

**Generische Untersuchungen
zu den Zuständen im
Ringraum eines DWR
KONVOI unter unfallbedingt
erhöhten Leckagen aus dem
Sicherheitsbehälter und
Ableitung von potentiellen
Notfallmaßnahmen zur
Schadensbegrenzung**

**Generische Untersuchungen
zu den Zuständen im
Ringraum eines DWR
KONVOI unter unfallbedingt
erhöhten Leckagen aus dem
Sicherheitsbehälter und
Ableitung von potentiellen
Notfallmaßnahmen zur
Schadensbegrenzung**

Ivan Bakalov
Martin Sonnenkalb
Siegfried Schwarz

März 2018

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende F&E-Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) unter dem Kennzeichen 4715R01345 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.

Corrigendum

Gegenüber der Version vom März 2018 wurde auf Seite 4, Zeilen 5 und 6, der ursprüngliche Wert „(4 x 25 %, notstromgesichert)“ durch den korrekten Wert „(4 x 50 %, notstromgesichert)“ ersetzt.

Deskriptoren

Druckwasserreaktor, Notfallmaßnahmen, Radionuklidverhalten, Reaktorgebäude-Ringraum, Schwerer Störfall, Sicherheitsbehälter, Wasserstofffreisetzung

Kurzfassung

Bei den Unfallabläufen in den KKW am Standort Fukushima kam es in den Blöcken 1 bis 3 zu schweren Kernschäden einschließlich Versagen des Reaktordruckbehälters (RDB) und einer starken Aerosol- und Edelgas- sowie Wasserstofffreisetzung in den Sicherheitsbehälter (SHB). Durch Nachanalysen der Unfallabläufe verfestigte sich die Erkenntnis, dass unfallbedingt erhöhte Leckagen aus dem SHB zum Radionuklid- und Wasserstoffeintrag in das Reaktorgebäude beigetragen haben, in dessen Folge es zu den Explosionen in den Blöcken 1 und 3 kam, die die Reaktorgebäude zerstört haben. Durch die ungefilterte Druckentlastung des SHB als Notfallmaßnahme wurden im weiteren Verlauf die SHB-Leckagen durch Druckabsenkung begrenzt und dabei größere Mengen an Wasserstoff und auch Radionukliden in die Umgebung freigesetzt.

Zielsetzung der Analysen im Forschungsvorhaben war es, mit Hilfe von deterministischen Analysen mit dem GRS-Rechenprogramm COCOSYS mögliche unfallbedingte Zustände im Ringraum (RR) eines DWR vom Typ KONVOI hinsichtlich H₂-Ansammlung und Aerosol- und Edelgasbelastung als Folge von unterschiedlichen Leckagen aus dem SHB vertieft für verschiedene, charakteristisch unterschiedliche Stör- und Unfallszenarien innerhalb des SHB ausgehend aus dem Leistungsbetrieb zu untersuchen. Im Unterschied zu den SWR-Anlagen in Fukushima wird bei deutschen DWR der Druck im SHB durch Einleiten einer gefilterten Druckentlastung unter 0,7 MPa und der radionuklidaustrag durch die Filter begrenzt. Größere SHB-Leckagen sind erst oberhalb von 1,0 MPa gemäß vorliegender strukturdynamischer Untersuchungen zu erwarten. Dennoch wurde für die Untersuchungen im Forschungsvorhaben zusätzlich zur Auslegungsleckage von einer erhöhten 10-fachen Auslegungsleckage zum RR ausgegangen, und es wurde die Wirksamkeit der geplanten Notfallmaßnahmen im HMN generisch untersucht. Weiterhin wurden Möglichkeiten der Erkennung der Gefährdung durch H₂- und Radionuklid-Leckagen zum Ringraum diskutiert und weitere potentielle Notfallmaßnahmen zur Schadensbegrenzung (Einsatz von Rekombinatoren im Ringraum) analysiert. Die Analysen nutzen zwei Unfallszenarien (MBL- und ND*-Fall), die auch in vorlaufenden Analysen der GRS zur Nachanalyse des Reko-Konzeptes und der gefilterten Druckentlastung des SHB als repräsentative Szenarien eingesetzt wurden. Die Analysen beziehen Empfehlungen des RSK-Ausschusses AST mit ein.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung, Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	1
2	Zusammenfassung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik und von Erkenntnissen aus bisherigen Analysen	3
2.1	Sicherheitsbehälter und Ringraum bei DWR vom Typ KONVOI.....	3
2.2	Zustände im Ringraum eines DWR bei SHB-Leckagen (insbesondere Wasserstoff)	5
2.2.1	Experimentelle Erkenntnisse	5
2.2.2	Erkenntnisse aus bisherigen Analysen	8
2.2.3	Schlussfolgerungen	13
2.3	Anlageninternes Notfallschutzkonzept in DWR	15
3	Randbedingungen und Anlagengegebenheiten	19
3.1	Charakteristika der DWR Referenzanlage KONVOI.....	19
3.1.1	Raubereiche im Sicherheitsbehälter	19
3.1.2	Raubereiche im Ringraum	20
3.1.3	Lüftungssysteme des Sicherheitsbehälters und des Ringraums	22
3.2	Durchführungen und Schleusen des Sicherheitsbehälters	26
3.3	Strukturmechanische Untersuchungen zum Versagen des Sicherheitsbehälters und seiner Durchführungen.....	30
4	Ermittlung der Ausgangs- und Randbedingungen der charakteristischen Szenarien	35
4.1	COCOSYS-Datensatz des DWR KONVOI.....	35
4.2	Ausgangs- und Randbedingungen der charakteristischen Szenarien: MBL- und ND*-Fall.....	41
4.3	Massen- und Energiefreisetzung in den Sicherheitsbehälter.....	43
4.4	Schmelzefreisetzung in den Sicherheitsbehälter nach RDB-Versagen	44
4.5	Modellannahmen für die Simulation der Schmelze-Beton- Wechselwirkung.....	46
4.6	Unterstellte Leckagen am Sicherheitsbehälter	50
4.7	Randbedingungen für den Basisfall und für Parametervariationen.....	50

5	Ergebnisse der COCOSYS-Analysen	55
5.1	MBL-Fall – Basisfall und Varianten	55
5.1.1	MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage	55
5.1.2	MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage	66
5.1.3	MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Variation des Ortes der SHB-Leckage	76
5.1.4	MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Ausfall der RR- Störfallabsaugung.....	80
5.2	MBL-Fall – Variantenrechnungen mit Notfallmaßnahmen	87
5.2.1	MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage mit Ausfall der RR- Störfallabsaugung und Einsatz von Zu-/Abluftanlagen im RR gemäß HMN	87
5.2.2	MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage mit Ausfall der RR- Störfallabsaugung und Einsatz der Bedarfsfilteranlage gemäß HMN	92
5.2.3	MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage mit Betrieb der RR- Störfallabsaugung und Einsatz der Umluftanlage im RR.....	93
5.2.4	MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage, mit Ausfall der RR- Störfallabsaugung und Einsatz von Rekos im oberen RR	94
5.3	Vergleich ND*-Fall und MBL-Fall – Einfluss des untersuchten Kernschmelzszenarios auf die Zustände im Ringraum	98
5.3.1	Basisfälle mit SHB-Auslegungsleckage	98
5.3.2	Variationsfälle mit 10-facher Auslegungsleckage des SHB	106
5.4	Variationsfälle mit Schmelzeverlagerung in den Sumpf.....	110
5.4.1	MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage, Ausfall der RR- Störfallabsaugung und Schmelzeverlagerung in den Sumpf	110
5.4.2	ND*-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage des SHB, Ausfall der RR- Störfallabsaugung und Schmelzeverlagerung in den Sumpf	115
6	Erkennbarkeit der Situation im Ringraum.....	121
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	123
	Literaturverzeichnis.....	131
	Abkürzungsverzeichnis.....	135

Abbildungsverzeichnis.....	137
Tabellenverzeichnis.....	147

1 Einleitung, Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im Forschungsvorhaben 3615R01340 wurden unter dem Titel „Vertiefte und generische Auswertung von Betriebserfahrungen – neue Bewertungsmethoden und Störfallanalyseverfahren“ Forschungsarbeiten in insgesamt 5 Arbeitspaketen durchgeführt. Die in diesem Bericht dargestellten Arbeitsergebnisse betreffen das Arbeitspaket 5 zur „Entwicklung von Programmen für Störfall- und Unfallanalysen unter Nutzung der Betriebserfahrung“. Der vorliegende Bericht dokumentiert die Arbeiten im Arbeitspaket 5.4 von insgesamt 4 Arbeitspaketen:

- Arbeitspaket 5.1 "Verifizierung von Analysesimulatoren"
- Arbeitspaket 5.2 "Ergänzung der bestehenden PSA der Stufe 2"
- Arbeitspaket 5.3 "Untersuchungen zur deterministischen Bewertung der Einwirkungen aus Gasfreisetzungen und chemischen Explosionen"
- Arbeitspaket 5.4 "Generische Untersuchungen zu den Zuständen im Ringraum eines DWR KONVOI unter unfallbedingt erhöhten Leckagen aus dem Sicherheitsbehälter (SHB) und Ableitung von potentiellen Notfallmaßnahmen (NFM) zur Schadensbegrenzung"

Zielsetzung war es, mit Hilfe von deterministischen Analysen mit dem GRS-Rechenprogramm COCOSYS mögliche unfallbedingte Zustände im Ringraum (RR) des Reaktorgebäudes (RG) eines DWR vom Typ KONVOI hinsichtlich H₂-Ansammlung und Aerosol- und Edelgasbelastung als Folge von unterschiedlichen, unfallbedingten Leckagen aus dem Sicherheitsbehälter (SHB) zu untersuchen. Dabei sollten verschiedene, charakteristisch unterschiedliche Stör- und Unfallszenarien innerhalb des SHB ausgehend aus dem Leistungsbetrieb untersucht werden. Weiterhin sollten Möglichkeiten der Erkennung der Gefährdung durch H₂- und Radionuklid-Leckagen zum RR diskutiert und vorhandene Notfallmaßnahmen zur Schadensbegrenzung hinsichtlich ihrer Wirksamkeit analysiert und bewertet werden sowie ggf. potentielle weitere Notfallmaßnahmen untersucht werden.

Das Interesse und die Bedeutung derartiger Untersuchungen für deutsche KKW resultieren aus den Unfallabläufen in den Kernkraftwerken (KKW) am Standort Fukushima, bei denen es in den Blöcken 1 bis 3 ausgelöst durch Erdbeben, Totalausfall der Spannungsversorgung der Anlagen und nachfolgenden Tsunami zu schweren Kernschäden einschließlich Versagen des Reaktordruckbehälters (RDB) und einer starken Aerosol-,

Edelgas- sowie Wasserstofffreisetzung in den SHB und aus diesem in die angrenzenden Gebäude kam. Durch Nachanalysen der Unfallabläufe verfestigte sich die Erkenntnis, dass unfallbedingt erhöhte Leckagen aus dem SHB zum Radionuklid- und Wasserstoffeintrag in das Reaktorgebäude beigetragen haben, in dessen Folge es zu den H₂-Explosionen in den Blöcken 1 und 3 sowie 4 kam, die die Reaktorgebäude zerstört haben. Durch die ungefilterte Druckentlastung des SHB als Notfallmaßnahme wurden im Unfallverlauf ein globales SHB-Versagen vermieden und die SHB-Leckagen durch Druckabsenkung begrenzt, dabei aber größere Mengen an Radionukliden und Wasserstoff in die Umgebung freigesetzt. Die ungefilterte Druckentlastung konnte allerdings wegen der vorliegenden Anlagensituation jeweils erst bei Drücken im SHB jenseits der Auslegungswerte eingeleitet werden.

Im Unterschied zum Unfallablauf in Fukushima würde bei deutschen DWR unter Unfallbedingungen durch die geplanten Notfallmaßnahmen der Druck im SHB durch Einleiten einer gefilterten Druckentlastung unter 0,7 MPa¹ begrenzt werden, d. h. diese würde bereits etwa bei Erreichen des Prüfdruckes des SHB eingeleitet werden. Größere SHB-Leckagen oder das lokale Versagen des SHB sind gemäß verschiedener Untersuchungen /GRS 01/ erst im Druckbereich oberhalb von ~1,0 MPa zu befürchten. Für die Untersuchungen zu den Auswirkungen von Freisetzungen aus dem SHB in den RR über Leckagen und zur Wirksamkeit von mitigativen Notfallmaßnahmen wurde deshalb das Auftreten von Leckagen des SHB im Bereich der Kabeldurchführungen durch die Stahlschale, die größer als die Auslegungsleckage sind, als zusätzlicher Fehler unterstellt.

Für die Analysen wurden zwei repräsentative Szenarien von Unfallabläufen zu Grunde gelegt, die bereits in vorlaufenden Untersuchungen der GRS zur Nachanalyse des Reko-Konzeptes zum Wasserstoffabbau im SHB /BAN 12/ und zur Bewertung der Wirksamkeit der gefilterten Druckentlastung des SHB /SCH 15/ verwendet wurden. Die Analysen beziehen Empfehlungen der Reaktorsicherheitskommission (RSK) bzw. des RSK-Ausschusses Anlagen- und Systemtechnik (AST) zum Notfallschutz und zu unfallbedingten Leckagen aus dem SHB mit ein /RSK 11/, /RSK 15/. Die Erkenntnisse können zur weiteren Absicherung und Verbesserung der geplanten Notfallmaßnahmen im Handbuch für mitigativen Notfallschutz (HMN) für den Fall von erhöhten Leckagen am SHB einfließen.

¹ Hinweis: Alle Angaben zu Drücken in SHB, RR oder RKL im Bericht sind Absolutdrücke; Abweichungen werden angegeben.

2 Zusammenfassung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik und von Erkenntnissen aus bisherigen Analysen

Nachfolgend sind Erkenntnisse aus bisherigen Analysen zur Thematik sowie grundsätzliche Ausführungen zum relevanten Stand von Wissenschaft und Technik zusammengefasst. Diese betreffen die Forschungsvorhaben SR2306 /SON 01a/ und 3609R01375 /BAN 12/ zur Untersuchung von Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes, 3613R01397 /STE 15/ zur Untersuchung aktueller Notfallschutzunterlagen (Notfallhandbuch, NHB und Handbuch Mitigativer Notfallschutz, HMN) sowie die Erkenntnisse der Diskussionen im Ausschuss „Anlagen- und Systemtechnik (AST)“ der Reaktorsicherheitskommission (RSK) zum Sachverhalt „Wasserstofffreisetzung aus dem Sicherheitsbehälter“ /RSK 15/. Die Analysen wurden für DWR KONVOI am Beispiel der Referenzanlage GKN-2 durchgeführt. Die Ausführungen unterscheiden folgende Sachverhalte:

- Charakteristika des SHB und des RR eines DWR vom Typ KONVOI,
- Kenntnisstand hinsichtlich der Zustände im RR bei unfallbedingten Leckagen aus dem SHB (insbesondere Wasserstoff) und
- vorgesehene mitigative Notfallmaßnahmen bei DWR vom Typ KONVOI.

2.1 Sicherheitsbehälter und Ringraum bei DWR vom Typ KONVOI

Der SHB (Abb. 2.1) einschließlich aller Durchführungen (mehrere 100 Rohr- und Kabeldurchführungen auf ~12 m Höhe) und Schleusen (Personenschleuse und eine Not- schleuse auf ~12 m und Materialschleuse und eine Notschleusen auf ~25 m Höhe) ist so ausgelegt, dass er unter Einhaltung der zugrunde gelegten Leckrate den statischen, dynamischen und thermischen Einwirkungen aus Anlagenzuständen des Normalbetriebs sowie des anormalen Betriebs und aus Störfällen sowie sehr seltenen Ereignissen standhält. Ferner sind Einrichtungen und Notfallmaßnahmen vorgesehen, mit denen auch bei Abläufen und Anlagenzuständen infolge von Ereignissen mit Mehrfachversagen von Sicherheitseinrichtungen und von Unfällen mit Kernschäden ein Versagen des Sicherheitsbehälters durch Überdruck (gefilterte Druckentlastung) oder unzulässige dynamische Belastungen aus H₂-Reaktionen (Passive Autokatalytische Rekombinatoren, Reko) vermieden werden kann.

Der RR des DWR besteht aus einem großen offenen Raumbereich (im Weiteren Ring-spalt genannt) sowie eine Reihe von separaten Räumen (im Weiteren RR-Räume ge-nannt) auf mehreren Bühnen im mittleren Bereich sowie den Räumen für die Notküh-leinrichtungen im unteren Bereich. Im RR des DWR vom Typ KONVOI ist mit der Störfallringraumabsaugung ein aktives Lüftungssystem installiert, das 4-strängig (4 x 50 %, notstromgesichert) aufgebaut ist und den Unterdruck im Ringraum auch unter Störfallbedingungen aufrecht halten soll und die Abluft gefiltert an die Umgebung ab-gibt. Die Absaugung aus dem Ringraum erfolgt auf ca. 12 m neben der Personen-schleuse.

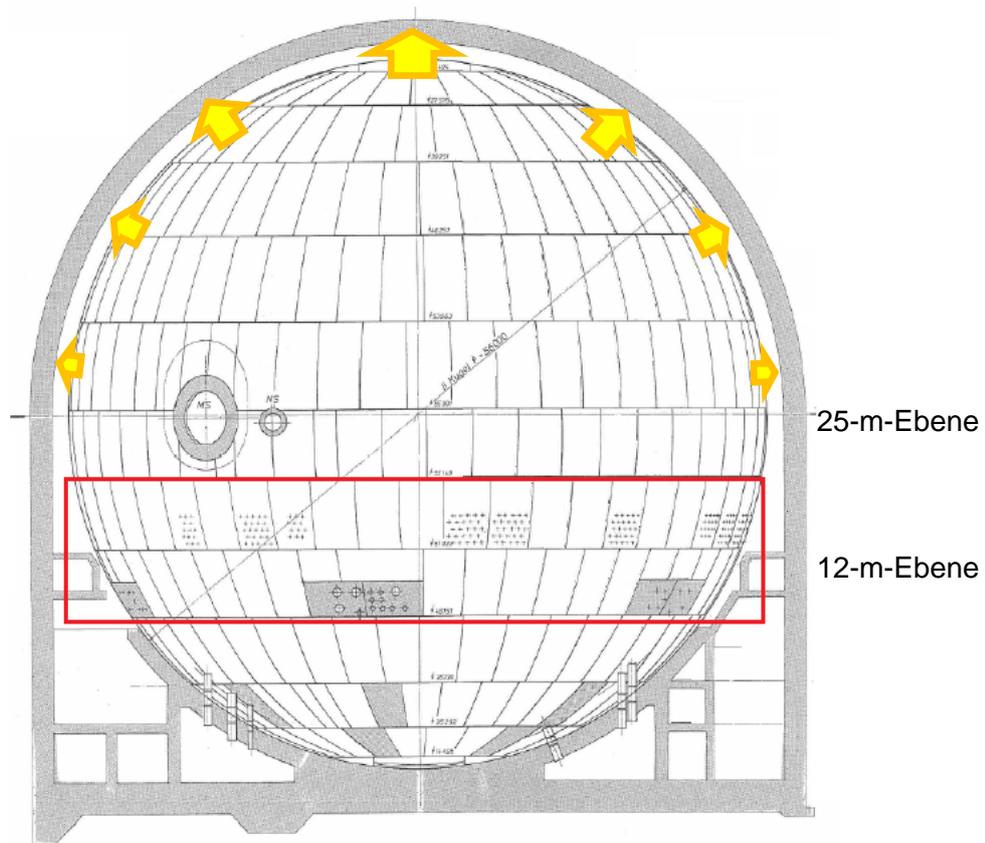


Abb. 2.1 SHB und RR des DWR vom Typ KONVOI mit Lage der wesentlichen Durchführungen (roter Bereich) und Schleusen (ausgewählte) sowie An-deutung der Wärmeabgabe in den RR über die Stahlschale

Der Druckaufbau im Ringraum bei Stör- und Unfällen resultiert aus der Leckage aus dem SHB sowie aus der Ausdehnung des Gasvolumens bedingt durch den Tempera-turanstieg resultierend aus Wärmeabgabe aus dem Sicherheitsbehälter. Dieser erfolgt über die Stahlschale, die im mittleren und oberen Bereich frei liegt, während sie im un-teren Bereich im Beton eingebettet ist. Die Verteilung der Gase im Ringraum hängt von

verschiedenen Faktoren ab, insbesondere auch der Lage der Leckage und der Temperaturverteilung im Ringraum. Erkenntnisse aus vorlaufenden Untersuchungen werden nachfolgend zusammengefasst.

2.2 Zustände im Ringraum eines DWR bei SHB-Leckagen (insbesondere Wasserstoff)

2.2.1 Experimentelle Erkenntnisse

Am Battelle Modell Containment (BMC) wurden ab 1979 Grundlagenversuche durchgeführt /LAN 79/, /LAN 82/. Ziel war es u. a., die Verteilung von Wasserstoff in untereinander verbundenen Räumen unter verschiedenen Bedingungen nach Kühlmittelverluststörfall (KMV) zu untersuchen. Relevant sind hier die Experimente zur Temperaturschichtung und H₂-Einspeisung in der Raumkette R3 – R1 – R2 im BMC (Abb. 2.2).

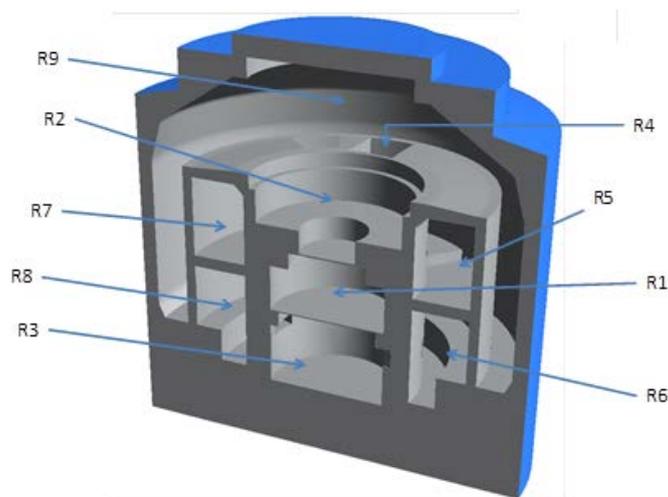


Abb. 2.2 Schnitt durch das Battelle Modell Containment (BMC) mit Bezeichnung der Raumbereiche

In verschiedenen Versuchen wurde Wasserstoff an verschiedenen Positionen (meist tief) in den Raum R3 oder R1 eingespeist, wobei sowohl die Temperatur des eingespeisten Gases als auch die Temperaturverteilung in den verbundenen Räumen R3 – R1 – R2 variiert wurde. Ziel war es zu untersuchen, welche prinzipiellen Einflussfaktoren die Vermischung des Wasserstoffes begünstigen oder behindern. Auch wenn die Versuchsbedingungen hinsichtlich der Temperaturen nur bedingt repräsentativ sind,

zeigt sich, dass der Wasserstoff nicht immer schnell nach oben steigt, wie auf Grund seiner geringeren Dichte gegenüber einem Luft-/Dampfgemisch zumeist vermutet wird.

Die Ergebnisse dreier repräsentativer Versuche sind in Abb. 2.3 bis Abb. 2.5 verglichen. Bei homogener Temperaturverteilung in der Raumkette und etwa gleicher Temperatur des eingespeisten Gases hängt die sich einstellende Gaskonzentrationsverteilung von der Lage der Einspeisestelle ab. Bei tiefer Einspeisung (Abb. 2.3) verteilt sich das Gas homogen in der Raumkette, während sich bei mittig liegender Einspeisung eine Gasschichtung ausbildet (Abb. 2.4), die sich durch Diffusion nur langsam auflöst. Eine Temperaturschichtung in der Raumkette mit höheren Temperaturen im oberen Bereich, wie sie unter Störfallbedingungen auch im RR des RG zu erwarten ist, und eine tief liegende Gaseinspeisung bei kälteren Temperaturen führen auch zu einer Gasschichtung (Abb. 2.5). Dabei wurden die höheren Gaskonzentrationen zunächst im Bereich der unteren Räume mit der Gaseinspeisung gemessen, d. h. das leichtere Gas konnte wegen der temperaturbedingten Dichteunterschiede nicht aufsteigen. Auch konnte eine Homogenisierung der Gasverteilung allein durch Diffusion des Wasserstoffs im betrachteten Zeitbereich nicht gezeigt werden. Daraus ist zu schlussfolgern, dass für die Untersuchungen in der DWR-Anlage die Kenntnis der potentiellen Lage des Leckortes ebenso wichtig ist wie die Modellierung der realen Gegebenheiten und unter Störfallbedingungen zu erwartenden Temperaturverteilungen.

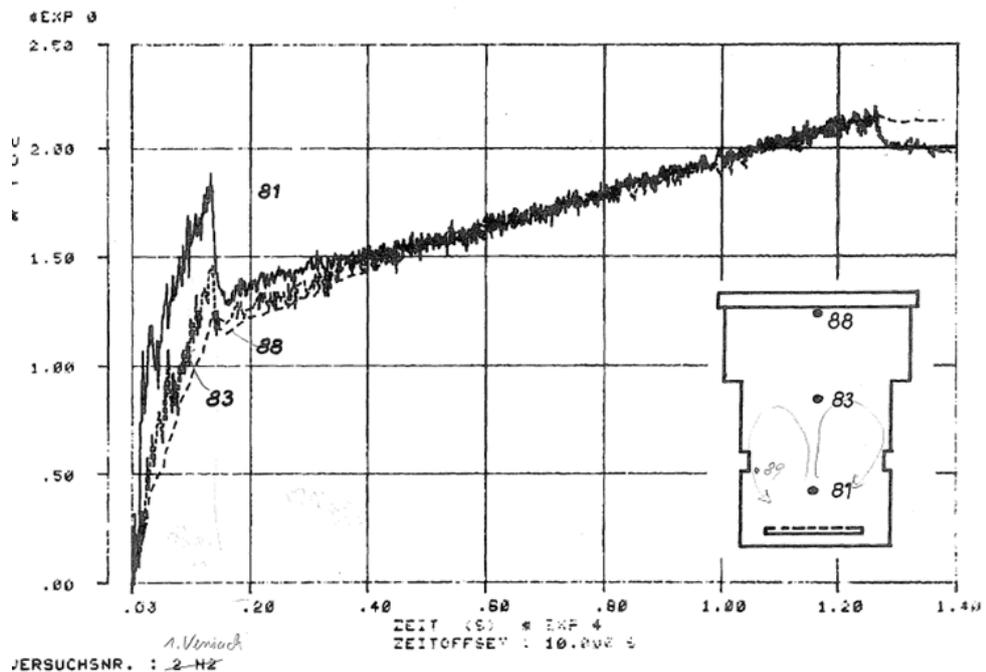


Abb. 2.3 H₂-Konzentration in einer Raumkette, BMC-Versuch zur H₂-Einspeisung tief in eine Raumkette mit homogener Temperaturverteilung /LAN 79/

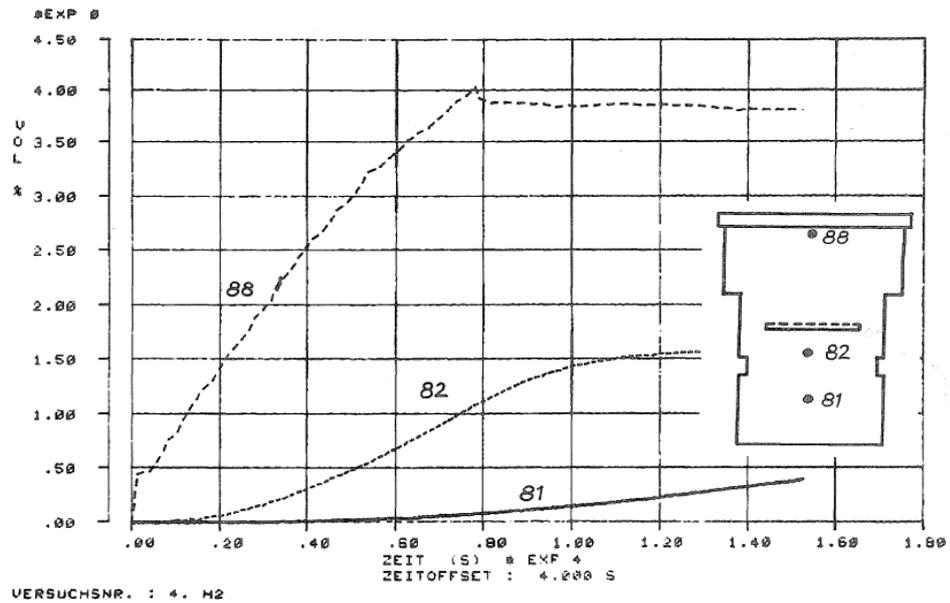


Abb. 2.4 H₂-Konzentration in einer Raumkette, BMC-Versuch zur H₂-Einspeisung mittig in eine Raumkette mit homogener Temperaturverteilung /LAN 79/

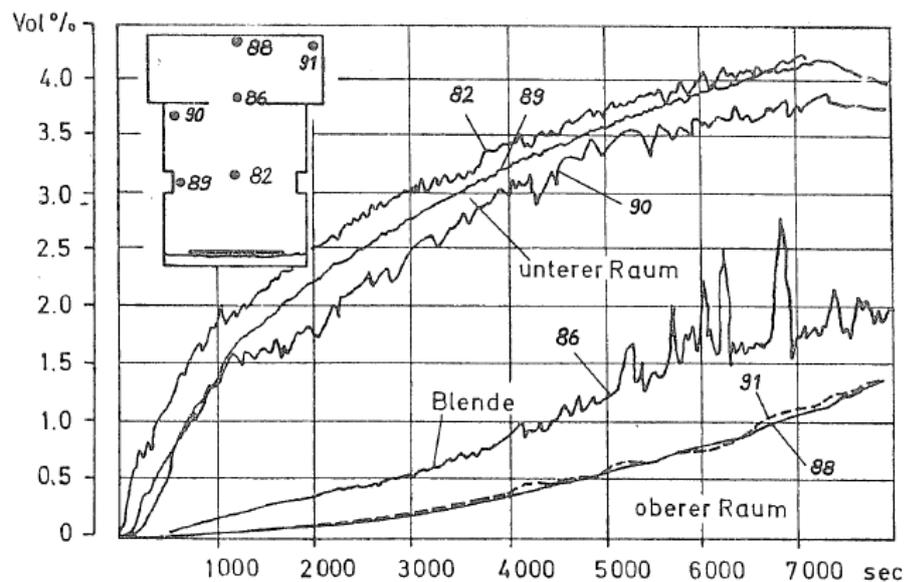


Abb. 2.5 H₂-Konzentration in einer Raumkette, BMC-Versuch zur H₂-Einspeisung tief in eine Raumkette mit Temperaturschichtung in der Raumkette und kalter Einspeisetemperatur des Gases /LAN 79/

Als Fazit aus diesen Versuchen ist zu ziehen, dass:

- die Zustände bei Eintrag von Wasserstoff (und Radionukliden) aus SHB-Leckagen in eine Raumkette bzw. den RR stark abhängig sind von verschiedenen Randbedingungen des Unfallablaufes,

- die Annahme einer generellen homogenen Gasverteilung im RR eher unwahrscheinlich ist, und
- eine lokale Aufkonzentration von Gasen in unterschiedlichen Bereichen keinesfalls auszuschließen ist.

2.2.2 Erkenntnisse aus bisherigen Analysen

Im Rahmen des BMU-Forschungsvorhabens SR 2306 (März 1998 bis Juni 2001) /SON 01a/ wurden umfangreiche Analysen mit COCOSYS zum Reko-Basiskonzept zum Wasserstoffabbau für DWR KONVOI erstellt. In diesem Zusammenhang wurden auch Analysen mit COCOSYS zu unfallbedingten Leckagen aus dem SHB in den RR gemacht. Dabei wurde die nominale (0,25 Vol.-%/d), und eine 10- bzw. 100-fach erhöhte SHB-Leckage in den Ringraum über eine auf ~25 m angeordnete Leckage (Annahme an der Materialschleuse) angesetzt und der Betrieb der RR-Störfallabsaugung simuliert. Das Verhalten der brennbaren Gase im RR, ihre Schichtung und Konvektion sowie die Auswirkung verschiedener Randbedingungen und Leckagen vom SHB in den RR, wurden parametrisch mit COCOSYS untersucht. Das Aerosolverhalten im SHB und auch im RR wurde nicht detailliert simuliert, sondern nur der Energieeintrag durch die Nachzerfallsleistung der Radionuklide in die Atmosphäre, den Sumpf im SHB sowie in ausgewählte Strukturen berücksichtigt. Als unterstelltes Unfallszenario wurde ein kleines Leck am Kühlkreislauf ausgewählt.

Parameterrechnungen mit COCOSYS zeigten, dass die Modellierung der Lage der Leckage zwischen SHB und RR sich auf die Ergebnisse deutlich auswirkt und eine genauere Nodalisation im RR nötig macht. Deshalb wurde für die Parameterrechnungen eine feinere Nodalisation insbesondere des RR erstellt (Abb. 2.6, rechts), die den RR in 4 Quadranten und einige axiale Ebenen unterteilt. Separate Räume des RR wurden nicht im Einzelnen betrachtet.

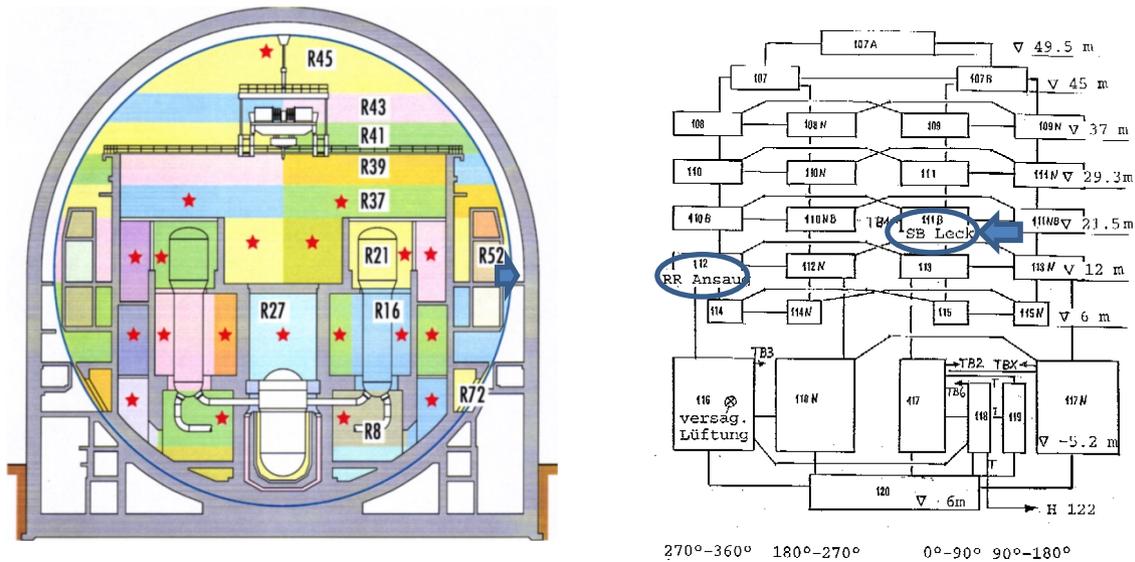


Abb. 2.6 COCOSYS Nodalisation des DWR KONVOI mit Reko-Basissystem (links) und des RG-Ringraums (rechts) mit Angabe der Lage der SHB-Leckage und RR-Störfallabsaugung /SON 01a/

Exemplarisch wird auf Ergebnisse (H_2 -Konzentration im RR) für den Basisfall (Abb. 2.7) mit nominaler Auslegungsleckage des SHB zum RR an der Materialschleuse (höchst möglicher Leckageort am SHB) sowie einen Fall mit 10-fach erhöhter Auslegungsleckage zum RR (Abb. 2.8) eingegangen. Tendenziell kommt es im RR bis zum Ende der Rechnung in beiden Fällen trotz laufender RR-Störfallabsaugung zu einer unterschiedlich starken Ansammlung von H_2 im Bereich oberhalb des Lecks. Brennbares Gasgemische sind im betrachteten Zeitraum nur bei mindestens 10-fach erhöhter Leckage zu erwarten, wenngleich die Tendenz generell eindeutig ist. Der Bereich des Unfallablaufes, in dem die SHB-Druckentlastung eingesetzt würde, wurde hier noch nicht erreicht.

Wesentlich ist, dass es im RR analog zur Situation im SHB eine klare höhenabhängige Temperaturschichtung gibt (oben heiß, nach unten hin abnehmende Temperatur, siehe Abb. 2.9), da ein großer Teil der Energie aus dem SHB über die SHB-Stahlschale in den RR bereits in der frühen Unfallphase vor Kernzerstörung übertragen wird. Der über die Leckage aus dem SHB einströmende Dampf kondensiert sofort im RR, so dass dieser nicht inertisierend wirken kann. Der Vorgang der Freisetzung aus dem SHB in den RR entspricht hier dem Eintrag heißen Gases in eine Umgebung etwa gleicher Temperatur, d. h. das heiße Gas kann im Wesentlichen nach oben steigen, kann aber auch von anderen Randbedingungen, wie z. B. der Dampfkondensation, beeinflusst

werden. Wegen der hohen Lage der Leckage aus dem SHB bildet sich eine Gas-schichtung analog zur Temperaturschichtung aus, d. h. hohe Gaskonzentrationen im oberen Bereich des RR oberhalb ~25 m.

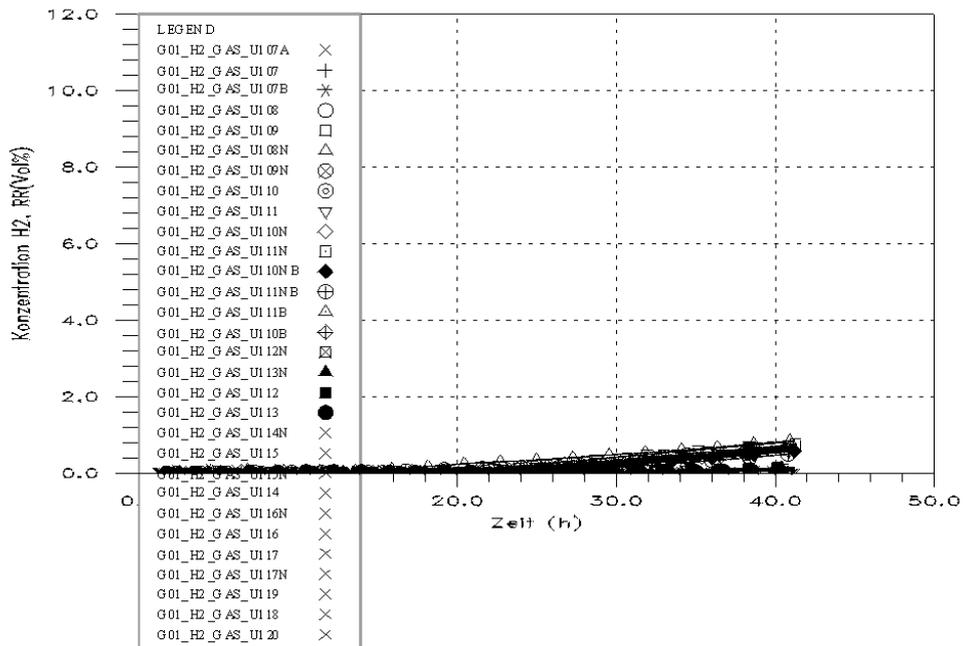


Abb. 2.7 H₂-Konzentration im Ringraum bei nominaler Auslegungsleckage des SHB zum RR, COCOSYS /SON 01a/

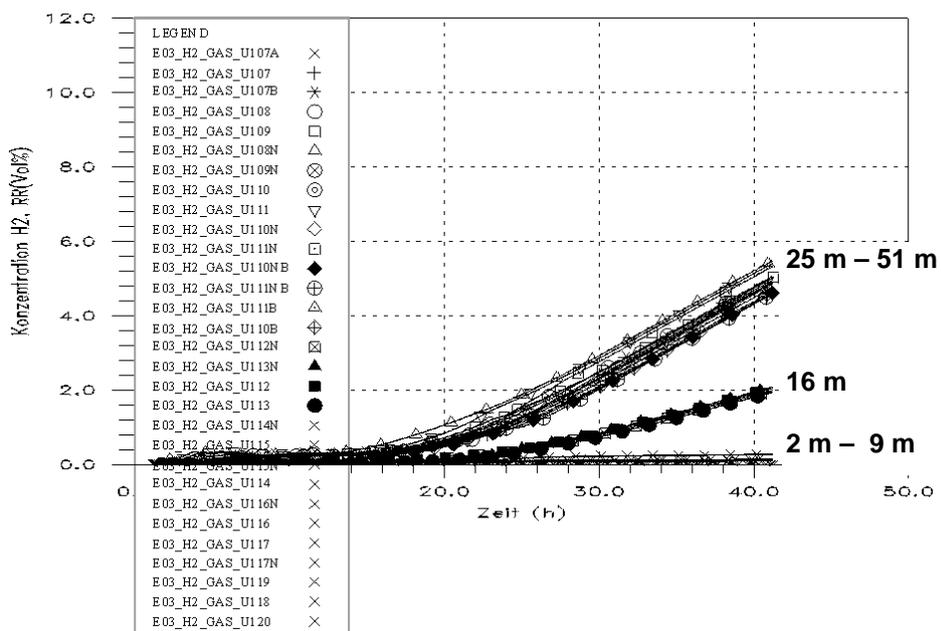


Abb. 2.8 H₂-Konzentration im Ringraum bei 10-facher Auslegungsleckage des SHB zum RR, COCOSYS /SON 01a/

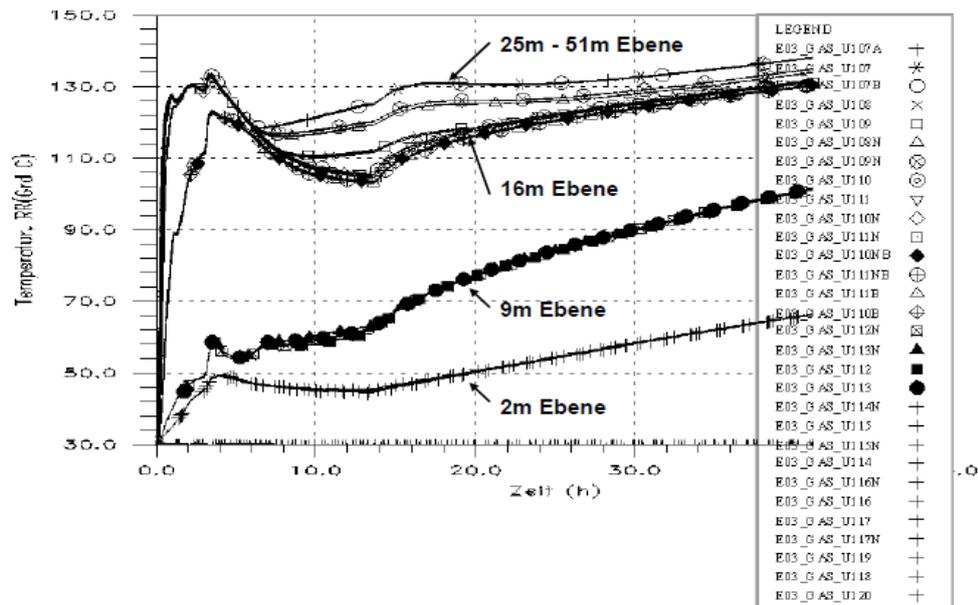


Abb. 2.9 Temperatur der Atmosphäre im Ringraum bei 10-facher Auslegungsleckage des SHB zum RR, COCOSYS /SON 01a/

Weitere Erkenntnisse konnten aus den Arbeiten im BMU-Forschungsvorhaben 3609R01375 (Dezember 2009 – November 2011) /BAN 12/ gewonnen werden und wurden für die Diskussion im RSK-Ausschuss AST von der GRS aufbereitet. In diesem Forschungsvorhaben wurde der gesamte COCOSYS-Datensatz im Vergleich zum Forschungsvorhaben SR 2306 überarbeitet und das Detail der Nodalisation wesentlich erweitert (ca. 300 Zonen, siehe Abb. 2.10). Die nominale SHB-Auslegungsleckage von 0,25 Vol.-%/d wurde als eine SHB-Leckage im Bereich der Durchführungen des SHB auf ~12 m simuliert. Dies ist eine vergleichsweise tief liegende Leckage zum RR. Die RR-Störfallabsaugung wurde in diesen Fällen nicht simuliert, da sie für die Unfallanalysen im SHB unerheblich war. Es wurden vier Unfallabläufe untersucht, zwei von den Analysen auch mit Simulation des Aerosolverhaltens im SHB /BAN 12/.

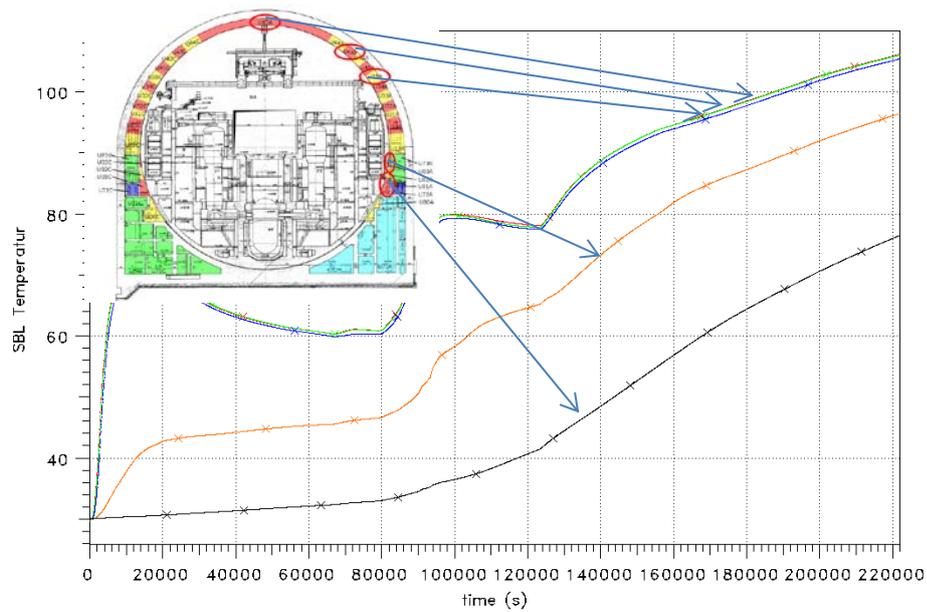


Abb. 2.11 Temperatur der Atmosphäre im Ringraum bei nominaler Auslegungsleckage des SHB zum RR, COCOSYS /BAN 12/

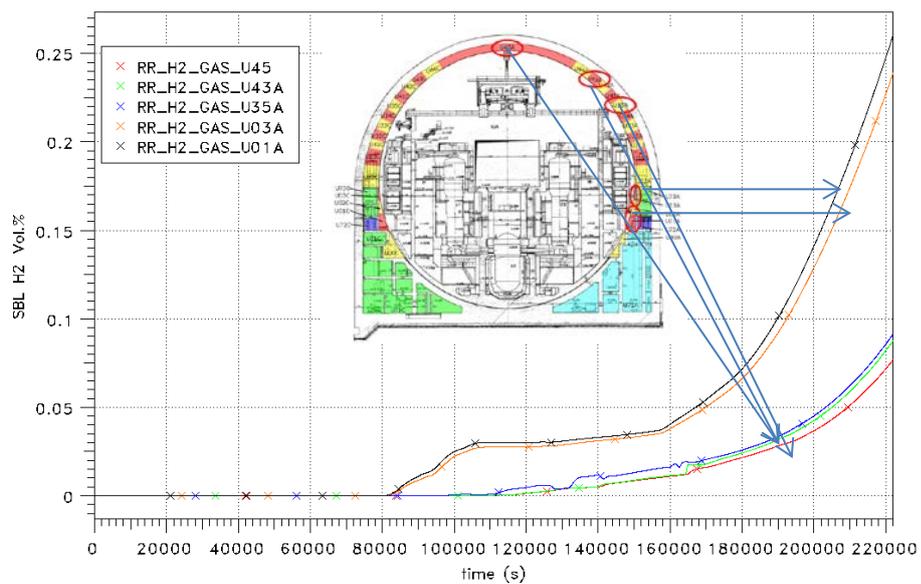


Abb. 2.12 H₂-Konzentration im Ringraum bei nominaler Auslegungsleckage des SHB zum RR, COCOSYS /BAN 12/

2.2.3 Schlussfolgerungen

Mit den Ergebnissen aus den Analysen aus den beiden BMU-Forschungsvorhaben werden grundlegende Erkenntnisse zu den Zuständen im Ringraum eines DWR bei unfallbedingtem Leckagen aus dem SHB bereitgestellt, eine systematische Analyse der zu erwartenden Zustände unter verschiedenen möglichen Randbedingungen fehlt aber,

genauso wie die Untersuchung zu möglichen und wirksamen Gegenmaßnahmen und auch eine Berücksichtigung des Einflusses von Radionukliden. Folgende Schlussfolgerungen wurden zum Beginn des Forschungsvorhabens gezogen:

- Im RR liegt unter Stör- und Unfallbedingungen abhängig vom Ablauf im SHB eine thermische Schichtung vor (heiß oben, kalt unten), d. h. es herrschen i. d. R. ausgeprägte Temperaturunterschiede.
- Die BMC-Versuche zeigen physikalische Vorgänge auf, die prinzipiell übertragbar sind.
- Die Zustände im RR sind abhängig von:
 - dem Unfallablauf innerhalb des Sicherheitsbehälters und der Dauer von MCCI bzgl. der Verteilung/Masse von H_2 , CO und dem Massenausstrag zum RR,
 - der Lage und Größe der Leckage (bisher nur an einem Punkt konzentriert) vom SHB in den RR und damit auch der Temperatur des Leckmassenstromes,
 - der Funktion der RR-Störfallabsaugung (Absaugung nur an einem Ort im RR), und
 - dem Vorhandensein und der Lage möglicher Leckagen aus der Umwelt bzw. dem Hilfsanlagegebäude in den RR, sofern die RR-Störfallabsaugung während des Unfallablaufs einen Unterdruck im RR gegen die Umwelt aufrecht halten kann.
- Der Status bisheriger Analysen lässt folgende Erkenntnisse zu:
 - Die Wahrscheinlichkeit für brennbare Zustände im RR bei Auslegungsleckage des SHB ist in den ersten Tagen generell gering. Sie steigt aber bei erhöhter SHB-Leckage auch in den ersten Tagen deutlich an.
 - Die eingesetzten COCOSYS-Modelle sind unterschiedlich und soweit für das Analyseziel erforderlich auf Zustände im RR zugeschnitten gewesen. Eine Freisetzung von Spaltprodukten in den RR wurde bisher nicht betrachtet oder ausgewertet. Eine komplette Modellierung aller Gegebenheiten insbesondere im RR ist erforderlich.

2.3 Anlageninternes Notfallschutzkonzept in DWR

Das sowohl weltweit als auch in der Bundesrepublik Deutschland angewandte Sicherheitskonzept für Kernkraftwerke sieht die in die Tiefe gestaffelte Vorsorge gegen Schäden bzw. Risiken in mehreren Sicherheitsebenen vor. Eine aktuelle Zusammenstellung der diesbezüglichen Anforderungen findet sich in den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 12/. Dort werden die aktuellen wesentlichen sicherheitstechnischen Merkmale, wie z. B. das Zusammenwirken des Barrierenkonzeptes (insbesondere auch der SHB als letzte Barriere) mit dem Konzept der Sicherheitsebenen im gestaffelten Sicherheitskonzept dargelegt. Außerhalb des Bereichs der deterministischen Anlagenauslegung verbleiben aber extrem unwahrscheinliche Ereignisabläufe, z. B. verursacht durch Mehrfachausfälle von Systemen, die ohne wirksame Notfallmaßnahmen zum Kernschmelzen führen können.

Beginnend in den 80er Jahren nach dem Unfall in TMI-2 wurde in Deutschland ein anlageninternes Notfallschutzkonzept entwickelt, in der RSK diskutiert und durch die Betreiber umgesetzt, so dass auslegungsgemäß nicht vorhergesehene bzw. nicht beherrschte Anlagenzustände rechtzeitig erkannt, kontrolliert und in ihren möglichen Auswirkungen innerhalb und außerhalb der Anlage wirksam begrenzt werden können /BMU 05/. Die deutsche Vorgehensweise setzte dabei schwerpunktmäßig bei den mitigativen Notfallmaßnahmen auf Hardwareertüchtigungen bzw. Nachrüstungen zum Erhalt der Integrität des SHB durch eine gefilterte Druckentlastung oder der Vermeidung von großräumigen H₂-Verbrennungen durch Passive Autokatalytische Rekombinatoren (Reko) /BMU 12/. Erforderliche aktive Handlungen des Personals wurden im Notfallhandbuch der Anlage beschrieben.

Die Bewertung der Unfallabläufe in Fukushima sowie die Erkenntnisse aus den durchgeführten Stresstests /BMU 11/ führten zur Erweiterung des anlageninternen Notfallschutzkonzeptes. U. a. wurde ein „Handbuch Mitigativer Notfallschutz“ (HMN) eingeführt /VGB 13/, das Handlungsempfehlungen für den anlageninternen Krisenstab bereithält, die nach bestimmten Anlagenzuständen gruppiert sind, wozu jetzt auch solche mit Leckagen aus dem SHB in den Ringraum gehören.

Die im HMN der Referenzanlage beschriebenen mitigativen Notfallmaßnahmen greifen auf bisher installierte Systeme der Anlage zurück. In den HMN werden Ereignisse bei Unfällen aus dem Leistungsbetrieb als auch aus dem Nichtleistungsbetrieb unterschieden. Bei den Ereignissen aus dem Leistungsbetrieb werden die beiden grundsätzlich

möglichen Anlagenzustände oder Kernschadenzustände "A/B – vor RDB-Versagen" und "C – nach RDB-Versagen" unterschieden. Für jeden der beiden möglichen Anlagenzustände werden jeweils 6 weitere Zustände bezüglich der Integrität der SHB unterschieden; diese sind:

- 1 – SHB Integrität sichergestellt
- 2 – SHB Integrität gefährdet
- 3 – Bypass aus dem RKL zur Sekundärseite
- 4 – Bypass aus dem RKL zum Ringraum
- 5 – Bypass aus dem RKL zum Hilfsanlagegebäude
- 6 – Leck am SHB

Bezüglich der im Forschungsvorhaben relevanten Thematik der unfallbedingten und ggf. erhöhten SHB-Leckagen in den RR ist der SHB-Zustand "6 – Leck am SHB" besonders relevant; bedingt auch der Zustand "4 – Bypass aus dem RKL zum Ringraum", insbesondere wegen der erforderlichen Abgrenzung zur Detektion der Ursache der Freisetzung und der zu ergreifenden Maßnahmen. Im HMN der Referenzanlage sind zusätzlich zur vorgesehenen Nutzung der installierten RR-Störfallabsaugung oder der gefilterten Druckentlastung des SHB auch folgende Notfallmaßnahmen vorgesehen:

- Rechtzeitige Herstellung einer kontrollierten Belüftung des RR zur Begrenzung des Anstiegs der H₂-Konzentration – Nutzung des Zu-/Abluftsystem des RG,
- Umwälzung der Atmosphäre im Ringraum zur Beseitigung von Schichtungen – Nutzung von Umluftsystemen im RG,
- Absaugung von Ringraumluft mit Maßnahmen zur Verringerung der Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung (z. B. Filterung, Abgabe über Kamin) – Nutzung der Bedarffilteranlage.

Beratungen der RSK und seines Ausschusses AST zum Thema „Wasserstofffreisetzung aus dem Sicherheitsbehälter“ wurden ab 2013 geführt und mündeten in einen Beschluss der RSK auf der 475. Sitzung der RSK am 15.04.2015. Die Empfehlung für DWR sieht die Vermeidung der Ausbildung von zündbaren Gasgemischen im Ringraum durch nachfolgend genannte mitigative Notfallmaßnahmen vor:

- Umwälzung der Atmosphäre im Ringraum (Beseitigung von Schichtungen) sowie rechtzeitig eine kontrollierte Belüftung (Begrenzung des Anstiegs der H₂-Konzentration).
- Absaugung von Ringraumlufte mit Maßnahmen zur Verringerung der Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung (z. B. Filterung, Abgabe über Kamin).
- Alternative Möglichkeiten zum Wasserstoffabbau können auch vorgesehen werden.

Diese Notfallmaßnahmen sollen in die existierenden HMN der Anlagen integriert werden, wenn nicht bereits erfolgt, und sollen bei der Festlegung von zu untersuchenden Szenarien im Forschungsvorhaben bezüglich der unfallbedingten Belastungen im Ringraum berücksichtigt werden.

3 Randbedingungen und Anlagengegebenheiten

3.1 Charakteristika der DWR Referenzanlage KONVOI

3.1.1 Raumbereiche im Sicherheitsbehälter

Die Räume innerhalb des SHB können in vier Bereiche unterteilt werden, in denen jeweils ein unterschiedliches Verhalten der Thermohydraulik und von Radionukliden (Iod, Aerosole) im Verlauf von Stör- und Unfällen auftreten kann (s. Abb. 3.1); das sind:

- Große Anlagenräume (mittelblau in Abb. 3.1), in denen sich der Reaktordruckbehälter und die Dampferzeuger befinden und kleine Anlagenräume und Treppenhäuser (hellblau in Abb. 3.1) innerhalb des Trümmerschutzzylinders,
- Betriebsräume / Dom (grün in Abb. 3.1) im oberen Bereich des SHB,
- Peripherie (gelb in Abb. 3.1) des SHB, zwischen Trümmerschutzzylinder und SHB-Stahlschale.

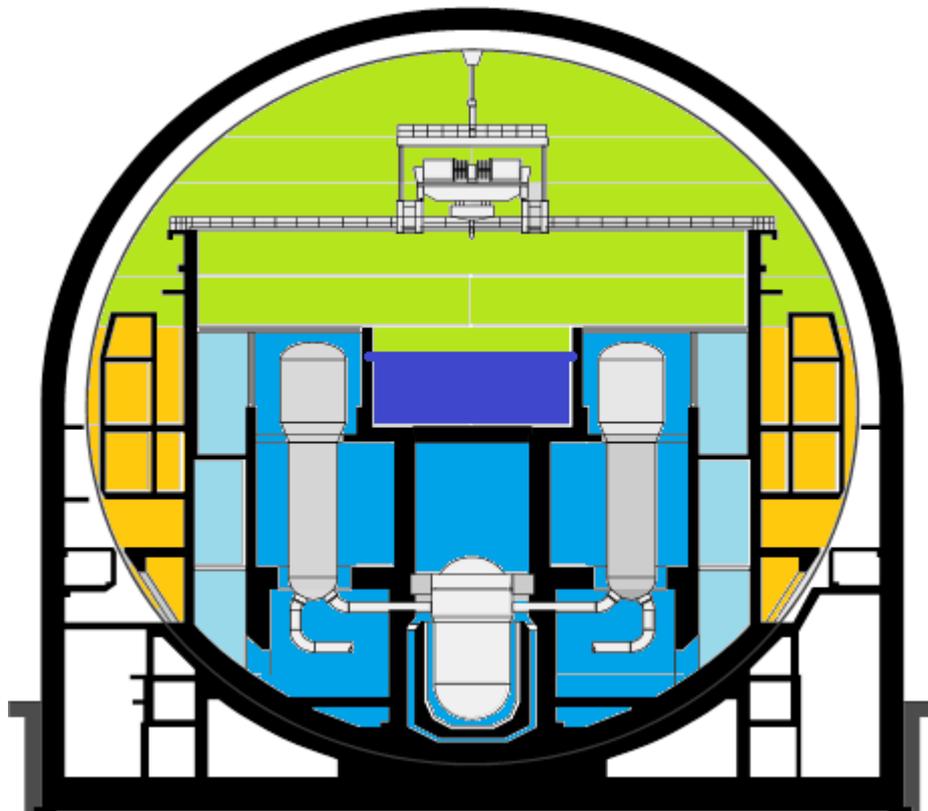


Abb. 3.1 Schema der Raumaufteilung innerhalb des Sicherheitsbehälters eines DWR KONVOI

Basierend auf den Ergebnissen aus /BAN 12/ reicht eine Unterteilung des SHB in eine kleine Anzahl von Zonen für die hier durchgeführten Analysen aus. /BAN 12/ zeigt, dass der Dom oberhalb der Dampferzeugertürme gut durchmischt ist. Ab Beginn der Schmelze-Beton-Wechselwirkung beginnt auch eine gute Durchmischung innerhalb der Anlagenräume. Das ist in den untersuchten Fällen bereits nach weniger als ~0,4 d der Fall; die hier durchgeführten Analysen haben aber eine Problemzeit von etwa 5 d.

