                                                     0.1013250D+01
==> TRACER GAS SCALING FACTOR T GAS SF = 0.10000D+11 CONSIDERED IN MASS FL.
```

Abb. 3.24 COCOSYS 3.1, Ausgabe der Daten zu einer Rn-222 TRACER_GAS Einspeisung

3.4.2.4 Lüftungssysteme (C---- FAN_SYSTEM)

In den COCOSYS-Rechnungen in Kapitel 3.2.2 und 3.3.1 zeigte sich, dass die Simulation der Randbedingungen, d. h. der Luftwechselzahl (System FAN-O, siehe Kapitel 3.2.1) und die Unterdruckeinstellung (FAN-I) in den Objekten, in COCOSYS am effektivsten mit Hilfe von Lüftungssystemen umzusetzen ist. Um dies in zukünftigen Anwendungen zu erleichtern, wurden auch hier Adaptionen vorgenommen.

Als neue Option ist anstatt der Vorgabe eines Volumenstromes oder einer Lüftungscharakteristik nun auch die Angabe einer Luftwechselzahl möglich. Diese Luftwechselzahl bezieht sich auf das anfängliche freie Volumen des Hauptgas-Zonenteils NZMGAS der dazu angegebenen Referenzzone FNZONE. Wenn diese Zone nicht Start- bzw. Zielzone des Lüftungssystems ist (abhängig vom Typ, INLET: FNZONE = FENV bzw. OUTLET: FNZONE = FZONE_i), wird dies toleriert, aber eine Warnung ausgegeben.

Ein Beispiel für ein Lüftungssystem mit der neuen Option ist in Abb. 3.25 enthalten (neue Daten in Rot geschrieben).

```
C---- FAN_SYSTEM
(a)
                                  @ Einstellen der Luftwechselzahl L50
K---- FAN-O
                           FMES
    CINOUT
                FENV
    OUTLET
                ENVIR-O
                           R1
(a)
    FANNO (1/h) FNZONE
    0.64
                R1
---- ZONE DIS
   FZONE
                FALPHA
    R1
                1.
---- VALVE REG
    V-FAN-O
(a)
(a)
C---- EXT EVENTS
(a)
    IF 'TIME' >= 100. THEN VALVE V-FAN-O SET OPEN
(a)
```

Abb. 3.25 COCOSYS 3.1, Eingabebeispiel für ein adaptiertes Lüftungssystem, System FAN-O

Die generelle Beschreibung der Lüftungseingabedaten ist /ARN 19/ zu entnehmen. Neue Daten sind FANNO als Luftwechselzahl in [1/h] sowie der Name der Referenzzone FNZONE.

Wie bei allen Eingaben werden auch diese nach Einlesen und Überprüfung in den Ausgabefile des THY Hauptmoduls *.prt.thy ausgedruckt (Abb. 3.26).

FAN SYSTEM FAN-O

MODE OUTLET

VENTILATION NUMBER 0.64000D+00 (1/H)

RELATED ZONE R1 ZONE PART NO 1

FREE VOL. OF ZONE PART 0.47000D+03 (M**3)
RESULTING VOL.FL. RATE 0.83556D-01 (M**3/S)

CONTROLLED BY VALVE: V-FAN-O

VOLUME FLOW (ATM. MIXTURE) IS TAKEN FROM ZONES:

ZONE NAME FACTOR
R1 0.10000D+01

AND DELIVERED TO ENVIRONMENT ZONE: ENVIR-O

Abb. 3.26 COCOSYS 3.1, Ausgabe der Daten zum Lüftungssystem

3.4.2.5 Ausgabe (Print and Plot Files)

Bezüglich TRACER_GAS wurde die COCOSYS Ausgabe in den Print- bzw. Plot-File um die berechnete Aktivitätskonzentration TG_ACT in [Bq/m³] erweitert (siehe Abb. 3.27). Die Ausgabe erfolgt dabei für den Hauptgas-Zonenteil NZMGAS jeder Zone. Dabei ist zu beachten, dass die "reale" Aktivität ausgegeben wird, d. h. ein eventueller Skalierungsfaktor T_GAS_SF größer 1.0 ist berücksichtigt.

Beim Blick auf die in der Ausgabe enthaltenen Massen eines TRACER_GAS ist zu beachten, dass diese abhängig von der verwendeten Option hochskaliert sind (Abb. 3.27).

Bei Notwendigkeit kann im Post-Processing die "reale" Radonkonzentration [kg/m³] durch Multiplikation mit dem Umrechnungsfaktor T_GAS_BK (siehe Abb. 3.19) bestimmt werden.

Falls in der Simulation Zonen-Modelle mit mehr als einem Zonenteil verwendet werden, kann im Post-Processing die Aktivitätskonzentration in den anderen GAS-Zonenteilen aus den entsprechenden Gasmassen geteilt durch freies Zonenteil-Volumen, Skalierungs- und Umrechnungsfaktor ermittelt werden. Die Verwendung des freien Gasvolumens berücksichtigt dabei z. B. eine mögliche Ansammlung von Wasser in der Zone.

NO. ZONE	PART	ZTEMP	ZMASS	ZMASS	ZMASS	ZMASS
		TEMPERATURE	WATER	STEAM	AIR	Rn-222
1 R1	GAS	0.20000D+02	0.00000D+00	0.95043D+00	0.13084D+03	0.11543D-05
2 ENVIR-O	GAS	0.20000D+02	0.00000D+00	0.86446D+07	0.11900D+10	0.75262D-05
3 ENVIR-I	GAS	0.20000D+02	0.00000D+00	0.86446D+07	0.11900D+10	0.00000D+00
ZONES) T	D A CED	GAS ACTIVITY (RO/M**3) (DIV	VIDED BY SCA	I ING FACTOR	,
(ZONES) T		_GAS ACTIVITY (TG_ACT	BQ/M**3) (DIV	VIDED BY SCA	LING FACTOR) -
			BQ/M**3) (DIV	IDED BY SCA	LING FACTOR) -
		TG_ACT	BQ/M**3) (DIV	/IDED BY SCA	LING FACTOR)
NO. ZONE	0.59	TG_ACT Rn-222	BQ/M**3) (DIV	IDED BY SCA	LING FACTOR)

Abb. 3.27 COCOSYS 3.1, Print-Ausgabe der Gasmassen sowie der Aktivitätskonzentration von Rn-222

Bei Aktivierung der Option zur Berücksichtigung des Massenzerfalls (T_GAS_DECAY = DECAY) wird jetzt in der Massenbilanz für jedes TRACER_GAS das Integral des Massenzerfalls im betrachteten System (Zonen inklusive Umgebung) mit ausgegeben (MODEL = BALANCE, BACOMP = DECAY_HEAT, SBDMAS – hier von Rn-222, siehe Abb. 3.28). Wenn vom Nutzer definiert, wird der Skalierungsfaktor T_GAS_SF laut Kapitel 3.4.2.1 dabei berücksichtigt (**Bemerkung**: die Energiebilanz ist nicht skaliert). Für alle anderen Komponenten ist dieser Massenbilanzeintrag Null.

NO. BACOMP	SBDENG	SBDMAS	SBDMAS	SBDMAS	SBDMAS
	ENERGY	WATER	STEAM	AIR	Rn-222
1 R1	0.11273D+02	0.00000D+00	-0.19655D-02	-0.27058D+00	0.94372D-04
2 ENV-IN	-0.55564D+05	0.00000D+00	-0.10468D+02	-0.14410D+04	0.00000D+00
3 ENV-OUT	0.55552D+05	0.00000D+00	0.10470D+02	0.14413D+04	0.16597D-03
4 STRUCTURES	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00
5 1D_JUNC	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00
6 IC_CIRCUIT	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00
7 BUILD_COND	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00
8 INJECTION	0.49445D-03	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.26427D-03
9 COMBUSTION	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00
10 RECOMBINER	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00
11 COOLING	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00
12 DECAY_HEAT	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	-0.39250D-05
13 AFP_CHANGE	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00
14 PYROLYSIS	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00
15 BOUND_SURF	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00
16 CCI_CORR	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00
17 DCH	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00
18 DCH_CHEM	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00	0.00000D+00
19 DIFFERENCE	0.51618D-02	0.93132D-07	0.93132D-07	-0.14305D-05	0.65052D-18

Abb. 3.28 COCOSYS 3.1, Print-Ausgabe der Massen- und Energiebilanz (hier Rechenfall mit Berücksichtigung des Zerfalls T GAS DEC = DECAY)

3.4.2.6 Überprüfung der Programm-Adaption

Die Korrektheit der vorgenommenen Programmänderungen wurde durch erneute Nachrechnung des Falles "Objekt 2 Sommer" aus Kapitel 3.3.1 überprüft.

Im Unterschied zur Rechnung in AP 1.3 wurden alle Umrechnungen im Datensatz, die bisher manuell erfolgten, entfernt und die neuen Programmoptionen TRACER_GAS, INJECTION, FAN_SYSTEM sowie der Ausgabe der Aktivität verwendet. Da sich an den Zahlenwerten selbst nichts geändert hat, müssen die neuen Ergebnisse identisch mit den alten sein (Rundungsfehler ausgenommen).

Diese Erwartung hat sich bestätigt und ist exemplarisch für das Objekt 2 Sommer für die Aktivitätskonzentration von Rn-222 in Zone R1 in Abb. 3.29 dargestellt.

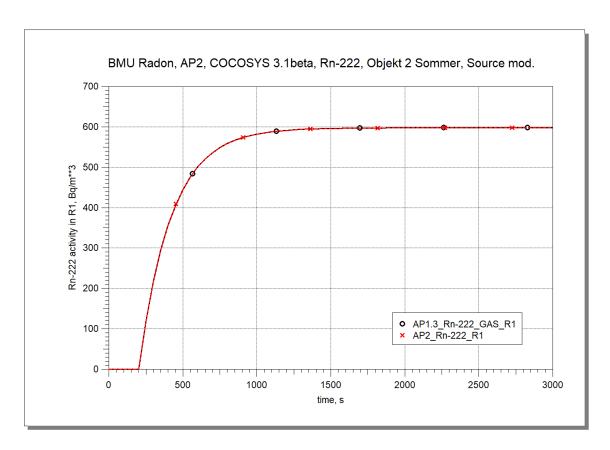


Abb. 3.29 COCOSYS, Objekt 2 Sommer, Rn-222 Aktivitätskonzentration in Zone R1, Vergleich der Ergebnisse aus AP 1.3 und AP 2

Anhand einer Rechnung für das Objekt 5 Sommer wurde neben der Überprüfung der Source-Änderungen auch der Einfluss der Berücksichtigung des Zerfalls von Rn-222 analysiert. Der Fall Objekt 5 Sommer ist hierfür besser geeignet als Objekt 2 Sommer, da sich die Gleichgewichtskonzentration erst viel später (nach ~40.000 s) einstellt und damit der Zerfall einen größeren Einfluss hat.

Die Aktivitätskonzentration von Rn-222 in Zone R1 ist in Abb. 3.30 dargestellt. Die aktuellen Ergebnisse für die Variante ohne Berücksichtigung des Zerfalls sind identisch zu denen aus AP 1.3 und auch der in Kapitel 3.3.1, Abb. 3.15 abgeschätzte Einfluss des Zerfalls wird bestätigt.

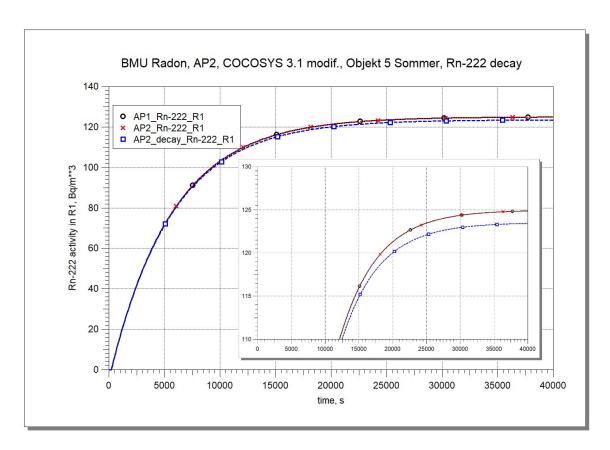


Abb. 3.30 COCOSYS, Objekt 5 Sommer, integrale Rn-222-Aktivitätskonzentration in Zone R1, Vergleich der Ergebnisse aus AP 1.3 und AP 2 (ohne und mit Zerfall)

Das Integral der im betrachteten Zeitraum zerfallenen Rn-222-Masse im gesamten System, d. h. des Rn-222 in Objekt 5 (Zone R1) sowie in beiden Umgebungszonen ENVIR-I und ENVIR-O (siehe Abb. 3.2) ist in Abb. 3.31 dargestellt. Der in der Rechnung verwendete Skalierungsfaktor T_GAS_SF = 1.D+10 ist im Integral der zerfallenen Rn-222-Masse berücksichtigt.

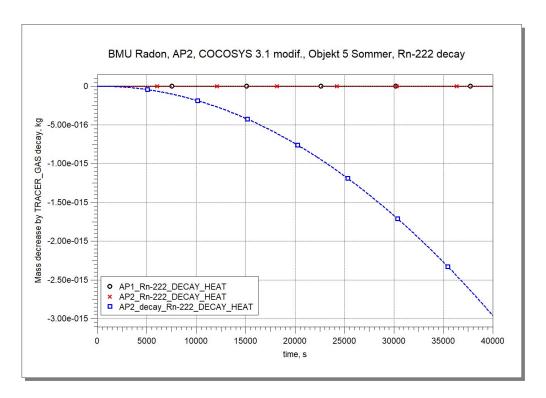


Abb. 3.31 COCOSYS, Objekt 5 Sommer, Integral des Rn-222 Massenverlustes im gesamten System (Objekt und Umgebung), Vergleich der Ergebnisse aus AP 1.3 und AP 2 (ohne und mit Zerfall)

3.5 AP 3: Messung und Datenerhebung

Die im Rahmen des Vorhabens erhobenen bzw. recherchierten Messdaten dienten als Eingangsdaten der Modellrechnung mittels COCOSYS und ermöglichten darüber hinaus die Validierung der Codeanpassung in COCOSYS.

Abweichend von der üblichen Vorgehensweise zur Bestimmung der mittleren Radonaktivität in Räumen bestand die Möglichkeit der zeitaufgelösten Datenaufzeichnung. Damit konnte im Prinzip zu jedem Zeitpunkt die Anpassung des Codes vorgenommen werden. Durch die umfangreichen Messdaten war die Prüfung hinsichtlich der Eignung und Anpassung des COCOSYS-Codes für die Simulation der Radon Ausbreitungsprozesse in Gebäuden und somit auch an Arbeitsplätzen möglich. In 3.5.1 wird die eingesetzte Messtechnik beschrieben. Kapitel 3.5.2 befasst sich mit der Identifikation geeigneter Gebäude für die Messungen. Kapitel 3.5.3 erläutert die Planung der Instrumentierung bzw. der Messungen und stellt u. a. die eingesetzte Messtechnik vor. Kapitel 3.5.4 diskutiert abschließend die Detailuntersuchungen und kontinuierlichen Messungen.

3.5.1 Eingesetzte Messtechnik

Die Messungen der Prüfparameter erfolgten durch entsprechend geeignete und kalibrierte Messsysteme. Prüfmittel und Geräte für Hilfsmessungen (wie z. B. für die Ermittlung der wesentlichen Umgebungsbedingungen) wurden vor ihrer Inbetriebnahme kalibriert (BfS Kalibrierkampagne Radon 4; Oktober/November 2018).

Die im nachfolgenden aufgeführten und im Vorhaben eingesetzten Messgeräte ermöglichen es, die Radonausbreitung in Gebäuden durch die simultane Bestimmung der Aktivitätskonzentration an verschiedenen Orten innerhalb eines Gebäudes zu untersuchen (Tab. 3.7).

Tab. 3.7 Überblick über die einsetzbare Messtechnik

	Bezeichnung	Besonderheit
Messtechnik Radon		
Alphaspektroskopischer Radon/Thoron-Monitor	RTM 1688-2	aktive Aufnahme des Messgases drei Geräte 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-Folgepro- dukte (FP)	EQF 3220	Angelagerte und unangelagerte Fraktion der Radon-Folgepro- dukte, Ausgabe als PAEC, EEC zusätzliche Anschlüsse z. B. für Differenzdrucksonde
Radon-Monitor	Radon Scout Plus	diffusiver Radonzutritt Alpha-Detektor zwei Geräte vorhanden
Radon-Monitor	Radon Scout PMT	szintillometrische Messung mit Hilfe von Lucas-Zellen Grab Sampling Bodenluft/Raum- luft/Wasseranalytik 17 Lucas-Zellen à 240 ml zwei Geräte vorhanden
Weitere Messfühler		
CO ₂ Sensor		zwei Geräte vorhanden

3.5.2 AP 3.1: Identifikation und Beschreibung geeigneter Gebäude mit Arbeitsplätzen

Zu Beginn des Vorhabens mussten geeignete Räumlichkeiten mit potenziell vorhandenen Arbeitsplätzen identifiziert werden. Neben einer ausreichend (hohen) Radonkonzentration in den Gebäuden/Räumlichkeiten war zudem die Erreichbarkeit (aus Berlin) sowie die Verfügbarkeit und Instrumentierbarkeit der Räumlichkeiten entscheidend für die Auswahl der Messobjekte. Die Identifikation fokussierte sich daher auf Gebäude bzw. Örtlichkeiten, in denen mit hoher Wahrscheinlichkeit zumindest in der Bodenluft hohe Radonkonzentration vorherrschen.

Weiterhin sollten diese Messobjekte nach Möglichkeit einen Arbeitsplatz aufweisen. Wünschenswert waren außerdem möglichst eindeutige Randbedingungen (z. B. geschlossene Fenster und Türen), damit die auszuwertenden Messergebnisse interpretierbar sind. Sämtliche in diesem Vorhaben untersuchten Messobjekte wurden über bereits bestehende Kontakte der GRS identifiziert. Weiterhin wurde versucht, potenzielle Messobjekte über Untersuchungen von Karten mit Radon-Bodenkonzentrationen usw. zu ermitteln. Aus Zeitgründen wurde jedoch von dieser Herangehensweise abgesehen, da sich im Laufe des Vorhabens herausstellte, dass durch eine größere Anzahl an Messobjekten kein Mehrwert für die Entwicklung des COCOSYS-Codes zu erwarten war. Vielmehr wurde der Fokus auf eine möglichst umfassende und detaillierte Betrachtung gut bekannter Messobjekte mit definierten Bedingungen gelegt. Insgesamt wurden Messungen in drei Messobjekten vorgenommen. Diese werden im folgenden Text näher besprochen.

Messobjekt 1: Ingenieurbüro

Bei diesem Objekt handelt es sich um ein Einfamilienhaus mit Arbeitsplatz (Ingenieurbüro) im Raum Dresden-Freital. Aufgrund der Anordnung der Räume sowie der hohen Radon-Aktivitätskonzentration, die offenbar hauptsächlich von einem Raum ausgeht, bot dieses Objekt für die Messungen ausgezeichnete Voraussetzungen, welche auch für typische Arbeitsplätze denkbar sind (z. B. Arztpraxen, Ingenieurbüros, Friseure, oder allgemein Kleingewerbe). Die Messungen wurden im Rahmen von zwei eigenständigen Messkampagnen je Objekt (innerhalb und außerhalb der Heizperiode) durchgeführt.

Messobjekt 2: Einfamilienhaus mit Gewölbekeller

Bei dem zweiten Objekt handelt es sich um ein im Stadtgebiet von Dresden befindliches Einfamilienhaus mit Kellergewölbe, in dem bereits in der Vergangenheit erhöhte Radon-Aktivitätskonzentrationen festgestellt wurden. Der Keller hat keine Fenster, jedoch einen Schacht und somit mindestens eine direkte Verbindung nach außen. Weiterhin verfügt der Gewölbekeller über einen Zugang (Kellertreppe) zum Erdgeschoss. In diesem Objekt wurde eine Messkampagne durchgeführt.

Messobjekt 3: Wasserwerk

Bei diesem Messobjekt handelt es sich um ein Wasserwerk, das aus Gründen der Anonymisierung hier nur eingeschränkt beschrieben werden kann. Das Wasserwerk hat mehrere Hallen, wobei die Messungen nur in einer Halle mit insgesamt 10 Filterbecken zur Trinkwasseraufbereitung durchgeführt wurden. Im Wasserwerk wurde eine Messkampagne durchgeführt.

Weitere Details zu den Messungen finden sich in den Kapiteln 3.5.3 und 3.5.4.

3.5.3 AP 3.2: Planung der Instrumentierung und der Messungen

Im vorliegenden Arbeitspaket erfolgte die Detailplanung der standortspezifischen Instrumentierung, Abstimmung und Initialisierung der durchzuführenden Messungen, ebenso wie die Formulierung von deren Anforderungen und Rahmenbedingungen. Basierend auf eigenen praktischen Erfahrungen des Forschungsnehmers sowie Informationen aus ausgewählter Literatur wurden die für die Zielerreichung des Vorhabenschrittes geeigneten Messtechniken ausgewählt.

Im Zusammenhang mit der Messung und Datenerhebung in den drei Messobjekten wurden folgende Tätigkeiten durchgeführt:

- Vor-Ort Besichtigung der Gebäude und Räumlichkeiten sowie Prüfung der grundsätzlichen Eignung für die geplanten Untersuchungen, insbesondere mit Blick auf eine ausreichend hohe Radon-Aktivitätskonzentration in der Luft.
- Detailuntersuchung, Installation und Prüfung von Messsystemen für die kontinuierliche Aufzeichnung der gewählten Prüfparameter.

- Mindestens 12-tägige Aufzeichnung von Messdaten bei gleichzeitiger Datenfernübertragung.
- Führung eines Messprotokolls mit Aufzeichnung besonderer Ereignisse, auch durch die Inhaber bzw. Mitarbeiter der jeweiligen Messobjekte
- Nachuntersuchung und Deinstallation der Messsysteme.

Messobjekt 1: Ingenieurbüro

Abb. 3.32 und Abb. 3.33 zeigen Grundrisse von Erdgeschoss und Obergeschoss im Messobjekt 1 mit Positionierung der Messgeräte.

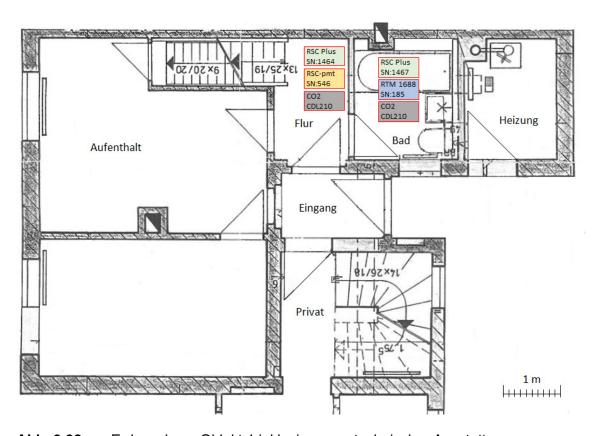


Abb. 3.32 Erdgeschoss Objekt 1 inklusive messtechnischer Ausstattung

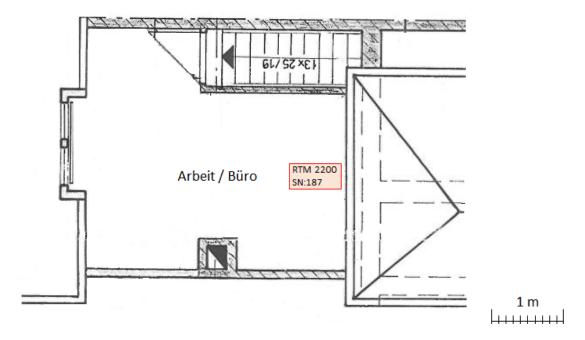


Abb. 3.33 Obergeschoss Objekt 1 inklusive messtechnischer Ausstattung

Tab. 3.8 zeigt eine Übersicht der Positionierung der Messgeräte mit den zugehörigen Messintervallen.

Tab. 3.8 Übersicht der Positionierung der Messgeräte mit Messintervallen, Messkampagne Winter (26.02.2019 bis 11.03.2019)

EG	1. OG	
Bad	Flur	Arbeitszimmer
RTM1688, SN: 185, 10 min ¹ ; 30 min ²	RSC-PMT, SN: 546, 10 min ¹ ; 30 min ²	RTM2200, SN: 187; 10 min ¹ ; 30 min ²
RSC+, SN: 1467, 10 min ¹ ; 30 min ²	RSC+, SN: 1464; 10 min ¹ ; 30 min ²	-
CO ₂ , CDL210, 5 min	CO ₂ , CDL210, 5 min	-

¹während der zweitägigen Testmessung; ²während der Langzeitmessung

Tab. 3.9 zeigt die Positionierung der Messgeräte während der Messkampagne im Sommer.

Tab. 3.9 Übersicht der Positionierung der Messgeräte mit Messintervallen, Messkampagne Sommer (20.08.2019 bis 03.09.2019)

	1. OG		
Bad	Flur	Aufenthaltsraum	Arbeitszimmer
EQF, SN: 3220; 15 min	RSC-PMT, SN: 546; 15 min	RTM1688, SN: 175*; 15 min	RTM2200, SN: 187; 15 15 min
RTM1688, SN: 185; 15 min	RSC+, SN: 1464; 15 min	RSC-PMT, SN: 1157; 15 min	-
RSC+, SN: 1467; 15 min	-	-	-
CO ₂ , CDL210; 5 min	CO ₂ , CDL210; 15 min	-	-

^{*} Kalibrierung nicht aktuell (2016)

Bemerkung: Die Kalibrierungen der Geräte wurde gemäß der Kalibrierzertifikate jeweils im Bereich bis 10.000 Bq/m³ durchgeführt. Insbesondere im Bad treten während der Messkampagne allerdings z.T. erheblich höhere Werte (bis etwa 50.000 Bq/m³) auf.

Messobjekt 2: Einfamilienhaus mit Gewölbekeller

Von Messobjekt 2 liegt leider kein Grundriss vor. Daher wurden mittels Laserabstandsmesser die Räume ausgemessen und entsprechende Skizzen der Räume im Haus gezeichnet. Es handelt sich um ein ca. 200 Jahre altes Fachwerkhaus mit einem Gewölbekeller. Abb. 3.34 zeigt die ermittelten Dimensionen des Gewölbekellers und Fotos. Die Messgeräte waren auf dem Tisch, ungefähr in der Mitte des Raumes positioniert. Das Kellergewölbe ist über mindestens einen Schacht mit der Außenluft verbunden und hat ein Volumen von ca. 40 m³. Über eine Kellertreppe (siehe Abb. 3.34) gelangt man ins Erdgeschoß.

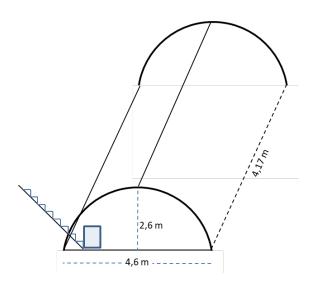






Abb. 3.34 Gewölbekeller mit Abmessungen und Fotos. Auf dem Tisch waren die Messgeräte positioniert

Der Gewölbekeller ist über eine Treppe mit dem Erdgeschoss verbunden (siehe Abb. 3.35). Die Kellertreppe wird durch eine Kellerklappe abgeschlossen. Diese besteht aus Holzbrettern, zwischen denen ein offener Abstand herrscht. So herrscht eine quasi offene Verbindung zwischen Keller und darüber liegender Etage. Der Bereich der Kellertreppe wurde ebenfalls mit Laserabstandsmesser ausgemessen. So wurde ein Volumen für diesen Bereich von 2 m³ ermittelt.



Abb. 3.35 Treppe zum Gewölbekeller. Links ist die Kellerklappe zu sehen; die Abstände zwischen den jeweiligen Holzbrettern sind offen

Abb. 3.36 zeigt ein Foto des Raumes oberhalb des Kellers und eine Skizze mit den abgemessenen Dimensionen. Links und rechts ist jeweils eine Tür eingezeichnet. Die dahinter liegenden Räume durften nicht betreten werden, daher liegen dazu keine Angaben vor. Das aus den Messdaten ermittelte Volumen des Raumes beträgt 18 m³.

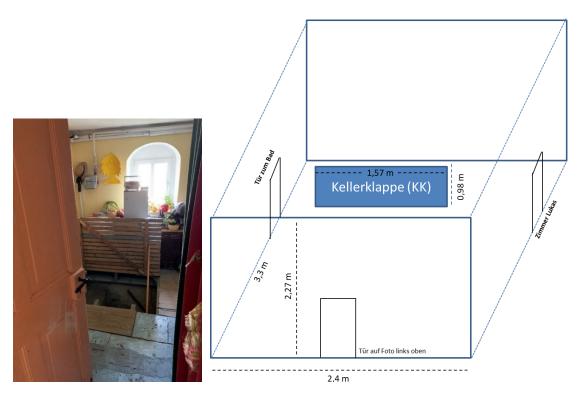


Abb. 3.36 Geöffnete Kellerklappe (links) und Skizze mit Abmessungen des Raums direkt oberhalb des Kellers

Abb. 3.37 zeigt eine Skizze des Raumes im Eingangsbereich mit Abmessungen. Von dort geradeaus geht es in den Raum mit der Kellerklappe. Weiterhin ist hier die Tür Richtung Kinderzimmer und die Treppe ins 1. OG. Für den Flurbereich (ohne die Raumhälfte mit der Treppe) wurde ein Volumen von 9,1 m³ ermittelt. Für den Treppenaufgang in das 1. OG wurde ein Volumen von 5,6 m³ ermittelt.

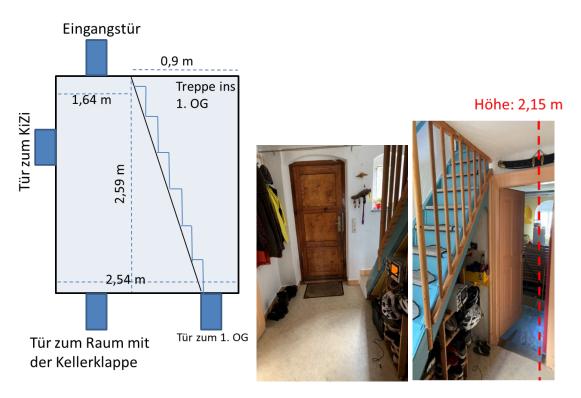


Abb. 3.37 Skizze das Raumes im Eingangsbereich (links), Flur mit geöffneter Tür Richtung Kellerklappe (rechts) und Eingangstür (Mitte)

Abb. 3.38 zeigt eine Skizze mit Abmessungen des Kinderzimmers mit zugehörigen Fotos. Zum Kinderzimmer führen zwei Türen, deren Abstand voneinander ist 0,17 m. Das Volumen des Kinderzimmers beträgt ca. 36,6 m³.

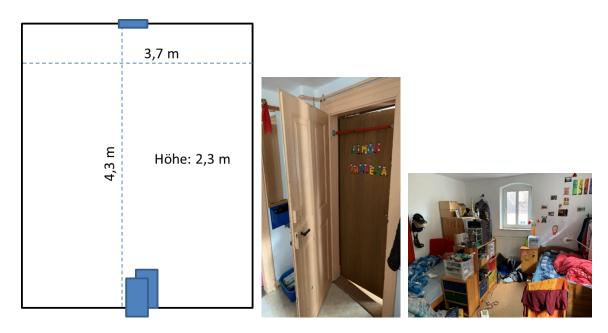


Abb. 3.38 Abmessungen des Kinderzimmers im Eingangsbereich; zum Kinderzimmer führen zwei Türen

Abb. 3.39 zeigt eine Skizze mit Abmessungen des 1. OG. Das durch die Abmessungen ermittelte Volumen beträgt ca. 15 m³. Im 1. OG befinden sich weitere Räumlichkeiten, die nicht betreten werden konnten und zu denen daher keine Angaben gemacht werden können

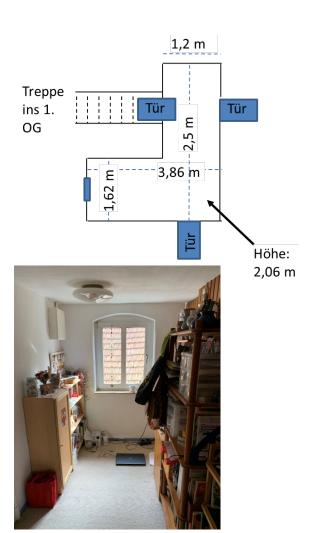




Abb. 3.39 Skizze des Bereichs im 1. OG (links oben); die Tür rechts in der Skizze ist im Bild oben rechts zu sehen

Tab. 3.10 zeigt die Positionierung der Messgeräte im Messobjekt 2 und die eingestellten Messintervalle. Die Messung wurde vom 15.02.2020 bis 22.02.2020 durchgeführt.

Tab. 3.10 Positionierung der Messgeräte und Messintervalle in Messobjekt 2

Keller		1. OG			
	Oberhalb der Kellerklappe	Flur	Kinderzimmer		
RTM1688,	RTM1688,	RTM2200,	EQF3220, SN:	RSC+, SN:	
SN: 175*	SN: 185	SN: 187	24+	1467	
60 min	30 min	30 min	30 min	60 min	
RSC-PMT,	RSC+, SN:	-	-	RSC-PMT,	
SN:546	1464			SN: 1157	
60 min	60 min			60 min	
CO2, CDL210	CO2, CDL210	-	-		
15 min	15 min				
*Kalibrierung nicht aktuell (von 2016)					

Messobjekt 3: Wasserwerk

Bei Messobjekt 3 handelt es sich um ein Wasserwerk, zu dem aus Gründen der Anonymisierung keine näheren Angaben wie Standort usw. gemacht werden können. Abb. 3.40 zeigt eine Skizze der Filterhalle mit Positionierung der Messgeräte. In der Halle befinden sich 10 Sandfilterbecken; diese sind in der Skizze nicht genauer eingezeichnet. Im Eingangsbereich zur Filterhalle befindet sich ein Abstellraum, der über einen Flur mit der Filterhalle verbunden ist. Während des Aufzeichnungszeitraumes wurden die in den Becken befindlichen Filter wie üblich entsprechend ihrem Filterwiderstand jeweils für einige Minuten gespült. Ein detailliertes Spülprotokoll wurde seitens des Wasserwerks zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus wurden in beiden Räumen jeweils Temperatur, relative Luftfeuchte und der Luftdruck erfasst.

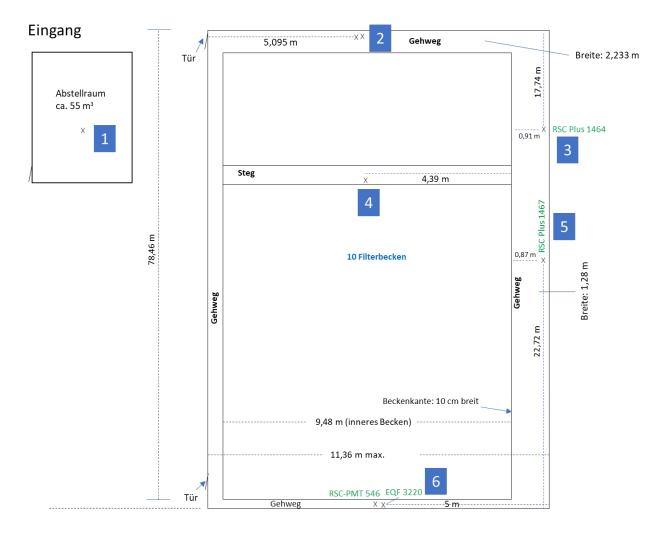


Abb. 3.40 Skizze der Filterhalle mit Positionierung der Messgeräte

Tab. 3.11 zeigt eine Übersicht über die Positionierung der Messgeräte, den Messzeitraum und die jeweiligen Messintervalle.

Tab. 3.11 Übersicht über die Positionierung der Messgeräte und eingestellte Messintervalle

Ort	Messstation	Gerät	Messzeitraum	Messintervall	
Abstell-		RTM1688, SN: 175*	24.1005.11.	15 min	
raum	1	RTM1688, SN: 278 (Wasserwerk)	24.1005.11.	15 min	
		RTM1688, SN: 185	24.1028.10.	5 min	
	2	RTM2200, SN: 187	28.1005.11.	5 min	
		RSC-PMT, SN: 1157	24.1005.11.	15 min	
	3	RSC+, SN: 1464	24.1005.11.	15 min	
		RTM2200, SN: 187	24.1028.10.	5 min	
Halle	Halle 4	RTM1688, SN: 185	28.1005.11.	5 min	
		DM, SN 387 (Wasser- werk)	29.1005.11.	20 min	
		Radim 3a (Wasserwerk)	29.1005.11.	20 min	
	5	RSC+, SN: 1467	24.1005.11.	15 min	
	6	EQF3220, SN: 24	24.1005.11.	5 min	
	6	RSC-PMT, SN: 546	24.1005.11.	15 min	
*Kalibrierung nicht aktuell (2016)					

Am 28.10.19 wurden die Geräte RTM1688, SN: 185 (Messstation 2) und RTM2200, SN: 187 (Messstation 4) vertauscht.

Am 29.10.19 wurden zwei zusätzliche Geräte (DM, SN 387; Radim 3a) an der Messstation 4 aufgestellt.

Während der Messungen wurde der Spülbetrieb der Filter wie üblich aufrechterhalten. An den beiden im Messzeitraum enthaltenen Wochenenden (25.-27.10. und 01.-03.11.) wurde jeweils die Lüftung abgeschaltet.