Die kleinen Anlagenräume bestehen aus einer Vielzahl von Räumen, die wegen ihres kleinen Volumens zusammengefasst werden können. Zwischen Dom und unterer Peripherie kann sich eine Atmosphärenschichtung ausbilden, was bezüglich der Leckagen aus dem SHB von Bedeutung ist. Um diese zu simulieren, ist hier eine detaillierte Unterteilung erforderlich.

Die Anlagenräume haben im Normalbetrieb einen niedrigeren Druck als die übrigen Räume im SHB und sind von ihnen durch Türen, Druckausgleichsklappen und Berstelemente getrennt, wobei kleine Öffnungen (Türspalte) verbleiben. Von der GRS wurde in einer früheren Untersuchung des Lüftungsbetriebs die Gesamtgröße dieser Öffnungen abgeschätzt. Sie wird in den GRS-Datensätzen vereinfachend in Form von Türspalten angenommen, wobei jeder Tür ein Spalt von $0,006 \text{ m}^2$ zugeordnet wird.

3.1.2 Raumbereiche im Ringraum

Der Ringraum hat ein Gesamtvolumen von $\sim 50\,600 \text{ m}^3$, wovon $\sim 27\,500 \text{ m}^3$ auf den gesamten Raumbereich oberhalb 6 m entfallen. Es werden folgende Raumbereiche unterschieden (Abb. 3.2):

- Ringspalt oberhalb 21,5 m ($\sim 14\,900 \text{ m}^3$)
- Ringspalt zwischen 6 m – 21,5 m ($\sim 4\,300 \text{ m}^3$)
- RR-Räume zwischen 6 m – 21,5 m ($\sim 8\,300 \text{ m}^3$)
- RR-Räume unterhalb 6 m ($\sim 23\,100 \text{ m}^3$)

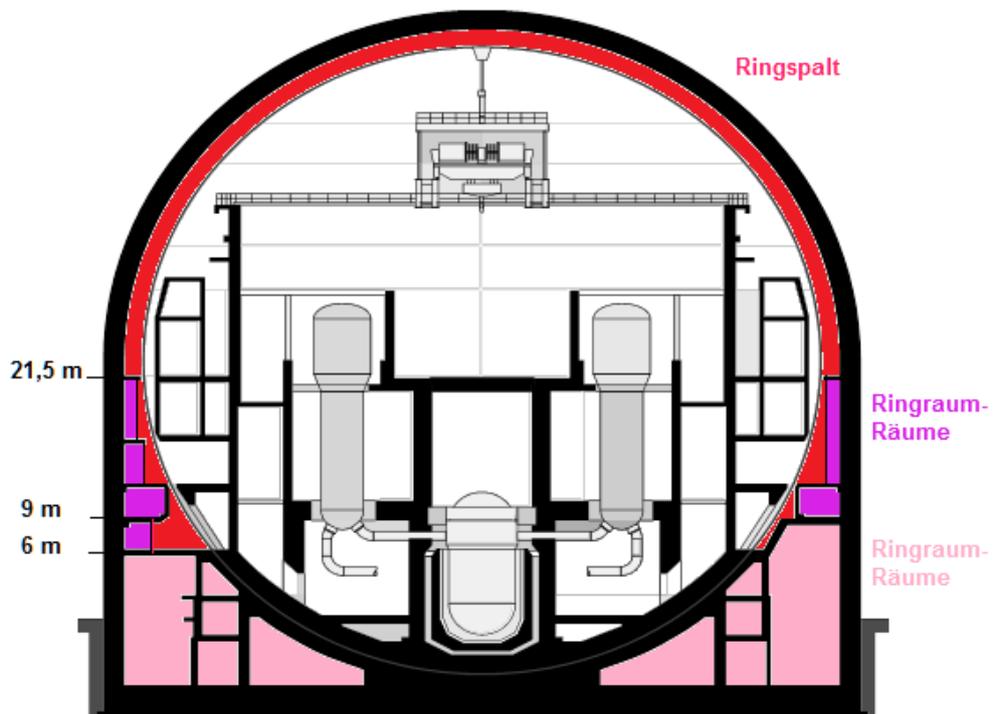


Abb. 3.2 Aufteilung des Ringraums eines DWR KONVOI in Ringspalt und separate Räume (RR-Räume)

Die Erfassung des Ringraums für die Analysen erfolgte anhand der Zeichnungen für die Referenzanlage, einer Begehung des Ringraums, des Lüftungsschemas des Ringraums und der Systembeschreibung der Lüftung.

Der gesamte Ringspalt steht im direkten Kontakt mit der Stahlschale des SHB. Im Ringspalt unterhalb 21,5 m befinden sich an den Winkelabschnitten 100° und 240° von den Höhekoten 6 m bis 21,5 m vertikale Brandschutzversperrungen mit Blechkästen, die an die Stahlschale anliegen, so dass hier keine Atmosphärenströmung in horizontaler Richtung möglich ist.

Die separaten RR-Räume auf den Ebenen 5 – 8 (9 – 21,5 m) sind weitestgehend lüftungstechnisch vom Ringspalt getrennt und bestehen aus einer Vielzahl von Einzelräumen. Die Verbindungen zwischen diesen Einzelräumen sind mit Brandschutztüren und Brandschutzklappen versehen, die bei Überschreiten einer Temperatur von 70 °C automatisch schließen.

Eine offene atmosphärische Verbindung von mehreren m² zwischen RR-Räumen und Ringspalt gibt es in der Ebene 8 an den Durchführungen der Speisewasserleitungen. Allerdings schließen auch dort die Brandschutztüren an den Winkelabschnitten 118°

und 217° bei Überschreiten von 70 °C, so dass dann nur noch sehr kleine atmosphärische Verbindungen zwischen beiden Raumbereichen verbleiben. Diese wurden generell als Spalten der Türen in den Treppenhäusern angenommen.

Die RR-Räume auf der Ebene 4 (6 – 9 m) haben nur über die Spalte der Türen in den Treppenhäusern eine Verbindung zu den darüber liegenden Ringraumräumen, dafür haben sie aber Lüftungsöffnungen zum Ringspalt.

Die RR-Räume unterhalb von 6 m Höhe haben nur einen vernachlässigbaren Atmosphärenaustausch mit dem Ringspalt bzw. den darüber liegenden Räumen. Auch fehlt der Wärmeeintrag aus dem SHB, so dass die Temperaturen dort und damit die Gasdichte höher sind, als im Ringspalt. Da sie auch unterhalb der Lage der Leckage aus dem SHB liegen, wird sich darüber eine Atmosphären-/Gasschichtung ausbilden. Damit werden in diesen ~23 100 m³ großen unteren Raumbereich im Ringraum kaum Gase aus dem SHB eingetragen, was das für den Gaseintrag verfügbare Volumen des Ringraums deutlich reduziert.

3.1.3 Lüftungssysteme des Sicherheitsbehälters und des Ringraums

Die nachfolgenden Abb. 3.3 und Abb. 3.4 zeigen eine Übersicht der Lüftungssysteme des SHB und des RR im Reaktorgebäude während des Normalbetriebes und bei Störfällen nach Gebäudeabschluss.

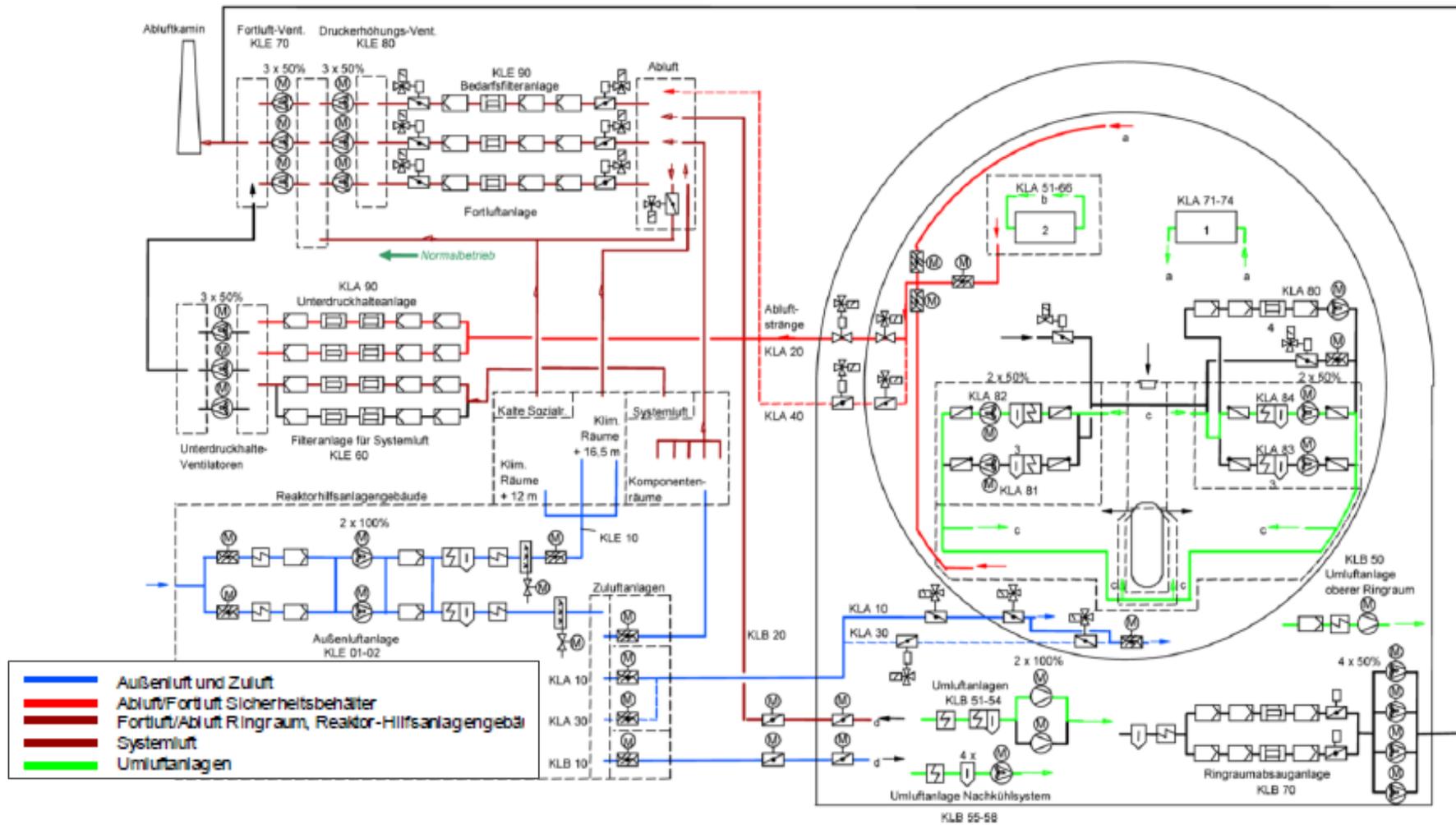


Abb. 3.3 DWR KONVOI, Lüftungssysteme in SHB und Ringraum während des Normalbetriebes

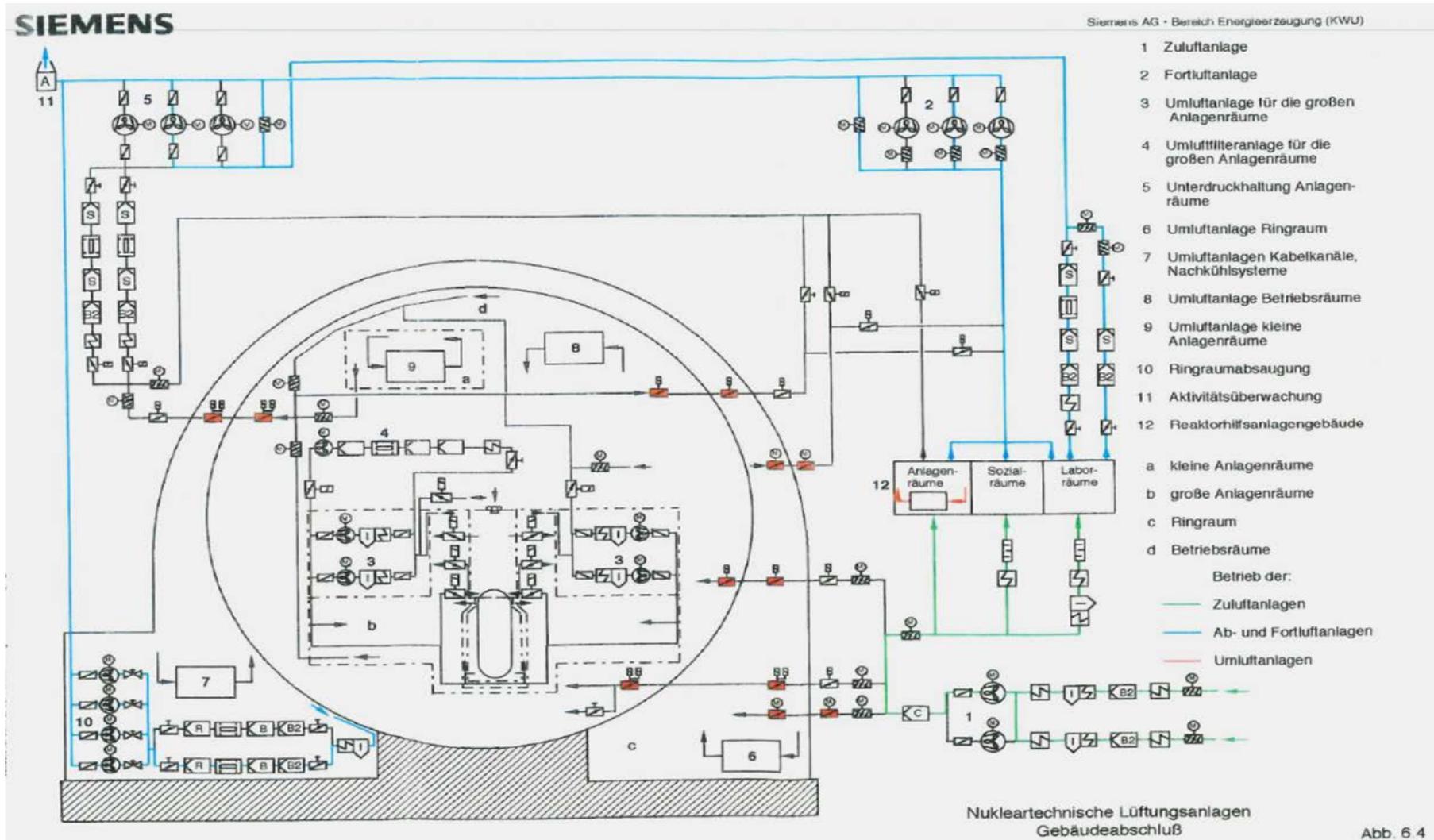


Abb. 3.4 DWR KONVOI, Lüftungssysteme nach Gebäudeabschluss in SHB und im Ringraum während eines Störfalls

Die Zu- und die Abluftanlage KLB 10 und KLB 20 des Ringraums fördern Luft in den Ringraum und vom Ringraum in die Umgebung. Die Abluft erfolgt mit einem konstanten Volumenstrom von etwa 33 000 m³/h über den Strang KLB 20 und wird zusammen mit der Abluft des Hilfsanlagengebäudes ungefiltert über das notstromgesicherte System KLE 70 an den Abluftkamin abgegeben. Wenn erforderlich, kann hier die Bedarfsfilteranlage KLE 90 zwischengeschaltet werden. Diese ist ein offenes System und besteht aus drei parallelen Filtersträngen mit Schwebstoff- und Jodfilter sowie den Ventilatoren KLE 80 zur Druckerhöhung bei einer Kapazität von 131 000 m³/h.

Die Lüftungssysteme KLB 10 und KLB 20 werden bei einem Kühlmittelverluststörfall abgeschaltet (KLB 20 zeitverzögert um 5 min) und ihre Klappen werden zwecks Gebäudeabschluss des Ringraums geschlossen. Als mögliche Notfallmaßnahme zur Reduzierung der Wasserstoffkonzentration im Ringraum sollen sie wie im HMN beschrieben in bestimmten Situationen mit SHB-Leckagen in den Ringraum wieder in Betrieb genommen werden.

Die RR-Störfallabsaugung KLB 70 wird bei Kühlmittelverluststörfällen eingesetzt und fördert Luft vom Ringraum gefiltert über den Abluftkamin an die Umgebung. Bei anstehendem Reaktorschutzsignal wird Luft mit einer Kapazität von 4 000 m³/h aus dem oberen Bereich des Ringraums angesaugt und durch eine Rückschlagklappe sowie einen Filterstrang über den Abluftkamin in die Umgebung geblasen. Im Ringraum wird damit ein Unterdruck gegenüber der Atmosphäre aufrechterhalten, der eine ungefilterte Freisetzung von Radionukliden (außer Edelgase) in die Umgebung verhindert. Das System ist durch Notstrom gesichert und bei Bedarf steht ein zweiter Filterstrang zur Verfügung.

Das Leckageabsauge- und Überwachungssystem JMM saugt nach einem Kühlmittelverluststörfall Atmosphäre aus den verschiedenen größeren Durchdringungen des SHB ab und fördert sie in den SHB zurück. Sollte das System überlastet oder ausgefallen sein, so wird die Atmosphäre über eine Rohrleitung zur RR-Störfallabsaugung geleitet. Die angeschlossenen Komponenten sind:

- 2 Notschleusen JMG
- 1 Materialschleuse JMG
- 1 Personenschleuse JMF
- 2 Lüftungsdurchführungen KLA DN 1000

- 2 Lüftungsdurchführungen KLA DN 500

Die Umluftanlage KLB 50 des oberen Ringraums saugt aus der Kuppel des Ringspalts an und führt die Atmosphäre in einer Höhe von 30 m bis 32 m über eine Ringleitung wieder in den Ringspalt zurück. Sie hat einen Nennvolumenstrom von 40 000 m³/h und ist nicht notstromgesichert.

Die Umluftanlagen KLB 51 – 54 des Ringraums und KLB 55 – 58 der Nachkühlsysteme im Ringraum sowie die Umluftanlagen KLA xx der kleinen Anlagenräume und der abgeschlossenen Betriebsräume im SHB dienen hauptsächlich zur Kühlung der separaten Räume. Sie speisen die gekühlte Atmosphäre in dieselben Räume zurück, aus denen sie ansaugen, und brauchen deshalb in den hier durchgeführten Analysen nicht modelliert zu werden.

Von Bedeutung für die Analysen sind dann die folgenden Zuluft einspeisungen in den Ringraum (KLB 10):

- Belüftung der drei Treppenhäuser: Die Zuluft wird unten in die Treppenhäuser eingespeist und tritt an deren Decke bei etwa 23 m durch jeweils eine Jalousienklappe mit Pneumatikzylinder in den Ringspalt ein. Die Volumenströme betragen jeweils 760, 350 und 400 m³/h.
- Belüftung der Ringraum-Räume auf Ebene 4 (6 – 9 m): Die Räume auf Ebene 4 sind lüftungstechnisch von den darüber liegenden Ringraum-Räumen getrennt, haben aber Lüftungsöffnungen zum Ringspalt. Die eingespeiste Zuluft von insgesamt 1 480 m³/h strömt deshalb in den unteren Ringspalt.

Die separaten Räume im Ringraum zwischen 9 m und 21,5 m sind durch den Betrieb der Zu- und Abluftanlagen lüftungstechnisch von den anderen offenen Bereichen des Ringraums getrennt. Die in diese Räume eintretende Zuluft wird auch aus ihnen wieder abgesaugt. Dies ist für die Ergebnisse der Analysen von geringer Relevanz und kann deshalb sehr vereinfacht modelliert werden.

3.2 Durchführungen und Schleusen des Sicherheitsbehälters

Die Durchführungen und Schleusen durch die Stahlschale des SHB könnten potentielle Orte für Leckagen zum RR sein. Die Durchführungen und Schleusen (Abb. 3.5) befinden sich auf folgenden Höhen:

- Ebene ~25 m: Materialschleuse, 1. Notschleuse, Kompensatoren der Frischdampf- und Speisewasserleitungen,
- Ebene 6 m bis 15 m: Personenschleuse, 2. Notschleuse, etwa 120 Rohr- und 475 Kabeldurchführungen,
- unterhalb 6 m im Bereich der Einspeisung in den Beton: 12 Rohrdurchführungen.

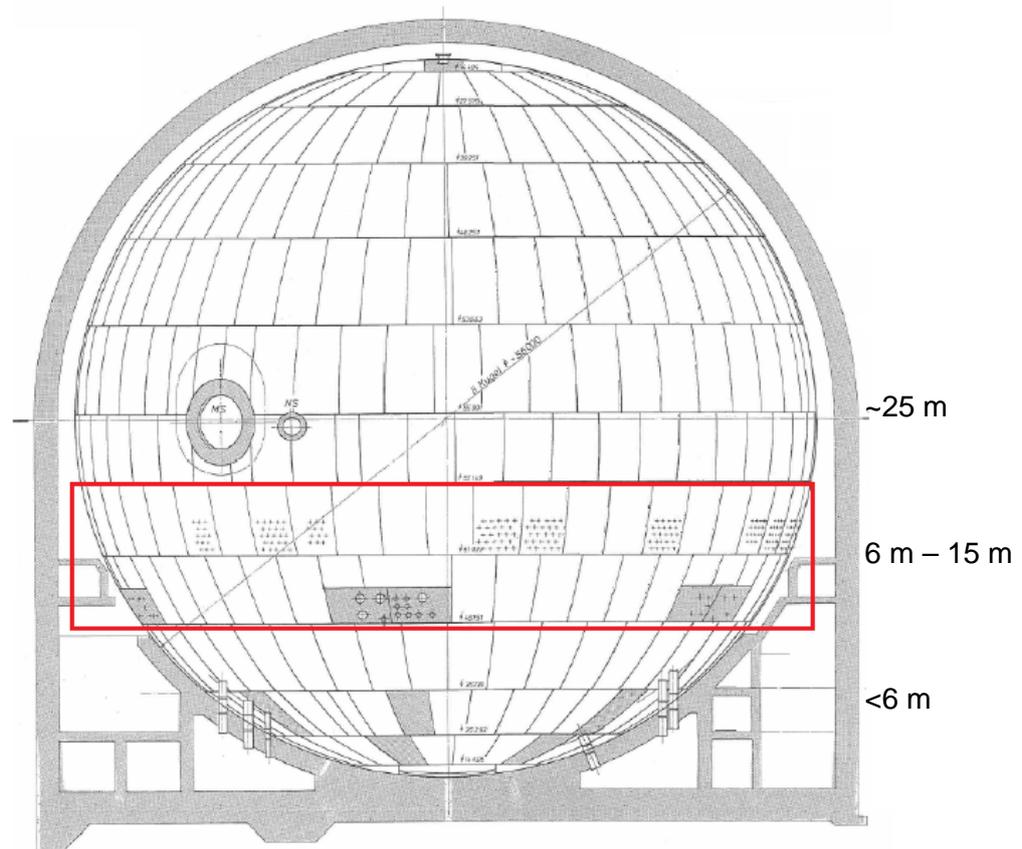


Abb. 3.5 Schema eines DWR KONVOI mit Lage der Durchführungen und Schleusen durch die Stahlschale des SHB

Insbesondere sind die Schleusen so konstruiert und in die Stahlschale des SHB integriert, dass größere Leckagen in den RR praktisch auszuschließen sind. Zusätzlich sind die Schleusen an das Leckageabsaugsystem (JMM) angeschlossen, das Leckagen entweder in den SHB zurückführt, oder der RR-Störfallabsaugung zuleitet. Generell würden nur Leckagen durch die Notschleusen (Abb. 3.6) direkt in den Ringraum führen; die beiden Hauptschleusen führen in Bereiche außerhalb des Ringraums.

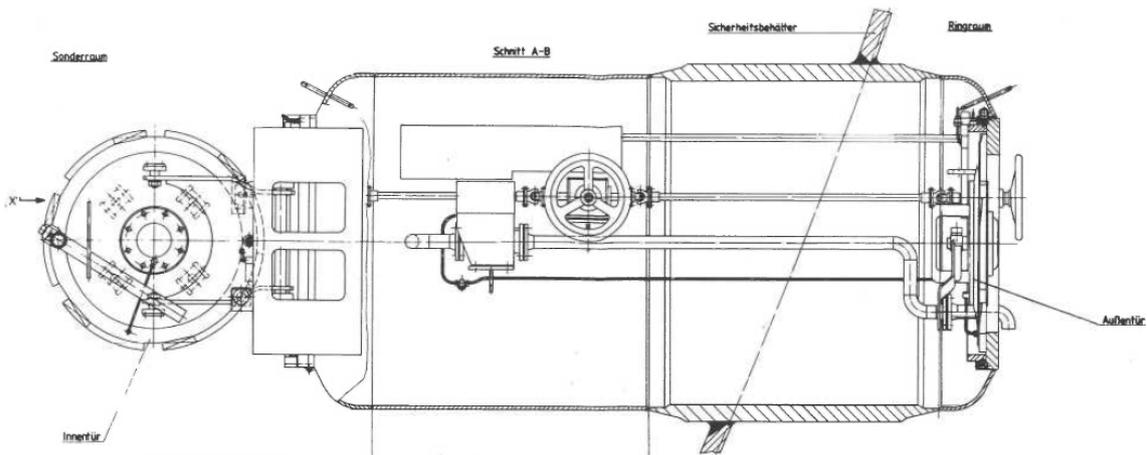


Abb. 3.6 Prinzipbild einer Notschleuse

Bei den kleineren Durchführungen sind folgende Komponenten zu unterscheiden:

- Rohrleitungskompensatoren (Abb. 3.7):
 - Leckagen zum Ringraum sind bei einem Defekt am Kompensatorbalg denkbar. Die Leckagen werden überwacht.
- Lüftungsabschlussklappe (Abb. 3.8):
 - Leckagen zum Ringraum sind bei einem Defekt an Lüftungskanälen denkbar. Allerdings werden die Lüftungskanäle mit Gebäudeabschluss im Störfall abgeschlossen und die Dichtheit nach Gebäudeabschluss überwacht.
- Druckglas- (Abb. 3.9) und Keramikdurchführungen:
 - Die zahlreichen Durchführungen des SHB weisen eine unterschiedliche konstruktive Ausführung auf. Leckagen zum Ringraum sind bei einem Defekt an der doppelten Dichtung (Polymer, Auslegungstemperatur 145 °C) der Durchführung denkbar, die die verschraubte Durchführung gegen die Stahlschale abdichtet. Es existiert eine Prüfbohrung zur Kontrolle möglicher Leckagen zwischen den beiden Dichtungsringen. Leckagen werden aber nicht überwacht.

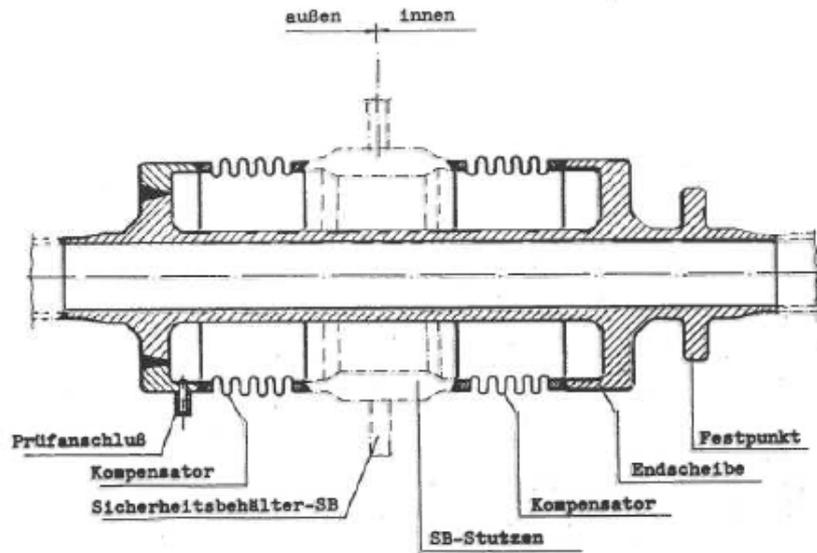


Abb. 3.7 Prinzipbild eines Rohrleitungskompensators

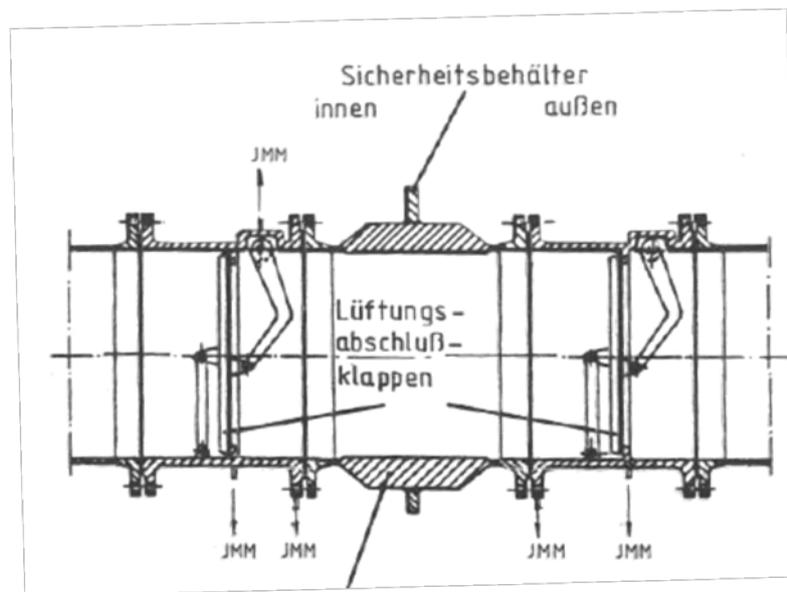


Abb. 3.8 Prinzipbild einer Lüftungsabschlußklappe

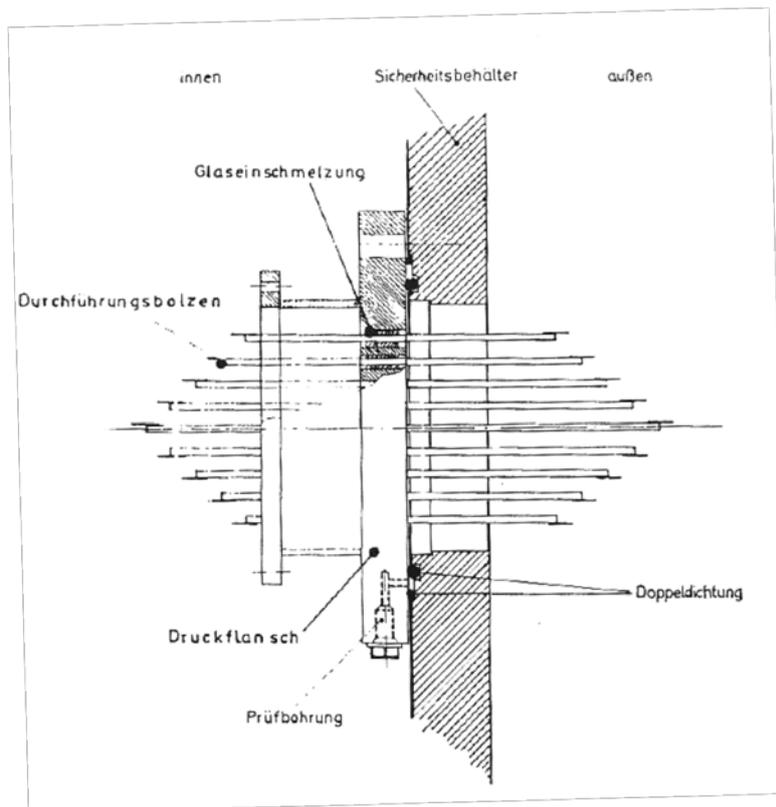


Abb. 3.9 Prinzipbild einer Durchführung mit Druckglaseinschmelzung der Kabel

3.3 Strukturmechanische Untersuchungen zum Versagen des Sicherheitsbehälters und seiner Durchführungen

Der SHB einschließlich aller Durchführungen und Schleusen ist so ausgelegt, dass er unter Einhaltung der zugrunde gelegten Leckage (0,25 Vol.-%/d) den statischen, dynamischen und thermischen Einwirkungen aus Anlagenzuständen des Normalbetriebs sowie des anormalen Betriebs und aus Störfällen sowie sehr seltenen Ereignissen standhält. Der SHB der Referenzanlage ist für eine Innendruckbelastung von 0,63 MPa bei einer Temperatur von 145 °C ausgelegt und gebaut. Er ist erfolgreich bis zu einem Druck von 0,774 MPa bei einer Temperatur von etwa 19 °C getestet worden /TÜV 87/. Bei Erreichen eines Drucks von 0,7 MPa im SHB wird eine gefilterte Druckentlastung als Notfallmaßnahme eingeleitet /SCH 15/.

Ferner sind Einrichtungen und anlageninterne Notfallmaßnahmen vorgesehen, mit denen auch bei unterstellten Ereignisabläufen und Anlagenzuständen infolge von Ereignissen mit Mehrfachversagen von Sicherheitseinrichtungen und von Unfällen mit Kernschäden ein Versagen des SHB durch Überdruck (gefilterte Druckentlastung) oder

unzulässige dynamische Belastungen aus H₂-Reaktionen (Wasserstoffabbau durch Passive Autokatalytische Rekombinatoren) vermieden werden kann.

Strukturmechanische Untersuchungen zum Versagen des SHB sind in /GRS 01/ dokumentiert. Die Untersuchungen bauen auf Analysen in der Risikostudie Phase B auf. Sie umfassen den SHB und den Dichtkasten am Materialtor als wesentliche Schwachstellen (Abb. 3.10). Es werden keine Untersuchungen zu Leckagen an Durchführungen und Schleusen des SHB durchgeführt. Untersuchte Aspekte waren: mögliche Versagensarten des SHB, Versagensdrücke bei angenommener Störfalltemperatur, Unsicherheitsbandbreiten und mögliche stabile Leckquerschnittsflächen.

Im Ergebnis zeigte sich, dass erhöhte Leckagen oder verschiedene Versagensszenarien erst bei SHB-Drücken deutlich oberhalb des Auslegungswertes des SHB zu erwarten sind (Abb. 3.11). Das führende Versagensszenario ist ein Bruch des Dichtkastens der Verschraubung des Materialtors ab einem Differenzdruck von $\Delta p > 0,94$ MPa (Abb. 3.11).

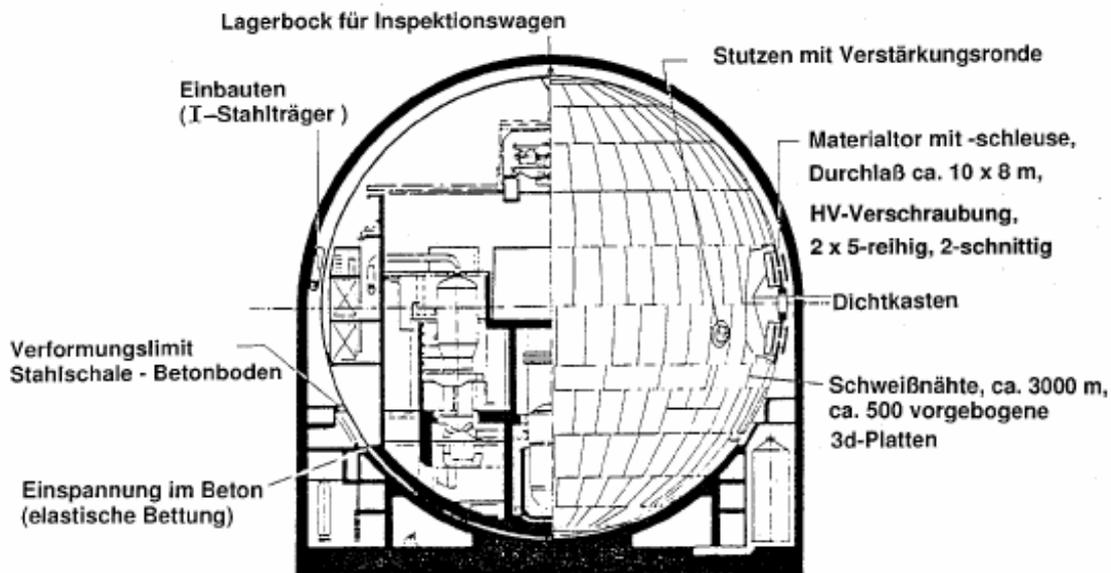


Abb. 3.10 Strukturmechanische Untersuchungen zum Versagen des SHB, Störstellen des Schalenkontinuums /GRS 01/

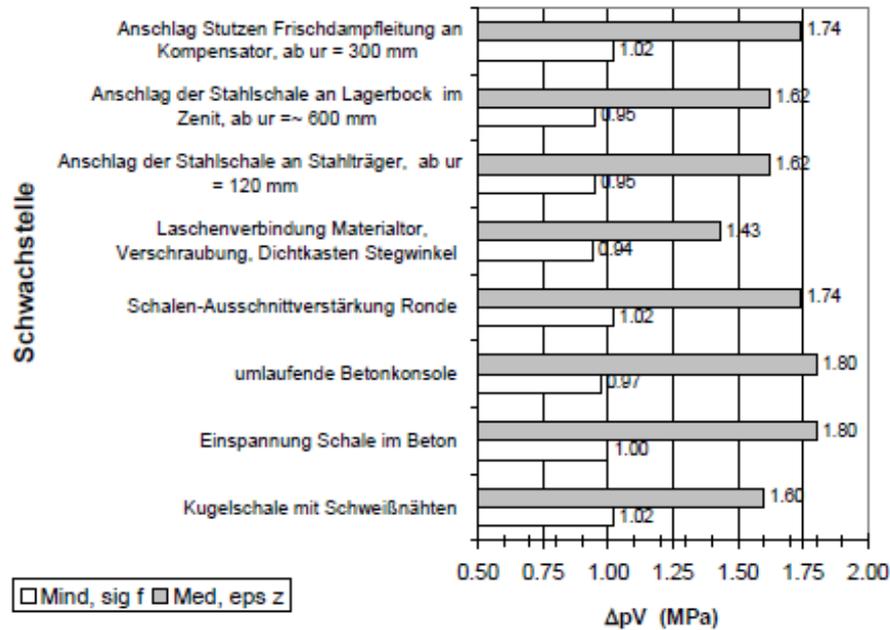


Abb. 3.11 Ergebnisse der strukturmechanischen Untersuchungen zum Versagen des SHB, potentielle Versagensinnendrucke der SHB-Schale /GRS 01/

Untersuchungen hinsichtlich des SHB-Versagens werden auch in den anlagenspezifischen PSA durch die Betreiber der deutschen KKW durchgeführt. Die Ergebnisse vergleichbarer Anlagen sind ähnlich zu denen der GRS. Der Versagensdruck des SHB ist ca. 2 x so hoch wie der Auslegungsdruck. Die Versagenswahrscheinlichkeit von Kompensatoren, Dichtungen bzw. Schleusen steigt ebenfalls erst bei > 1,0 MPa Überdruck deutlich an. Die Untersuchungen umfassen dabei auch nur große Durchführungen und Schleusen durch den SHB.

Zusammenfassend ist festzustellen:

- Ein Versagen von Schleusen und Durchdringungen in Druckbereichen unterhalb des Auslegungsdruckes des SHB bzw. vor Einleitung des SHB-Venting bei 0,7 MPa ist unwahrscheinlich.
- Leckagen durch Material- und Personenschleuse führen nicht zu Freisetzungen in den Ringraum.
- Leckagen am Dichtkasten des Materialtors würden zu Freisetzungen in den Ringraum führen, ebenso wie Leckagen durch die Notschleusen.
- Leckagen an Schleusen und größeren Durchführungen (Kompensatoren) werden überwacht und abgesaugt.

- In Kabeldurchführungen sind die Kabel durch Druckglaseinschmelzungen oder Keramikeinsätze abgedichtet. Ein Versagen unterhalb des Auslegungsdruckes des SHB bzw. vor Einleitung des SHB-Venting bei 0,7 MPa ist unwahrscheinlich.
- Die Kabeldurchführungen sind mit einer Polymer-Doppeldichtung gegen den SHB von innen abgedichtet. Die Auslegungstemperatur der Polymerdichtungen liegt bei 145 °C und entspricht damit der Auslegungstemperatur des SHB. Die Dichtheit der zahlreichen Durchführungen wird im Betrieb nicht überwacht. Detaillierte strukturelle mechanische Bewertungen der zahlreichen Kabeldurchführungen liegen nicht vor.
- Für die nachfolgenden Analysen wurde von Leckagen im Bereich der Kabeldurchführungen durch den SHB ausgegangen und verschärfend unterstellt, dass größere Leckagen als die Auslegungsleckagen des SHB (Faktor 10) bereits ab Eintritt des Ereignisses existieren.

4 Ermittlung der Ausgangs- und Randbedingungen der charakteristischen Szenarien

4.1 COCOSYS-Datensatz des DWR KONVOI

Der im Forschungsvorhaben verwendete COCOSYS-Datensatz basiert auf dem in /BAN 12/ dargestellten Datensatz für DWR KONVOI, der mit sehr feiner Unterteilung des SHB zur Absicherung des Reko-Konzeptes und mit vereinfachter Nodalisation des Ringraums entwickelt wurde. Da der Schwerpunkt der Untersuchungen auf den Zuständen im Ringraum liegt, wurden in diesem COCOSYS-Datensatz Änderungen der Nodalisation des SHB und vor allem des Ringraums vorgenommen. Dabei wurde die Unterteilung des SHB unter Anwendung des GROBIAN-Tools von COCOSYS /KLH 12/ vereinfacht (Abb. 4.1), während eine wesentlich verfeinerte Nodalisation des Ringraums eingeführt wurde. Der Ringraum ist nun in 4 Quadranten und insgesamt 7 vertikale Ebenen unterteilt (Abb. 4.2). Die Nodalisation des Ringraums wurde an die neue Nodalisation im Dombereich bzw. generell im SHB hinsichtlich der Anzahl der Ebenen angepasst (siehe Abb. 4.1). Dies ist aufgrund der sehr starken „thermischen Kopplung“ zwischen den Zonen innerhalb und außerhalb des SHB über den Wärmeaustausch durch die Stahlschale (38 mm stark) erforderlich. Generell gelten die gleichen COCOSYS-Nodalisationvorschriften innerhalb des SHB als auch außerhalb. Ferner wurde diese detaillierte Nodalisation des Ringraums so entwickelt, dass sie auftretende atmosphärische Schichtungs- und Konvektionseffekte realistisch abbilden kann.

Die Räume innerhalb des SHB sind in vier Bereiche unterteilt (vgl. Kap. 3.1.1), in denen jeweils je nach dem Unfallszenario unterschiedliche Konvektionszustände in Abhängigkeit von Anzahl bzw. Strömungsquerschnitt geöffnete Verbindungen zwischen den Räumen ausbilden können. Der erste Bereich beinhaltet die Anlagenräume (z. B. Räume R1U, R65A, R66A, R67A in Abb. 4.1), in denen sich der Reaktordruckbehälter und die Dampferzeuger befinden. Der zweite Bereich umfasst die kleinen Anlagenräume im Inneren des SHB und der dritte Bereich die Betriebsräume und den Dom bzw. die Kuppel (z. B. Räume D13A, D23A, D33A, D37A, D46 in Abb. 4.1). Der vierte Bereich umfasst die Peripherie des SHB, d. h. alle Räume zwischen Trümmerschutzzylinder und SHB-Stahlschale (z. B. Räume R52A, D72A, D73A, D74A, in Abb. 4.1).

Der Ringraum ist ebenfalls in vier Bereiche unterteilt (vgl. Kap. 3.1.2):

- Der erste Bereich ist der obere Bereich des Ringraums oberhalb von 21,5 m – ein offener Ringspalt. Dieser Bereich umfasst insgesamt 12 Raumzonen (U22A-D, U23A+C, U31A+C, U32A+C, U37A+C) auf sechs axialen Ebenen (21,5 m – 45 m). Die oberste Zone U46 entspricht der Kuppel des RR auf Höhe 45 m (Abb. 4.2).
- Der zweite Bereich ist der untere Teil des Ringraums unterhalb von 21,5 m – der untere Teil des offenen Ringspalts. Dieser Teil des Ringspalts ist mit insgesamt 23 Raumzonen (U00A-D, U01A-C, U02A-C, U03A-D usw.) auf vier axialen Ebenen (6 m – 21,5 m) entlang der SHB-Stahlschale modelliert. Die im Ringspalt befindlichen vertikalen Brandschutzversperrungen mit Blechkästen, die zur Aufteilung des Ringraums in „Rauchzonen“ dienen und keine Atmosphärenströmung in horizontaler Richtung ermöglichen, wurden bei der Nodalisierung berücksichtigt.
- Der dritte Bereich besteht aus mehreren separaten RR-Räumen, inklusive der Treppenhäuser, die sich auf vier Ebenen entlang der Höhe des Ringraums (9 m – 21,5 m) befinden. Die separaten Räume und die Treppenhäuser sind in COCOSYS mit einer Vielzahl von Einzelzonen (U70A-D, U70uTA-D, U72A-D, U72TA-D, U73A-D, U74A-D, U74TA-D) modelliert. Die RR-Räume haben Spalten an den Türen zu den Treppenhäusern sowie auch Lüftungsöffnungen zum Ringspalt, die als atmosphärische Verbindung modelliert sind. Die Brandschutztüren und Brandschutzklappen zwischen diesen Einzelzonen sind als atmosphärische Klappen modelliert, die bei Überschreiten einer Temperatur von 70 °C automatisch schließen.
- Der vierte Bereich repräsentiert alle RR-Räume unterhalb der Höhe von 6 m. Dieser volumenmäßig größte Bereich ist sehr grob mit einer Einzelzone (U71) modelliert, weil er in der vorliegenden Untersuchung eine unbedeutende Rolle spielt, da er deutlich unterhalb der möglichen Leckage vom SHB liegt.

Der COCOSYS-Datensatz umfasst jetzt insgesamt 57 Raumzonen für den SHB, 76 Raumzonen für den Ringraum und für das SHB-Ventingsystem 1 Raumzone (VW). Die Umgebung wird ebenfalls als 1 Raumzone (ENVIRON) abgebildet. Zusätzlich wird für die Abluftanlage des Ringraums 1 Raumzone (KLB 20) eingeführt, so dass sich daraus insgesamt 135 Raumzonen ergeben. Die Raumzonen sind durch insgesamt 477 Verbindungsöffnungen, wie z. B. freie Öffnungen, Brandschutztüren, Brandschutzklappen, Lüftungs- und Drainageverbindungen, sowie durch druckdifferenzabhängige Öffnungen (Türen, Berstklappen, Berstfolien, u. a.) miteinander verknüpft.

Das COCOSYS-Modell berücksichtigt die in den einzelnen Zonen vorhandenen wärmeleitenden Strukturen wie Decken, Böden und Wände aus Beton und Stahl und andere Einbauten. Den Raumzonen werden insgesamt 226 wärmeleitende Strukturen zugeordnet.

In COCOSYS wird ein einfaches Modell der gefilterten SHB-Druckentlastungsstrecke, inklusive der Gleitdruckventuriwäscher (Zone VW) berücksichtigt. Dabei wird eine Rückhaltung von 99,9 % (Dekontaminationsfaktor 1000) für Aerosole im Eingabedatensatz festgelegt. Wenn der Druck 0,7 MPa (absolut) im SHB erreicht, wird die gefilterte Druckentlastung im SHB als Notfallmaßnahme eingeleitet. Zu Beginn der Druckentlastung kann gemäß Notfallhandbuch Wasser aus einem Behälter (TANK-Zone) in den SHB-Sumpf eingespeist werden.

Das COCOSYS-Modell beinhaltet auch das in der Referenzanlage installierte Reko-Konzept /BAN 12/ mit insgesamt 65 Rekos unterschiedlicher Größe, die in den verschiedenen Modellräumen verteilt sind. Darüber hinaus umfasst das Modell alle relevanten Systeme, die bei Unfällen zum Einsatz kommen (z. B. die RR-Störfallabsaugung) oder betriebliche Systeme, die als Notfallmaßnahmen im HMN vorgesehen sind (z. B. die Zu-/Abluftanlagen und die Umluftanlage im Ringraum).

Die RR-Störfallabsaugung (KLB 70) ist ein aktives, notstromgesichertes Lüftungssystem, das aus 4 Ventilatoren und 2 Filterstrecken besteht. Für die Modellierung der RR-Störfallabsaugung wird ein FAN-Modell von COCOSYS unter Berücksichtigung der Fördercharakteristik der Ventilatoren eingesetzt. Die Fördercharakteristik ist durch die Verwendung der realen Ventilator Kennlinien modelliert. Dabei wurden die entsprechenden Koeffizienten der Fördercharakteristik unter Anwendung des FANSYS-Tools von COCOSYS /KLH 12/ berechnet. Abschließend sind die berechneten Koeffizienten im FAN-Modell von COCOSYS umgesetzt. Abb. 4.3 zeigt die von FANSYS berechneten Ventilator- und Anlagenkennlinien im Vergleich zum Förderdruck der realen Ventilator Kennlinien. Es wird angenommen, dass zwei 2 von 4 Ventilatoren der RR-Störfallabsaugung im Parallelbetrieb sind.

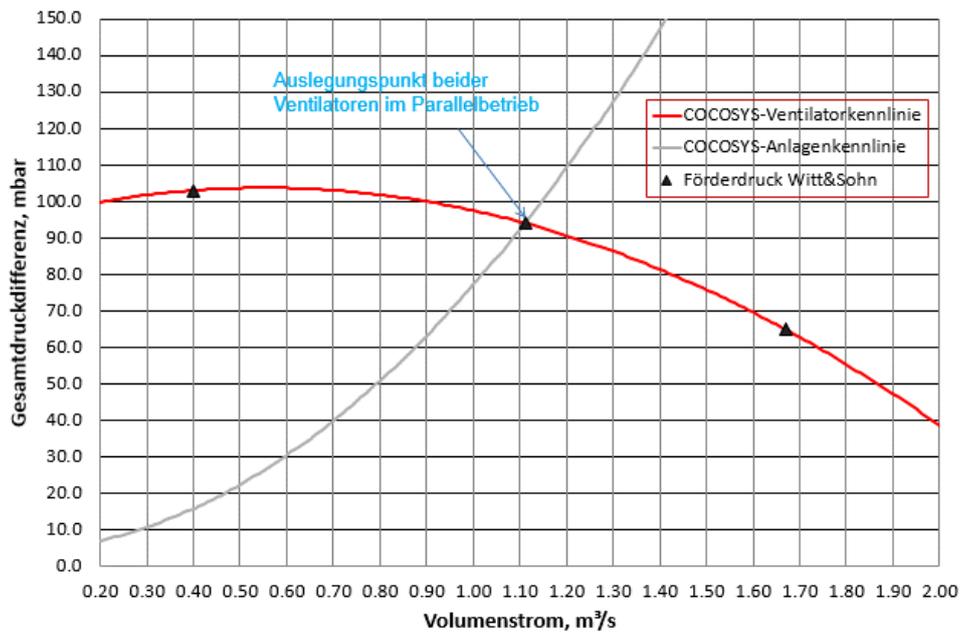


Abb. 4.3 Ventilator- und Anlagenkennlinien von zwei in Parallelbetrieb befindlichen Ventilatoren der RR-Störfallabsaugung, Vergleich mit dem Förderdruck der realen Ventilator Kennlinie

Die RR-Störfallabsaugung (KLB 70) wird im Rahmen von wiederkehrenden Prüfungen (WKP) unter Störfallbedingungen geprüft. Dabei wird durch Gebäudeabschluss ein Lüftungsabschluss im Ringraum hergestellt. Bei einer WKP wurde nach 8:16 min ein Volumenstrom von 3 240 m³/h und ein Unterdruck von 14,1 mbar erreicht. Auf Basis der vorhandenen Messdaten wurde das in COCOSYS eingesetzte FAN-Modell validiert. Aus der COCOSYS-Rechnung ergibt sich, dass 8 min nach Beginn des GBA ein Unterdruck von 14,8 mbar und ein Volumenstrom von 3 740 m³/h erreicht wird (Abb. 4.4). Dabei zeigen die COCOSYS-Ergebnisse generell eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten.

Für die Modellierung der Störfallfilter wird ein einfaches Filtermodell von COCOSYS verwendet, wobei eine Rückhaltung von 99,9 % (Dekontaminationsfaktor 1000) für Aerosole im Eingabedatensatz festgelegt wird.

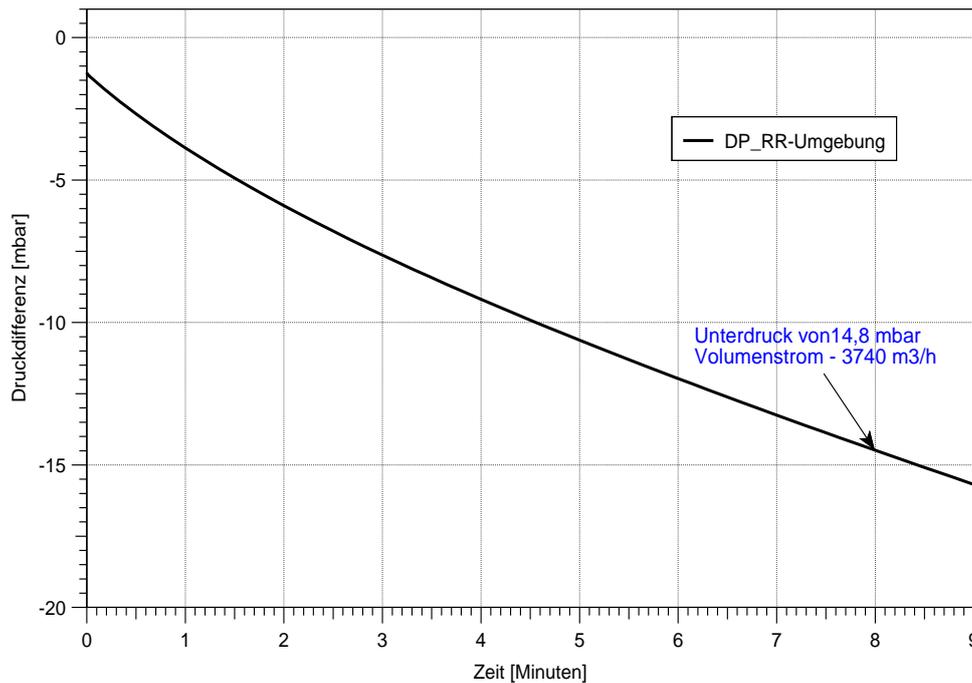


Abb. 4.4 Druckdifferenz zwischen RR und Umgebung nach Gebäudeabschluss, Betrieb von 2 Ventilatoren der RR-Störfallabsaugung in Betrieb, COCOSYS

Die Zu- und die Abluftanlage KLB 10 und KLB 20 des Ringraums fördert Luft in den Ringraum und vom Ringraum in die Umgebung. Der Einsatz der Zu/Abluftanlagen innerhalb des Ringraumes ist im HMN der Referenzanlage als Notfallmaßnahme vorgeschlagen. Es wird angenommen, dass die Zu-/Abluftanlagen bei 180 000 s (50 h) nach Beginn des Unfalls wieder in Betrieb genommen werden. Alternativ lässt sich auch die Nutzung der Bedarffilteranlage simulieren. Dabei wird eine Rückhaltung von 99,9 % (Dekontaminationsfaktor 1000) für Aerosole im Eingabedatensatz festgelegt.

In COCOSYS wird die Zuluft durch ein einfaches Modell (FAN_SYS) bis in die Zonen des unteren RR-Bereichs geführt und den entsprechenden RR-Räumen zugeleitet. Die Abluft erfolgt im COCOSYS-Modell durch Verwendung von 4 atmosphärischen Klappen mit einem konstanten Volumenstrom von etwa 33 000 m³/h. Von Bedeutung für die Analysen sind die folgenden Räume der Abluft aus dem Ringraum (KLB 20):

- 12-m-Ebene aus Zone U01D2,
- 6-m-Ebene aus Zonen U00D2, U00B und U00C

Die Ventilatoren der Umluftanlage (KLB 50) sind modelliert, so dass deren Einfluss auf die Vermischung der Atmosphäre im obersten RR-Bereich berücksichtigt wird. Zur Modellierung dieser Umluftanlage wird ein einfaches Modell von COCOSYS (FAN_SYS)

verwendet, wobei ein konstanter Volumenstrom von 40 000 m³/h im Eingabedatensatz definiert wird. Die Umluftanlage saugt aus der Kuppel des Ringspalts (Zone U46) an und führt die Atmosphäre in einer Höhe von 30 m wieder in den oberen Ringspalt (Zonen U31A, C) zurück. Für die Analyse wird angenommen, dass die Umluftanlage bei 35 000 s (ca. 10 h) nach Beginn des Unfalls zusätzlich zum Einsatz kommt.

Die Auslegungsleckage aus dem SHB zum Ringraum ist mit 0,25 Vol.-%/d angegeben und wird in den Rechnungen durch eine atmosphärische Verbindung LR72B-U01 mit Querschnittsfläche von 0,084 cm² simuliert. Die Lage der Leckage des SHB wird in den Rechnungen variiert. Im Basisfall wurde sie im Bereich der Durchführungen des SHB auf 12-m-Ebene zwischen dem peripheren Raum R72B und dem Raum U01B im Ringspalt simuliert, als am „ungünstigsten“ Ort im Ringraum gegenüber der Absaugstelle der RR-Störfallabsaugung. Die Leckagen vom Ringraum zum Hilfsanlagengebäude (U71A) bzw. weiter zur Umgebung sind durch eine atmosphärische Verbindung L3_U71A mit einer Querschnittsfläche von 40 cm² simuliert bzw. angenommen. Alle Leckagen aus dem Ringraum werden pessimistisch als Leckagen in die Umgebung angesehen, auch wenn bei einer Durchströmung von Bereichen des Hilfsanlagengebäudes auch dort noch eine Rückhaltung von Aerosolen möglich ist.

4.2 Ausgangs- und Randbedingungen der charakteristischen Szenarien: MBL- und ND*-Fall

Die durchgeführten Analysen für einen DWR KONVOI für zwei charakteristisch unterschiedliche Anlagenzustände / Unfallbedingungen ausgehend aus dem Leistungsbetrieb der Anlage unterstellten die Kernschmelzszenarien:

- MBL – mittleres Leck am Kühlkreislauf mit Ausfall der aktiven Notkühlung nach Entleerung der Flutbecken (maximale Wassermenge im Sumpf) und
- ND* – Transiente mit Ausfall der DE-Bespeisung, primärseitiger Druckentlastung des Kühlkreislaufes und Ausfall der aktiven Notkühlung (minimale Wassermenge im Sumpf).

Die Randbedingungen der Szenarien wurden aus früheren Studien übernommen /SON 01/, /BAN 12/, /SCH 15/, um Konsistenz in den Aussagen bezüglich unterschiedlicher Aspekte des Unfallablaufes zu erlangen, und sie wurden wo erforderlich konservativ (im Sinne hoher Aerosol-/Iodbelastungen) abgeschätzt bzw. ergänzt (Schmelzeausbreitung in den Sumpf des SHB). Die Fallauswahl berücksichtigt dabei:

- charakteristische Unterschiede in den Zuständen im SHB in Abhängigkeit des auslösenden Ereignisses und damit der Leckagen zum RR,
- aus PSA gewonnene Erkenntnisse zum Unfallablauf, zum Freisetzungsort und zur Relevanz der Szenarien.

Auf der Basis von Freisetzungsdaten aus dem RKL /SON 01/ wurden mit COCOSYS die Situationen im SHB berechnet und die im Ventingssystem anfallenden Gas-, Dampf-, Kondensat- und Aerosol-/Iodmengen bestimmt sowie der verbleibende Spaltprodukt-Quellterm ermittelt. Die Analysen berücksichtigen die Nutzungsbedingungen des SHB-Ventingssystems gemäß Notfallhandbuch (NHB).

Der MBL-Fall ist gekennzeichnet durch:

- Kühlmittelverluststörfall durch mittleres Leck (200 cm²) an einer Hauptkühlmittelleitung (heißseitig),
- Verfügbarkeit der aktiven Notkühlsysteme bis zur Umschaltung auf Sumpfrückförderung,
- Verfügbarkeit des sekundärseitigen Abfahrens mit 100 K/h über die Dampferzeuger.

Der ND*-Fall ist gekennzeichnet durch:

- Transiente infolge eines Totalausfalls der Bespeisung der Dampferzeuger,
- unterstelltes Versagen sämtlicher aktiven Not- und Nachkühlsysteme mit Ereignisbeginn,
- Vermeidung eines potentiellen Hochdruckversagens des RDB durch primärseitige Druckentlastung gemäß NHB und Einspeisung des Wassers der heißseitigen Druckspeicher.

Zeitpunkte charakteristischer Ereignisse sind in Tab. 4.1 zusammengestellt. Folgendes ist charakteristisch für die untersuchten unterschiedlichen Szenarien mit Blick auf den langfristigen Unfallablauf und den Ventingvorgang des SHB. Die SHB-Druckentlastung wird beim ND*-Szenario nach ~66,5 h und beim MBL-Szenario nach ~82,2 h erforderlich. Im ND*-Fall wird unterstellt, dass beim Venting Wasser in den Sumpf eingespeist wird und daher der Sumpf nicht ausdampft. Im MBL-Fall ist genügend Wasser im Sumpf vorhanden und es wurde keine zusätzliche Wassereinspeisung simuliert. Die

erste Druckentlastungsphase endet beim ND*-Szenario nach ~93,1 h und beim MBL-Szenario nach ~112,5 h.

Tab. 4.1 Zeitpunkte charakteristischer Ereignisse /SON 01/

Szenario	ND*	MBL
Auslösendes Ereignis und RESA	0,0 h	0,0 h
Start der Leckage von Dampf/Wasser in den SHB	1,4 h	0,0 h
Start des Kernschmelzens	3,5 h	5,8 h
RDB-Versagen und Schmelzeaustrag in die Reaktorgrube	6,5 h	8,9 h
Sumpfwassereinbruch in die Reaktorgrube / Schmelzeaustrag zum Sumpf	11,1 h	13,5 h
Start der gefilterten SHB-Druckentlastung	66,5 h	82,2 h
Ende der gefilterten SHB-Druckentlastung	93,1 h	112,5 h

4.3 Massen- und Energiefreisetzung in den Sicherheitsbehälter

Die Freisetzungen aus dem Reaktorkühlkreislauf bis RDB-Versagen dauern je nach Szenario 6,5 h bis 8,9 h. Dies ist eine relativ kurze Zeitspanne im Vergleich zu dem untersuchten Zeitraum von bis zu 5 d und kann deshalb als „Anfangsbedingung der Rechnungen“ angesehen werden. Die Freisetzungen von Dampf, Wasser und H₂ wurden in den MELCOR Analysen /SON 01/ ermittelt und als COCOSYS-Input bereits in /BAN 12/ aufbereitet.

Die Aerosol- und Spaltproduktfreisetzung aus dem Kreislauf aus den MELCOR-Analysen lag nur noch für den MBL-Fall vor und musste daher für den ND*-Fall zeitlich entsprechend des Beginns der Freisetzung angepasst werden. Die Aerosolkonzentration in der langfristigen Unfallphase wird von der Freisetzung aus der Schmelze-Beton-Wechselwirkung bestimmt als auch von einer Resuspension von Radionukliden aus dem siedenden Sumpfwasser. Die langfristige Aerosolfreisetzung aus der Schmelze-Beton-Wechselwirkung wurde aus Konservativitätsgründen aus der Risikostudie Phase B /GRS 90/ entnommen, da sie bedeutend höher als die vom CCI-Modul berechnete Freisetzung ist.

Die Angaben zu den freigesetzten Massen an Aerosolen und Edelgasen sind vor allem im Vergleich zur Freisetzung über das SHB-Venting zu sehen. Quantitativ sind je nach Kerninventar und Anlagenzustand zum Zeitpunkt eines Unfalls auch größere oder klei-

nerer freigesetzte Massen möglich. Eine ins Detail gehende Auswertung bzgl. einzelner Elemente oder Nuklide war nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Die Nachzerfallsleistung des in /SON 01/ verwendeten Kerninventars wurde gemäß „Entwurf DIN 25463“ definiert. Die Nachzerfallsleistung der in den SHB freigesetzten Spaltprodukte hängt von der berechneten Stärke der Freisetzung einzelner Stoffklassen ab. Dies ist in /SON 01/ beschrieben. Ein Vergleich mit heutigen Analysen zur Nachzerfallsleistung gängiger Kerninventare mit FIPISO aus COCOSYS zeigt, dass die in /SON 01/ verwendete Nachzerfallsleistung konservativ höher ist und dann reproduziert werden kann, wenn in der Berechnung ein Aufschlag von ca. 10 % vorgesehen wird. Dies wurde unverändert beibehalten.

4.4 Schmelzefreisetzung in den Sicherheitsbehälter nach RDB-Versagen

Nach RDB-Versagen wird die Kernschmelze zuerst in die Reaktorgrube (Zone R1U in Abb. 4.5, Abb. 4.6) ausgetragen, in der die Schmelze-Beton-Wechselwirkung beginnt. In der Reaktorgrube befindet sich zu diesem Zeitpunkt kein Wasser. Die Schmelze erodiert zunächst den Betonboden der Grube und in radialer Richtung das biologische Schild. Unter realen Verhältnissen ist ein radialsymmetrisches Durcherodieren des biologischen Schildes eher unwahrscheinlich. Stattdessen würde die Wand an einer Schwachstelle oder der Stelle mit der höchsten Erosionsrate zuerst versagen und die Schmelze von dort aus in den Ringspalt zwischen biologischem Schild und Tragschild fließen. Die in den Ringspalt fließende Schmelze würde sich durch eine oder mehrere Durchlässe (Druckausgleichsklappen) vom Ringspalt in den Sumpfraum verlagern und also sofort in Kontakt mit Sumpfwasser kommen.

In früheren Untersuchungen der GRS für die gleiche Referenzanlage /SON 01/, /BAN 12/ wurde keine Schmelzeverlagerung aus der Reaktorgrube in den SHB-Sumpf nach dem Durchschmelzen des biologischen Schildes unterstellt. Die Schmelze-Beton-Wechselwirkung sowie der Sumpfwassereinbruch in die Reaktorgrube (Schmelze-Sumpfwasser-Wechselwirkung) wurden dort mit dem CCI-Modul in COCOSYS unter Berücksichtigung von einem Schmelzepool berechnet.

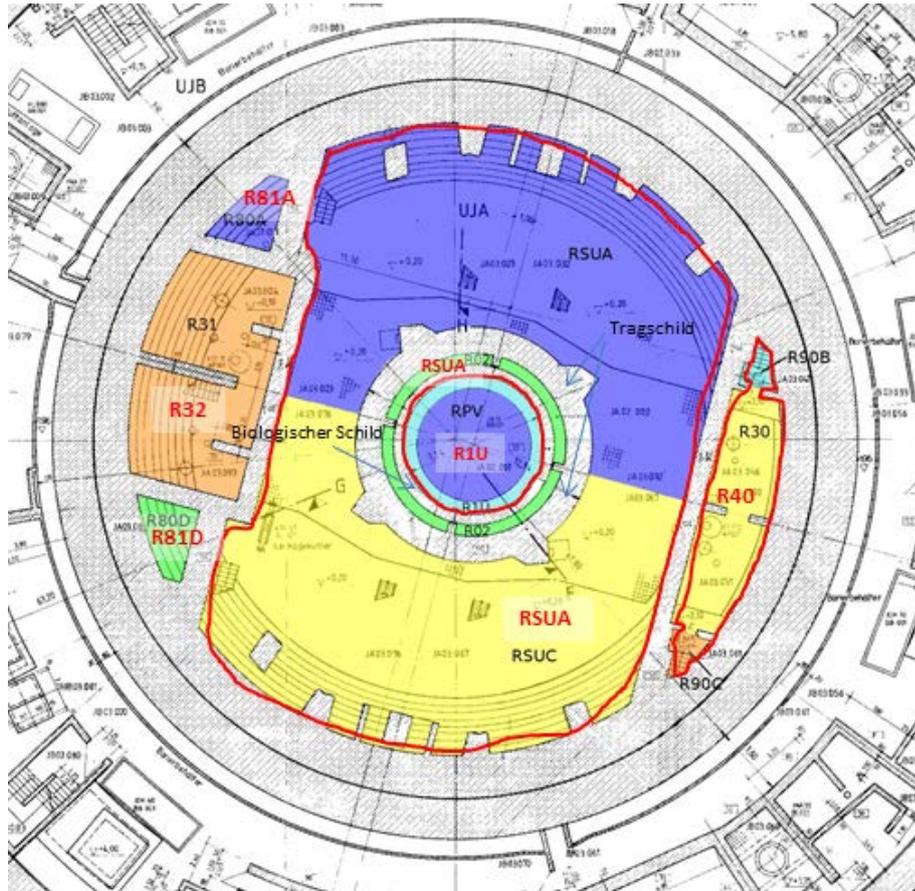


Abb. 4.5 Schnittdarstellung der Reaktorgrube und des Sumpfes des DWR KONVOI auf Höhe +2 m

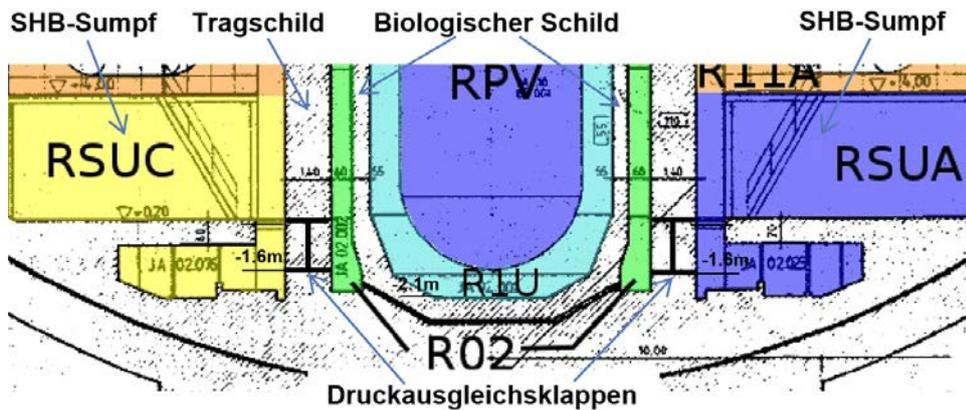


Abb. 4.6 Schnittdarstellung der Reaktorgrube und des Sumpfes des DWR KONVOI mit COCOSYS Zonen

Neuere Analysen /STE 15/ weisen darauf hin, dass ein Schmelzeaustrag nach Durchdringen des biologischen Schildes in den SHB-Sumpf nicht auszuschließen und sogar sehr wahrscheinlich ist, und dann sowohl die verbleibende Schmelze in der Reaktorgrube als auch die verlagerte Schmelze im SHB-Sumpf mit Wasser bedeckt wird.

Nach dem Durchschmelzen des biologischen Schildes wird ein Teil der Schmelze in den Ringspalt und unmittelbar danach in den Sumpf verlagert. Die in den Sumpf verlagerte Schmelze erstarrt und die Betonerosion und damit auch die Wasserstoffproduktion kommen zum Erliegen. Die in der Reaktorgrube verbleibende Schmelze hingegen erodiert weiterhin den Beton und produziert H_2 , CO und CO_2 , wobei sie dann ebenfalls mit Sumpfwasser überdeckt ist. Der Fortgang der Erosion ist damit begründet, dass der Schmelzepool wesentlich kompakter als im Sumpf ist und damit nicht so effektiv gekühlt werden kann.

Zur Berechnung des dargestellten Vorgangs kommt das erweiterte CCI-Modul in COCOSYS zur Simulation von Unfallabläufen mit mehreren Schmelzepools zum Einsatz. Zielsetzung der CCI-Analyse ist es, die Schmelze-Beton-Wechselwirkung in der Reaktorgrube (Schmelzepool 1) sowie im SHB-Sumpf (Schmelzepool 2) unter Annahme eines radialen Durchbruchs des biologischen Schildes und eines Schmelzeaustritts in den SHB-Sumpf zu untersuchen. Im Unterschied zu den früheren Analysen /SON 01/, /BAN 12/ sind somit folgende Vorgänge realistischer abgebildet:

- Erosion des biologischen Schildes in Folge der Schmelze-Beton-Wechselwirkung nach RDB-Versagen, insbesondere der Ort des Durchschmelzens in der Reaktorgrube,
- Massenübertrag zwischen mehreren Schmelzepools, d. h. vom „sendenden“ Schmelzepool in der Reaktorgrube zu dem „empfangenden“ Schmelzepool im SHB-Sumpfbereich,
- Wasserüberdeckung der Schmelze nach Eindringen von Sumpfwasser in die Reaktorgrube sowie Verlagerung der Schmelze in den SHB-Sumpf.

Das mögliche Auftreten von Dampfexplosionen in der Reaktorgrube oder dem SHB-Sumpf beim Kontakt der Schmelze mit Wasser wird in den vorliegenden COCOSYS-Analysen nicht berücksichtigt.

4.5 Modellannahmen für die Simulation der Schmelze-Beton-Wechselwirkung

Mit Hilfe des CCI-Moduls sind zwei Bereiche hinsichtlich einer möglichen Schmelze-Beton-Wechselwirkung simuliert. Der erste Bereich umfasst die Reaktorgrube innerhalb des biologischen Schildes (Schmelzepool 1), in dem sich der Reaktor befindet.

Das biologische Schild hat einen Innendurchmesser von 7,1 m und eine Wanddicke von 0,55 m. Die Reaktorgrube hat eine Bodenfläche von 14 m² und befindet sich auf einer Höhe von -2,1 m. Der zweite Bereich umfasst den außerhalb der Reaktorgrube liegenden SHB-Sumpfbereich (Schmelzpool 2). Im unteren Bereich des Tragschildes sind auf Bodenhöhe 8 Klappen (Durchlässe) im Umfang angeordnet, die einen Druckausgleich zwischen dem Ringspalt und dem Bereich des SHB-Sumpfes ermöglichen. Zum Zeitpunkt des Durchdringens des biologischen Schildes sind diese Druckausgleichsklappen von dem im Sumpf befindlichen Wasser aufgedrückt. Die Unterkante des Durchlasses zwischen Ringspalt und Sumpf befindet sich auf -1,6 m (Abb. 4.6). Es wird angenommen, dass nach dem Durchschmelzen des biologischen Schildes ein Teil der Schmelze vor der Reaktorgrube (Schmelzpool 1) unmittelbar in den SHB-Sumpf (Schmelzpool 2) verlagert wird, d. h. der Ringspalt zwischen biologischem Schild und Tragschild wird hier nicht simuliert.

In der CCI-Rechnung (Abb. 4.7) wird auf der Basis vereinfachter Abschätzungen angenommen, dass der Durchdringungsort in der Reaktorgrube (Schmelzpool 1) zum SHB-Sumpf (Schmelzpool 2) 0,5 m oberhalb des ursprünglichen Betonbodens der Reaktorgrube auf -2,1 m liegt. So wird nur der Massenanteil an Schmelze in den Schmelzpool 2 übertragen, der oberhalb der für den Ort der Durchdringung angenommenen axialen Koordinate steht ($z = 0,5$ m), d. h. die gesamte Schmelze, die sich zwischen -2,1 m und -1,6 m befindet, wird dann sofort in den SHB-Sumpf übertragen. Der Schmelzedurchbruch in radialer Richtung erfolgt, wenn die seitliche Erosionskontur in der Reaktorgrube (Schmelzpool 1) eine radiale Koordinate von $r = 4,1$ m erreicht, d. h. nachdem das biologische Schild von 0,55 m Dicke durchgeschmolzen ist (Abb. 4.7). Nach dem Durchschmelzen des biologischen Schildes wird das Eindringen von Sumpfwasser in die Reaktorgrube und das vollständige Überdecken der Schmelze mit Wasser angenommen.

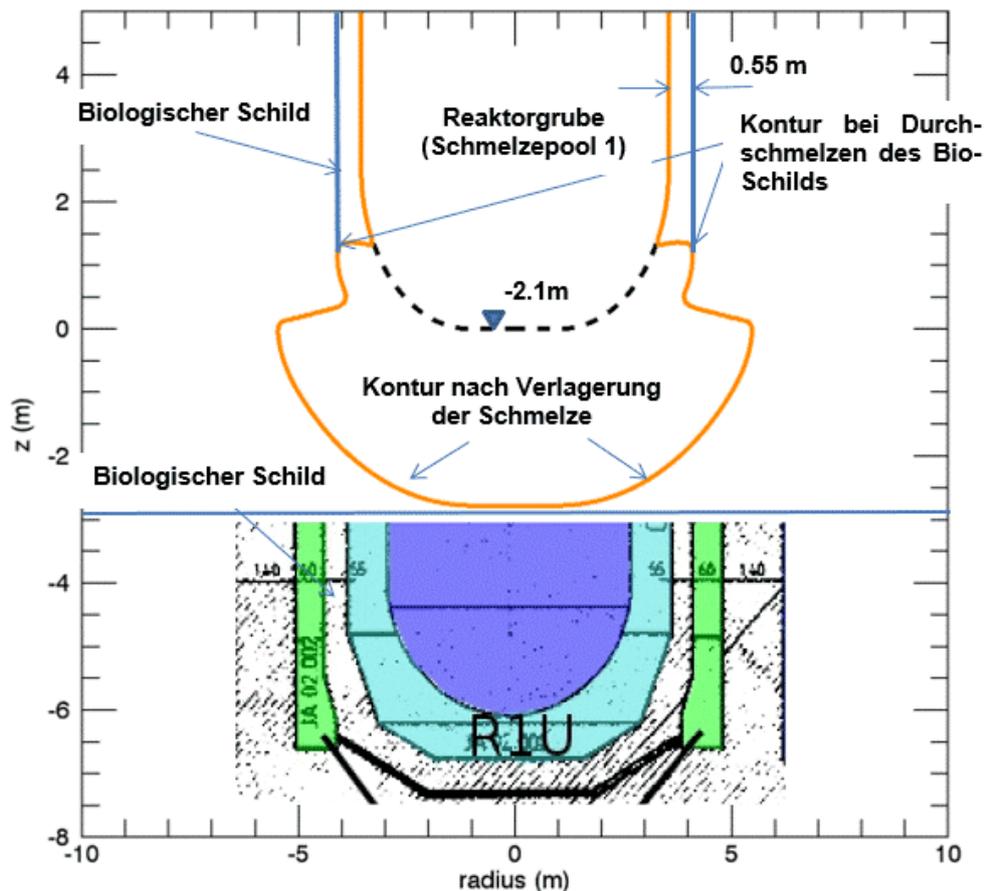


Abb. 4.7 CCI-Modul Rechnung, Kavernenkontur bei Durchdringung des Schildes und nach Schmelzeverlagerung in den SHB-Sumpf – Kontur der Betonerosion in der Reaktorgrube (orange), Ausgangskontur (schwarz, gestrichelt)

Zur Berechnung der Schmelze-Beton-Wechselwirkung wird die Schmelze mit homogener Anfangskonfiguration in der Reaktorgrube ohne Berücksichtigung möglicher Abfolge von Schichtungsvorgängen, d. h. ohne Übergang von homogener zu geschichteter Schmelzekonfiguration während des gesamten CCI-Prozesses in den beiden Schmelzepools, angesetzt.

Die verwendete Betonzusammensetzung der Reaktorgrube entspricht dem silikatischen Beton der Referenzanlage (Tab. 4.3) und basiert auf /SON 01/ bzw. /SON 05/. Die Zusammensetzung der in die Reaktorgrube ausgetragenen Schmelze ist von dem betrachteten Unfallszenario abhängig und wurde den Ergebnissen der in /SON 01/ dokumentierten Rechnungen entnommen.

Tab. 4.2 Chemische Betonzusammensetzung der Reaktorgrube für die Referenzanlage GKN-2

Betonbestandteil	Massenanteil
SiO ₂	0,67682
CO ₂	0,01718
Fe ₂ O ₃	0,01410
Al ₂ O ₃	0,03736
CaO	0,08793
MgO	0,00803
Fe	0,11894
H ₂ O _{chem+frei}	0,03965

Wichtige thermophysikalische Eingaben des CCI-Moduls sind die Zerstörungstemperatur sowie die integrale Schmelzenthalpie des Betons. Die Zerstörungstemperatur des silikatischen Betons liegt bei 1573 K, während die entsprechende Schmelzenthalpie 2,1E6 J/kg beträgt.

Ausgehend von einem von der GRS entwickelte empirischen Ansatz, wurde im CCI-Modul ein konstanter Wert der effektiven Wärmeübergangskoeffizienten an der Schnittstelle Schmelze/Beton sowie auch Schmelze/Atmosphäre in der Reaktorgrube verwendet /SPE 11/. Die effektiven Wärmeübergangskoeffizienten für die Grenzfläche zwischen Schmelze und Beton (in axialer und radialer Richtung) wurden auf der Basis einer vereinfachten Bewertung der effektiven Wärmeübergangskoeffizienten geschätzt, die in einer Reihe von 2D-MCCI-Experimenten beobachtet wurden /SPE 11/. Die aktuellen Ergebnisse der Nachrechnungen mit dem CCI-Modul unter Verwendung dieser empirisch ermittelten effektiven Wärmeübergangszahlen zeigen generell akzeptable Übereinstimmungen mit den experimentellen Daten. Die von der GRS auf Basis der Nachrechnungen empfohlenen Werte der effektiven Wärmeübergangskoeffizienten für Schmelze mit homogener Anfangskonfiguration und silikatischem Beton sind in Tab. 4.3 angegeben.

Tab. 4.3 Effektive Wärmeübergangskoeffizienten zwischen homogener oxidischer Schmelze und Beton (in axialer und radialer Richtung)

Schmelzekonfiguration	Wärmeübergangszahlen, W/(m ² *K)		
	Boden	Seitenwand	Oberfläche
Schmelzepool (homogen vermischt) – Oxidschmelze	300	300	300

4.6 Unterstellte Leckagen am Sicherheitsbehälter

Wie in Kapitel 3.3 begründet, wurde für die nachfolgenden Analysen von Leckagen im Bereich der Kabeldurchführungen durch den SHB ausgegangen und verschärfend unterstellt, dass größere Leckagen als die Auslegungsleckagen des SHB (Faktor 10) bereits ab Eintritt des Ereignisses existieren. Bei den Analysen wurde der Druckanstieg des SHB auf maximal 0,7 MPa begrenzt und danach die gefilterte Druckentlastung des SHB genutzt. Die größeren Leckagen werden deshalb als zusätzlicher Fehler unterstellt. In diesen Analysen werden sie hauptsächlich im Bereich der 475 Kabeldurchführungen auf der Ebene 6 von +12 m bis +15 m auf verschiedenen Umfangspositionen unterstellt (rote Pfeile in Abb. 4.2). Zusätzlich werden Leckagen von der Umgebung durch das Hilfsanlagegebäude und das Verbindungstor in die unteren Ringräume definiert (blaue Pfeile in Abb. 4.2).

4.7 Randbedingungen für den Basisfall und für Parametervariationen

Die durchgeführten Rechnungen zu den Basisfällen und die Parametervariationen sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst. Für die Auswertung der Ergebnisse in Kapitel 5 wurden nur die Fälle herangezogen, die auch ergebnisrelevant waren.

Tab. 4.4 Zusammenstellung der Analysen: Basisfall und Variantenrechnungen

Variante	NFM					Randbedingungen			
	1. RR-Störfallabsaugung	2. Umluftsysteme im RR (KLB-50)	3. Zu- und Abluftanlagen des RR	4. Nutzung Bedarfsfilteranlage	5. Berücksichtigung von RECOs im RR	Lage der RR-Störfallabsaugung	Größe der SHB-Leckage	Lage der SHB-Leckage	SHB-Druckentlastung bei 7 bar
Fälle mit Auslegungsleckage – MBL-Fall									
Basisfall MBL-BC-0,25	in Betrieb	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	Nein	Nein	U01D3	0,25 Vol.-%/d	U01B ungünstigste Pos.	Ja
Variante 1 MBL-V1	in Betrieb	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	Nein	Nein	U01D3	0,25 Vol.-%/d	U01D3 günstigste Pos.	Ja
Variante 2 MBL-V2	in Betrieb	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	Nein	Nein	U01D3	0,25 Vol.-%/d	U01B-50% U01D3-50%	Ja
Variante 3 MBL-V3	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	Nein	Nein	U01D3	0,25 Vol.-%/d	U01B	Ja
Variante 4 MBL-V4	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	Nein	Nein	U01D3	0,25 Vol.-%/d	U01B-50% U01A-50%	Ja
Variante 5 MBL-V5	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	Nein	Nein	U01D3	0,25 Vol.-%/d	U01B	Ja
Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage – MBL-Fall									
Basisfall MBL-BC-2,5	in Betrieb	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	Nein	Nein	U01D3	10-fache Leckage	U01B	Ja

Variante	NFM						Randbedingungen			
	1. RR-Störfallabsaugung	2. Umluftsysteme im RR (KLB-50)	3. Zu- und Abluftanlagen des RR	4. Nutzung Bedarfsfilteranlage	5. Berücksichtigung von RECOs im RR	Lage der RR-Störfallabsaugung	Größe der SHB-Leckage	Lage der SHB-Leckage	SHB-Druckentlastung bei 7 bar	
Variante 1 MBL-V1	in Betrieb	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	Nein	Nein	U01D3	10-fache Leckage	U01D3	Ja	
Variante 2 MBL-V2	in Betrieb	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	Nein	Nein	U01D3	10-fache Leckage	U01B-50% U01A-50%	Ja	
Variante 3 MBL-V3	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	Nein	Nein	U01D3	10-fache Leckage	U01B	Ja	
Variante 4 MBL-V4	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	Ja 2 Tage	Ja	Nein	U01D3	10-fache Leckage	U01B	Ja	
Variante 5 MBL-V5	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	Ja 2 Tage	Nein	Nein	U01D3	10-fache Leckage	U01B	Ja	
Variante 6 MBL-V6	in Betrieb	Ja 35000 s	nicht in Betrieb	Nein	Nein	U01D3	10-fache Leckage	U01B	Ja	
Variante 7 MBL-V7	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	Nein	Nein	U01D3	10-fache Leckage	U01B	Ja	
Variante 8 MBL-V8	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	Ja 3 Tage	Nein	Nein	U01D3	10-fache Leckage	U01B	Ja	
Variante 9 MBL-V9	nicht in Betrieb	Ja 2 Tage	Ja 2 Tage	Nein	Nein	U01D3	10-fache Leckage	U01B	Ja	
Variante 10 MBL-V10	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	Nein	4 Rekos U22A-D	U01D3	10-fache Leckage	U01B	Ja	

NFM					Randbedingungen				
Variante	1. RR-Störfallabsaugung	2. Umluftsysteme im RR (KLB-50)	3. Zu- und Abluftanlagen des RR	4. Nutzung Bedarfsfilteranlage	5. Berücksichtigung von RECOs im RR	Lage der RR-Störfallabsaugung	Größe der SHB-Leckage	Lage der SHB-Leckage	SHB-Druckentlastung bei 7 bar
Fälle mit Auslegungsleckage – ND*-Fall									
Basisfall ND*-BC-0,25	in Betrieb	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	Nein	Nein	U01D3	0,25 Vol.-%/d	U01B	Ja
Variante 1 ND*-V1	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	Nein	Nein	U01D3	0,25 Vol.-%/d	U01B	Ja
Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage – ND*-Fall									
Basisfall ND*-BC-2,5	in Betrieb	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	Nein	Nein	U01D3	10-fache Leckage	U01B	Ja
Variante 1 ND*-V1	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	Nein	Nein	U01D3	10-fache Leckage	U01B	Ja
ND*-Fall und MBL-Fall mit Schmelzeverlagerung in den Sumpf									
Variante 1 ND*-V2	in Betrieb	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	Nein	Nein	U01D3	10-fache Leckage	U01B	Ja
Variante 2 ND*-V3	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	Nein	Nein	U01D3	10-fache Leckage	U01B	Ja

Variante	NFM					Randbedingungen			
	1. RR-Störfallabsaugung	2. Umluftsysteme im RR (KLB-50)	3. Zu- und Abluftanlagen des RR	4. Nutzung Bedarfsanlage	5. Berücksichtigung von RECOs im RR	Lage der RR-Störfallabsaugung	Größe der SHB-Leckage	Lage der SHB-Leckage	SHB-Druckentlastung bei 7 bar
Variante 3 MB-V7	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb	Nein	Nein	U01D3	10-fache Leckage	U01B	Ja

5 Ergebnisse der COCOSYS-Analysen

5.1 MBL-Fall – Basisfall und Varianten

5.1.1 MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

Im MBL-Basisfall wurde die nominale SHB-Auslegungsleckage von 0,25 Vol.-%/d zum Ringraum im Bereich der Durchführungen des SHB auf 12 m Ebene simuliert. Die Auslegungsleckage wurde durch eine Lecköffnung von 0,084 cm² zwischen dem peripheren Raum R72B und dem Raum U01B im Ringspalt am „ungünstigsten“ Ort, d. h. im Ringraum gegenüber der Absaugstelle der RR-Störfallabsaugung, unterstellt. Aufgrund der kleinen Lecköffnung kommt es zu einem geringen Volumenstrom in den Ringraum und damit zur Freisetzung geringer Mengen von Wasserstoff, Aerosolen und Edelgasen. Der Volumenstrom durch die Leckage beträgt beim SHB-Auslegungsdruck von 0,7 MPa ca. 7,4 m³/h (Abb. 5.1).

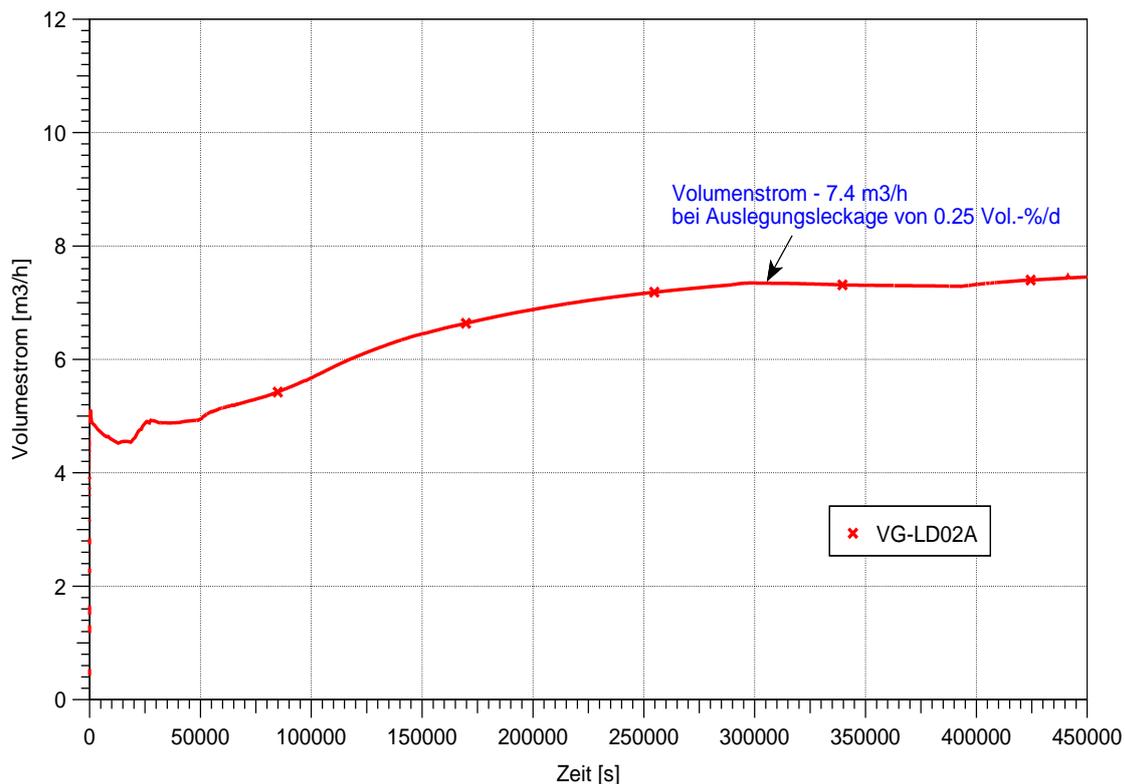


Abb. 5.1 Volumenstrom durch die SHB-Auslegungsleckage, MBL-Basisfall

Der MBL-Basisfall mit Auslegungsleckage wurde unter Berücksichtigung der Druckentlastung des SHB bei 0,7 MPa gerechnet. Abb. 5.2 zeigt den zeitlichen Druckverlauf im SHB. Nach dem Versagen des Reaktordruckbehälters (bei 31 867 s) tritt die Kern-

schmelze in die Reaktorgrube aus und breitet sich auf dem Betonboden aus, wodurch dort die trockene Schmelze-Beton-Wechselwirkung einsetzt. Bei 48 140 s nach dem Beginn des Störfalls ist der Beton des biologischen Schildes durcherodiert und die Kernschmelze kommt mit dem eindringenden Sumpfwasser in Kontakt. Ein Schmelzeaustrag in den Sumpf wird hier (pessimistisch) nicht angenommen, wodurch die Produktion nichtkondensierbarer Gase am stärksten ist. Mit dem Beginn der Schmelze-Sumpfwasser-Wechselwirkung steigt aufgrund der höheren Dampfproduktion der Druck im SHB langfristig an (Abb. 5.2). Wenn er 0,7 MPa (absolut) erreicht, wird die Druckentlastung im SHB eingeleitet. Beim MBL-Fall ist die Wassermasse im Sumpf groß genug, so dass er bis zum Ende der Rechnung nicht austrocknet. Zu Beginn der Druckentlastung wird eine Wassereinspeisung in den Sumpf angenommen.

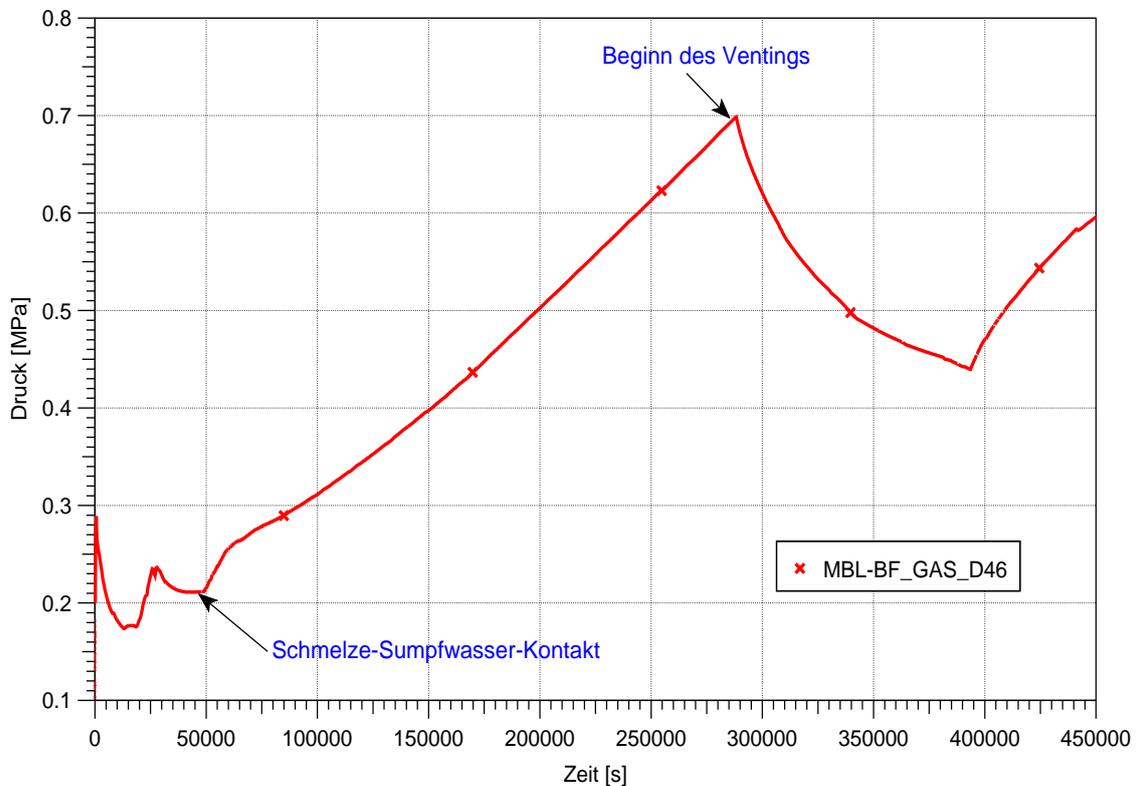


Abb. 5.2 SHB-Druckverlauf, MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

Im Basisfall mit Auslegungsleckage wird außerdem angenommen, dass die RR-Störfallabsaugung ab Beginn des Störfalls in Betrieb ist. Abb. 5.3 zeigt den zeitlichen Druckverlauf im Ringraum. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass in der Anfangsphase des Unfallablaufs innerhalb einer kurzen Zeitspanne von 600 s ein geringer Überdruck im Ringraum entsteht, obwohl die RR-Störfallabsaugung in Betrieb ist. Dies ist durch eine vereinfachte Modellierung des Gebäudeabschlusses und der betrieblichen Lüftungssysteme begründet. Generell würde bei Eintritt eines Störfalls ein Gebäudeab-

schluss im Ringraum hergestellt und die RR-Störfallabsaugung in Betrieb genommen. Wenn die normalen Lüftungssysteme beim Störfalleintritt nicht verfügbar sind, kann es laut HMN durch den Wärmeeintrag und Leckagen aus dem SHB zu einem geringeren Überdruck im Ringraum kommen. Deswegen werden die normalen Lüftungssysteme des RR erst 5 Minuten nach dem Gebäudeabschluss abgeschaltet. Da die normalen Lüftungssysteme während des langfristigen Unfallablaufs abgeschaltet sind, wurden diese im COCOSYS-Datensatz nicht modelliert, so dass zu Beginn ein kleiner Überdruck von ca. 0,0007 MPa im Ringraum berechnet wird. Abb. 5.3 zeigt, dass für den Basisfall mit Auslegungsleckage nach 1200 s die RR-Störfallabsaugung den Unterdruck im Ringraum gegen die Umgebung aufrechterhalten kann.

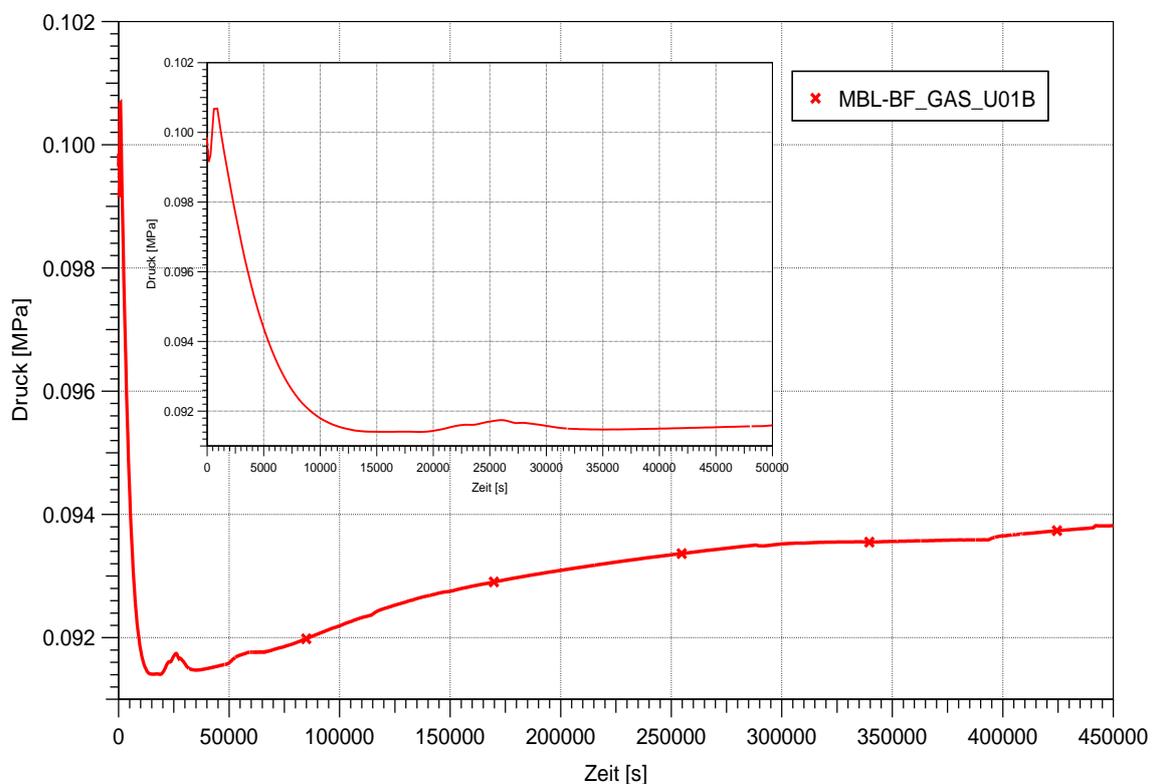


Abb. 5.3 Druckverlauf im Ringraum, MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

Der zeitliche H₂-Konzentrationsverlauf in einigen ausgewählten Zonen des Ringspaltes ist in Abb. 5.4 dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass im Betrachtungszeitraum keine brennbaren Gasgemische im Ringraum auftreten. Durch den Betrieb der RR-Störfallabsaugung bildet sich eine Gasschichtung aus. Die RR-Störfallabsaugung saugt auch Atmosphäre aus der Umgebung durch die Undichtigkeiten (hier am Tor zum Hilfsanlagegebäude (Zone U71) unterstellt) an. Von dort strömt die Luft in den unteren Bereich des Ringraums (6-m-Ebene) ein. Dies führt zur Verringerung der Wasserdampfkonzentration im unteren Ringraum.

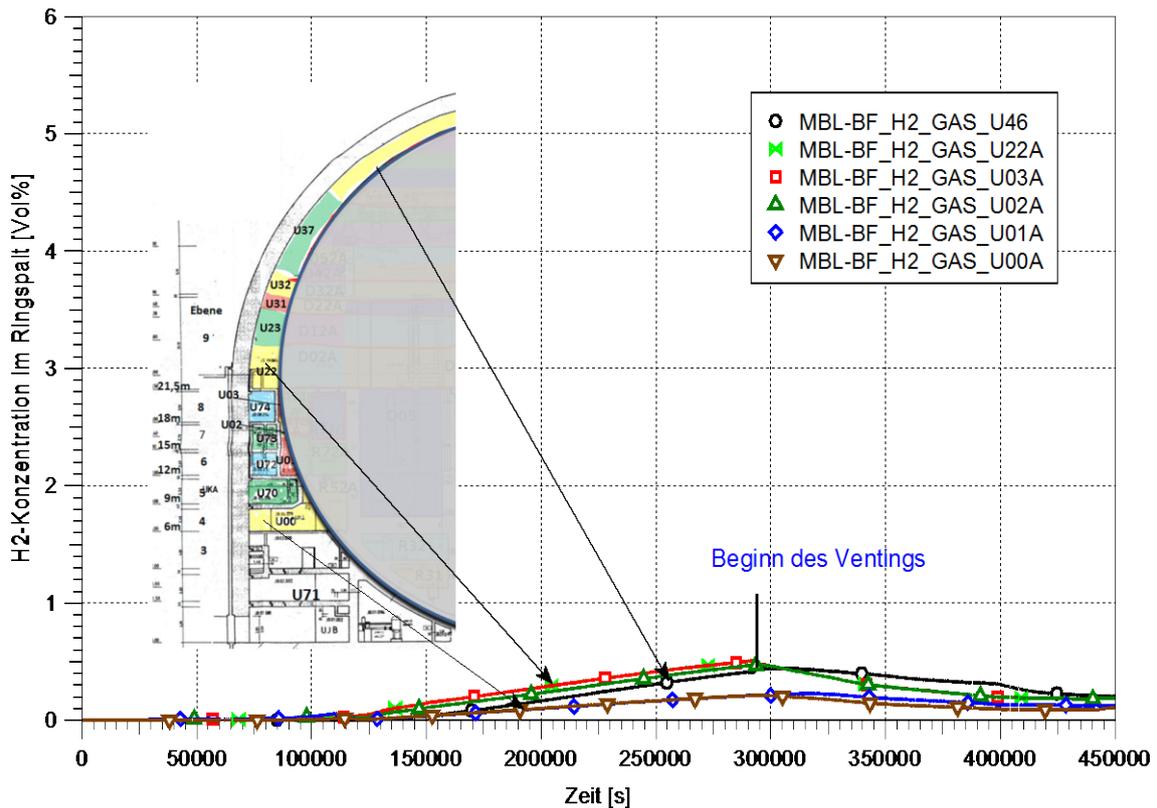


Abb. 5.4 H₂-Konzentration im RR-Ringspalt, MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

Abb. 5.5 und Abb. 5.6 stellen die H₂-Konzentration in einigen Zonen (separate Räume des Ringraums) in Umfangsrichtung dar sowie auf fünf verschiedenen Ebenen entlang der Höhe des Ringraums. Die H₂-Konzentration liegt bis zum Beginn der Druckentlastung bei 295 000 s im Ringraum deutlich unterhalb 1 Vol.-% und nimmt langfristig weiter ab, wenn die gefilterte Druckentlastung des SHB zum Einsatz kommt.

Hier zeigt sich, dass einige separate Räume des Ringraums auf 18-m-Ebene (z. B. Zone U7*A, Abb. 5.5) durch das Schließen einzelner Brandschutzelemente vom Gaseintrag abgeschlossen werden, während bei andere Räumen dies nicht der Fall ist, da sie über offene Verbindungen zum Ringspalt verfügen (z. B. Zone U7*B, Abb. 5.6). Die Brandschutztüren und Brandschutzklappen schließen automatisch, wenn die Temperatur in den RR-Räumen 70°C erreicht. So kann der Anstieg der H₂-Konzentration in den dargestellten RR-Räumen frühzeitig im Unfallablauf verhindert werden.

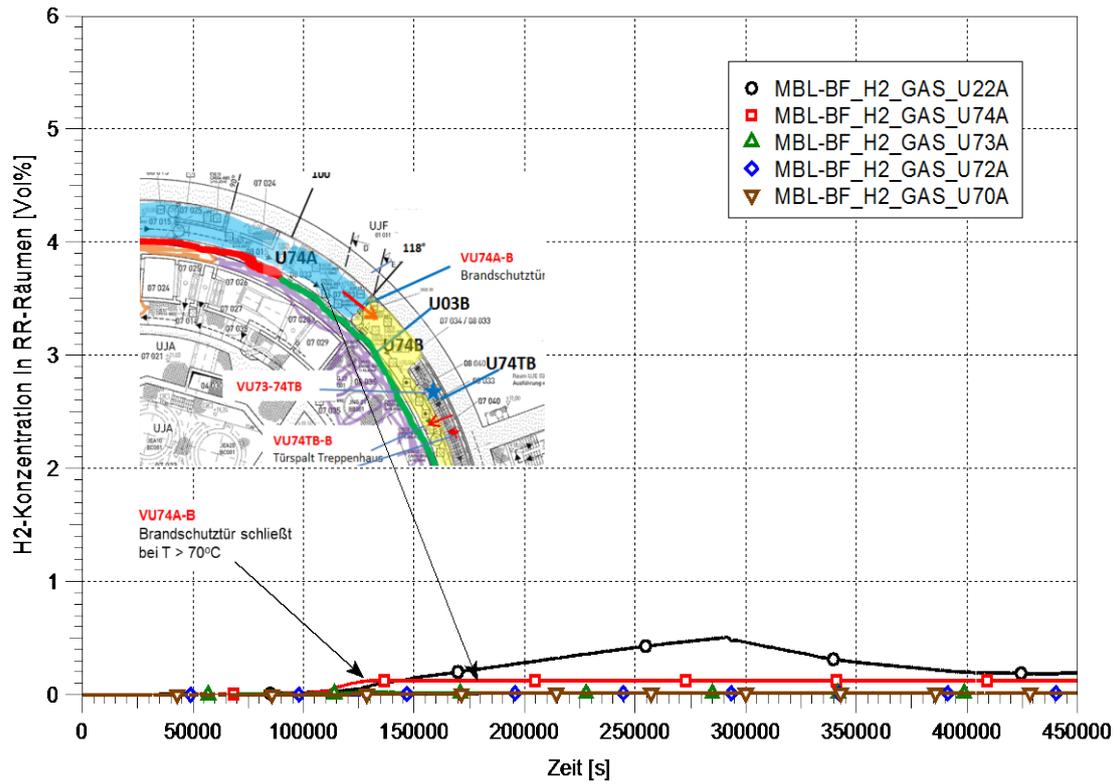


Abb. 5.5 H₂-Konzentration in separaten RR-Räumen (Zonen U7*A), MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

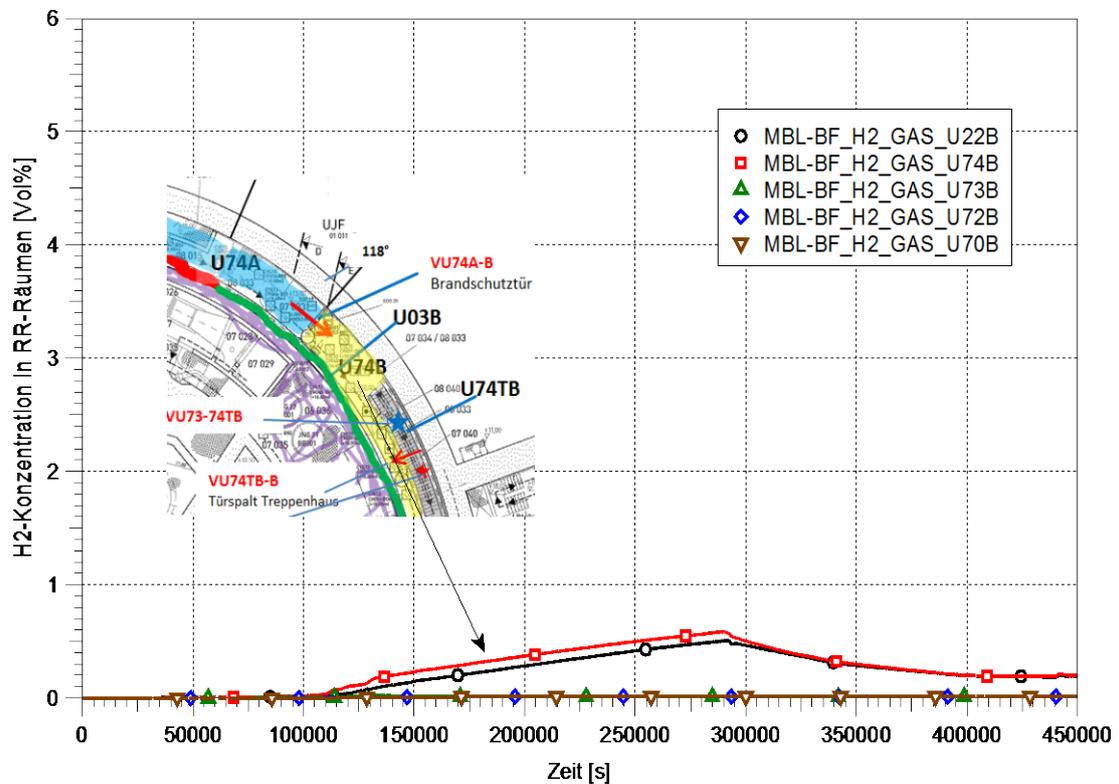


Abb. 5.6 H₂-Konzentration in separaten RR-Räumen (Zonen U7*B), MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

In den nicht absperrbaren RR-Räumen auf der 18-m-Ebene (z. B. Zone U74B) steigt die H₂-Konzentration langsam weiter an, bis die Druckentlastung des SHB eingeleitet wird und die Leckage in den RR nachlässt. In diesen Räumen befinden sich z. B. die Durchführungen der Speisewasserleitungen, die die einzelnen RR-Räume mit dem Ringspalt verbinden. So kann der Wasserstoff aus dem Ringspalt in die einzelnen RR-Räume gelangen.

In /BAN 12/ wurde gezeigt, dass sich im SHB eine stabile Temperaturschichtung mit nach oben zunehmenden Temperaturen ausbildet. Da ein großer Teil der Wärme aus dem SHB über die SHB-Stahlschale in den RR übertragen wird, bildet sich im Ringraum auch eine klare Temperaturschichtung aus. In Abb. 5.7 sind die Temperaturen in einigen ausgewählten Zonen innerhalb des Ringraums und in an die Stahlschale angrenzenden Raumbereichen auf sechs verschiedenen Ebenen dargestellt.

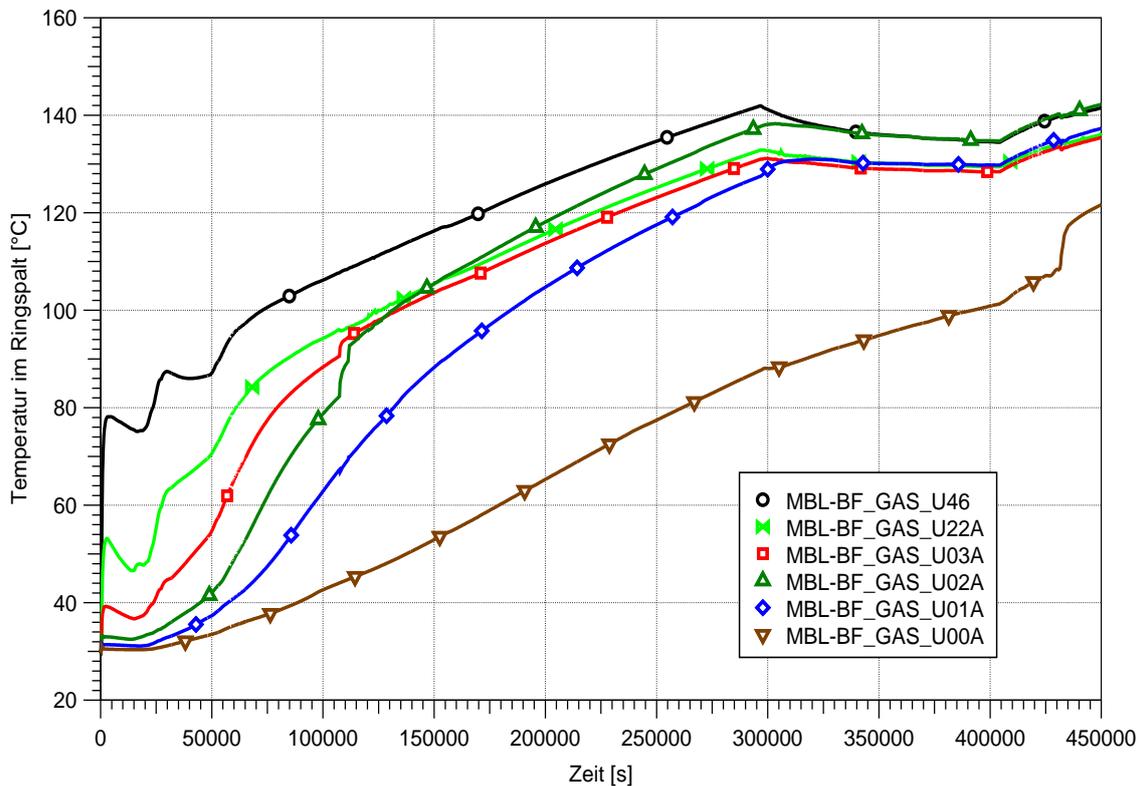


Abb. 5.7 Temperaturen der Atmosphäre im Ringspalt, MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

Aus dem Primärkreis und zu Beginn der Schmelze-Beton-Wechselwirkung werden große Mengen von Aerosolen in den SHB freigesetzt. Die Gesamtmasse freigesetzter Aerosolmasse beträgt ca. 1 600 kg (Abb. 5.8). Wie aus der Abbildung zu ersehen ist, ist wenige Stunden nach der Freisetzung die Konzentration luftgetragener Aerosole

schon zum großen Teil abgesunken. Insbesondere die größeren Aerosole im SHB lagern sich rasch und spätestens bis zum Beginn der Druckentlastung des SHB nahezu vollständig ab. Damit werden sowohl die Leckage in den RR als auch die Freisetzung über die SHB-Druckentlastung eher von kleinen Aerosolen geprägt.