3.5.4 AP 3.3: Durchführung von Detailuntersuchungen und kontinuierlichen Messungen

Das Arbeitspaket 3.3 beinhaltet die Erhebung, Übernahme und qualifizierte Aufbereitung der aufgezeichneten Daten entsprechend der in Arbeitspaket 3.2 geplanten und ausgewählten Instrumentierung. In den folgenden Kapiteln werden die Messergebnisse und deren Auswertung hinsichtlich der jeweiligen Messobjekte präsentiert.

3.5.4.1 Messobjekt 1: Messergebnisse (Winterkampagne)

Testmessung (26.02.2019 bis 27.02.2019)

Im Winter/Frühjahr 2019 (vom 26.2.2019 bis 11.03.2019) wurde eine Radonlangzeitmessung durchgeführt. Ziel der Messung war die Erhebung einer eigenen Datengrundlage für die Anpassung des COCOSYS-Codes zur Radonmodellierung.

Im Vorfeld der Langzeitmessung wurden die Räumlichkeiten zu Testzwecken bemessen. Gegenüber der Langzeitmessung (30-Minuten-Intervall) wurde hier in einem 10-Minuten-Intervall die Radonkonzentration gemessen. Das Ziel der Testmessung war neben der Bestimmung der Luftwechselrate einen ersten Eindruck über die zu erwartenden Radonkonzentrationen zu bekommen. Für die Bestimmung der Luftwechselrate wurden zudem CO₂-Messgeräte eingesetzt, die den Abfall der CO₂-Konzentration aufgezeichnet haben.

Vor Beginn der Testmessung wurden sämtliche Räumlichkeiten für etwa 10 Minuten ausgiebig gelüftet (Durchzug), sodass zum Beginn der Messung die Radon-Aktivitätskonzentration jener in der Außenluft entsprach. Der Grad der Lüftung war zudem anhand der CO₂-Messung gut festzustellen, d. h. die CO₂-Konzentrationen in den Räumen glichen jenen im Freien (ca. 400 ppm).

Abb. 3.41 zeigt die bei der Testmessung aufgezeichneten Messwerte der Radon-Aktivitätskonzentration im Bad, Flur und Obergeschoss im zeitlichen Verlauf. Ein Ziel der Testmessung war es, die Radon-Aktivitätskonzentration im Bad soweit ansteigen zu lassen, bis ein Plateau (Gleichgewichtswert) erreicht ist. Dieses wurde, wie die Abbildung zeigt, nicht erreicht. Aus diesem Grunde wurde – nach dem Auslesen der Daten – der Entschluss gefasst, die Messung weiterlaufen zu lassen. In Abb. 3.41 ist nach ca. 8 h Messdauer ein starker Abfall der Radon-konzentration im Bad zum Zeitpunkt des Auslesens der Daten (um 18 Uhr) erkennbar. Dieses Absinken ist durch die Öffnung der Badezimmertür und die Bewegung der Bearbeiter im Haus

erklärbar (die Tür zwischen Bad und Flur wurde um etwa 21:20 Uhr durch den Hauseigentümer geöffnet und versehentlich nicht wieder geschlossen). Der dadurch auftretende Luftaustausch zwischen Flur und Bad (Radonquelle) wurde durch sämtliche Messgeräte gut erfasst und dokumentiert. Zeitgleich ist ein deutlicher Anstieg der Radon-Konzentration im Flur gemessen worden. Etwa 2 Stunden nach Öffnen der Tür pendelt sich eine Gleichgewichtskonzentration bei etwa 7.200 Bq/m³ ein. Auch im Arbeitszimmer kommt es nach Öffnung der Badezimmertür zu einem Konzentrationsanstieg der Radon-Konzentration. Um etwa 7:00 Uhr (ca. 17 h nach Messbeginn) wurde die Badezimmertür vom Hauseigentümer wieder geschlossen. Daraufhin ist ein relativ schneller Anstieg der Radonkonzentration im Badezimmer gemessen worden. Zeitgleich ist deutlicher Abfall der Radonkonzentration im Flur und weiterhin ein weniger deutlicher Abfall der Radon-Aktivitätskonzentration im Arbeitszimmer gemessen worden.

In der nächtlichen Ruhephase blieben die Radonkonzentrationen in Bad, Flur und Arbeitszimmer relativ konstant.

Um etwa 8:45 Uhr (ca. 19 h nach Messbeginn) wurden die Messgeräte erneut ausgelesen. Dabei wurden die Türen geöffnet und durch die Bewegungen usw. kam es zu einem Absinken der Radon-Aktivitätskonzentration in allen betrachteten Räumen.

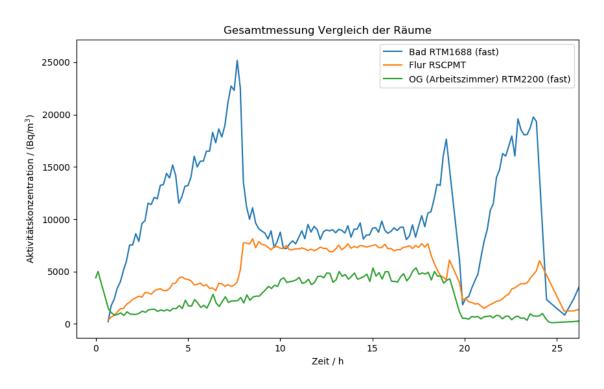


Abb. 3.41 Vergleich der Radon-Aktivitätskonzentration in den verschiedenen Räumen innerhalb der ersten 24 h (Testmessung)

Nach der oben erläuterten Testmessung wurde mit dem Start der Langzeitmessung begonnen. Hinsichtlich der Positionierung der Messgeräte wurden keine Änderungen vorgenommen. Abb. 3.42 zeigt den Vergleich der gemessenen Radon-Aktivitätskonzentration in den verschiedenen Räumen über die gesamte Messdauer.

Folgende allgemeine Schlüsse können gezogen werden:

- Im Badezimmer werden stets die höchsten Radon-Aktivitätskonzentrationen gemessen. Ein Plateau (Gleichgewichtskonzentration) wurde während der Langzeitmessung allerdings nicht erreicht. Maximalwerte lagen bei etwa 45.000 Bq/m³. Bevor ein Plateau erreicht werden konnte, wurde das Haus einschließlich dem Badezimmer vom Hauseigentümer gelüftet.
- Im Flur wurden stets die zweithöchsten Radon-Aktivitätskonzentrationen gemessen.
 Diese korrelierten von ihrem Verlauf mit jenen im Bad, was darauf schließen lässt, dass im Badezimmer die Radonquelle des Hauses liegt.
- Die vergleichsweise niedrigsten Radon-Aktivitätskonzentrationen wurden im Arbeitszimmer (1. OG) gemessen. Auch diese Messwerte korrelierten mit jenen im Bad und Flur, was die These unterstreicht, dass die Radonquelle des Hauses im Bad zu vermuten ist.
- Die hohe Radon-Aktivitätskonzentration von ca. 45.000 Bq/m³ am 28.3.2019 (bis ca. 8:00 Uhr) wurde herbeigeführt, indem ab dem 27.3.19 ab Messbeginn (14:40 Uhr) das Bad weder gelüftet noch betreten wurde. Der starke Abfall der Radon-Konzentration am 28.2.2019 ab 8:40 Uhr (ca. 45 h nach Messbeginn) erklärt sich durch Lüftungsmaßnahmen des Hausbesitzers.
- Der Hausbesitzer schließt gewohnheitsgemäß vor dem Zubettgehen die Fenster und somit lässt sich jede Nacht ein Anstieg der Radon-Konzentration im Haus feststellen.
 Mit dem täglichen morgendlichen Lüften ist dann wieder ein Abfall der Radon-Konzentrationen beobachtbar.

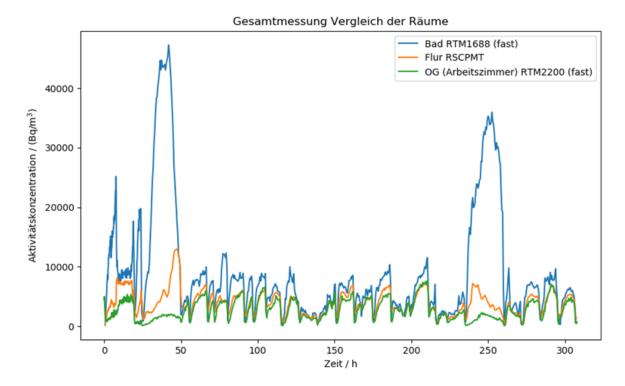


Abb. 3.42 Vergleich der gemessenen Radon-Aktivitätskonzentration in den verschiedenen Räumen über die gesamte Messdauer

3.5.4.2 Messobjekt 1: Auswertung (Winterkampagne)

Die aufgenommen Daten für die Radon-Aktivitätskonzentrationen wurden über die gesamte Messdauer dargestellt (Abb. 3.42). Bei den Geräten mit unterschiedlichen Auswertemodi "slow" und "fast" (RTM), wurde jeweils der "fast"-Modus gewählt, um schnelle Änderungen aufgrund sich öffnender und schließender Türen zu erfassen. Bei den anderen nicht-spektroskopisch arbeitenden Messgeräten entspricht die Erfassung eher dem "slow-mode", da hier nicht zwischen (schnell- und langlebigen) Zerfallsprodukten unterschieden werden kann. Innerhalb des ersten Tages (26.02.) wurden verschiedene Testmessungen mit einem kurzen Messintervall von 10 min. durchgeführt. Am 2. Tag (27.02.) ging die Messung in eine Langzeitmessung über, bei der die Bewohner des Hauses grundsätzlich ihren normalen Tagesablauf durchführten. Das Messintervall betrug hier jeweils 30 min.

Zur Bestimmung der Quellstärke Q_{Rn} ausgehend von (3.7) wurde in erster Näherung die numerische erste Ableitung der Aktivitätskonzentration C_{Rn} gebildet:

$$Q_{\rm Rn}(t) = \frac{C_{\rm Rn}(t + \Delta t) - C_{\rm Rn}(t)}{\Delta t} \tag{3.11}$$

Um zusätzlich eine Glättung der Kurven zu erzielen, wurden 4-fache Zeitschritte (jeweils 4 Messpunkte) verwendet.

Es wird angenommen, dass jeweils in den Anstiegen der Konzentration die größten Steigungen auftreten, so dass die Maximalwerte der ersten Ableitung der Quellstärke entsprechen sollten. Diese Maximalwerte wurden durch einen Peakfinder-Algorithmus identifiziert (Schwelle (Bad): 1.000 Bq/(m³h), Schwelle (Flur): 600 Bq/(m³h), Schwelle (OG): 100 Bq/(m³h), Mindestabstand: 20 Punkte).

Die so ermittelten Quellstärken weisen allerdings eine erhebliche Schwankung auf, was u. U. auf den Einfluss stark schwankender Umgebungsbedingungen (Luftwechselraten L) im ganzen Haus zurückzuführen ist.

Zunächst ist hier die Quellstärke im Bad von Interesse, da hier die Radonquelle im Haus vermutet wird. Tatsächlich zeigen sich hier mit Abstand die höchsten Werte sowohl für die Aktivitätskonzentration als auch für die berechneten Quellstärken.

In Tab. 3.12 sind die in erster Näherung im Bad für den gesamten Messzeitraum bestimmten mittleren Quellstärken für die verschiedenen Messgeräte aufgeführt. Zusätzlich wurde der Zeitraum ab 24 h (also im Bereich der eigentlichen Langzeitmessung nach Abschluss der Testmessungen) gesondert betrachtet.

Tab. 3.12 Übersicht der im Bad bestimmten mittleren Quellstärken für die verschiedenen Messgeräte und unterschiedliche Auswertungszeiträume

Messgerät	Gesamtmessz	eit (310 h)	Langzeitmessung (ab 24 h)		
	Mittlere Quellstärke	Standard- abwei- chung	Mittlere Quellstärke	Standard- abweichung	
	Bq/(m³h)	Bq/(m³h)	Bq/(m³h)	Bq/(m³h)	
RTM1688, SN: 185	2.760	2.080	4.280	2.720	
RSC+, SN: 1467	2.420	1.560	3.480	1.440	

Bestimmung der Luftwechselrate durch CO₂-Messungen

Zur Bestimmung der Luftwechselrate, insbesondere für das Bad, wurde die CO₂-Konzentration im Bad und im angrenzenden Flur während der Messdauer aufgezeichnet (Abb. 3.43). Im Rahmen der Testmessungen wurde das Bad zweimal mit CO₂ beimpft und die Badtür danach geschlossen gehalten.

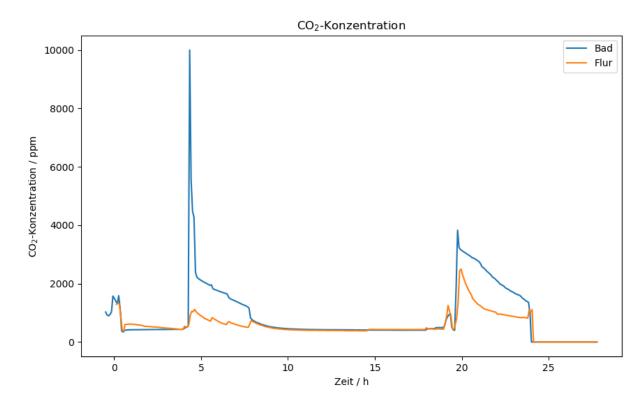


Abb. 3.43 CO₂-Konzentration im Bad und im angrenzenden Flur während der gesamten Messdauer

Der jeweils auf die Beimpfung folgende Abfall der CO_2 -Konzentration im Bad erlaubt die Bestimmung der Luftwechselrate im Bad bei geschlossener Tür. Die Abklingkurve der CO_2 -Konzentration C(t) mit der (Luftwechsel)-Rate L über die Zeit t ausgehend von einer Anfangskonzentration C_0 ist ausgehend von einer Anfangskonzentration C_0 auf die Umgebungskonzentration C_{um} = 400 ppm gegeben durch /LAU 11/:

$$C(t) = (C_0 - C_{um})e^{-L \cdot t} + C_{um}$$
 (3.12)

$$\ln(C(t) - C_{um}) = \ln(C_0 - C_{um}) - L \cdot t \tag{3.13}$$

Man erhält also die Luftwechselrate aus der linearen Regression der logarithmisch aufgetragenen Abklingkurve.

Für die beiden linearen Abschnitte nach der Beimpfung ergeben sich die in Tab. 3.13 angegeben Werte.

Tab. 3.13 Übersicht der durch abschnittsweise lineare Regression bestimmten Luftwechselrate im Bad für die beobachteten linearen Abfälle der logarithmisch aufgetragenen CO₂-Konzentration

Abschnitt	Zeit t ₁ (Start)	Zeit t ₂ (Ende)	Index i ₁ (Start)	Index i ₂ (Ende)	Luftwech- selrate	Unsicherheit (2σ)
	h	h			1/h	1/h
1	5,33	7,83	65	95	0,277	0,015
2	20,25	23,83	244	287	0,263	0,009

Abb. 3.44 und Abb. 3.45 zeigen die linearen Fits der logarithmisch aufgetragenen CO₂-Konzentrationen in diesen Abschnitten.

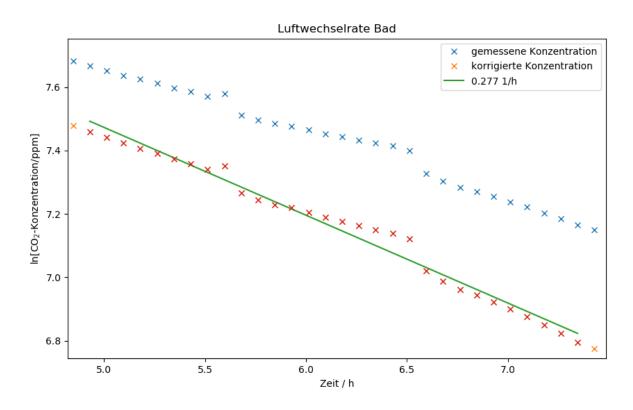


Abb. 3.44 Logarithmisch aufgetragene Abklingkurve der CO₂-Konzentration im Bad sowie der um die Umgebungskonzentration (400 ppm) korrigierten Konzentration nach Beimpfung bei geschlossener Tür (Abschnitt 01)

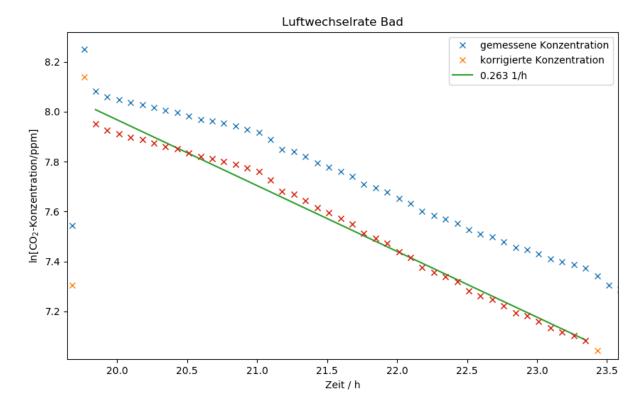


Abb. 3.45 Logarithmisch aufgetragene Abklingkurve der CO₂-Konzentration im Bad sowie der um die Umgebungskonzentration (400 ppm) korrigierten Konzentration nach Beimpfung bei geschlossener Tür (Abschnitt 02)

3.5.4.3 Messobjekt 1: Messergebnisse (Sommerkampagne)

Die aufgenommen Daten für die Radon-Aktivitätskonzentrationen über die gesamte Messdauer sind in Abb. 3.46 dargestellt. Bei den Geräten mit unterschiedlichen Auswertemodi "slow" und "fast" (RTM, EQF), wurde jeweils der "fast"-Modus gewählt, um schnelle Änderungen aufgrund sich öffnender und schließender Türen zu erfassen. Bei den anderen nichtspektroskopisch arbeitenden Messgeräten entspricht die Erfassung eher dem "slow-mode", da hier nicht zwischen (schnell- und langlebigen) Zerfallsprodukten unterschieden wird.

Beim Start der Messung kam es zu einem Übertragungsproblem bei der Einstellung der aktuellen Uhrzeit beim EQF, so dass dieser eine Zeitskala mit fiktivem Datum erzeugte. Da der Start der Messung aller Geräte im Bad aber unmittelbar hintereinander erfolgte, wurde bei der folgenden Auswertung die Zeitskala (insbesondere Startzeitpunkt) des RSC+ im Bad für den EQF übernommen.

Weiterhin zeigte sich, dass der RTM1688 im Aufenthaltsraum nur einen Teil der Messdaten aufzeichnete (29.08. bis 03.09.2019).

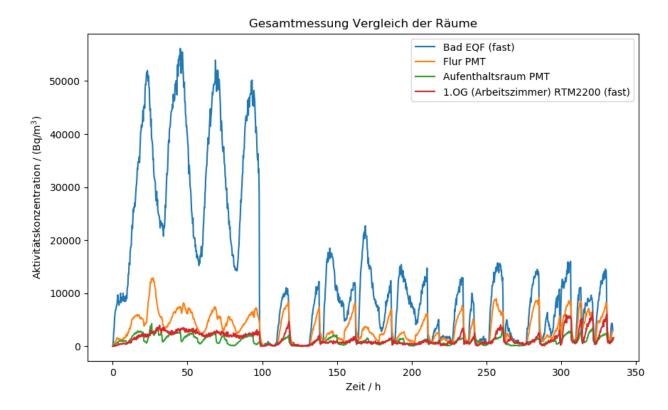


Abb. 3.46 Radon-Aktivitätskonzentration im Bad über die gesamte Messdauer

Die Messungen wurden am 20.08.2019 um 10:54 Uhr (entspricht 0 h) gestartet. Das Messintervall betrug 15 min. Während der ersten halben Stunde wurden alle Räume gelüftet, bevor anschließend die Türen geschlossen wurden und die Bewohner des Hauses grundsätzlich ihren normalen Tagesablauf durchführten.

In den ersten 100 h Stunden wurde ein Versuch durchgeführt bei dem die Badtür stets geschlossen blieb. Man erkennt allerdings trotz dauerhaft geschlossener Badtür jeweils den Tagesgang, d. h. Zunahme der Konzentration bis ca. 9:30 bis 11:00 Uhr mit Spitzenwerten um 50.000 Bq/m³ und dann Absinken der Konzentration auf Werte um 20.000 Bq/m³ bis ca. 22:00 – 22.30 Uhr. Dies könnte eventuell mit dem Luftaustausch im restlichen Haus zusammenhängen, da die Türen und Fenster aufgrund der vorhandenen Bausubstanz nicht vollständig dicht sind.

3.5.4.4 Messobjekt 1: Auswertung (Sommerkampagne)

In einem ersten Schritt wurden die Quellstärken analog zur Winter-Messkampagne aus der numerischen Ableitung der Radon-Aktivitätskonzentration bestimmt.

Zunächst ist hier die Quellstärke im Bad von Interesse, da hier die Radonquelle im Haus vermutet wird. Tatsächlich zeigen sich hier mit Abstand die höchsten Werte sowohl für die Aktivitätskonzentration als auch für die berechneten Quellstärken.

In Tab. 3.14 sind die in erster Näherung im Bad für den gesamten Messzeitraum bestimmten mittleren Quellstärken für die verschiedenen Messgeräte aufgeführt. Zusätzlich wurden die ersten 100 h gesondert betrachtet, da hier die längsten (und damit am sichersten auswertbaren) Anstiege vorliegen bzw. die Umgebungsbedingungen durch die dauerhaft geschlossene Badtür am wenigsten verändert werden. Dies spiegelt sich in den für die ersten 100 h kleineren Standardabweichungen wider.

Tab. 3.14 Übersicht der im Bad bestimmten mittleren Quellstärken für die verschiedenen Messgeräte und unterschiedliche Auswertungszeiträume

	Gesamtmess	zeit (335 h)	Ausschnitt Badtür geschlossen (100 h)		
Messgerät	Mittlere Quell- stärke	Standardab- weichung	Mittlere Quellstärke	Standardab- weichung	
	Bq/m³h	Bq/m³h	Bq/m³h	Bq/m³h	
EQF, SN: 3220	4.900	1.480	5.730	910	
RTM1688, SN: 185	4.920	1.440	5.950	550	
RSC+, SN: 1467	4.160	1.500	5.910	770	

Zur weiteren detaillierteren Analyse des zeitlichen Verlaufs der Quellstärke wurde ein abschnittsweiser linearer Fit gemäß (3.8) durchgeführt. Innerhalb der ersten 120 h Stunden wurden 6 (lineare) Abschnitte identifiziert. Die ersten fünf von ihnen liegen im Bereich der ersten 100 h, in denen die Badtür kontinuierlich geschlossen blieb. Diese Abschnitte und die durch lineare Regression durchgeführten Fits sind in Abb. 3.47 für den EQF im Bad dargestellt.

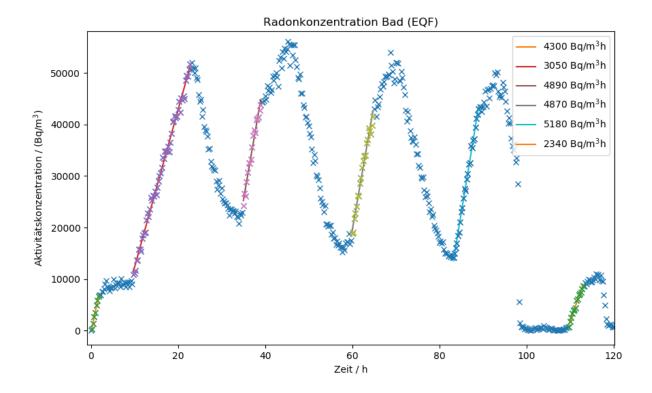


Abb. 3.47 Ausschnitt der ersten 120 h (Badtür bis ca. 100 h Stunden geschlossen) der mittels EQF gemessenen Radonaktivitätskonzentration im Bad mit farbig markierten Abschnitten 1 bis 6 (von links nach rechts) linearen Anstiegs sowie entsprechenden linearen Fits

Die Steigung der Geraden entspricht hierbei der jeweiligen Quellstärke. Diese schwankt über die Zeitdauer des Versuchs. Die Werte sind in Tab. 3.15 zusammengefasst. Im Mittel ergibt sich eine Quellstärke von 4.110 Bg/(m³h) mit einer Standardabweichung von 1.050 Bg/(m³h).

Zum Vergleich mit der Bestimmung der Quellstärke aus den Maxima der numerischen Ableitung werden die Abschnitte 2-5 (in Abb. 3.47) betrachtet, welche den ausgewerteten Peaks für den Ausschnitt "Badtür geschlossen (100 h)" in Tab. 3.14 entsprechen. Man erhält dann einen Mittelwert von 4.500 Bq/(m³h) mit einer Standardabweichung von 850 Bq/(m³h). Die numerische Auswertung ergab für den EQF eine mittlere Quellstärke von 5.730 Bq/(m³h) und eine Standardabweichung von 910 Bq/(m³h).

Tab. 3.15 Übersicht der im Bad durch abschnittsweise lineare Regression bestimmten Quellstärken für die beobachteten linearen Anstiege (Abschnitte 1-6) in den mittels EQF gewonnenen Daten im Bereich bis 120 h

Ab-	Zeit t ₁ (Start)	Zeit t ₂ (Ende)	Index i ₁ (Start)	Index i ₂ (Ende)	Quell- stärke	Unsicherheit (2σ)
schnitt	h	h			Bq/(m³h)	Bq/(m³h)
1	0,25	1,75	1	8	4.300	330
2	9,75	22,75	39	92	3.050	70
3	35,00	39,00	140	157	4.890	390
4	60,00	64,75	240	260	4.870	340
5	83,25	89,00	333	357	5.180	150
6	109,75	113,00	439	453	2.340	170

Die Auswertung wurde in einem weiteren Schritt verfeinert, indem jeweils ein Fit des vollständigen exponentiellen Konzentrationsverlaufs für Konzentrationsanstiege und -abfälle mit den 3 Fitparametern Anfangskonzentration, Quellstärke und Luftwechselrate (gemäß (3.8)) durchgeführt wurde.

Für die Auswertung des vollständigen Kurvenverlaufs der Radonaktivitätskonzentration im Bad wurden anhand der mit dem EQF gewonnen Daten 12 zeitliche Abschnitte bis 120 h definiert (Abb. 3.48).

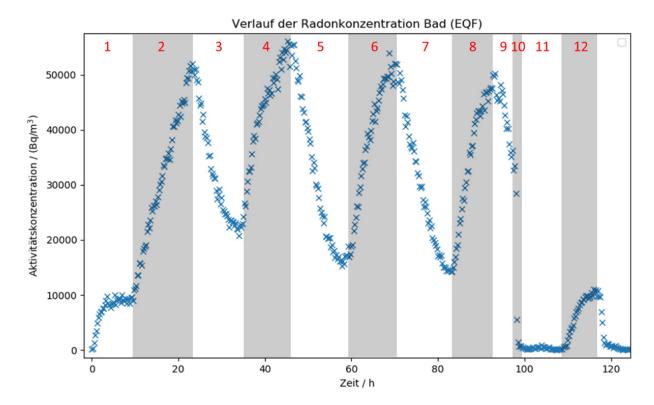


Abb. 3.48 Verlauf der Radon-Aktivitätskonzentration im Bad mit einer Einteilung in 12 Zeitabschnitte

Die Abschnitte 9-11 wurden nicht weiter betrachtet, da hier eine sprunghafte Veränderung der Umgebungsbedingungen (Öffnen der Türen und Lüften) vorgenommen wurde.

Die Fits der anderen Abschnitte mit den gewonnenen Werten für die Fitparameter sind in Abb. 3.49 dargestellt.

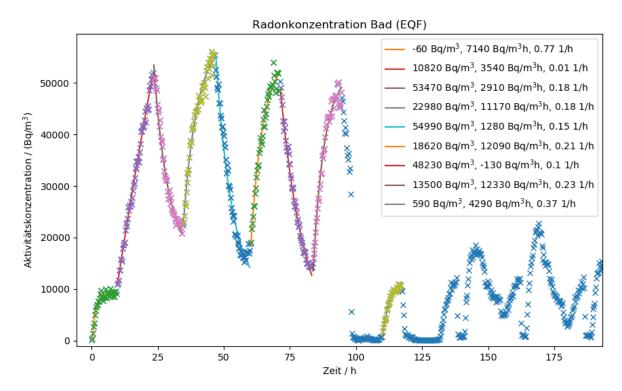


Abb. 3.49 Ergebnisse der Fits (in der Legende: Aktitivätskonzentration, Quellstärke, Luftwechselrate)

Es zeigt sich wieder eine recht große Schwankungsbreite der Quellstärken und der Luftwechselraten zwischen den einzelnen Abschnitten. In den Abschnitten 3 – 8 kann man hierbei eine gewisse Regelmäßigkeit erkennen. Es handelt sich dabei um den Zeitraum (abzüglich einer Anfangsphase nach dem Lüften), in dem alle Türen im Wesentlichen geschlossen blieben und die stabilsten Umweltbedingungen (Randbedingungen) herrschten.

In den Abschnitten, in welchen es zu einem Anstieg der Radon-Aktivitätskonzentration kommt (4,6,8), werden Quellstärken im Bereich von 11.000 - 12.000 Bq/(m³h) erreicht, während in den Bereichen des Konzentrationsabfalls (3,5,7) eher geringe Werte von ca. 0 - 3.000 Bg/(m³h) auftreten.

In den Abschnitten 3-8 liegen zudem auch relativ stabile Luftwechselraten von 0,1-0,23 1/h vor.

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass sowohl die Quellstärke also auch die Luftwechselrate zeitabhängig sind bzw. von weiteren nicht ausreichend definierten Umgebungsbedingungen abhängen. Ebenso wird vermutet, dass die Quellstärke nicht unabhängig von der Luftwechselrate ist, da es im Haus zu Kamineffekten kommen kann.

In Tab. 3.16 sind alle Abschnitte mit den gewonnenen Werten zusammengefasst und den Abschnitten und Werten aus der Auswertung der linearen Anstiege und der CO₂-Messungen gegenübergestellt.

Tab. 3.16 Übersicht der im Bad bestimmten mittleren Quellstärken für die verschiedenen Messgeräte und unterschiedliche Auswertungszeiträume

Grobe Tages- zeit	Grobe Nutzung	Ab- schnitt	Beschrei- bung	t _{start}	t _{ende}	index start	index ende	Quellstärke	Luftwech- selrate	Entsprechen- der Abschnitt des Linearfits	Quellstärke aus Linearfit	Luftwechselrate aus CO ₂ - Messung
				h	h			Bq/(m³h)	1/h		Bq/(m³h)	1/h
tags	Türen geschlossen	1	Anstieg	0,25	9,50	1	38	7.140	0,77	1	4.300	0,180
nachts	Türen geschlossen	2	Anstieg	9,75	23,25	39	93	3.540	0,01	2	3.050	
tags	Türen geschlossen	3	Abfall	23,50	34,50	94	138	2.910	0,18			
nachts	Türen geschlossen	4	Anstieg	34,75	46,75	139	187	11.170	0,18	3	4.890	
tags	Türen geschlossen	5	Abfall	47,00	60,00	188	240	1.280	0,15			
nachts	Türen geschlossen	6	Anstieg	60,25	71,25	241	285	12.090	0,21	4	4.870	
tags	Türen geschlossen	7	Abfall	71,50	83,50	286	334	-130	0,10			
nachts	Türen geschlossen	8	Anstieg	83,75	94,75	335	379	12.330	0,23	5	5.180	
tags	Türen geschlossen	9	Abfall	95,00	97,75	380	391					
tags	Lüften	10	starker Abfall	98,00	98,50	392	394					
tags	Lüften	11	Nullniveau	98,75	109,75	395	439					
nachts	Türen geschlossen	12	Anstieg	110,00	117,25	440	469	4.290	0,37	6	2.340	

Bestimmung der Luftwechselrate durch CO₂-Messungen

Zur Bestimmung der Luftwechselrate, insbesondere für das Bad, wurde die CO₂-Konzentration im Bad und im angrenzenden Flur während der gesamten Messdauer aufgezeichnet (Abb. 3.50).

Zu Beginn der Messreihe wurde das Bad mit CO₂ beimpft und die Badtür geschlossen.

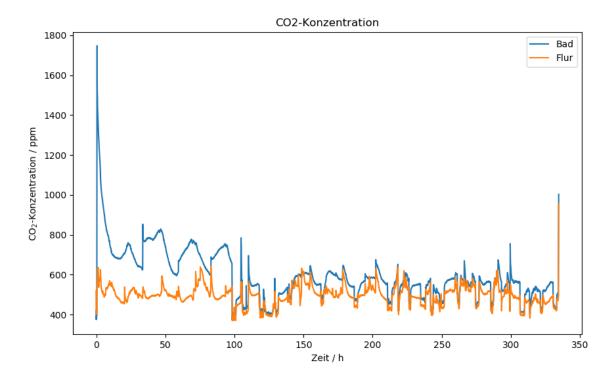


Abb. 3.50 CO₂-Konzentration im Bad und im angrenzenden Flur während der gesamten Messdauer

Der auf die Beimpfung folgende Abfall der CO_2 -Konzentration im Bad erlaubt die Bestimmung der Luftwechselrate im Bad bei geschlossener Tür. Die Abklingkurve der CO_2 -Konzentration C(t) mit der (Luftwechsel)-Rate L über die Zeit t ausgehend von einer Anfangskonzentration C_0 auf die Umgebungskonzentration C_{um} = 400 ppm ist gegeben durch:

$$C(t) = (C_0 - C_{um})e^{-L \cdot t} + C_{um}$$
 (3.14)

$$\ln(C(t) - C_{um}) = \ln(C_0 - C_{um}) - L \cdot t \tag{3.15}$$

Man erhält also die Luftwechselrate aus der linearen Regression der logarithmisch aufgetragenen Abklingkurve.

Bei den im Bad aufgenommenen Messwerten lässt sich dieser lineare Abfall innerhalb der ersten 10 h verfolgen (Abb. 3.51). Ein erster linearer Fit zur Schnellauswertung der Messergebnisse ohne Berücksichtigung der Umgebungskonzentration von CO_2 ergab eine Luftwechselrate von $(0,128 \pm 0,008)$ 1/h bei geschlossener Badtür. Die genauere Auswertung der Messdaten unter Berücksichtigung der Umgebungskonzentration über die ersten 3 h ergibt eine Luftwechselrate von $(0,180 \pm 0,008)$ 1/h.

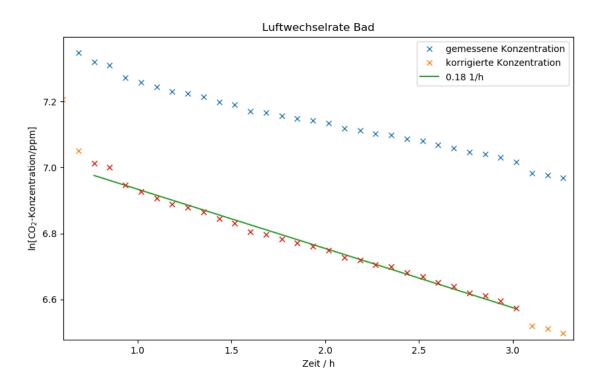


Abb. 3.51 Logarithmisch aufgetragene Abklingkurve der CO₂-Konzentration im Bad sowie der um die Umgebungskonzentration (400 ppm) korrigierten Konzentration innerhalb 3 h nach Beimpfung bei geschlossener Tür

Allerdings ist zu erwarten, dass die Luftwechselrate im Bad über den gesamten Messzeitraum Schwankungen aufgrund der Umgebungsbedingungen im ganzen Haus/der Luftwechselraten im restlichen Hause unterworfen ist. Dies zeigt sich u. a. in den über den gesamten Zeitraum schwankenden CO₂-Konzentrationen in Abb. 3.50. Hierbei lassen sich jeweils Tagesgänge (24 h Zyklen) erkennen. Innerhalb der ersten 100 h Stunden (geschlossene Badtür) liegt der Mittelwert etwas höher als danach, schwankt aber auch innerhalb eines Tagesganges in etwa der gleichen Größenordnung wie im restlichen Zeitraum.

Zur Bereitstellung von Vergleichswerten für die COCOSYS-Rechnungen in Kapitel 3.6.2.4 wurde neben dem Fit für die ersten 3 h eine weitere lineare Regressionen der Messwerte für die Phasen 0,85 – 4,02 und 4,02 – 11,77 h unter Berücksichtigung der normalen Umgebungskonzentration von 400 ppm CO₂ vorgenommen. Da zu Beginn der Messung über die durch das Betreten des Bades geöffnete Tür auch CO₂ in den Flur freigesetzt wurde, ist in einer zusätzlichen Analyse eine "Umgebungskonzentration" von 600 ppm angenommen. Die Ergebnisse sind in Tab. 3.17 aufgelistet. Eine Diskussion dazu erfolgt in 3.6.2.4 im Zusammenhang mit COCOSYS-Nachrechnungen.