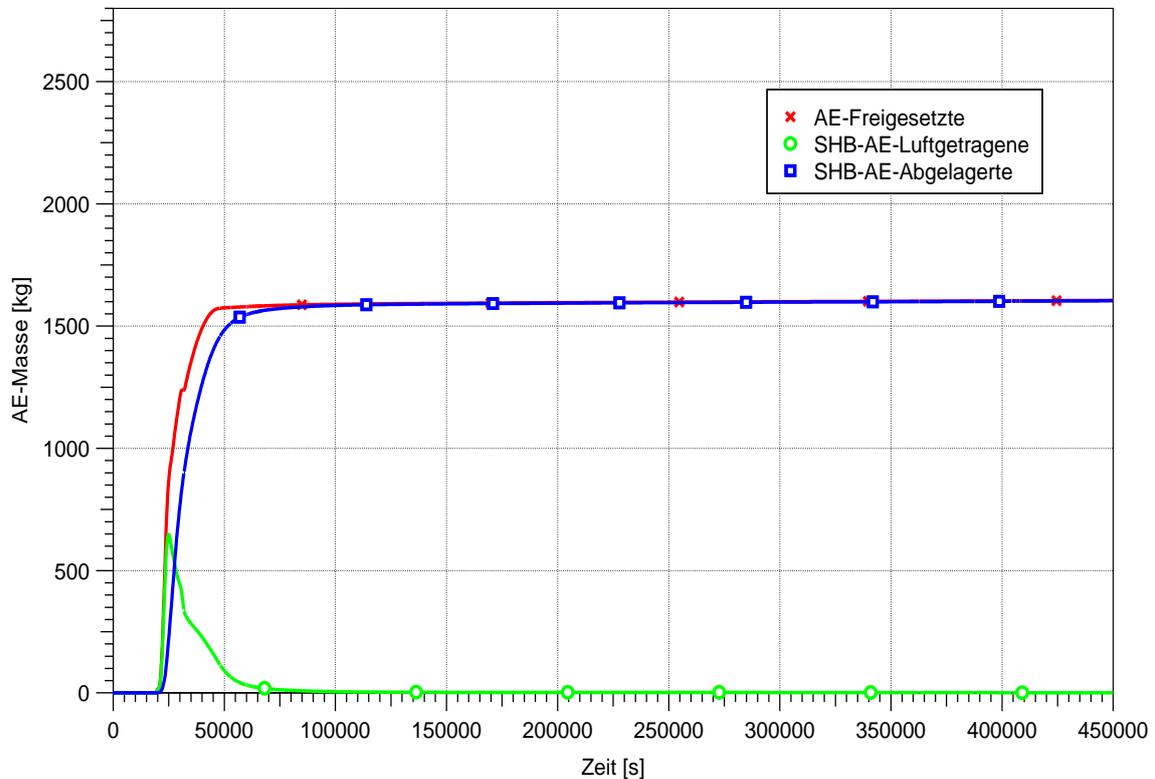


Abb. 5.8 Gesamtmasse in den SHB freigesetzter sowie luftgetragener und abgelagerter Aerosole im SHB, MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

Im MBL-Basisfall mit Auslegungsleckage kann nur eine begrenzte sehr geringe Menge an Aerosolen in den Ringraum freigesetzt werden, da die Leckage sehr gering ist. Aus Abb. 5.9 und Abb. 5.11 ist zu erkennen, dass die luftgetragene Aerosolmasse im Ringspalt nach beendeter Freisetzung andauernd abnimmt, während die Ablagerung der Aerosole auf den Strukturen innerhalb des Ringspalt es kaum ansteigt. Die Ablagerung der Aerosole ist im Prinzip von der Partikelgrößenklasse der Aerosole abhängig, d. h. nur größere Aerosole über 0,1 – 0,5 μm lagern sich schnell ab. Da vorwiegend kleinere Aerosole in den RR ausgetragen wurden (Abb. 5.12), lagern sie sich nicht ab und werden durch die RR-Störfallabsaugung angesaugt und im Störfallfilter zurückgehalten (Abb. 5.10).

Die maximale Masse luftgetragener Aerosole im Ringraum beträgt ca. 0,00063 % (10 g) aller in den SHB freigesetzten Aerosole. Insgesamt werden bis zum Ende der

Rechnung 0,0017 % (27 g) der in den RR freigesetzten Aerosolmasse im Störfallfilter der RR-Störfallabsaugung zurückgehalten. Eine um den Faktor 1000 geringere Menge (ca. 0,027 g) wird in die Umgebung freigesetzt.

Da sich die Aerosole im SHB, bis zum Beginn der Druckentlastung des SHB nahezu vollständig abgelagert haben, ist die Freisetzung von Aerosolen in die Umgebung durch die gefilterte SHB-Druckentlastung auch sehr gering, aber in Summe deutlich höher als der Austrag über die RR-Störfallabsaugung. Bis zum Ende der Rechnung werden insgesamt 0,000063 % (1 g, Abb. 5.9) aus dem SHB in die Umgebung über die Druckentlastung freigesetzt; eine um den Faktor 1000 höhere Masse (ca. 1 kg) ist im Filter der SHB-Druckentlastung zurückgehalten.

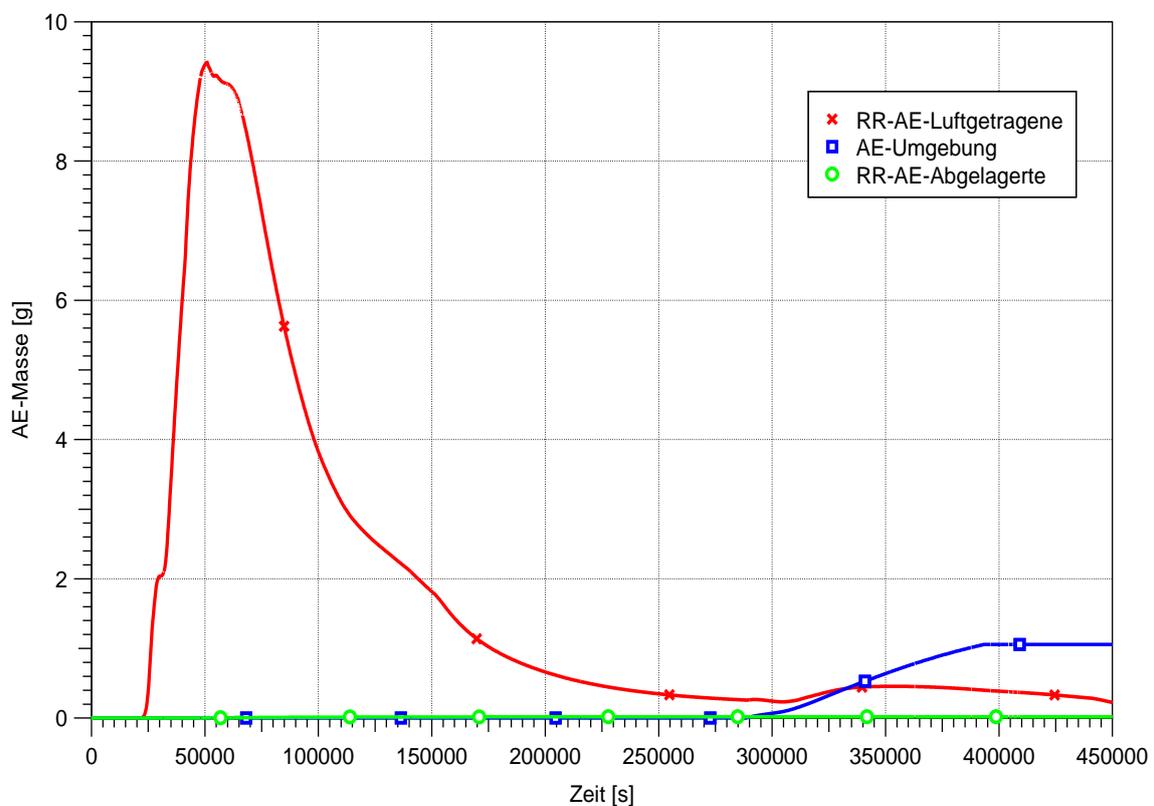


Abb. 5.9 Masse luftgetragener und abgelagerter Aerosole im RR und in die Umgebung freigesetzter Aerosole, MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

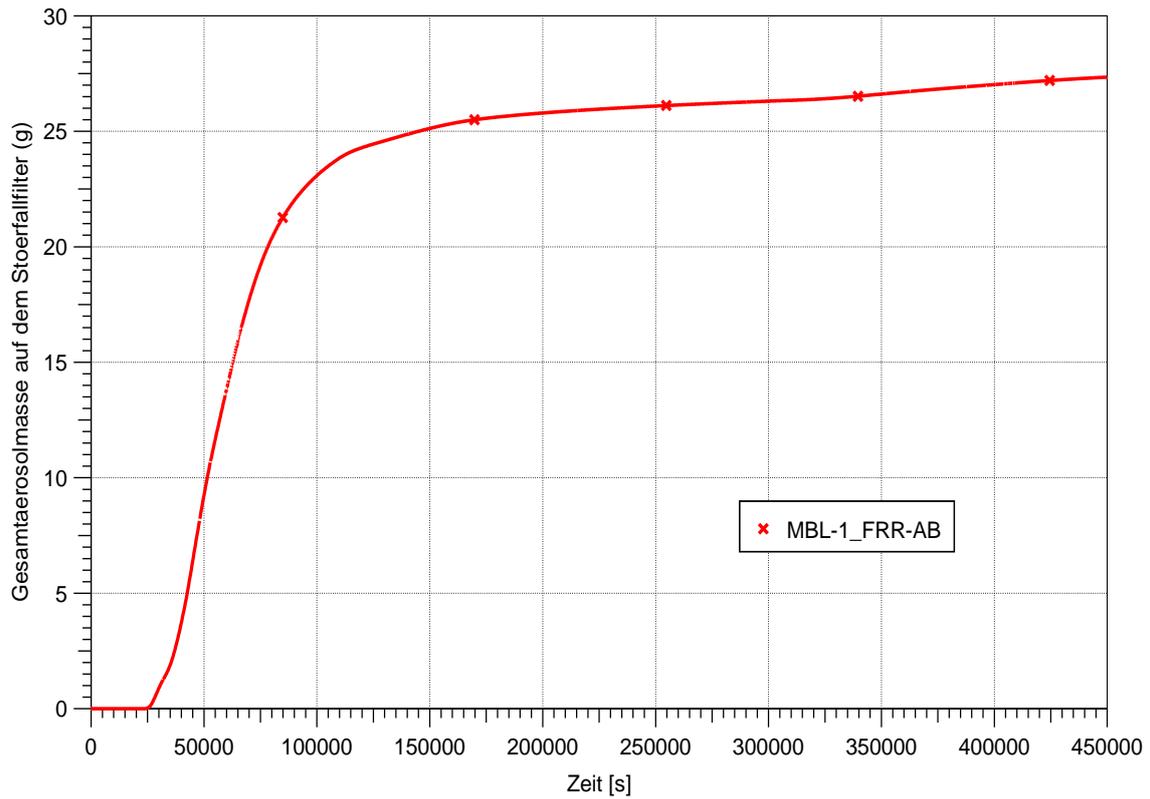


Abb. 5.10 Gesamtaerosolmasse im Störfallfilter der RR-Störfallabsaugung, MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

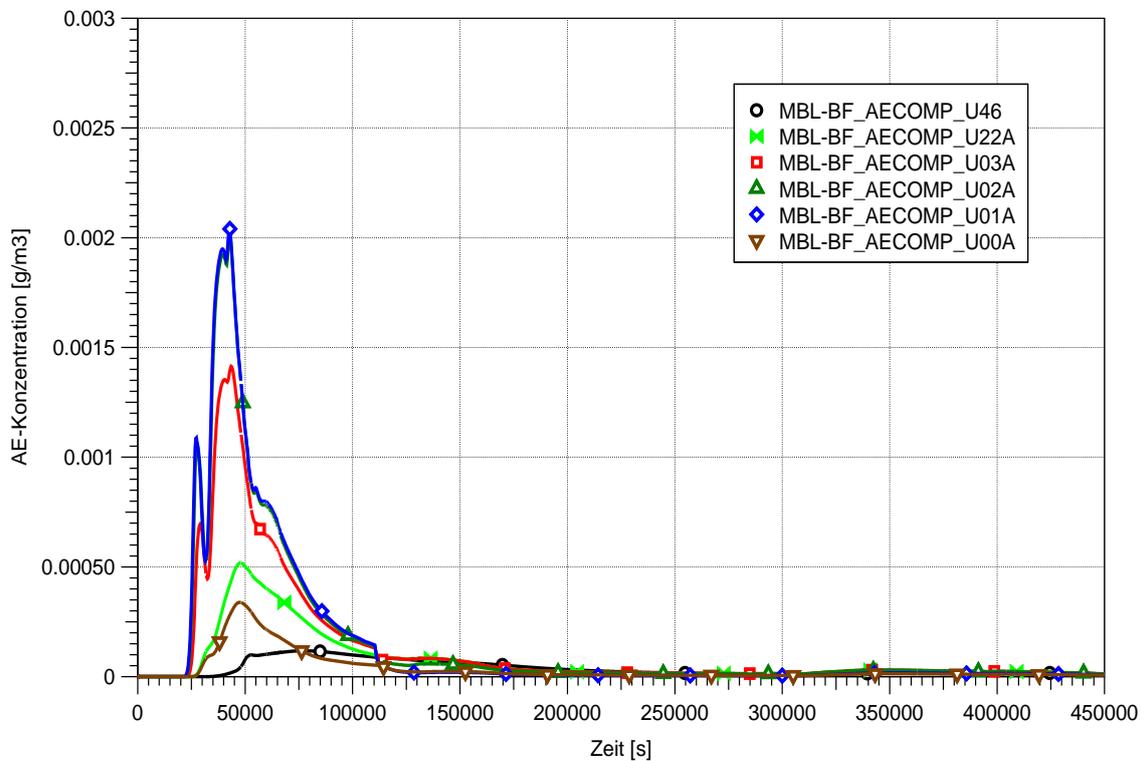


Abb. 5.11 Aerosol-Konzentration in ausgewählten Zonen entlang der Höhe des Ringspaltes, MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

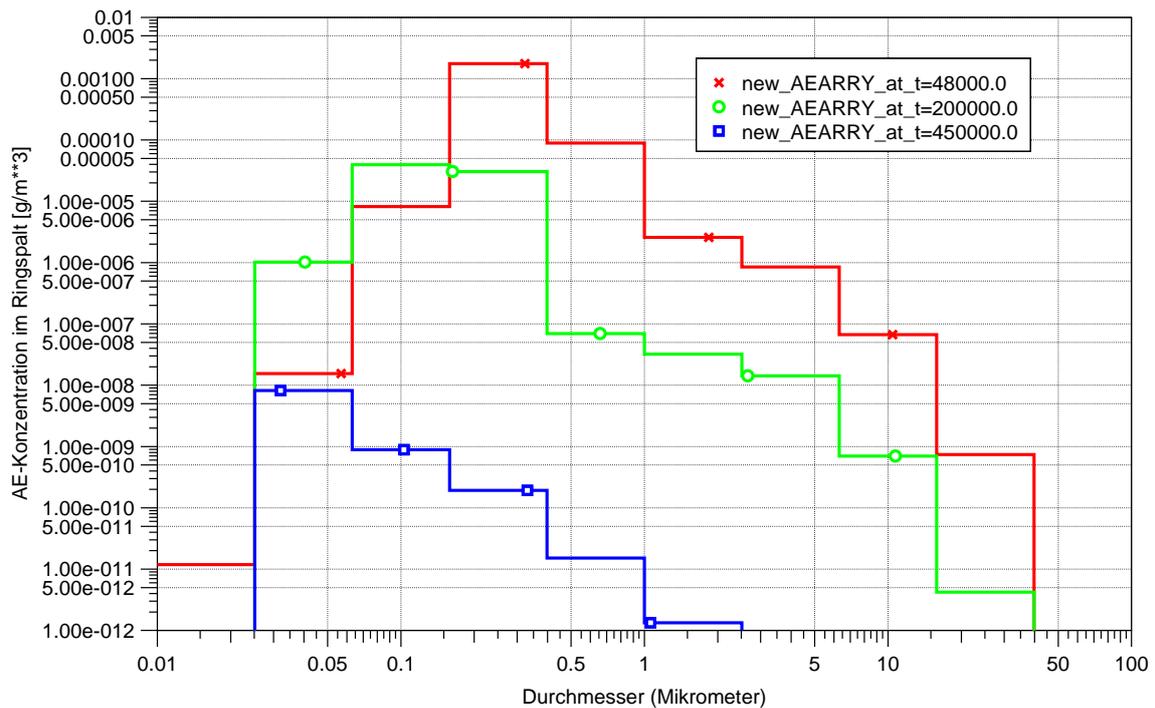


Abb. 5.12 Aerosol-Konzentration im Ringspalt in Abhängigkeit von der Partikelgrößenklasse (für ausgewählte Zeitpunkte), MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

Die als Basis genutzten Rechnungen /SON 01/ zeigen, dass während der In-Vessel-Phase mehr als 90 % des Inventars der Edelgase, sowie der leicht flüchtigen Stoffklassen (Cs, I, Te) aus dem Kern in den SHB freigesetzt werden. Insgesamt werden ca. 343 kg Edelgase aus der Kernschmelze in den SHB freigesetzt (Abb. 5.13). Durch die Auslegungsleckage des SHB kann nur eine begrenzte sehr geringe Menge an Edelgasen in den Ringraum ausgetragen werden. Der zeitliche Xe-Konzentrationsverlauf im Ringspalt sowie in separaten RR-Räumen ist in Abb. 5.14 und Abb. 5.15 dargestellt. Insgesamt werden bis zum Beginn der Druckentlastung nur ca. 1,2 % in die Umgebung über die RR-Störfallabsaugung freigesetzt.

Mit Beginn der Druckentlastung kommt es zu einer höheren Freisetzung von Edelgasen in die Umgebung direkt aus dem SHB. Bis zum Ende der Rechnung werden 75 % (256 kg) aller in den SHB freigesetzten Edelgase in die Umgebung über die gefilterte Druckentlastung freigesetzt (Abb. 5.13). Der Quellterm wird insgesamt von den Edelgasen dominiert, die durch die gefilterte Druckentlastung des SHB nicht zurückgehalten werden können.

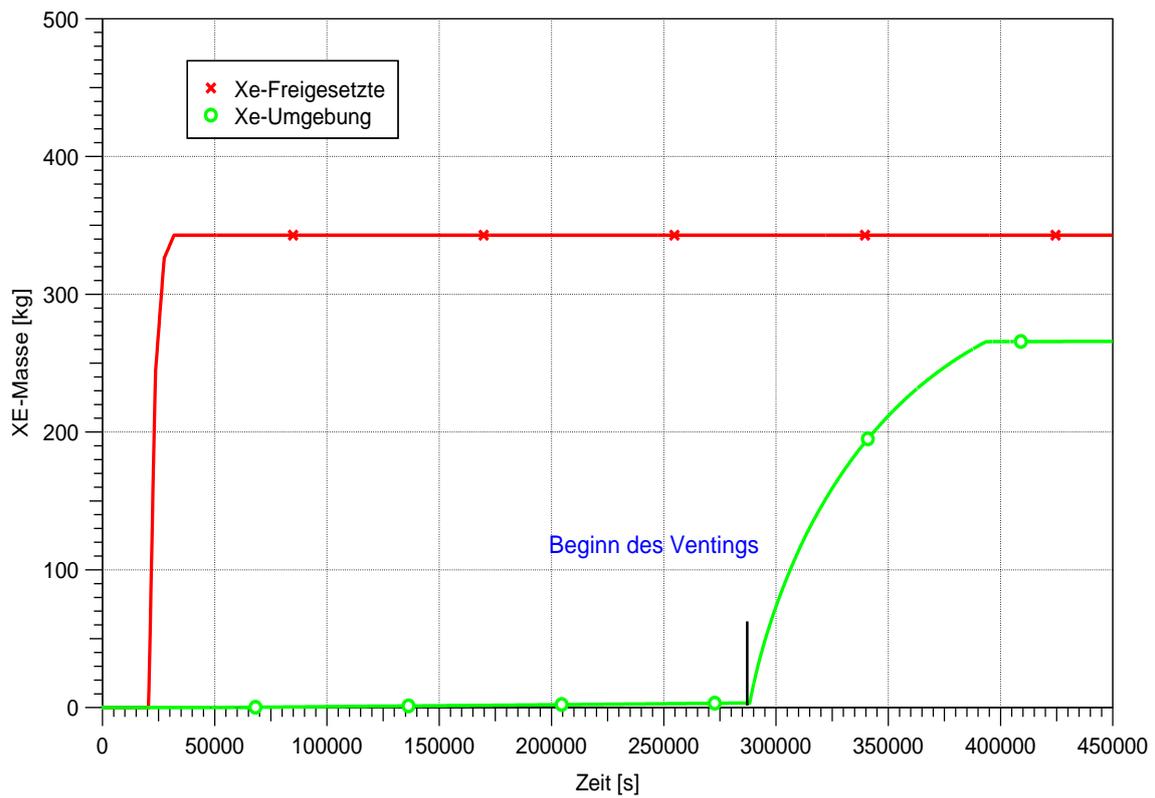


Abb. 5.13 Gesamtmasse freigesetzter Edelgase in den SHB sowie in die Umgebung, MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

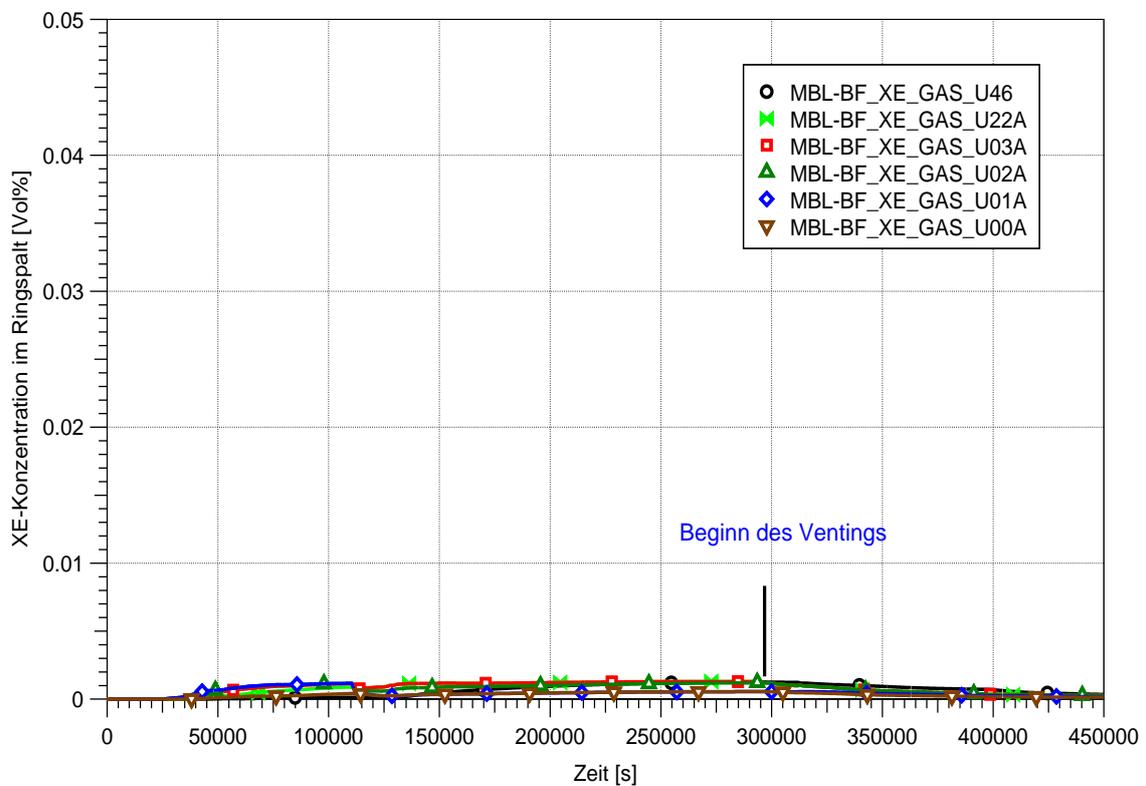


Abb. 5.14 Xe-Konzentration in ausgewählten Zonen entlang der Höhe des Ringspaltes, MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

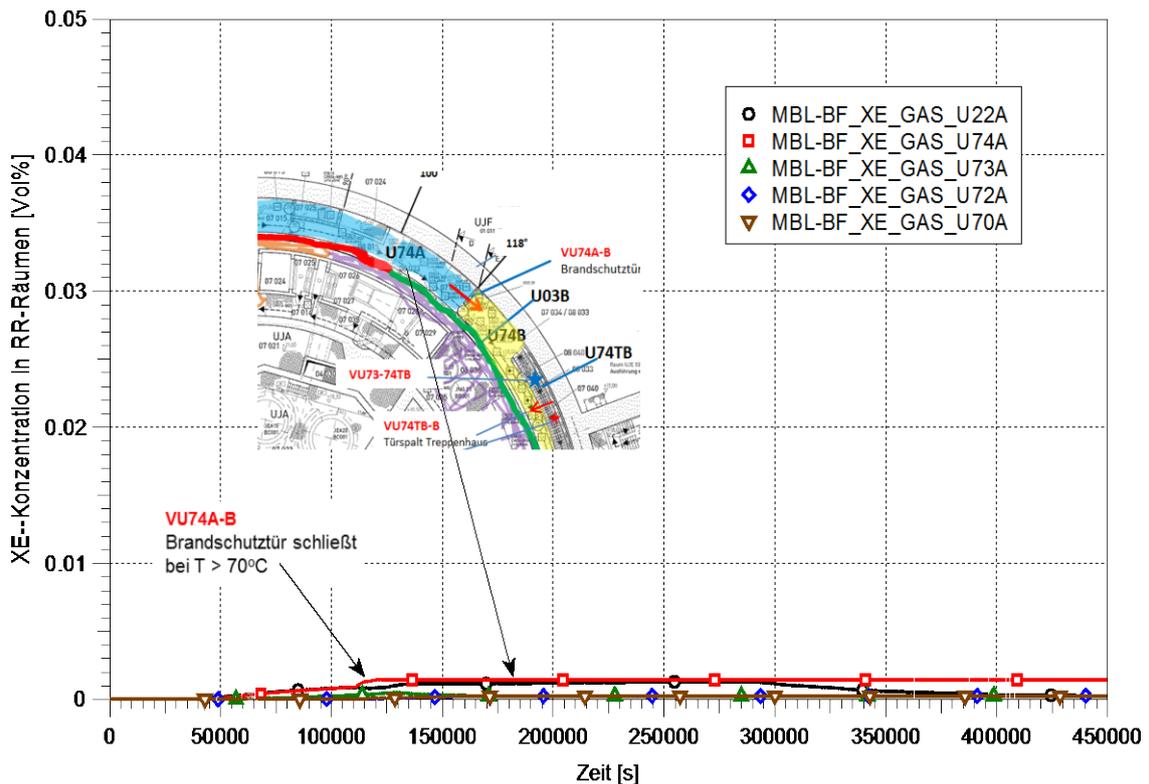


Abb. 5.15 Xe-Konzentration in separaten RR-Räumen entlang der Höhe des Ringraums, MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

5.1.2 MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage

Ein Ziel des Forschungsvorhabens besteht darin, die Zustände im RR bei erhöhten Leckagen aus dem Sicherheitsbehälter zu untersuchen. Aus diesem Grund wurden Variationsfälle mit 10-facher Auslegungsleckage u. a. mit Betrieb oder Ausfall der RR-Störfallabsaugung analysiert. Wie im Basisfall mit Auslegungsleckage wurde der Fall mit 10-facher Auslegungsleckage unter Berücksichtigung der Druckentlastung des SHB bei 0,7 MPa gerechnet. Abb. 5.16 zeigt den Vergleich des zeitlichen Druckverlaufs im SHB für die Auslegungsleckage und die 10-fache Auslegungsleckage. Wie aus der Abbildung zu ersehen ist, ist der Druckverlauf sehr ähnlich. Es fällt auf, dass wegen der erhöhten Leckage aus dem SHB der langfristige Druckaufbau im SHB etwas langsamer ist, verglichen mit dem Basisfall mit Auslegungsleckage.

Abb. 5.17 zeigt für den MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage den zeitlichen Druckverlauf im Ringraum. Innerhalb eines Anfangsbereichs zwischen 600 und 1200 s entsteht wieder ein geringer Überdruck im Ringraum, da die betriebliche Lüftung nicht simuliert wurde. Nach 1200 s kann die RR-Störfallabsaugung den Unterdruck im RR gegen die Umgebung wieder aufrechterhalten.

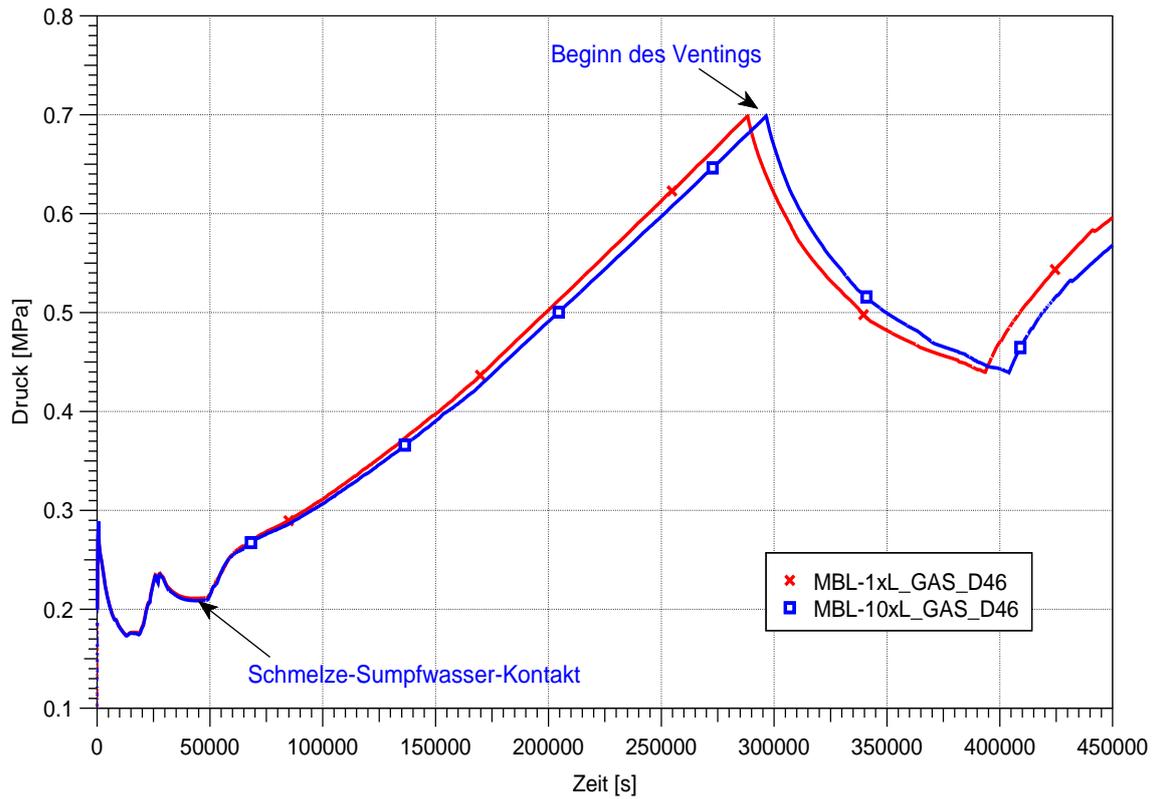


Abb. 5.16 SHB-Druckverlauf für den MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage (blau) im Vergleich zum Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage (rot)

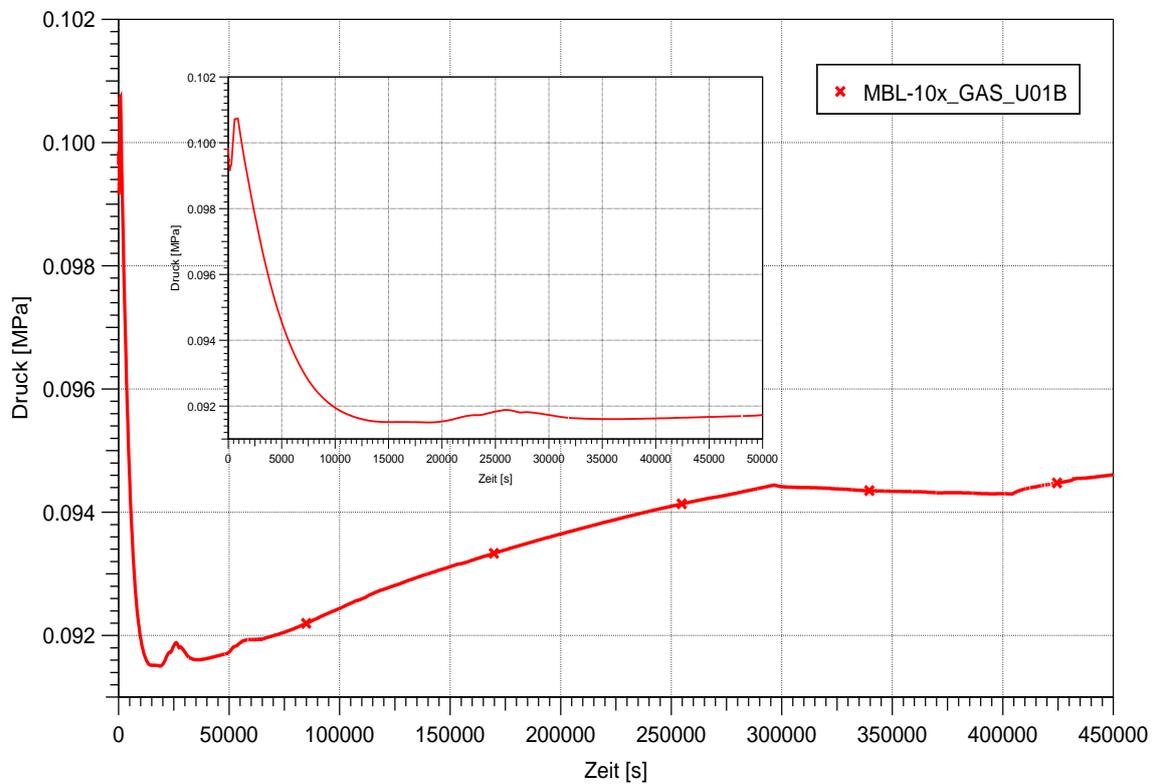


Abb. 5.17 Druckverlauf im Ringraum, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage

Der H₂-Konzentrationsverlauf in einigen ausgewählten Zonen des Ringspaltes ist in Abb. 5.18 dargestellt. Wie die Abbildung zeigt, bildet sich im Basisfall mit 10-facher Auslegungsleckage eine Gasschichtung durch den Betrieb der RR-Störfallabsaugung aus. Die H₂-Konzentration steigt langfristig in den Ringraumbereichen oberhalb des Leckortes an. Die RR-Störfallabsaugung saugt Atmosphäre aus der Umgebung durch die Leckage am Tor zum Hilfsanlagegebäude (Zone U71) an. Von dort zieht die Luft in den unteren Bereich des Ringraums (6-m-Ebene) herein. Dies führt zur Verringerung der Wasserstoffkonzentration im unteren Ringraum.

Durch den Einsatz der RR-Störfallabsaugung entstehen drei Gaskonzentrationsbereiche, die bei dem Basisfall mit 10-facher Auslegungsleckage deutlich zu unterscheiden sind.

- Hohe H₂-Konzentrationen (ca. 5 Vol.-%) oberhalb des Leckortes (Ebene: 16 m – 41 m)
- Mittlere H₂-Konzentrationen (ca. 2 Vol.-%) im Bereich des Leckortes (Ebene: 12 m)
- Sehr niedrige H₂-Konzentrationen (< 0,1 Vol.-%) im unteren Bereich des Ringraums (unterhalb 6 m)

Der Abbildung lässt sich entnehmen, dass es bei 10-facher Auslegungsleckage zur Ausbildung brennbarer Gemische im oberen Bereich des Ringraums kommt, obwohl etwas mehr Dampf in den RR eingetragen wird. Für diesen Bereich zeigt das Dreistoffdiagramm (Abb. 5.19) eindeutig die Tendenz zunehmender Anteile von Wasserstoff, so dass z. B. in den RR-Räumen auf 21,5-m-Ebene (Zone U22A) bei diesem Ablauf bereits innerhalb von 84 h brennbare Zustände auftreten. Das liegt daran, dass die Wirksamkeit der RR-Störfallabsaugung unzureichend ist, um die Ausbildung brennbarer Gasgemische im oberen RR-Bereich zu verhindern.

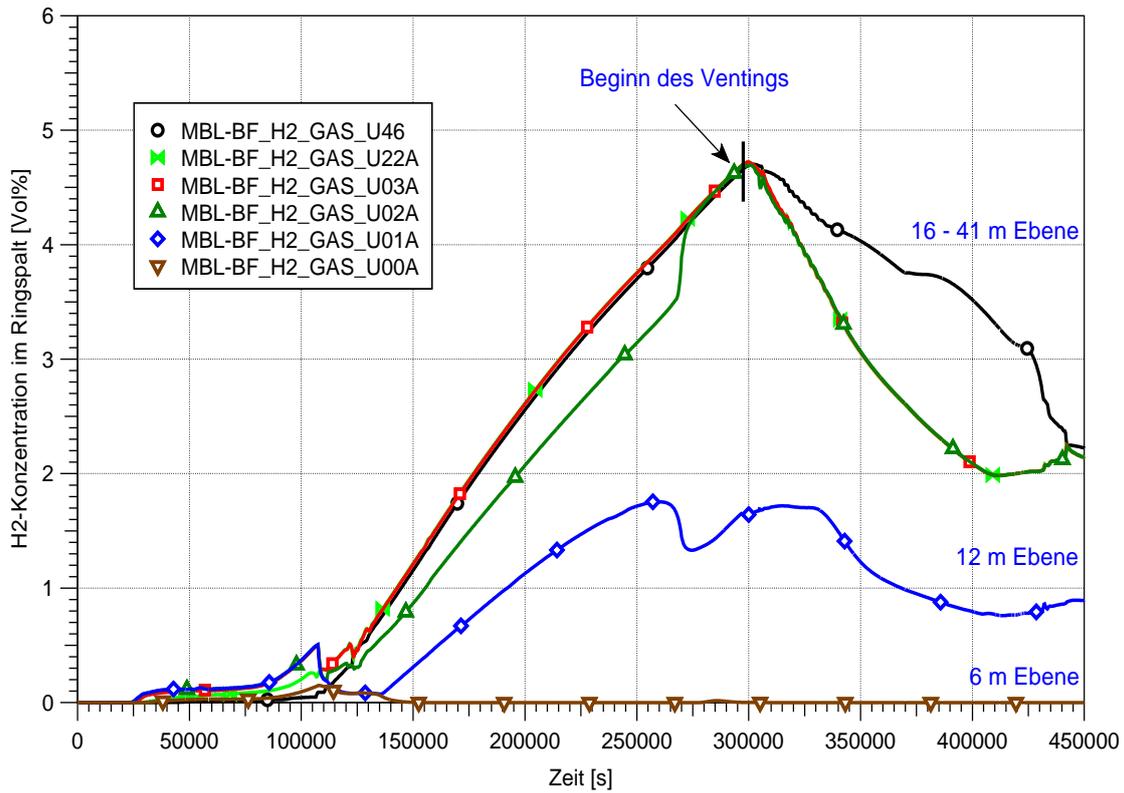


Abb. 5.18 H₂-Konzentration im RR-Ringspalt, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage

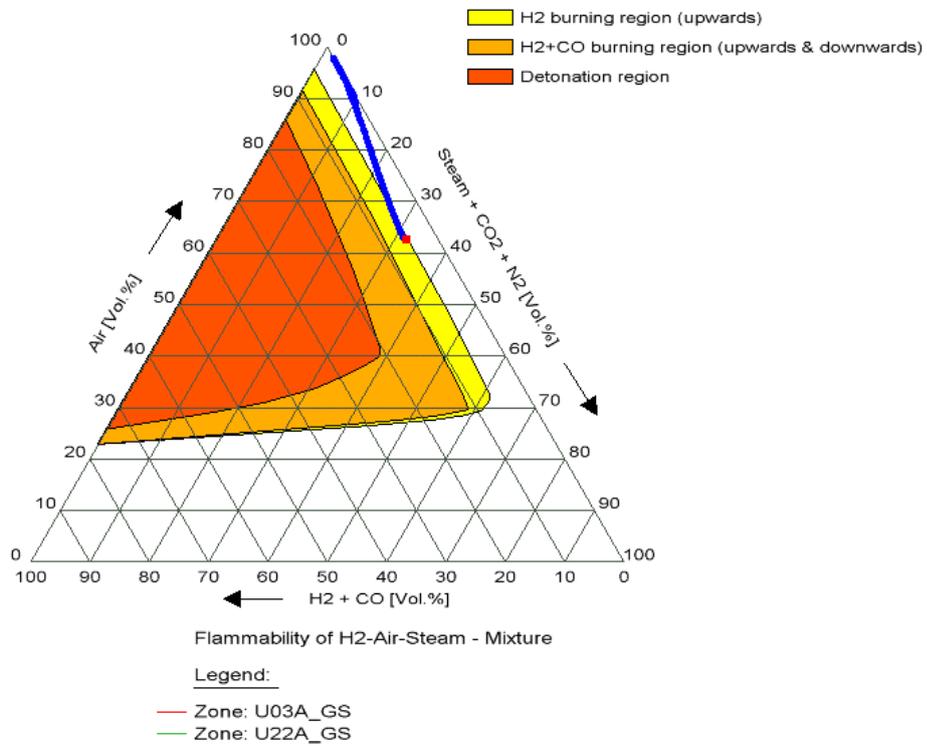


Abb. 5.19 Zustände in einzelnen Zonen des Ringspaltes, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage

Die H₂-Konzentrationen in separaten RR-Räumen in Umfangsrichtung (z. B. Zone U74A) sowie auf fünf verschiedenen Ebenen entlang der Höhe des Ringraums sind in Abb. 5.20 dargestellt. Der Anstieg der H₂-Konzentration in einigen der RR-Räume (z. B. Zone U74A) wird durch das Schließen der Brandschutztüren frühzeitig verhindert. Damit kommt es zu keiner Ausbildung brennbarer Gasgemische in den dargestellten RR-Räumen auf 18-m-Ebene. In Abb. 5.21 ist das Dreistoffdiagramm für die Zone U74A auf 18-m-Ebene dargestellt.

Wie aus der Abb. 5.22 zu erkennen ist, steigt die H₂-Konzentration in anderen RR-Räumen auf 18-m-Ebene (Zone U74B) bis auf ca. 5 Vol.-% an. In diesen Räumen befinden sich die Durchführungen der Speisewasserleitungen. Die RR-Räume sind durch eine offene atmosphärische Verbindung mit dem Ringspalt verbunden. So kann der Wasserstoff aus dem Ringspalt in die einzelnen RR-Räume gelangen. Damit kommt es zur Ausbildung brennbarer Gasgemische in den genannten Räumen des oberen RR-Bereichs. In Abb. 5.23 ist beispielsweise das Dreistoffdiagramm für die Zone U74B auf 18-m-Ebene dargestellt.

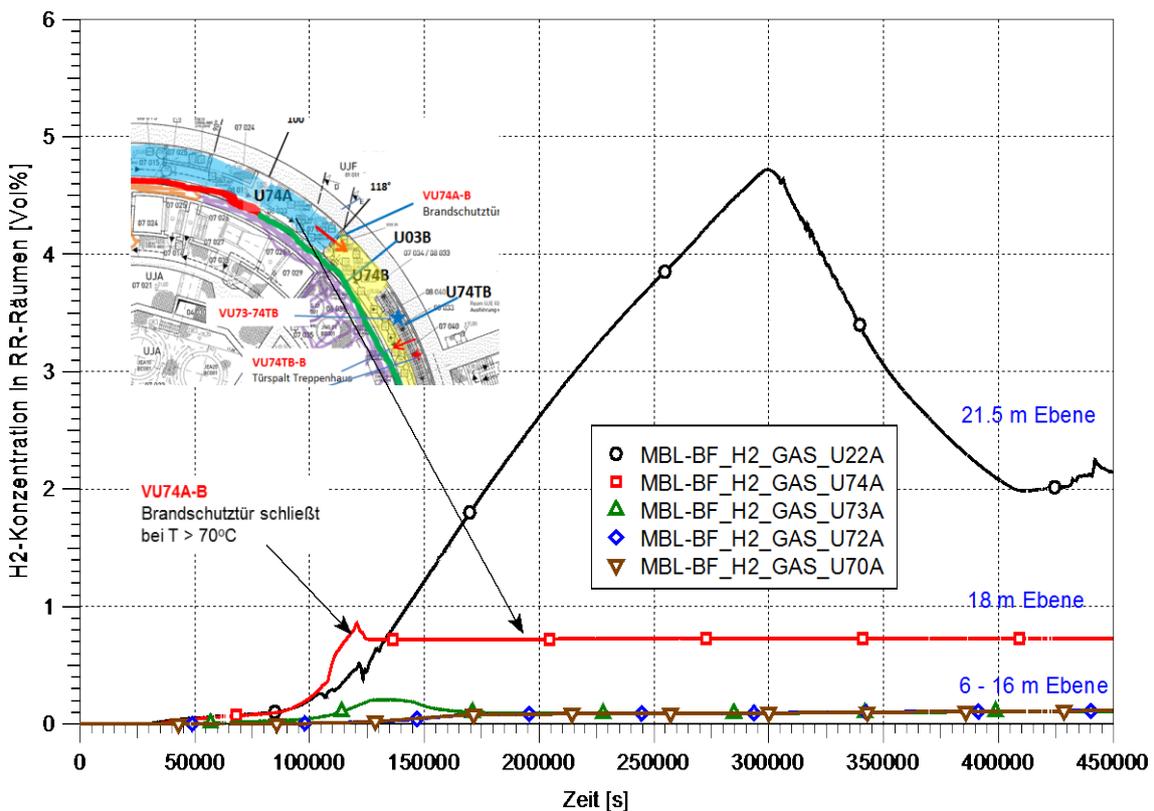


Abb. 5.20 H₂-Konzentration in separaten RR-Räumen (Zonen U7*A), MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage

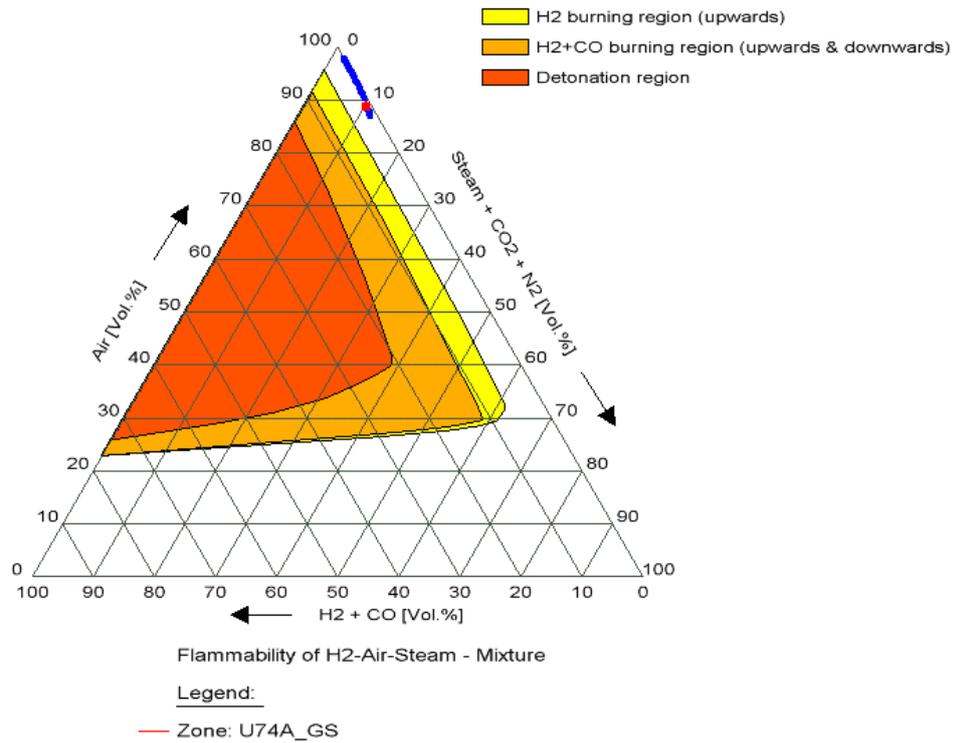


Abb. 5.21 Zustände in separaten RR-Räumen (Zonen U7*A), MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage

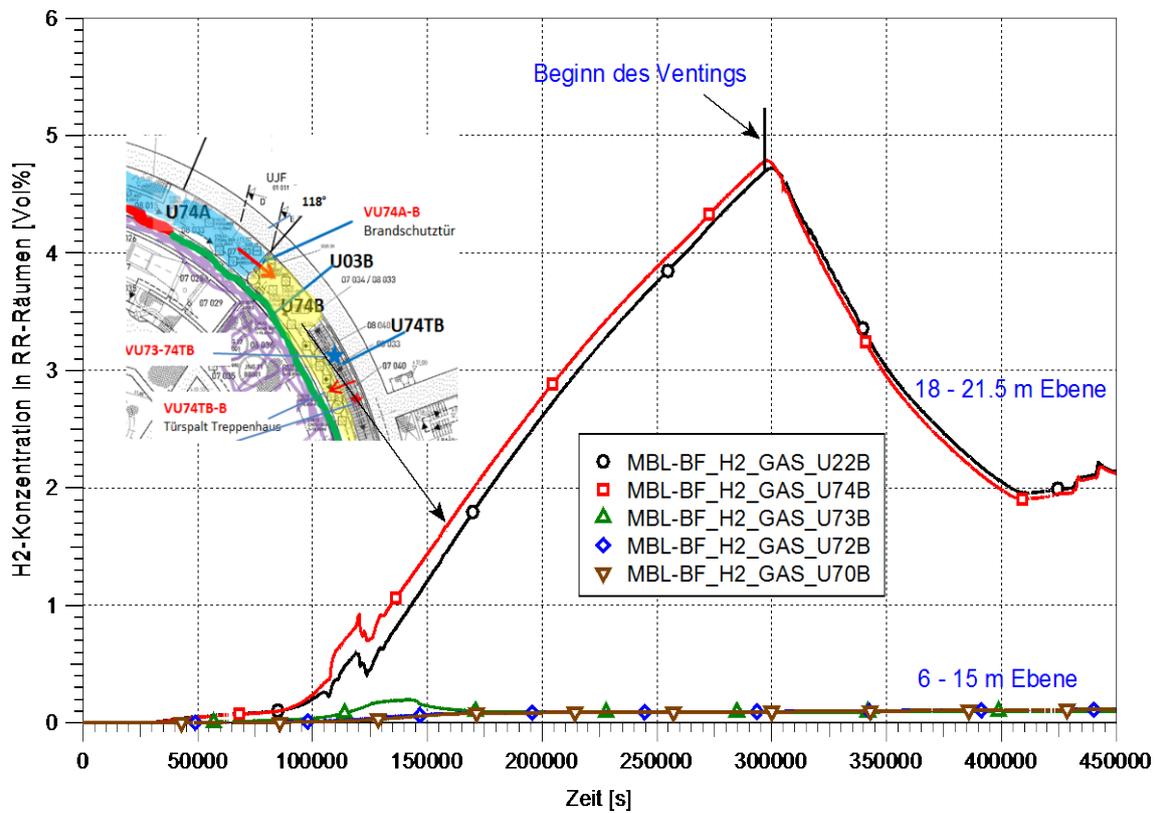


Abb. 5.22 H₂-Konzentration in separaten RR-Räumen (Zonen U7*B), MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage

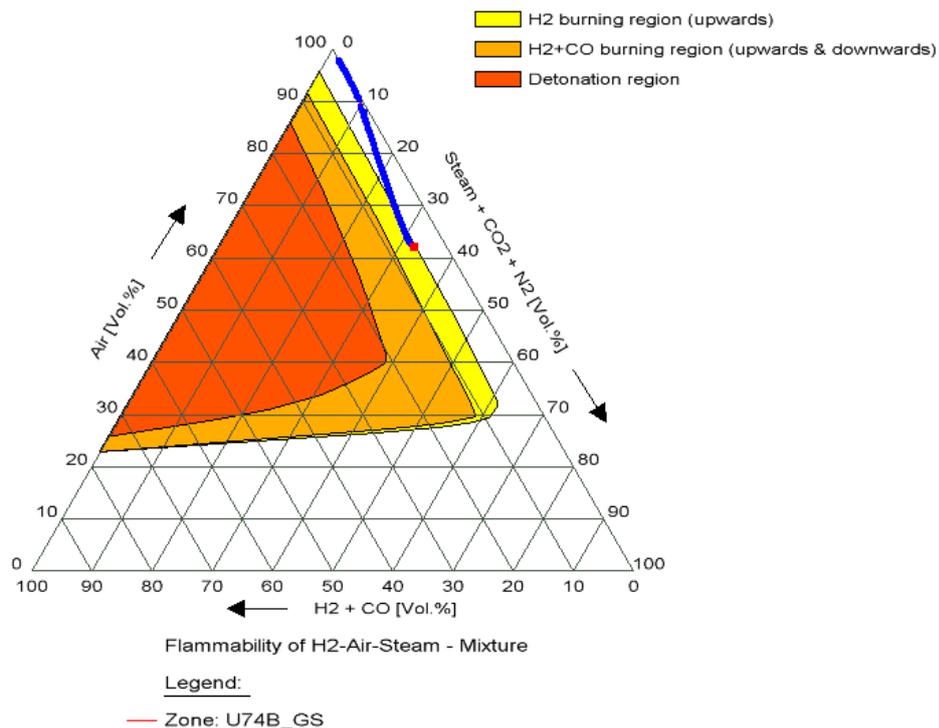


Abb. 5.23 Zustände in separaten RR-Räumen (Zonen U7*B), MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage

In Abb. 5.24 sind die Temperaturen in einigen ausgewählten Zonen des Ringspaltes auf 5 verschiedenen Ebenen dargestellt. Wie im Basisfall, bildet sich im SHB und analog im Ringraum eine höhenabhängige Temperaturschichtung, da ein großer Teil der Energie aus dem SBH über die SHB-Stahlschale in den Ringraum übertragen wird. Im Fall mit 10-facher Auslegungsleckage ändern sich die Temperaturen der Atmosphäre im Ringspalt verglichen mit dem Basisfall mit Auslegungsleckage nur geringfügig. Beispielsweise steigt die Atmosphärentemperatur in der obersten Zone des Ringraums (Zone U46) bis zum Beginn der Druckentlastung auch bis auf etwa 140 °C, wie im Basisfall mit Auslegungsleckage.

Der Fall mit 10-facher Auslegungsleckage führt (wie zu erwarten) zu einer höheren Aerosolkonzentration im Ringraum vor allem in der frühen Unfallphase mit großen Freisetzungen aus dem Primärkreis während des Kernschmelzens ab ~25 000 s sowie nach Beginn der Schmelze-Beton-Wechselwirkung ab ~32 000 s (Abb. 5.25). Im Vergleich zum MBL-Basisfall mit Auslegungsleckage wird eine um ca. Faktor 10 größere Aerosolmenge in den Ringraum freigesetzt. Die maximale Masse luftgetragener Aerosole im Ringraum beträgt ca. 0,0063 % (100 g, Abb. 5.27) aller in den SHB freigesetzten Aerosole, wobei wiederum parallel dazu die RR-Störfallabsaugung läuft.

Die Ablagerung der Aerosole im Ringraum ist wie im MBL-Basisfall gering; die Gründe wurden bereits diskutiert. Die höhere Masse luftgetragener Aerosole im Ringraum hat eine höhere Beladung der Störfallfilter der RR-Störfallabsaugung zur Folge. In Abb. 5.26 ist die im Störfallfilter abgelagerte Gesamtaerosolmasse für die Fälle mit SHB-Auslegungsleckage und 10-facher Auslegungsleckage miteinander verglichen. Die Abbildung zeigt, dass im Fall mit 10-facher Auslegungsleckage die Gesamtaerosolmasse auf dem Filter um den Faktor 10 höher ist als im Basisfall mit Auslegungsleckage.

Die Freisetzung von Aerosolen durch die gefilterte SHB-Druckentlastung ist in der gleichen Größenordnung wie im MBL-Basisfall mit Auslegungsleckage. Bis zum Ende der Rechnung werden insgesamt 0,000063 % (ca. 1 g) aus dem SHB über die Druckentlastung freigesetzt (Abb. 5.27). Die höhere SHB-Leckage bewirkt auch eine Erhöhung der Xe-Konzentration im Ringraum im Vergleich zum Basisfall mit Auslegungsleckage. Abb. 5.28 stellt den zeitlichen Verlauf der Xe-Konzentration im Ringspalt im Vergleich beider Fälle dar. Im Gegensatz zu den Aerosolen werden die Edelgase in keinem Filter zurückgehalten und langfristig aus dem RR über die RR-Störfallabsaugung sowie auch aus dem SHB durch das Venting in die Umgebung freigesetzt.

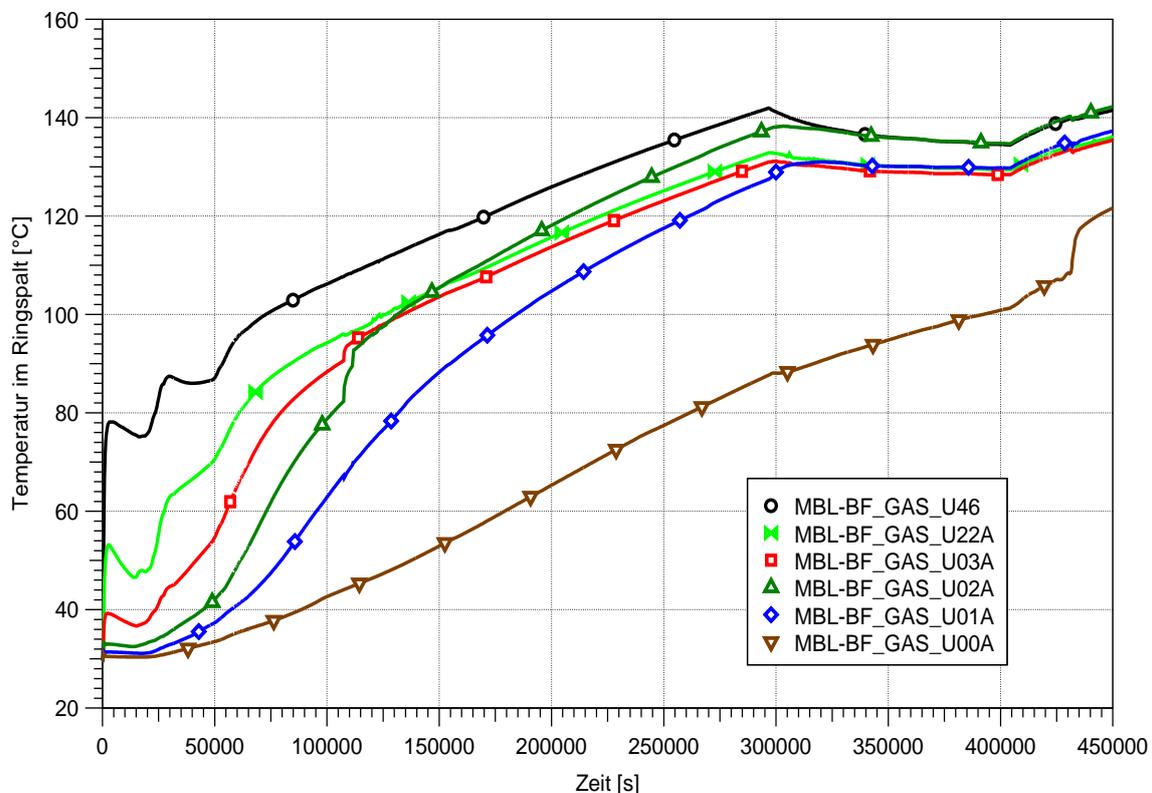


Abb. 5.24 Temperaturen der Atmosphäre im Ringspalt, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage

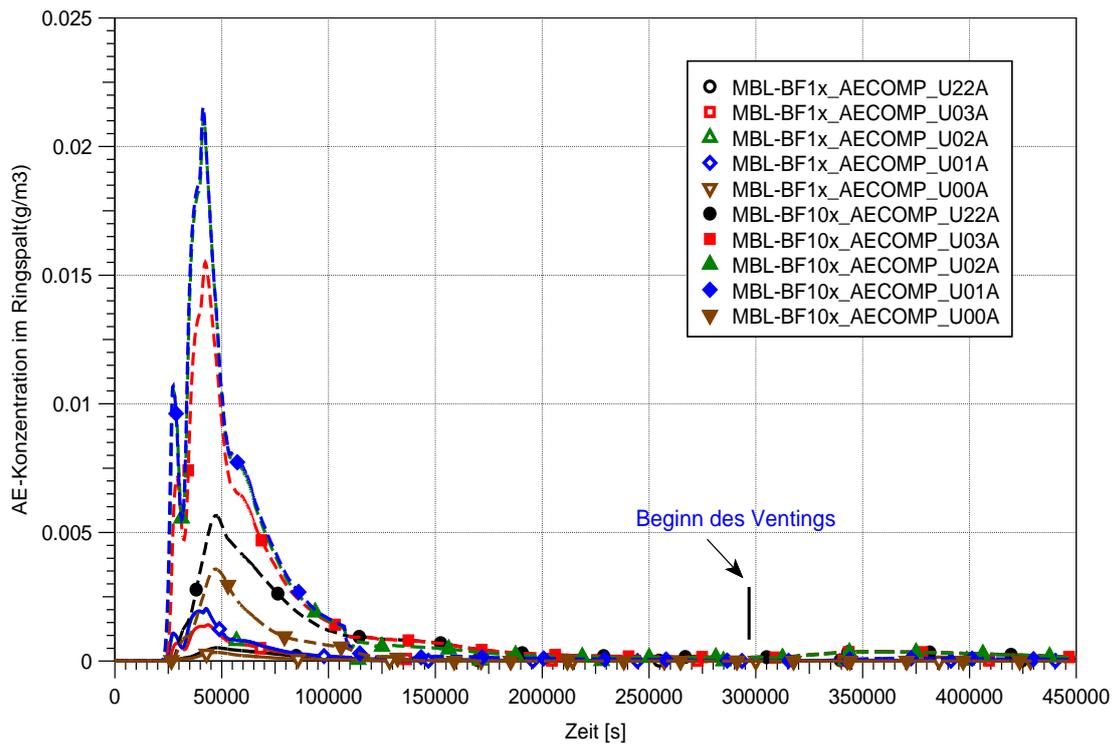


Abb. 5.25 Aerosol-Konzentration in ausgewählten Zonen des Ringspaltes, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage (ausgefüllte Marker) im Vergleich zum Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage (offene Marker)

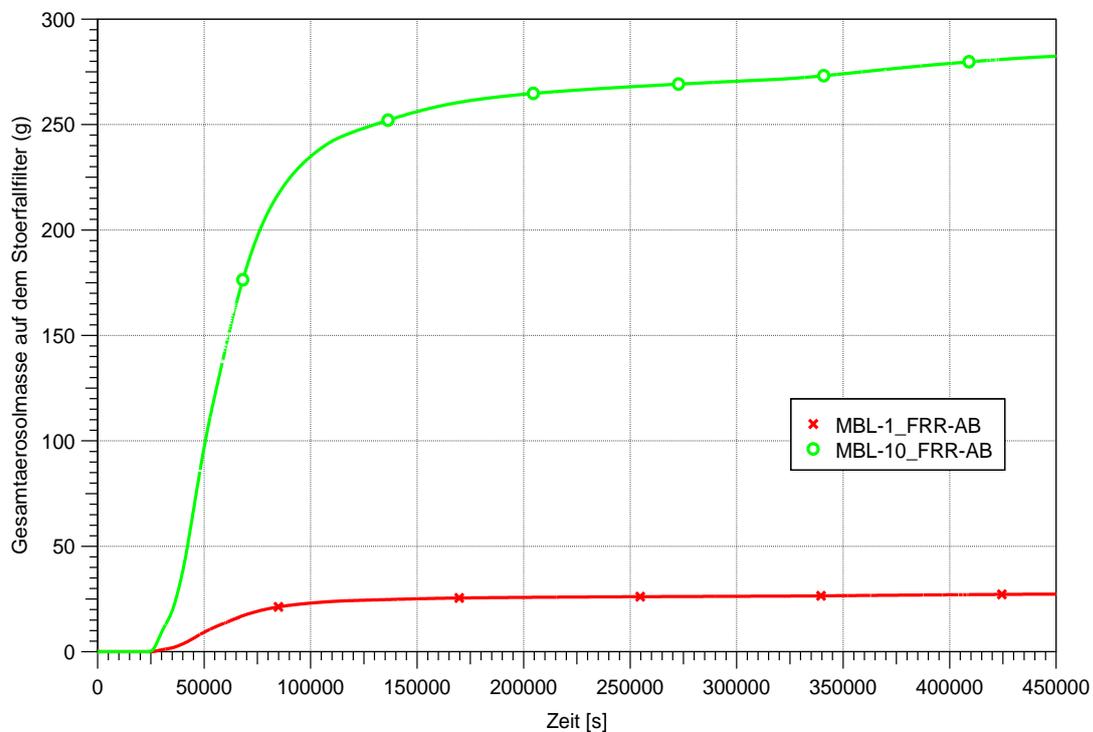


Abb. 5.26 Aerosolmasse im Störfallfilter der RR-Störfallabsaugung, Vergleich MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage (grün) und Fall mit SHB-Auslegungsleckage (rot)

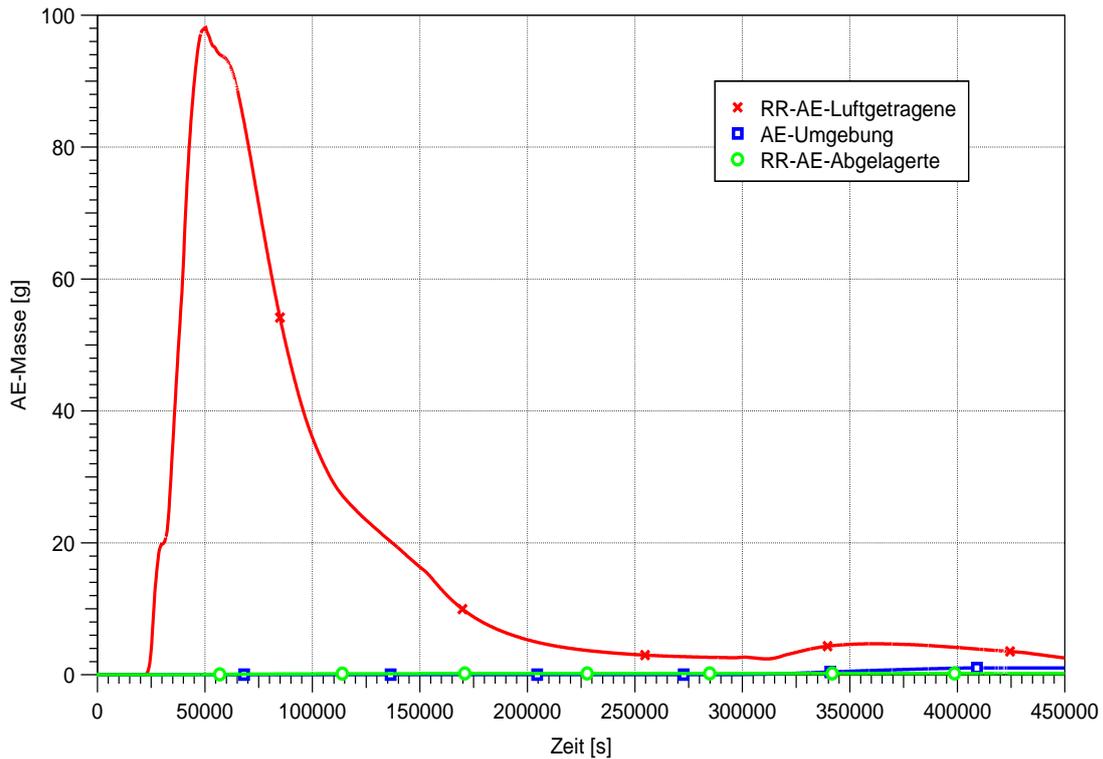


Abb. 5.27 Masse luftgetragener und abgelagerter Aerosole im RR und aus dem SHB freigesetzte Aerosole, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage

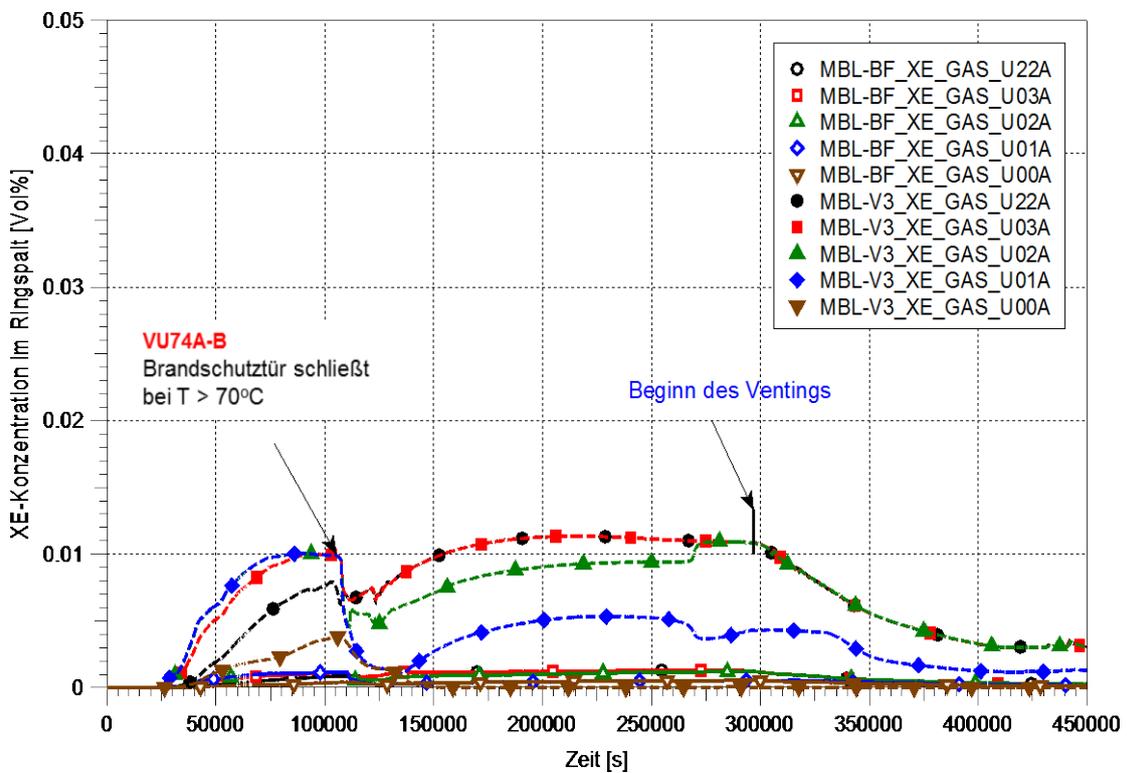


Abb. 5.28 Xe-Konzentration in ausgewählten Zonen des Ringspaltes, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage (ausgefüllte Marker) im Vergleich zum Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage (offene Marker)

5.1.3 MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Variation des Ortes der SHB-Leckage

Der nächste Aspekt bezieht sich auf die Variation des Ortes der SHB-Leckage im Bereich der Kabeldurchführungen auf der Ebene 12 – 15 m. In den bisher gerechneten Varianten wurde die Leckage aus dem SHB immer am „ungünstigsten“ Ort unterstellt, nämlich im Ringraum gegenüber der Absaugstelle der RR-Störfallabsaugung. Um den Einfluss des Leckortes zu untersuchen wurde die Leckage aus dem SHB zum Ringraum am vermeintlich günstigsten Ort unterstellt, d. h. der Leckort befindet sich jetzt in der Zone der Absaugstelle der RR-Störfallabsaugung. Druck und Temperatur im RR bleiben von dieser Änderung nahezu unbeeinflusst und werden hier nicht erneut verglichen.

In Abb. 5.29 sind die berechnete H_2 -Konzentration in ausgewählten Zonen des Ringspaltes für den Basisfall mit 10-facher Auslegungsleckage und die Variante mit Variation des Leckortes hin zum „günstigsten“ Ort dargestellt. Im Basisfall mit 10-facher Auslegungsleckage am ungünstigsten Leckort steigt die H_2 -Konzentration bis zum Beginn der Druckentlastung auf ca. 5 Vol.-%; dagegen bleibt die H_2 -Konzentration in der Variante mit 10-facher Auslegungsleckage am günstigsten Leckort unterhalb von 3 Vol.-%.

Wie aus der Abbildung ersichtlich, kommt es während des gesamten Unfallablaufs zu keiner Ausbildung brennbarer Gasgemische im Ringraum, da der im Leckort aus dem SHB eintretende Wasserstoff direkt von der RR-Störfallabsaugung abgesaugt wird. Durch die Variation des Leckortes ändert sich die Gasverteilung in Umfangsrichtung sowie auch die Gasschichtung auf verschiedenen Ebenen im Ringraum. Abb. 5.30 zeigt die H_2 -Konzentrationen in den Zonen des Ringspaltes in Umfangsrichtung auf 12-m-Ebene (U01*) für beide Fälle.

Aufgrund des geänderten Leckortes ergibt sich nachfolgend ein anderes Konvektionsverhalten im Ringspalt sowie auch in den RR-Räumen. Die Variation des Leckortes hat einen Einfluss auf die Größe der Konvektionsströmungen, wobei in den durchströmten Zonen des Ringraums die Strömungsrichtung sich nicht wesentlich ändert. Das zeigt, dass die RR-Störfallabsaugung einen dominierten Einfluss auf die Ausbildung der Konvektion im Ringraum hat.

In Abb. 5.31 sind die H_2 -Konzentrationen auf verschiedenen Ebenen entlang des Ringspaltes für beide Fälle miteinander verglichen. Wegen der geänderten Konvektionsströmung durch die öffnenden Verbindungen ergeben sich starke Unterschiede in den lokalen H_2 -Konzentrationen der Zonen auf verschiedenen Ebenen des Ringraums. In den oberen Zonen hinter den Versperrungen des Ringspaltes lässt sich im Vergleich zum Basisfall eine langsamere H_2 -Aufkonzentration beobachten, da die Konvektionsströmung durch die Verbindungen über den Ringspalt deutlich geringer ist; generell bleibt die Konzentration unter der unteren Verbrennungsgrenze von 4 Vol.-%.

In Abb. 5.32 sind die Aerosolkonzentrationen im Ringspalt für die beiden Fälle miteinander verglichen. Die erhöhte Effektivität der RR-Störfallabsaugung zeigt sich an niedrigeren luftgetragenen Konzentrationen, während die im Filter der RR-Störfallabsaugung abgelagerte Gesamtaerosolmasse für den MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage am „ungünstigsten Ort“ deutlich ansteigt (Abb. 5.33). Die Abbildung zeigt einen Anstieg um ca. den Faktor 4 für den Filter der RR-Störfallabsaugung mit Aerosolen.

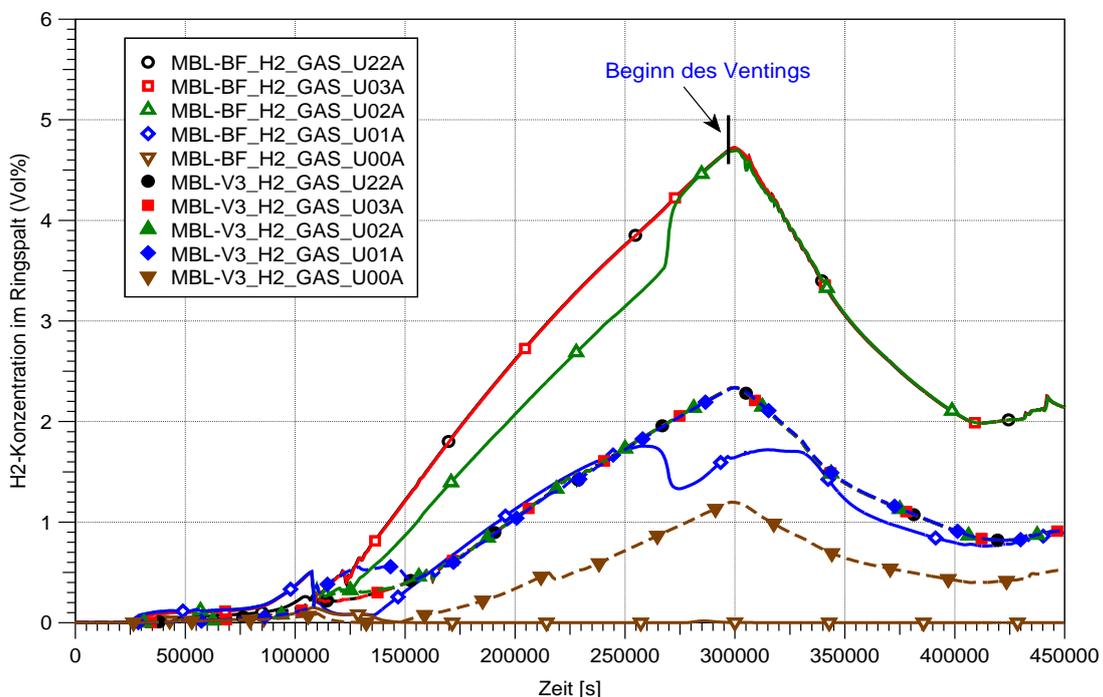


Abb. 5.29 H_2 -Konzentration in ausgewählten Zonen des Ringspaltes, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Leckage am „günstigsten Ort“ (ausgefüllte Marker) im Vergleich zum Fall mit Leckage am „ungünstigsten Ort“ (offene Marker)

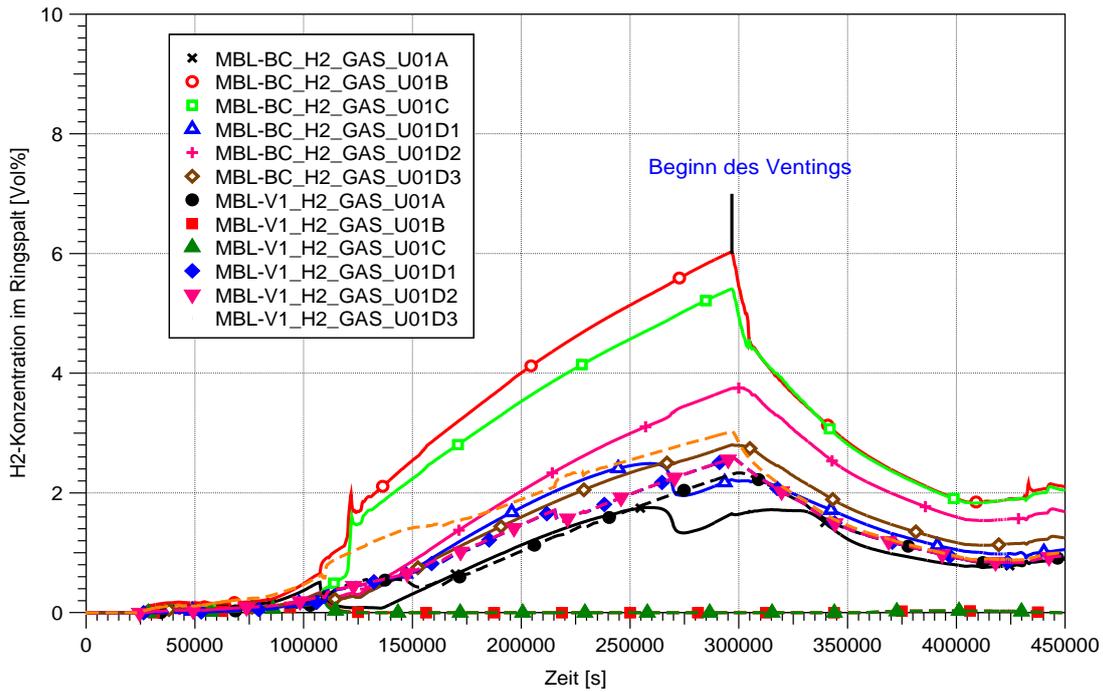


Abb. 5.30 H₂-Konzentration in ausgewählten Zonen (U01*) des Ringspaltes in Umfangsrichtung, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Leckage am „günstigsten Ort“ (ausgefüllte Marker) im Vergleich zum Fall mit Leckage am „ungünstigsten Ort“ (offene Marker)

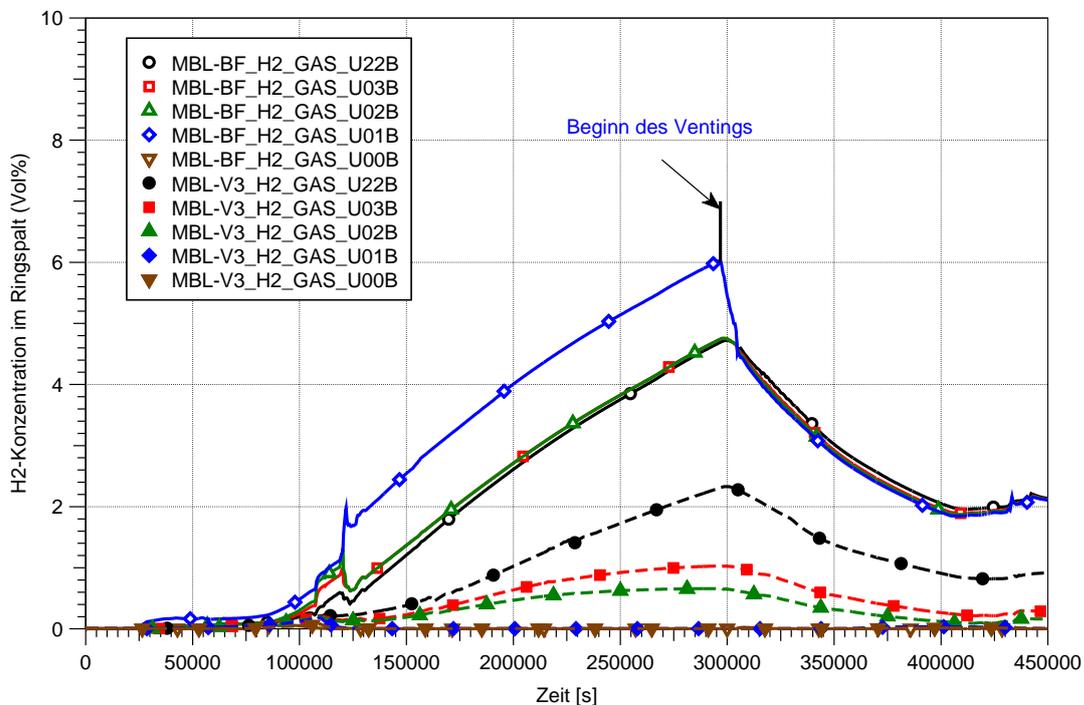


Abb. 5.31 H₂-Konzentration in ausgewählten Zonen (U01*) auf verschiedenen Ebenen des Ringspaltes, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage (ausgefüllte Marker) und Leckage am „günstigsten Ort“ im Vergleich zum Fall mit Leckage am „ungünstigsten Ort“ (offene Marker)

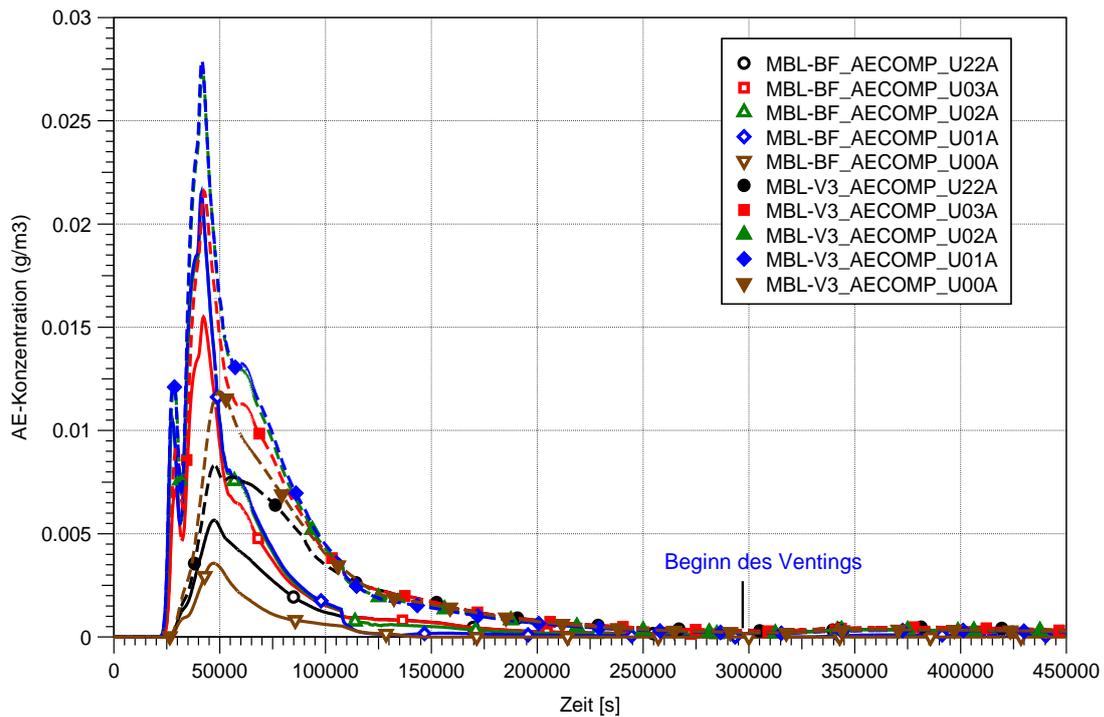


Abb. 5.32 Aerosol-Konzentration im Ringspalt, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage (ausgefüllte Marker) und Leckage am „günstigsten Ort“ im Vergleich zum Fall mit Leckage am „ungünstigsten Ort“ (offene Marker)

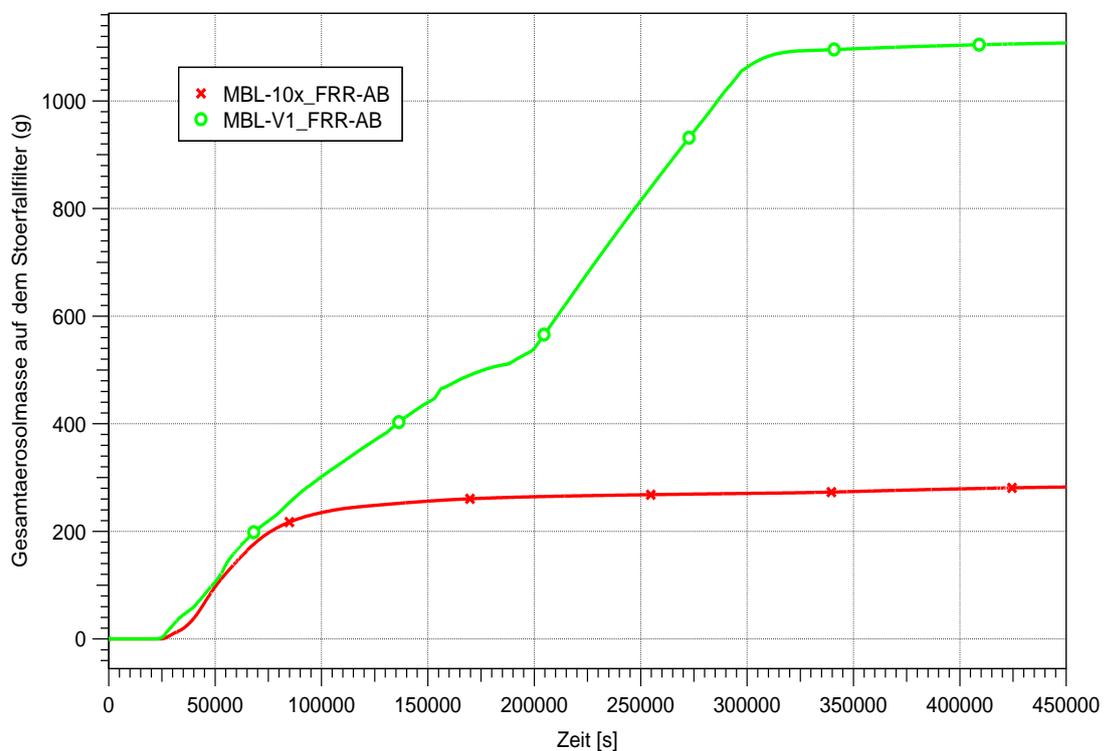


Abb. 5.33 Aerosolmasse im Filter der RR-Störfallabsaugung, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage am „günstigsten Ort“ (grün) im Vergleich zum Fall mit Leckage am „ungünstigsten Ort“ (rot)

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Änderungen des Leckortes hin zur Absaugstelle der RR-Störfallabsaugung deren Wirksamkeit potentiell erhöhen. Veränderungen der lokalen H₂-Konzentrationen im Ringraum als auch der Aerosolkonzentration hin zu niedrigeren Maximalwerten sind zu beobachten. Die Wirksamkeit der Absaugung wird erhöht und damit auch die Menge der im Filter zurückgehaltenen Aerosole. Langfristig bleibt hierbei die Tendenz zur Aufkonzentration der Gase im Ringraum erhalten, jedoch in diesem Fall mit maximalen H₂-Konzentrationen unterhalb von 4 Vol.-% (untere Verbrennungsgrenze).

5.1.4 MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Ausfall der RR-Störfallabsaugung

Die RR-Störfallabsauganlage ist ein aktives, notstromgesichertes Lüftungssystem, das aus 4 Ventilatoren und 2 Filterstrecken besteht. Die Auslegung der 4 Ventilatoren beträgt 4 x 50 % und der beiden Filterstrecken 2 x 100 %. Ein gleichzeitiger Ausfall aller Ventilatoren ist im Prinzip unwahrscheinlich. Sollte die RR-Störfallabsaugung trotzdem ausfallen, so könnte die Bedarfsfilteranlage in Kombination mit der RR-Abluft ihre Funktion übernehmen. Zunächst wurde zur Überprüfung des Einflusses der RR-Störfallabsaugung eine Variationsrechnung mit 10-facher Auslegungsleckage und zusätzlichem Ausfall der RR-Störfallabsaugung durchgeführt. Wegen des Ausfalls der RR-Störfallabsaugung entsteht ein bleibender Überdruck in Höhe von ca. 0,001 MPa im Ringraum (Abb. 5.34). Damit wird dann die Gasatmosphäre im Ringraum über die Leckagen am Tor in das HAG und weiter in die Umgebung ungefiltert freigesetzt, solange nicht die Bedarfsfilteranlage zum Einsatz kommt und einen Unterdruck im RR erzeugt. Eine Rückhaltung im HAG wurde hier nicht betrachtet.

Im Vergleich zum Fall mit laufender RR-Störfallabsaugung wird eine komplette Auflösung der Atmosphärenschichtung hinsichtlich der H₂-Konzentration im Ringraum beobachtet (siehe Abb. 5.35, Kurven mit ausgefüllten Markern). Aufgrund des Ausfalls der RR-Störfallabsaugung entweicht die ursprünglich vorhandene Luft aus dem unteren RR-Bereich (Ebenen auf 6 m) durch die angenommene Leckage am Tor (nur Spalte im Tor) in die Umgebung. Damit gelangt der Wasserstoff vom oberen RR-Bereich auch in den unteren RR-Bereich und die Gasschichtung im Ringraum löst sich schließlich auf. Trotz der Ausströmung über die definierten Leckagen am Tor zur Umgebung steigt die H₂-Konzentration im RR-Bereich rasch an.

In der Variationsrechnung mit Ausfall der RR-Störfallabsaugung treten im Vergleich zum Fall mit 10-facher Auslegungsleckage brennbare Zustände im Ringraum verstärkt auf. Die H₂-Konzentration steigt bis zum Zeitpunkt der Druckentlastung bis auf 8 Vol.-%, was die Grenze der abwärts gerichteten Verbrennung von Wasserstoff ist (siehe Abb. 5.35). Verbrennungsvorgänge wurden in allen Analysen nicht simuliert.

Abb. 5.36 und Abb. 5.37 zeigen den zeitlichen H₂-Konzentrationsverlauf in ausgewählten RR-Räumen auf fünf verschiedenen Ebenen entlang der Höhe des Ringraums. Die Ausbildung brennbarer Gasgemische in einigen RR-Räumen (z. B. Zone U74A) auf 18-m-Ebene wird durch das Schließen einzelner Brandschutztüren (VU74A-B) frühzeitig im Unfallablauf verhindert (siehe Abb. 5.36). Dagegen treten in anderen RR-Räumen (z. B. Zone U74B) auf der gleichen Ebene brennbare Zustände auf (siehe Abb. 5.37). Abb. 5.38 zeigt das Dreistoffdiagramm für zwei verschiedene RR-Räume (Zone U74B, U74C) auf 18-m-Ebene. Wie in den Abbildungen zu sehen ist, werden in den RR-Räumen oberhalb von 21,5 m (z. B. Zone U22A) H₂-Konzentrationen bis auf 8 Vol.-% erreicht.

Der Temperaturverlauf der Variationsrechnung mit Ausfall der RR-Störfallabsaugung ist sehr ähnlich dem Basisfall mit 10-facher Auslegungsleckage und Betrieb der RR-Störfallabsaugung. Die Ergebnisse (Abb. 5.39) zeigen die gleiche Tendenz, d. h. hohe Temperaturen im oberen Bereich des RR, die nach unten hin abnehmen.

Die Variante mit 10-facher Auslegungsleckage und Ausfall der RR-Störfallabsaugung führt zu noch höheren Aerosolkonzentrationen im Ringraum im Vergleich zum Basisfall mit 10-facher Auslegungsleckage und laufender RR-Störfallabsaugung (Abb. 5.40). Die maximale Masse luftgetragener Aerosole im Ringraum beträgt ca. 0,0125 % (ca. 200 g) aller in den SHB freigesetzten Aerosole (siehe Abb. 5.41), da die RR-Störfallabsaugung ausgefallen ist. Die großen Mengen des Aerosols, die aus dem Sicherheitsbehälter in den Ringraum freigesetzt werden, werden bis zum Beginn der SHB-Druckentlastung fast vollständig abgelagert.

Im Vergleich zum MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage wird infolge des unterstellten Ausfalls der RR-Störfallabsaugung eine wesentlich größere Aerosolmenge ungefiltert durch die Leckage am Tor des HAG direkt in die Umgebung freigesetzt. Die Aerosolfreisetzung in die Umgebung liegt um den Faktor 30 höher (Abb. 5.42), als in der Variante mit 10-facher Auslegungsleckage und Betrieb der RR-Störfallabsaugung

Die Nutzung der Bedarfsfilteranlage im Zusammenhang mit der RR-Abluft kann dies reduzieren, wobei das davon abhängt, wann diese in Betrieb genommen wird.

Die Variante mit 10-facher Auslegungsleckage und Ausfall der RR-Störfallabsaugung zeigt auch noch höhere Xe-Konzentration im Ringraum als im MBL-Fall mit Betrieb der RR-Störfallabsaugung (Abb. 5.43). Wie bereits erwähnt, werden Edelgase von keinem Filter zurückgehalten und in diesem Fall aus dem RR über die Leckage am Tor des HAG in die Umgebung freigesetzt sowie unabhängig davon aus dem SHB durch das Venting.

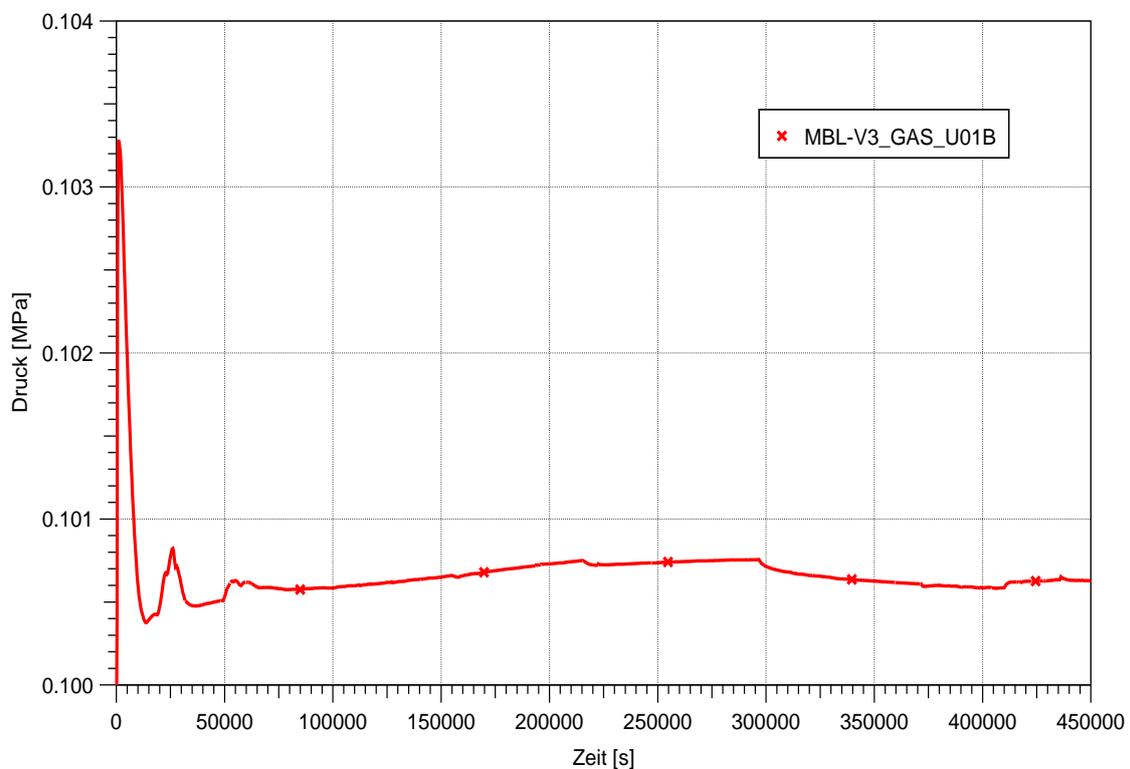


Abb. 5.34 Druckverlauf im Ringraum, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Ausfall der RR-Störfallabsaugung

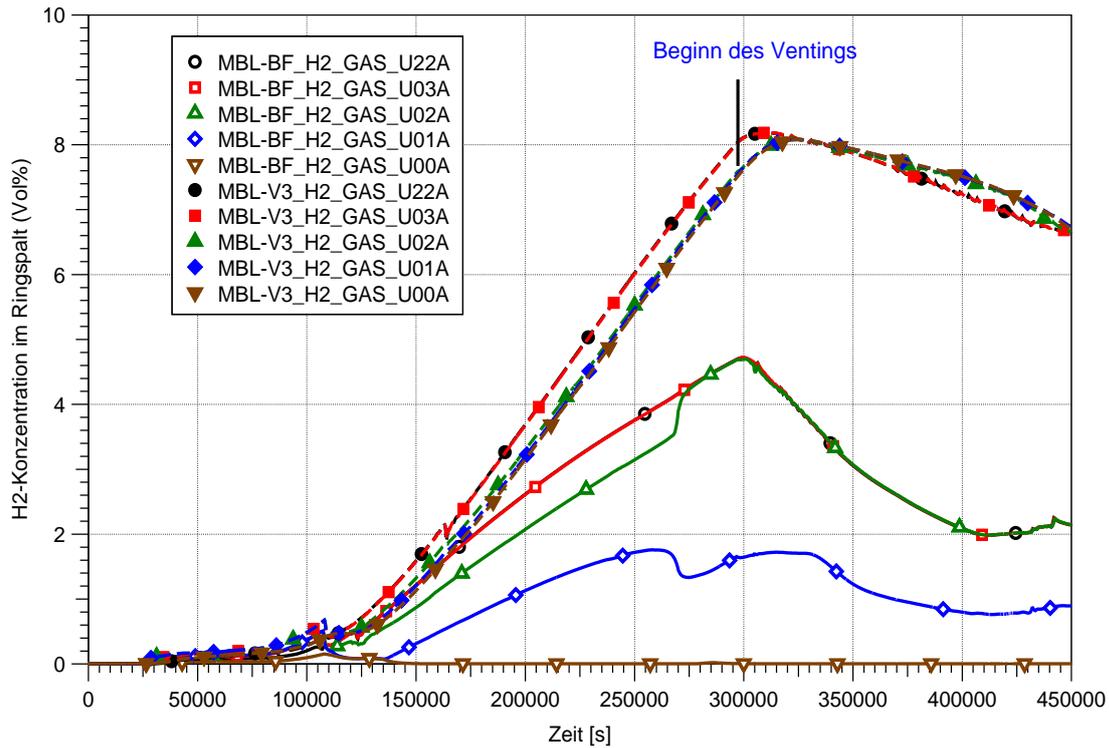


Abb. 5.35 H₂-Konzentration im Ringspalt, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage mit Ausfall der RR-Störfallabsaugung (ausgefüllte Marker) im Vergleich zum Fall mit laufender RR-Störfallabsaugung (offene Marker)

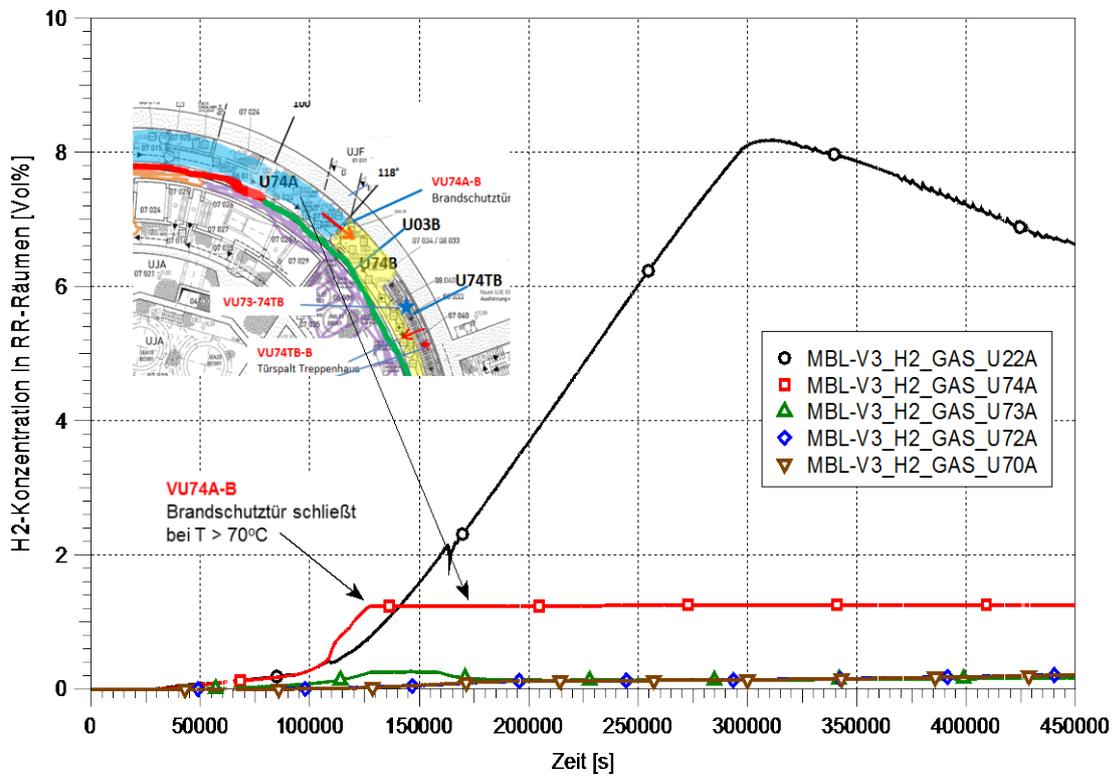


Abb. 5.36 H₂-Konzentration in separaten RR-Räumen (Zonen U7*A), MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Ausfall der RR-Störfallabsaugung

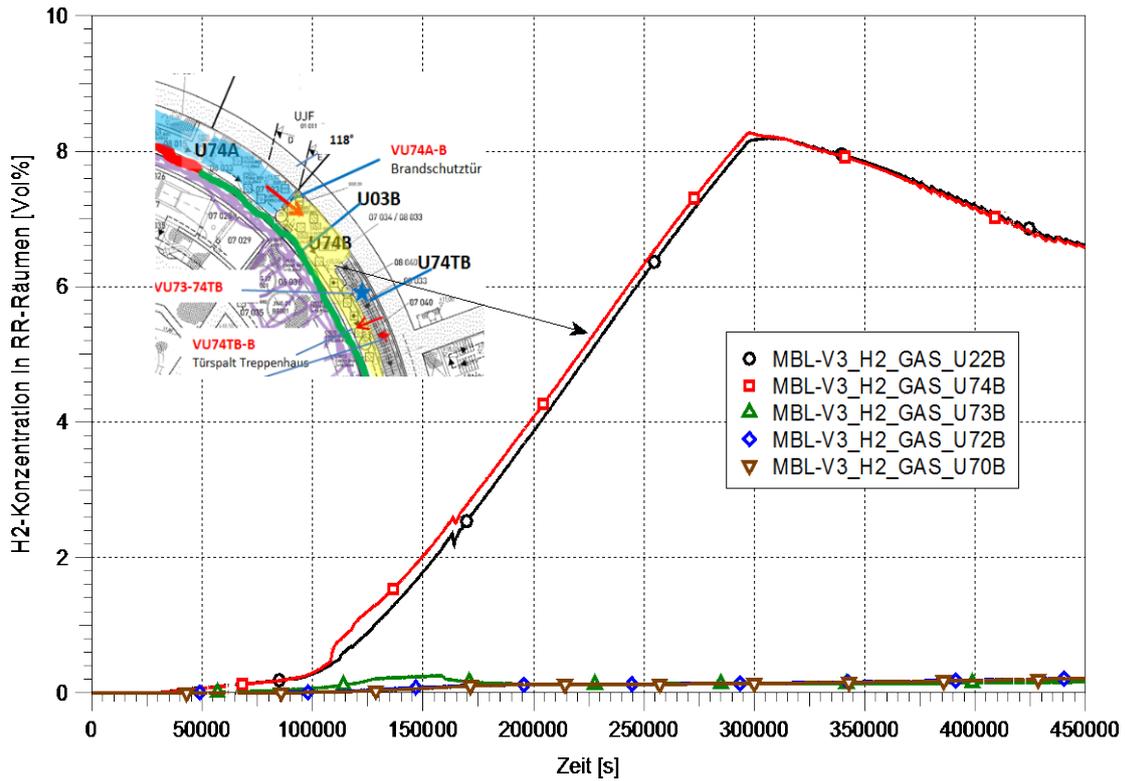


Abb. 5.37 H₂-Konzentration in separaten RR-Räumen (Zonen U7*B), MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Ausfall der RR-Störfallabsaugung

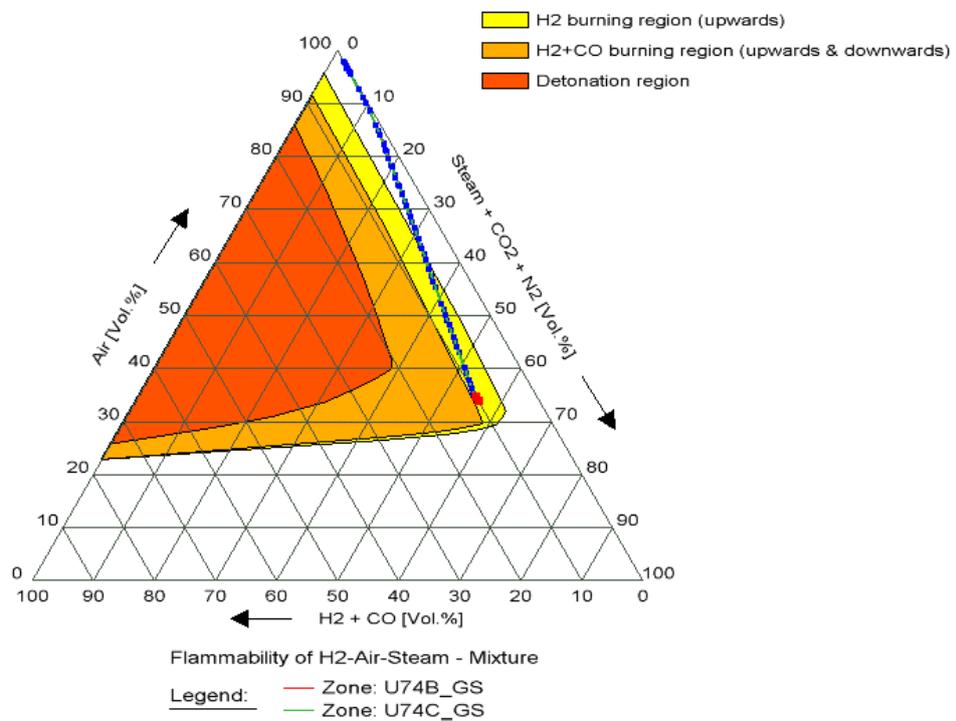


Abb. 5.38 Zustände in separaten RR-Räumen (Zone U74B, U74C,), MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Ausfall der RR-Störfallabsaugung

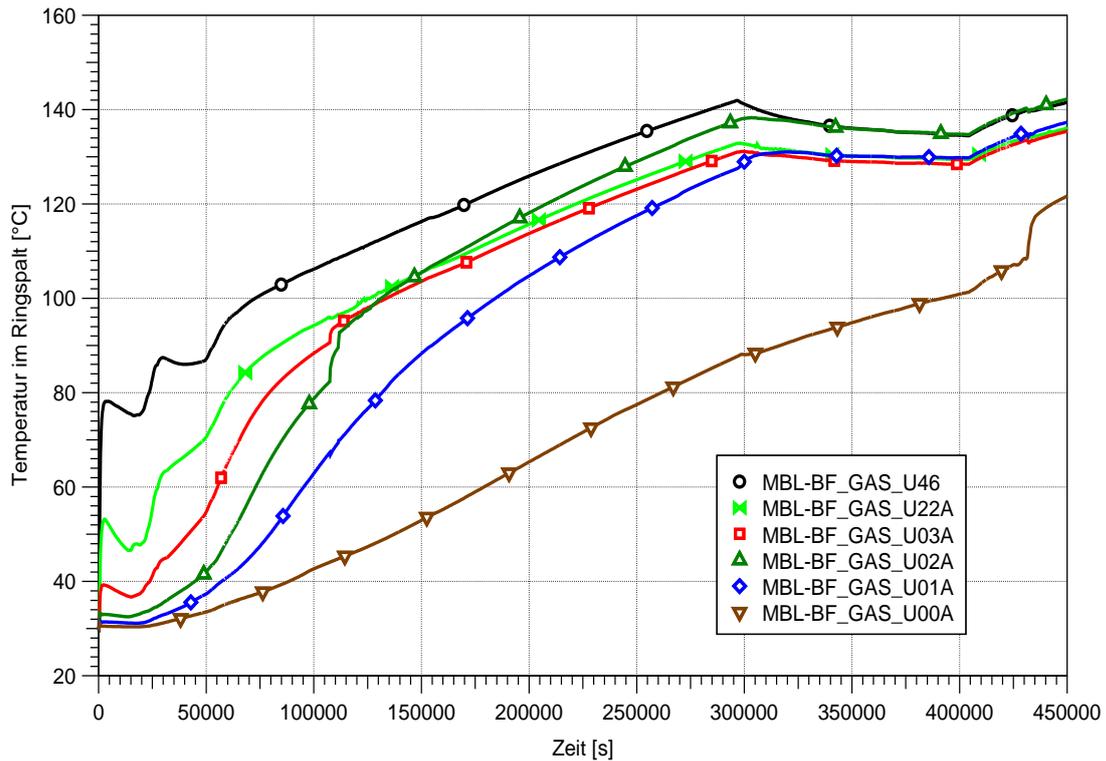


Abb. 5.39 Temperaturen der Atmosphäre im Ringspalt, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Ausfall der RR-Störfallabsaugung

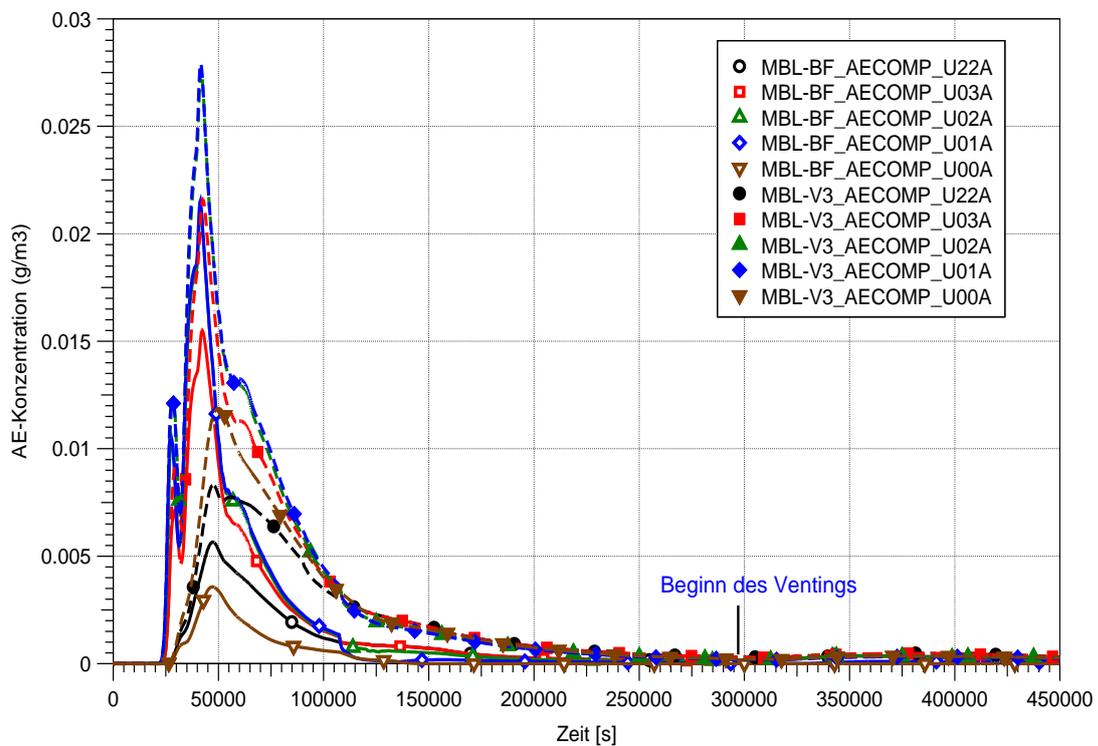


Abb. 5.40 Aerosol-Konzentration im Ringspalt, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage mit Ausfall der RR-Störfallabsaugung (ausgefüllte Marker) im Vergleich zum Fall mit laufender RR-Störfallabsaugung (offene Marker)

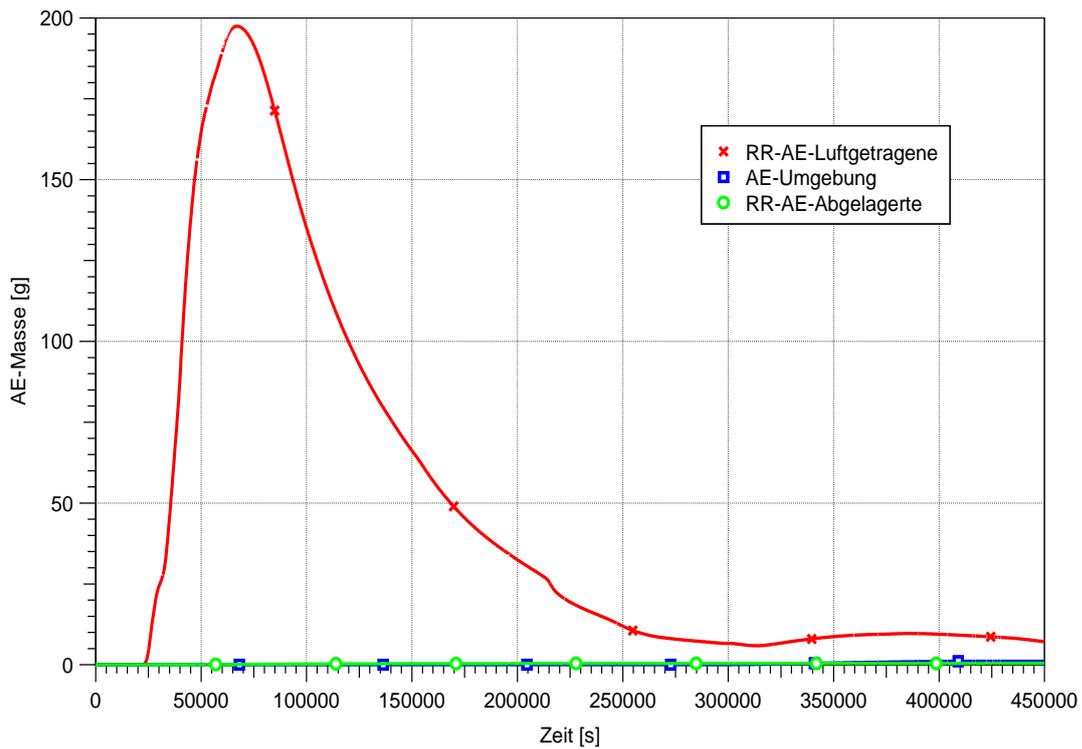


Abb. 5.41 Masse luftgetragener und abgelagerter Aerosole im RR und aus dem SHB über die Druckentlastung freigesetzter Aerosole, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Ausfall der RR-Störfallabsaugung

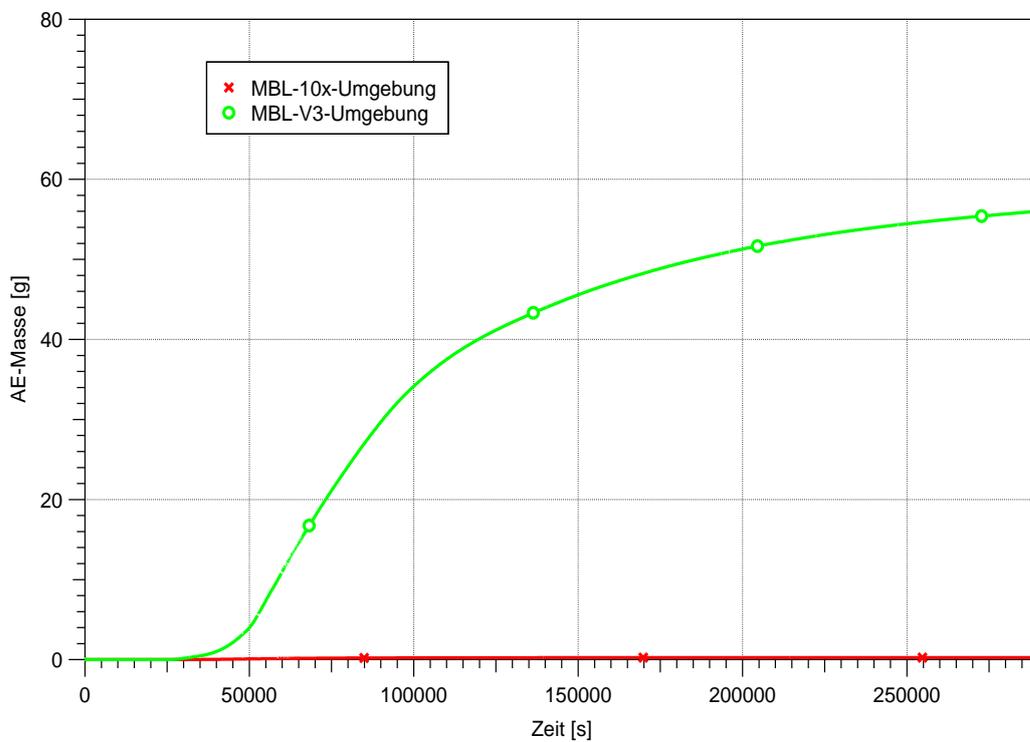


Abb. 5.42 Masse aus dem RR in die Umgebung freigesetzter Aerosole, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage mit Ausfall der RR-Störfallabsaugung (grün) im Vergleich zum Fall mit laufender RR-Störfallabsaugung (rot)

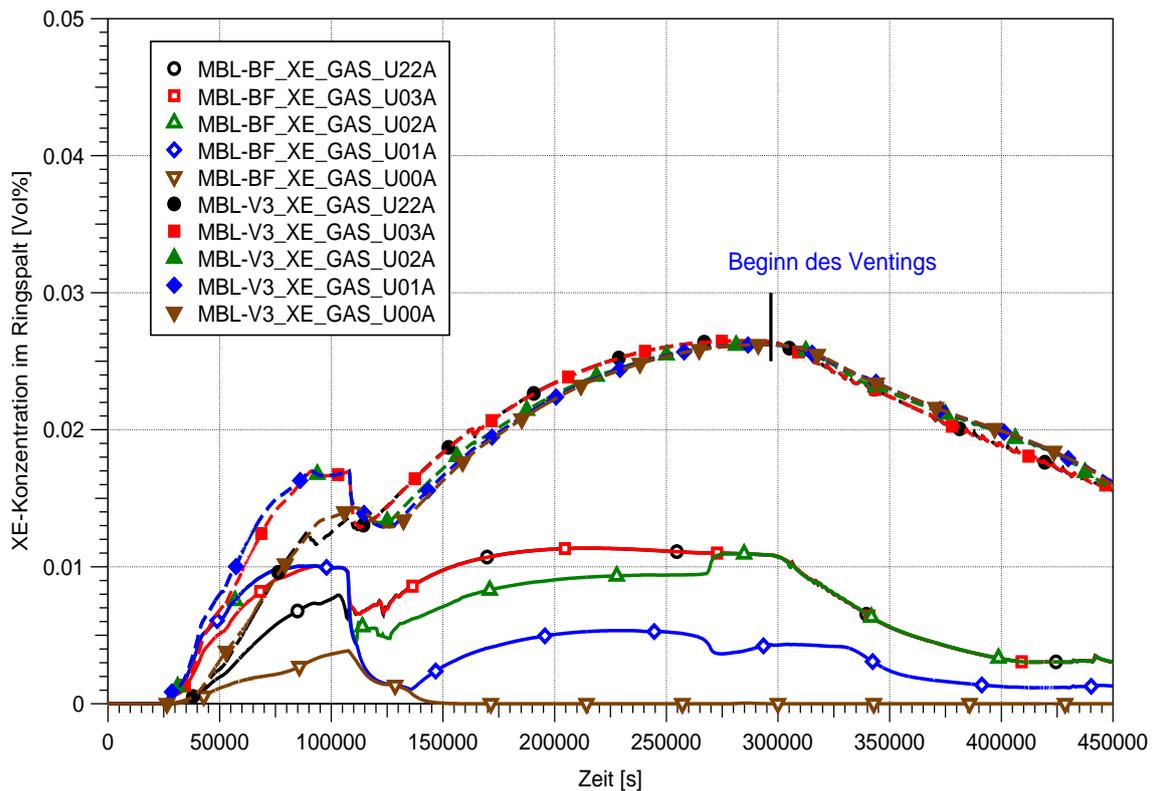


Abb. 5.43 Xe-Konzentration in ausgewählten Zonen des Ringspaltes, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage mit Ausfall der RR-Störfallabsaugung (ausgefüllte Marker) im Vergleich zum Fall mit laufender RR-Störfallabsaugung (offene Marker)

5.2 MBL-Fall – Variantenrechnungen mit Notfallmaßnahmen

5.2.1 MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage mit Ausfall der RR-Störfallabsaugung und Einsatz von Zu-/Abluftanlagen im RR gemäß HMN

Wie bereits in Kap. 2.3 aufgeführt, ist im HMN der Referenzanlage eine rechtzeitige Zuschaltung der Zu-/Abluftanlagen im Ringraum zur Begrenzung des Anstiegs der H_2 -Konzentration als Notfallmaßnahme vorgesehen. Die Wirksamkeit dieser neu entwickelten Maßnahmen des mitigativen Notfallschutzes wurde hinsichtlich der Zustände im Ringraum bei erhöhten Leckagen aus dem SHB analysiert. Um die Wirksamkeit dieser Notfallmaßnahme zu untersuchen, wurde eine Variantenrechnung mit 10-facher Auslegungsleckage mit Ausfall der RR-Störfallabsaugung durchgeführt, bei der angenommen wurde, dass die Zu-/Abluftanlagen des RR bei 180 000 s (50 h) nach Beginn des Unfalls wieder in Betrieb genommen werden. Damit wird eine kontrollierte Belüf-

tung der RR-Atmosphäre hergestellt. Die Bedarfsfilteranlage wurde hier noch nicht genutzt.