Tab. 3.17 Übersicht der für 2 Abschnitte bestimmten Luftwechselrate im Bad auf Basis der gemessenen CO₂-Konzentration

Abschnitt	Zeit t ₁ (Start)	Zeit t ₂ (Ende)	Index i ₁ (Start)	Index i ₂ (Ende)	Luftwech- selrate	Unsicherheit (2σ)				
	h	h			1/h	1/h				
	Umgebungskonzentration CO₂ von 400 ppm									
1	0,85	4,02	13	51	0,183	0,005				
2	4.02	11,77	51	144	0,089	0,002				
	Umgebungskonzentration CO₂ von 600 ppm									
1	0,85	4,02	13	51	0,247	0,007				
2	4.02	11,77	51	144	0,177	0,004				

3.5.4.5 Messobjekt 2: Messergebnisse

Die Messungen in Messobjekt 2 wurden vom 15.02.2020 bis 22.02.2020 durchgeführt. Es war mit dem Eigentümer verabredet, die Messungen in Abwesenheit der Hausbewohner durchzuführen, allerdings wurde dies während der Messungen verworfen und während des Messzeitraums war zumindest eine Person zeitweise im Hause. Die Türen im Hause waren über den Messzeitraum (laut Eigentümer) die meiste Zeit geschlossen.

Die aufgenommenen Daten für die Radon-Aktivitätskonzentrationen sind im Folgenden über die gesamte Messdauer dargestellt. Bei den Geräten mit unterschiedlichen Auswertemodi "slow" und "fast" (RTM, EQF), wurde jeweils der "fast"-Modus für die Auswertung gewählt, um schnelle Änderungen zu erfassen. Die Messintervalle betrugen bei diesen Geräten 30 min. (außer RTM1688, SN: 175, welches weniger Datenspeicher besitzt). Bei den anderen nicht-spektroskopisch arbeitenden Messgeräten entspricht die Erfassung eher dem "slow-mode", da hier nicht zwischen (schnell- und langlebigen) Zerfallsprodukten unterschieden werden kann. Hier wurden Messintervalle von 60 min. gewählt.

Abb. 3.52 zeigt die Messergebnisse der Radon-Aktivitätskonzentrationen im Gewölbekeller. Eine Art Tagesgang der Radon-Aktivitätskonzentrationen ist erkennbar, allerdings liegt kein sich regelmäßig wiederholender Verlauf vor (bspw. sind die Werte unterschiedlich hoch und die zeitlichen Abstände variieren).

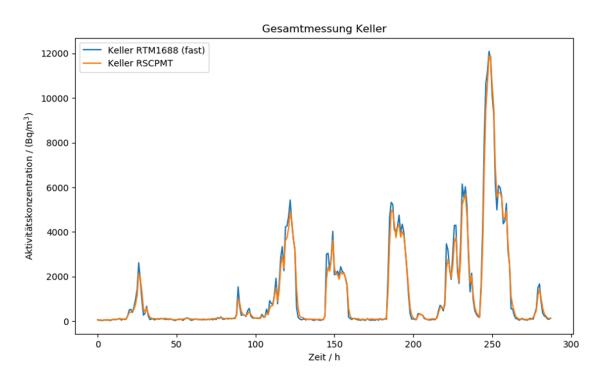


Abb. 3.52 Radon-Aktivitätskonzentration im Gewölbekeller

Abb. 3.53 zeigt die gemessenen Radon-Aktivitätskonzentration im Erdgeschoss (ohne Kinderzimmer und im Bereich der Kellerklappe bzw. im Bereich des Flurs). Es ist erkennbar, dass die Radon-Aktivitätskonzentrationen im Bereich der Kellerklappe und im Flur einen sehr ähnlichen Verlauf haben.

Die erreichten Maximalwerte der Aktivitätskonzentration sind im Keller und im Erdgeschoss (ohne Kinderzimmer) ähnlich und liegen überwiegend zwischen 4.000 und 6.000 Bq/m³. Abgesehen davon verlaufen die "Tagesgänge" im Keller und oberhalb der Kellerklappe sowie dem Flur annähernd synchron.

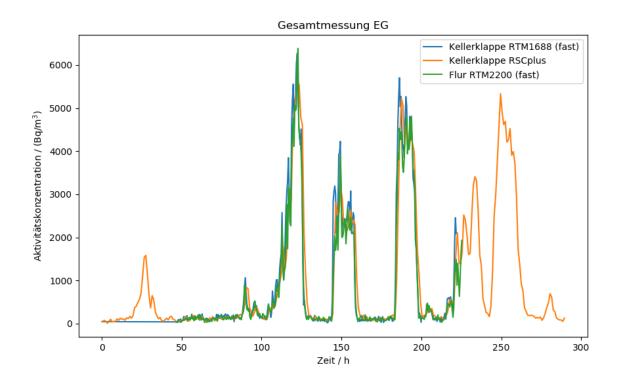


Abb. 3.53 Radon-Aktivitätskonzentration im Erdgeschoss (ohne Kinderzimmer)

Abb. 3.54 zeigt die gemessenen Radon-Aktivitätskonzentrationen im Erdgeschoss im Bereich der Kellerklappe, dem Flur und dem Kinderzimmer. Die hohen Peaks im Kinderzimmer (von ca. 50 h bis 110 h) können nicht plausibel erklärt werden und sind vermutlich Artefakte. Diese Daten werden für Modellrechnungen außer Acht gelassen Im Kinderzimmer werden im Vergleich zum Bereich der Kellerklappe und im Flur geringere Werte gemessen und das Radon scheint mit einem gewissen Zeitverzug in das Kinderzimmer "einzuströmen". Die Maximalwerte liegen hier deutlich niedriger bei ca. 1.200 – 1.400 Bg/m³ und einmalig bei knapp 3.000 Bg/m³.

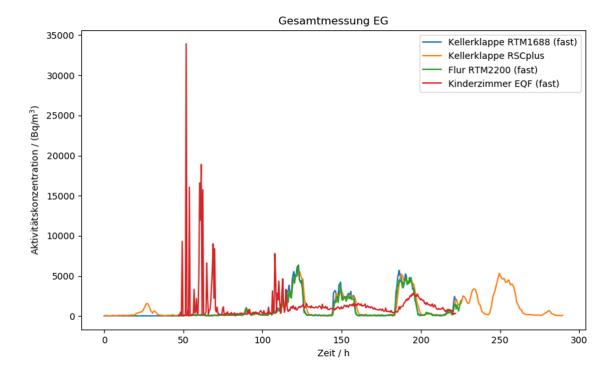


Abb. 3.54 Radon-Aktivitätskonzentration im Erdgeschoss (einschl. Kinderzimmer)

Abb. 3.55 zeigt die gemessenen Radon-Aktivitätskonzentrationen im 1. OG. Auch im 1. OG um zeigen sich verzögerte Verläufe der "Tagesgänge", und es werden ähnliche Werte wie im Kinderzimmer erreicht.

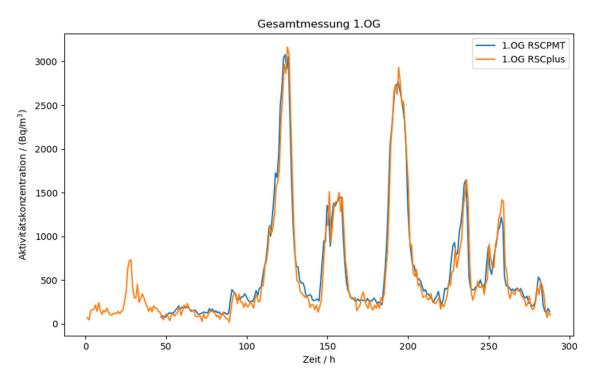


Abb. 3.55 Radon-Aktivitätskonzentration im 1. OG

Abb. 3.56 zeigt eine Übersicht der gemessenen Radon-Aktivitätskonzentrationen in sämtlichen, mit Messgeräten ausgestatteten Räumen. Es ist festzustellen, dass die Maximalwerte der Aktivitätskonzentration im Keller und EG (ohne das Kinderzimmer) keine signifikanten Abweichungen von einander aufweisen und zwischen 4.000 bis 6.000 Bq/m³ liegen (bis auf den Spitzenwert im Keller, der bei 12.000 Bq/m³ liegt). Bezüglich der Messwerte im Kinderzimmer und im 1. OG wurden spätere und langsamere Anstiege und Abfälle festgestellt bzw. vergleichsweise niedrigere Maximalwerte (1.200 bis 1.400 Bq/m³, einmal knapp 3.000 Bq/m³) gemessen.

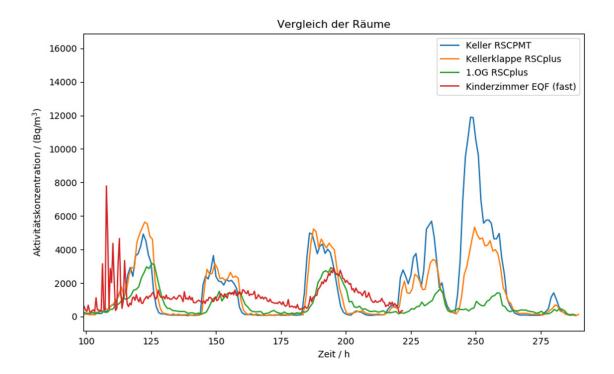


Abb. 3.56 Radon-Aktivitätskonzentration in allen betrachteten Räumen zur Übersicht

Abb. 3.57 zeigt einen Vergleich der gemessenen Tagesgänge der Radon-Aktivitätskonzentration und der CO₂-Konzentration. Zur besseren Übersicht wurden die Daten normiert auf vergleichbare Maximalwerte der Tagesgänge. Es ist ersichtlich, dass die CO₂-Konzentration positiv mit der Radon-Aktivitätskonzentration korreliert. Dies unterstreicht, dass beide Gase (wie erwartet) aus dem Untergrund stammen (im Untergrund sind aufgrund bakterieller Abbauprozesse von organischem Material bzw. in diesem Fall auch durch Löseprozesse des anstehenden kalkhaltigen Gesteins erhöhte CO₂-Konzentrationen in der Bodenluft zu erwarten).

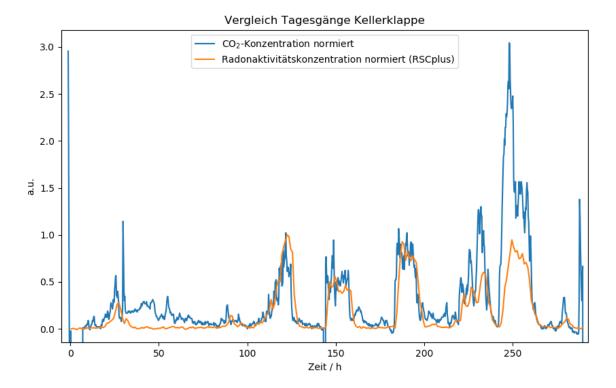


Abb. 3.57 Vergleich der gemessenen Tagesgänge der Radon-Aktivitätskonzentration und der CO₂-Konzentration (jeweils normiert)

3.5.4.6 Messobjekt 2: Auswertung

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Tagesgänge ausgewertet. Abb. 3.58 zeigt den Verlauf der gemessenen Radon-Aktivitätskonzentration im Bereich der Kellerklappe über einen Zeitraum von 220 h. Die Tagesgänge wurden in diesem Falle in sechs Abschnitte unterteilt und die Quellstärken und Luftwechselraten wurden über den (abschnittsweisen) Fit der Konzentration anhand (3.8) ermittelt. Für einige Abschnitte wurden mehrere Fits mit variierenden Anfangs- und Endzeiten durchgeführt. Die entsprechenden Zeiten und die Fitparameter mit ihren Unsicherheiten sind in Tab. 3.18 gegeben.

Die im Bereich der Kellerklappe ermittelten Daten wurden für die weiteren Betrachtungen gewählt, obwohl im Keller die Radonquelle zu vermuten ist. Grund hierfür ist, dass eine größere Anzahl an Messpunkten im Bereich der Kellerklappe aufgenommen wurden und ein ähnlicher Kurvenverlauf der aufgenommenen Rn-Aktivitätskonzentration wie im Keller vorliegt (aufgrund der offenen Verbindung zwischen beiden Räumlichkeiten).

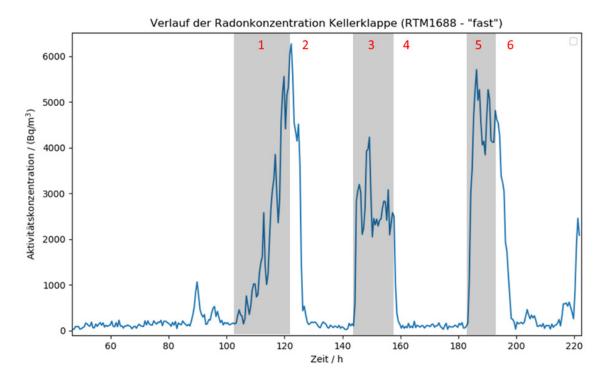


Abb. 3.58 Verlauf der Radon-Aktivitätskonzentration im Bereich der Kellerklappe. Sechs Abschnitte wurden zur weiteren Auswertung unterteilt

Insbesondere im Anstieg des ersten Tagesganges treten negative Werte für die Fitparameter Quellstärke und Luftwechselrate auf. Eventuell ist hier eine Beschreibung des gesamten Abschnittes mit der der oben genannten Formel nicht sinnvoll, da es u. U. noch kurzfristigere Schwankungen/weitere Effekte gibt, welche abschnittsweise gesondert betrachten werden müssten, sich aber mit der Messrate nicht erfassen lassen.

Die Verläufe der beiden anderen Tagesgänge lassen sich dagegen sowohl im Anstieg als auch im Abfall grundsätzlich mit diesem Ansatz beschreiben. Auch hier erkennt man weitere überlagerte kurzfristigen Schwankungen. Daher wurden im Anstieg jeweils zwei verschiedene Varianten mit unterschiedlicher Anzahl an beitragenden Punkten gefittet. In Abb. 3.59 und Abb. 3.60 sind die Fits der Abschnitte 3 und 4 sowie 5 und 6 (siehe auch Abb. 3.58). Die aus den Fits ermittelten Quellstärken und Luftwechselraten sind in der Legende der Darstellung gezeigt. Dieses Vorgehen wurde für die verschiedenen Räumlichkeiten (in denen Messungen stattfanden) durchgeführt.

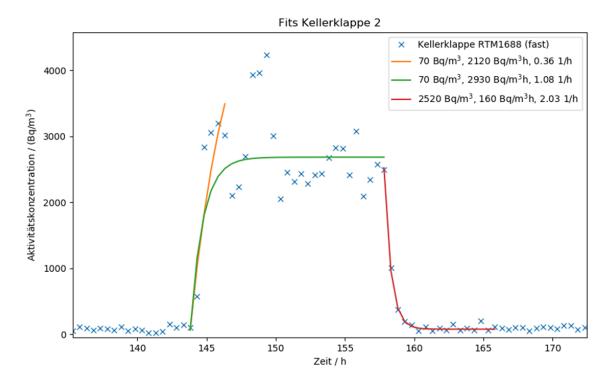


Abb. 3.59 Darstellung der durchgeführten Fitvarianten in den Abschnitten 3 und 4 (Variante 3: orange, Variante 30: grün, Variante 4: rot); die durch die jeweiligen Fits ermittelten Anfangskonzentrationen, Quellstärken und Luftwechselraten sind in der Bildlegende gezeigt

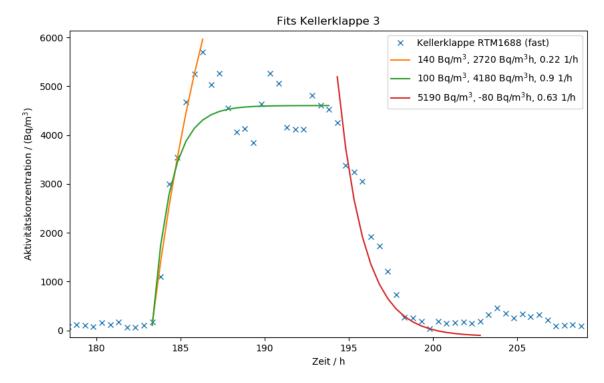


Abb. 3.60 Darstellung der durchgeführten Fitvarianten in den Abschnitten 5 und 6 (Variante 5: orange, Variante 50: grün, Variante 6: rot); die durch die jeweiligen Fits ermittelten Anfangskonzentrationen, Quellstärken und Luftwechselraten sind in der Bildlegende gezeigt

Bei Varianten (3) und (5) der Anstiege, welche kurzfristigeren Schwankungen Rechnung tragen, ergeben sich etwas geringere Quellstärken, aber vor allem auch geringere Luftwechselraten, so dass diese zu deutlich höheren Steady-State-Konzentrationen führen würden. Diese werden allerdings im Verlauf der "Tagesgänge" nicht erreicht.

Die Varianten (30) und (50) beziehen alle Punkte bis zum Abfall mit ein, entsprechen also einer im Verlauf des Tagesganges erreichten mittleren Steady-State-Konzentration. Entsprechend sind die Luftwechselraten bei dieser Variante deutlich höher.

Im Abfall (4, 6) sinken die Quellstärken jeweils auf Werte um Null.

Insgesamt ist zu beachten, dass die Unsicherheiten in den Fitparametern jeweils relativ groß sind. Dies liegt an der vergleichsweise geringen Anzahl an Messpunkten in den schnellen Anstiegen und Abfällen. zeigt die Ergebnisse der Fits basierend auf den Messergebnissen an der Kellerklappe.

 Tab. 3.18
 Ergebnisse der Fits für die Position Kellerklappe für die Abschnitte 1 bis 6 und verschiedene Fitvarianten

Abschnitt	Fitvari- ante	Beschreibung	tstart	tende	index start	index ende	Quellstärke	Luftwechselrate	Unsicherheit Quellstärke	Unsicherheit Luftwechsel- rate	Steady-State-Kon- zentration (t→∞)
			h	h			Bq/(m³h)	1/h	Bq/(m³h)	1/h	Bq/m³
1	1	Anstieg	103,32	122,32	115	153	40	-0,15	30	0,02	-
2	2	Abfall	122,32	128,32	153	165	-400	0,30	190	0,12	-
2	20	Abfall	122,32	132,32	153	173	-10	0,52	60	0,08	-
2	21	Abfall	122,32	125,32	153	159	3690	0,96	2230	0,49	3.814
2	22	Abfall	125,32	128,32	159	165	370	2,09	170	0,37	176
3	3	Anstieg	143,82	146,32	196	201	2120	0,36	1120	0,61	5.767
3	30	Anstieg	143,82	157,82	196	224	2930	1,08	850	0,34	2.694
4	4	Abfall	157,82	165,82	224	240	160	2,03	30	0,19	79
5	5	Anstieg	183,32	186,32	275	281	2720	0,22	450	0,16	11.951
5	50	Anstieg	183,32	193,82	275	296	4180	0,90	700	0,17	4.606
6	6	Abfall	194,32	202,82	297	314	-80	0,63	50	0,13	→ 0

3.5.4.7 Messobjekt 3: Messergebnisse

Während der Messungen im Wasserwerk wurde der Spülbetrieb der Filter wie üblich aufrechterhalten. An den beiden im Messzeitraum enthaltenen Wochenenden (25.-27.10.2019 und 01.-03.11.2019) wurde jeweils die Lüftung abgeschaltet.

Bei den Geräten mit unterschiedlichen Auswertemodi "slow" und "fast" (RTM, EQF), wurde jeweils der "fast"-Modus gewählt, um schnelle Änderungen aufgrund der Filterspülungen erfassen zu können. Bei den anderen nicht-spektroskopisch arbeitenden Messgeräten entspricht die Erfassung eher dem "slow-mode", da hier nicht zwischen (schnell- und langlebigen) Zerfallsprodukten unterschieden werden kann.

Die Vergleiche der Messdaten verschiedener Geräte und Stationen wurde entsprechend der in Tab. 3.19 angegebenen Auswertemodi durchgeführt.

Tab. 3.19 Übersicht der gezeigten Vergleiche der Messdaten

Vergleich	Auswertemodus	Geräte	Messstationen
01	"fast"	EQF3220, SN: 24,	2, 4, 6 (Halle)
(Abb. 3.61)		RTM2200, SN: 187,	
		RTM1688, SN: 185	
02	"slow"	RSC-PMT, SN:	2, 3, 5, 6 (Halle)
(Abb. 3.62)		546, RSC+, SN:	
		1467, RSC+, SN:	
		1464, RSC-PMT,	
		SN: 1157	
03	"fast"	RTM1688, SN: 175,	1 (Abstellraum)
(Abb. 3.63)		RTM1688, SN: 278	
((Wasserwerk)	
04	"fast"	RTM1688, SN: 185,	1, 2 (Vergleich Ab-
(Abb. 3.64)		RTM1688, SN: 278	stellraum und
((Wasserwerk)	Halle)

Die aufgenommenen Daten für die Radon-Aktivitätskonzentrationen sind in Abb. 3.61 bis Abb. 3.64 jeweils für die gesamte Messdauer dargestellt. Bei den Geräten mit unterschiedlichen Auswertemodi "slow" und "fast" (RTM, EQF), wurde jeweils der "fast"-Modus gewählt, um schnelle Änderungen aufgrund der Filterspülungen erfassen zu können. Bei den anderen nicht-spektroskopisch arbeitenden Messgeräten entspricht die Erfassung eher dem "slow-mode", da hier nicht zwischen (schnell- und langlebigen) Zerfallsprodukten unterschieden werden kann.

Im Gesamtverlauf der Aktivitätskonzentrationen treten vor allem bei abgeschalteter Lüftung (hier jeweils an den Wochenenden) sehr hohe Werte um 10.000 Bq/m³ in der Halle auf. In diesen Zeiträumen lassen sich auch Tagesgänge der Radonkonzentration beobachten. Direkte kurzzeitige Einflüsse der Spülungen sind nicht offensichtlich. Während der Lüftungsperiode (unter der Woche) stellt sich eine Aktivitätskonzentration im Bereich von ca. 1.000 – 2.500 Bq/m³ in der Halle und bis ca. 400 Bq/m³ im angrenzenden Raum ein.

Es zeigten sich zudem keine signifikanten Unterschiede in den zeitlichen Verläufen der Kurven zwischen den in der Halle verteilten Messstationen.

Die in den Messdaten des EQF beobachteten "Peaks" (Abb. 3.61) sind wahrscheinlich Artefakte und traten auch bei anderen Messkampagnen auf.

Beim RSC-PMT, SN: 1157 wurde die Pumpe nach dem ersten Wochenende abgeschaltet. Folglich zeigt sich hier am zweiten Wochenende ein langsamerer Anstieg der Radon-Aktivitätskonzentration (Abb. 3.62).

Im Nebenraum der Halle ("Abstellraum") stieg die Konzentration am ersten Wochenende auf Maximalwerte um 3.500 Bq/m³ (Abb. 3.63). Im Vergleich zur Halle findet der Anstieg nach Abschalten der Lüftung hier zeitlich verzögert und langsamer statt. Tägliche Schwankungen zeichnen sich ebenfalls weniger deutlich ab.

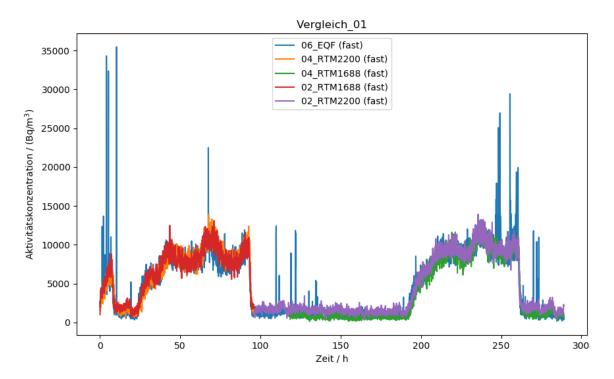


Abb. 3.61 Vergleich 01: Radon-Aktivitätskonzentration in der Halle über die gesamte Messdauer (Vergleich der Geräte mit "fast"-Modus)

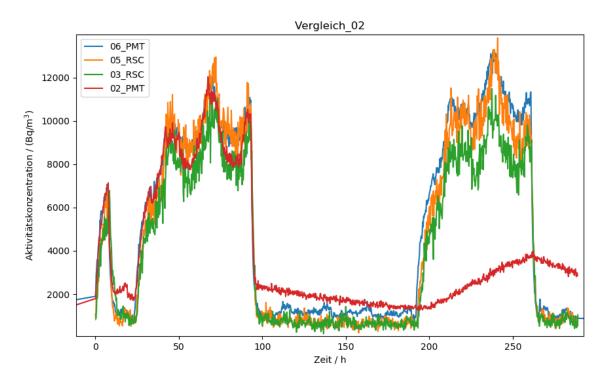


Abb. 3.62 Vergleich 02: Radon-Aktivitätskonzentration in der Halle über die gesamte Messdauer (Vergleich der Geräte, welche nur im "slow"-Modus arbeiten)

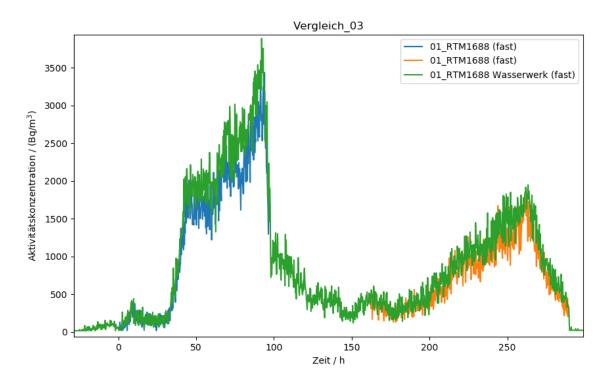


Abb. 3.63 Vergleich 03: Radon-Aktivitätskonzentration im "Abstellraum" über die gesamte Messdauer (Vergleich der Geräte mit "fast"-Modus)

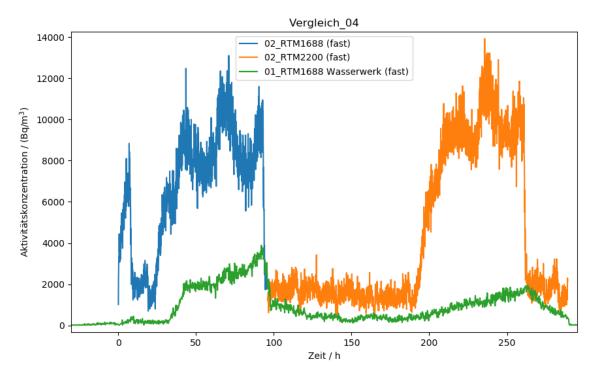


Abb. 3.64 Vergleich 04: Radon-Aktivitätskonzentration in der Halle und im angrenzenden "Abstellraum" über die gesamte Messdauer

3.5.4.8 Messobjekt 3: Auswertung

Für die beiden Hauptanstiege der Rn-Aktivitätskonzentration in der Filterhalle, welche jeweils bei Abschaltung der Lüftung zu Beginn der Wochenenden auftraten, konnte ein exponentieller Fit gemäß (3.8) mit den drei Fitparametern Anfangskonzentration, Quellstärke und Luftwechselrate durchgeführt werden. Da sich die Kurvenverläufe als unabhängig von der Position in der Halle erwiesen, wurden hierfür beispielhaft die Messdaten des EQF ("fast mode", Messintervall: 5 min.) an Messstation 06 ausgewählt.

Abb. 3.65 zeigt zwei Varianten des Fits, die sich durch die Anzahl der betrachteten Messpunkte unterscheiden.

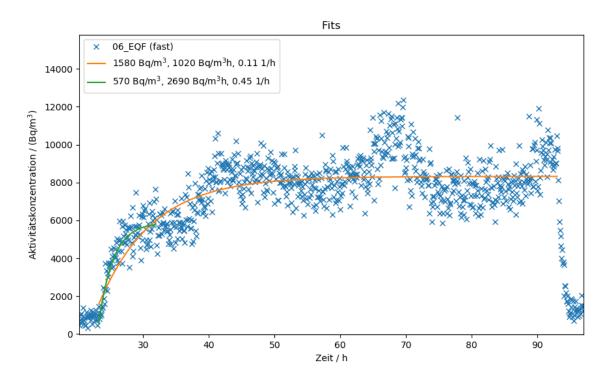


Abb. 3.65 Ausschnitt der mit dem EQF gewonnenen Daten (Filterhalle, Messstation 6) für das erste Wochenende (ausgeschaltete Lüftung); zwei Fitvarianten des exponentiellen Anstieges sind mit den Fitparametern Anfangskonzentration, Quellstärke und Luftwechselrate farbig dargestellt

Die erste Fitvariante (Abb. 3.65, orange Kurve) umfasst alle Messpunkte des Zeitraums mit abgeschalteter Lüftung (gesamtes Wochenende) und stellt somit eine Mittelung über die überlagerten Tageschwankungen dar. Man erhält hierbei eine Quellstärke von 1.020 Bq/(m³h) und eine Luftwechselrate von 0,11 1/h.

Betrachtet man dagegen einen kürzeren Abschnitt von wenigen Stunden nach dem Abschalten der Lüftung (Abb. 3.65, grüne Kurve), welcher einem ersten Anstieg bis zu einem ersten Plateau entspricht, erhält man deutlich höhere Quellstärken (2.690 Bq/(m³h)) und Luftwechselraten (0,45 1/h). Diese Werte spiegeln eher kurzfristige tägliche Schwankungen wider.

3.6 AP 4: COCOSYS-Validierung anhand erhobener Messwerte

In den folgenden Kapiteln sind die durchgeführten Arbeiten zur Validierung von COCOSYS für die Simulation von Rn-222-Verteilungsvorgängen und deren Ergebnisse dokumentiert. Als Vergleichsbasis dienten dabei im Internet verfügbare Daten zur stationären Radon-Aktivitätskonzentration sowie von der GRS im Rahmen des Vorhabens neu aufgenommene Messreihen zu zwei Objekten (Einfamilienhäuser in Dresden-Freital/Sachsen). Die im Wasserwerk aufgenommenen Messdaten wurden in diesem Zusammenhang aus Zeitgründen nicht weiter betrachtet.

3.6.1 Variantenrechnungen zu Daten vom Sachverständigenbüro Haumann

Im AP 1.3, Kapitel 3.3.2, sind auf Basis von Daten vom Sachverständigenbüro Haumann (Blower-Door-Messungen mit 50 Pa Unterdruck in 6 Objekten) Ergebnisse des generischen Modells zur stationären Rn-222 - Konzentration mit COCOSYS-Resultaten verglichen.

Aus den Messdaten bei 50 Pa, die jeweils im Sommer und Winter erhoben wurden, sind in /HAU 17/ darüber hinaus abgeleitete Jahresmittelwerte angegeben. Aus diesen wurden dann von Haumann durch Interpolation Jahresmittelwerte für 4 Pa Unterdruck bestimmt, d. h. für realistische Druckverhältnisse bei normaler Nutzung von Arbeitsräumen. Für diesen Druck ist auch der Referenzwert der Rn-222-Aktivitätskonzentration in der Luft an Arbeitsplätzen von 300 Bq/m³ definiert, bei dessen Überschreitung Maßnahmen zu ergreifen sind. Bei der Interpolation hat Haumann vorausgesetzt, dass sowohl die Luftwechselzahlen als auch die Rn-222-Quellstärken zwischen 50 und 0 Pa Unterdruck eine lineare Anhängigkeit aufweisen.

Um zu überprüfen, ob COCOSYS auch für diese Bedingungen korrekte Ergebnisse liefert, wurden in Ergänzung zu den Nachrechnungen in AP 1.3 für Objekt 2 auch die 2 Fälle "Jahresmittel" und "Jahresmittel 4 Pa" nachgerechnet. Die COCOSYS-Ergebnisse zur stationären Rn-222-Aktivitätskonzentration sind in Tab. 3.20 im Vergleich zu den Haumann-Daten aufgelistet. Wie die Tabelle zeigt, stimmen auch für diese Bedingungen beide Ergebnisse gut überein.

Tab. 3.20 Vergleich der berechneten stationären Radon-Aktivitätskonzentration in Objekt 2 für verschiedene Bedingungen

Variante	Luftwechselzahl (bei Unterdruck dp in Pa) [1/h]	Quell- stärke [Bq/(m³h)]	Haumann Rn-Kon- zentration [Bq/m³]	COCOSYS Rn-Kon- zentration [Bq/m³]
Sommer (siehe Tab. 3.5)	16,4 (50)	9.800	600	597,5
Jahresmittel	14,6 (50)	8.100	555	554,8
Jahresmittel 4 Pa	1,17 (4)	648	554	553,8

Der Zeitverlauf der Rn-222-Aktivitätskonzentration ist in Abb. 3.66 dargestellt. Im Vergleich zur "Sommer"-Messung ist in Variante "Jahresmittel" die Luftwechselzahl um 11% kleiner, wodurch die stationäre Konzentration ansteigen muss. Da aber zugleich die Quellstärke um 17% geringer ist (was zu einer geringeren Konzentration führt), ist die sich letztendlich einstellende Konzentration geringer als in Variante "Sommer".

Da beide Luftwechselzahlen und Quellstärken nicht wesentlich unterschiedlich sind, wird die stationäre Konzentration jeweils nach etwa 2.000 s erreicht.

In Variante "Jahresmittel 4 Pa" mit geringerer Luftwechselzahl und Quellstärke stellt sich die stationäre Rn-222 Aktivitätskonzentration erst viel später nach ca. 20.000 s ein. Da aber sowohl die Luftwechselzahl als auch die Quellstärke linear interpoliert sind (d. h. ihr Verhältnis zueinander ist gleich groß wie in "Jahresmittel"), ist der Wert der stationären Rn-Konzentration gleich.

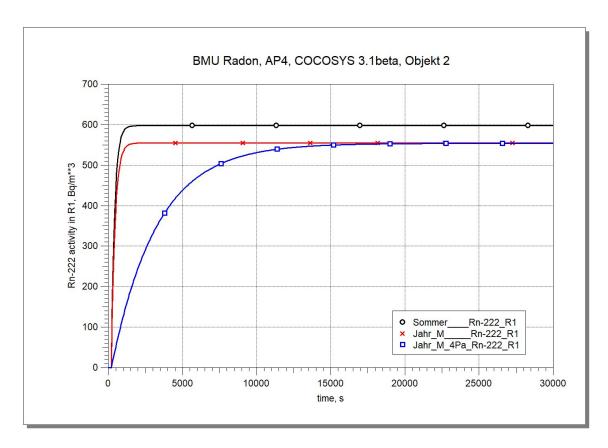


Abb. 3.66 COCOSYS, Nachrechnung Objekt 2, Zeitverlauf der berechneten Rn-222 Aktivitätskonzentration in Zone R1 für die drei Varianten laut Tab. 3.20

Wie oben bereits gesagt, wurde von Haumann vorausgesetzt, dass im Druckbereich 50 bis 0 Pa sowohl die Luftwechselzahlen als auch die Rn-222-Quellstärken eine lineare Anhängigkeit aufweisen. Dies ist sowohl für die Luftwechselzahl als auch für die Quellstärke anzuzweifeln.

Deshalb wurde COCOSYS verwendet, um zu prüfen, ob mit Hilfe von Variantenrechnungen Aussagen zur Haumann-Annahme der Linearität getroffen werden können. Da die Quellstärke für COCOSYS ein klare Eingangsgröße ist, wurde die Quellstärke nicht verändert und die Untersuchungen konzentrierten sich auf die Luftwechselzahl. Tab. 3.21 gibt einen Überblick über die Rechnungen, wobei hier nur die relevanten Varianten enthalten sind.

Die Varianten 1: "Sommer_3Z-Model", 2: "Mittel_3Z-Model" und 4: "Mittel_3Z-Model_4Pa" sind die bereits oben gezeigten Rechnungen, die hier als Basis für die Untersuchungen dienten. In der Variante 3: "Mittel_3Z-Model_05" wurde die Modellierung des Unterdruckes geändert, sodass anstatt des Zuluft-Ventilationssystems FAN-I die Atmosphärenverbindung ANSAUG die Summe der Undichtheiten des Objektes 2 abbildet.

Deren Querschnittsfläche (bei angenommener Verbindungslänge und Strömungsverlustbeiwerten) wurde solange verändert, bis sich exakt ein Unterdruck von 50 Pa in Raum R1 ergab. Dies war der Fall bei einer Fläche der "ANSAUG"-Verbindung von 0,085 m². Nun wurde diese Fläche in Variante 5 für die von Haumann für 4 Pa Unterduck interpolierte Randbedingung der Luftwechselzahl von 1,17 h⁻¹ verwendet. Dabei zeigte sich, dass dann aber von COCOSYS nur ein Unterdruck von 0,3 Pa berechnet wird. Um diesen Unterdruck von 4 Pa zu erreichen, muss die Luftwechselzahl auf 4,13 h⁻¹ erhöht werden, d. h. etwa vervierfacht (Variante 8). Dabei würde dann aber die stationäre Rn-222-Aktivitätskonzentration von 553,8 auf 157 Bq/m³ sinken. Um bei der Luftwechselzahl von 1,17 h⁻¹ einen Unterdruck von 4 Pa zu erhalten, muss die Summe der Undichtheiten (Leckfläche) auf 0,024 m² (ca. ¼) verringert werden.

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass COCOSYS hier keine wirklich neue Information liefern kann. Als wahrscheinlichste Ursache wird angenommen, dass die Leckfläche stark vom Unterdruck abhängt, d. h. sich bei größerem Unterduck die Spalten zwischen Tür und Türrahmen oder Fenstern signifikant vergrößern oder zusätzliche Undichtigkeiten erst bei höheren Unterdrücken wirksam werden. In COCOSYS ist im Normallfall die Fläche der Verbindung unabhängig vom anliegenden Differenzdruck. Die für die Simulation einer differenzdruckabhängigen Fläche notwendige Charakteristik ist für Objekt 2 nicht bekannt.

Letztendlich verbleibt damit nur die Möglichkeit, Luftwechselzahl und Quellstärke direkt bei 4 Pa Unterdruck zu messen. Die Annahme der Linearität von Haumann wird nicht bestätigt.