In den Abb. 5.44 und Abb. 5.45 sind die H_2 -Konzentrationen in einigen ausgewählten Zonen des Ringspaltes auf sieben verschiedenen Ebenen entlang der Stahlschale des SHB sowie auch in den RR-Räumen, inklusive der obere Bereiche des Ringraums im Vergleich zu der Variante mit 10-facher Auslegungsleckage und Ausfall der RR-Störfallabsaugung dargestellt. Der Vergleich der beiden Rechnungen zeigt, dass durch das Zuschalten der Zu-/Abluftsysteme des RR die H_2 -Konzentrationen in den RR-Räumen rasch wesentlich reduziert werden. Damit kann die Ausbildung brennbarer Gasgemische durch die Nutzung der Zu-/Abluftanlagen verhindert werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass beim Zuschalten der Zu-/Abluftanlagen der Wasserstoff aus dem Ringraum rasch ausgespült wird und die H_2 -Konzentration unterhalb 1 Vol.-% fällt. Abb. 5.46 zeigt exemplarisch das Dreistoffdiagramm für die Zone im Bereich der SHB-Leckage (U01B). Wie deutlich zu sehen ist, treten während des gesamten Unfallablaufs keine brennbaren Gasgemische in der dargestellten Zone auf. Nach dem Zuschalten der Zu-/Abluftsysteme des RR nimmt die Luft-Konzentration zu, während die Dampf- und H_2 -Konzentration im Ringspalt abnehmen. Bei der dargestellten Zone bildet sich nach Beginn der kontrollierten Belüftung bei 180 000 s ein Gasgemisch aus, das aus 90 Vol.-% Luft, 8 Vol.-% Dampf und 1 Vol.-% Wasserstoff besteht.

Zum Zeitpunkt der Zuschaltung der RR-Zu-/Abluftanlagen nach 50 h (180 000 s) ist die luftgetragene Konzentration im RR bereits abgesunken, bedingt durch Ablagerungsvorgänge und den Austrag über Leckagen zur Umwelt. Das Zuschalten der Zu-/Abluftanlagen verringert die Aerosolkonzentrationen (Abb. 5.47) sowie die Xe-Konzentration (Abb. 5.48) im Ringspalt des RR deutlich weiter. Allerdings werden dabei Aerosole zusätzlich zu den Edelgasen ungefiltert in die Umgebung freigesetzt, falls nicht die Bedarfsfilteranlage genutzt wird. Abb. 5.49 zeigt die Masse in die Umgebung freigesetzter Aerosole aus dem RR über das Abluftsystem des RR und die aus dem SHB über gefilterte Druckentlastung freigesetzte Masse. Wird die Bedarfsfilteranlage nicht genutzt, so ist die Aerosolfreisetzung um ca. den Faktor 50 höher als die Belastung durch die Druckentlastung des SHB.

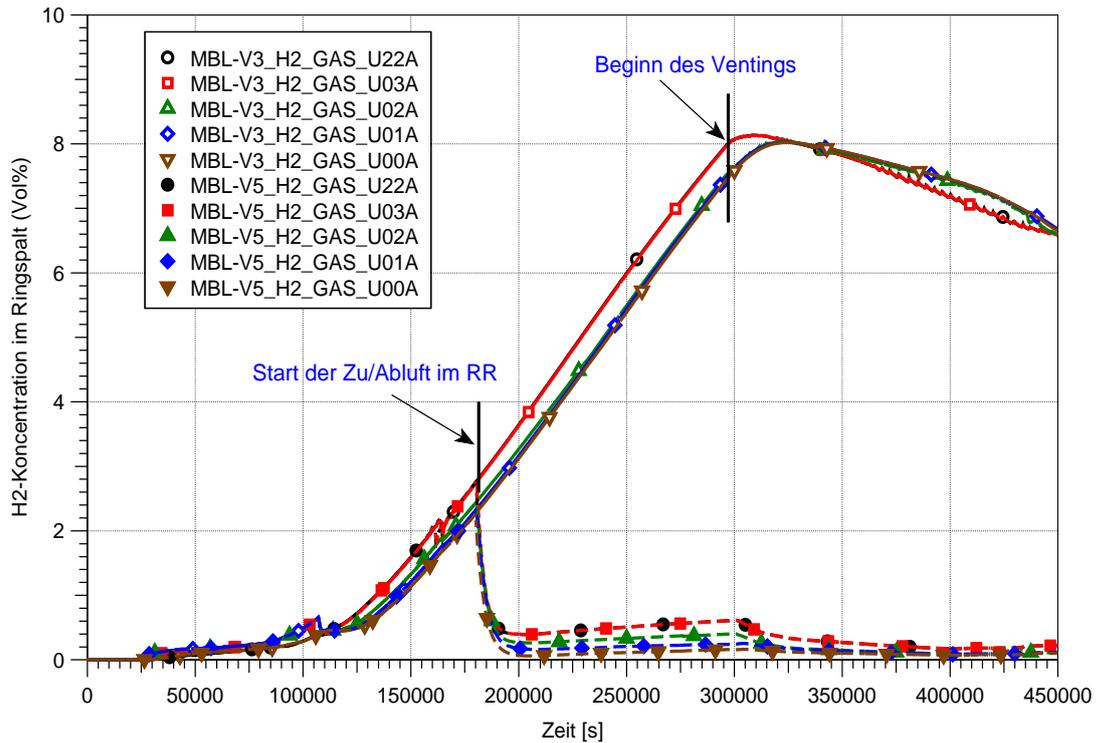


Abb. 5.44 H₂-Konzentration ausgewählter Zonen im Ringspalt, MBL-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage und Ausfall der RR-Störfallabsaugung (offene Marker) und mit Einsatz der Zu-/Abluftanlagen des RR (ausgefüllte Marker)

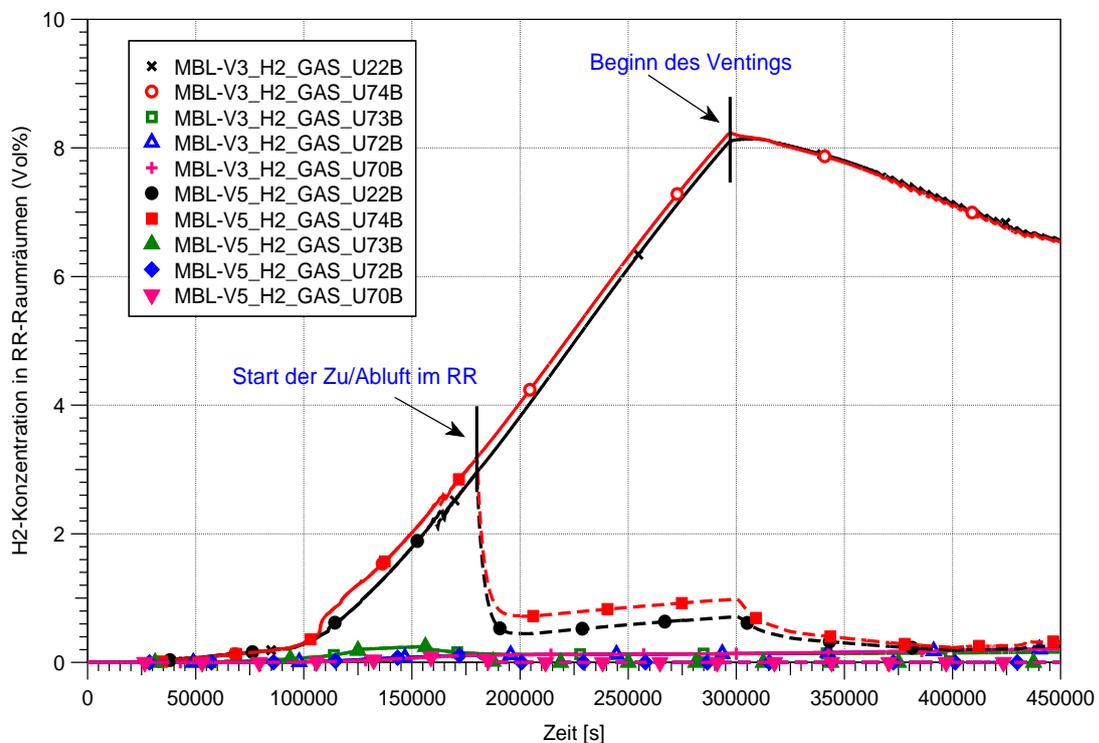


Abb. 5.45 H₂-Konzentration ausgewählter RR-Räume, MBL-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage und Ausfall der RR-Störfallabsaugung (offene Marker) und mit Einsatz der Zu-/Abluftanlagen des RR (ausgefüllte Marker)

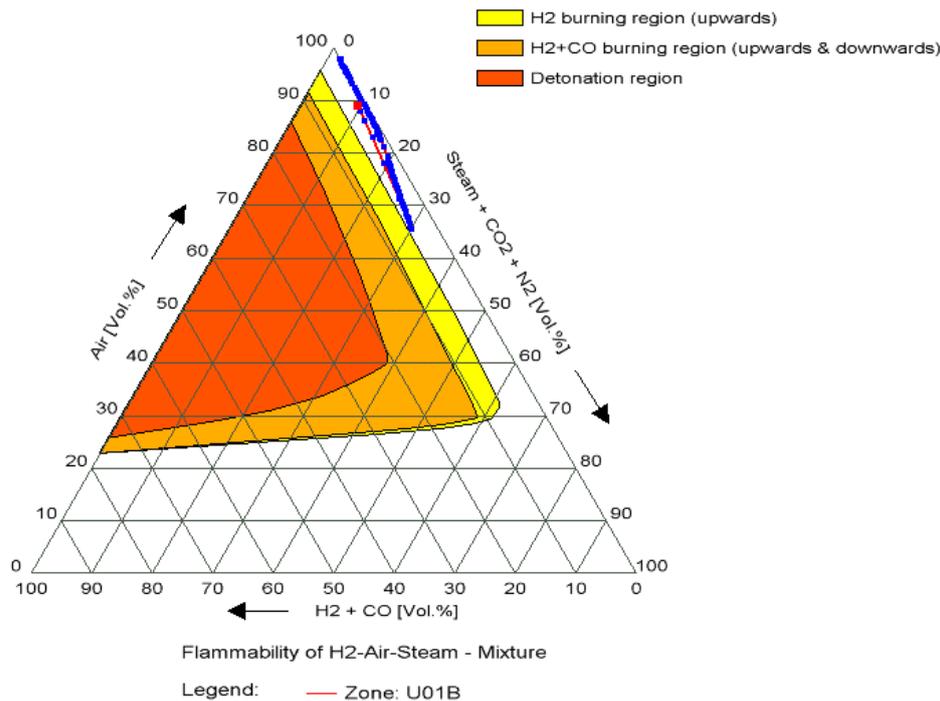


Abb. 5.46 Zustände im Bereich der SBH-Leckage (U01B), MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Einsatz der Zu-/Abluftanlagen des RR

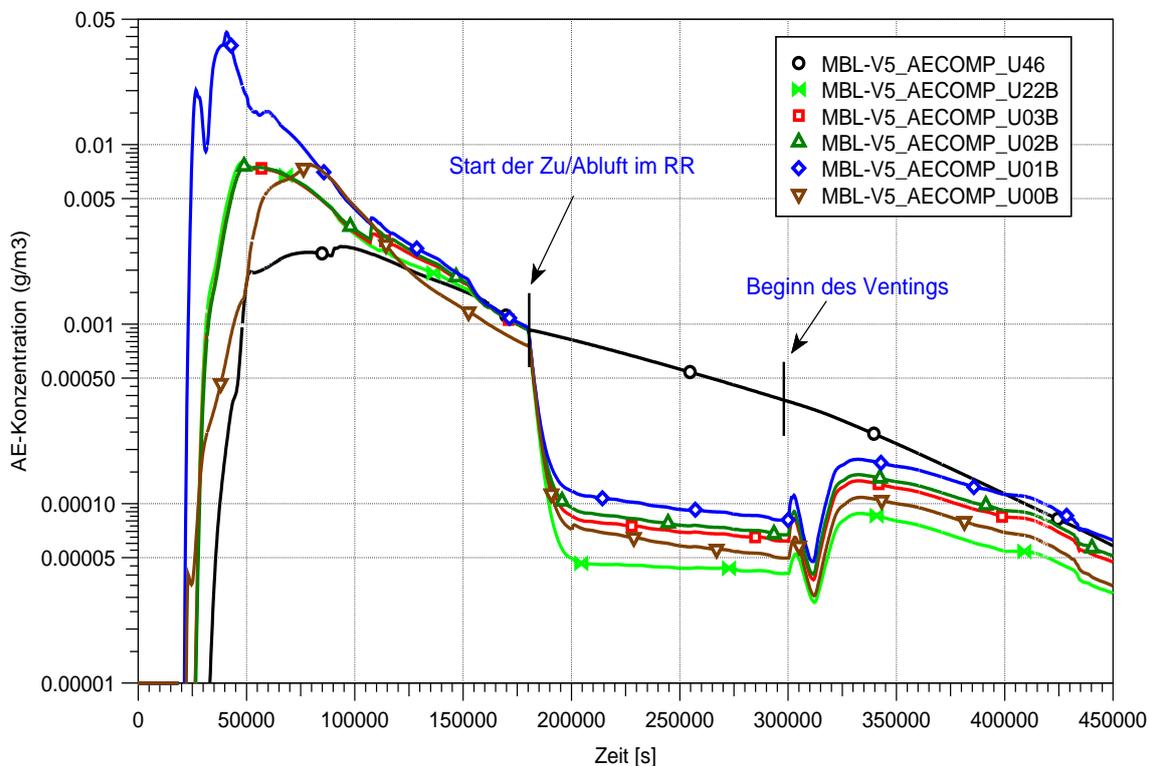


Abb. 5.47 Aerosol-Konzentration in Zonen entlang der Höhe des Ringspaltes, Variante mit 10-facher Leckage und Einsatz der Zu-/Abluftanlagen des RR

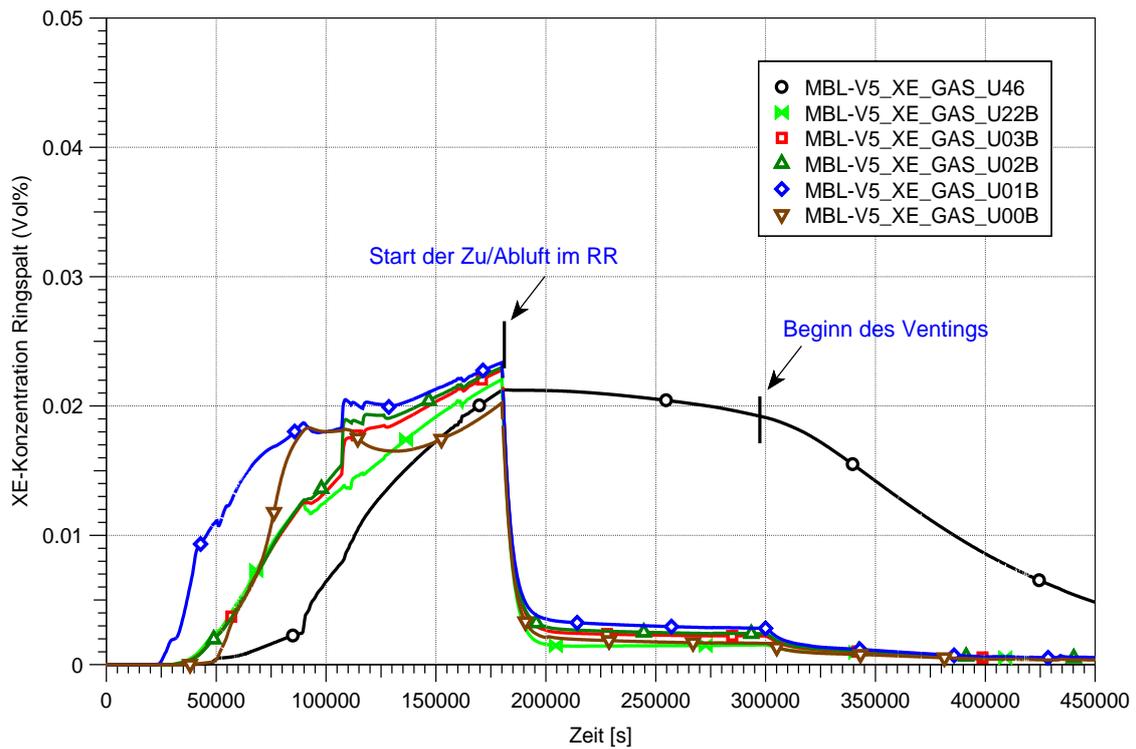


Abb. 5.48 Xe-Konzentration in ausgewählten Zonen des Ringspaltes, Variante mit 10-facher Leckage und Einsatz der Zu-/Abluftanlagen des RR

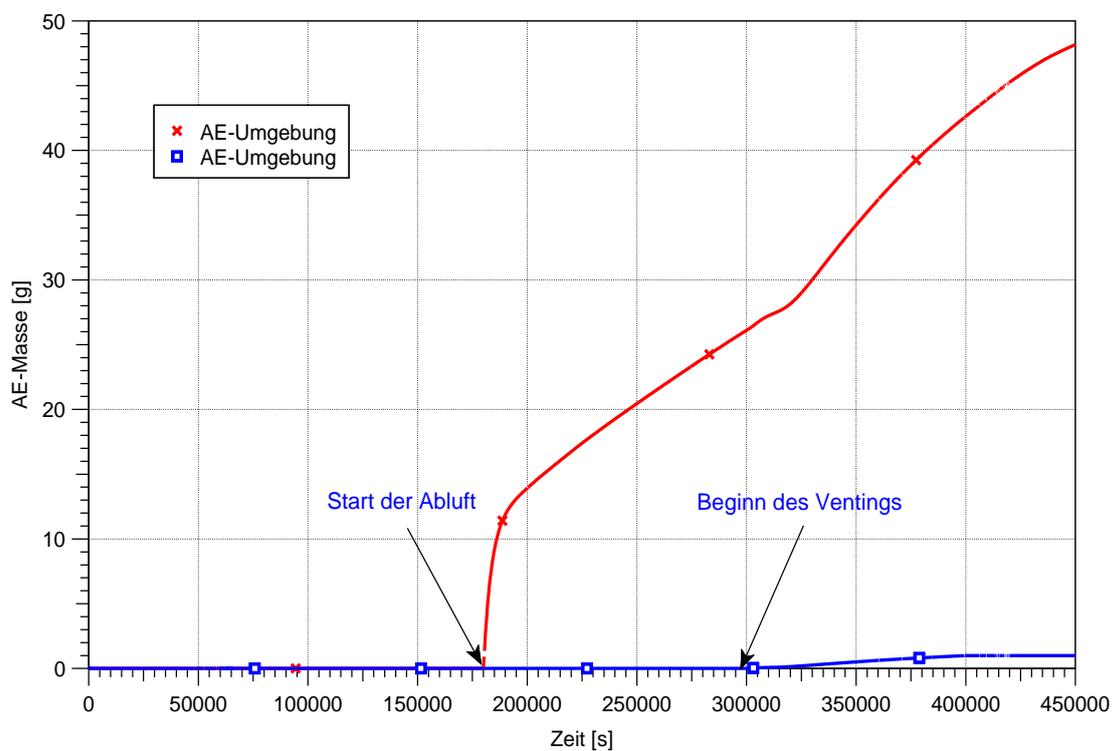


Abb. 5.49 Masse in die Umgebung freigesetzter Aerosole aus dem RR über Abluftsystem des RR (rot) und aus dem SHB über gefilterte Druckentlastung (blau), MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Einsatz der Zu-/Abluftanlagen des RR

Zusammenfassend stellt die Nutzung der Zu-/Abluftsysteme des RR eine sehr erfolgversprechende Notfallmaßnahme zur Verringerung der H₂-Konzentration im RR dar. Ein Zuschalten der Zu-/Abluftanlagen reduziert wesentlich die H₂-Konzentration und verhindert die Ausbildung brennbarer Gasgemische im Ringraum. Ohne die Nutzung der Bedarfsfilteranlage führt dies aber auch zu hohen Aerosolbelastungen.

5.2.2 MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage mit Ausfall der RR-Störfallabsaugung und Einsatz der Bedarfsfilteranlage gemäß HMN

Die nachfolgende Variantenrechnung unterstellt an Stelle der Nutzung der Zu-/Abluftanlagen des RR nach 50 h (180 000 s) die Nutzung der Bedarfsfilteranlage. In erster Näherung (Annahme gleicher Volumendurchsatz) unterscheidet sich das Ergebnis der Analyse nur hinsichtlich der Rückhaltung von Aerosolen im Bedarfsfilter von der im vorherigen Kapitel beschriebenen Analyse, wo die Freisetzung der Aerosole ungefiltert in die Umgebung erfolgt. In Abb. 5.50 ist die in den Bedarfsfiltern abgelagerte Aerosolmasse für den MBL-Fall mit 10-facher Leckage und Einsatz der Bedarfsfilteranlage dargestellt. Für die Bedarfsfilter wurde eine Rückhaltung von 99,9 % (Dekontaminationsfaktor von 1000) angenommen.

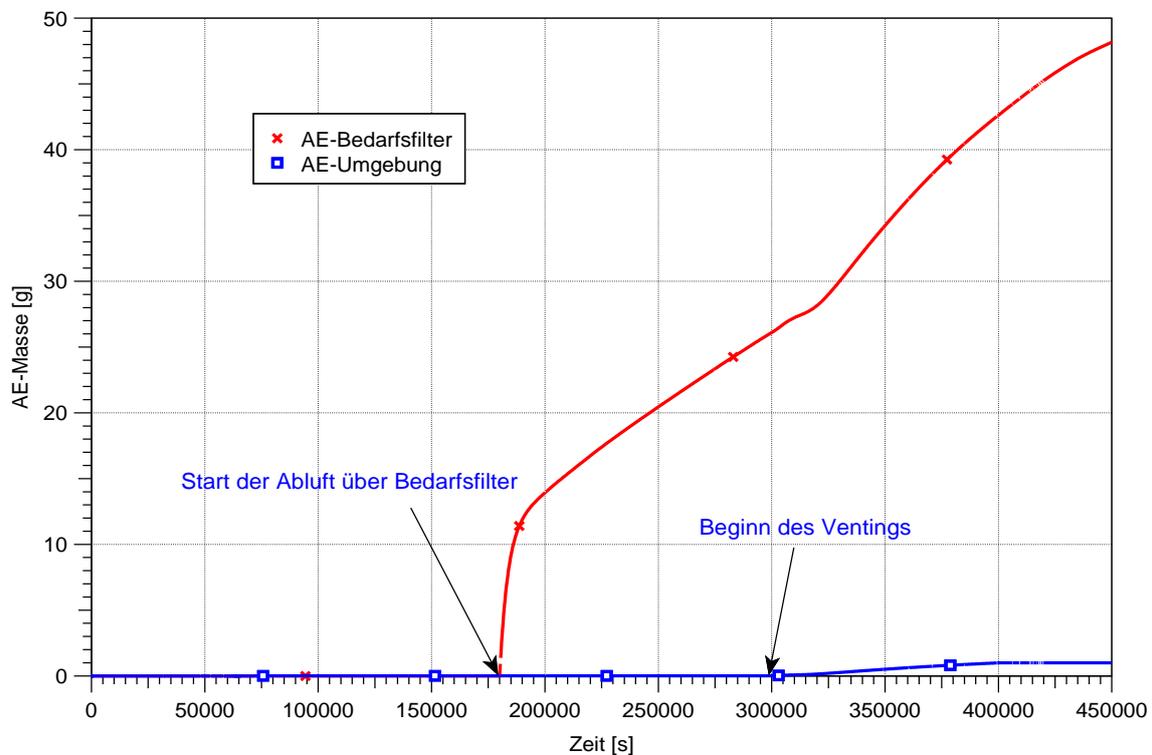


Abb. 5.50 Masse im Bedarfsfilter zurückgehaltener Aerosole (rot) und in die Umgebung freigesetzter Aerosole über SHB-Druckentlastung (blau), MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage mit Nutzung der Bedarfsfilteranlage

5.2.3 MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage mit Betrieb der RR-Störfallabsaugung und Einsatz der Umluftanlage im RR

Eine weitere potenzielle Notfallmaßnahme aus dem HMN der Referenzanlage ist die frühzeitige Nutzung der Umluftanlage im Ringraum zur Beseitigung von Schichtungen der Atmosphäre. Zur Untersuchung der Wirksamkeit der Umluftanlage wurde zusätzlich zum Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Betrieb der RR-Störfallabsaugung (siehe Kap. 5.1.2) eine Variationsrechnung durchgeführt, bei der unterstellt wurde, dass auch noch die Umluftanlage des RR bei 35 000 s (ca. 10 h) nach Beginn des Unfalls zum Einsatz kommt. Wie schon in Kap. 3.1.3 beschrieben, saugt die Umluftanlage Luft aus der Kuppel des RR auf Höhe 45 m (Zone U46) an und speist diese in den oberen Ringraum auf Höhe 32 m (Zonen U31A-D) zurück.

Abb. 5.51 zeigt den zeitlichen H_2 -Konzentrationsverlauf im Ringspalt für die Variationsrechnung mit 10-facher Auslegungsleckage und Einsatz der Umluftanlage. Es sind quasi keine Unterschiede im Vergleich zum MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage ohne Betrieb der Umluftanlage (siehe Abb. 5.18) zu sehen; die H_2 -Konzentration verhält sich bis zum Beginn der Druckentlastung des SHB gleich. Lediglich nach der Einleitung der Druckentlastung bei 297 000 s (83 h) unterscheidet sich der H_2 -Konzentrationsverlauf in der Kuppel des Ringraums (Zone U46) leicht von der im MBL-Fall ohne Betrieb der Umluftanlage. In Abb. 5.51 ist zu erkennen, dass nach Beginn der Druckentlastung die H_2 -Konzentration in der Kuppel des RR für die Variante mit Einsatz der Umluftanlage geringfügig schneller absinkt, d. h. eine bessere Durchmischung der Atmosphäre im obersten RR-Bereich stattfindet.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Nutzung der Umluftanlage in Kombination mit der RR-Störfallabsaugung zu keiner wesentlichen Verbesserung der Situation hinsichtlich der H_2 -Konzentration führt. Der Einsatz der Umluft verringert die H_2 -Konzentration in weiten Bereichen des Ringraums nicht merklich, weil die abgesaugte Luft weit oberhalb des unterstellten Leckortes vom SHB wieder zugeführt wird. Ein frühzeitiges Zuschalten der Umluftanlage im Ringraum kann also allenfalls den Gasaustausch und die Vermischung im oberen Ringraum verstärken, wobei dies nicht erforderlich ist.

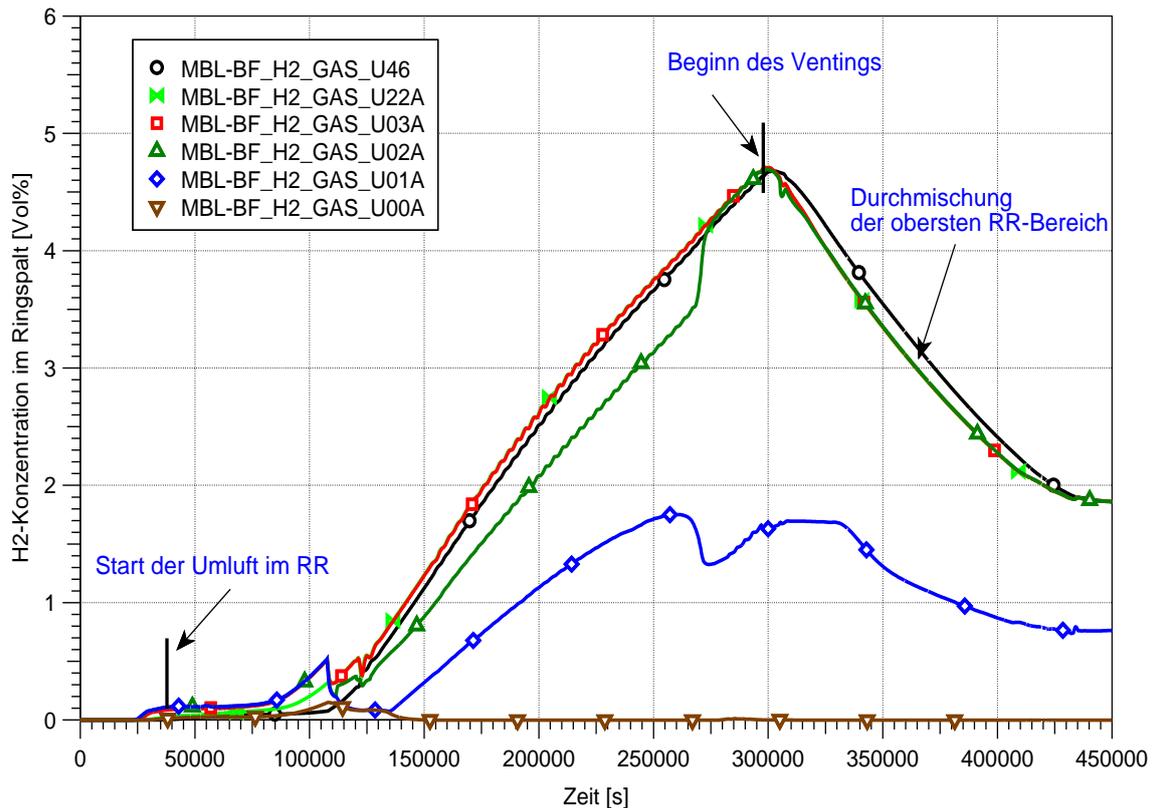


Abb. 5.51 H₂-Konzentration im RR-Ringspalt, Variante mit 10-facher Auslegungslecke und Einsatz der Umluftanlage

5.2.4 MBL-Fall mit 10-facher Auslegungslecke, mit Ausfall der RR-Störfallabsaugung und Einsatz von Rekos im oberen RR

Gemäß der Empfehlung aus der RSK von 2015 /RSK 15/ wurde auch eine alternative Methode zum Wasserstoffabbau im Ringraum als mitigative Notfallmaßnahme untersucht, bei der eine kleine Anzahl von H₂-Rekombinatoren im Ringraum zum Einsatz vorgesehen wird (Annahme). Es wurde unterstellt, dass 4 Rekos mittlerer Baugröße (FR 90-750) in vier Zonen (UA22A-D, siehe Abb. 5.52) des oberen RR verteilt werden. Die gewählte Baugröße richtete sich grob nach den örtlich verfügbaren Platzverhältnissen im Bereich oberhalb der obersten Bühne (etwa 22,5-m-Ebene) des Ringraums. Systematische Untersuchungen dazu wurden nicht durchgeführt, erscheinen aber aufgrund der Ergebnisse nicht erforderlich.

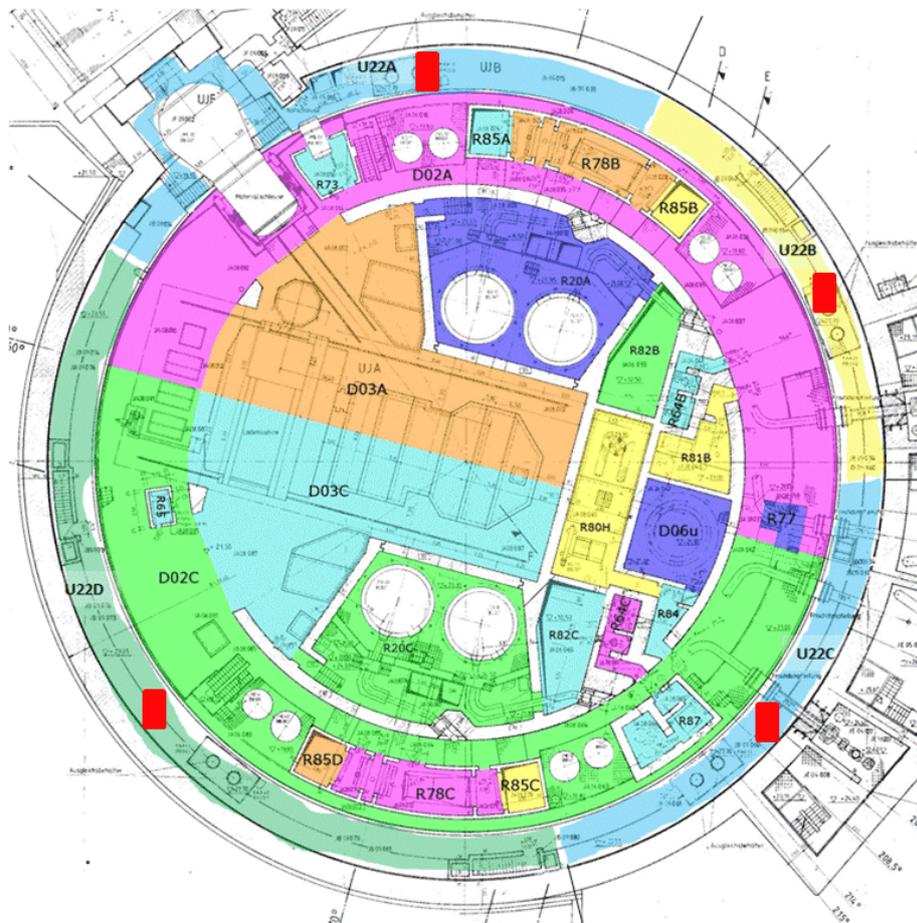


Abb. 5.52 Angenommene Platzierung der 4 Rekos im RR-Bereich oberhalb der obersten Bühne (22,5-m-Ebene)

Abb. 5.53 zeigt für die Variationsrechnungen mit Ausfall der RR-Störfallabsaugung den zeitlichen H_2 -Konzentrationsverlauf ohne Rekos (offene Symbole) und mit Rekos (ausgefüllt Symbole). Dabei ist zu erkennen, dass ohne Rekos die H_2 -Konzentration in den ausgewählten Zonen des Ringraums langfristig bis zum Zeitpunkt der Druckentlastung des SHB bis auf 8 Vol.-% steigt. Der Einsatz von nur 4 mittleren Rekos vermindert dagegen diesen Wert um den Faktor 4, so dass die H_2 -Konzentration im Ringraum bis zum Beginn der Druckentlastung nur auf etwa 2 Vol.-% ansteigt und brennbare Gemische vermieden werden. Abb. 5.53 zeigt, dass der Wasserstoffabbau bei etwa 145 000 s (ca. 40 h) beginnt und die H_2 -Konzentration in allen Räumen bis zum Ende der Rechnung deutlich unterhalb von 4 Vol.-% bleibt.

Abb. 5.54 zeigt die Rekombinationsrate der einzelnen Rekos. Es ist ersichtlich, dass nach Beginn der SHB-Druckentlastung bei ca. 293 000 s (82 h) die Rekombinationsrate über einen weiten Zeitbereich stark abfällt. In diesem Zeitbereich ist die noch verfügbare Sauerstoffmasse im RR bereits sehr gering (siehe Abb. 5.55). Langfristig ist

die Rekombinationsrate auf ca. 0,02 g/s abgesunken, da den Rekos nicht mehr der nötige Sauerstoff zur Verfügung steht.

In Abb. 5.55 ist das Dreistoffdiagramm für den Leckageraum im Ringspalt dargestellt. Aus dem Dreistoffdiagramm wird deutlich, dass bis zum Ende der Rechnung keine brennbaren Gasgemische im Ringraum auftreten. Durch die katalytische Reaktion steigt auch der Dampfanteil und die Atmosphäre im RR wird daher letztlich N₂-inertisiert.

Die Ergebnisse der Variationsrechnung mit Rekombinatoren zeigt, dass der Einbau von 4 mittleren Rekos schon frühzeitig ein großes Potential zum Abbau von Wasserstoff aus der unfallbedingten Atmosphäre des Ringraums hat. Ein derartiges Reko-Konzept ist eine sehr effiziente und voll passive Notfallmaßnahme zur Verhinderung brennbarer Zustände im Ringraum ohne zusätzlichen Aerosolaustrag in die Umgebung.

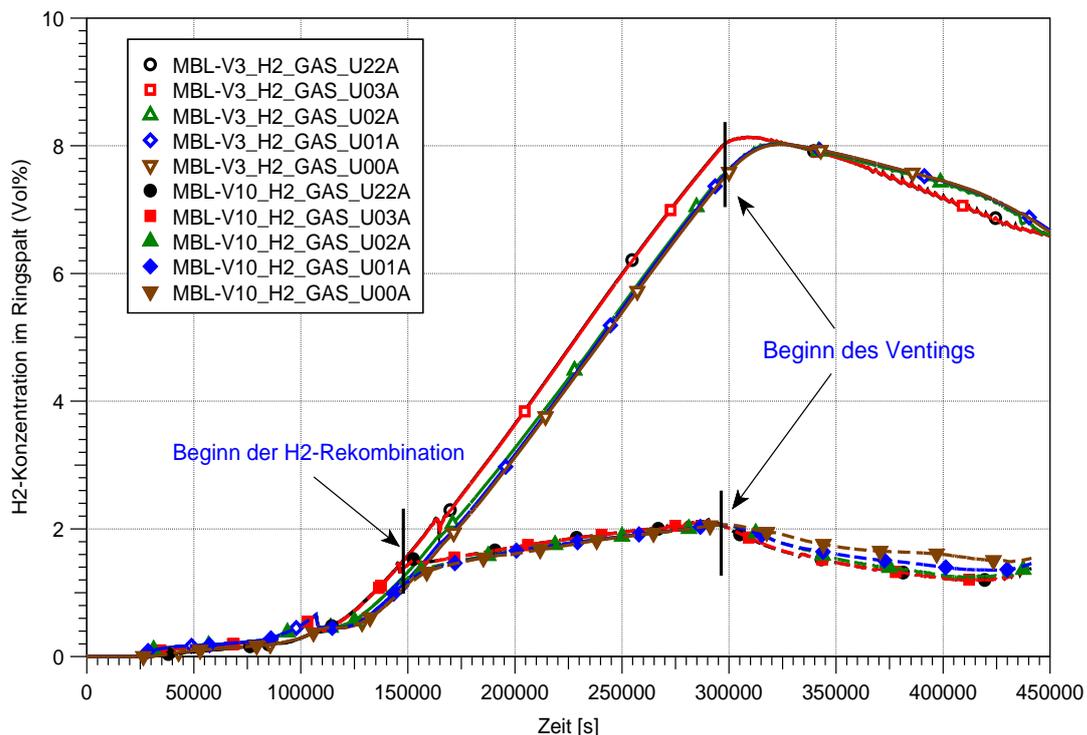


Abb. 5.53 Vergleich der H₂-Konzentration ausgewählter Zonen im Ringspalt, MBL-Fälle mit Ausfall der RR-Störfallabsaugung ohne (offene Marker) und mit Rekos im RR (ausgefüllte Marker)

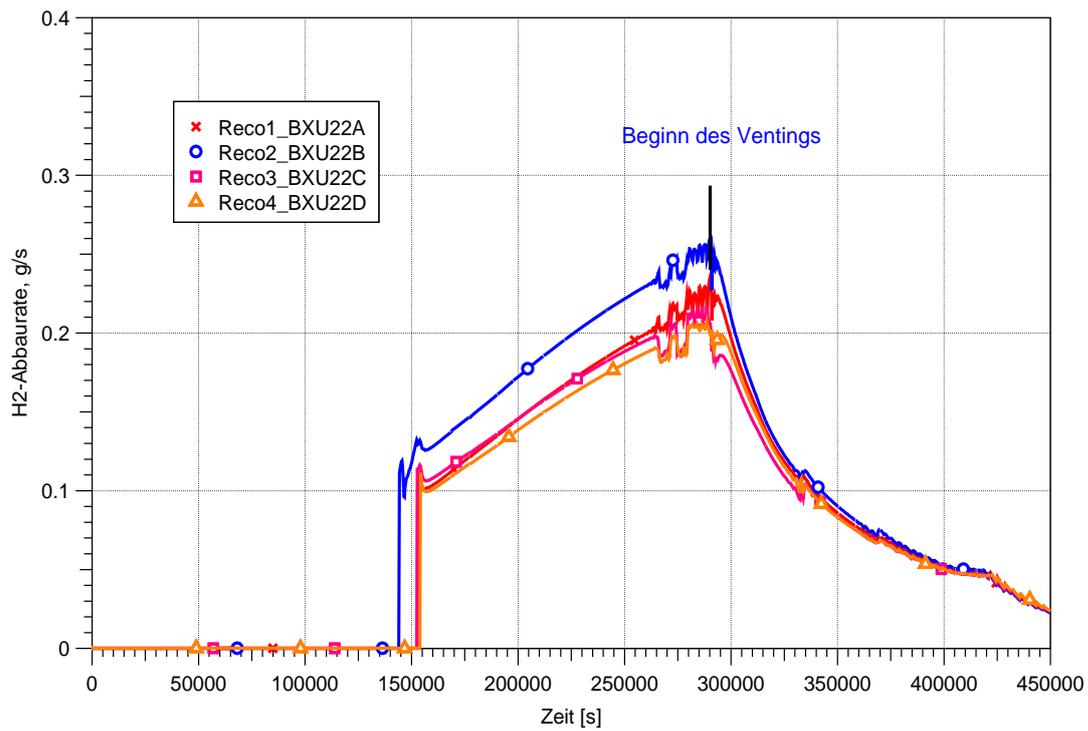


Abb. 5.54 Abbaureate an Wasserstoff durch die Rekombination im Ringraum, MBL-Fälle mit Ausfall der RR-Störfallabsaugung und Rekos im RR

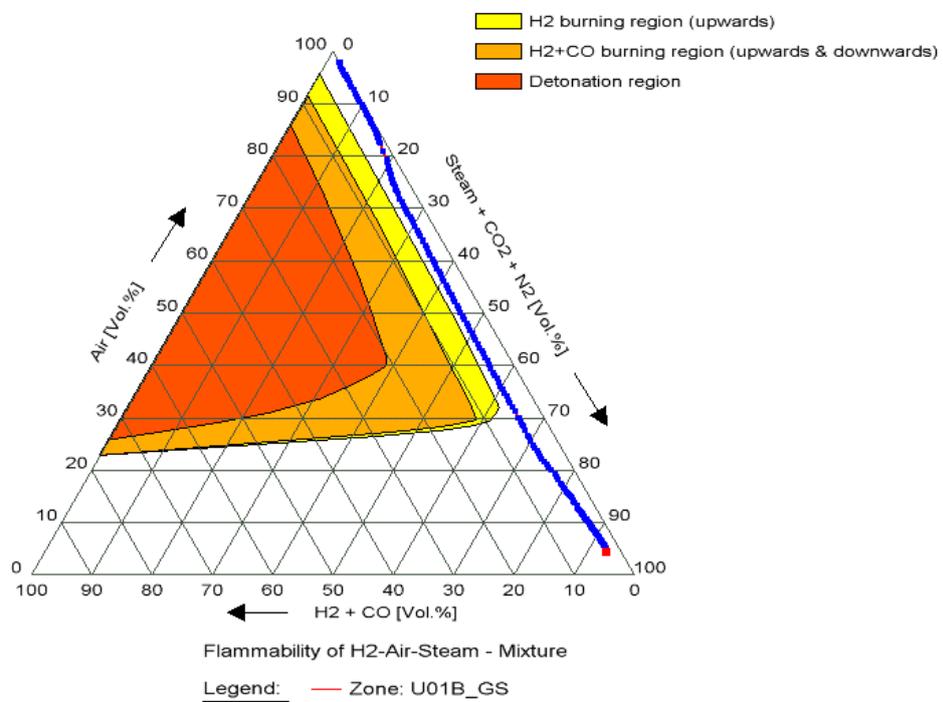


Abb. 5.55 Zustände im Bereich der SBH-Leckage (U01B) im Ringraum, MBL-Fälle mit Ausfall der RR-Störfallabsaugung und Rekos im RR

5.3 Vergleich ND*-Fall und MBL-Fall – Einfluss des untersuchten Kernschmelzszenarios auf die Zustände im Ringraum

5.3.1 Basisfälle mit SHB-Auslegungsleckage

Um den Einfluss des untersuchten Kernschmelzszenarios zu untersuchen, wurden die Ergebnisse der beiden Szenarien (MBL und ND*) für die Basisfälle mit Auslegungsleckagen aus dem SHB und Betrieb der RR-Störfallabsaugung verglichen. Abb. 5.56 zeigt hierzu den Vergleich der Druckverläufe für die zwei betrachteten Basisfälle mit Auslegungsleckagen (MBL und ND*). Beim Vergleich der Zeitspannen zwischen den Ereignissen fallen zuerst die unterschiedlichen Zeitpunkte der Freisetzung in den SHB auf. Beim MBL-Fall beginnt die Freisetzung in den Sicherheitsbehälter mit dem Auftreten des Lecks zum Zeitpunkt 0 s. Im ND*-Szenario kommt es erst beim Versagen der Berstscheiben des DH-Abblasetanks (bei 4 908 s) zu einer Freisetzung in den SHB.

Auffällig sind auch die Unterschiede in der Zeitspanne danach bis zum Zeitpunkt des RDB-Versagens sowie auch im Zeitintervall bis zum Durchdringen des biologischen Schildes als Folge der Betonerosion in der Reaktorgrube. Im ND*-Fall beginnt die Schmelze-Beton-Wechselwirkung bei 23 254 s (6,5 h), während im MBL-Fall diese ca. 9 000 s später beginnt, nämlich bei 31 867 s (8,9 h). Aus diesem Grund wird beim ND*-Fall insgesamt mehr H_2 erzeugt im Vergleich zum MBL-Fall, da die Nachzerfallsleistung zum Beginn der Schmelze-Beton-Wechselwirkung etwas höher ist als im MBL-Fall, und diese früher einsetzt. Weiterhin zeigt sich hier auch der Unterschied im Zeitpunkt der Einleitung der gefilterten Druckentlastung im Sicherheitsbehälter (Abb. 5.56) Im ND*-Basisfall beginnt die gefilterte Druckentlastung des Sicherheitsbehälters ca. 16 Stunden (~60 000 s) früher als im MBL-Basisfall und es schließt sich eine 2. Druckentlastungsphase nach ca. 112,5 h (~405 000 s) an.

Der Vergleich des berechneten Druckverlaufs im RR für die beiden Basisfälle mit Auslegungsleckagen ist in Abb. 5.57 dargestellt. Im MBL-Fall kommt es während der Anfangsphase innerhalb einer kurzen Zeitspanne von 600 s durch Wärmeeintrag und Leckage zu einem geringen Überdruck im Ringraum, obwohl die RR-Störfallabsaugung im Betrieb ist. Dagegen wird im ND*-Fall während des gesamten Ablaufs kein Überdruck im Ringraum berechnet, da der Wärmeeintrag und die Leckagen aus dem SHB erst bei ca. 5 000 s beginnen. Zu diesem Zeitpunkt kann die RR-Störfallabsaugung im RR einen höheren Unterdruck zur Umgebung erzeugen, so dass immer eine negative Druckdifferenz zwischen Umgebung und Ringraum gewährleistet ist.

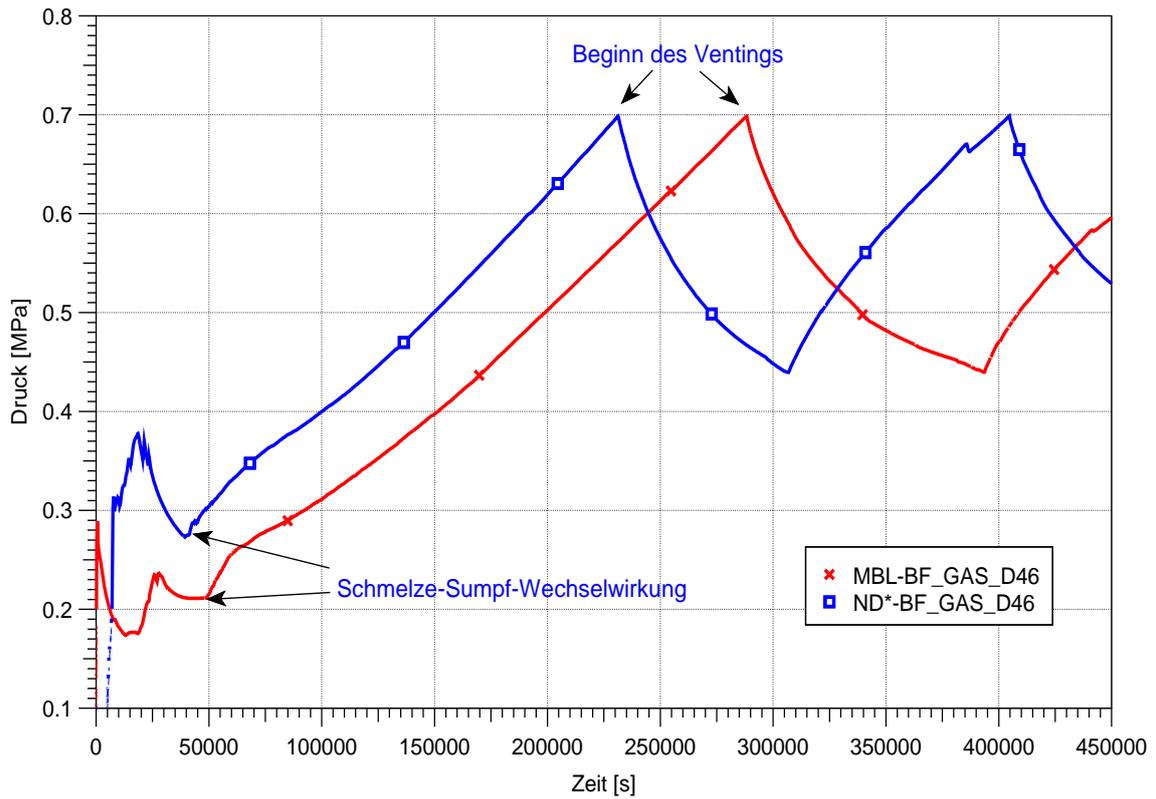


Abb. 5.56 SHB-Druck, Vergleich ND*-Basisfall und MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

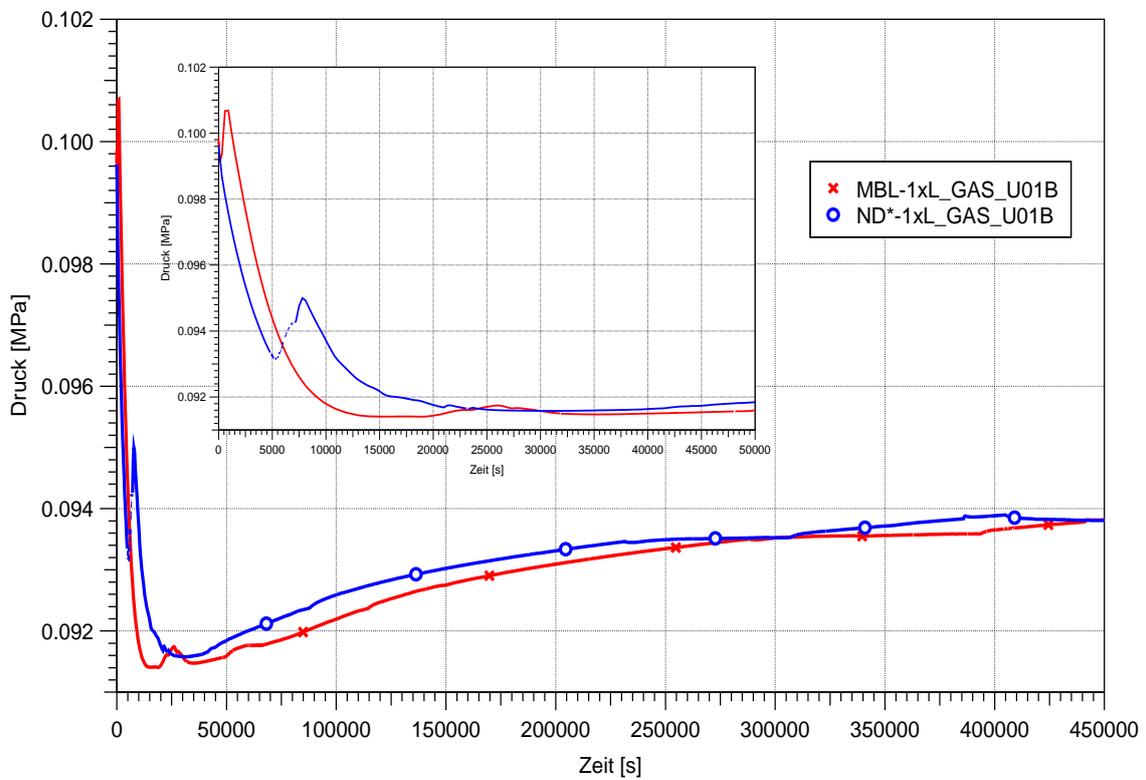


Abb. 5.57 RR-Druck, Vergleich ND*-Basisfall und MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

Im ND*-Fall findet die Freisetzung aus dem Primärkreis im oberen Bereich der Anlagenräume im SHB statt, an den Berstscheiben des DH-Abblasetanks (Zeitpunkt ab 4 908 s). Während der Freisetzung über den DH-Abblasetank verläuft die Strömung aus den beiden Dampferzeugertürmen in den Dom des SHB. Durch die Dampf- und Gasfreisetzung kommt es im Vergleich zum MBL-Fall zu einem höheren Temperaturanstieg im Dom sowie auch in den Räumen hinter dem Trümmerschutzzylinder (Peripherie) (siehe Abb. 5.58). Danach steigen auch die Temperaturen im oberen Bereich des Ringraums, da ein großer Teil der Wärme aus dem SHB über die SHB-Stahlschale in den RR übertragen wird. Nach dem Schmelze-Kontakt zum Sumpfwasser (38 700 s) steigen die Temperaturen im SHB und damit auch im Ringraum kontinuierlich weiter an.

Dagegen tritt im MBL-Fall das Leck an einer tiefen Stelle in den Anlagenräumen auf, an einem heißen Strang des Loops. Nach einem anfänglichen Temperaturanstieg in Folge des Lecks fällt die Temperatur durch den Eintrag kalten Wassers von Not- und Nachkühlsystemen aus dem Leck ab, bevor sie während der Kernzerstörungsphase wieder ansteigt. Erst nach dem Kontakt der Schmelze (bei 48 140 s) mit Sumpfwasser und der nachfolgenden Verdampfung in der Reaktorgrube kommt es zu einem anhaltenden Temperaturanstieg im SHB und damit auch im Ringraum. Durch den höheren Wärmeeintrag in den SHB im ND*-Fall liegen die Atmosphärentemperaturen im SHB und damit auch im Ringraum deutlich höher als im MBL-Fall.

Der Vergleich des berechneten Temperaturverlaufs im Ringraum für die beiden Basisfälle mit Auslegungsleckagen ist in Abb. 5.59 dargestellt.