102

Tab. 3.21 Variantenrechnungen zu Objekt 2, Jahres-Mittelwerte, $50 \rightarrow 4$ Pa Unterdruck, 3 Zonen-Datensatz, 0 - 30.000 s

Varinate/ Datensatz	Luftw.zahl von R1 [1/h]	Quellstärke [Bq/(m³h)]	Unterdruck in R1 [Pa]	Luft- Ansaugung	berechn. Rn-222 Konzentration [Bq/m³]	Kommentar
1 Sommer_3Z-Model	16,4	9.800	50	FAN-I	597,5	Basisvariante – Objekt 2 Sommer, wie in AP 1.3 verwendet
2 Mittel_ 3Z-Model	14,6	8.100	50	FAN-I	554,8	Jahresmittelwert Objekt 2, bei 50 Pa
3 Mittel_3Z-Model_05	14,6	8.100	- (berechnet 50 Pa)	ANSAUG 0,08493 m³	553,8	Lüftung FAN-I durch ATMOS_JUN "ANSAUG" ersetzt (I = 0,3m Zeta = 3.0) → Unterdruck 50 Pa
4 Mittel_3Z-Model_ 4Pa	1,17	648	4	FAN-I	553,8	Jahresmittelwert Objekt 2, bei 4 Pa
5 Mittel_3Z-Model_4Pa_05	1,17	648	- (berechnet 0,32 Pa)	ANSAUG 0,08493 m³	553,8	→ Unterdruck 0,32 Pa
6 Mittel_3Z-Model_4Pa_06	2,34	648	- (berechnet)	ANSAUG 0,08493 m³	276,9	→ Unterdruck 1,28 Pa
7 Mittel_3Z-Model_4Pa_07	4,68	648	- (berechnet)	ANSAUG 0,08493 m³	138,4	→ Unterdruck 5,14 Pa
8 Mittel_3Z-Model_4Pa_08	4,128	648	- (berechnet)	ANSAUG 0,08493 m³	157	→ Unterdruck 4 Pa
9 Mittel_3Z-Model_4Pa_09	4,128	648	- (berechnet)	ANSAUG 0,04246 m³	157	→ Unterdruck 16,06 Pa
10 Mittel_3Z-Model_4Pa_10	1,17	648	- (berechnet)	ANSAUG 0,02415 m ³	553,8	→ Unterdruck 4 Pa

3.6.2 COCOSYS-Nachrechnungen für das EFH Dresden-Freital

Wie in den Kapiteln oben beschrieben, konnte die Anwendbarkeit des COCOSYS-Codes für die Berechnung der Radon-Aktivitätskonzentration gezeigt werden. Mit der für Rn-Ausbreitungsanalysen adaptierten Codeversion wurden Variantenrechnungen unter Verwendung der im EFH Dresden-Freital im August 2019 aufgenommenen und bearbeiteten Messdaten durchgeführt. Es handelt sich hierbei um sogenannte "offene Nachrechnungen", d. h. um eine Codevalidierung anhand offengelegter Versuchsdaten.

Ziel der Nachrechnungen war es, bei vorgegebener Quellstärke (Bq/(m³h)) und Radon-Anfangsaktivitätskonzentration (Bq/m³) die gemessenen Werte der Rn-Aktivitätskonzentration und deren zeitlichen Verlauf in den Büroräumen des EFH nachzuvollziehen.

Die erste Variantenrechnung zur Radon-Aktivitätskonzentration war auf den Raum mit der höchsten gemessenen Radon-Aktivitätskonzentration, das Badezimmer des EFH, fokussiert. Im nächsten Schritt wurde das COCOSYS Eingabemodell um den Flur erweitert.

Anhand der gemessenen CO₂-Konzentration im Bad wurden Nachrechnungen mit verschiedenen Luftwechselzahlen durchgeführt und diese der ermittelten LWZ aus der Radon-Messung gegenübergestellt.

Darüber hinaus wurden mit COCOSYS unter Nutzung des 1-Zonenmodells für das Bad im EFH separate Untersuchungen zum Einfluss der Gasdiffusion auf die Radon-Aktivitätskonzentration durchgeführt.

3.6.2.1 Kurzbeschreibung der COCOSYS-Datensätze zum EFH

Auf der Grundlage der für das EFH übergebenen Zeichnungen (z. B. Abb. 3.67) und (während der Versuche aufgenommener) Fotos wurden die für die COCOSYS-Datensätze erforderlichen Geometriedaten wie Volumina, Raumhöhen, Bodenflächen und Flächen von Überströmöffnungen bestimmt.

Für die Nachrechnungen der Rn-Konzentration im Badezimmer kam anfangs ein 1-Zonen-Modell, später ein 3-Zonen-Modell zum Einsatz. Abb. 3.68 zeigt die Nodalisation des 3-Zonen-Modells. R1 ist die Zonenbezeichnung für das Badezimmer, dem Hauptfreisetzungsort von Radon im Einfamilienhaus. ENVIR-I und ENVIR-O modellieren zwei Umgebungszonen. Wie schon im Datensatz für die Nachrechnungen der Blower-Door-Versuche im Kapitel 3.2 wurde die aus den Messdaten berechnete Luftwechselzahl (LWZ) über die Lüftungssysteme FAN-I und FAN-O simuliert. Die Start- und Randbedingungen wurden den gemessenen Parametern entsprechend gesetzt. Die Eingabedaten zu Quellstärken und Luftwechselzahlen sind Ergebnisse (Fits) aus der Auswertung der Messwerte, die im Kapitel 3.5.4 beschrieben ist.

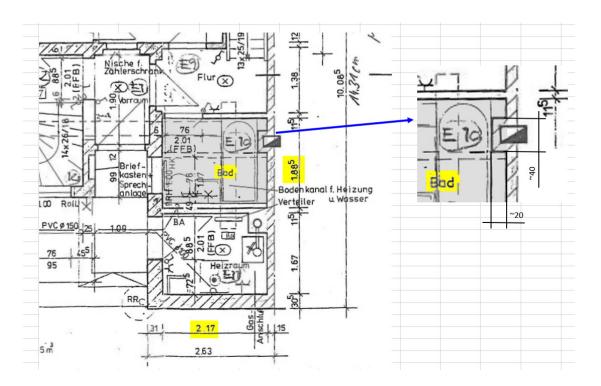


Abb. 3.67 EFH Dresden-Freital, Ausschnitte aus dem Grundriss des Erdgeschosses

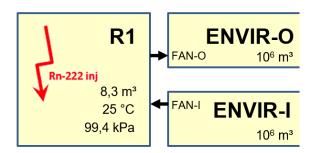


Abb. 3.68 COCOSYS, Nachrechnung EFH Dresden-Freital, 3-Zonen-Modell

In den **Nachrechnungen der Rn-Konzentration im Flur** (und Bad) wurde ein 4-Zonen-Modell (Abb. 3.69) verwendet, dass im Verlaufe der Untersuchungen stufenweise modifiziert wurde. Diese Modifikationen sind im Kapitel 3.6.2.3 beschrieben. R1 ist die Zonenbezeichnung für das Badezimmer, R2 für den Flur. Die aus den Messdaten berechneten bzw. angenommenen Luftwechselzahlen für Flur und Bad wurden über verschiedene Lüftungssysteme simuliert. Einzelheiten dazu werden ebenfalls im Kapitel 3.6.2.3 gegeben.

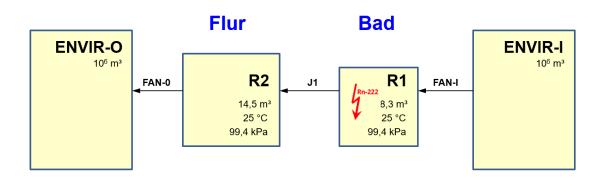


Abb. 3.69 COCOSYS, Nachrechnung EFH Dresden-Freital, 4-Zonen-Modell

In den Nachrechnungen der Rn-Aktivitätskonzentration war der in Abb. 3.70 grau/gelb markierte 24-Stunden-Gang zunächst im Badezimmer und später im Flur des EFH Gegenstand der Untersuchungen. Der grau markierte Bereich ist durch eine hohe Anfangsaktivitätskonzentration von 10.000 Bq/m³ im Bad sowie einen stetigen Anstieg der hier gemessenen Konzentration gekennzeichnet. Dieser Verlauf ist darauf zurückzuführen, dass in den 12 ersten betrachteten Stunden Fenster und Tür des Bades geschlossen waren. Im Gegensatz dazu fällt im gelb markierten Bereich die Aktivitätskonzentration. In diesem Intervall wurden gemäß /GTL 19/ neben den protokollierten zwei Kontrollgängen die Türen im gesamten Gebäude häufig betätigt.

Im Flur beträgt zu Beginn der Untersuchung die Rn-Aktivitätskonzentration 2.000 Bq/m³. Der unstetige Verlauf der Konzentration innerhalb der ersten betrachteten 12 Stunden (siehe orangene Kurve in Abb. 3.70) wird im Kapitel 3.6.2.3 diskutiert. Anstieg und Abfall der Konzentration im Flur im nachfolgenden Zeitbereich sind auf das Begehen der Räume zurückzuführen. Einzelheiten hierzu sind leider nicht bekannt, sodass für die Luftwechselzahl des Flurs Annahmen getroffen werden mussten.

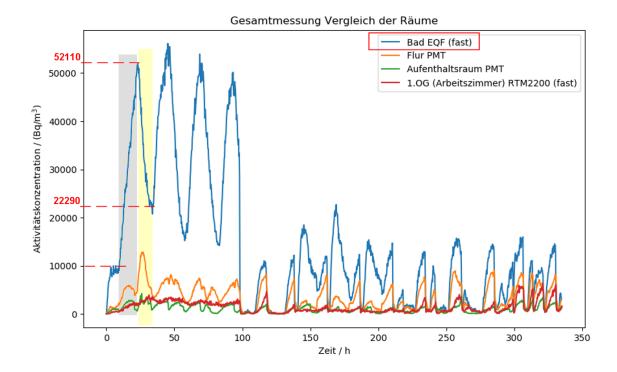


Abb. 3.70 EFH Dresden-Freital, Sommer 2019, gemessene Rn-Aktivitätskonzentration

3.6.2.2 Nachrechnung der Rn-222 – Aktivitätskonzentration im Bad für einen 24-Stunden-Gang

Im Rahmen dieser Nachrechnungen sind insgesamt 22 Rechnungen mit dem COCOSYS-Code durchgeführt worden. Einen Überblick zu diesen Rechnungen gibt Tab. 3.22. Einen wesentlichen Eingabeparameter stellt die aus den Messdaten gefittete Rn-222-Quellstärke dar. Sie wurde nach Erkenntnisstand modifiziert und ist für die verschiedenen Varianten in Abb. 3.71 gezeigt. Die hiermit erhaltenen Verläufe der Rn-222 - Aktivitätskonzentrationen sind in Abb. 3.72 bis Abb. 3.77 dargestellt.

Ausgerichtet waren die im weiteren beschriebenen COCOSYS-Nachrechnungen darauf, eine möglichst gute Übereinstimmung der berechneten Radon-Aktivitätskonzentration mit der im Bad des EFH (Zone R1) gemessenen Konzentration (schwarze gestrichelte Kurve in Abb. 3.72 bis Abb. 3.77) zu erhalten und somit einen wichtigen ersten Schritt zur COCOSYS-Validierung für Rn-Ausbreitungsprozesse anhand von der GRS selbst aufgezeichneter Daten zu vollziehen.

 Tab. 3.22
 COCOSYS-Variantenrechnung zum EFH Dresden-Freital, Nachrechnung eines 24-Stunden-Ganges für das Bad

Var. Nr.	Daten- satz	Analysier- tes Zeit- intervall, s	Volu- men R1, m³	Quell- stärke, Bq/(m³h)	Luft- wechsel- zahl, h ⁻¹	Rn- Zerfall	Kommentar
1	Var_00	46.800	8,3	3.120	n.b.	n.b.	R1 Volumenreferenzwert, 1-Zonen-Modell
2	_01	- " -	8,3 / 7,5	- " -	- ,, -	- " -	R1 Volumenreferenzwert / Volumen variiert; mit volumenskalierter Quellstärke
3	_02	- " -	- " -	- " -	- " -	ber.	wie _01 mit Rn-Zerfall
4	_03	- " -	- " -	- " -	- " -	- ,, -	wie _02 mit geänderten Anfangstemp. , -druck, -feuchte (nach EQF-Gerät)
5	_04	90.900	- " -	3.120 / 0	- " -	- " -	wie _02 mit verlängertem Zeitintervall (Quellstärke = 0)
6	_04a	- " -	- " -	3.120 / 0	- " -	n.b.	wie _04 ohne Rn-Zerfall
7	_05	46.800	- " -	3.120	0,128	ber.	wie _02 unter Berücksichtigung des Luftwechsels, 3-Zonen-Modell
8	_06	- " -	- " -	7.000	- " -	- " -	wie _05 mit Rn-Quellstärke erhöht auf 7.000 Bq/(m³h)
9	_07	- " -	8,3	- " -	- " -	- " -	wie _06 mit R1 Volumenreferenzwert
10	_08	- " -	- " -	8.200	- " -	- " -	wie _07 mit Rn-Quellstärke erhöht auf 8.200 Bq/(m³h)
11	_09	90.900	- " -	- " -	0,128 / 0,384	- " -	wie _08 mit verdreifachter Luftwechselzahl im Zeitintervall ab 46800 s
12	_10	46.800	- " -	3.540	0,01	- " -	wie _05 mit gefitteter Quellrate und Luftwechselzahl
13	_11	- " -	- " -	- " -	- ,, -	n.b.	wie _10 ohne Rn-Zerfall
14	_12	90.900	- " -	3.540 / 2.910	0,01 / 0,18	- ,, -	wie _11 mit verlängertem Zeitintervall und geänderter Quellstärke und Luftwechselzahl im Zeitintervall ab 46 800 s

	٠.
	_
•	
١,	_

Var. Nr.	Daten- satz	Analysier- tes Zeit- intervall, s	Volu- men R1, m³	Quell- stärke, Bq/(m³h)	Luft- wechsel- zahl, h ⁻¹	Rn- Zerfall	Kommentar
15	_13	90.900	8,3	3.540 / 2.910	0,01 / 0,18	ber.	wie _12 mit Rn-Zerfall
16	_13a	- " -	- " -	- " -	- " -	- " -	wie _13 mit Anfangsaktivitätskonzentration 10.820 Bq/m³
17	_13b	90.000	8,3	3.540 / 2.910	0,01 / 0,18	ber.	wie _13a mit Ende d. 1. Zeitintervalls nach 49.500 s (entspr. 23,5 h in /GRS 19/) und Ende d. 2. Zeitintervalls nach 90.000 s (entspr. 34,75 h)
18	_14	1.250.000	- " -	3.540	0,01	- " -	wie _10 als Langzeitrechnung
19	_15	46.800	- " -	- " -	n.b.	- " -	Basiert auf _10, Untersuchung des LWZ-Einflusses
20	_15a	- " -	- ,, -	- " -	0,1	- " -	wie _15, zur Untersuchung des LWZ-Einflusses
21	_15b	- " -	- ,, -	- " -	0,05	- " -	- ,, -
22	_15c	- " -	- ,, -	- " -	0,0076	n.b.	- ,, -

Legende: n.b. – nicht berücksichtigt ber. – berücksichtigt

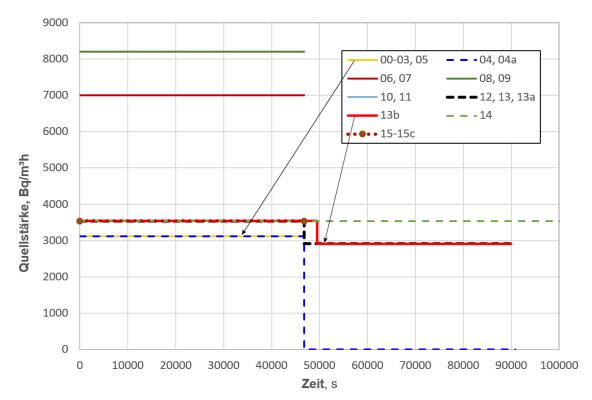


Abb. 3.71 COCOSYS, EFH Dresden-Freital, in den Varianten vorgegebene Quellstärken

Abb. 3.72 zeigt die in den Varianten Nr. 1 bis 4, d. h. Var_00 bis Var_03¹ berechneten Aktivitätskonzentration für das Zeitintervall mit dem starken Rn-Konzentrationsanstieg, d. h. für den grau markierten Bereich in Abb. 3.70 über etwa 12 Stunden. Es handelt sich um Pilotrechnungen unter Anwendung des 1-Zonen-Modells und ohne Berücksichtigung eines Luftwechsels. Die verwendete Quellstärke von 3.120 Bq/(m³h) ist Resultat eines ersten groben Fits der Messdaten. Zunächst ist für alle 4 Varianten eine relativ gute Übereinstimmung der berechneten mit der gemessenen Aktivitätskonzentration festzustellen.

Untersucht wurde in Var_00 bis _03 der Einfluss der folgenden Anfangs- bzw. Randbedingungen:

– Raumvolumen:

In Variante 01 wurde das Raumvolumen um 10 % gegenüber dem auf Grundlage der vorliegenden Zeichnungen und Fotografien berechneten reduziert. Der gezeigte

Im Weiteren wird in der Ergebnisdiskussion Bezug auf die Bezeichnung des Datensatzes (siehe Tab. 3.22) genommen, da diese auch in den Plots verwendet werden.

Einfluss entspricht der Erwartung: bei geringerem Volumen und gleicher Quellstärke erhöht sich die Aktivitätskonzentration².

- Berücksichtigung des Rn-Zerfalls:
 Die Berücksichtigung führt erwartungsgemäß zu einem geringeren Anstieg der Rn-Aktivitätskonzentration. In 15 der 21 Varianten wurde schließlich der Zerfall modelliert.
- Annahme von Anfangstemperatur, -druck und -luftfeuchte in Übereinstimmung mit den Messwerten laut EQF-Gerät:

Die Änderungen gegenüber den gemittelten Werten betrugen 7 K, 100 Pa und 5 %. Die Auswirkungen zeigen keinen sichtbaren Einfluss auf den Verlauf der Rn-Aktivitätskonzentration.

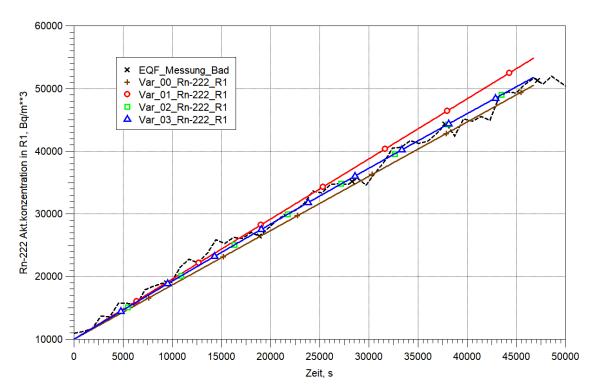


Abb. 3.72 COCOSYS, EFH Dresden-Freital, 1-Zonen-Modell, Var_00 bis Var_03 ohne Luftwechsel

_

Ab Variante 07 wurde von der Reduktion Abstand genommen, weil das Volumen relativ genau bestimmt werden kann und eine 10%ige Änderung sehr konservativ ist. Kleinere Änderungen fallen im Ergebnis in den Bereich der Genauigkeit der Konzentrationsmessungen.

Abb. 3.73 zeigt mit Var_04 und Var_04a erste Ergebnisse mit dem 1-Zonen-Modell für den 24-Stunden-Gang, wobei nach 46.800 Sekunden die Quellstärke auf null gesetzt wurde. Var_04a zeigt den Einfluss des Radonzerfalls bei ansonsten identischen Anfangs- und Randbedingungen.

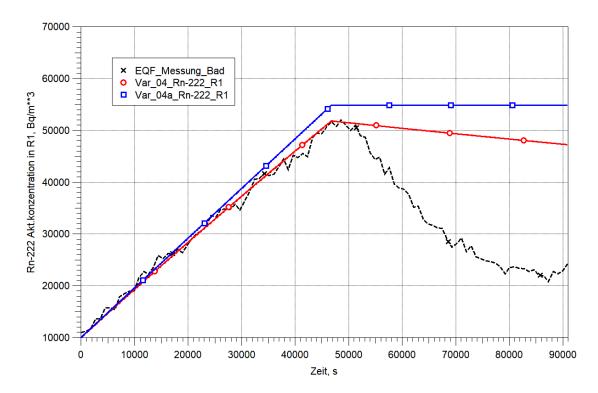


Abb. 3.73 COCOSYS, EFH Dresden-Freital, 1-Zonen-Modell, Var_04 und Var_04a ohne Luftwechsel

Die mit Var_05 bis Var_08 unter Verwendung des 3-Zonen-Modells ermittelten Rn-Aktivitätskonzentrationen sind in Abb. 3.74 dargestellt. Das 3-Zonen-Modell ist Voraussetzung für die Simulation des Luftwechsels aufgrund von Undichtheiten von Türen, Fenstern, Abluftschächten und begründet durch das Öffnen von Türen und Fenstern. Auffällig ist der wesentlich geringere Anstieg der Konzentration in Var_05 (rote Kurve), die sich von Var_02 lediglich durch die Berücksichtigung einer zunächst aus den Messdaten abgeschätzten Luftwechselzahl von 0,128 h⁻¹ unterscheidet. Getestet wurde dann in Var_06, wie sich eine Erhöhung der Quellstärke auf 7.000 Bq/(m³h) auswirkt. Die nachfolgenden Varianten zeigen einen weiteren Anstieg der Rn-Aktivitätskonzentration durch Annahme des ursprünglich berechneten Raumvolumens von 8,3 m³ und einer weiteren Erhöhung der Quellstärke auf 8.200 Bq/(m³h). Eine generelle Schlussfolgerung aus diesen Varianten ist, dass mit der angenommenen Luftwechselzahl keine so gute Übereinstimmung zwischen berechneter und gemessener Konzentration erzielt werden kann,

wie in Var_02 d. h. ohne Luftwechsel. Jedoch bewirkt die Berücksichtigung des Luftwechsels eine qualitative Änderung der mit COCOSYS berechneten Konzentration von linearem zu exponentiellem Verlauf.

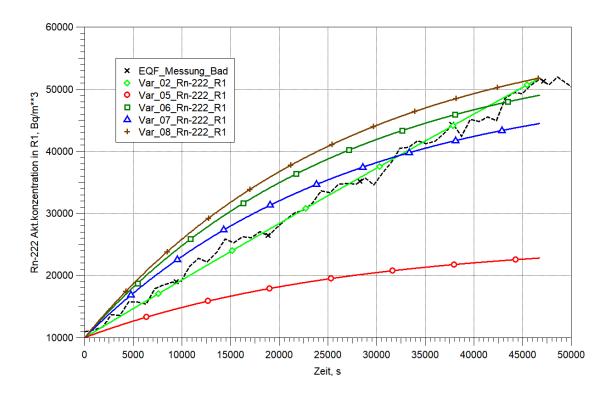


Abb. 3.74 COCOSYS, EFH Dresden-Freital, 3-Zonen-Modell, Var_02 ohne Luftwechsel, Var_05 bis Var_08 mit Luftwechsel

Grundsätzliche Aussagen zu den Randbedingungen für eine gute Übereinstimmung von Rechnung und Messung konnten aus Var_09 bis Var_12 abgeleitet werden (Abb. 3.75). Var_09 setzt auf Var_08 auf und wurde um das zweite Zeitintervall (46.800 bis 90.900 Sekunden) ergänzt. Hierbei wurde die Quellstärke von 8 200 Bq/(m³h) beibehalten, die Luftwechselzahl jedoch für dieses Zeitintervall auf 0,384 h⁻¹ verdreifacht. Das Ergebnis zeigt für das erste Intervall eine zu hohe Aktivitätskonzentration und eine zu geringe für das zweite Intervall. Nach Vorlage neuer gefitteter Werte für Quellstärke (3.540 Bq/(m³h)) und Luftwechsel (0,01 h⁻¹) im ersten Intervall gemäß /GRS 19/ konnte in Var_10 eine wesentlich bessere Übereinstimmung mit den gemessenen Werten erzielt werden. Den Einfluss des Rn-Zerfalls auf den Verlauf während des ersten Intervalls zeigt Var_11. Mit Var_12 wurde schließlich eine gute Übereinstimmung für beide Zeitintervalle berechnet, nachdem auch für das zweite Intervall gefittete Werte für Quellstärke (2.910 Bq/(m³h)) und Luftwechselzahl (0,18 h⁻¹) im Datensatz Berücksichtigung fanden. Aus diesen Varianten kristallisierten sich klar die Schlüsselrolle der zwei Eingabeparameter Quellstärke und Luftwechselzahl heraus.

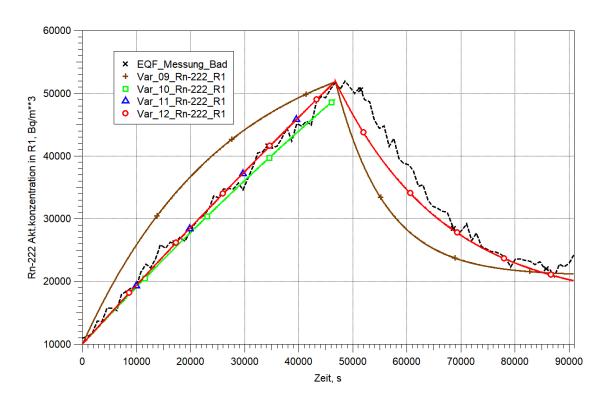


Abb. 3.75 COCOSYS, EFH Dresden-Freital, 3-Zonen-Modell, Var_09 bis Var_12 mit Luftwechsel

In den Var_13 bis Var_13b und Var_14 ist der Rn-Zerfall wieder enthalten (Abb. 3.76). In Var_13a und Var_13b ist die Anfangskonzentration mit 10.820 Bq/m³ genauer vorgegeben. Zudem sind in Var_13b beide Zeitintervalle in Übereinstimmung mit /GRS 19/modifiziert worden. Somit konnte mit Var_13b die beste Übereinstimmung mit den Messwerten erzielt werden (siehe Tab. 3.22). Diese Variante stellt das wesentlichste Ergebnis des ersten Schrittes zur COCOSYS-Validierung für Rn-Ausbreitungsprozesse anhand von der GRS aufgenommener Daten dar.

Der Vollständigkeit halber ist in diesem Zusammenhang zu erwähnen, dass Var_14 durchgeführt wurde, um zu zeigen (s. kleines Bild in Abb. 3.76), in welchem Maße die Aktivitätskonzentration steigen würde, wenn bei gleichbleibender Quellstärke das Badezimmer weiter von den anderen Räumen abgeschlossen (und damit von den angrenzenden Räumen weitestgehend isoliert) bleibt.

Abb. 3.77 zeigt den Einfluss der Luftwechselzahl auf den Verlauf der Aktivitätskonzentration im Badezimmer, der mit **Var_15 bis Var_15c** untersucht wurde. Im Bereich des

Luftwechsels von bis zu ca. 5 % des Raumvolumens pro Stunde ist der Einfluss marginal. Bei 10 % (siehe Var_15a) reduziert sich der Konzentrationsanstieg bereits auf den halben Wert.

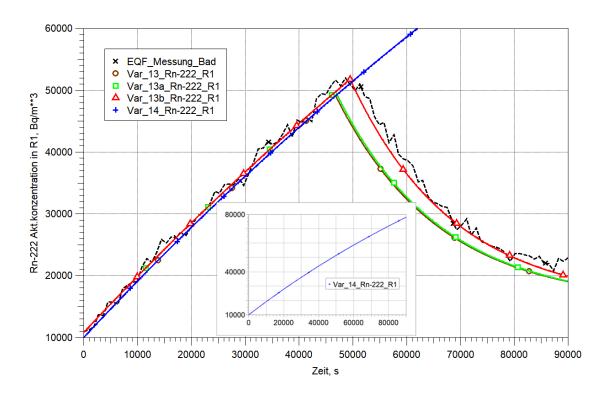


Abb. 3.76 COCOSYS, EFH Dresden-Freital, 3-Zonen-Modell, Var_13 bis Var_13b und Var_14 mit Luftwechsel

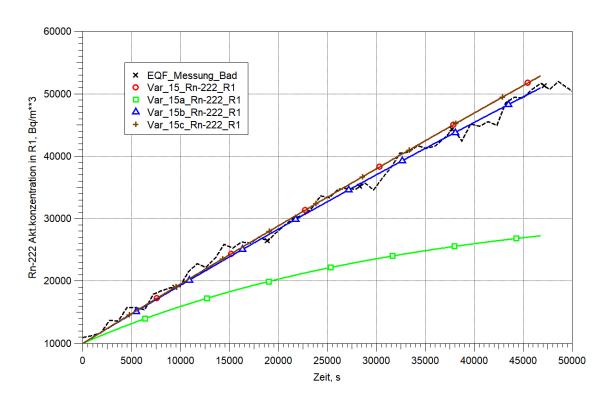


Abb. 3.77 COCOSYS, EFH Dresden-Freital, 3-Zonen-Modell, Var_15 bis Var_15c, Einfluss der Luftwechselzahl

3.6.2.3 Nachrechnung der Rn-222 – Aktivitätskonzentration im Flur für einen 24-Stunden-Gang

Zur Untersuchung der Radon-Aktivitätskonzentration im Flur wurden 8 Nachrechnungen mit dem COCOSYS-Code durchgeführt. Einen Überblick zu den Varianten gibt Tab. 3.23. Die dort farblich markierten Varianten werden im Weiteren diskutiert. Wie schon für die im vorigen Kapitel beschriebenen Analysen, ist auch hier die Rn-222-Quellstärke im Bad ein wesentlicher Eingabeparameter der untersuchten Rn-Ausbreitungsprozesse. Sie beträgt in allen Nachrechnungen zum Flur 3.540 Bq/(m³h) während der ersten betrachteten 12 Stunden, d. h. während des 1. Zeitintervalls und 2.910 Bq/(m³h) während des 2. Zeitintervalls, und ist somit gleich der in der Rechnung mit dem Datensatz Var_13b (siehe Tab. 3.22).

Auch die hier beschriebenen COCOSYS-Nachrechnungen waren auf eine möglichst gute Übereinstimmung der berechneten mit den gemessenen Radon-Aktivitätskonzentrationen ausgerichtet. Sie stellen einen weiteren wichtigen Schritt der COCOSYS-Validierung für Rn-Ausbreitungsprozesse anhand aufgezeichneter Daten dar.

Bei **Var_100** handelt es sich um die erste untersuchte Variante nach Erweiterung des Datensatzes um den Flur (Zone R2) unter Anwendung der Nodalisation in Abb. 3.69. Diese Variante basiert weitestgehend auf Var_13b in Tab. 3.22. Neben der Berücksichtigung des Flurs ist die Modellierung der Überströmverbindung J1 eine wesentliche Änderung gegenüber Var_13b. Bei J1 handelt es sich um den Luftspalt der Badezimmertür, der mit einer Überströmfläche von 0,01 m² abgeschätzt wird. Der mit Var_100 berechnete Verlauf der Rn-Aktivitätskonzentration ist durch die blaue Kurve in Abb. 3.78 dargestellt. Es zeigte sich, dass der in den ersten 7,5 Stunden des untersuchten Zeitbereiches gemessene Konzentrationsverlauf im Flur nur unter Verwendung der Rn-Quelle im Bad (R1) nicht nachvollzogen werden kann. Selbst dann nicht, wenn eine wesentlich größere Überströmfläche für die Verbindung J1 angesetzt wird.

Im Ergebnis der Diskussionen unter den beteiligten GRS-Experten wird davon ausgegangen, dass Radon-222 auch aus dem Boden im Flur, der sich auf der gleichen Höhe befindet wie das Bad, austritt. Demzufolge wurden in Var_101 für den Flur auf Basis der Messdaten eine zusätzliche Rn-Quelle und eine Luftwechselzahl gefittet. Der Schwerpunkt lag hierbei zunächst auf dem Zeitbereich bis 22.800 s (ca. 7,5 Stunden). Für das sich anschließende Zeitintervall wurde im Flur ausschließlich mit der Luftwechselzahl gearbeitet (s. Tab. 3.23). Damit ergeben sich die in Abb. 3.79 gezeigten Änderungen im Nodalisationsschema und die in Abb. 3.78 in Rot dargestellten Verläufe der Rn-Aktivitätskonzentrationen in Flur und Bad. Unterteilt man den untersuchten Zeitbereich von 24 Stunden entsprechend dem im Flur gemessenen Konzentrationsverlauf in 4 Phasen (s. Abb. 3.80), zeigt sich in Var 101 für die Phasen I und II auch für den Flur eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Rn-Aktivitätskonzentrationen. In Var 101 wurde angenommen, dass in den Phasen II bis IV die LWZ 50 % des für Phase I gefitteten Wertes beträgt. Diese Annahme wurde in weiteren Varianten, insbesondere für die Phasen III und IV, modifiziert (s. Tab. 3.23, Spalte LWZ 2). Abschließend ist zu Var 101 zu bemerken, dass die Drücke in R1 und R2 nahezu identisch sind und demzufolge kein Massenstrom durch J1 berechnet wird.

Tab. 3.23 COCOSYS-Variantenrechnung zum EFH Dresden-Freital, Nachrechnung eines 24-Stunden-Ganges für den Flur

Var	Var. Daten-		LWZ 2,	Quells	tärke in	Lüftungs-		
Nr.	satz	LWZ 1 , h ⁻¹	h ⁻¹	R1, Bq/(m³h)	R2, Bq/(m³h)	systeme	Kommentar	
1	Var_100	0,01 / 0,18 ¹	-	3.540 / 2.910 ¹	-	FAN-I, -O	basierend auf Var_13b, mit Modellierung des Flurs (R2); Lüftungssysteme FAN-I, -O mit LWZ 1 - Funktion	
2	_101	- " -	0,27 / 0,13 ²	- " -	1.880 / 0 ²	FAN1-I, -O FAN2-I, -O	wie _100 mit Rn-Quelle in R2, Modellierung der R2-Lüftungssysteme FAN2-I, -O mit gefitteter LWZ 2 - Funktion	
3	_102	- " -	- " -	- " -	- " -	FAN1-I, FAN12-I FAN2-I, -O	wie _101, FAN12-I anstelle von FAN1-O, unterteilt in: 70% nach R2, 30% nach ENVIR-O, mit LWZ 1 - Funktion	
4	_103	- " -	0,27 / 0,13 / 0 ³	- ,, -	- ,, -	- " -	wie _102, LWZ-Funktion von FAN2-I, -O in weitere Zeitintervalle unterteilt; FAN2-I mit LWZ 2 - Funktion; FAN2-O mit LWZ = 0,27 von 0 - 28.000 s; 0,13 von 28.000 - 45.000 s; 0,05 von 45.000 - 55.000 s; 0,1 von 55.000 - 90.000 s;	
5	_103a	- " -	- " -	- ,, -	- " -	- ,, -	wie _103; FAN2-O mit LWZ = 0,27 von 0 – 28.000 s; 0,13 – 90.000 s	
6	_104	- " -	- ,, -	- " -	- " -	FAN1-I, FAN12-I, FAN12A-I FAN2-I, -O	wie _103 mit Änderung der FAN12-I - Anteile 70/30 (R2/ENVIR-O) nach 60 000 s in 30/70; FAN2-O mit LWZ = 0,27 von 0 - 28 000 s; 0,13 von 28.000 – 45.000 s; 0,05 von 45.000 – 90.000 s	
7	_104a	- " -	- " -	- ,, -	- ,, -	- " - FAN12B-I	wie _104 mit Änderung der FAN12-I - Anteile 70/30 (R2/ENVIR-O) von 60.000 – 70.000 s in 30/70 durch FAN12A-I und von 70.000 – 90.000 s in 0/100 durch FAN12B-I	
8	_105	0,01 / 0,18 ¹	0,27 / 0,13 / 0,24 ⁴	3.540 / 2.910 ¹	1.880 / 0 ²	FAN1-I, FAN12-I, FAN12A-I FAN2-I, -O	wie _104 mit Änderung der FAN12-I - Anteile 70/30 (R2/ENVIR-O) nach 65.000 s in 0/100 durch FAN12A-I; FAN2-I und -O mit LWZ 2 - Funktion	

LWZ 1: Luftwechselzahl im Bad R1 LWZ 2: Luftwechselzahl im Flur R2

Legende:

- 1 1. Zeitintervall 0 49.500 s, 2. Intervall 49.501 90.000 s
- 2 1. Zeitintervall 0 28.000 s, 2. Intervall 28.001 90.000 s
- ³ 1. Zeitintervall 0 28.000 s, 2. Intervall 28.001 45.000 s, 3. Intervall 45.001 90.000 (FAN2-I)
- ⁴ 1. Zeitintervall 0 28.000 s, 2. Intervall 28.001 65.000 s, 3. Intervall 65.001 90.000 (FAN2-I, -O)

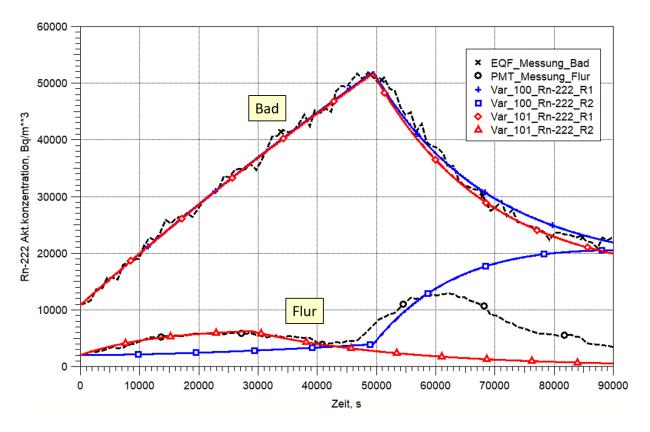


Abb. 3.78 COCOSYS, EFH Dresden-Freital, 4-Zonen-Modell, Var_100 und Var_101, Einfluss einer Rn-222-Quelle im Flur

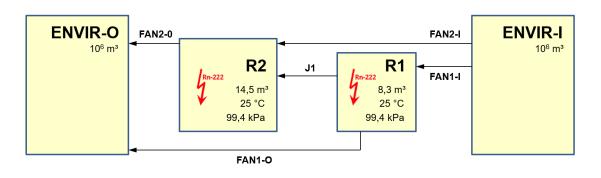


Abb. 3.79 COCOSYS, Nachrechnung EFH Dresden-Freital, 4-Zonen-Modell mit Rn-222-Quelle und LWZ in Zone R2

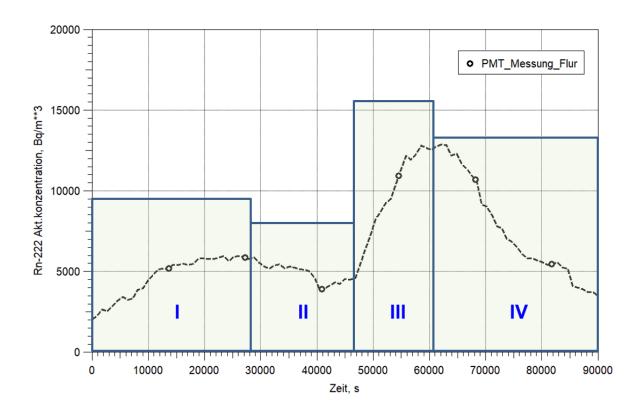


Abb. 3.80 EFH Dresden-Freital, gemessene Aktivitätskonzentration im Flur, 4-Phasen-Unterteilung

In **Var_102** wurde zwei Aspekten Rechnung getragen: erstens soll ein Anstieg der Rn-Aktivitätskonzentration ab Phase III bewirkt werden und zweitens sind entsprechende Änderungen zeitlich mit dem Kurvenverlauf in R1 (d. h. dem ersten Öffnen der Badezimmertür nach der Nachtruhe) abzugleichen. Die Änderung besteht im Austausch des Lüftungssystems FAN2-O gegen das verzweigte System FAN12-I (Abb. 3.81). Das angenommen Verhältnis x/y beträgt 70% / 30% bei unveränderter LWZ 1 (s. Tab. 3.23), womit ein deutlicher Anstieg der in R2 eingetragenen Luft (inkl. Rn) ab 49.500 s einhergeht.

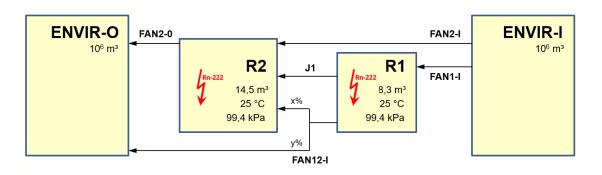


Abb. 3.81 COCOSYS, Nachrechnung EFH Dresden-Freital, 4-Zonen-Modell mit Rn-Quelle und LWZ in Zone R2 und Unterteilung der Abluft von Zone R1

Die mit Var_102 berechneten Rn-Konzentrationen im Vergleich zu Var_101 sind in Abb. 3.82 dargestellt. Durch die angenommene Aufteilung der abstömenden Luft (Abluft) aus dem Bad konnte nun auch für Phase III eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Konzentrationen erreicht werden. Es ist hierbei erneut zu bemerken, dass die Überstömverbindung J1 keinen signifikanten Beitrag zum Transport des Radon-Gases aus dem Bad in den Flur leistet. Diese Rolle übernehmen die Lüftungssysteme. Ein vergleichbares Verhalten könnte erzielt werden, wenn anstelle des verzweigten Systems FAN12-I die Verbindung J1 mit einer zeitabhängigen Flächenfunktion modelliert werden würde. Voraussetzung dafür ist jedoch das Vorliegen von gemessenen Drücken in den verschiedenen Räumen mit ausreichend hoher Genauigkeit sowie belastbare Protokolle zur Öffnung von Türen und Fenstern im EFH. Da beides nicht gegeben ist, wurde diese Idee verworfen.

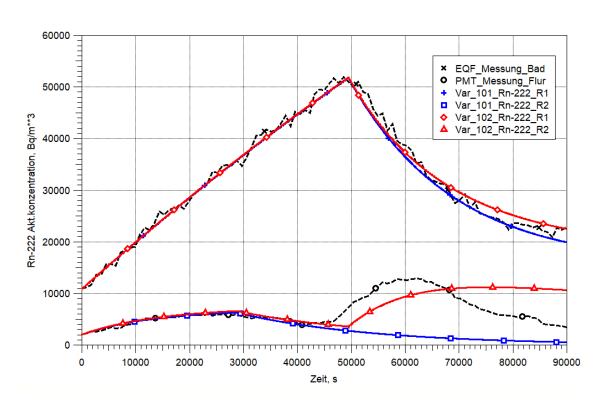


Abb. 3.82 COCOSYS, EFH Dresden-Freital, 4-Zonen-Modell, Var_101 und Var_102, Aufteilung des Abluftstromes aus dem Bad

Die letzte Variante, die hier diskutiert werden soll, ist **Var_105**. Sie zielte darauf ab, in Phase IV des untersuchten Zeitraumes einen Abfall der Rn-Aktivitätskonzentration im Flur bei unveränderten Bedingungen in den Phasen I bis III in Bad und Flur zu berechnen. Hierfür wurde angenommen, dass sich nach 65.000 s (ca. 18 Stunden) die Anteile der Abluft aus dem Bad stark ändern und die gesamte Abluft in die Umgebung ENVIR-

O strömt und nicht wie davor anteilig in den Flur geleitet wird. Abb. 3.83 verdeutlicht, dass mit dieser Annahme das Ziel der Nachrechnung erreicht werden konnte. Die Differenz zwischen der gemessenen und der berechneten Konzentration im Flur in Phase 3 könnte durch erneute Berücksichtigung einer Quellstärke im Flur bis hin zur vollständigen Übereinstimmung der Kurven reduziert werden. Nach eingehender Diskussion unter den GRS-Experten wurde aufgrund des spekulativen Charakters derartiger Änderungen von weiteren COCOSYS-Rechnungen für das EFH abgesehen. Die Übereinstimmung zwischen Messungen und Rechnungen würde zwar verbessert werden, aber ein Erkenntniszuwachs ist damit nicht verbunden.

Die Variante Var_105 stellt das wesentlichste Ergebnis des zweiten Schrittes zur COCOSYS-Validierung für Rn-Ausbreitungsprozesse anhand von der GRS aufgenommener Daten dar.

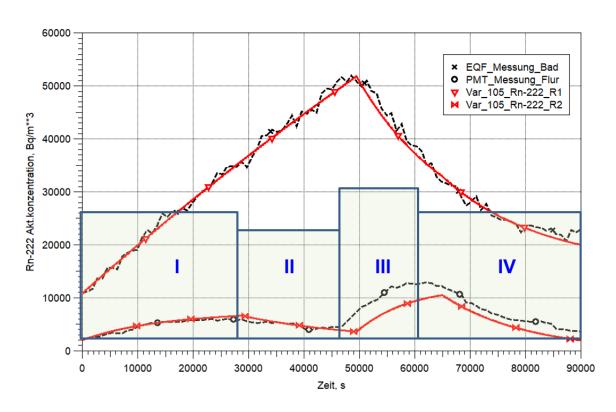


Abb. 3.83 COCOSYS, EFH Dresden-Freital, 4-Zonen-Modell, Var_105, 4 Phasen des Verlaufes der Rn-222-Aktivitätskonzentrationen

Auf Grundlage der mit COCOSYS zum EFH durchgeführten Nachrechnungen werden folgende Schlussfolgerungen gezogen:

- Eine gute Übereinstimmung der im Flur und im Bad gemessenen Rn-Aktivitätskonzentrationen wird für die ersten 12 Stunden des untersuchten Zeitraumes nur erreicht, wenn auch im Flur eine Quelle modelliert wird (d. h. unter Nutzung der für das Bad gefitteten LWZ ist das Überströmen von Rn-222 in den Flur nicht ausreichend). Diese 12 Stunden sind durch genügend gut beschriebene Randbedingungen (Nachtruhe, keine Türöffnungen) charakterisiert.
- Charakteristisch für die zweiten 12 Stunden des untersuchten Zeitraumes ist die lückenhafte Protokollierung des Öffnungs- bzw. Schließzustandes von Türen und Fenstern im relevanten Teil des EFH. Vertretbare Annahmen basierend auf gefitteten Quellstärken und Luftwechselzahlen führten schließlich auch zu einer guten Übereinstimmung in diesem Zeitraum.
- Weitere Variantenuntersuchungen z. B. unter Einbeziehung eines dritten Raumes des EFH lassen auf Grund unklarer Randbedingungen keinen Erkenntniszuwachs erwarten.

3.6.2.4 Nachrechnung der CO₂-Konzentration

Wie oben in den Kapiteln 3.5.4.1 bis 3.5.4.4 dargestellt, wurde im Rahmen der Messaufnahme das Bad des EFH (Messobjekt 1) mit CO₂ beaufschlagt und anschließend der Konzentrationsverlauf im Bad (z. B. Abb. 3.50) sowie im Flur und in einem Arbeitsraum gemessen. Auf Basis des gemessenen Abfalls der CO₂ Konzentration wurde dann die Luftwechselrate für das Bad bestimmt. Die im folgenden dargestellten COCOSYS-Nachrechnungen wurden zu den Messungen Sommer 2019 (siehe Kapitel 3.5.4.3) durchgeführt.

Da die CO_2 -Einspeisung nicht gemessen wurde - d. h. keine Rate in kg/s als Randbedingung für COCOSYS verfügbar ist – und die Phase des Anstiegs der CO_2 -Konzentraztion von anfänglich ~400 ppm (-536 s) bis zum maximalen Wert von 1.748 ppm (2.164 s) bzgl. der Rn-222 Problematik nicht relevant ist, wird diese Anstiegsphase nicht mit betrachtet. Die Nachrechnungen konzentrieren sich deshalb auf die Anfangsphase 0.6 - 11.93 h (d. h. 2.164 - 42.964 s, siehe Abb. 3.84).

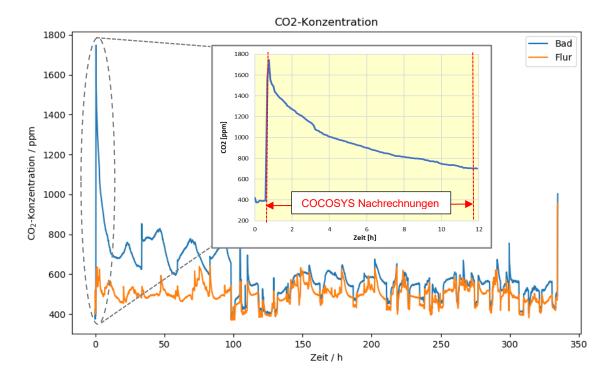


Abb. 3.84 EFH Sommer 2019, gemessene CO₂-Konzentration im Bad

In den Rechnungen wurde der 3-Zonen-Datensatz entsprechend Kapitel 3.6.2.1 und Abb. 3.68 verwendet. Das Volumen des Bades (Zone R1) wurde mit 8,3 m³ angenommen und die Anfangsbedingungen entsprechend der Messung festgelegt. Druck, Temperatur und Feuchte spielen aber hier in diesem adiabaten Modell ohne Quellen/Senken nur eine untergeordnete Rolle. Die gemessene maximale Anfangskonzentration von 1.748 ppm CO₂, entspricht einem Volumenanteil von 1,748 %, wurde in COCOSYS als CO₂-Partialdruck vorgegeben. Dieser beträgt bei einem Gesamtdruck von 99.600 Pa entspricht dies 1.741 Pa.

In einer ersten Abschätzung (siehe Kapitel 3.5.4.4) wurde aus den Messdaten für die Phase 0,6 - 12 h eine mittlere Luftwechselzahl von 0,128 h⁻¹ bestimmt, die in COCOSYS als erste Eingabe für die Lüftungssysteme FAN-O und FAN-I (Abb. 3.68) diente.

Nach der detaillierteren Auswertung der Messdaten wurde diese LWZ später unter Berücksichtigung der Umgebungskonzentration von CO₂ für 2 Messphasen präzisiert. Neben der normalen Umgebungskonzentration von ca. 400 ppm wurde auch ein Fit für eine "Umgebungskonzentration" von 600 ppm durchgeführt. Hintergrund für diese höhere Konzentration ist, dass nach "Beimpfung" des Bades mit CO₂ die Badtür geöffnet wurde (Verlassen des Raumes) und dadurch CO₂ in den Flur gelangte (Anstieg in der Flur-Konzentration bei 0 h in Abb. 3.50). Da in der anschließenden Phase auch ein Ansaugen von Luft aus dem Flur in das Bad möglich ist, und dabei entweder die gesamte Luft oder

nur ein Anteil und der Rest aus der Umgebung, würde das im Fit einer entsprechend höheren "Umgebungskonzentration entsprechen. Ein dementsprechender Wechsel der Strömungsrichtung ist den verwendeten LWZ nicht im Detail berücksichtigt. Die Ergebnisse der Auswertung der Messdaten sind in Tab. 3.17 angegeben.

Tab. 3.24 gibt einen Überblick zu den durchgeführten COCOSYS-Variantenrechnungen bezügliche der CO₂-Messung.

Tab. 3.24 EFH Dresden-Freital - Sommer 2019, Variantenrechnungen zur Luftwechselzahl anhand der CO₂-Messung im Bad

Datensatz	Anfangskonz. CO ₂ Bad / Umgebung [ppm]	LWZ [h ⁻¹]	Kommentar
var_00	1.748 / -	-	Basisvariante
var_01	- " -	0,128	Luftwechselzahl 0,128 durch 2 Lüftungssysteme modelliert
var_02	1.500 / -	- ,, -	geringere CO ₂ Anfangskonzentration
var_03	1.250 / -	0,055	geringere CO ₂ Anfangskonzentration und geringere LWZ
var_04	1.500 / -	0,128 0,055 ab 13.000 s	wie var_02, mit verringerter LWZ ab 13.000 s
var_05	1.748 / 400	0,128	wie var_01, plus Anfangskonzen- tration 400 ppm in Umgebung
var_06	1.500 / 400	- ,, -	wie var_02, plus Anfangskonzen- tration 400 ppm in Umgebung
var_07	1.500 / 400	0,170 0,090 ab 13.000 s	wie var_06, mit gefitteter LWZ (plus FAN-O time regulation)
var_08	1.500 / 400	0,170 0,090 ab 15.000s	wie var_06, mit weiter gefitteter LWZ (plus FAN-O time regulation)
var_09	1.497 / 400	0,183 ab 3.060 s 0,089 ab 14.472 s	wie var_08, mit 2-stufigem Fit der LWZ auf Basis der exp. Messdaten
var_10	1.497 / 600	0,247 ab 3.060 s 0,177 ab 14.472 s	wie var_08, mit 2-stufigem Fit der LWZ auf Basis der Messdaten & 600 ppm Umgebung

Die Ergebnisse der Varianten var_00, var_01 und var_05 sind in Abb. 3.85 dargestellt. Var_00 ohne Berücksichtigung der LWZ diente der Überprüfung der korrekten Definition der Anfangsbedingungen. In var_01 wurde zusätzlich die zunächst abgeschätzte LWZ von 0,128 h⁻¹ berücksichtigt. Man sieht, dass der Abfall der CO₂-Konzentration zu stark berechnet wird und der Endwert deutlich unter dem Messwert liegt. Ursache war die nicht berücksichtigte normale Umgebungskonzentration von CO₂, sodass über FAN-I nur "pure" Luft aus der Umgebung in das Bad angesaugt wurde. Dies verdeutlich für die Rn-Problematik damit auch, dass bei erwarteten kleinen Rn-222-Konzentrationen in einem Arbeitsraum, d. h. in der Größenordnung von bis zu 1.000 Bq/m³, die Rn-Umgebungskonzentration mit zu berücksichtigen ist.

Nach Annahme einer mittleren Umgebungskonzentration von 400 ppm liegt damit der in var_05 ermittelte Konzentrationswert zu Beginn und zum Ende der Simulation direkt auf den Messdaten (Abb. 3.85). Die Messung zeigt dagegen zu Beginn einen stärkeren und später einen schwächeren Abfall als den für die mittlere LWZ von 0,128 h⁻¹ berechneten.

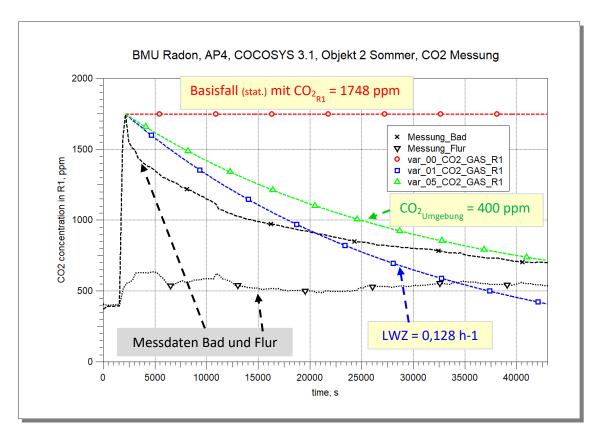


Abb. 3.85 EFH Dresden-Freital, COCOSYS-Nachrechnungen var_00 bis var_05, CO₂-Konzentration im Bad

Betrachtet man in Abb. 3.85 die Messergebnisse in Bad und Flur während der ersten Stunde, sehen diese wie erwartet aus – der Abfall der Konzentration im Bad geht einher mit dem Anstieg im benachbarten Flur, d. h. CO₂ wird offensichtlich aus dem Bad in den Flur transportiert. Danach fällt allerdings auch die Konzentration im Flur bzw. steigt nach ca. 25.000 s wieder an, was für geänderte, aber nicht genau dokumentierte Strömungsbedingungen spricht (Tür- oder Fenster-Öffnungen). Deshalb wurden weitere Nachrechnungen unter Vernachlässigung des Maximalwertes der Anfangskonzentration sowie mit der Annahme von zeitabhängigen Luftwechselzahlen für das Bad durchgeführt.

Der Vergleich von var_05 (Anfangskonzentration 1.748 ppm bei 0,6 h, d. h. 2.164 s) und var_06 (1.500 ppm) in Abb. 3.86 zeigt, dass damit die Messung besser getroffen wird. Allerdings ist in var_06 die Endkonzentration zu gering. Deshalb wurden in Variante var_07 anhand der Messkurve im Bad zwei Zeitintervalle mit jeweils unterschiedlichen Luftwechselzahlen abgeschätzt: 2.164 bis 13.000 s – LWZ = 0,17 und ab 13.000 s LWZ = 0,09. Damit wird die gemessene CO₂-Konzentration gut reproduziert. In var_08 ist dann noch zusäztlich der Beginn des zweiten Intervalls auf 15.000 s verschoben und somit die Übereinstimmung zur Messung sehr gut.

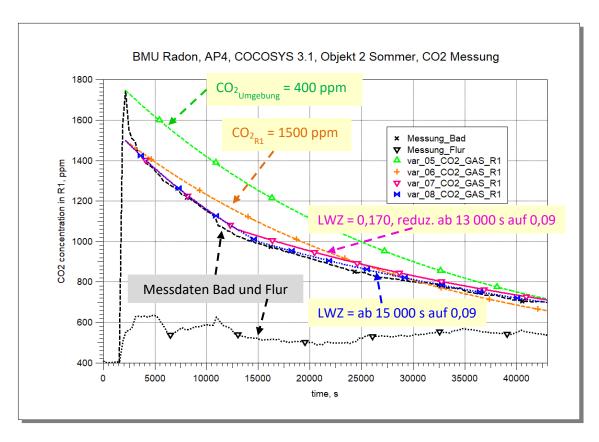


Abb. 3.86 EFH Dresden-Freital, COCOSYS-Nachrechnungen var_05 bis var_08, CO₂-Konzentration im Bad

Daraufhin wurde auch in der Auswertung der Messdaten für den Zeitbereich 0,85 – 11,77 h ein Fit für zwei Zeitintervalle vorgenommen (siehe Tab. 3.17) Die dabei ermittelten LWZ von 0,183 und 0,089 stimmen gut mit den auf Basis von COCOSYS-Nachrechnungen abgeschätzten Werten von 0,17 und 0,09 überein. Diese neu ermittelten LWZ wurden in Rechnungsvariante var_09 angewendet. Wie in Abb. 3.87 zu sehen ist, liegen die berechneten Konzentrationen in Var_08 und Var_09 nahe beieinander. Die vergleichsweise geringen Abweichungen sind in der ersten Phase an größten und darin begründet, dass der neue Fit auf Daten zu einen etwas späteren Zeitpunkt (3.060 anstatt 2.164 s) aufsetzt.

Die unter Annahme der erhöhten Umgebungskonzentration gefitteten LWZ (0,247 und 0,177 in Tab. 3.17) sind in der Variante var_10 verwendet worden und mit in Abb. 3.87 aufgetragen. Die Unterschiede im berechneten Konzentrationsverlauf zu var_08 und var_09 sind nicht groß. Diese Variante wurde letztendlich aber als weniger realistisch eingeschätzt, da die CO₂-Konzentration im Bad nach 12.000 s immer deutlich unter 600 ppm liegt und davon ausgegangen wird, dass der größte Anteil des Luftaustausches mit der Umgebung (~400 ppm) stattfindet.

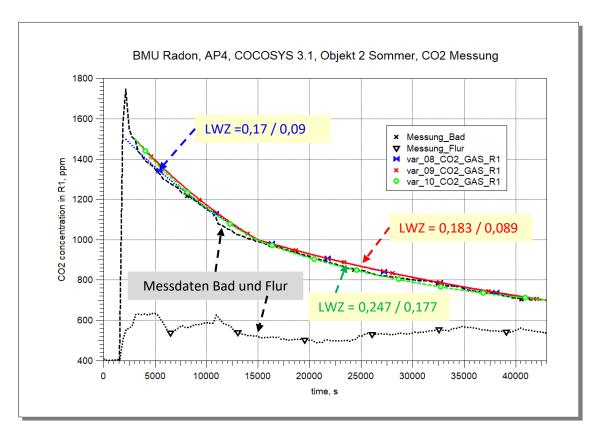


Abb. 3.87 EFH Dresden-Freital, COCOSYS-Nachrechnungen var_08 bis var_10, CO₂-Konzentration im Bad

Basierend auf diesen Simulationen wird zusammengefasst, dass mit COCOSYS der CO₂-Konzentrationsverlauf im Bad durch eine mittlere Luftwechselzahl gut nachgerechnet werden kann. Besser sehen die Ergebnisse bei Annahme von zeitabhängigen Luftwechselzahlen aus.

Eine allgemeingültige konstante Luftwechselzahl des Bades zur Verwendung in den Berechnungen der Rn-222-Aktivitätskonzentration konnte aus den CO₂-Messungen aber nicht abgeleitet werden. Jedoch stimmen die hier für den ersten Zeitbereich bis 15.000 s mit abfallender CO₂-Konzentration ermittelten LWZ von 0,183 h⁻¹ (Fit) und 0,17 h⁻¹ (COCOSYS) gut mit der für die Nachrechnung der Rn-222-Konzentration im Bad verwendeten LWZ von 0,18 h⁻¹ für den Zeitbereich 49.500 s bis 90.000 s (siehe Var_13b in Tab. 3.22), in dem die Konzentration ebenfalls fällt, gut überein. In den Messungen zum Gewölbekeller (Kapitel 3.5.4.5) konnte ein kausaler Zusammenhang zwischen der Rn-Aktivitätskonzentration und der CO₂ Konzentration festgestellt werden (Abb. 3.57). Damit kann die Übereinstimmung der Luftwechselzahlen begründet werden.

Die durchgeführten Analysen untermauern, dass die genaue Kenntnis von Quellraten (für Rn-222-Aktivitätskonzentration) und Luftwechselzahlen eine Grundvoraussetzung für eine gute Übereinstimmung von Rechnung und Messung und damit für eine erfolgreiche Code-Validierung ist.

3.6.2.5 Testrechnungen zum Einfluss der Diffusion

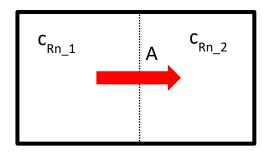
Im COCOSYS Thermohydraulik-Hauptmodul THY existiert auch ein Modell zur Berücksichtigung der Gasdiffusion. Da die neu eingeführte Komponente "TRACER_GAS" auch als thermohydraulisches Gas behandelt wird, kann die Ausbreitung von Rn-222 über Diffusionsvorgänge in der Raumluft berücksichtigt werde, wenn die entsprechende Diffusionskonstante CDIFFC größer Null gesetzt ist /ARN 19/.

Anhand von Testrechnungen zu EFH Sommer 2019 soll geklärt werden, ob die Diffusionsmodellierung in COCOSYS auch bei den extrem geringen Rn-Konzentrationen funktioniert und welchen Einfluss diese auf die Rn-222 Verteilung hat.

In COCOSYS als Lumped-Parameter Code sind in einer Zone bzw. einem Zonenteil (numerisches Kontrollvolumen) alle Komponenten homogen gemischt und haben die gleiche Temperatur. Diffusion wird deshalb nur zwischen Zonen über die Verbindungen

berechnet. Ein Diffusionsmassenstrom (Gasaustausch) ist dann möglich, wenn Konzentrationsunterschiede zwischen verbundenen Zonen vorliegen, z. B. wenn die Konzentration c_{Rn} in Raum 1 größer als die in Raum 2 ist. Dieser Austausch ist auch direkt proportional zur Verbindungsfläche A und damit bei virtuell unterteilten Räumen größer als bei Verbindungen durch Türspalte (siehe Abb. 3.88).

In COCOSYS erfolgt ein Test, ob die Diffusionsgeschwindigkeit einer Gaskomponente i durch die Verbindung größer ist als die Geschwindigkeit in der Verbindung (Konvektionsgeschwindigkeit). Unter dieser Bedingung werden beide Komponentenmassenströme überlagert und so z. B. auch eine mögliche entgegengesetzte Richtung von Konvektion und Gasdiffusion berücksichtigt. Ist die Diffusionsgeschwindigkeit der Gaskomponente kleiner als die Konvektionsgeschwindigkeit in der Verbindung, wird die Diffusion dieser Komponente vernachlässigt.



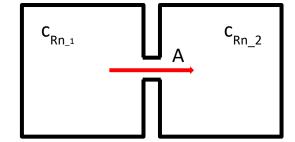


Abb. 3.88 COCOSYS, Abhängigkeit der Diffusion von der Verbindungsfläche, links: virtuell unterteilter Raum, rechts: 2 Räume verbunden durch eine kleine Öffnung

In den in Kapitel 3.6.2.2 und 3.6.2.3 beschriebenen COCOSYS-Analysen wurde das Bad bzw. der Flur nur durch jeweils 1 Zone abgebildet und somit ist innerhalb der Räume keine Diffusion berücksichtigt. Der 3-Zonen-Datensatz nach Abb. 3.68 wurde deshalb dahingehend erweitert, dass Raum R1 in 4 gleiche Rechenzonen unterteilt wurde (oben, unten, links, rechts in Abb. 3.89). Die Abbildung zeigt auch die neuen internen Verbindungen, den Anschluss der Lüftungssysteme zur Simulation der ursprünglich aus den Messdaten bestimmten LWZ von 0,128 h⁻¹ sowie den angenommenen Ort der Radon-Quelle in R1_UL. Die Daten der vier Atmosphärenverbindungen A_UL_UR, A_UL_OL, A_OL_OR und A_UR_OR wurden aus der Bad-Geometrie abgeschätzt. Als Diffusionskonstante von Radon in Luft wurde CDIFFC = 1.1 · 10⁻⁵ m²s⁻¹ verwendet /AMG 19/. Das Eingabemodell ist nach wie vor adiabat, d. h. ohne Wärmeaustausch mit Wänden und ohne Wärmequellen. Als Simulationszeitraum wird ein Zeitbereich von 13 h (46.800 s) betrachtet.

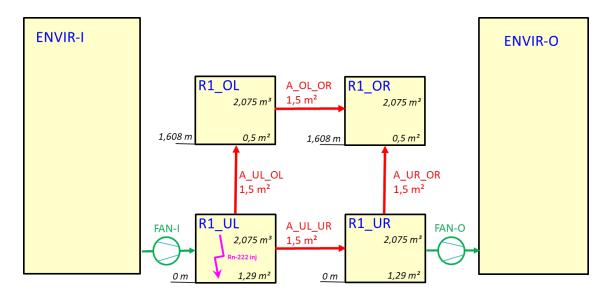


Abb. 3.89 COCOSYS, Diffusion, erweiterte Nodalisation für das Bad des EFH

Tab. 3.25 listet die relevanten und unten beschriebenen COCOSYS-Variantenrechnungen zur Untersuchung der Diffusion auf.

Tab. 3.25 EFH Dresden-Freital - Sommer 2019, Variantenrechnungen zur Diffusion in COCOSYS

Daten- satz	Luftw. Zahl (1/h)	Quell- stärke (Bq/(m³ h)	Anfangs- bedingungen in R1_*	Kommentar			
var_00	0,128	3.050 in R1_UL	p = 0,994 bar r = 51 %	Basisvariante, LWZ bezogen auf Gesamtvolu- men R1 von 8.,43 m³, Verbindungslängen 0,1 m wie für THAI Versuchsanlage			
var_01	0,0	- " -	- " -	Lüftung aus			
var_02	- " -	- " -	p _u = 0,994091 p _o = 0,993909	Gestaffelter exakter Anfangsdruck unten und oben, T und r gleich gelassen			
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$							
Basis-Datensatz "EFH_Sommer19_diffusion_var_00.inp" mit R1 als 4 Zonen und 2 Umgebungen							

In den ersten Simulationsläufen wurden für Zonen R1_UL bis R1_OR exakt die gleichen Anfangsbedingungen verwendet (gemessene Daten für Druck, Temperatur und relative Luftfeuchte). Die Auswertung dieser ersten Ergebnis zeigte, dass dabei

- die Anfangsbedingungen nicht genügend exakt definiert waren.
 Ohne geodätische Höhenstaffelung des Druckes im Pa-Bereich (entsprechend 1,6 m Unterschied in den Zonenmittelpunkten) oder/und gestaffelter Luftfeuchtigkeit und Raumtemperatur und damit der Gasdichte treten Konvektionsströmungen innerhalb der 4 Zonen auf. Diese sind insbesondere zu Beginn bis zu 300-mal größer als der einer Luftwechselzahl von 0,128 h⁻¹ des Gesamtraumes R1 entsprechenden Zu- bzw. Abströmung (FAN-I und FAN-O) von 0,25 g/s.
- die von COCOSYS berechnete Rn-222 Diffusion nur dann einen relevanten Beitrag liefert, wenn keine nennenswerten Strömungen (LWZ) durch diese 4 Rechenzonen auftreten.
 Der LWZ von 0,128 h⁻¹ entspricht bei der angenommenen R1-internen Verbindungsfläche von 1,5 m² eine Konvektionsgeschwindigkeit von ~0,15 mm/s. Die Diffusionsgeschwindigkeit von Rn-222 erreicht maximale Werte von 0,04 mm und wird deshalb in COCOSYS für die Mehrzahl der Verbindungen nicht berücksichtigt.

Um die Diffusionsberechnung zu "aktivieren" und den Einfluss der Diffusion zu prüfen, wurde in der folgenden Rechnung die Luftwechselzahl auf null gesetzt (entspricht dichtem Bad ohne Luftaustausch). Der Vergleich der Konvektions- und Diffusionsgeschwindigkeiten für zwei ausgewählte Bad-interne Verbindungen in vertikaler und horizontaler Richtung ist in Abb. 3.90 dargestellt. Die zwei anderen nicht gezeigten Verbindungen weisen ein nahezu identisches Verhalten auf. Auf Grund nicht abgeglichener Randbedingungen (höhengestaffelter Drücke) sind die Konvektionsgeschwindigkeiten zu Beginn so groß, dass die Diffusion vernachlässigt wird. Erst nach Abklingen der Oszillation fällt bei etwa 8.000 s die Konvektions- unter die Rn-222-Diffusionsgeschwindigkeit und ab dann ist die Gasdiffusion aktiviert.

Die berechneten Rn-222-Aktivitätskonzentrationen in den vier Bad-Bereichen sind in Abb. 3.91 gezeigt. In allen 4 Zonen wurden eine Anfangsaktivitätskonzentration von 10.000 Bq/m³ entsprechend der im EFH gemessenen verhältnismäßig hohen Konzentration im Bad definiert und die Radon-Quelle in der linken unteren Zone R1_UL unterstellt. Logischerweise steigt in der Quellzone R1_UL die Konzentration am schnellsten an; die anderen Bereiche folgen nach. Bis 8.000 s wird die Verteilung durch die wegen der Vernachlässigung der Höhenstaffelung unkorrekten Konvektionsströme bestimmt, wodurch z. B. die Konzentration in der am weitesten von der Quelle entfernten Zone R1_OR schneller ansteigt als in R1_UR. Wenn nach ca. 15.000 s die Diffusion dominiert,

entsprechen die Werte der Erwartung. Im Vergleich zum Radon-Transport durch Konvektionsströmen erfolgt die Verteilung durch Diffusion wesentlich langsamer, wobei dies im hier untersuchten Fall auf Grund der sehr starken Rn-222-Quelle und der dadurch resultierenden großen Konzentrationsunterschiede noch relativ schnell erfolgt. Zuletzt sei erwähnt, dass mit Annahme von LWZ = 0 trotz Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls die Konzentration in allen Zonen stetig steigt.

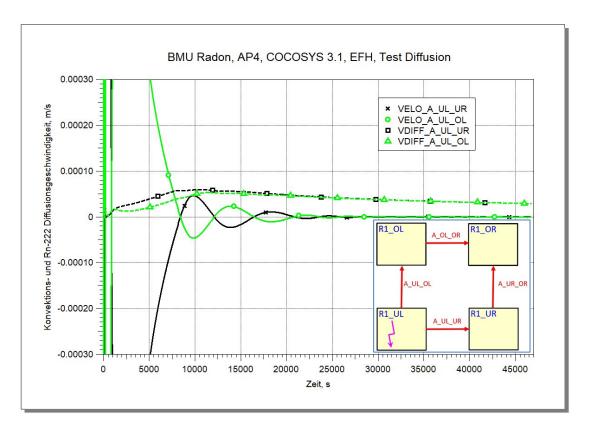


Abb. 3.90 COCOSYS, Diffusion Var_01, LWZ = 0, Konvektions- und Rn-222 Diffusionsgeschwindigkeiten in Verbindung A_UL_OL und A_UL_UR

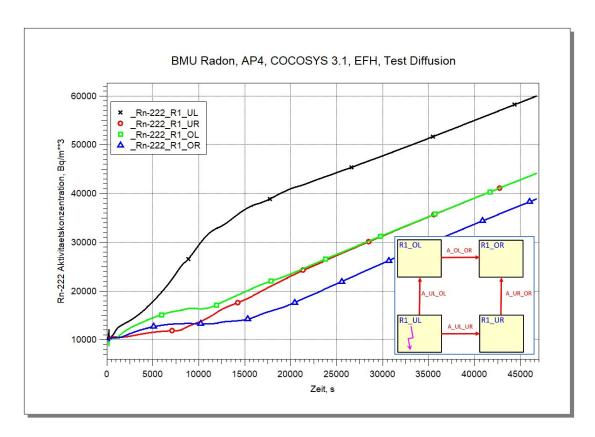


Abb. 3.91 COCOSYS, Diffusion Var_01, LWZ = 0, berechneter Verlauf der Rn-222 Aktivitätskonzentration in den 4 Raumbereichen des Bades

Daraufhin wurden die Anfangsdrücke entsprechend der geodätischen Höhe der Zonen gestaffelt. Um die anfänglichen Massenstromschwingungen zu verhindern, war es dabei notwendig, die Drücke vom ursprünglichen Messwert 99,4 kPa auf p_u = 99,4091 kPa und p_o = 99,3909 kPa zu setzten, d. h. im 0,1 Pa-Genauigkeitsbereich. Trotz der nunmehr über die gesamte Simulation konstanten Drücke treten numerisch bedingte Schwingungen auf, die in Abb. 3.92 bei 3.000 s und ganz besonders bei ~20.000 s zu sehen sind. Während in den stabilen Phasen im Prinzip keine Konvektionsströmungen auftreten und somit der gesamte Massenstrom durch eine Verbindung nur aus der Diffusion entsteht (Abb. 3.93), sind die numerisch bedingten Strömungen so stark, dass die Diffusion vernachlässigt wird. In diesen Phasen zeigen auch die von COCOSYS berechnete Raumkonzentrationen ein unrealistisches Verhalten. Aus der Abbildung ist auch abzulesen, dass es sich hier um Massenströme in einer Größenordnung von 10^{-18} kg/s handelt, währen in typischen Containment-Anwendungen Massenströmen im Bereich von Gramm bis zu einigen Tonnen pro Sekunde auftreten.