Die Abb. 5.60 zeigt den Vergleich der durch die Schmelze-Beton-Wechselwirkung entstehenden Wasserstoffmasse der beiden Unfallszenarien. Für den ND*-Basisfall werden bis zum Beginn der SHB-Druckentlastung insgesamt ca. 3 700 kg H₂ freigesetzt. Beim MBL-Fall beträgt bis zum Zeitpunkt der Druckentlastung die gesamte Wasserstoffentstehung ca. 4 000 kg. Insgesamt wird jedoch beim ND*-Fall mehr H₂ erzeugt im Vergleich zum MBL-Fall. Der Hauptgrund dafür ist, dass die Beton-Schmelze-Wechselwirkung etwas früher einsetzt als im MBL-Fall.

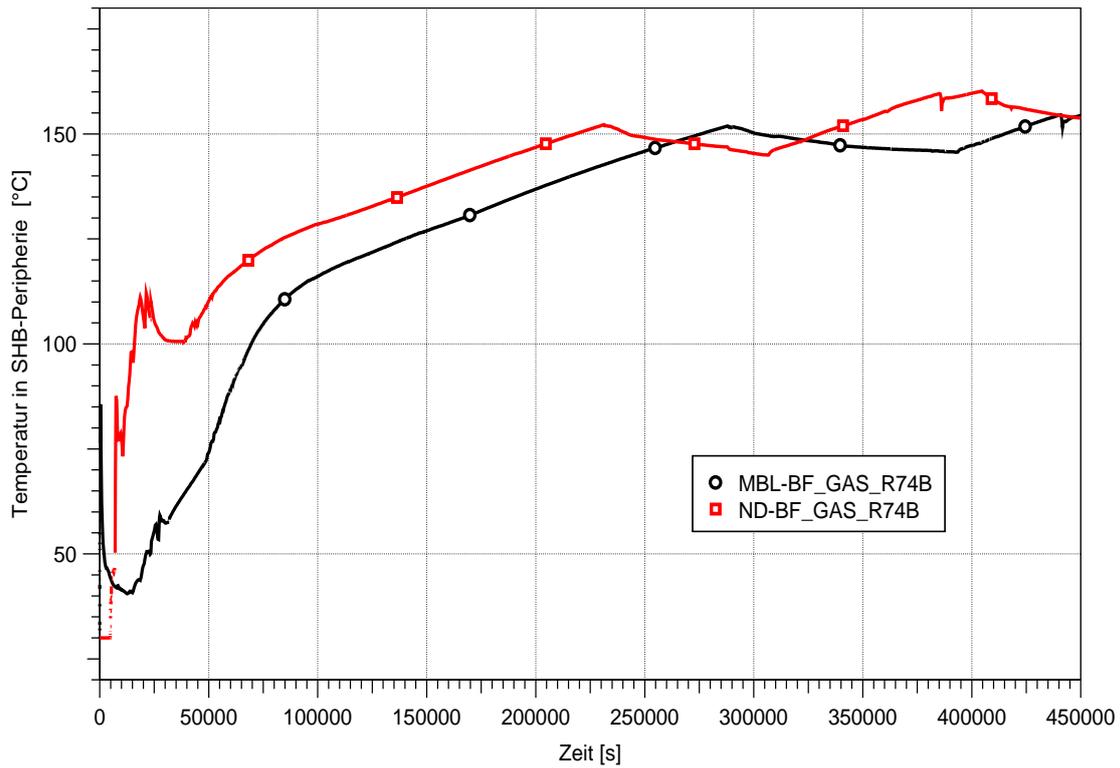


Abb. 5.58 Atmosphärentemperatur im SHB (Peripherie), Vergleich ND*-Basisfall (rot) und MBL-Basisfall (schwarz) mit SHB-Auslegungsleckage

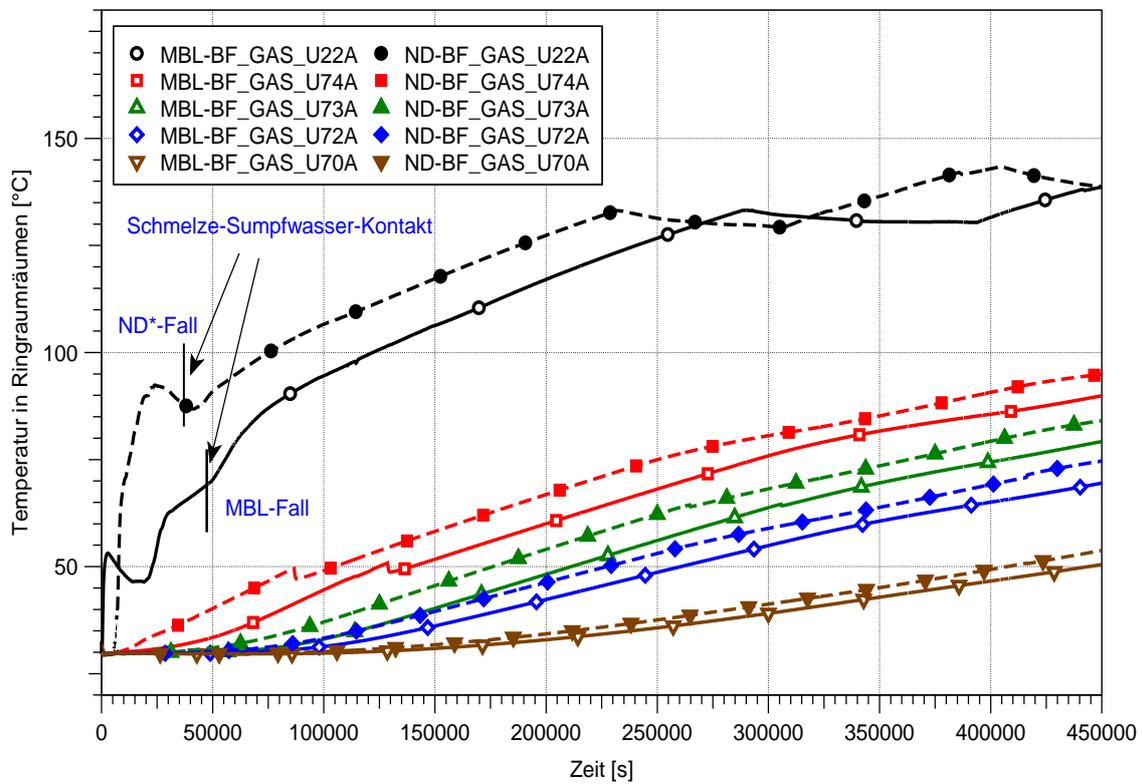


Abb. 5.59 Atmosphärentemperatur in RR-Räumen, Vergleich ND*-Basisfall und MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

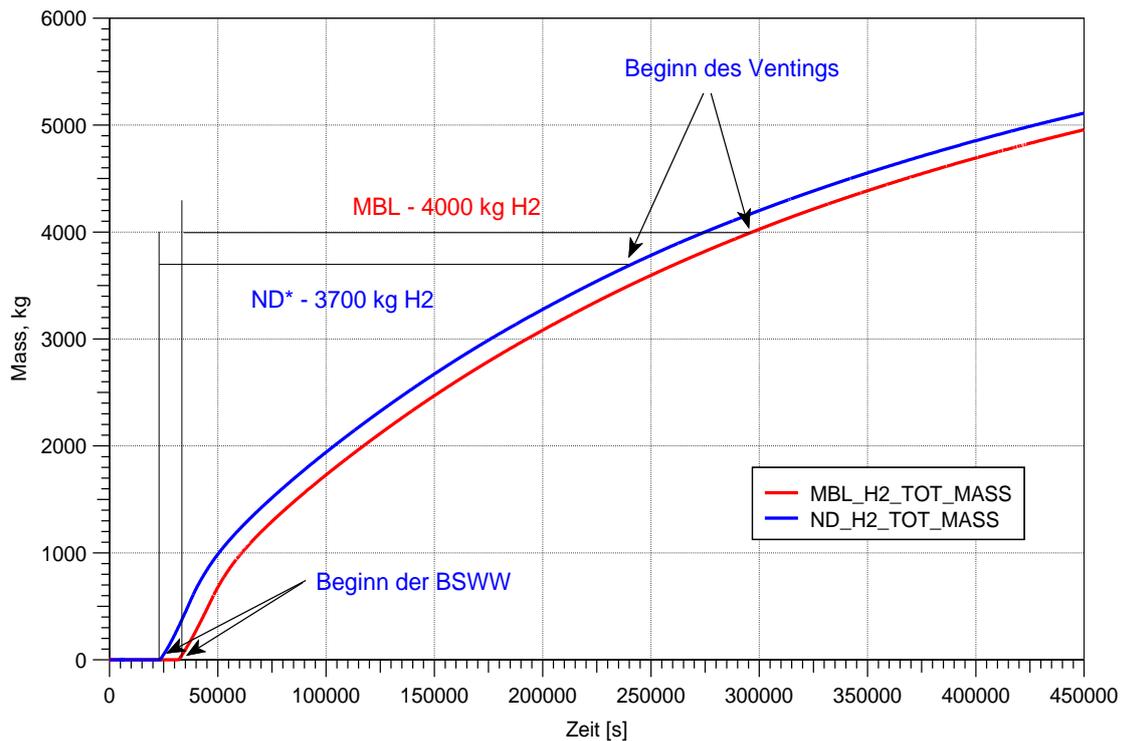


Abb. 5.60 H₂-Masse im SHB, Vergleich ND*-Basisfall (blau) und MBL-Basisfall (rot) mit SHB-Auslegungsleckage

Der Vergleich des zeitlichen H₂-Konzentrationsverlaufs in einigen ausgewählten Zonen des Ringspaltes ist in Abb. 5.61 – Abb. 5.63 dargestellt. Die Abbildungen zeigen, dass auch im ND*-Basisfall mit Auslegungsleckage die H₂-Konzentration im Ringraum während des gesamten Unfallablaufs deutlich unterhalb der unteren Zündgrenze von 4 Vol.-% liegt, wobei die H₂-Konzentration etwas schneller ansteigt als im MBL-Basisfall. Dies liegt daran, dass generell im ND*-Fall bedingt durch die hohe Lage der Freisetzung über den DH-Abblasetank in den SHB bis zum Schmelze-Sumpfwasser-Kontakt mehr Wasserstoff in die Räume hinter dem Trümmerschutzzylinder (periphere Betriebsräume) und damit auch in den Bereich der Leckage in den Ringraum gelangt. Im ND*-Fall schließen im Vergleich zum MBL-Fall einzelne Brandschutztüren und Brandschutzklappen früher, da die Schließtemperatur von 70°C deutlich schneller erreicht wird (Abb. 5.62). So wird z. B. der Anstieg der H₂-Konzentration in einigen separaten Räumen des Ringraums auf der 18-m-Ebene (z. B. Zone U74A) früher im Unfallablauf beendet. Aufgrund der früheren Druckentlastung des SHB ist im ND*-Fall die H₂-Konzentration zu diesem Zeitpunkt generell geringer im Vergleich zum MBL-Fall.

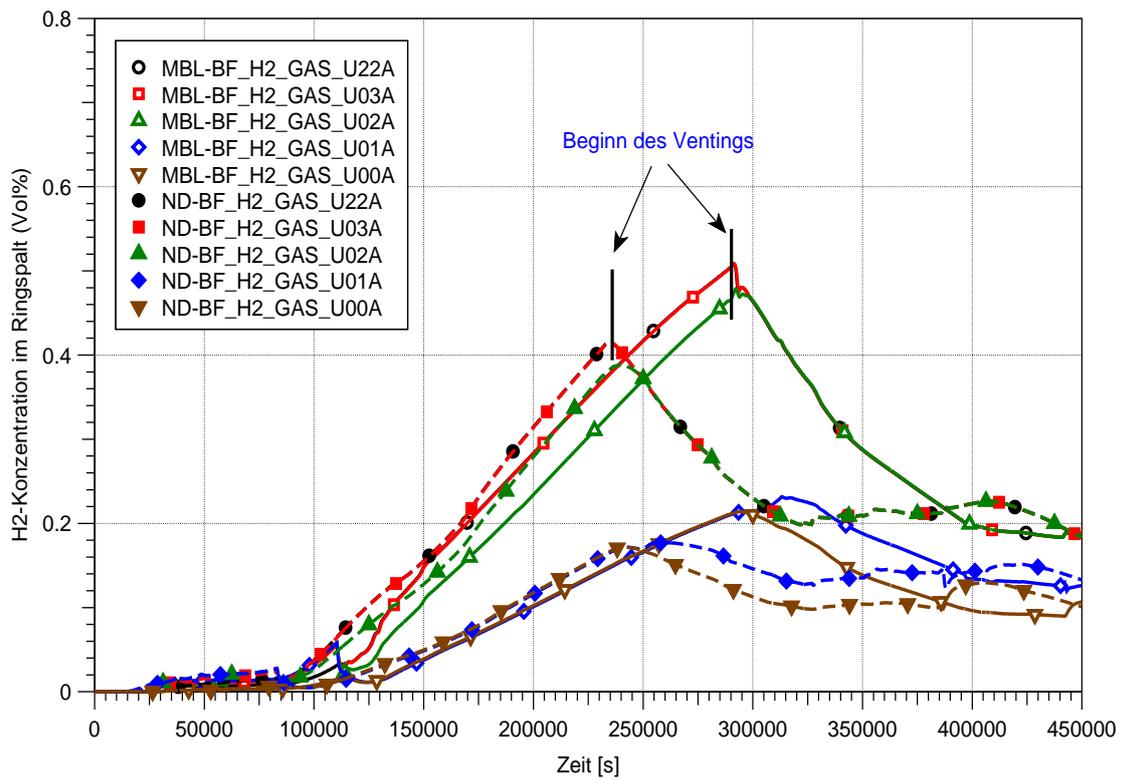


Abb. 5.61 H₂-Konzentration im Ringspalt, Vergleich ND*- und MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

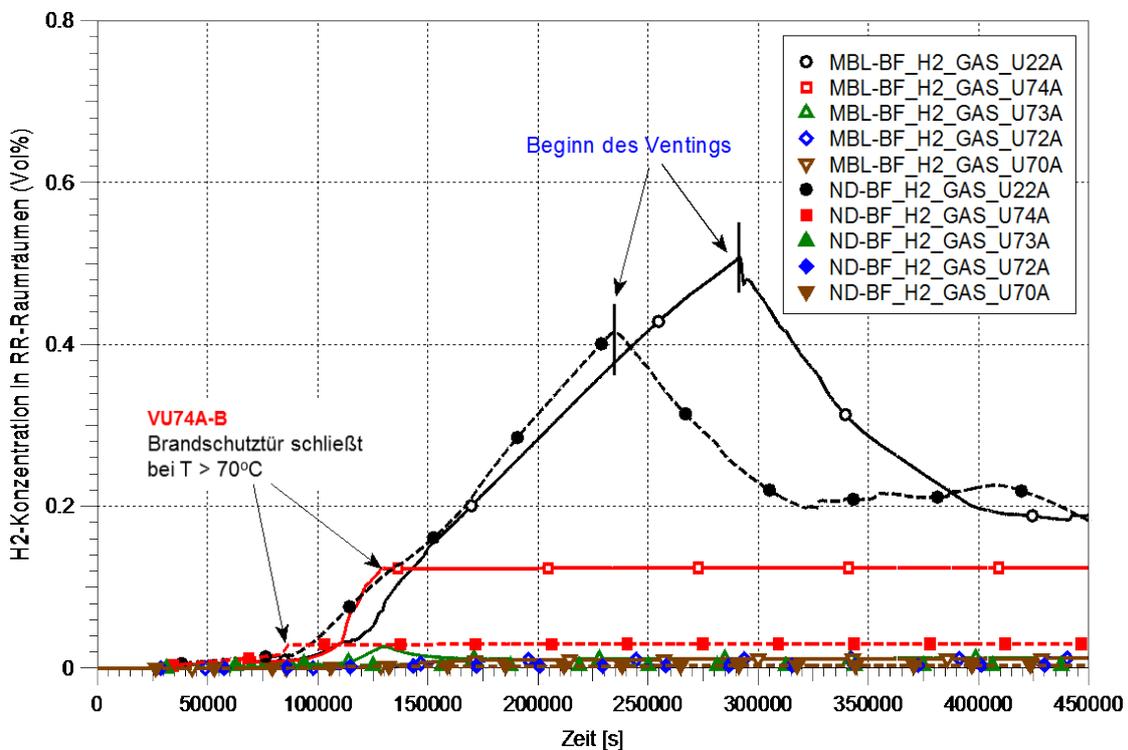


Abb. 5.62 H₂-Konzentration in separaten RR-Räumen (Zonen U7*A), Vergleich ND*- und MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

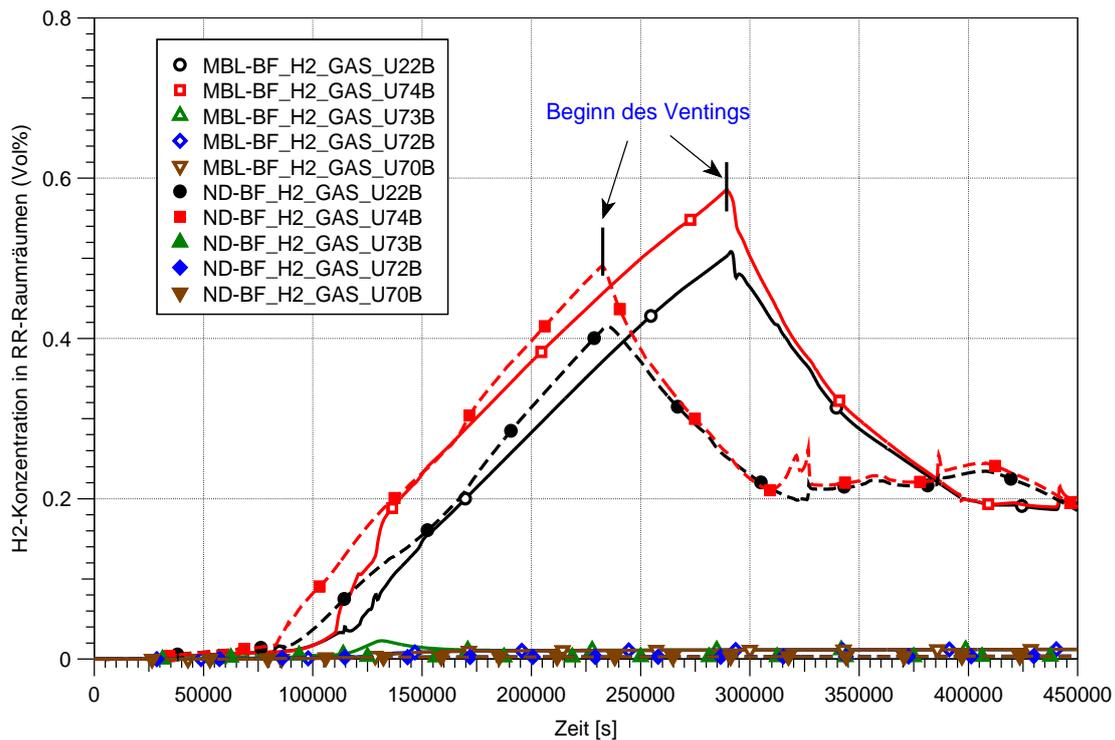


Abb. 5.63 H₂-Konzentration in separaten RR-Räumen (Zonen U7*B), Vergleich ND*- und MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

Die Aerosol- und die Xe-Konzentration in ausgewählten Zonen entlang der Höhe des Ringspalt sind in Abb. 5.64 und Abb. 5.65 für den ND*-Basisfall und den MBL-Basisfall miteinander verglichen. Wie bereits für den MBL-Basisfall mit Auslegungsleckage in Kap. 5.1.1 erläutert, kann nur eine begrenzte sehr geringe Menge an Aerosolen in den Ringraum freigesetzt werden, da die Leckage sehr gering ist. Diese ist im ND*-Fall sogar noch geringer. Wiederum nimmt die luftgetragene Aerosolmasse im Ringspalt nach beendeter Freisetzung andauernd ab, was auf die laufende RR-Störfallabsaugung im Wesentlichen zurückzuführen ist. Die Edelgaskonzentration im Ringspalt ist vergleichbar zum MBL-Basisfall. Für diesen Fall sind keine Variationsrechnungen erforderlich.

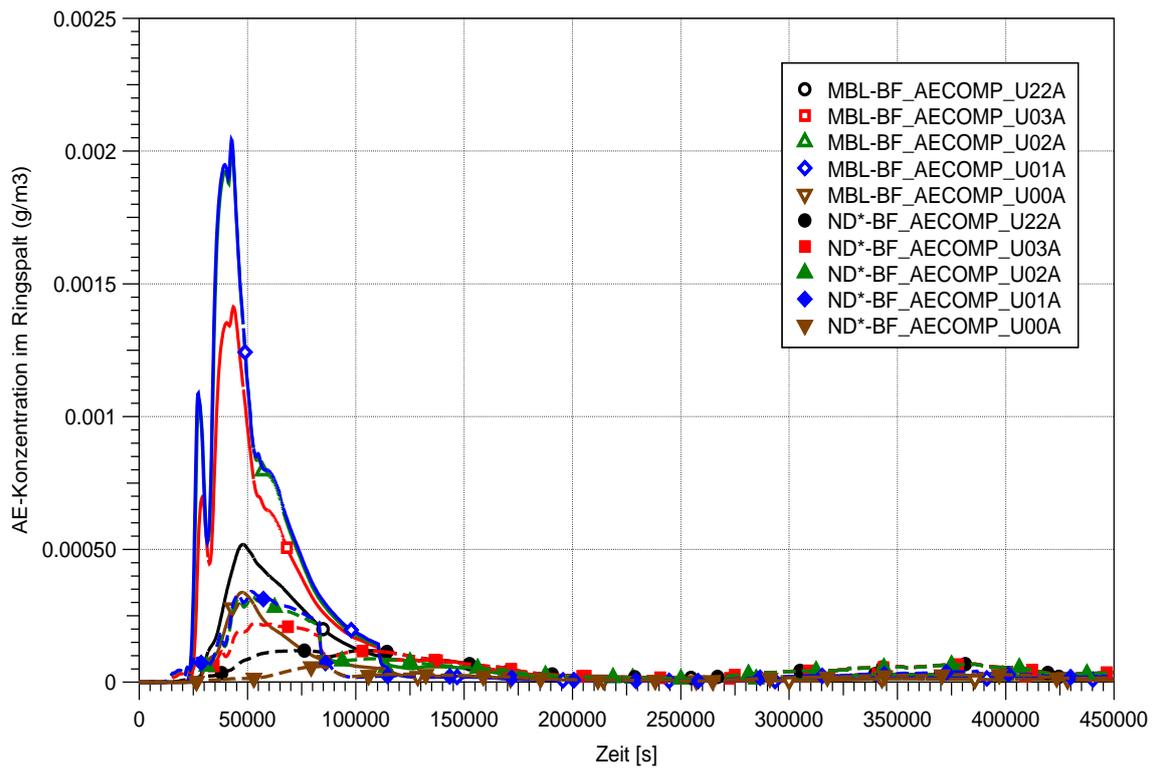


Abb. 5.64 Aerosol-Konzentration in Zonen entlang der Höhe des Ringspalt (Zonen U7*B), Vergleich ND*- und MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

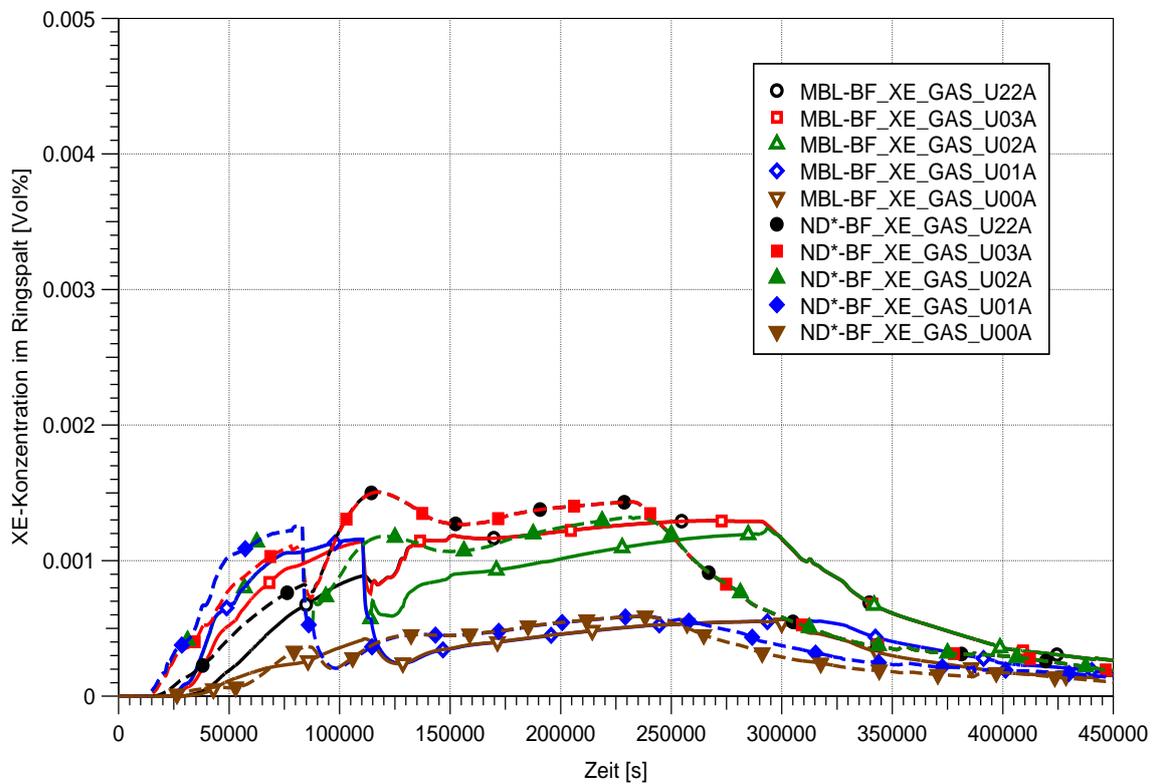


Abb. 5.65 Xe-Konzentration in Zonen entlang der Höhe des Ringspalt, Vergleich ND*- und MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage

5.3.2 Variationsfälle mit 10-facher Auslegungsleckage des SHB

Die Ergebnisse der beiden analysierten Unfallszenarien (MBL und ND*) wurden auch für die Fälle mit 10-fachen Auslegungsleckagen aus dem Sicherheitsbehälter miteinander verglichen. Auch in diesen beiden Fällen ist die RR-Störfallabsaugung in Betrieb.

Der Vergleich des mit COCOSYS berechneten Druckverlaufs im Sicherheitsbehälter für die beiden Fälle mit 10-fachen Auslegungsleckagen ist in Abb. 5.66 dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass wie im ND*-Basisfall die gefilterte Druckentlastung des Sicherheitsbehälters ca. 16 Stunden früher beginnt als im MBL-Fall.

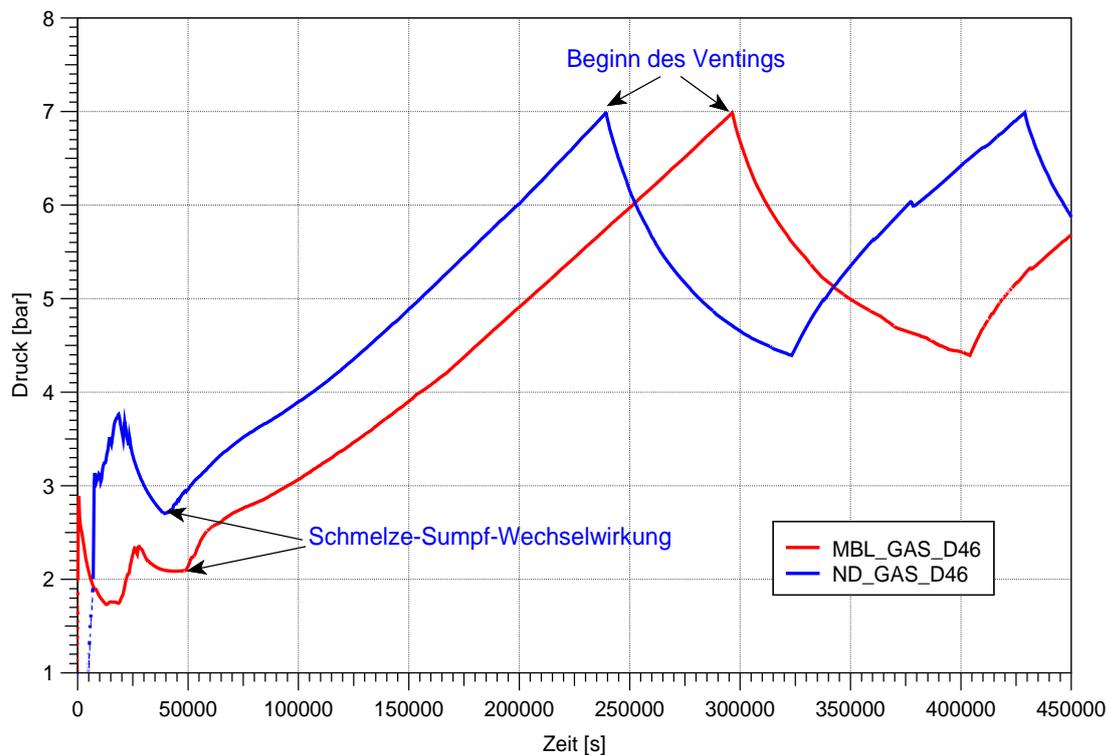


Abb. 5.66 SHB-Druck, Vergleich ND*-Fall und MBL-Fall mit 10-facher SHB-Leckage

Die zeitlichen Verläufe der H_2 -Konzentration sind in ausgewählten Zonen des Ringspaltes in Abb. 5.67 – Abb. 5.69 für beide Fälle miteinander verglichen. Aus dem Vergleich ist deutlich zu sehen, dass im ND*-Fall die H_2 -Konzentration etwas schneller ansteigt als im MBL-Fall. Wie schon im Kap. 5.3.1 erläutert, schließen einzelne Brandschutztüren und Brandschutzklappen im ND*-Fall früher als im MBL-Fall. Dadurch werden separate Räume des Ringraums auf 18-m-Ebene (z. B. Zone U74A) vom Gaseintrag frühzeitig ausgeschlossen (Abb. 5.68). Aufgrund der früheren SHB-Druckentlastung im ND*-Fall wird die untere Zündgrenze von 4 Vol.-% nicht überschritten.

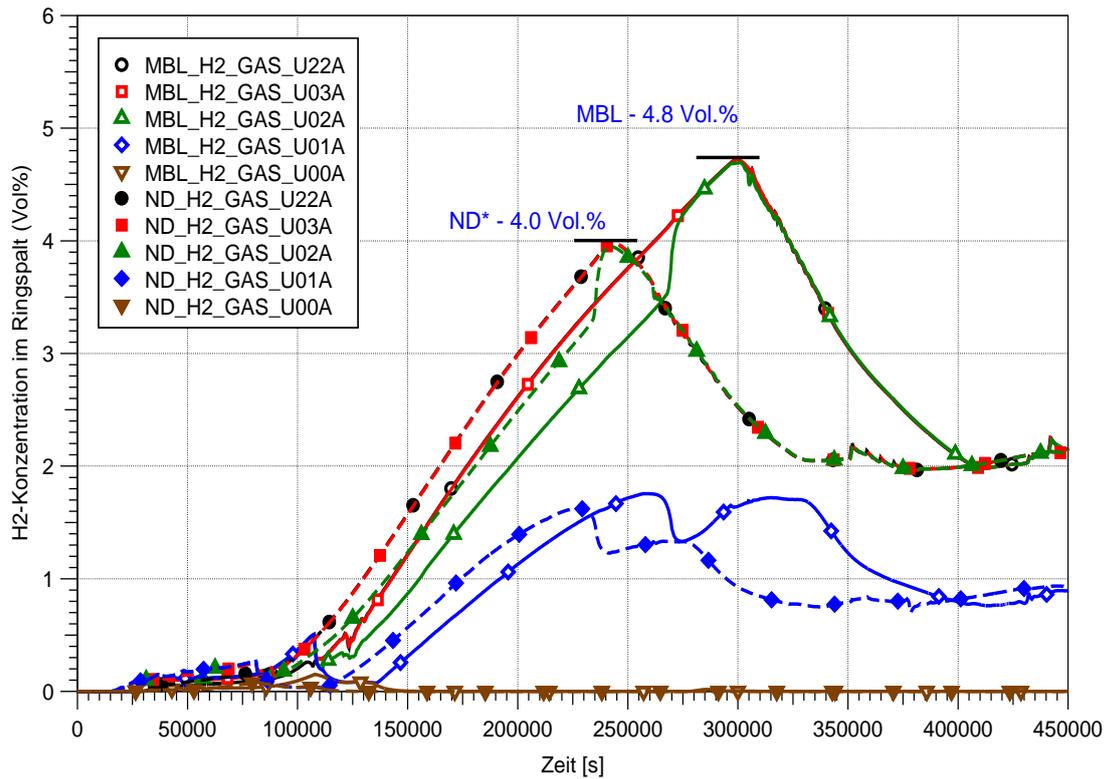


Abb. 5.67 H₂-Konzentration im Ringspalt, Vergleich ND*-Fall und MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage

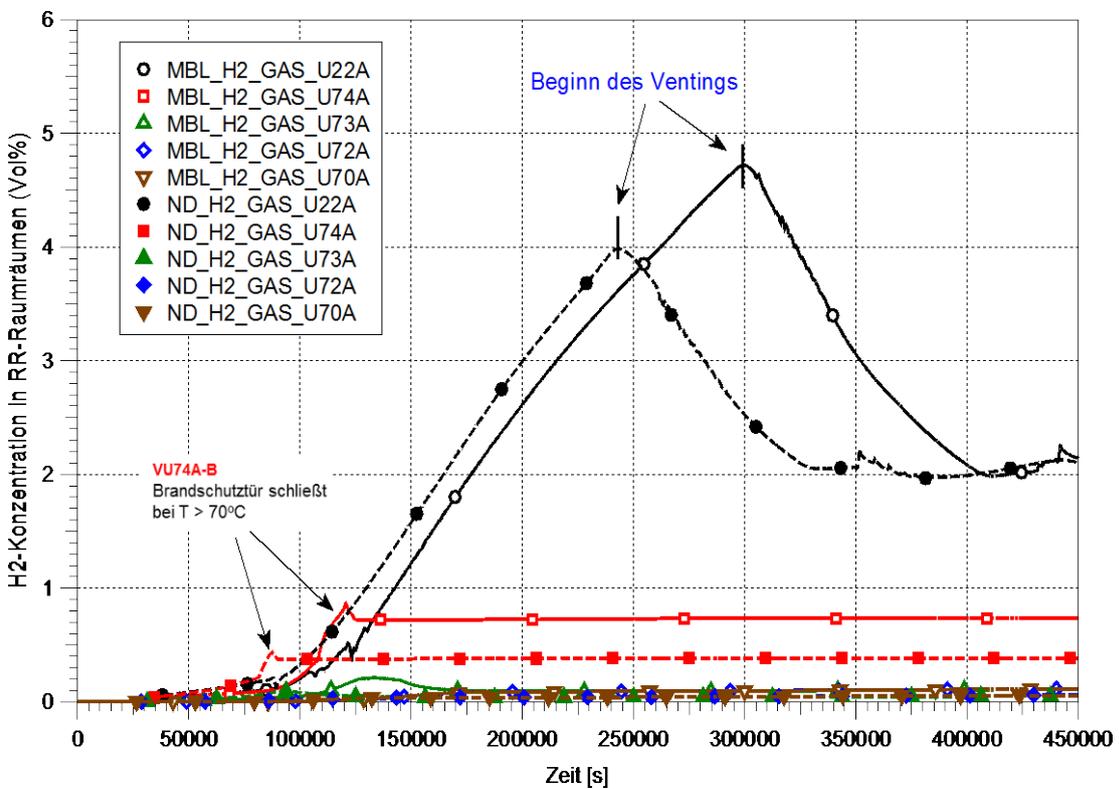


Abb. 5.68 H₂-Konzentration in RR-Räumen (Zonen U7*A), Vergleich ND*-Fall und MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage

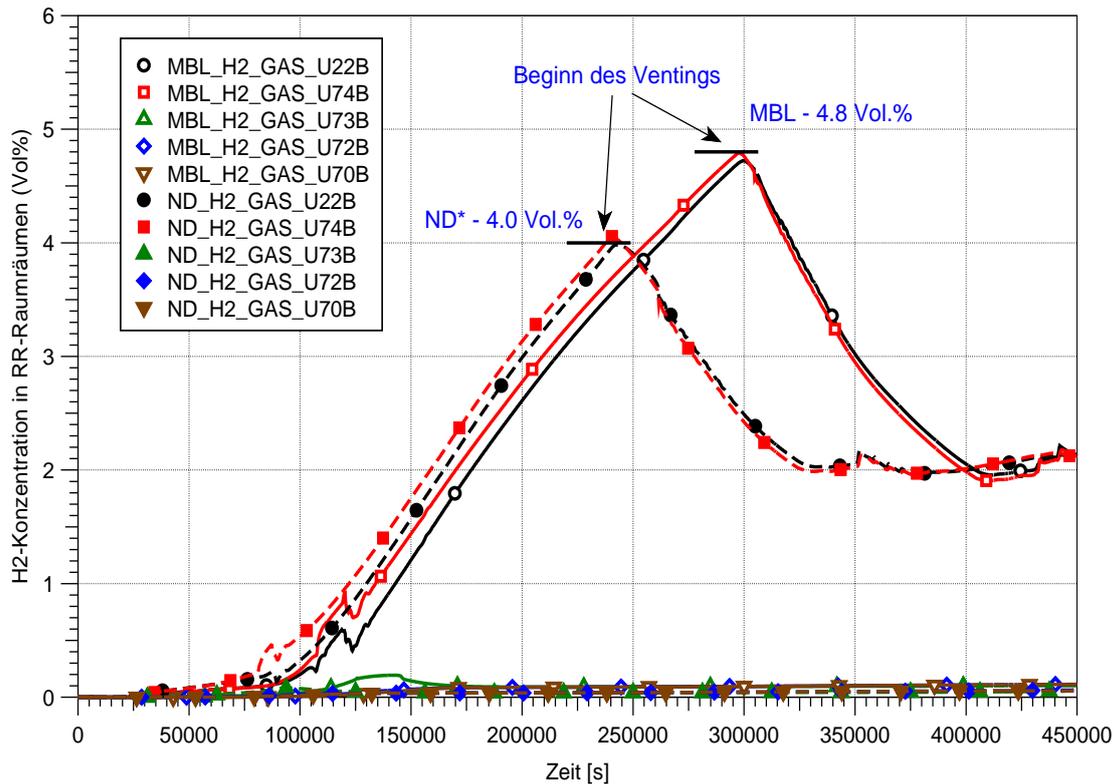


Abb. 5.69 H₂-Konzentration in RR-Räumen (Zonen U7*B), Vergleich ND*-Fall und MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage

Die Aerosol- und die Xe-Konzentration in ausgewählten Zonen entlang der Höhe des Ringspaltes sind in Abb. 5.70 und Abb. 5.71 für den ND*-Fall und den MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage miteinander verglichen. Wie bereits für den Vergleich der beiden Basisfälle mit SHB-Auslegungsleckage in Kap. 5.3.1 erläutert, kann nur eine begrenzte Menge an Aerosolen in den Ringraum freigesetzt werden, die um den Faktor 10 höher ist, als im jeweiligen Basisfall. Wiederum nimmt die luftgetragene Aerosolmasse im Ringspalt nach beendeter Freisetzung andauernd ab, was auf die laufende RR-Störfallabsaugung im Wesentlichen zurückzuführen ist. Die Edelgaskonzentration im Ringspalt ist wiederum vergleichbar zum MBL-Fall.

Für diesen Fall sind keine Variationsrechnungen erforderlich, da diese durch die für den MBL-Fall durchgeführten Rechnungen bereits abgedeckt sind.

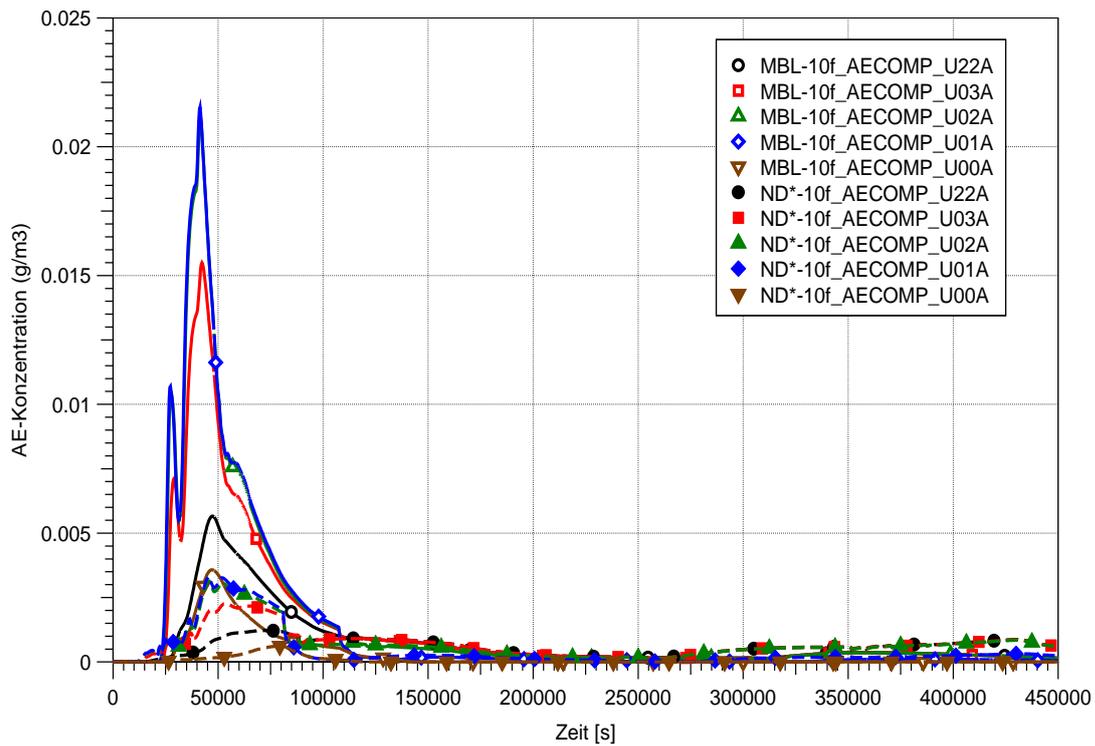


Abb. 5.70 Aerosol-Konzentration in Zonen entlang der Höhe des Ringspaltes, Vergleich ND*-Fall und MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage

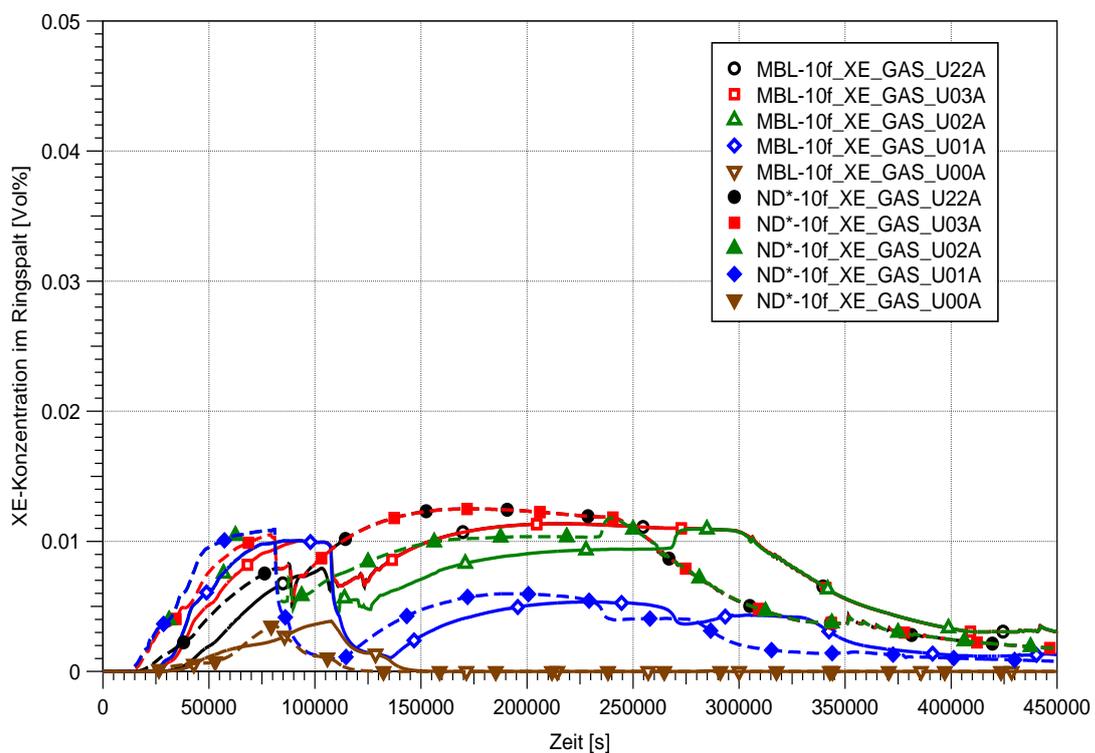


Abb. 5.71 Xe-Konzentration in ausgewählten Zonen des Ringspaltes, Vergleich ND*-Fall und MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage

5.4 Variationsfälle mit Schmelzeverlagerung in den Sumpf

5.4.1 MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage, Ausfall der RR-Störfallabsaugung und Schmelzeverlagerung in den Sumpf

In den bisher untersuchten Fällen wurde wie bei früheren Untersuchungen der GRS für die gleiche Referenzanlage /SON 01/, /BAN 12/ keine Schmelzeverlagerung in den SHB-Sumpf nach dem Durchdringen des biologischen Schildes unterstellt. Neuere Analysen weisen darauf hin, dass ein Schmelzeaustrag nach Durchdringen des biologischen Schildes in den SHB-Sumpf nicht auszuschließen und sogar wahrscheinlich ist. Zusätzlich zu den bisher betrachteten Fällen wurde noch eine Variantenrechnung zum MBL-Fall unter Berücksichtigung einer Schmelzeverlagerung in den Sumpf durchgeführt. Dabei wurden eine 10-fache Auslegungsleckage und der Ausfall der RR-Störfallabsaugung unterstellt.

Nach dem Durchschmelzen des biologischen Schildes (nach ~13,5 h oder ~49 000 s) verlagern sich ca. 42 m³ (49 %) der Schmelze in den Sumpf. Mit der Schmelze wird auch ein Anteil der enthaltenen Radionuklide mit übertragen. Der Anteil an Nachzerfallsleistung wurde an den prozentualen Anteil der übertragenen Schmelze angepasst.

Die Rechnungen zeigen, dass der in der Reaktorgrube verbleibende Teil der Schmelze den Beton weiterhin erodiert, obwohl die Schmelze mit Wasser überdeckt wird. Die Erosion schreitet hier bis zum Ende der Rechnung weiter voran. Durch die deutlich größere Bodenfläche des Sumpfes im Vergleich zur Reaktorgrube breitet sich die Schmelze dort weit aus, die Schichtdicke ist vergleichsweise gering, so dass die Schmelze effektiv gekühlt wird. Kurze Zeit nachdem die Schmelze in den Sumpf austritt, kommt der Erosionsprozess zum Erliegen und es findet dort keine H₂- und CO-Produktion mehr statt (Abb. 5.73). Somit werden integral weniger brennbare Gase in den SHB freigesetzt. Nach dem Kontakt des Wassers mit der Schmelze sowohl im Sumpf als auch in der Reaktorgrube kommt es zu einer anhaltenden höheren Dampfproduktion im SHB, was einen schnelleren Anstieg des Drucks zur Folge hat, als im Basisfall ohne Schmelzeverlagerung. Aufgrund der höheren Dampfproduktion beginnt die Druckentlastung des SHB deutlich früher (Abb. 5.72).

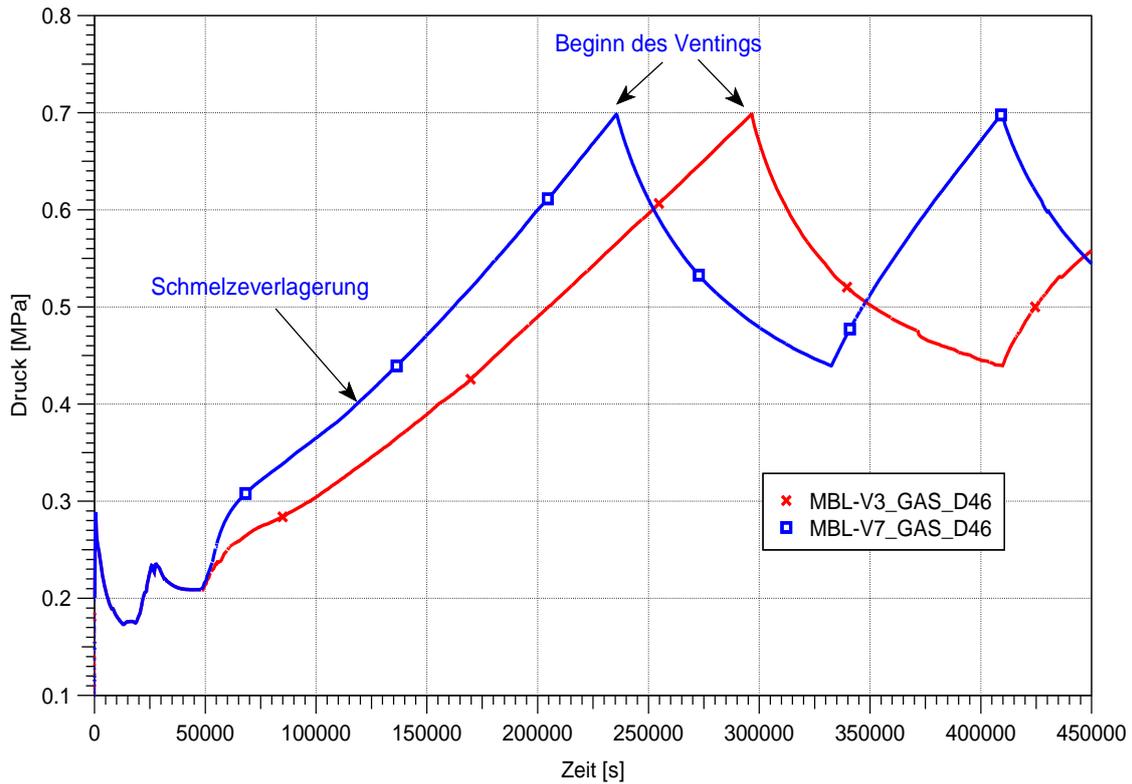


Abb. 5.72 SHB-Druckverlauf, MBL-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne (rot) und mit (blau) Schmelzeverlagerung in den Sumpf

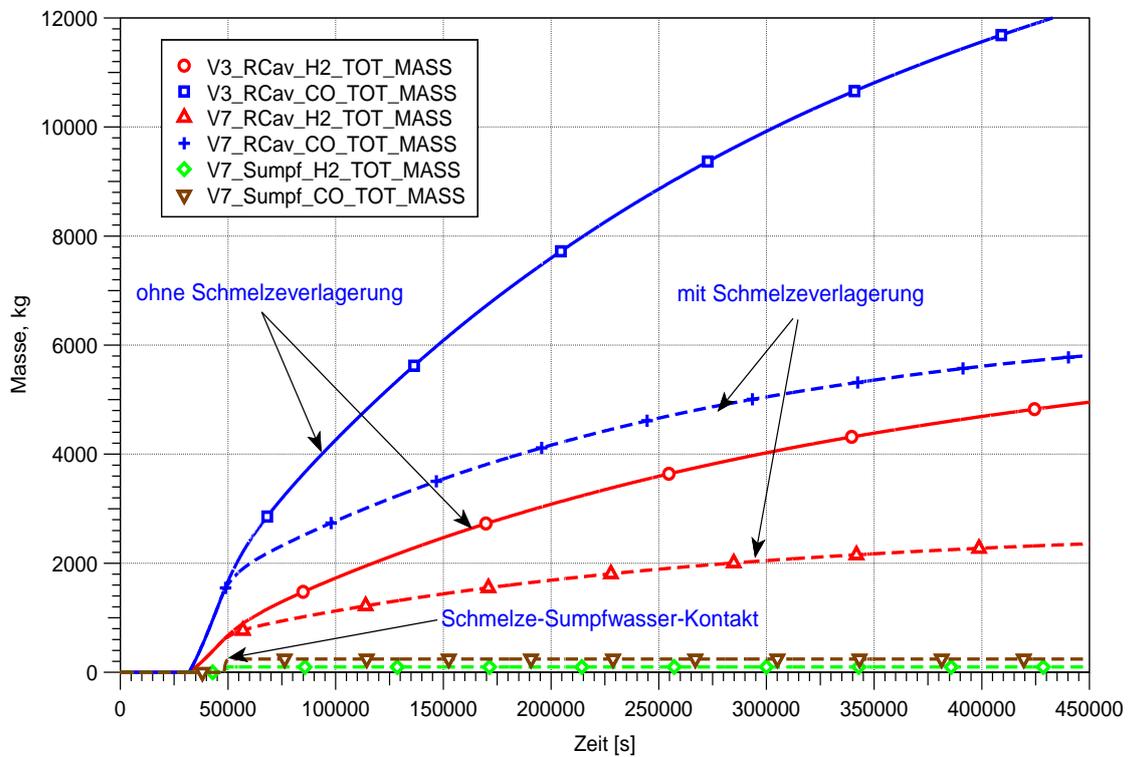


Abb. 5.73 Integral erzeugte H₂- und CO-Masse, MBL-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne und mit Schmelzeverlagerung in den Sumpf

Wegen der insgesamt geringeren Gasproduktion in den Rechnungen mit Schmelzeverlagerung sind die Rekos im SHB in der Lage, die H₂-Konzentration niedrig zu halten. Damit reduziert sich auch die in den RR übertragene Menge an H₂ deutlich. Die Abb. 5.74 und Abb. 5.75 zeigen, dass im SHB die untere Zündgrenze von 4 Vol.-% nicht überschritten wird, während die H₂-Konzentration im Ringraum sogar unterhalb von 2 Vol.-% bleibt, obwohl die RR-Störfallabsaugung nicht läuft.

Die Aerosol- und die Xe-Konzentration in ausgewählten Zonen entlang der Höhe des Ringspaltes sind in Abb. 5.76 und Abb. 5.77 für die MBL-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage und mit bzw. ohne Schmelzeverlagerung in den Sumpf miteinander verglichen. Anders als für die H₂-Situation sind der Aerosol- und Edelgaseintrag über die SHB-Leckage in den RR in beiden Fällen ähnlich. Dies ist damit begründet, dass sich die Aerosol- und Edelgasfreisetzung erst langfristig nach dem Schmelzeübertrag in den Sumpf ändert, da ein Teil der Schmelze dann erstarrt. Zu diesem Zeitpunkt ist aber die wesentliche Freisetzung von Radionukliden aus der Schmelze bereits abgeschlossen.

Auch für diesen MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Schmelzeübertrag in den Sumpf sind keine Variationsrechnungen erforderlich, da diese durch die für den MBL-Fall ohne Schmelzeübertrag durchgeführten Rechnungen bereits abgedeckt sind. Dies gilt auch für die Berücksichtigung von Notfallmaßnahmen.