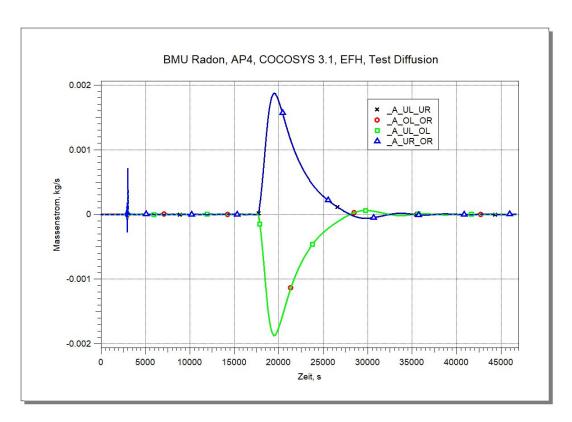


Abb. 3.92 COCOSYS, Diffusion Var_02, Druckstaffelung, Konvektions- und Rn-222 Diffusionsgeschwindigkeiten in Verbindung A_UL_OL und A_UL_UR

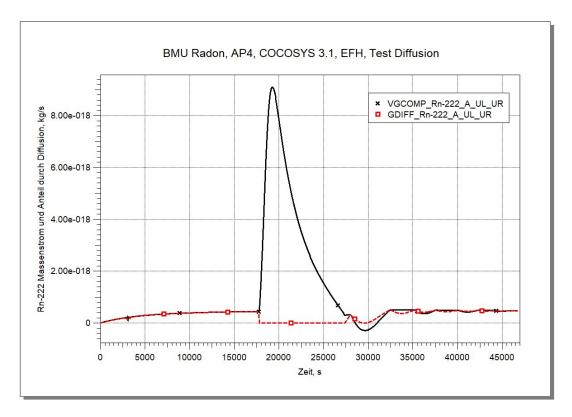


Abb. 3.93 COCOSYS, Diffusion Var_02, Druckstaffelung, Verlauf der Rn-222 Aktivitätskonzentration in den 4 Raumbereichen des Bades

Die Verlegung der Rn-Quelle in einen anderen Raumbereich (Zone R1_OR) zeigt bzgl. der Diffusion die erwarteten Ergebnisse (Aktivitätskonzentration in dieser Zone steigt am schnellsten). Auch in dieser Rechnung traten Schwingungen auf, allerdings in anderen zeitlichen Phasen und mit anderen Amplituden.

Da in COCOSYS die Strömungen neben Druckdifferenzen auch von Dichteunterschieden getrieben werden, wurde die anfängliche relative Luftfeuchte (und damit die Atmosphärendichte) höhengestaffelt. Alternativ wäre auch die Staffelung der Raumtemperatur möglich gewesen. Die anfängliche Luftfeuchte wurde bei oben genannten gestaffeltem Anfangsdruck von $r=51\,\%$ auf $r_u=50,9966\,\%$ und $r_o=50,9934\,\%$ angepasst. Obwohl in der damit durchgeführten Simulation die Drücke in den 4 Bereichen konstant blieben, konnte das Auftreten von numerisch bedingten Konvektionsströmen zwischen den oben und unten liegenden Zonen nicht verhindert werden, d. h. die Anpassung der Luftfeuchte war nicht zielführend. Diese Strömungen haben erheblichen Einfluss auf die berechneten Aktivitätskonzentrationen, d. h. die Zoneninhalte werden schnell durchmischt wie in Abb. 3.94 bei ~38.000 s gezeigt.

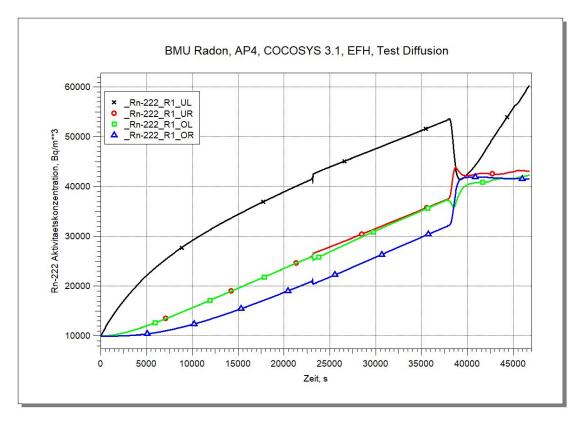


Abb. 3.94 COCOSYS, Diffusion Var_04, Staffelung der Anfangsluftfeuchte, berechnete Rn-222 Aktivitätskonzentrationen

Letztendlich konnten die numerisch bedingten Konvektionsströme und deren Verläufe nur durch weitere signifikante Verschärfung der Fehlergrenze zur Integration den Rn-222 - Masse (T_GAS_CLI entsprechend Kapitel 3.4.2.1, in Var_08 von 1·10⁻¹⁵ auf 1·10⁻¹⁹ kg) auf akzeptabel geringe Werte unterdrückt werden.

Als Schlussfolgerungen aus diesen Testrechnungen kann zusammenfassend festgestellt werden:

- Die Diffusionssimulation in COCOSYS kann prinzipiell auch für Radon-Verteilungsuntersuchungen angewendet werden.
- Bei signifikanten Luftwechselzahlen (im Beispiel ~0,1 h-1) sind die Konvektionsströme aber so groß, dass die Diffusion keine Rolle spielt (in COCOSYS vernachlässigt wird). Radon-Verteilung/-vermischung durch Konvektion ist deutlich schneller als durch Diffusion. Bei Vorgabe einer Diffusionskonstante größer Null wird die Diffusion bei Relevanz von COCOSYS automatisch mit berechnet. Dies kann anhand der Ausgabevariable GDIFF überprüft werden.
- Diffusion kann bei virtuell unterteilten Räumen oder in durch große Strömungsflächen verbundenen Räumen von Einfluss sein, bei Strömungen durch Luftspalte oder Türschlitze eher nicht. In den aktuellen COCOSYS-Nachrechnungen wird auf Grund unklarer Randbedingungen (exakte Lage und geometrischen Daten zu Verbindungen sowie zeitabhängige Öffnungszustände, Wetterdaten, Heizung als Energiequellen usw.) für die relevanten Räume nur jeweils eine Modellzone angesetzt.
- Wie bei der Simulation der Radon-Verteilung allgemein sind für allein auf Diffusion beruhende Transportvorgänge neben speziellen Angaben (Höhe der Zonenmittelpunkte) extrem genaue Anfangs-/Randbedingungen wie höhengestaffelte Drücke im Pascal-Bereich erforderlich. Dies stellt hohe Anforderungen an die Messtechnik, in den GRS-eigenen Messungen ist der Druck nur auf 10 Pagenau. Ohne parallele Konvektionsströme ist für eine stabile Lösung außerdem mit sehr kleiner Fehlergrenze für die Integrationsroutine zu arbeiten (T_GAS_CLI). Bei der Nutzung von komplexen Nodalisationen geht dies zu Lasten der Rechenzeit.

3.6.3 COCOSYS-Nachrechnungen zum Messobjekt 2 (EFH mit Gewölbekeller)

In diesem Kapitel wird eine Kurzbeschreibung der COCOSYS-Datensätze zum Messobjekt 2 – einem Einfamilienhaus mit Gewölbekeller – gegeben (siehe Kapitel 3.5.3) und die Analyseergebnisse, die mit den verschiedenen Modellen erzielt wurden, beschrieben. Im Weiteren wird das Messobjekt mit GWK (steht für Gewölbekeller) bezeichnet.

3.6.3.1 Kurzbeschreibung der COCOSYS-Datensätze zum GWK

Basis bei der Bestimmung für die in den COCOSYS-Datensätzen erforderlichen Geometriedaten wie Volumina, Raumhöhen, Bodenflächen und Flächen von Überströmöffnungen waren die Informationen, die vor und während der Messungen im Februar 2020 zusammengetragen wurden und im Kapitel 3.5.3 beschrieben sind. Messwerte stehen für 5 Räume zur Verfügung. Die Untersuchungen mit dem COCOSYS-Code konzentrierten sich zunächst auf den Gewölbekeller und die Räume im Erdgeschoss und wurden dann auf alle 5 Räume erweitert.

Für die Nachrechnungen der Rn-Konzentration im Gewölbekeller und im Vorratsraum wurde das in Abb. 3.95 dargestellte 4-Zonen-Modell entwickelt. Die Zone K0 modelliert den Gewölbekeller, V1 den unmittelbar darüber gelegenen Vorratsraum. K0 stellt den einzigen Freisetzungsort von Radon in diesem Einfamilienhaus dar. ENVIR-I und ENVIR-O modellieren zwei Umgebungszonen. Im Gegensatz zu den Nachrechnungen der Blower-Door-Versuche im Kapitel 3.2 und den Analysen zum EFH im Kapitel 3.6.2 wurde in den nachfolgend beschriebenen COCOSYS-Rechnungen zur Bestimmung der Rn-Aktivitätskonzentration nicht die aus den Messdaten ermittelte Luftwechselzahl, sondern folgender Ansatz verwendet: Mit der aus den Messungen gefitteten Rn-Quellstärke (siehe Kapitel 3.5.4.6) und den zum Zeitpunkt der Messungen herrschenden Luftdrücken und Windlasten stellen sich Strömungen ein, die zur Verteilung des Radons in den Räumen führen. Die Start- und Randbedingungen wurden soweit vorhanden den gemessenen Parametern entsprechend gesetzt. Das in diesen Rechnungen zunächst verwendete 4-Zonen-Modell (Abb. 3.95) wurde im Weiteren leicht modifiziert, um eine bessere Übereinstimmung von Messung und Rechnung zu erzielen. Einzelheiten zu Modifikation werden im den Kapiteln 3.6.3.2 und 3.6.3.3 zu den Analyseergebnissen gegeben. Zu den Verbindungen J0 und J2 liegen keine Angaben vor. Die Eingabedaten hierzu, wie

z. B. Querschnittsflächen und Strömungsverlustbeiwerte sind Ergebnis von Abschätzungen. Wie schon in den Analysen zum EFH (Kapitel 3.6.2) sind die Berechnungen mit adiabaten Bedingungen erfolgt, d. h. ohne Berücksichtigung des Wärmaustausches mit Böden, Decken und Wänden.

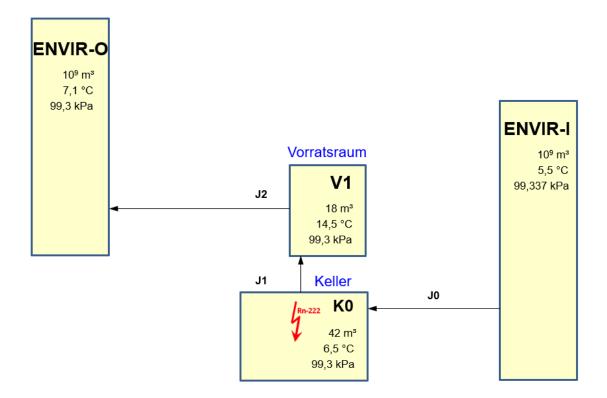


Abb. 3.95 COCOSYS, Nachrechnung GWK, 4-Zonen-Modell

In den abschließenden **Nachrechnungen der Rn-Konzentration in allen 5 Räumen** wurden zusätzlich zum 4-Zonen-Modell der Flur (Zonenbezeichnung F1) und das Kinderzimmer (K1) im Erdgeschoss sowie der Flur im Obergeschoß (F2) aufgenommen, sodass jetzt Modellzonen auf 3 Ebenen simuliert sind. Dazu wurde die Nodalisation in mehreren Schritten schließlich auf 8 Zonen und 9 Verbindungen erweitert (Abb. 3.96). Die erforderlichen geometrischen Daten für F1, K1 und F2 basieren wiederum auf den in Kapitel 3.5.3 beschrieben Daten. In Erd- und Obergeschoss gab es je zwei weitere Zimmer, die jedoch nicht betreten werden durften und somit nicht mit Messgeräten ausgestattet werden konnten. Zu ihnen liegen auch keine Maße vor. Dieser Umstand erhöht die Unzulänglichkeiten an für genaue Nachrechnungen notwendigen Daten.

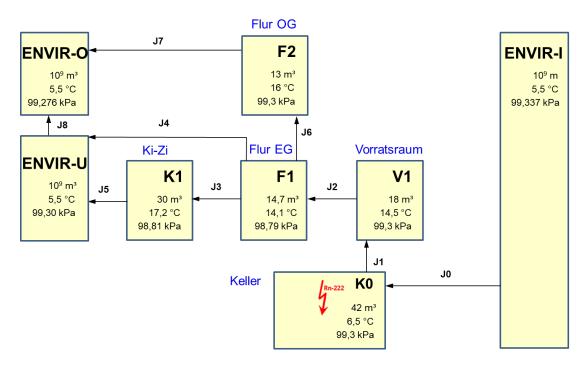


Abb. 3.96 COCOSYS, Nachrechnung GWK, erweiterte 8-Zonen-Nodalisation

In Bezug auf die Verbindungen zwischen den Räumen liegen lediglich für J1 und J2 die Überströmquerschnittsflächen vor. Für alle anderen Verbindungen wurden Annahmen getroffen. Laut Messprotokoll waren die Türen zum Kinderzimmer und Flur im Obergeschoß geschlossen (Verbindungen J3 und J6), sodass hier nur kleine Spaltflächen als Überströmöffnungen definiert wurden. Im Unterschied zu den ersten Rechnungen zum Keller K0 und Vorratsraum V1 entsprechend Abb. 3.95 stellen die Umgebungszonen ENVIR-O und ENVIR-U hier die echte Umgebung des Gebäudes dar (die Unterteilung in ENVIR-O und ENVIR-I ist in Kapitel 3.6.3.3 diskutiert). Für sie wurden als Anfangsbedingungen die Druck-, Temperatur- und Feuchtewerte nach Meteosat (siehe z. B. Abb. 3.97 und Abb. 3.100) verwendet, wobei die zeitlichen Änderungen z. B. des Druckes in ENVIR-I hier nicht berücksichtigt sind.

Alle Nachrechnungen der Rn-Aktivitätskonzentration im GWK wurden für einen 22-Stunden-Gang vom 19. zum 20. Februar 2020 durchgeführt (Fitvarianten 30 und 4 in Tab. 3.18). Hierbei ist jedoch zu bemerken, dass die Messergebnisse mit großer Wahrscheinlichkeit dadurch beeinflusst wurden, dass sich in einem der Räume, auf die nicht zugegriffen werden durfte, ein Bewohner befand (entgegen der Absprache mit dem Hauseigentümer war das Haus während der Messdauer leider nicht unbewohnt). Das Öffnen und Schließen von Türen und Fenstern während der Messperiode konnte nicht protokolliert worden.

3.6.3.2 Nachrechnung der Rn-222-Aktivitätskonzentration in Keller und Vorratsraum für einen 22-Stunden-Gang

Im Rahmen der Untersuchungen wurden das 4-Zonen-Model in mehr als 20 Nachrechnungen mit dem COCOSYS-Code angewendet. Tab. 3.26 gibt einen Überblick über wesentliche Datensatzänderungen in 8 ausgewählten Varianten. Aufgrund des Ansatzes dieser Nachrechnungen, die Analysen auf Luftdrücken (und nicht wie in den Nachrechnungen zum EFH im Kapitel 3.6.2 auf Luftwechselzahlen) basieren zu lassen, spielen die Anfangsdrücke eine entscheidende Rolle, was auch klar in Tab. 3.26 zum Ausdruck kommt. Schwerpunkt lag auf den berechneten Rn-222-Aktivitätskonzentrationen in den Räumen/Zonen K0 und V1 und dem Vergleich mit den hier gemessenen Werten.

Tab. 3.26 COCOSYS-Variantenrechnung zum GWK, Nachrechnung eines 22-Stunden-Ganges für Gewölbekeller und Vorratsraum

Var. Nr.	Daten- satz	Rn-222 Quellstärke in K0, Bq/m³h	Anfangsdruck in		Anfangsakt		
			ENVIR-I , Pa	ENVIR-O , Pa	konzentra- tion in K0/V1, Bq/m³	Kommentar	
1	Var_G01	2.930 / 160 ¹	101.300	99.300	219,5 / 0		
2	G02	- " -	99.500	- " -	- " -	wie G01 mit geändertem Anfangsdruck in ENVIR-I	
3	G03	- " -	99.325	- " -	219,5 / 103	wie G02 mit Rn 222 - Anfangsaktivitätskonzentration auch in V1 und geändertem Anfangsdruck in ENVIR-I	
4	G07	- " -	99.340	- " -	219,5 / 0	wie G01 mit geändertem Anfangsdruck in ENVIR-I	
5	G09	- " -	99.337	- " -	219,5 / 103	wie G03 mit geändertem Anfangsdruck in ENVIR-I	
6	G11	- " -	99.337 / 99.335 ^{1,2}	- " -	- " -	wie G09 mit zeitabhängigem Anfangsdruck in ENVIR-I (simuliert durch 2 Zonen ENVI-1, ENVI-2)	
7	G12	- " -	99.337 / 99.335 ^{1,2}	- " -	- " -	wie G11 mit zusätzlicher geschlossener Verbindung J03 (RUPTURE) zwischen ENVI-1, ENVI-2	
8	G13	- ,, -	99.337 / 99.345 ^{1,2}	- " -	- ,, -	wie G12 mit geändertem Anfangsdruck in ENVI-2	

<u>Legende</u>:

1 - 1. Zeitintervall 0 - 50.400 s, 2. Intervall 50.401 - 79.200 s entsprechend T₁, T₂ und T₃ in Abb. 3.97

² - zeitabhängige Ankopplung (im 1. und 2. Zeitintervall) von ENVI-1 bzw. ENVI-2

Wie auch in den in Kapitel 3.6.2 beschriebenen Nachrechnungen stellt die aus den Messdaten gefittete Rn-222-Quellstärke einen wesentlichen Eingabeparameter dar. In den Nachrechnungen zum GWK wird die Radon-Quelle nur im Keller K0 angenommen. Eine Auswahl der mit dem 4-Zonen-Modell berechneten Verläufe der Rn-222-Aktivitätskonzentrationen ist in Abb. 3.98 und Abb. 3.102 dargestellt.

In Variante G01 wurde zunächst der Luftdruck in der Umgebungszone ENVIR-I auf den unter https://meteostat.net/de für Freital zum Zeitpunkt 19.2.2020 um 12:00 Uhr gegebenen Wert von 101.300 Pa gesetzt (entspricht Zeitpunkt T₁, siehe Abb. 3.97). Wohingegen für die Umgebungszone ENVIR-O (hier als Umgebung des Vorratsraumes innerhalb des Gebäudes zu verstehen) ein Luftdruck angenommen wurde, der dem im Keller und im Vorratsraum gemessenen entspricht. Damit werden die in Abb. 3.98 durch die blauen Kurven dargestellten Verläufe der Rn-Aktivitätskonzentration berechnet. Sie zeichnen sich im Vergleich zu den Messungen durch viel zu geringe Werte aus, die sich daraus ergeben, dass durch relativ hohe Druckdifferenzen zur Umgebung ENVIR-I eine großer Anteil der Atmosphäre in Keller und Vorratsraum schnell durch nicht radonhaltige Luft ersetzt wird.

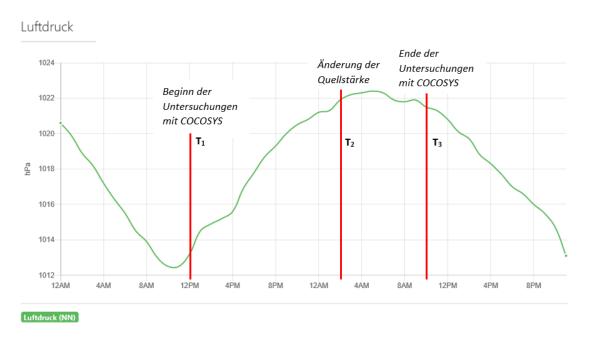


Abb. 3.97 Luftdruck (bezogen auf Normalnull) in Freital am 19./20.2.2020 nach https://meteostat.net/de

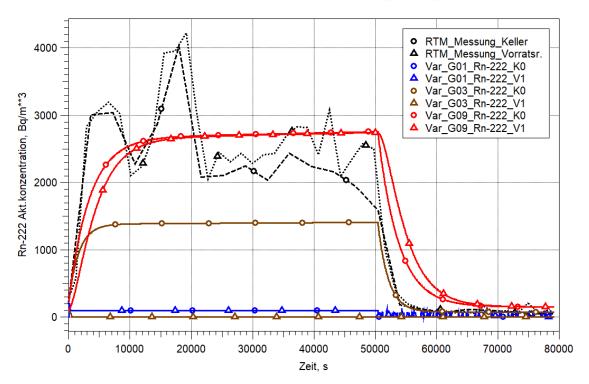


Abb. 3.98 COCOSYS, Nachrechnung GWK, 4-Zonen-Modell, Var_G01, G03 und G09

Bei zu geringen Druckdifferenzen wie in Variante G03 ergeben sich wiederum Atmosphärendichten, die zusammen mit den vorliegenden geodätische Verhältnissen in den Verbindungen J0, J1 und J2 (siehe Abb. 3.95) zu negativen Massenströmen führen, also Strömungen in Richtung ENVIR-I (siehe braun dargestellte Massenströme in Abb. 3.99).

Basierend auf der über https://meteostat.net/de für den Messzeitpunkt bestimmten mittleren Windgeschwindigkeit von ca. 27 km/h (Abb. 3.100) und auf der unter Verwendung von https://www.google.com/maps ermittelten Höhenlage von 190 m (über Normalnull) für das EFH mit Gewölbekeller wurde schließlich für diese Verhältnisse ein Umgebungsdruck von 99.337 Pa (inkl. 37 Pa für den Winddruck nach https://de.wikipedia.org/wiki/Winddruck) berechnet. Die Plausibilität dieses Wertes wird durch die von der GRS aufgenommenen Messwerte innerhalb des Hauses bestätigt (Druckwerte von 98.970 bis 99.300 Pa). Folglich ist in Variante G09 ein Umgebungsdruck (Zone ENVIRI) von 99.337 Pa angewendet worden. Die hiermit berechneten Aktivitätskonzentrationen in den Zonen K0 und V1 sind in Abb. 3.98 rot dargestellt und zeigen eine relativ gute Übereinstimmung mit den Messwerten.

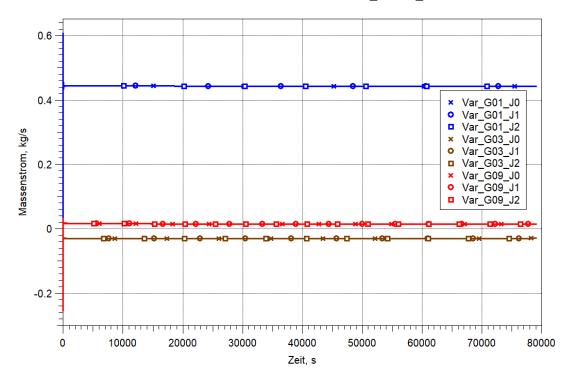


Abb. 3.99 COCOSYS, Nachrechnung GWK, 4-Zonen-Modell, Var_G01, G03 und G09, Massenstrom durch Verbindungen J0, J1, J2

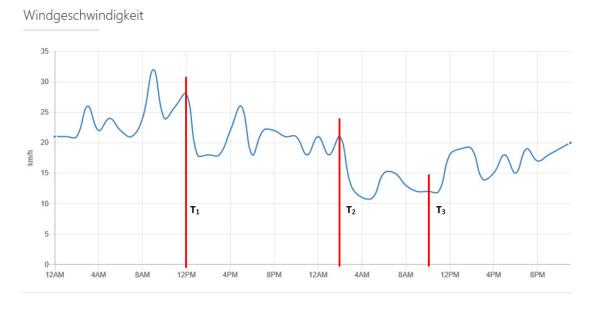
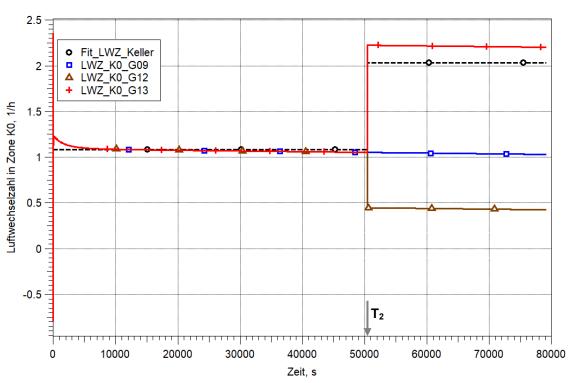


Abb. 3.100 Windgeschwindigkeit in Freital am 19./20.2.2020 nach https://meteostat.net/de

Zur eingehenderen Prüfung dieser Ergebnisse wurde der Vergleich der aus den Messwerten gefitteten Luftwechselzahl mit der aus den COCOSYS-Ergebnissen ermittelten LWZ herangezogen. Abb. 3.101 zeigt, dass sich in Variante G09 im Gegensatz zum

gefitteten Wert die Luftwechselzahl im langzeitigen Bereich nicht ändert, jedoch bis zum Zeitpunkt der Änderung der Quellrate T₂ sehr gut übereinstimmt.



BMU Radon, AP4, COCOSYS 3.1, GWK_Winter_2020

Abb. 3.101 COCOSYS, Nachrechnung GWK, 4-Zonen-Modell, Var_G09, G12 und G13, Luftwechselzahl im Keller

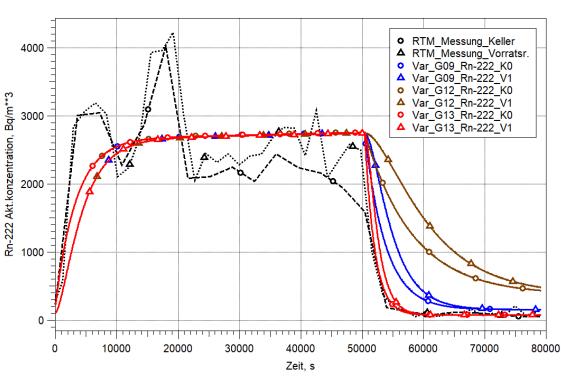
Um eine bessere Übereinstimmung ab T_2 zu erzielen, ist in Variante G12 für die Umgebung ENVI-2 der Druck von 99.337 Pa zum Zeitpunkt T_2 begründet durch die abnehmende Windstärke (siehe Bereich zwischen T_1 und T_2 in Abb. 3.100) auf **99.335 Pa** reduziert worden.

Bemerkung: Auf Grund der Modellierungsmöglichkeiten in COCOSYS musste dazu die in vorausgegangenen Varianten verwendete Umgebungszone ENVIR-I durch zwei geometrisch identische Zonen (ENVI-1 und ENVI-2) mit unterschiedlichen Drücken ersetzt werden. Zum Zeitpunkt T₂ wurde dann die Verbindung J0 (siehe Abb. 3.95) von ENVI-1 auf ENVI-2 umgeschalten.

Wie die braunen Kurvenverläufe der Rn-222-Aktvitätskonzentrationen in Abb. 3.102 zeigen, wird infolgedessen die Differenz zwischen Messung und Rechnung im Zeitbereich ab T_2 sichtbar größer und die berechnete Luftwechselzahl verhält sich gegenläufig zur gefitteten (Abb. 3.101).

Nimmt man jedoch zum Zeitpunkt T₂ aufgrund der in Abb. 3.97 dargestellten gemessenen Druckverläufe eine Erhöhung des Außendruckes auf **99.345 Pa** an, ergibt sich eine wesentlich bessere Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung, wie mit den roten Kurvenverläufen für die Variante G13 in Abb. 3.102 gezeigt wird. Unter diesen Bedingungen wird auch für die Luftwechselzahl im Keller ab T₂ ein Verlauf berechnet, der dem gefitteten Wert nahekommt (rote Kurve in Abb. 3.101).

Eine weitere Annäherung zwischen gefitteten und berechneten Werten durch Verringerung des Umgebungsdruckes ab T₂ wäre möglich. Darauf wurde jedoch aufgrund der Vielzahl an Ungenauigkeiten im für die COCOSYS-Analysen vorliegenden Datenmaterial (siehe Kapitel 3.6.4.1) bewusst verzichtet.

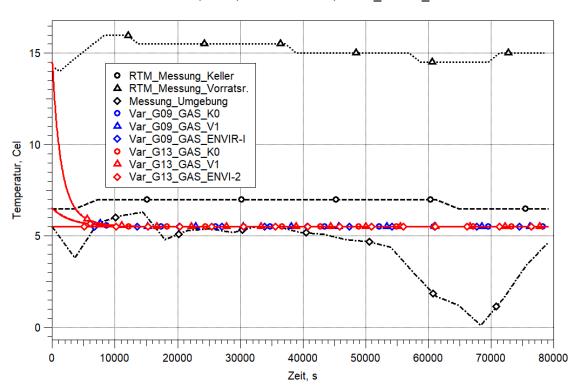


BMU Radon, AP 4, COCOSYS 3.1, GWK_Winter_2020

Abb. 3.102 COCOSYS, Nachrechnung GWK, 4-Zonen-Modell, Var_G09, G12 und G13

Zum Abschluss der GWK-Nachrechnungen mit dem 4-Zonen-Modell soll noch eine Aussage zum Vergleich der gemessenen und berechneten Temperaturverläufe im Keller und im Vorratsraum getroffen werden. Der Vergleich wird in Abb. 3.103 gezeigt. Wie klar aus der Abbildung hervorgeht, bestimmt unter den gewählten Randbedingungen die Anfangstemperatur in der Umgebung (ENVIR-I bzw. ENVI-1 und ENVI-2) die Temperaturen

in Keller und Vorratsraum, was nicht den dort gemessenen Werten entspricht. Wesentlicher Grund dafür ist neben dem erwähnten adiabaten Ansatz im Modell, dass keine Wärmquellen bzw. -senken modelliert wurden, da hierzu keine Informationen vorliegen.



BMU Radon, AP 4, COCOSYS 3.1, GWK_Winter_2020

Abb. 3.103 COCOSYS, Nachrechnung GWK, 4-Zonen-Modell, Var_G09 und G13, Temperaturverläufe

3.6.3.3 Nachrechnung der Rn-222-Aktivitätskonzentration in allen 5 Messräumen für einen 22-Stunden-Gang

Basierend auf den Ergebnissen aus dem vorigen Kapitel 3.6.3.2 war hier die Zielstellung, die gemessenen Rn-222-Aktivitätskonzentrationen in allen 5 GWK-Räumen auf 3 Ebenen nachzurechnen. Dazu wurde das 4-Zonenmodell in mehreren Schritten schließlich auf 8 Zonen erweitert (Abb. 3.96). Im Rahmen dieser Erweiterung wurden folgende Erkenntnisse gewonnen und umgesetzt:

 Der Druck in den Zonen K1 und F2 gleicht sich über die Verbindungen J3 und J6 innerhalb weniger Sekunden dem in F1 an, sodass danach in diesen Verbindungen praktisch keine Strömungen mehr auftreten und im Gegensatz zur Messung kein Radon in diese Zonen gelangt. Die Diffusion durch die Türspalten ist um Größenordnungen zu gering. Nur die Annahme von Undichtheiten zwischen diesen Räumen und der Umgebung (Verbindungen J5 und J7) und damit die permanente Nachströmung von Radon aus F1 bewirken den gemessenen Anstieg.

- Anfänglich wurden alle Undichtheiten des Flures F1 in die Verbindung J6 zum Flur F2 gelegt, was aber zu extremen Abweichungen der berechneten Rn-222-Konzentrationen führte. Nur durch Definition der Verbindung J4 als direkten Stömungspfad in die Umgebung konnten diese vermieden werden.
- Die Anbindung von K1 und F2, die auf unterschiedlichen Höhen liegen, an die Umgebung ENVIR-O verletzt die COCOSYS-Nodalisationsregeln und würde zu einer numerisch bedingten Zirkulationsströmungen in Richtung F2 -> ENVIR-O -> K1 -> F1 -> F2 führen. Deshalb wurde die Umgebung in die 2 Zonen ENVIR-O und ENVIR-U aufgeteilt, die auf der gleichen Höhe wir F2 bzw. K1/F1 liegen. Zusätzlich machte sich die Definition eines um 4 Pa geringeren Anfangsdruckes in der höher gelegenen Zone ENVIR-O notwendig (siehe Abb. 3.96).
- Zur besseren Übereinstimmung zwischen gemessenen und gerechneten Rn-222-Aktivitätskonzentrationen wurden im Verlaufe der Nachrechnungen folgende Eingabewerte geändert bzw. justiert:
 - Verschärfung des Fehlerkriteriums T_GAS_CLI (entsprechend Kapitel 3.4.2.1)
 von 10⁻¹⁷ auf 10⁻¹⁹ kg, um den Rn-222 Masseverlust zu reduzieren.
 - Reduzierung der Länge der Verbindungen J0 bis J7 auf 0,1 m. Dies ist insbesondere für die offene Klappe (J1) und die offene Tür (J2) abweichend zur gängigen Praxis in COCOSYS, wo (bei üblicherweise großen Druckgradienten) durch größere Längen die Trägheit des Gases berücksichtigt wird. Dies ist Konsequenz aus den Untersuchungen zur Gasdiffusion (siehe Kapitel 3.6.2.5).
 - Verwendung der Radon-Anfangskonzentration in allen Räumen, was insbesondere in K1 mit ca. 900 Bq/m³ wichtig ist. Da nur ein bzw. zwei Messwerte pro Stunde aufgenommen werden konnten, wurden die Anfangswerte für den Beginn der Rechnung (T₁ = 0 s, siehe Tab. 3.26) linear interpoliert. Die lineare Interpolation ist eine grobe, aber die einzige Alternative gegenüber der Verwendung des letzten Messpunktes (dies bedeutet z. B. für V1 einen Erhöhung von 103 auf 277 Bq/m³). Da die Umgebungsaktivität von Rn-222 nicht gemessen wurde, ist sie als Null angenommen. Dies kann aber z. B. an der Außenwand

des Kellers K0 in der Nähe der Undichtheiten und der damit zuströmenden Luft zu einer Unterschätzung der Konzentration im Gebäude führen.

- Der signifikante Abfall der gemessenen Rn-222 Konzentrationen in V1 und F1 bei 50.000 s erfolgte in der Rechnung zu spät. In Übereinstimmung mit der gefitteten Quellstärke (Rn-222 Quelle) im Keller K0 wurde zunächst wie bisher der Wechsel der Quellstärke zum Zeitpunkt T₂ = 50.400 s verwendet. Dem Fit zugrundeliegende Messwerte sind dabei zu den Zeitpunkten 46.800 und 50.400 s verfügbar. Damit ist das Verschieben des Wechsels der Quellstärke innerhalb dieses Intervalls legitim (hier zu 49.400 s), was zu einer besseren Übereinstimmung mit den Messwerten führte.
- Die Undichtheit des Kinderzimmers K1 wurde so gefittet, dass im Zeitbereich 0 bis 50.000 s die beste Übereinstimmung erreicht wurde. Von ursprünglich 0,01m² (identisch zu J4) wurde die entsprechende Verbindung J5 auf 0,0003 m² reduziert.
- Für die Undichtheit des Flures F2 wurde auf gleiche Weise für den Zeitbereich 0 bis 50.400 s ein etwas kleinerer Wert von 0,0002 m² bestimmt. Der anschließende stärkere Abfall in F2 ist nicht über eine allgemeingültige Fläche zu erreichen; hierzu wären Druckdifferenz-Änderungen oder Türöffnungen erforderlich.

Die Rn-222-Aktivitätskonzentrationen der abschließend durchgeführten COCOSYS-Nachrechnung sind in Abb. 3.104 mit den gemessenen Verläufen verglichen. Insgesamt ist eine gute Übereinstimmung erreicht worden. Als wesentlichen Unterschied zwischen Rechnung und Messung sind die Messspitzen insbesondere bei 5.000 s und 18.000 s zu nennen. Die geringe zeitliche Dichte der Messungen ist oben bereits erwähnt worden. Diese Spitzen können in COCOSYS wegen fehlender Randbedingungen nicht reproduziert werden. Als Ursachen werden Spitzen in der Rn-222-Quelle im Keller, Schwankungen im Umgebungsdruck und/oder der Windgeschwindigkeit und/oder nicht protokollierte Öffnungs- und Schließvorgänge von Türen/Fenstern im Haus vermutet. Aus dem gleichen Grund tritt auch im Keller K0 ab 35.000 s im Vergleich zu V1 und K1 ein wesentlich früherer Abfall der Konzentration auf. Zuletzt wird somit auch die starke Reduzierung der Konzentration im oberen Flur F2 nach ca. 53.000 s nicht reproduziert.

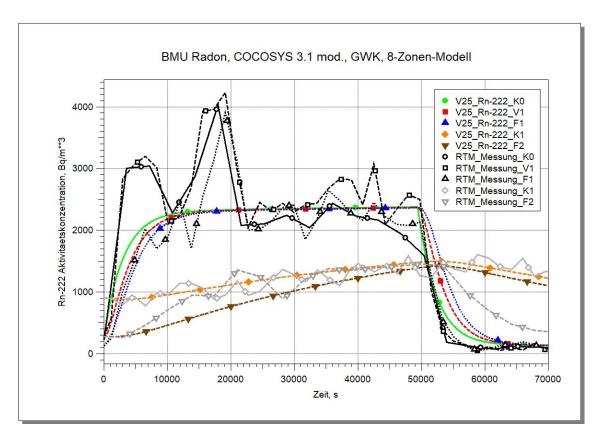


Abb. 3.104 COCOSYS, Nachrechnung GWK, Var_25, Vergleich der gemessenen und berechneten Rn-222-Aktivitätskonzentration in allen 5 Räumen

Die "Unbestimmtheit" des Simulationsmodells lässt sich an der Anzahl der unsicheren Variablen und Eingabedaten verdeutlichen (nicht genau oder unzureichend verfügbar), die für diese letzte Rechnung mit 8 Zonen und 9 Verbindungen abgeschätzt wurde:

14 unsichere Variablen

Relevante Variablen sind Druck (Druckdifferenz außen/innen inkl. Windgeschwindigkeit), Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wandoberflächen und Materialien, Wärmequelle, Verbindungsfläche und -länge sowie Strömungsverlustbeiwert der Undichtheiten, Lage/Verteilung der Undichtheiten, Öffnungszustand der Türen/Fenster, Rn-222-Quellstärke, Rn-222-Umgebungsaktivität

Die nicht exakt bestimmbaren Raumvolumina wurden hier als von untergeordneter Bedeutung eingeschätzt und nicht mitgezählt.

33 unsichere Eingabedaten

Hierzu wurde die Anzahl der notwendigen Eingabedaten im COCOSYS-Datensatz für die unsicheren Variablen aufsummiert, z. B. Druck in Umgebung EINVIR-I und ENVIR-O ergibt 2, nicht simulierte Undichtheiten vom Vorratsraum V1 (Fläche, Länge, Zeta) = 3. Auf Grund des adiabaten Modells sind Wandoberflächen und Materialien in allen 5 Räumen nicht berücksichtigt.

3.6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der COCOSYS-Validierung

Anhand von der GRS erhobener Messwerte zu Rn-222-Aktivitätskonzentrationen in zwei EFH in Dresden-Freital sind erste Schritte zur COCOSYS-Validierung für die Radonverteilung in Gebäuden durchgeführt worden. Während der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der hiermit verbundenen Nachrechnungen der gemessenen Konzentrationsverläufe sind gewisse Unzulänglichkeiten in den Randbedingungen und Daten identifiziert worden. Sie werden im folgenden Kapitel aufgeführt. Im Anschluss daran wird ein Resümee aus den im Rahmen des Vorhabens durchgeführten COCOSYS-Analysen gezogen.

3.6.4.1 Qualität des Datenmaterials für die COCOSYS-Nachrechnungen

Im Hinblick auf die Durchführung weiterer auf eine Prognostizierung von Radon-Verteilungsprozessen mit dem COCOSYS-Code ausgerichteter Forschungsarbeiten in einem eventuellen Anschlussvorhaben werden neben der Einschätzung des vorhanden Datenmaterials für die COCOSYS-Analysen auch nicht vorliegende Informationen/Daten, die jedoch für eine genaue Modellierung der Verteilungsprozesse notwendig sind, aufgezählt.

Die Qualität des Hauptparameters der Validierungsuntersuchungen - der in beiden Gebäuden gemessenen Radon-Aktivitätskonzentration - ließ in zwei Punkten wesentliche Probleme erkennen:

• die Messfrequenz:

Sie war für die Nachrechnung zum "EFH" (Kapitel 3.6.2) mit 15 Minuten im Vergleich zur Bandbreite der Ergebnisse akzeptabel. Das kann für die Messungen im "GWK" (Kapitel 3.6.3) nicht bestätigt werden. Mit einer Frequenz von einem Messwert pro 30 oder sogar 60 Minuten ist die Abfragegenauigkeit bei der z. B. in Abb. 3.102 dargestellten Ergebnisbandbreite zu ungenau.

- die Protokollierung von prozessbeeinflussenden Vorgängen im Haus: Sämtliche Messungen der Aktivitätskonzentration unterlagen Vorgängen bzw. Handlungen im Haus, die entweder lückenhaft oder überhaupt nicht beschrieben wurden (konnten). Somit besteht Raum für die Annahme einer Reihe physikalisch plausibler Randbedingungen. Jedoch sind derartige - zielführend für eine gute Übereinstimmung berechneter und gemessener Konzentrationen - getroffene Annahmen einer korrekten Code-Validierung hinderlich und schmälern ihre Aussagekraft. Beispielgebend sollen hier erwähnt werden:
 - (von den Hausbewohnern) nicht (exakt) protokollierte Bewegungen im Haus, die das Öffnen und Schließen von Türen, Fenstern ggf. Katzenklappen betreffen und maßgeblich zur Störung von Strömungsvorgängen führen, die bei permanent geöffneten oder geschlossenen Gebäudepfaden vorherrschen. Mit der Annahme von zeitabhängigen Luftwechselzahlen oder Überströmquerschnitten können diese Unzulänglichkeiten spekulativ behoben werden. Für eine Prognostizierung der Vorgänge wird diese Herangehensweise als unzulässig angesehen.
 - in den zur Verfügung gestellten Materialien nicht erwähnte luftströmungsbeeinflussende Systeme in den Häusern, wie Heizungen und Lüftungen. Im Fall "GWK" sind z. B. die festgestellten Temperaturunterschiede zwischen dem zur Zeit der Messungen nicht bewohnten Kinderzimmer im Erdgeschoss (bis über 18 °C) und der Umgebung (zwischen 0 und 8 °C) mit großer Wahrscheinlichkeit auf eine Heizung zurückzuführen. Entgegen der Absprache mit dem Inhaber es Hauses war das Haus während der Messdauer bewohnt und somit vermutlich auch eine Heizung aktiv.

Neben diesen Problemen haben sich während der Arbeiten mit dem COCOSYS-Code weitere Fragen zu den in den Gebäuden und deren Umgebung zum Zeitpunkt der Messungen herrschenden Randbedingungen ergeben. Sie betrafen beispielsweise:

- das Fehlen von Messwerten zur Radon-Aktivitätskonzentration in der Umgebung.
 Somit führt in den vorliegenden Rechnungen die in die Gebäude eintretende "saubere" Luft zu einer Überschätzung der Verdünnung der Aktivitätskonzentration im Gebäude.
- unzureichende Angaben zu Undichtheiten und Öffnungszuständen von Türen, Fenstern u. a. (wie Katzenklappen). Grund hierfür ist, dass es den Hausbewohnern nicht zumutbar ist, diese Daten während der Messzeiträume exakt zu erfassen (in Abwesenheit der GRS-Experten).

Da sämtliche Angaben für die Nachrechnungen erforderlich waren, mussten hierfür Annahmen getroffen werden, die nicht ausreichend untermauert werden konnten. Bezüglich der letzten Nachrechnung zu den 5 GWK-Räumen wurden 14 Parameter und damit 33 Eingabedaten als unsicher eingeschätzt.

3.6.4.2 Resümee aus den durchgeführten COCOSYS-Nachrechnungen gemessener Rn-222 Aktivitätskonzentrationen

Eine vorläufige Zusammenfassung der Anwendung von COCOSYS zur Simulation von Radon-Verteilungsvorgängen wurde während des Projektgespräches im Januar 2020 gegeben (siehe Übersichtsfolie in Abb. 3.105). Das hier gegebene Resümee kann nach den erfolgreichen Nachrechnungen zum GWK, bekräftigt werden:

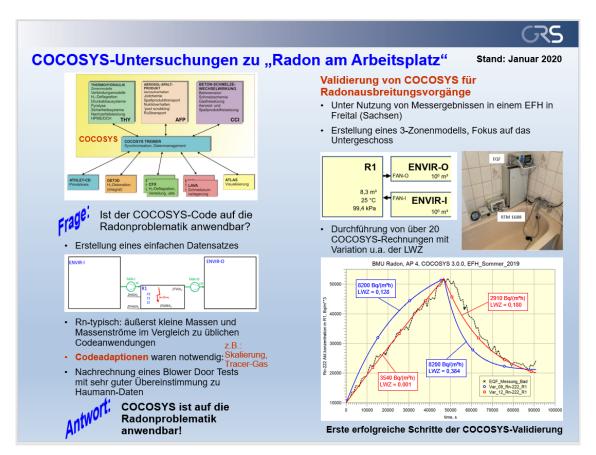


Abb. 3.105 Resümee der Anwendung von COCOSYS auf Rn-222-Verteilungsvorgänge an Arbeitsplätzen – Stand Januar 2020

Mit COCOSYS können Rn-222-Aktivitätskonzentrationen in Raumsystemen berechnet werden. Die im Code vorgenommenen Anpassungen erleichtern dabei die Anwendung des Programms für Fragestellungen zur Rn-Verteilung in Arbeitsräumen.

Unter Nutzung von durch die GRS aufgenommenen Messdaten erfolgte eine erste Validierung zur Radon-Verteilung in zwei Gebäuden. Es wurden zu beiden Objekten Nachrechnungen für ausgewählte Zeitphasen durchgeführt. Diese zeigen gute bzw. akzeptable Übereinstimmungen mit den gemessenen Rn-Aktivitätskonzentrationen.

Eine wesentliche, für die COCOSYS-Simulationen jeweils bereitzustellende Randbedigung ist die Rn-222-Quellstärke. Diese wurde für jedes Objekt und für verschiedene Zeitphasen aus den Messdaten bestimmt. Die Quellstärke ist dabei immer eine "effektive" Quelle, da sie auf der gemessenen und damit bereits durch den Luftwechsel sowie den radioaktiven Zerfall verringerten Rn-Konzentration beruht. Der radioaktive Zerfall ist unabhängig von thermohydraulischen Parametern und kann in COCOSYS ausreichend

exakt berechnet und damit quantifiziert werden (auf Grund der geringen Energiefreisetzung ist nur der Massenzerfall berücksichtigt).

Neben anfänglichen Einraum-Simulationen sind anschließend Nachrechnungen unter Nutzung von aus Messdaten gefitteten Luftwechselzahlen als auch mit Strömungsberechnungen auf Grund von Druckdifferenzen erfolgt. Dies sind Validierungsschritte für eine echte dynamische Rn-222-Verteilung innerhalb eines Objektes mit Strömungsvorgängen über Türen und Undichtigkeiten. Dabei zeigte sich deutlich, dass die berechnete lokale Radon-Aktivitätskonzentration unmittelbar von der angenommenen (d. h. gefitteten Luftwechselzahl) bzw. den berechneten Strömungszuständen abhängt. Ohne exakte Randbedingungen sind verlässliche Vorhersagen nicht möglich. Dies umfasst neben detaillierten geometrischen Daten insbesondere auch Änderungen in den Öffnungszuständen von Strömungsverbindungen.

Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass die notwendigen Anfangs-/Randbedingungen in großer Genauigkeit erforderlich sind, wie z. B. höhengestaffelte Drücke im Pascal-Bereich, was hohe Anforderungen an die Messtechnik stellt (in den GRS-eigenen Messungen ist der Druck nur auf 10 Pa genau).

Werden Problemstellungen mit relativ niedrigen Rn-222-Konzentrationen in einem Arbeitsraum untersucht, kann es notwendig werden, auch die Rn-Umgebungskonzentration mit zu berücksichtigen – vorausgesetzt dass neben Quellen im Gebäude auch bodennahe Luft mit entsprechendem Radon-Gehalt angesaugt wird.

Bei Kenntnis aller erforderlichen Anfangs- und Randbedingungen sowie deren zeitlichen Verläufen können mit COCOSYS prinzipiell auch lokale Rn-222-AktivitätsKonzentrationen ermittelt werden. Nach gegenwärtigem Erkenntnisstand erfordert dies aber einen hohen Aufwand. Prognosen mit wechselnden und nicht periodischen Randbedigungen werden eine sehr breite Streuung der Ergebnisse aufweisen.

Diese Aussage trifft unserer Einschätzung nach aber auf alle Simulationsprogramme zu und ist somit kein codespezifischer Fakt. COCOSYS sollte daher eher als ein Tool zur Prüfung der Plausibilität und zur Abschätzung/Bewertung der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Verringerung der lokalen Rn-Konzentration gesehen werden. Falls es gelingt Prozeduren zu entwickeln, die es trotz zeitlich stark schwankender Rn-222-Aktivitätskonzentrationen erlauben repräsentative Jahres-Mittelwerte abzuleiten, kann COCOSYS als schnell rechnendes Programm ein geeignetes Tool dafür werden.

Bisher sind alle Nachrechnungen unter adiabaten Randbedingungen durchgeführt worden da keine (Wärmequellen durch Heizungen) bzw. unvollständige (Wandflächen und -materialien) entsprechenden Daten vorlagen. Das führt zu Einschränkungen in der Genauigkeit der Ergebnisse, die aber nach ggw. Kenntnisstand nicht größer als die bisherigen Unsicherheiten auf Grund fehlender Randbedigungen eingeschätzt werden.

Die Diffusionssimulation in COCOSYS kann prinzipiell auch für Radon-Verteilungsuntersuchungen angewendet werden. Bei signifikanten Luftwechselzahlen oder im Hinblick auf den Radon-Transport durch Undichtheiten wie Türspalte spielt die Diffusion keine Rolle. Durch Angabe einer Diffusionskonstante größer Null wird in COCOSYS die Diffusion bei Vorliegen entsprechend kleiner Konvektionsströme automatisch mit berücksichtigt.

Die Rn-222-Freisetzung in die Gebäude (Quellrate) weist starke Schwankungen auf. Der Vergleich der Aktivitätskonzentration mit dem gemessenen Luftdruck für das Messobjekt 2 – Gebäudekeller (Abb. 3.57) zeigt, dass mit steigendem Druck auch die Konzentration ansteigt, wobei die Konzentrationsspitzen deutlich vor den Erreichen des jeweiligen lokalen Druckmaximums zu verzeichnen sind. Kurz vor Erreichen des jeweiligen Spitzendruckes wiederum bricht die Rn-Konzentration stark ein. Die COCOSYS-Analysen geben keinen Hinweis darauf, ob dies an einer Abhängigkeit der Rn-222-Quelle von äußeren Bedingungen liegt (z. B. Druckabhängigkeit) oder ob der Luftdruck die Konvektion durch das Gebäude bestimmt (Luftwechselzahl). Gegen Letzteres spricht, dass Aktivitätskonzentrations- und Druckspitzen zeitlich nicht aufeinander fallen.

3.7 AP 5: Ableitung von Maßnahmen und Handlungsempfehlungen

Durch Adaption und Fortentwicklung von Raumzonen-Modellen können bauliche Maßnahmen einer ersten Überprüfung unterzogen und prognostisch deren Wirksamkeit getestet werden. Der Nachweis der Wirksamkeit von Maßnahmen durch Simulation kann Hinweise für eine Kosten-Nutzenanalyse zur Implementierung der Maßnahmen geben.

Das Arbeitspaket sieht daher auch die Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Auswahl geeigneter Messorte und einzuhaltender Rahmenbedingungen vor. Diese werden im Folgenden für Messobjekt 1 vorgenommen.

Arbeitsplatz Messobjekt 1 (Ingenieurbüro)

Wie in den Messungen in diesem Gebäude gezeigt werden konnte, lagen die Messwerte in den jeweils etwa zweiwöchigen Messkampagnen im Sommer bzw. Winter weit über dem Referenzwert, also der über das Jahr gemittelten Rn-222 Aktivitätskonzentration in der Luft an Arbeitsplätzen von 300 Bq/m³. Letztgenannter Wert gilt für das Jahresmittel, insofern ist eine Vergleichbarkeit zwischen den in den Messkampagnen gewonnen Werten und dem Referenzwert nicht gegeben. Die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Messungen stellen nur kurze Zeitfenster dar (max. 2 Wochen) und dadurch lässt sich nicht mit Sicherheit feststellen, ob der Jahresreferenzwert von 300 Bq/m³ in den betreffenden Gebäuden tatsächlich überschritten wird.

Allerdings liegt aufgrund der sehr hohen Werte der Rn-Aktivitätskonzentrationen während der Messkampagnen die Vermutung nahe, dass es in dem Gebäude zumindest im Bad zu einer Überschreitung des Referenzwertes kommen könnte. So beläuft sich der Mittelwert der während der 14-tägigen Messkampagne im Sommer gemessenen Rn-Aktivitätskonzentration im Bad auf ca. 13.000 Bg/m³. Eine konkrete Handlungsempfehlung, die sich direkt umsetzen lässt (und zum Teil bereits durch die Bewohner umgesetzt wird), ist das regelmäßige Lüften des Bades im Erdgeschoss über den Tag und insbesondere morgens, nachdem das Fenster im Badezimmer über die Nacht geschlossen war. Da die Radonquelle im Badezimmer zu vermuten ist, wird durch das regelmäßige Lüften dieses Raumes die Radon-Aktivitätskonzentration im gesamten Gebäude gesenkt. Auf diesen Fakt weisen die Ergebnisse der Messungen hin, d. h. bei geschlossener Badezimmertur und geschlossenen Fenstern kam es zu einem drastischen Anstieg der Rn-Aktivitätskonzentration im Bad, während durch das Öffnen der Badezimmertür die Aktivitätskonzentrationen in den angrenzenden Räumen anstiegen, während sie im Bad fiel. Abb. 3.106 zeigt beispielhaft an einem Zeitausschnitt (Winter-Messkampagne), dass es durch das Öffnen der Badezimmertür (ab ca. 7 h und ansonsten geschlossenen Fenstern) bereits zu einer deutlichen Verringerung der Rn-Aktivitätskonzentration im Badezimmer, allerdings zu einem korrespondierenden Anstieg in den angrenzenden Räumlichkeiten führt.

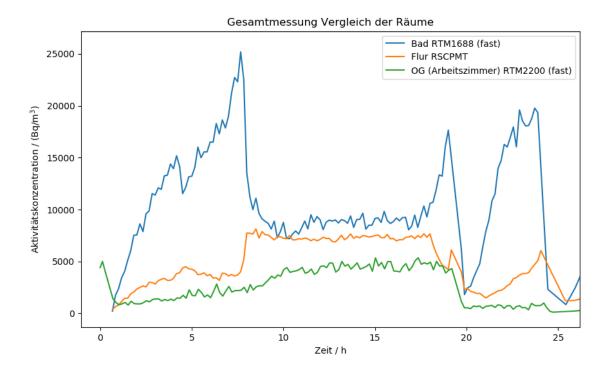


Abb. 3.106 Gemessene Radon-Aktivitätskonzentrationen in Messobjekt 1

Während der ersten 100 h Stunden der Sommer-Messkampagne, also bei dauerhaft geschlossener Badtür, betrug der Mittelwert der Rn-Aktivitätskonzentration sogar über 30.000 Bq/m³. Im Zeitraum ab 100 h Stunden fand dann eine weitgehend ungestörte, also übliche, Nutzung des Gebäudes statt, bei der die Bewohner aufgrund der bekannten Radonproblematik regelmäßig im gesamten Gebäude lüfteten. Obwohl die Aktivitätskonzentration während der Lüftungsphasen auf Werte nahe 0 Bq/m³ zurückging, lag der Mittelwert über diesen Zeitraum weiterhin bei einem hohen Wert von ca. 6.000 Bq/m³.

Als Alternative und Ergänzung zum Lüften durch das Öffnen der Fenster, welches im betrachteten Objekt wahrscheinlich nicht ausreichend ist und das insbesondere in den Wintermonaten zu einer Beeinträchtigung der Lebensqualität führt (sinken der Zimmertemperatur) und die Heizkosten durch das Lüften entsprechend steigen, können diverse bautechnische bzw. lüftungstechnische Maßnahmen zur Reduzierung der Radonzufuhr in Betracht gezogen werden. Beispielsweise könnte der Einbau einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung in Betracht gezogen werden. Die Abluft wird vor Abgabe ins Freie mittels Wärmetauscher oder Wärmepumpe die Wärme entzogen und an die Frischluft übertragen. Mit derartigen Anlagen sind auch im Winter hohe Luftwechsel ohne übermäßige Energieverlust möglich. Weiterhin ist der Luftwechsel ununterbrochen gewährleistet und nicht vom Benutzerverhalten abhängig. Eine verstärkte Außenluftzufuhr führt jedoch

bei niedrigen Außentemperaturen allerdings zu einer starken Reduzierung der Raumluftfeuchte, so dass Probleme infolge sehr trockener Luft in den Räumen auftreten können.

Je nach Möglichkeit der technischen Umsetzbarkeit sind Sanierungsmaßnahmen wie Abdichtungen in erdberührten Bereichen, an Fußbodenfugen und Drainagen um und unter Gebäudeteilen vorzusehen. Diese Maßnahmen sollten von Fachfirmen gebäudebezogen geplant und begleitet werden.

Für die folgende (beispielhafte) Betrachtung wird der Einbau einer elektrischen Lüftung im Badezimmer angenommen, die frische Außenluft (mit zu vernachlässigender Radon-Konzentration) ins Haus fördert. Das Badezimmer zusammen mit dem angrenzenden Raum (Flur und Treppenaufgang in das Arbeitszimmer) haben ein Volumen von ca. 16 m³. Für die Lüftung wird ein Volumenstrom von $\phi = 17$ m³/h angenommen (siehe z. B. kommerziell erhältliche Lüftungsanlagen der Firma SEVentilation, Modell SEVi 160); so ist sichergestellt, dass die Räumlichkeiten ungefähr einen Luftwechsel pro Stunde erfahren (L = 1,1/h).

Für die Berechnung der erwarteten Rn-Aktivitätskonzentration im Bad wurde der – maximal ungünstige – Zeitraum mit geschlossener Badtür (erste 100 h) ausgewählt. Im Folgenden werden demnach die Abschnitte 1-8 (Abb. 3.49) betrachtet, für die in 3.5.4.4 jeweils ein exponentieller Fit durchgeführt wurde. Der erwartete Kurvenverlauf der Aktivitätskonzentration wurde nun abschnittsweise gemäß (3.8) berechnet, wobei jeweils die mittels Fit bestimmten Quellstärken und Anfangskonzentrationen sowie die durch die Lüftung erzwungenen Luftwechselrate von L = 1,1 1/h angesetzt wurde. Anschließend wurde der Mittelwert über diesen berechneten Verlauf bestimmt. Zusätzlich wurde noch Abschnitt 12 nach Ablauf der 100 h und Lüften des Bades betrachtet.

Die an die Messdaten gefitteten und für zusätzliche Lüftung berechneten Kurvenverläufe sind in Abb. 3.107 dargestellt. Als Vergleichsmaß sind der Richtwert von 300 Bq/m³ und die jeweiligen Mittelwerte über die ersten 100 h aufgetragen.

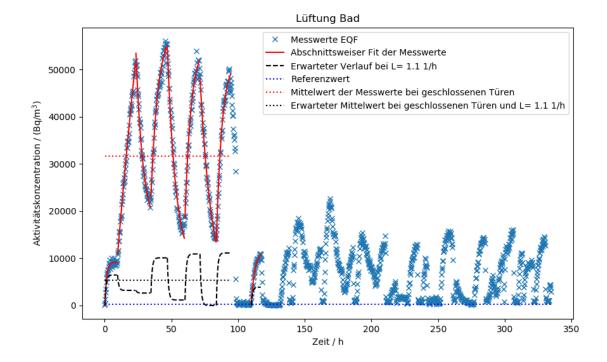


Abb. 3.107 Messwerte der Rn-Aktivitätskonzentration im Bad während der Sommer-Messkampagne sowie daran gefittete und für zusätzliche Lüftung berechnete Kurvenverläufe während der ersten 100 h (geschlossene Badtür) mit den resultierenden Mittelwerten im Vergleich zum Richtwert von 300 Bq/m³

Es zeigt sich, dass mit dieser Lüftung eine erhebliche Senkung des Mittelwertes um ca. 83 % von über 30.000 Bq/m³ auf ca. 5.000 Bq/m³ erwartet wird. Der resultierende Wert liegt für diesen Zeitraum jedoch weiterhin weit oberhalb des Referenzwertes.

Ausgehend von weiteren erhältlichen Ausführungen der genannten Luftüngsanlage wurden zusätzlich höhere Volumenströme für die Berechnungen angesetzt. Die Ergebnisse sind in Abb. 3.108 und Tab. 3.27 dargestellt.

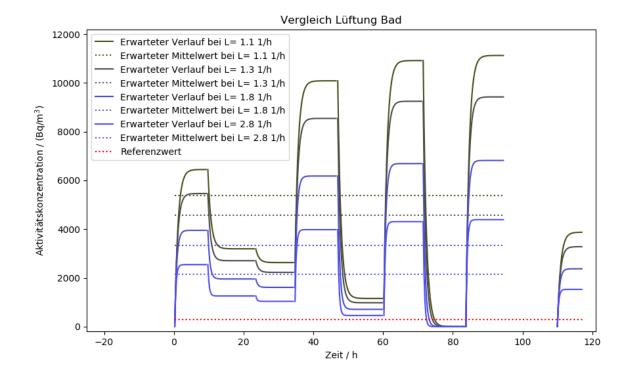


Abb. 3.108 Berechnete Kurvenverläufe der Rn-Aktivitätskonzentration im Bad während der ersten 100 Stunden (geschlossene Badtür) für unterschiedliche durch zusätzliche Lüftung erzeugte Luftwechselraten mit den resultierenden Mittelwerten im Vergleich zum Richtwert von 300 Bq/m³

Tab. 3.27 Berechnete Mittelwerte der Rn-Aktivitätskonzentration im Bad während der Abschnitte 1-8 (erste 100 h, geschlossene Badtür) für unterschiedliche durch zusätzliche Lüftung erzeugte Luftwechselraten im Vergleich zu den gemessenen Konzentrationen

Luft- Mittlere Radon-Aktivitätskonzentration im Zeitabsch						nitt				
Luftleis- tung	wechsel- rate	1	2	3	4	5	6	7	8	1-8 (100 h)
m³/h	1/h	Bq/m³								
17	1,1	5728	3443	2682	9446	1866	10001	940	10083	5378
21	1,3	4933	2888	2266	8073	1501	8575	691	8658	4569
29	1,8	3657	2058	1633	5920	998	6317	383	6393	3321
45	2,8	2408	1307	1047	3858	590	4134	178	4192	2147
Messwer	7750	31684	32244	44267	28302	41067	26868	37983	31672	

Durch Einsatz der stärksten hier betrachteten Lüftung (ϕ = 45 m³/h), welche einer Luftwechselrate von L = 2,8 1/h im Bad entspricht, kann der Mittelwert der Aktivitätskonzentration im Zeitraum der geschlossenen Badtür weiter auf ca. 2.000 Bq/m³ gesenkt werden.

Eine weitere Verringerung der Rn-Aktivitätskonzentration ließe sich durch Kombination einer zusätzlichen Lüftungsanlage mit regelmäßigem manuellem Lüften erreichen, wie der letzte in Abb. 3.48 und Abb. 3.49 dargestellte Abschnitt (Nummer 12) nach 100 h, also nach Lüftung des Bades, nahe legt.

3.8 AP 6: Verfolgung und Auswertung des internationalen Standes von Wissenschaft und Technik

Im Rahmen dieses AP wird der Stand von Wissenschaft und Technik für die Zwecke des Vorhabens verfolgt. Dazu wurden hauptsächlich begutachte Artikel aus wissenschaftlichen Zeitschriften gesichtet, aber auch ausgewählte Veranstaltungen besucht, wie das alljährlich stattfindende Radon-Fachgespräch in Berlin.

Modellierung des Eindringens von Rn-222/Rn-220 in Gebäude

Radon kann generell über die Boden- bzw. Außenluft (/GUS 09/, /NAZ 92/), über die Wasserzuleitung (/VOG 08/) (Wasserhähne, Duschen etc.) und über Baumaterialien (/AWH 16/, /CSI 13/) in ein Gebäude gelangen. Radonhaltige Bodenluft und Baumaterialien wie bspw. Porenbeton aus Alaunschiefer sind meist die Hauptquelle von Rn-222 in Innenräumen. Aufgrund seiner kurzen Halbwertszeit von nur 55,6 s stammt Rn-220 meist von den Wänden (und aufgrund der Transportzeit nicht vom Untergrund), da es auf seinem Transportweg bereits zerfällt. Aufgrund der kurzen Halbwertszeit ist die Rn-220-Aktivitätskonzentration nahe der Wände am höchsten /DOI 94/.

Eindringen von radonhaltiger Bodenluft in Gebäude

Das Eindringen von (radonhaltiger) Bodenluft in Gebäude hängt mit verschiedenen Prozessen zusammen, wie beispielsweise der Radonbildungsrate im Boden und dem Radon-Transport durch den Boden und in das Gebäude (z. B. über Risse im Fundament). Die zugrundeliegenden Prozesse wurden bereits von einigen Forschern untersucht und

mit Modellen beschrieben (z. B. /BON 92/, /GAG 92/, /ROB 97/). /NAZ 85/ führten beispielsweise eine fünfmonatige Studie durch, in der die Rn-222-Aktivitätskonzentration, die Luftwechselrate und weitere relevante Parameter in einem einstöckigen Gebäude aufgezeichnet wurden. Die genannten Autoren entwickelten ein Modell, um den Radontransport in das Gebäude zu analysieren und stellten fest, dass die Advektion – im Vgl. zur Diffusion – ein weitaus bedeutenderer Parameter hinsichtlich des Eindringens von Radon in das Gebäude war. Im Gegensatz dazu wurde gefunden, dass im vorliegenden Fall die Luftwechselrate nur eine relativ kleine Auswirkung auf die Radon-Aktivitätskonzentration im Innenraum hat. /LOU 90/ entwickelten ein 3-D Finite-Differenzen-Modell, um die Bildung und den Zerfall von Rn-222 im Boden, den diffusiven und konvektiven Transport von Rn-222 im Boden und den Prozess des Eindringens von Rn-222 in ein Gebäude durch das Fundament abzubilden. Eine von den Autoren durchgeführten Sensitivitätsanalyse zufolge sind hinsichtlich der Rn-222 Aktivitätskonzentration in Innenräumen die Konzentration von Ra-226 im Boden, die Bodenpermeabilität und die vorliegende Druckdifferenz die bedeutsamsten Einflussfaktoren.

/RIL 99/ entwickelten das sog. RapidSTART-Modell (ein FE-Modell), das den zeitabhängigen Radon-Transport durch den Boden und das Eindringen in das Gebäude vorhersagen kann. In deren Studie wurde der Einfluss von fluktuierenden Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen auf den Radoneintrag in ein Gebäude untersucht. Es wurde gezeigt, dass Fluktuationen der Windgeschwindigkeiten nur einen geringen bis mittleren Effekt auf die Radon-Eindringrate in das Gebäude haben. Im Gegensatz dazu hatten fluktuierende Windrichtungen einen vergleichsweise starken Einfluss auf die Radon-Eindringraten.

Eindringen in Gebäude über den Wasserpfad

In Gebieten mit erhöhter Radon-Aktivitätskonzentration im Grundwasser und beispielsweise in Thermalbädern kann das Wasser eine Hauptquelle von Radon in Innenräumen darstellen. Der Eintritt von Radon ins Gebäude aus dem Wasser beruht hauptsächlich auf zwei Prozessen. Der erste Prozess bezieht sich auf die Radonfreisetzung an der Wasseroberfläche, z. B. am Wasserauslass (Wasserhahn) oder auf der (bewegten) Wasseroberfläche in einem Becken. In diesem Zusammenhang sind die Phänomene Turbulenz, Diffusion und Advektion zu berücksichtigen. Der zweite Prozess beruht auf dem diffusiven Radontransport von der freien und wenig bewegten Wasseroberfläche in die Luft des Innenraums. Hierbei kann der Radontransfer als konstant mit der Zeit ange-

nommen werden /VOG 08/. Angaben wie Wohnraumvolumina, Luftwechselraten, Wassernutzungsverhalten, Wasser-Luft-Transferkoeffizienten können kombiniert werden, um die Radon-Konzentrationen in Innenräumen durch Trinkwassernutzung abzuschätzen. Der mittlere Anstieg der Radon-Konzentration in Innenräumen durch die Nutzung von Trinkwasser kann unter Berücksichtigung der Massenerhaltung abgeschätzt werden und wird durch folgende Gleichung beschrieben /NAZ 88/:

$$C_{wa} = \frac{C_w W e}{V_{psn} L} \tag{3.16}$$

wobei

C_{wa} Radon-Aktivitätskonzentration, die sich aus der Trinkwassernutzung ergibt [Bq/m³]

C_w Radon-Aktivitätskonzentration im Wasser, das in das Wohngebäude geleitet wird [Bq/m³]

W Gesamte Wassernutzungsrate der Gebäudebewohner [m³/s]

e Nutzungsgewichtete mittlere Transfereffizienz von Radon im Wasser in die Luft

V_{psn} Volumen des Wohngebäudes [m³]

L Luftwechselrate [1/s]

Weitere grundlegende Informationen zum Eindringen von Radon in Gebäude über den Wasserpfad finden sich in /NAZ 88/.

Numerische Modellrechnungen zum Ausbreitungsverhalten von Rn-222/Rn-220 in Innenräumen

Ein großer Anteil der Radon-Folgeprodukte Po-218 und Pb-212 sind unter Normalbedingungen positiv geladen. Die in der Luft stets vorhandenen und negativ geladenen Ionen wie NO, NO₂ und Verunreinigungen reagieren mit diesen Kationen und in kurzer Zeit (< 1 s) folgt dadurch eine Clusterbildung. Der Durchmesser dieser Cluster beträgt ca. 0,5 bis 5 nm /HU 18/. Aufgrund der vergleichsweise größeren Diffusionskoeffizienten dieser Cluster können die Folgeprodukte von Rn-222 und Rn-220 so an verschiedene Oberflächen adsorbieren, wie bspw. Oberflächen von Tröpfchen und Aerosolen, und radioaktive Aerosole bilden. So basiert deren Verhalten in der Luft zu einem großen Anteil auf der Größenverteilung der Aerosolpartikel. Die relative Größenverteilung der angelagerten Folgeprodukte hängt nicht nur vom Adsorptionskoeffizienten (engl. attachment

coefficient), sondern auch von der relativen Größenverteilung der Aerosole und Tröpfchen in der Atmosphäre ab /POR 84/. Aufgrund dieser Prozesse werden die gebildeten Folgeprodukte (FP) in die Gruppen "angelagert" und "unangelagert" eingeteilt. Neben Verlusten durch radioaktiven Zerfall kann die Konzentration an FP auch durch Anlagerung an Wände und Belüftung reduziert werden. Andererseits können in diesem Zusammenhang auch Desorptionsprozesse stattfinden. Die Rückstoßenergie des durch Alpha-Zerfall des angelagerten Po-218 (der Rn-222-Zerfallsreihe) erzeugten Pb-214 beträgt 117 keV. Die Rückstoßenergie ist größer als die potenzielle Energie des adsorbierten Moleküls und so kann dieser Rückstoß eine Desorption der Aerosolpartikel/Tröpfchen bewirken und die Folgeprodukte können wieder Teil der unangelagerten Fraktion werden. Ein vergleichbarer Prozess kann auch für die Rn-220 Zerfallsreihe stattfinden, d. h. mit Bi-212. Bei dem durch Alpha-Zerfall von Bi-212 entstehendes TI-208 erzeugt eine Rückstoßenergie, die genügend groß ist, um eine Abtrennung (Desorption) des angelagerten Folgeprodukts zu bewirken. Andererseits können angelagerte Folgeprodukte, die über Beta-Zerfall zerfallen (z. B. Pb-214, Bi-214, Pb-212), nicht desorbiert werden, da die Rückstoßenergie des erzeugten Teilchens nicht genügend groß ist /HU 18/.

Oftmals werden mathematische Modelle genutzt, um das Verhalten von Rn-222, Rn-220 und deren FP in Innenräumen zu prognostizieren bzw. die Konzentration der FP durch den Einfluss verschiedener Quellen und Senken zu modellieren. Dies kann bei folgenden Aufgaben dienlich sein: 1) Abschätzung der Radon-Inhalation und der FP durch die Messung von Radon /POR 78/; 2) Bewertung der Maßnahmen/Strategien zur Reduktion der Rn-Aktivitätskonzentration /DE 16/; 3) die Identifikation der maßgeblichen Variablen, die für eine Dosisabschätzung der Bevölkerung benötigt werden /NAZ 88/. In diesem Zusammenhang werden im Folgenden das Jacobi-Raummodell und CFD-Modelle beschrieben.

Das Jacobi-Raummodell

Mittels diesem mathematischen Modell kann die Konzentration von sich in der Luft befindlichen Radon-FP, die von diversen Quellen und Senken beeinflusst werden, prognostiziert werden /HU 18/. Das Modell geht von den folgenden drei Annahmen aus: 1) Rn-222 und seine FP sind homogen in der Raumluft verteilt; 2) es liegen keine Temperaturgradienten vor; 3) die Luftfeuchte im Raumvolumen ist homogen verteilt.

Das Jacobi-Raummodell wird als geeignet erachtet, die Strahlenexposition durch Inhalation von Rn-222/Rn-220 im Innenraum abzuschätzen. Allerdings wird es als nicht geeignet dafür erachtet, die Innenraumverteilung nicht-uniform verteilter Radionuklide mit kurzen Halbwertszeiten, wie bspw. Rn-220 und Po-216 zu berechnen /HU 18/.

Bereits im Jahr 1972 wurde von /JAC 72/ das erste mathematische Modell mit Berücksichtigung der kurzlebigen Radon-FP veröffentlicht, um die Konzentration von Radon-FP in der Luft einer Uranmine zu prognostizieren. /POR 84/ untersuchte den Einfluss verschiedener Parameter auf das Jacobi-Raummodell und konnte das Modell im Labor verifizieren. /CAU 00/ berücksichtigte darauf aufbauend weiterhin langlebige Radon-FP und simulierte deren Verhalten mit der Monte-Carlo Methode. /NIK 04/ und /NIK 07/ verbesserten das Jacobi-Raummodell. Es wurde auf drei modale Aerosolverteilungen erweitert und auf angelagerte Rn-222/Rn-220 FP angewendet.

/MEI 11/ erweiterten das ursprüngliche Jacobi-Raummodell, um auch Aktivitätskonzentrationen von Rn-220 bzw. seiner FP in Behausungen aus Lehm prognostizieren zu können. Dieses verbesserte Modell kann auch auf Räume mit einer bekannten Exhalationsrate mit verschiedenen Baumaterialien oder Böden, die Quelle des Rn-220 sind, angewendet werden.

Das Jacobi-Raummodell besteht aus Differenzialgleichungen, die die Quellstärke, den radioaktiven Zerfall, die Radonableitung über die Lüftung und Ablagerung sowie die Anlagerung von FP an Aerosole und Tröpfchen berücksichtigt. Die mathematische Beschreibung für das Verhalten von Rn-222 in dem Modell lautet wie folgt /HU 18/:

$$\frac{dC_{r0}}{dt} = S_r V^{-1} - \lambda_{r0} C_{r0} - LC_{r0} \tag{3.17}$$

wobei

- C_{ri} Konzentration der Nuklide [Atome/m³], (i = 0, 1, 2, 3 für Rn-222 bzw. dessen ersten drei Folgeprodukte)
- t Zeit [s]
- S_r Radon-Zufuhr [Atome/s]
- V Volumen des betrachteten Raumes [m³]
- L Luftwechselrate [1/s]
- λ Zerfallskonstante [1/s], (i = 0, 1, 2, 3 für Rn-222 bzw. dessen ersten drei Folgeprodukte)

Das Jacobi-Raummodell basiert auf zusammenhängenden Satz von sog. Prozessen erster Ordnung, in denen die Rate jedes einzelnen Prozesses proportional zur Konzentration der Mutterisotope ist /NAZ 88/.

Das CFD-Modell

In neuerer Zeit spielen CFD (Computational Fluid Dynamic) Modelle zur Modellierung der Radon-Ausbreitung in Innenräumen eine gesteigerte Rolle. Mittels dieser Herangehensweise können Strömungsmuster und Konzentrationsverteilungen eines Stoffes in einem bestimmten Raum simuliert und prognostiziert werden. CFD-Modelle können auf effektive Weise die Innenraumkonzentrationen von Rn-222, Rn-220 und der entsprechenden FP simulieren, und insbesondere heterogene Verteilungen von kurzlebigen Radionukliden im Innenraum darstellen (z. B. Rn-220, Po-216). Im Vergleich zum Jacobi-Raummodell – präzise Messungen vorausgesetzt – können CFD-Modelle den Einfluss von diversen Umwelteinflüssen auf die Innenraumverteilung von Rn-222 und Rn-220 und der FP deutlich realitätsnäher prognostizieren /HU 18/.

/ZHO 01/ und /URO 08/ nutzen ein CFD-Modell, um die Konzentration bzw. Verteilung von Rn-222 und Rn-220 und ihrer Folgeprodukte dreidimensional darzustellen. Es wurde argumentiert, dass die Aktivitätsverteilung von Rn-220 bei einer geringen Luftwechselzahl nicht vollkommen homogen ist. Beispielsweise wurde in Bereichen in der Nähe des Luftverteilers (Zufuhr und Abluft) prognostiziert, dass sich die Rn-220 Aktivitätskonzentration exponentiell mit dem Abstand von der Quelle verringert. Mit ansteigender Lüftungsrate, verringerten sich jedoch die Aktivitätskonzentrationen von Rn-222 und Rn-220 und deren Verteilungen wurden durch die turbulente Luftströmung verkompliziert.

/AKB 13/ und /RAB 17/ nutzen ein CFD-Modell um den Einfluss von Temperatur, relativer Luftfeuchte und die Luftaustauschrate auf das Verhalten von Rn-222 und Rn-220 in Innenräumen zu untersuchen. Mittels dieser Methode konnten die optimalen Bedingungen ermittelt werden, um die Radon-Konzentrationen möglichst gering zu halten. /CHA 14/, /CHA 15/ validierten mittels Messungen ein CFD-Modell für die Innenraumkonzentration von Rn-222 und Rn-220 bzw. ihren Folgeprodukten. Es konnte gezeigt werden, dass die Modellprognosen durch die Messungen hinreichend bestätigt werden können. /DE 16/ nutzen ein CFD-Modell, um Maßnahmen zur Reduktion von Rn-220 und seinen Folgeprodukten in Innenräumen zu bewerten.

Hinsichtlich der Untersuchung von der Verteilung von Radon-FP in Innenräumen mittels numerischer Simulationen wurden in den letzten Jahren also einige Untersuchungen durchgeführt (z. B. /DEU 14/, /URO 08/). Allerdings hatten diese Studien den Nachteil, dass der Einfluss der Radonexhalation von verschiedenen Materialien (Mauern, Boden, Decke) nicht berücksichtigt wurde. /RAB 17/ stellen ein Modell vor, das auf der Finite-Volumen-Methode (VFM) beruht und die räumliche und zeitliche Änderung der Radon-Aktivitätskonzentrationen und deren Folgeprodukte in einem Innenraum berechnet. In diesem Zusammenhang wurden auch Messungen mit Kernspurdetektoren durchgeführt, um die Radon-Exhalation aus Wänden, Böden und der Decke in einem Raum (36 m³) zu messen. Im Ergebnis konnte von /RAB 17/ gezeigt werden, dass eine Bestimmung der Radonverteilung bzw. der FP innerhalb des Raumes möglich ist. Die Radon-Exhalation von Wänden, dem Boden, der Decke, und auch die Luftwechselrate wurden messtechnisch erfasst und als Inputparameter für die Modellrechnungen verwendet. Von den Autoren wurde mit Hilfe der Berechnungen festgestellt, dass die Radon-Verteilung und die der FP im Raum aufgrund der unterschiedlichen Exhalationsraten der verschiedenen Quellen (Wand, Boden, Decke) und der Belüftung nicht einheitlich ist. Weiterhin wurden die höchsten Aktivitätskonzentrationen von Radon bzw. der Folgeprodukte in Bodennähe, die niedrigsten Werte wurden nahe der Luftzufuhr gemessen. Es konnte gezeigt werden, dass die Radon-Aktivitätskonzentrationen an den Wänden erheblich höher sind und aufgrund der Luftströmung zur Raummitte hin abnehmen.

4 Forschungs- und Handlungsbedarf

Im Allgemeinen besteht bei den Messungen von Radonaktivitätskonzentrationen in Innenräumen die Frage, inwieweit relativ kurze Messdauern auf das ganze Jahr extrapoliert werden können, um die Einhaltung des Referenzwerts von 300 Bq/m³ im Jahresmittel zuverlässig nachzuweisen. Es hat sich im Laufe dieses Vorhabens gezeigt, dass sich für derartige Aussagen Prognosen mit Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen als vorteilhaft erweisen würden. Weiterhin könnten mit derartigen Analysen Aussagen getroffen werden, welche Parameter maßgeblich die Überschreitung bzw. Einhaltung des Referenzwertes beeinflussen. Zudem könnte eine Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse beantworten, wie lange bzw. zu welchen (Jahres-/Tages-) Zeiten gemessen werden sollte, um mit hinreichender Sicherheit Aussagen über die Einhaltung des jährlichen Referenzwerts treffen zu können.

Weiterer Forschungsbedarf besteht allgemein in der Überprüfung bzw. Beurteilung der Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen für Bestandsbauten mit Aufenthaltsräumen und Arbeitsplätzen. Auch die Frage, inwieweit bauliche Veränderungen, die zu einer erheblichen Verminderung der Luftwechselrate führen, einem Anstieg der Rn-Aktivitätskonzentration vorbeugen oder entgegenwirken, gilt es zu beantworten. Auch in diesem Rahmen könnten Modellrechnungen mittels COCOSYS (neben entsprechenden Messungen) zu Einsatz kommen, um den Einfluss von verschiedenen (Schutz)maßnahmen (und deren Kombination) wie Lüftung, Abdichtung usw. zu analysieren.

Literaturverzeichnis

- /AKB 13/ Akbari, K., Mahmoudi, J., Ghanbari, M.: Influence of indoor air conditions on radon concentration in a detached house. Journal of Environmental Radioactivity, Bd. 116, S. 166–173, DOI 10.1016/j.jenvrad.2012.08.013, 2013.
- /AMG 19/ Amgarou, K.: Long-Term Measurements of Indoor Radon and its Progeny in the Presence of Thoron Using Nuclear Track Detectors. A Novel Approach. Universitat Autonoma de Barcelona: Barcelona, Spanien, 2019.
- /ARN 19/ Arndt, S., Band, S., Beck, S., Eschricht, D., Iliev, D., Klein-Heßling, W., Nowack, H., Reinke, M., Sonnenkalb, M., Spengler, C., Weber, G.: COCOSYS 3.0 User Manual. Hrsg.: GRS gGmbH, GRS-P-3/Vol. 1, Mai 2019.
- /AWH 16/ Awhida, A., Ujic, P., Vukanac, I., Durasevic, M., Kandic, A., Celikovic, I., Loncar, B., Kolarz, P.: Novel method of measurement of radon exhalation from building materials. Journal of Environmental Radioactivity, Nr. 164, S. 337–343. 2016.
- /BON 92/ Bonnefous, Y. C., Gagdil, A. J., Fisk, W. J., Prill, R. J., Nematollahi, A. R.: Field study and numerical simulation of subslab ventilation systems. Environmental Science & Technology, 26, 9, S. 1752–1759, 1992.
- /CAU 00/ Cauwels, P., Poffijn, A., Mondelaers, W., Lahorte, P., Masschaele, B., Meesen, G., Van Deynse, A.: Theoretical study of the relation between radon and its long-lived progeny in a room. Health Physics, S. 389–395, 2000.
- /CHA 14/ Chauhan, N., Chauhan, R. P., Joshi, M., Agarwal, T. K., Aggarwal, P., Sahoo, B. K.: Study of indoor radon distribution using measurements and CFD modeling. Journal of Environmental Radioactivity, S. 105–111, 2014.
- /CHA 15/ Chauhan, N., Chauhan, R. P., Joshi, M., Agarwal, T. K., Sapra, B. K.: Measurements and CFD modeling of indoor thoron distribution. Atmospheric Environment, Nr. 105, S. 7–13, 2015.

- /CSI 13/ Csige, I., Szabo, Z., Szabo, C.: Experimental technique to measure thoron generation rate of building material samples using RAD7 detector. Radiation Measurements, Nr. 59, S. 201–204, 2013.
- /DE 16/ de With, G., de Jong: Impact from indoor air mixing on the thoron progeny concentration and attachment fraction. Journal of Environmental Radioactivity, 158-159, S. 56–63, 2016.
- /DEU 14/ Deutsche Herzstiftung e.V., D. H. (Hrsg.): Deutscher Herzbericht 2013, 25. Bericht/Sektorenübergreifende Versorgungsanalyse zur Kardiologie und Herzchirurgie in Deutschland. 2500. Aufl., 200 S. in 1 Teil, ISBN 978-3-9811926-6-7, Deutsche Herzstiftung: Frankfurt am Main.
- /DOI 94/ Doi, M., Fujimoto, K., Kobayashi, S., Yonehara, H.: Spatial distribution of thoron and radon concentations in the indoor air of a traditional Japanese wooden house. Health Physics, 66 (1), S. 43–49, 1994.
- /GAG 92/ Gagdil, A. J.: Models of Radon Entry. Radiation Protection Dosimetry, Bd. 45, 1-4, S. 373–379, 1992.
- /GRS 19/ GRS: Radon-Messkampagne Sommer, Datei: Auswertung Bad Vollständiger_Fit_docx. 11. November 2019.
- /GRS 20/ GRS: Welcome to the User Area for the GRS Software AC²! erreichbar unter https://user-codes.grs.de/, abgerufen am 1. September 2020.
- /GTL 19/ G., G.: Tabellarische Auflistung von Messzeiten und Protokollnotizen zur Aktivitätsmessung im EFH . Dresden-Freital vom 20. bis 25. August 2019. (Autor anonymisiert). An GRS gGmbH, Datei: Quellstärke_lineare Abschnitte Sommer.xlsx, 23. Oktober 2019.
- /GUS 09/ Gusain, G. S., Prasad, G., Prasad, Y., Ramola, R. C.: Comparison of indoor radon level with radon exhalation rate from soil in Garwhal Himalaya. Radiation Measurements, Bd. 44, 9-10, S. 1032–1035, 2009.

- /HAU 17/ Haumann, T.: Radonmessungen und Blower Door, Fallbeispiele aus Bestandsgebäuden. Präsentation, 2. Radonfachtag des VDB, Bauzentrum München: München, 4. Mai 2017.
- /HU 18/ Hu, J., Yang, G., Hegedűs, M., Iwaoka, K., Hosoda, M., Tokonami, S.: Numerical modeling of the sources and behaviors of 222Rn, 220Rn and their progenies in the indoor environment-A review. Journal of Environmental Radioactivity, Bd. 189, S. 40–47, DOI 10.1016/j.jenvrad.2018.03.006, 2018.
- /JAC 72/ Jacobi, W.: Activity and potential alpha-energy of 222Rn and 220Rn-daughters in different air atmospheres. Health Physics, S. 441–450, 1972.
- /LAU / Laussmann, D., Helm, D.: Air Change Measurements Using Tracer Gases: Methods and Results. Significance of air change for indoor air quality. In: Chemistry, Emission Control, Radioactive Pollution and Indoor Air Quality. S. 365–406, DOI 10.5772/18600.
- /LOU 90/ Loureiro, C. O., Abriola, L. M., Martin, J. E., Sextro, R. G.: Three-dimensional simulation of radon transport into houses with basements under constant negative pressure. 24 (9), S. 1338–1348, 1990.
- /MEI 11/ Meisenberg, O., Tschiersch, J.: Thoron in indoor air: modeling for a better exposure estimate. Indoor Air, Bd. 21, Nr. 3, S. 240–252, DOI 10.1111/j.1600-0668.2010.00697.x, 2011.
- /NAZ 85/ Nazaroff, W. W., Feustel, H., Nero, A. V., Revzan, K. L., Grimsrud, D. T., Essling, M. A., Toohey, R. E.: Radon transport into a detached one-story house with a basement. Atmospheric Environment, 19 (1), 1985.
- /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.
- /NAZ 92/ Nazaroff, W. W.: Radon transport from soil to air. Reviews of Geophysics, Bd. 30, Nr. 2, S. 137, DOI 10.1029/92RG00055, 1992.
- /NIK 04/ Nikezic, D., Stevanovic, N.: Room model with three modal distributions of attached radon progeny. Health Physics, 87 (4), S. 405–409, 2004.

- /NIK 07/ Nikezic, D., Stevanovic, N.: Room model with three modal distributions of attached 220Rn progeny and dose conversion factor. Radiation Protection Dosimetry, 123 (1), S. 95–102, 2007.
- /POR 78/ Porstendörfer, J., Wicke, A., Schraub, A.: The influence of exhalation, ventilation and deposition processes upon the concentration of radon (222Rn), thoron (220Rn) and their decay products in room air. Health Physics, S. 465–473, 1978.
- /POR 84/ Porstendörfer, J.: Behaviour of Radon Daughter Products in Indoor Air. Radiation Protection Dosimetry, Volume 7, Issue 1-4, S. 107–113, 1984.
- /RAB 17/ Rabi, R., Oufni, L., Amrane, M.: Modeling of indoor 222 Rn distribution in ventilated room and resulting radiation doses measured in the respiratory tract. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, Bd. 10, Nr. 3, S. 273–282, DOI 10.1016/j.jrras.2017.05.003, 2017.
- /RIL 99/ Riley, W. J., Robinson, A. L., Gagdil, A. J., Nazaroff, W. W.: Effects of variable wind speed and direction on radon transport from soil into buildings: model development and exploratory results. Atmospheric Environment, 33 (44), S. 2157–2168, 1999.
- /ROB 97/ Robinson, A. L., Sextro, R. G.: Radon Entry into Buildings Driven by Atmospheric Pressure Fluctuations. 31, 6, S. 1742–1748, 1997.
- /SCH 18/ Schulz, H., Hermann, E., Baumert, R.: Qualifizierung der Luftdichtheitsmessung an Gebäuden zur Prüfung der Radondichtheit neu errichteter Gebäude, Endbericht. BfS AG-R-08313/3616S12241: Radeberg, 11. Juni 2018.
- /SSG 20/ Gesetz zur Neuordnung des Rechts zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung in der Fassung vom 27. Juni 2017, zuletzt geändert 28. April 2020 (BGBI. I 2020, Nr. 23, S. 960).
- /URO 08/ Urosevic, V., Nikezic, D., vulovic, S.: A theoretical approach to indoor radon and thoron distribution. Journal of Environmental Radioactivity, 99 (12), S. 1829–1833, 2008.

- /VOG 08/ Vogiannis, E., Nikolopoulos, D.: Modelling of radon concentration peaks in thermal spas: application to Polichnitos and Eftalou spas (Lesvos Island Greece). Science of The Total Environment, 405, 1-3, S. 36–44, 2008.
- /ZHO 01/ Zhou, W., Iida, T., Moriizumi, J., Ayoyagi, T., Takahashi, I.: Simulation of the Concentrations and Distributions of Indoor Radon and Thoron. Radiation Protection Dosimetry, 93 (4), S. 357–367, 2001.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Messwerte des zeitlichen Verlaufes der ²²² Rn-Aktivitätskonzentrationen; farbig markiert sind die für den Fit gewählten Abschnitte von Messwerten bzw. die zugehörigen Fits mit resultierenden Werten der Fitparameter
Abb. 3.2	COCOSYS, 3-Zonen-Modell
Abb. 3.3	Drucksteuerung des FAN-I Lüftungssystems
Abb. 3.4	COCOSYS, Testrechnung tracer gas Einspeisung, Rn-222 in Zone R 19
Abb. 3.5	COCOSYS, Testrechnung tracer gas Einspeisung, Rn-222 Massenbilanzfehler
Abb. 3.6	COCOSYS, Nachrechnung Objekt 2 Sommer, aus R1 abgesaugter Volumenstrom
Abb. 3.7	COCOSYS, Nachrechnung Objekt 2 Sommer, berechnete Druckverläufe für Zone R1 und die zwei Umgebungszonen22
Abb. 3.8	COCOSYS, Nachrechnung Objekt 2 Sommer, Zeitverlauf der berechneten Rn-222 Aktivitätskonzentration in Zone R1
Abb. 3.9	COCOSYS, Nachrechnung Objekt 2 Sommer, Rn-222 Massenbilanzfehler
Abb. 3.10	COCOSYS, Nachrechnung Objekt 2 Sommer, Rn-222 Energiebilanzfehler
Abb. 3.11	COCOSYS, Nachrechnung Objekt 2 Sommer, Real Time Factor25
Abb. 3.12	COCOSYS, Nachrechnung Objekt 2 Sommer, berechnete Rn-222 Aktivitätskonzentration in Zone R1 ohne (var.06) und mit Kernzerfall (var.07)
Abb. 3.13	COCOSYS, Nachrechnung Objekt 5 Sommer, aus R1 abgesaugter Volumenstrom
Abb. 3.14	COCOSYS, Nachrechnung Objekt 5 Sommer, Zeitverlauf der berechneten Rn-222 Aktivitätskonzentration in Zone R127
Abb. 3.15	COCOSYS, Nachrechnung Objekt 5 Sommer, berechnete Rn-222 Aktivitätskonzentration in Zone R1 ohne (var.06) und mit Kernzerfall (var.07)

Abb. 3.16	COCOSYS, Testrechnung mit einem komplexen RBMK-1000 – Datensatz, CLIMAS = 10 ⁻¹⁶ kg, Rn-222 Einspeisung mit 10 ⁻¹⁴ kg/s ab 10 s, berechnete Rn-222 Masse in der Einspeisezone	33
Abb. 3.17	COCOSYS, Testrechnung mit einem komplexen RBMK-1000 – Datensatz, Real Time Factor mit globalem CLIMAS = 10 ⁻⁵ kg bzw. individuellem T_GAS_CLI = 10 ⁻²⁵ kg für die Rn-222 Gasmasse	34
Abb. 3.18	COCOSYS 3.1, Eingabestruktur für TRACER_GAS	36
Abb. 3.19	COCOSYS 3.1, Ausgabe der Daten für Rn-222 als TRACER_GAS	38
Abb. 3.20	COCOSYS, Objekt 2 Sommer, Testrechnung zum Einfluss der TRACER_GAS Stoffwerte auf die Rn-222 Aktivitätskonzentration in Zone R1, base = korrekte Stoffwerte, modi = Stoffwerte*100	39
Abb. 3.21	COCOSYS 3.1, Eingabe zur Definition einer Rn-222 – Anfangs-konzentration	40
Abb. 3.22	COCOSYS 3.1, Ausgabe der Daten zu einer Rn-222 TRACER_GAS Einspeisung	41
Abb. 3.23	COCOSYS 3.1, Eingabestruktur einer Einspeisung mit "BQ_M3H_T_P" für Rn-222	42
Abb. 3.24	COCOSYS 3.1, Ausgabe der Daten zu einer Rn-222 TRACER_GAS Einspeisung	43
Abb. 3.25	COCOSYS 3.1, Eingabebeispiel für ein adaptiertes Lüftungssystem, System FAN-O	44
Abb. 3.26	COCOSYS 3.1, Ausgabe der Daten zum Lüftungssystem	45
Abb. 3.27	COCOSYS 3.1, Print-Ausgabe der Gasmassen sowie der Aktivitäts- konzentration von Rn-222	46
Abb. 3.28	COCOSYS 3.1, Print-Ausgabe der Massen- und Energiebilanz (hier Rechenfall mit Berücksichtigung des Zerfalls T_GAS_DEC = DECAY	47
Abb. 3.29	COCOSYS, Objekt 2 Sommer, Rn-222 Aktivitätskonzentration in Zone R1, Vergleich der Ergebnisse aus AP 1.3 und AP 2	48
Abb. 3.30	COCOSYS, Objekt 5 Sommer, integrale Rn-222-Aktivitätskonzentration in Zone R1, Vergleich der Ergebnisse aus AP 1.3 und AP 2 (ohne und mit Zerfall)	49
Abb. 3.31	COCOSYS, Objekt 5 Sommer, Integral des Rn-222 Massenverlustes im gesamten System (Objekt und Umgebung), Vergleich der Ergebnisse aus AP 1.3 und AP 2 (ohne und mit Zerfall)	50

Abb. 3.32	Erdgeschoss Objekt 1 inklusive messtechnischer Ausstattung	54
Abb. 3.33	Obergeschoss Objekt 1 inklusive messtechnischer Ausstattung	55
Abb. 3.34	Gewölbekeller mit Abmessungen und Fotos. Auf dem Tisch waren die Messgeräte positioniert	57
Abb. 3.35	Treppe zum Gewölbekeller. Links ist die Kellerklappe zu sehen; die Abstände zwischen den jeweiligen Holzbrettern sind offen	58
Abb. 3.36	Geöffnete Kellerklappe (links) und Skizze mit Abmessungen des Raums direkt oberhalb des Kellers	58
Abb. 3.37	Skizze das Raumes im Eingangsbereich (links), Flur mit geöffneter Tür Richtung Kellerklappe (rechts) und Eingangstür (Mitte)	59
Abb. 3.38	Abmessungen des Kinderzimmers im Eingangsbereich; zum Kinderzimmer führen zwei Türen	60
Abb. 3.39	Skizze des Bereichs im 1. OG (links oben); die Tür rechts in der Skizze ist im Bild oben rechts zu sehen	61
Abb. 3.40	Skizze der Filterhalle mit Positionierung der Messgeräte	63
Abb. 3.41	Vergleich der Radon-Aktivitätskonzentration in den verschiedenen Räumen innerhalb der ersten 24 h (Testmessung)	66
Abb. 3.42	Vergleich der gemessenen Radon-Aktivitätskonzentration in den verschiedenen Räumen über die gesamte Messdauer	68
Abb. 3.43	CO ₂ -Konzentration im Bad und im angrenzenden Flur während der gesamten Messdauer	70
Abb. 3.44	Logarithmisch aufgetragene Abklingkurve der CO ₂ -Konzentration im Bad sowie der um die Umgebungskonzentration (400 ppm) korrigierten Konzentration nach Beimpfung bei geschlossener Tür (Abschnitt 01)	
Abb. 3.45	Logarithmisch aufgetragene Abklingkurve der CO ₂ -Konzentration im Bad sowie der um die Umgebungskonzentration (400 ppm) korrigierten Konzentration nach Beimpfung bei geschlossener Tür (Abschnitt 02)	72
Abb. 3.46	Radon-Aktivitätskonzentration im Bad über die gesamte Messdauer	73

ca. 100 h Stunden enen Radonaktivitäts- bschnitten 1 bis 6 (von ntsprechenden linearen 75	Abb. 3.47
Bad mit einer Einteilung	Abb. 3.48
tskonzentration, Quell- 78	Abb. 3.49
nden Flur während der	Abb. 3.50
CO ₂ -Konzentration im zentration (400 ppm) nach Beimpfung bei 82	Abb. 3.51
er84	Abb. 3.52
s (ohne Kinderzimmer) 85	Abb. 3.53
oss (einschl. Kinder- 86	Abb. 3.54
86	Abb. 3.55
achteten Räumen zur 87	Abb. 3.56
inge der Radon- ation (jeweils normiert)88	Abb. 3.57
m Bereich der Keller- n Auswertung unterteilt89	Abb. 3.58
den Abschnitten 3 und nte 4: rot); die durch die onen, Quellstärken und igt90	Abb. 3.59
den Abschnitten 5 und nte 6: rot); die durch die onen, Quellstärken und iat91	Abb. 3.60

Abb. 3.61	Vergleich 01: Radon-Aktivitätskonzentration in der Halle über die gesamte Messdauer (Vergleich der Geräte mit "fast"-Modus)95
Abb. 3.62	Vergleich 02: Radon-Aktivitätskonzentration in der Halle über die gesamte Messdauer (Vergleich der Geräte, welche nur im "slow"-Modus arbeiten)
Abb. 3.63	Vergleich 03: Radon-Aktivitätskonzentration im "Abstellraum" über die gesamte Messdauer (Vergleich der Geräte mit "fast"-Modus)96
Abb. 3.64	Vergleich 04: Radon-Aktivitätskonzentration in der Halle und im angrenzenden "Abstellraum" über die gesamte Messdauer96
Abb. 3.65	Ausschnitt der mit dem EQF gewonnenen Daten (Filterhalle, Messstation 6) für das erste Wochenende (ausgeschaltete Lüftung); zwei Fitvarianten des exponentiellen Anstieges sind mit den Fitparametern Anfangskonzentration, Quellstärke und Luftwechselrate farbig dargestellt
Abb. 3.66	COCOSYS, Nachrechnung Objekt 2, Zeitverlauf der berechneten Rn- 222 Aktivitätskonzentration in Zone R1 für die drei Varianten laut Tab. 3.20
Abb. 3.67	EFH Dresden-Freital, Ausschnitte aus dem Grundriss des Erd- geschosses
Abb. 3.68	COCOSYS, Nachrechnung EFH Dresden-Freital, 3-Zonen-Modell 104
Abb. 3.69	COCOSYS, Nachrechnung EFH Dresden-Freital, 4-Zonen-Modell 105
Abb. 3.70	EFH Dresden-Freital, Sommer 2019, gemessene Rn-Aktivitäts-konzentration
Abb. 3.71	COCOSYS, EFH Dresden-Freital, in den Varianten vorgegebene Quellstärken
Abb. 3.72	COCOSYS, EFH Dresden-Freital, 1-Zonen-Modell, Var_00 bis Var_03 ohne Luftwechsel110
Abb. 3.73	COCOSYS, EFH Dresden-Freital, 1-Zonen-Modell, Var_04 und Var_04a ohne Luftwechsel111
Abb. 3.74	COCOSYS, EFH Dresden-Freital, 3-Zonen-Modell, Var_02 ohne Luftwechsel, Var_05 bis Var_08 mit Luftwechsel112
Abb. 3.75	COCOSYS, EFH Dresden-Freital, 3-Zonen-Modell, Var_09 bis Var 12 mit Luftwechsel113

Abb. 3.76	COCOSYS, EFH Dresden-Freital, 3-Zonen-Modell, Var_13 bis Var_13b und Var_14 mit Luftwechsel114
Abb. 3.77	COCOSYS, EFH Dresden-Freital, 3-Zonen-Modell, Var_15 bis Var_15c, Einfluss der Luftwechselzahl
Abb. 3.78	COCOSYS, EFH Dresden-Freital, 4-Zonen-Modell, Var_100 und Var_101, Einfluss einer Rn-222-Quelle im Flur118
Abb. 3.79	COCOSYS, Nachrechnung EFH Dresden-Freital, 4-Zonen-Modell mit Rn-222-Quelle und LWZ in Zone R2
Abb. 3.80	EFH Dresden-Freital, gemessene Aktivitätskonzentration im Flur, 4-Phasen-Unterteilung119
Abb. 3.81	COCOSYS, Nachrechnung EFH Dresden-Freital, 4-Zonen-Modell mit Rn-Quelle und LWZ in Zone R2 und Unterteilung der Abluft von Zone R1
Abb. 3.82	COCOSYS, EFH Dresden-Freital, 4-Zonen-Modell, Var_101 und Var_102, Aufteilung des Abluftstromes aus dem Bad
Abb. 3.83	COCOSYS, EFH Dresden-Freital, 4-Zonen-Modell, Var_105, 4 Phasen des Verlaufes der Rn-222-Aktivitätskonzentrationen121
Abb. 3.84	EFH Sommer 2019, gemessene CO ₂ -Konzentration im Bad
Abb. 3.85	EFH Dresden-Freital, COCOSYS-Nachrechnungen var_00 bis var_05, CO ₂ -Konzentration im Bad125
Abb. 3.86	EFH Dresden-Freital, COCOSYS-Nachrechnungen var_05 bis var_08, CO ₂ -Konzentration im Bad
Abb. 3.87	EFH Dresden-Freital, COCOSYS-Nachrechnungen var_08 bis var_10, CO ₂ -Konzentration im Bad
Abb. 3.88	COCOSYS, Abhängigkeit der Diffusion von der Verbindungsfläche, links: virtuell unterteilter Raum, rechts: 2 Räume verbunden durch eine kleine Öffnung
Abb. 3.89	COCOSYS, Diffusion, erweiterte Nodalisation für das Bad des EFH 130
Abb. 3.90	COCOSYS, Diffusion Var_01, LWZ = 0, Konvektions- und Rn-222 Diffusionsgeschwindigkeiten in Verbindung A_UL_OL und A_UL_UR132
Abb. 3.91	COCOSYS, Diffusion Var_01, LWZ = 0, berechneter Verlauf der Rn- 222 Aktivitätskonzentration in den 4 Raumbereichen des Bades

ADD. 3.92	222 Diffusionsgeschwindigkeiten in Verbindung A_UL_OL und A_UL_UR
Abb. 3.93	COCOSYS, Diffusion Var_02, Druckstaffelung, Verlauf der Rn-222 Aktivitätskonzentration in den 4 Raumbereichen des Bades
Abb. 3.94	COCOSYS, Diffusion Var_04, Staffelung der Anfangsluftfeuchte, berechnete Rn-222 Aktivitätskonzentrationen
Abb. 3.95	COCOSYS, Nachrechnung GWK, 4-Zonen-Modell
Abb. 3.96	COCOSYS, Nachrechnung GWK, erweiterte 8-Zonen-Nodalisation 139
Abb. 3.97	Luftdruck (bezogen auf Normalnull) in Freital am 19./20.2.2020 nach https://meteostat.net/de
Abb. 3.98	COCOSYS, Nachrechnung GWK, 4-Zonen-Modell, Var_G01, G03 und G09143
Abb. 3.99	COCOSYS, Nachrechnung GWK, 4-Zonen-Modell, Var_G01, G03 und G09, Massenstrom durch Verbindungen J0, J1, J2144
Abb. 3.100	Windgeschwindigkeit in Freital am 19./20.2.2020 nach https://meteostat.net/de
Abb. 3.101	COCOSYS, Nachrechnung GWK, 4-Zonen-Modell, Var_G09, G12 und G13, Luftwechselzahl im Keller145
Abb. 3.102	COCOSYS, Nachrechnung GWK, 4-Zonen-Modell, Var_G09, G12 und G13146
Abb. 3.103	COCOSYS, Nachrechnung GWK, 4-Zonen-Modell, Var_G09 und G13, Temperaturverläufe147
Abb. 3.104	COCOSYS, Nachrechnung GWK, Var_25, Vergleich der gemessenen und berechneten Rn-222-Aktivitätskonzentration in allen 5 Räumen 150
Abb. 3.105	Resümee der Anwendung von COCOSYS auf Rn-222- Verteilungsvorgänge an Arbeitsplätzen – Stand Januar 2020154
Abb. 3.106	Gemessene Radon-Aktivitätskonzentrationen in Messobjekt 1
Abb. 3.107	Messwerte der Rn-Aktivitätskonzentration im Bad während der Sommer-Messkampagne sowie daran gefittete und für zusätzliche Lüftung berechnete Kurvenverläufe während der ersten 100 h (geschlossene Badtür) mit den resultierenden Mittelwerten im Vergleich zum Richtwert von 300 Bq/m³

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Blower-Door-Messergebnisse für 6 Objekte in der Ubersicht /HAU 17/	11
Tab. 3.2	Mittlere Radon-Aktivitätskonzentration Rn ₅₀ ermittelt mit Hilfe der Quellstärken und Lufteintrittsraten anhand (3.3) /HAU 17/	12
Tab. 3.3	Berechnete Radon-Aktivitätskonzentration Rn ₄ bei normaler Nutzung bei 4 Pa im Jahresmittel (Faktor 12,5) /HAU 17/	12
Tab. 3.4	Anfangs- und Randbedingungen für die COCOSYS-Rechnungen mit dem 3-Zonen-Modell	15
Tab. 3.5	Vergleich der Radon-Aktivitätskonzentration Rn ₅₀ /HAU 17/ mit GRS- Ergebnissen (COCOSYS)	29
Tab. 3.6	Beschreibung der Eingabedaten für TRACER_GAS	. 37
Tab. 3.7	Überblick über die einsetzbare Messtechnik	.51
Tab. 3.8	Übersicht der Positionierung der Messgeräte mit Messintervallen, Messkampagne Winter (26.02.2019 bis 11.03.2019)	55
Tab. 3.9	Übersicht der Positionierung der Messgeräte mit Messintervallen, Messkampagne Sommer (20.08.2019 bis 03.09.2019)	. 56
Tab. 3.10	Positionierung der Messgeräte und Messintervalle in Messobjekt 2	. 62
Tab. 3.11	Übersicht über die Positionierung der Messgeräte und eingestellte Messintervalle	64
Tab. 3.12	Übersicht der im Bad bestimmten mittleren Quellstärken für die verschiedenen Messgeräte und unterschiedliche Auswertungszeiträume	69
Tab. 3.13	Übersicht der durch abschnittsweise lineare Regression bestimmten Luftwechselrate im Bad für die beobachteten linearen Abfälle der logarithmisch aufgetragenen CO ₂ -Konzentration	71
Tab. 3.14	Übersicht der im Bad bestimmten mittleren Quellstärken für die verschiedenen Messgeräte und unterschiedliche Auswertungszeiträume	74
Tab. 3.15	Übersicht der im Bad durch abschnittsweise lineare Regression bestimmten Quellstärken für die beobachteten linearen Anstiege (Abschnitte 1-6) in den mittels EQF gewonnenen Daten im Bereich bis 120 h	76

1ab. 3.16	verschiedenen Messgeräte und unterschiedliche Auswertungszeit- räume
Tab. 3.17	Übersicht der für 2 Abschnitte bestimmten Luftwechselrate im Bad auf Basis der gemessenen CO ₂ -Konzentration83
Tab. 3.18	Ergebnisse der Fits für die Position Kellerklappe für die Abschnitte 1 bis 6 und verschiedene Fitvarianten92
Tab. 3.19	Übersicht der gezeigten Vergleiche der Messdaten
Tab. 3.20	Vergleich der berechneten stationären Radon-Aktivitätskonzentration in Objekt 2 für verschiedene Bedingungen99
Tab. 3.21	Variantenrechnungen zu Objekt 2, Jahres-Mittelwerte, $50 \rightarrow 4$ Pa Unterdruck, 3 Zonen-Datensatz, 0 - 30.000 s
Tab. 3.22	COCOSYS-Variantenrechnung zum EFH Dresden-Freital, Nachrechnung eines 24-Stunden-Ganges für das Bad107
Tab. 3.23	COCOSYS-Variantenrechnung zum EFH Dresden-Freital, Nachrechnung eines 24-Stunden-Ganges für den Flur117
Tab. 3.24	EFH Dresden-Freital - Sommer 2019, Variantenrechnungen zur Luftwechselzahl anhand der CO ₂ -Messung im Bad
Tab. 3.25	EFH Dresden-Freital - Sommer 2019, Variantenrechnungen zur Diffusion in COCOSYS
Tab. 3.26	COCOSYS-Variantenrechnung zum GWK, Nachrechnung eines 22- Stunden-Ganges für Gewölbekeller und Vorratsraum141
Tab. 3.27	Berechnete Mittelwerte der Rn-Aktivitätskonzentration im Bad während der Abschnitte 1-8 (erste 100 h, geschlossene Badtür) für unterschiedliche durch zusätzliche Lüftung erzeugte Luftwechselraten im Vergleich zu den gemessenen Konzentrationen

Abkürzungsverzeichnis

BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

CFD Computational Fluid Dynamic

COCOSYS Containment Code System

EFH Einfamilienhaus

LWZ Luftwechselzahl

RTF Real Time Factor

StrlSchG Strahlenschutzgesetz

Gesellschaft für Anlagenund 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