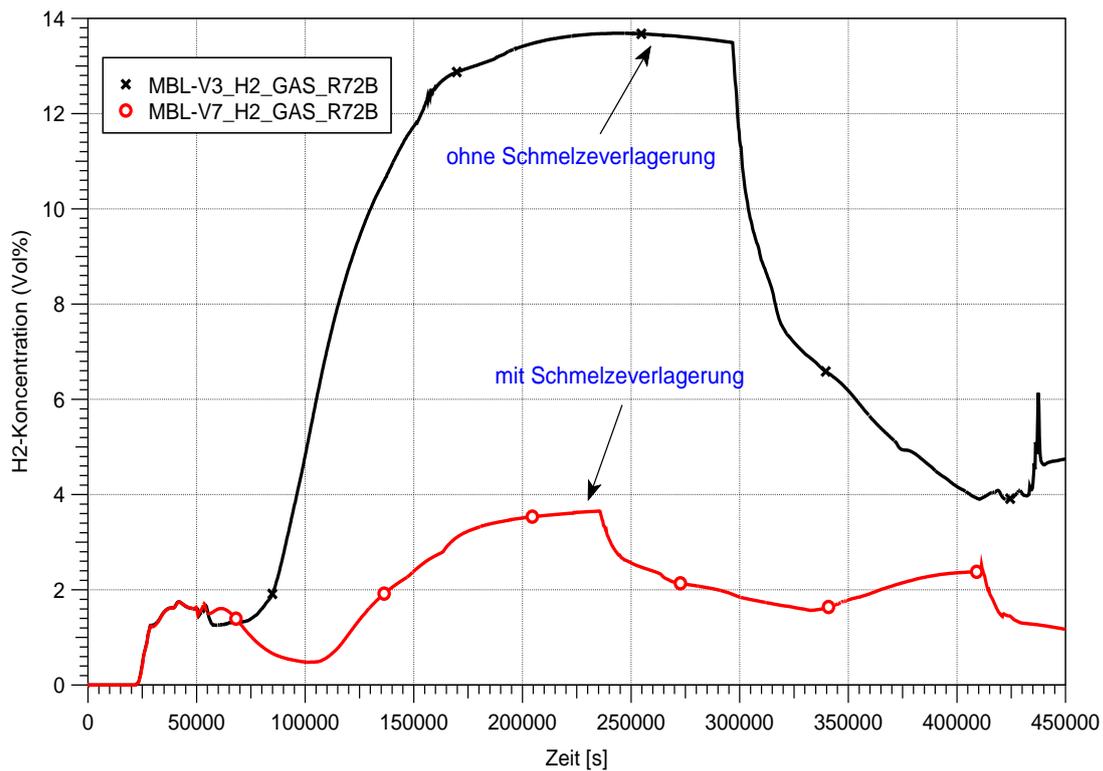


Abb. 5.74 H₂-Konzentration im SHB, MBL-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne (schwarz) und mit (rot) Schmelzeverlagerung in den Sumpf

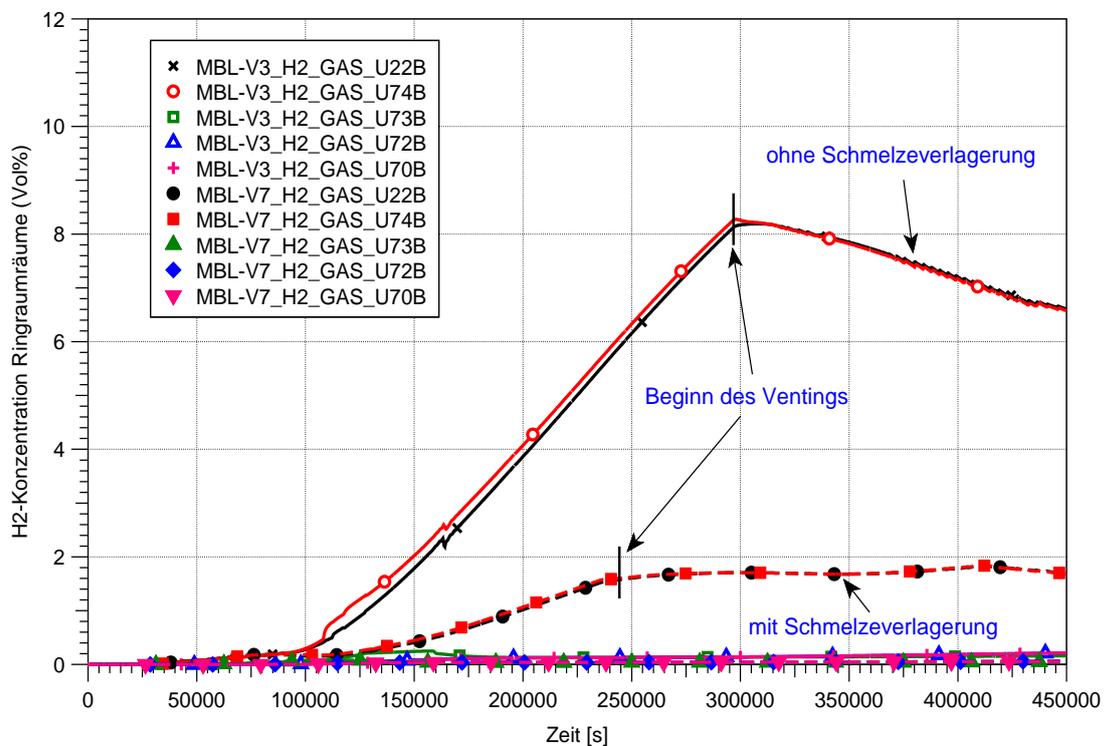


Abb. 5.75 H₂-Konzentration in ausgewählten RR-Räumen (Zonen U7*B), MBL-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne (offene Marker) und mit (ausgefüllte Marker) Schmelzeverlagerung in den Sumpf

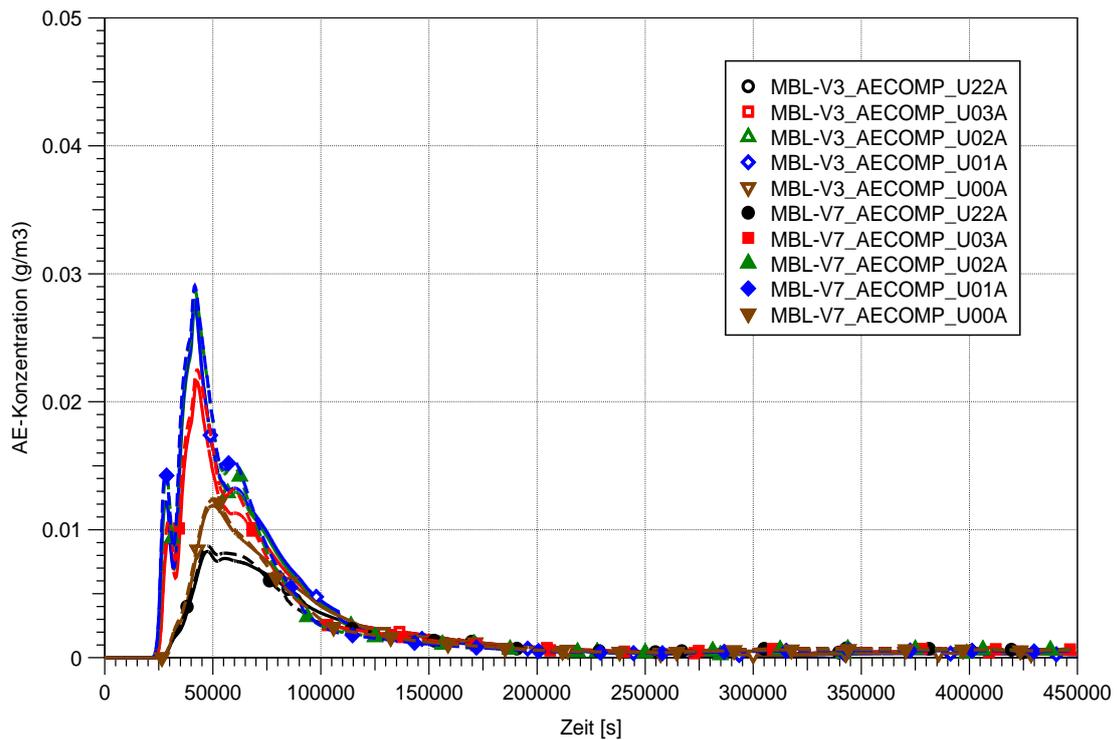


Abb. 5.76 Aerosol-Konzentration in Zonen entlang der Höhe des Ringspaltes, MBL-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne (offene Marker) und mit (ausgefüllte Marker) Schmelzeverlagerung in den Sumpf

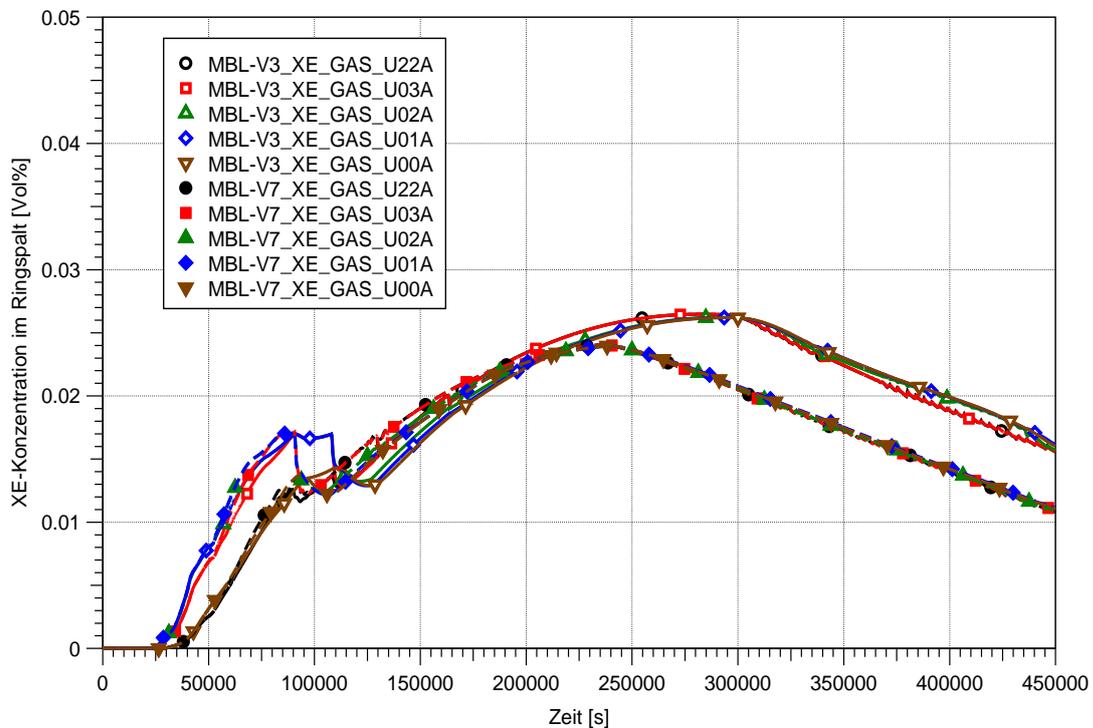


Abb. 5.77 Xe-Konzentration in ausgewählten Zonen des Ringspaltes, MBL-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne (offene Marker) und mit (ausgefüllte Marker) Schmelzeverlagerung in den Sumpf

5.4.2 ND*-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage des SHB, Ausfall der RR-Störfallabsaugung und Schmelzeverlagerung in den Sumpf

Abschließend wurde für den ND*-Fall auch noch eine Variantenrechnung mit 10-facher Auslegungsleckage und Ausfall der RR-Störfallabsaugung sowie mit unterstellter Schmelzeverlagerung in den Sumpf durchgeführt. Auch im ND*-Fall wird berechnet, dass sich nach dem Durchschmelzen des biologischen Schildes (nach ~11,1 h oder ~40 000 s) etwa 42 m³ (49 %) der Schmelze in den Sumpf verlagern. Wie im MBL-Fall kommen nach der Schmelzeverlagerung die in der Reaktorgrube verbleibende Schmelze als auch die verlagerte Schmelze im SHB-Sumpf mit Wasser in Kontakt. Trotz der zu dem früheren Zeitpunkt erfolgten Schmelzeverlagerung im Vergleich zum MBL-Fall kommt es zur Erstarrung der Schmelze im SHB-Sumpf. Die in der Reaktorgrube verbleibende Schmelze erodiert den Beton weiter, so dass die Erosion dort bis zum Ende der Rechnung andauert. Die insgesamt freigesetzte Masse brennbarer Gase (H₂, CO) zeigt Abb. 5.78.

Nach dem Kontakt der Schmelze mit Sumpf-Wasser kommt es wie im MBL-Fall zu einer anhaltenden höheren Dampfproduktion im SHB. Aufgrund der höheren Dampfproduktion steigt in der Rechnung mit Schmelzeverlagerung der SB-Druck schneller an, als im ND*-Fall ohne Schmelzeverlagerung. Nach etwa 140 000 s (1,6 d) ist im ND*-Fall mit Schmelzeverlagerung die Reaktorgrube (RG) durch den Wärmeeintrag von der Schmelze fast vollständig ausgetrocknet. Danach wird weniger Dampf erzeugt und somit steigt der Druck im SHB bis zum Beginn der Druckentlastung etwas langsamer an. Mit Beginn der Druckentlastung bei 174 000 s (ca. 2 d) wird gleichzeitig eine Wassereinspeisung in den Sumpf vorgenommen und die Wassermasse im Sumpf sowie auch in der Reaktorgrube nimmt verstärkt wieder zu. Damit verringert sich die Verdampfungsrates im Sumpf und der Druck im SHB sinkt schnell ab (Abb. 5.79).

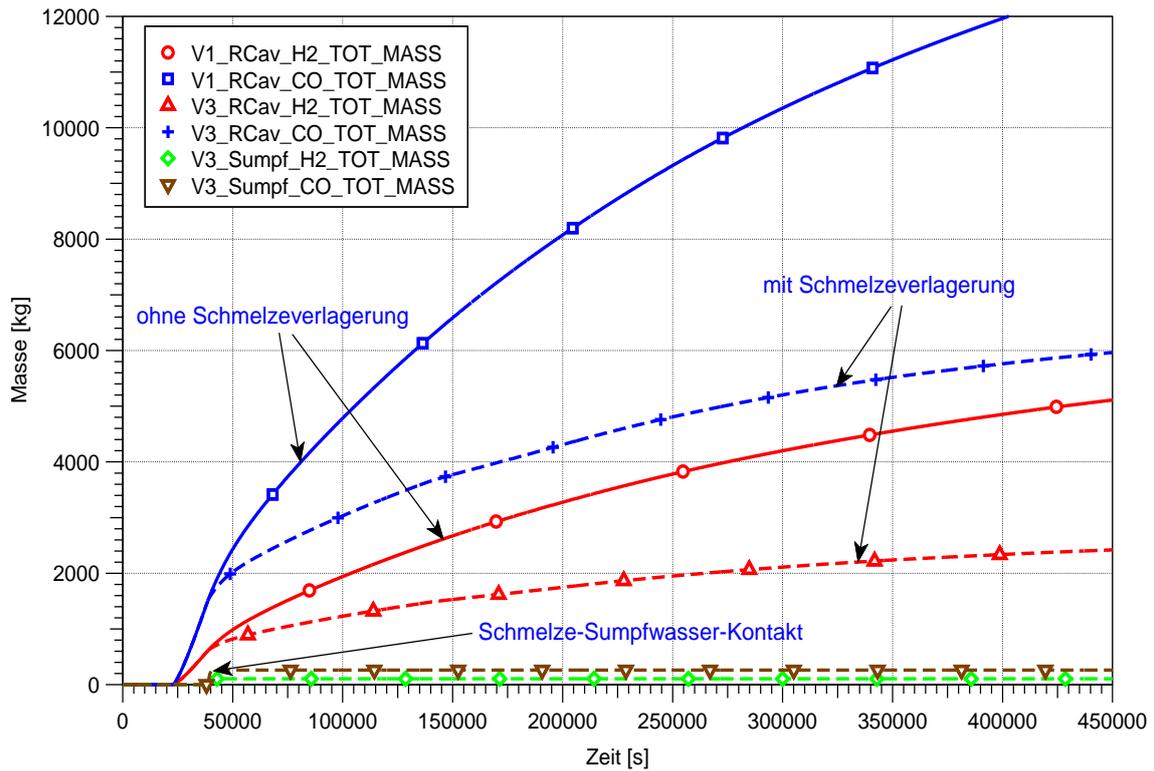


Abb. 5.78 Integral erzeugte H₂- und CO-Masse, ND*-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne und mit Schmelzeverlagerung in den Sumpf

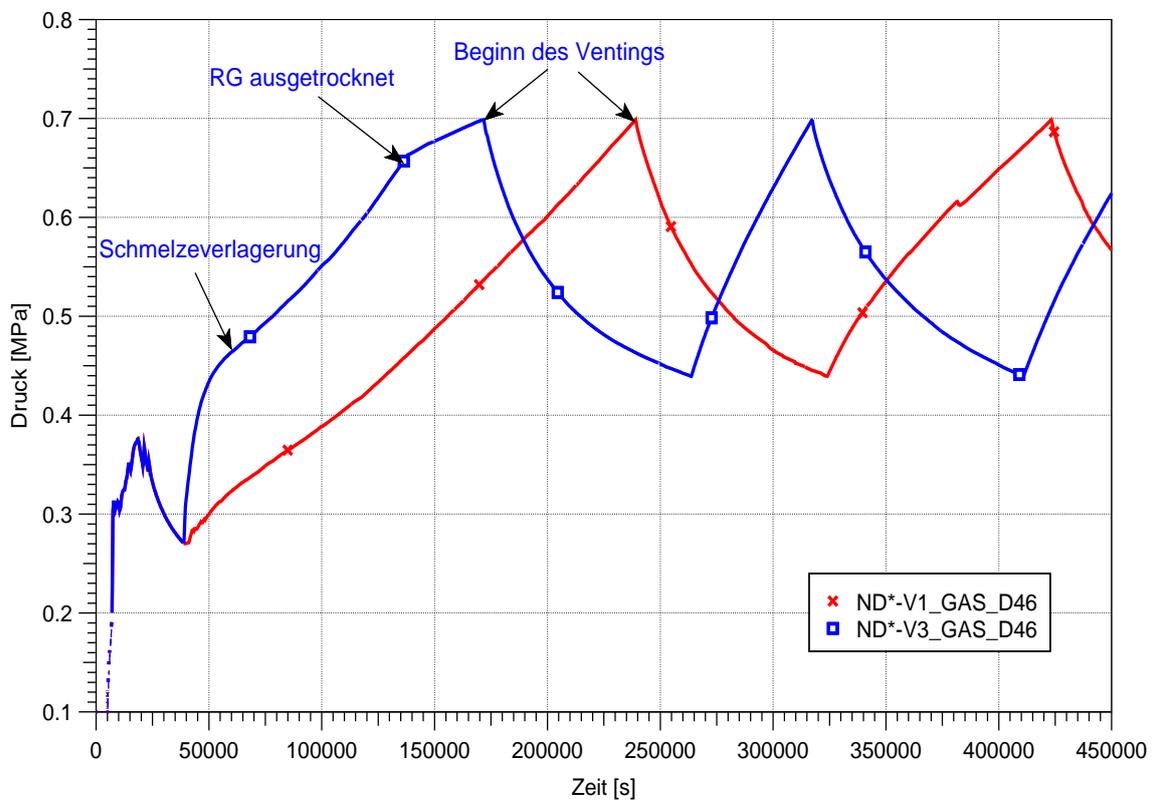


Abb. 5.79 SHB-Druckverlauf, ND*-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne (rot) und mit (blau) Schmelzeverlagerung in den Sumpf

Wegen der insgesamt geringeren Gasproduktion sind in den Rechnungen mit Schmelzeverlagerung die H₂-Konzentrationen im SHB und damit auch im Ringraum deutlich niedriger. Die Abb. 5.80 und Abb. 5.81 zeigen die H₂-Konzentration im SHB sowie auch im Ringraum. Es zeigt sich auch hier, dass für den ND*-Fall mit Schmelzeverlagerung die H₂-Konzentrationen im SHB sowie auch im Ringspalt so niedrig sind, dass keine brennbaren Gasgemische in den relevanten Räumen auftreten. Bis zum Ende der Rechnung liegen die Konzentrationen deutlich unterhalb der 4 Vol.-%-Grenze.

Die Aerosol- und die Xe-Konzentration in ausgewählten Zonen entlang der Höhe des Ringspalt es sind in Abb. 5.82 und Abb. 5.83 für die ND*-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage und mit bzw. ohne Schmelzeverlagerung in den Sumpf miteinander verglichen. Wie auch im MBL-Fall sind der Aerosol- und Edelgaseintrag über die SHB-Leckage in den RR in beiden Fällen ähnlich. Dies ist damit begründet, dass sich die Aerosol- und Edelgasfreisetzung erst langfristig nach dem Schmelzeübertrag in den Sumpf ändert, da ein Teil der Schmelze dann erstarrt. Zu diesem Zeitpunkt ist aber die wesentliche Freisetzung von Radionukliden aus der Schmelze bereits abgeschlossen.

Auch für diesen ND*-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Schmelzeübertrag in den Sumpf sind keine Variationsrechnungen erforderlich, da diese durch die für den ND*-Fall ohne Schmelzeübertrag durchgeführten Rechnungen bereits abgedeckt sind. Dies gilt auch für die Berücksichtigung von Notfallmaßnahmen.

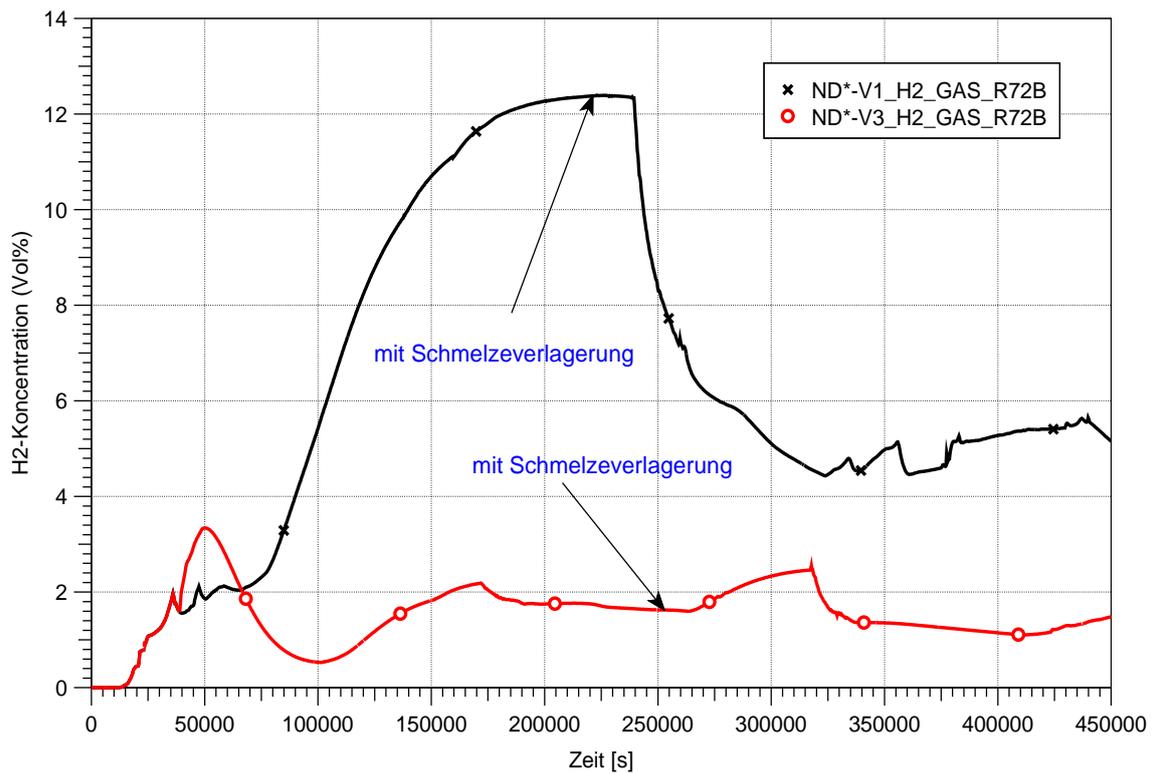


Abb. 5.80 H₂-Konzentration im SHB, ND*-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne (schwarz) und mit (rot) Schmelzeverlagerung in den Sumpf

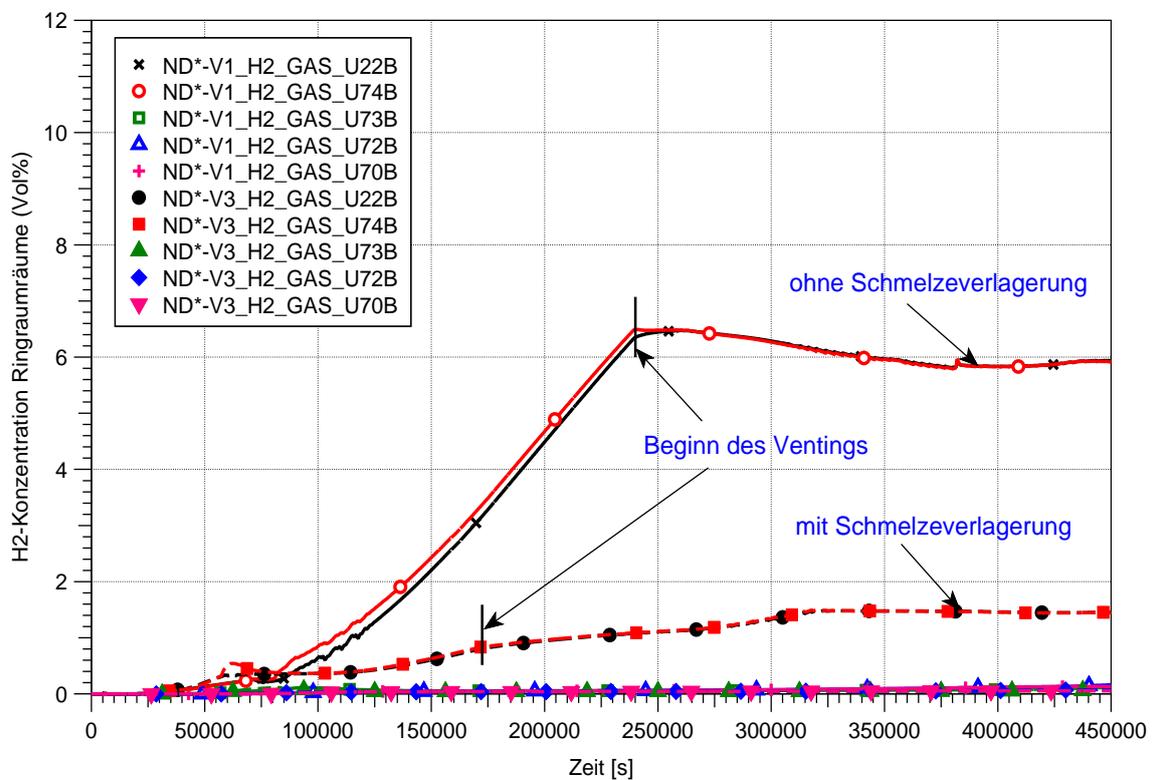


Abb. 5.81 H₂-Konzentration in separaten RR-Räumen (Zonen U7*B), ND*-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne (offene Marker) und mit (ausgefüllte Marker) Schmelzeverlagerung in den Sumpf

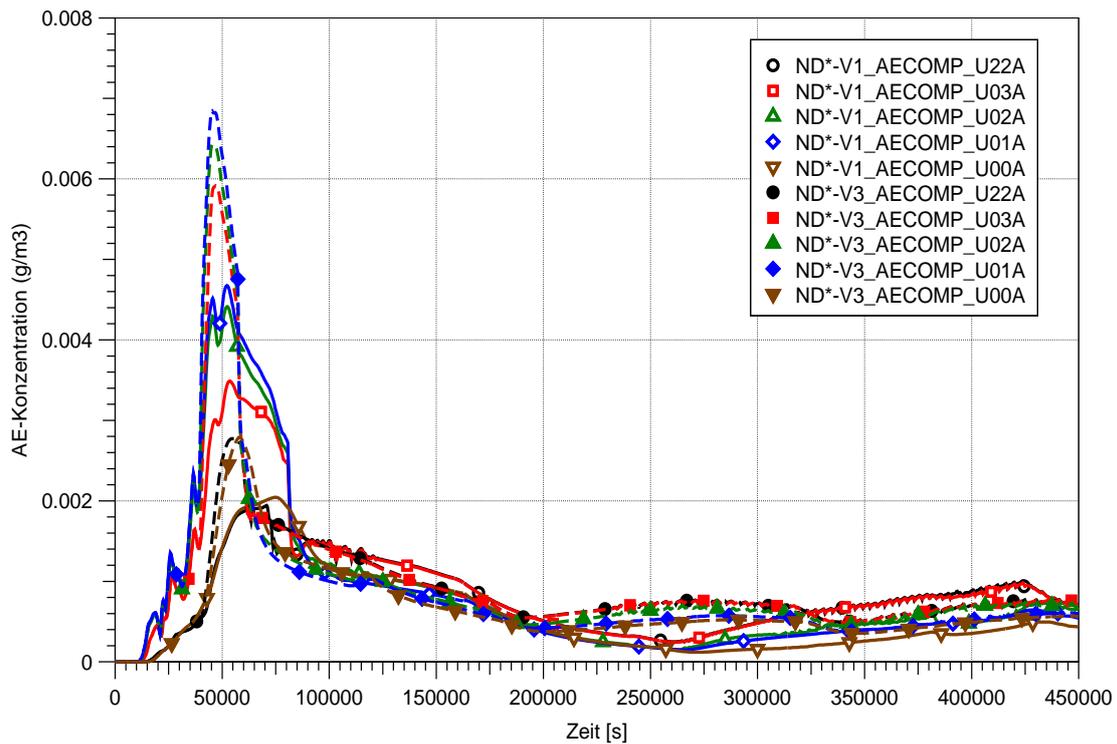


Abb. 5.82 Aerosol-Konzentration in Zonen entlang der Höhe des Ringspalt, ND*-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne (offene Marker) und mit (ausgefüllte Marker) Schmelzeverlagerung in den Sumpf

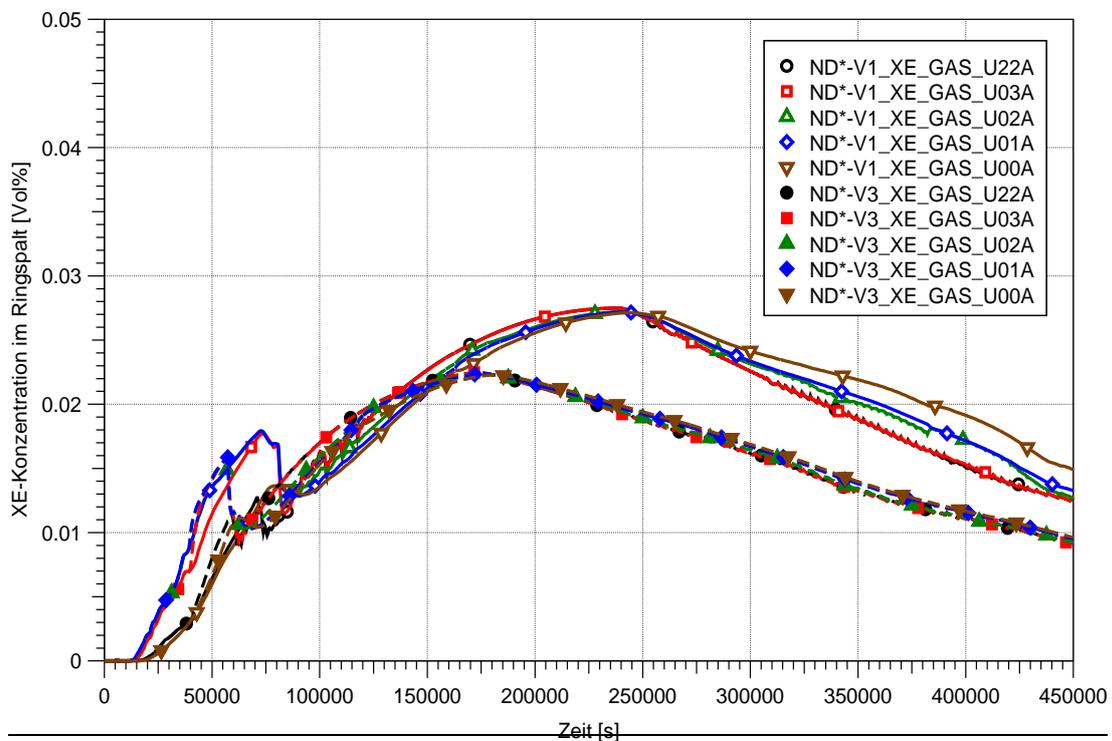


Abb. 5.83 Xe-Konzentration in ausgewählten Zonen des Ringspalt, ND*-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne (offene Marker) und mit (ausgefüllte Marker) Schmelzeverlagerung in den Sumpf

6 Erkennbarkeit der Situation im Ringraum

Die Möglichkeiten zu einer Erkennung von erhöhten Leckagen aus dem SHB in den RR eines DWR vom Typ KONVOI wurden anhand der Notfallunterlagen der Anlage und von groben Kenntnissen über vorhandene Messsysteme erörtert. Sie sind beschränkt, da keine Messtechnik zur Bestimmung der H₂-Konzentration im RR oder ein System zur Gasprobenahme existiert. Gemäß Angaben in den Notfallunterlagen der Anlage soll eine (qualitative) Erkennung des Anlagenzustandes durch Messung der Aktivitätsabgabe über die Fortluft mit Quelle aus im RR betriebenen Lüftungssystemen (i. W. die RR-Störfallabsaugung) oder durch das Ansprechen von Brandmeldern infolge Feuchteeintrag in den RR möglich sein.

Eine quantitative Bestimmung der Größe einer Leckage am SHB erscheint schwierig bzw. nicht möglich, die Unterschiede im Druckverlauf des SHB sind gering. Auch liegen in der Anlage in einem Unfallablauf keine Vergleichswerte für eine Entscheidung vor (anders als bei den Analysen). Die Bestimmung der Leckage wäre aber erforderlich bzw. wünschenswert, da erst bei erhöhten Leckagen aus dem SHB in den RR Gefährdungen durch eine Aufkonzentration von H₂ möglich sind. So kann die mögliche Gefahr einer Aufkonzentration von Wasserstoff nicht detektiert werden, die mit steigender Leckage zunimmt. Die ggf. in den Filtern der Lüftungssysteme gemessene Aktivität oder die über den Kamin freigesetzte Aktivität lassen auch keine konkreten Schlussfolgerungen zu, insbesondere dann nicht, wenn sie durch die Abgaben der gefilterten Druckentlastung des SHB überlagert sind. Damit ist es schwierig, mit Sicherheit die Notwendigkeit zusätzlicher Notfallmaßnahmen abzuleiten. Klar wird aus den Analysen, dass diese insbesondere dann erforderlich werden, wenn zusätzlich zu den erhöhten Leckagen auch noch die RR-Störfallabsaugung ausfällt.

Eine Messung der H₂-Konzentration im Ringraum oder eine Gasprobenahme würden die Erkennung des Anlagenzustandes erheblich vereinfachen und damit auch das Erfordernis der Einleitung von Notfallmaßnahmen signifikant verbessern.

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Forschungsvorhaben wurden mit Hilfe von deterministischen Analysen mit dem GRS-Rechenprogramm COCOSYS mögliche unfallbedingte Zustände im Ringraum (RR) des Reaktorgebäudes (RG) eines DWR vom Typ KONVOI hinsichtlich H₂-Ansammlung und Aerosol- und Edelgasbelastung als Folge von unterschiedlichen, unfallbedingten Leckagen aus dem Sicherheitsbehälter (SHB) untersucht. Für die Analysen wurden zwei repräsentative Unfallszenarien ausgehend aus dem Leistungsbetrieb zu Grunde gelegt:

- MBL-Fall - mittleres Leck am Kühlkreislauf mit Ausfall der aktiven Notkühlung nach Entleerung der Flutbecken (maximale Wassermenge im Sumpf) und
- ND*-Fall - Transiente mit Ausfall der DE-Bespeisung, primärseitiger Druckentlastung des Kühlkreislaufes und Ausfall der aktiven Notkühlung (minimale Wassermenge im Sumpf).

Diese Szenarien waren bereits in vorlaufenden Untersuchungen der GRS zur Nachanalyse des Reko-Konzeptes zum Wasserstoffabbau im SHB und zur Bewertung der Wirksamkeit der gefilterten SHB-Druckentlastung verwendet wurden, so dass die Ergebnisse das Gesamtbild der zu erwartenden Zustände in der Anlage unter Unfallbedingungen abrunden.

Die Analysen beziehen Empfehlungen der Reaktorsicherheitskommission (RSK) bzw. des RSK-Ausschusses Anlagen- und Systemtechnik (AST) zum Notfallschutz im Falle von unfallbedingten Leckagen aus dem SHB mit ein und berücksichtigen den aktuellen Stand der in den Notfallunterlagen der Referenzanlage vorgeschlagenen mitigativen Notfallmaßnahmen. Die nachfolgend genannten Notfallmaßnahmen zur Schadensbegrenzung wurden hinsichtlich ihrer Wirksamkeit analysiert,

- rechtzeitige Herstellung einer kontrollierten Belüftung des RR zur Begrenzung des Anstiegs der H₂-Konzentration durch Nutzung des Zu-/Abluftsystem des RG,
- Umwälzung der Atmosphäre im Ringraum zur Beseitigung von Schichtungen durch Nutzung von Umluftsystemen im RG,
- Absaugung von Ringraumlufte mit Maßnahmen zur Verringerung der Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung durch Nutzung der Bedarfsfilteranlage und Abgabe über den Kamin.

Darüber hinaus wurde eine weitere potentielle Notfallmaßnahme untersucht, die Installation von 4 mittleren Rekos im oberen Bereich des RR zum H₂-Abbau.

Für die Analysen im Forschungsvorhaben wurde nur von Leckagen im Bereich der Kabeldurchführungen durch den SHB ausgegangen, nicht an oder durch Schleusen und deren Lage auf dem Umfang des SHB variiert. Verschärfend wurde in Variationsrechnungen unterstellt, dass größere Leckagen als die Auslegungsleckagen des SHB (Faktor 10) bereits ab Eintritt des Ereignisses existieren, also ein zusätzlicher Fehler unterstellt. Die Randbedingungen bezüglich der SHB-Leckage wurden durch grundlegende Analysen der Durchführungen und Schleusen durch den SHB einer DWR-Anlage vom Typ KONVOI begründet. Darüber hinaus wurden strukturmechanische Untersuchungen zum Versagen des SHB und seiner Durchführungen ausgewertet. Im Ergebnis wurde festgehalten, dass der SHB einschließlich aller Durchführungen und Schleusen so ausgelegt ist, dass er unter Einhaltung der Auslegungsleckage (0,25 Vol.-%/d) den statischen, dynamischen und thermischen Einwirkungen aus Anlagenzuständen des Normalbetriebs sowie des anormalen Betriebs und aus Störfällen sowie sehr seltenen Ereignissen standhält. Er ist für eine Innendruckbelastung von 0,63 MPa bei einer Temperatur von 145 °C ausgelegt. Unter Unfallbedingungen würde durch die geplanten Notfallmaßnahmen der Druck im SHB durch Einleiten einer gefilterten Druckentlastung unter 0,7 MPa begrenzt. Größere SHB-Leckagen oder das lokale Versagen des SHB sind gemäß verschiedener ausgewerteter Untersuchungen erst im Druckbereich oberhalb von ~1,0 MPa zu befürchten.

Der im Vorhaben verwendete COCOSYS-Datensatz basiert auf einem in früheren Forschungsvorhaben der GRS für DWR KONVOI erstellten Datensatz, der eine sehr feine Unterteilung des SHB und eine vereinfachte Nodalisierung des Ringraums hatte. Entsprechend des Schwerpunkts der Untersuchungen - unfallbedingte Zustände im Ringraum - wurde dieser COCOSYS-Datensatz angepasst, das Detail der Nodalisierung des SHB reduziert und das des Ringraums erhöht, unter Berücksichtigung aller anlagenspezifischen Details. Ferner wurden alle relevanten Lüftungssysteme des RR modelliert, sowie die Rekos im SHB und das gefilterte Druckentlastungssystem.

Es wurden zunächst die Basisfälle beider o. g. Szenarien analysiert und anschließend eine große Anzahl von Variationsrechnungen vorzugsweise zum MBL-Fall durchgeführt, bei dem die Auswirkungen auf den RR stärker sind. Für die Auswertung der Ergebnisse wurden nur die Fälle herangezogen, die auch Ergebnisrelevant waren, wobei der Schwerpunkt auf der H₂-Freisetzung in den RR lag. Die Ergebnisse zu den freige-

setzten Massen an Aerosolen und Edelgasen in den RR sind vor allem im Vergleich zur Freisetzung über das SHB-Venting zu sehen und um den Einfluss des Ausfalls einzelner Lüftungssysteme zu bewerten bzw. die Wirksamkeit von Notfallmaßnahmen. Quantitativ sind je nach Kerninventar und Anlagenzustand zum Zeitpunkt eines Unfalls auch größere oder kleinere freigesetzte Radionuklidmassen möglich. Eine ins Detail gehende Auswertung bzgl. einzelner Elemente oder Nuklide war nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Der Vergleich der Ereignisse der beiden analysierten Szenarien zeigt, dass im ND*-Fall der RDB früher versagt und damit die Schmelze-Beton-Wechselwirkung ca. 2,5 h früher beginnt als im MBL-Fall. Aus diesem Grund wird beim ND*-Fall insgesamt etwas mehr H₂ erzeugt als im MBL-Fall, allerdings liegt der Zeitpunkt der Einleitung der gefilterten Druckentlastung des SHB ca. 16 Stunden früher.

Aus dem Vergleich der beiden Analysen zum Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage und betriebener RR-Störfallabsaugung ergibt sich, dass im ND*-Basisfall die H₂-Konzentration im RR etwas schneller ansteigt als im MBL-Basisfall. Allerdings ist die maximale H₂-Konzentration im RR, die zum Zeitpunkt der Einleitung der gefilterten Druckentlastung des SHB jeweils erreicht wird, niedriger als im MBL-Fall. Generell liegt bei beiden Basisfällen die H₂-Konzentration im Ringraum während des gesamten Unfallablaufs deutlich unterhalb der unteren Zündgrenze von 4 Vol.-%. Somit sind diesbezüglich keine Notfallmaßnahmen erforderlich.

Des Weiteren zeigten die Analysen, dass eine Reihe von Brandschutztüren und Brandschutzklappen in den separaten Räumen des RR auf den einzelnen Ebenen 4 bis 8 bei Erreichen des Kriteriums „Schließtemperatur 70 °C“ (erwartungsgemäß) schließen, so dass dann der weitere Gas- und Radionuklideintrag in diese Bereiche verhindert wird. Dies erfolgt frühzeitig im Unfallablauf und damit reduziert sich das freie Volumen des RR, das von der Leckage des SHB beeinflusst werden kann. Im ND*-Fall schließen die Brandschutztüren und Brandschutzklappen etwas früher im Unfallablauf als im MBL-Fall.

Bezüglich des Übertrags von Aerosolen und Edelgasen durch die SHB-Auslegungsleckage ist festzuhalten, dass nur eine begrenzte, sehr geringe Menge an Aerosolen in den Ringraum freigesetzt wurde, da die SHB-Leckage sehr gering ist. Dabei nimmt die luftgetragene Aerosolmasse im Ringspalt nach beendeter anfänglich stärkerer Freisetzung andauernd ab, da die Freisetzung aus der Schmelze im SHB einige Stunden

nach RDB-Versagen quasi beendet ist und sich die Aerosole im SHB letztlich bis zum Beginn der Druckentlastung nahezu vollständig ablagern, was den Anteil in der Leckage reduziert. Dagegen steigt die Ablagerung der Aerosole auf den Strukturen innerhalb des Ringspaltes kaum an, da die Ablagerung der Aerosole von der Partikelgrößenklasse der Aerosole abhängig ist (nur größere Aerosole über 0,1 – 0,5 µm lagern sich schnell ab) und vorwiegend kleinere Aerosole in den RR ausgetragen wurden. Somit werden die Aerosole aus der RR-Atmosphäre durch die laufende RR-Störfallabsaugung angesaugt und im Störfallfilter zurück gehalten. Zusätzlich werden auch die in den RR eingetragenen Edelgase sukzessive an die Umgebung abgegeben. Mit Beginn der SHB-Druckentlastung kommt es dann zusätzlich auch noch zu einem Austrag aus der SHB-Atmosphäre. Unter der Annahme eines Rückhaltefaktors von 1000 für Aerosole in allen Filtern der Anlage wird insgesamt nur ca. 1 g an Aerosolen in die Umgebung freigesetzt, wobei der maßgebliche Anteil über die SHB-Druckentlastung freigesetzt wird.

Zu den beiden Basisfällen mit SHB-Auslegungsleckage und betriebener RR-Störfallabsaugung wurden keine Variationsrechnungen durchgeführt, da die sich ergebenden Unfallbedingungen im RR den Einsatz von Notfallmaßnahmen nicht erfordern. Außerdem wurde bereits der „ungünstigste Ort“ der Leckage aus dem SHB gewählt, weit weg (gegenüber) vom Ort der Absaugung der RR-Störfallabsaugung.

Die durchgeführten Variationsfälle unterstellten zunächst eine 10-fache Auslegungsleckage in den RR. Jetzt kommt es in beiden Fällen - ND* und MBL - trotz laufender RR-Störfallabsaugung zu deutlich höheren H₂-Konzentrationen im oberen Bereich des Ringraumes. Die RR-Störfallabsaugung ist bei „ungünstiger Lage“ der Leckage des SHB nicht in der Lage, die Ausbildung brennbarer Gasgemische im oberen RR-Bereich zu verhindern, d. h. die H₂-Konzentration in allen Ringraumbereichen unterhalb der unteren Verbrennungsgrenze von 4 Vol.-% zu halten; die höheren Werte ergaben sich für den MBL-Fall. Es entstehen drei Gaskonzentrationsbereiche:

- hohe H₂-Konzentrationen (ca. 5 Vol.-%) oberhalb des Leckortes (16 - 41 m Ebene),
- mittlere H₂-Konzentrationen (ca. 2 Vol.-%) im Bereich des Leckortes (12 m Ebene),
- sehr niedrige H₂-Konzentrationen (< 0,1 Vol.-%) im unteren Bereich des Ringraums (unterhalb 6 m).

In beiden Fällen mit 10-facher Auslegungsleckage kommt es (wie zu erwarten) zu einer ca. 10-fach höheren Aerosolkonzentration im Ringraum vor allem in der frühen Unfallphase mit den großen Freisetzungen aus der Schmelze in den SHB und damit auch zu einem höheren Eintrag von Aerosolen in den Störfallfilter. In beiden Fällen wird insgesamt etwas mehr als ca. 1 g an Aerosolen in die Umgebung freigesetzt, wobei jetzt der Anteil aus dem RR ca. 1/10 davon umfasst.

In den bisher untersuchten Fällen wurde wie bei früheren Untersuchungen der GRS für die gleiche Referenzanlage keine Schmelzeverlagerung in den SHB-Sumpf nach dem Durchdringen des biologischen Schields der Reaktorgrube unterstellt. Neuere Analysen weisen darauf hin, dass ein Schmelzeaustrag nach Durchdringen des biologischen Schields in den SHB-Sumpf nicht auszuschließen und sogar wahrscheinlich ist. Die Ergebnisse der beiden Analysen mit Schmelzeverlagerung in den Sumpf des SHB zeigen insgesamt eine geringere Produktion nichtkondensierbarer Gase, da die Erosion nur in der Reaktorgrube voranschreitet und im Sumpf rasch zum Erliegen kommt. Dem steht eine höhere Dampfproduktion im SHB als Folge der Schmelzeausbreitung in den Sumpf gegenüber, was zu einem schnelleren langfristigen Anstieg des SHB-Drucks führt. Wegen der insgesamt geringeren Gasproduktion und des effektiven Abbaus durch die Rekos im SHB sind die H₂-Konzentrationen im SHB deutlich niedriger als im Falle ohne Schmelzeverlagerung, und damit auch im Ringraum. Dies gilt auch im Fall mit 10-facher Auslegungsleckage. In keinem der untersuchten Fälle wird die untere Zündgrenze von 4 Vol.-% im RR erreicht.

Auch für die Fälle mit Schmelzeverlagerung in den Sumpf sind der Aerosol- und Edelgaseintrag über die SHB-Leckage in den RR verglichen zu den Fällen ohne Schmelzeübertrag sehr ähnlich, ggf. etwas geringer. Dies ist damit begründet, dass sich die Aerosol- und Edelgasfreisetzung erst langfristig nach dem Schmelzeübertrag in den Sumpf ändert, da ein Teil der Schmelze dann erstarrt. Zu diesem Zeitpunkt ist aber die wesentliche Freisetzung von Radionukliden aus der Schmelze in den SHB bereits abgeschlossen, d. h. der Übertrag in den RR wird davon nur schwach beeinflusst.

Auch zu diesen Szenarien mit Schmelzeübertrag in den SHB-Sumpf wurden keine weiteren Variationsrechnungen durchgeführt, da die Auswirkungen auf den RR schwächer sind, als in den Vergleichsfällen ohne Schmelzeübertrag.

Die weiteren Variationsrechnungen auch zur Untersuchung der Wirksamkeit der Notfallmaßnahmen wurden dann am Beispiel des MBL-Falls mit unterstellter 10-facher

Auslegungsleckage und ohne Schmelzeverlagerung in den Sumpf durchgeführt, da dieser Fall die vergleichsweise stärksten Auswirkungen auf die Zustände im RR stellt und somit „repräsentativ abdeckend“ ist.

Eine Rechnung mit Variation des Leckageortes hin zur „günstigsten Stelle“ in der Nähe der Absaugstelle der RR-Störfallabsaugung ergibt erwartungsgemäß eine signifikante Verringerung der H₂-Konzentration im RR, da der in den Ringraum eintretende Wasserstoff direkt von der RR-Störfallabsaugung abgesaugt wird. Während des gesamten Unfallablaufs kommt es zu keiner Ausbildung brennbarer Gasgemische im RR. Da die Wirksamkeit der Absaugung erhöht wird, erhöht sich auch die Menge der im Filter zurückgehaltenen Aerosole ca. um den Faktor 4. Varianten mit einer an mehreren Orten auf gleicher Höhe verteilten SHB-Leckage wurden nicht untersucht, da sie durch die beiden Fälle mit SHB-Leckage am „günstigsten“ und „ungünstigsten“ Ort abgedeckt bzw. eingehüllt werden.

Durchgeführte Rechnungen mit Ausfall der RR-Störfallabsaugung zeigen, dass es dann zunächst zu einem bleibenden schwachen Überdruck im RR kommt, was sonst durch die RR-Störfallabsaugung wirksam verhindert wird. Damit wird dann die Gasatmosphäre im Ringraum über Leckagen am Tor in das Hilfsanlagegebäude (HAG) und weiter in die Umgebung ungefiltert freigesetzt, solange nicht die Bedarfsfilteranlage zum Einsatz kommt, und einen Unterdruck im RR erzeugt. In dieser Variationsrechnung treten im Vergleich zum Basisfall verstärkt brennbare Zustände im Ringraum auf. Die H₂-Konzentration steigt bis zum Zeitpunkt der Druckentlastung bis auf 8 Vol.-% an. Auch führt der Ausfall zu noch höheren Aerosolkonzentrationen im RR im Vergleich zum Basisfall, und zu anhaltend ungefilterten Freisetzungen von Aerosolen über das HAG in die Umgebung.

Am Beispiel des MBL-Falls mit unterstellter 10-facher Auslegungsleckage, meist auch mit Ausfall der RR-Störfallabsaugung und ohne Schmelzeverlagerung in den Sumpf wurde dann die Wirksamkeit der o. g. mitigativen Notfallmaßnahmen zur Schadensbegrenzung untersucht.

Ein Zuschalten der Zu-/Abluftanlagen des RG im Verlaufe des Unfalls (nach ca. 2 Tagen) reduziert wesentlich die H₂-Konzentration im RR und verhindert die Ausbildung brennbarer Gasgemische im RR wirksam. Dadurch verringert sich auch wesentlich die luftgetragene Aerosolkonzentration im RR, allerdings werden dann zusätzlich zu den Edelgasen auch Aerosole ungefiltert in die Umgebung freigesetzt, falls nicht die Be-

darfsfilteranlage zusätzlich in Betrieb genommen wird. Deren Einsatz reduziert die Aerosolabgabe dann wiederum auf Werte Unterhalb der Abgabe über die gefilterte Druckentlastung des SHB.

Ein frühzeitiges Zuschalten der Umluftanlage im Ringraum, zusätzlich zum Betrieb der RR-Störfallabsaugung kann die H₂-Konzentration im RR nicht spürbar verringern, da die Rückspeisung der im Kuppelbereich des RR abgesaugten Luft sehr hoch im Ringspalt des RR erfolgt. Die Umluft kann nur zu einer weiter verbesserten Durchmischung der Atmosphäre im oberen RR-Bereich beitragen, was allerdings nicht wirklich erforderlich erscheint, da auch ohne Nutzung der Umluft dort bereits gut durchmischte Zustände vorliegen.

Bezüglich der Verhinderung brennbarer Gasgemische im Ringraum wurde mit einer Variationsrechnung gezeigt, dass der zusätzliche Einbau von 4 mittleren Rekos im Bereich oberhalb der obersten Ebene (21,5 m) des Ringraums (Annahme im Vorhaben) die Ausbildung brennbarer Gasgemische im RR wirksam verhindert. Auswirkungen auf die Aerosolzustände im RR sind nicht zu erwarten; die Ablagerung ist auch in anderen Fällen gering. Weitere Variantenrechnungen dazu wurden nicht durchgeführt.

Abschließend wurden die Möglichkeiten zu einer Erkennung von erhöhten Leckagen aus dem SHB in den RR eines DWR vom Typ KONVOI an Hand der Notfallunterlagen der Anlage und von groben Kenntnissen über vorhandene Messsysteme erörtert. Sie sind beschränkt, da keine Messtechnik zur Bestimmung der H₂-Konzentration im RR oder ein System zur Gasprobenahme existiert. Gemäß Angaben in den Notfallunterlagen der Anlage soll eine (qualitative) Erkennung des Anlagenzustandes durch Messung der Aktivitätsabgabe über die Fortluft mit Quelle aus im RR betriebenen Lüftungssystemen (i. W. die RR-Störfallabsaugung) oder durch das Ansprechen von Brandmeldern infolge Feuchteeintrag in den RR möglich sein. Eine quantitative Bestimmung der Größe einer Leckage erscheint schwierig bzw. nicht möglich. So kann die mögliche Gefahr einer Aufkonzentration von Wasserstoff nicht detektiert werden, die mit steigender Leckage zunimmt. Die ggf. in den Filtern der Lüftungssysteme gemessene Aktivität oder die über den Kamin freigesetzte Aktivität lassen auch keine konkreten Schlussfolgerungen zu, insbesondere dann nicht, wenn sie durch die Abgaben der gefilterten Druckentlastung des SHB überlagert sind. Eine Messung der H₂-Konzentration im Ringraum oder eine Gasprobenahme würden die Erkennung des Anlagenzustandes erheblich vereinfachen und damit auch das Erfordernis der Einleitung von Notfallmaßnahmen verbessern. Klar wird aus den Analysen, dass Notfallmaßnah-

men insbesondere dann erforderlich werden, wenn zusätzlich zu den erhöhten Leckagen auch noch die RR-Störfallabsaugung ausfällt.

Die Erkenntnisse können zur weiteren Verbesserung der geplanten Notfallmaßnahmen im Handbuch für mitigativen Notfallschutz (HMN) für den Fall von erhöhten Leckagen aus dem SHB in den RR einfließen.

Literaturverzeichnis

- /BAN 12/ Band, S. et.al, „Nachweis der Wirksamkeit von H₂-Rekombinatoren auf der Basis ergänzender analytischer Untersuchungen mit COCOSYS für die Referenzanlage GKN-2“, GRS-A-3652, März 2012
- /BMU 05/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Sicherheitsüberprüfung für Kernkraftwerke gemäß §19a des Atomgesetzes - Leitfaden Probabilistische Sicherheitsanalyse, 31. Januar 2005, Bekanntmachung vom 30. August 2005, Bundesanzeiger, Jahrgang 57, Nummer 207a, ISSN 0720-6100, 3. November 2005
- /BMU 11/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit und Bau (BMUB), "EU Stresstest, National Report of Germany", Implementation of the EU Stress Tests in Germany, December 2011
- /BMU 12/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit und Bau (BMUB), Bekanntmachung der "Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke" vom 22. November 2012, BAnz AT 24.01.2013 B3, Veröffentlicht am 24. Januar 2013
- /GRS 90/ GRS, „Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Phase B“, Eine Untersuchung der Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) im Auftrag des BMFT, Verlag TÜV Rheinland, 1990, ISBN 3-88585-809-6
- /GRS 01/ GRS, „Einschätzung zum Grenztragverhalten des Sicherheitsbehälters einer Konvoi-Anlage“, Bericht im Vorhaben SR 2306: Bewertung von Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes zur Schadensbegrenzung für Leichtwasserreaktoren, GRS - V - SR 2306 - 5/2001, Februar 2001
- /KLH 12/ Klein-Hessling, W., et al. COCOSYS V2.4 User's Manual, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, März 2012
- /LAN 79/ Langer, G., R. Jenior, H.G. Wentlandt, "Experimentelle Untersuchung der Wasserstoffverteilung im Containment eines Leichtwasserreaktors nach einem Kühlmittelverlust-Störfall", Bericht BF-R-63.363-3, Mai 1979

- /LAN 82/ Langer, G., W. Baukal, "Experimentelle Untersuchung der Wasserstoffverteilung in einem Modell-Containment (Grundlagenversuche Phase II)", Bericht BF-R-64.036-3, Juli 1982
- /RSK 11/ Reaktorsicherheitskommission (RSK), „Anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung (RSK-SÜ) deutscher Kernkraftwerke unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I (Japan)“, RSK-Stellungnahme, 437. er Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) vom 11. – 14.05.2011
- /RSK 15/ Reaktorsicherheitskommission (RSK), „Wasserstofffreisetzung aus dem Sicherheitsbehälter“, RSK-Empfehlung, 475. Sitzung der Reaktorsicherheitskommission (RSK) am 15.04.2015
- /SCH 15/ Schwarz, S., M. Sonnenkalb, „Analyse der Belastung von Gleitdruckventuriwäschern in SHB-Ventingsystemen von DWR KONVOI und SWR-72 bei Unfällen“, GRS-A-3791, August 2015
- /SON 01/ Sonnenkalb, M., „Unfallanalysen für DWR vom Typ KONVOI (GKN-2) mit dem Integralcode MELCOR 1.8.4“ GRS-A-2954, Dezember 2001
- /SON 01a/ Sonnenkalb, M., "Bewertung von Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes zur Schadensbegrenzung für LWR, Abschlussbericht zum Vorhaben SR 2306", GRS-A-2921, September 2001
- /SON 05/ Sonnenkalb, M., "Documentation on Experiences using MELCOR for German PWR", GRS gGmbH, Cologne, 2005
- /SPE 11/ Spengler C., "Status of GRS Activities on MCCI Modelling with MEDICIS", Technical meeting ASTEC TRG-39, Paris, November 2011
- /STE 15/ Steinrötter, Th., M. Hage, M. Kowalik, M. Sonnenkalb, "Untersuchungen zum anlageninternen Notfallschutz deutscher Kernkraftwerke und Darstellung der Wirksamkeit von Optimierungsmaßnahmen", Abschlussbericht zum Vorhaben 3613R01397, GRS-A-3839, November 2015

- /TÜV 87/ Technischer Überwachungsverein Bayern "Untersuchungsbericht: Dehnungs- und Verschiebungsmessungen im Rahmen der Druckprüfung am Reaktor-Sicherheitsbehälter GKN-2", TÜV Bayern, Prüf-Nr. MP 2/5924 (1987)
- /VGB 13/ VGB Powertech, „Stand der Handbücher für mitigative Notfallmaßnahmen“, Bericht der Betreiber vor der AG SAMG des RSK-AST", Vortrag, Erlangen, 12.09.2013

Abkürzungsverzeichnis

AE	Aerosol
BE	Brennelement
DWR	Druckwasserreaktor
HAG	Hilfsanlagegebäude
HMN	Handbuch für mitigativen Notfallschutz
ND*	Abkürzung für einen Störfall im Niederdruckbereich: Transiente mit Ausfall der DE-Bespeisung und primärseitiger Druckentlastung des RKL
ND	Niederdruck
NFM	Notfallmaßnahme
MBL	Abkürzung für einen Störfall mit mittlerem Leck am RKL
RKL	Reaktorkühlkreislauf
RG	Reaktorgebäude
RSK	Reaktorsicherheitskommission
RR	Ringraum
SHB	Sicherheitsbehälter
SWR	Siedewasserreaktor
WKP	Wiederkehrende Prüfung

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	SHB und RR des DWR vom Typ KONVOI mit Lage der wesentlichen Durchführungen (roter Bereich) und Schleusen (ausgewählte) sowie Andeutung der Wärmeabgabe in den RR über die Stahlschale	4
Abb. 2.2	Schnitt durch das Battelle Modell Containment (BMC) mit Bezeichnung der Raumbereiche	5
Abb. 2.3	H ₂ -Konzentration in einer Raumkette, BMC-Versuch zur H ₂ -Einspeisung tief in eine Raumkette mit homogener Temperaturverteilung /LAN 79/	6
Abb. 2.4	H ₂ -Konzentration in einer Raumkette, BMC-Versuch zur H ₂ -Einspeisung mittig in eine Raumkette mit homogener Temperaturverteilung /LAN 79/	7
Abb. 2.5	H ₂ -Konzentration in einer Raumkette, BMC-Versuch zur H ₂ -Einspeisung tief in eine Raumkette mit Temperaturschichtung in der Raumkette und kalter Einspeisetemperatur des Gases /LAN 79/	7
Abb. 2.6	COCOSYS Nodalisation des DWR KONVOI mit Reko-Basissystem (links) und des RG-Ringraums (rechts) mit Angabe der Lage der SHB-Leckage und RR-Störfallabsaugung /SON 01a/	9
Abb. 2.7	H ₂ -Konzentration im Ringraum bei nominaler Auslegungsleckage des SHB zum RR, COCOSYS /SON 01a/	10
Abb. 2.8	H ₂ -Konzentration im Ringraum bei 10-facher Auslegungsleckage des SHB zum RR, COCOSYS /SON 01a/	10
Abb. 2.9	Temperatur der Atmosphäre im Ringraum bei 10-facher Auslegungsleckage des SHB zum RR, COCOSYS /SON 01a/	11
Abb. 2.10	COCOSYS Nodalisation des SHB des DWR KONVOI (links) und des RG-Ringraums (rechts) mit Angabe der Lage der SHB-Leckage /BAN 12/	12
Abb. 2.11	Temperatur der Atmosphäre im Ringraum bei nominaler Auslegungsleckage des SHB zum RR, COCOSYS /BAN 12/	13
Abb. 2.12	H ₂ -Konzentration im Ringraum bei nominaler Auslegungsleckage des SHB zum RR, COCOSYS /BAN 12/	13
Abb. 3.1	Schema der Raumaufteilung innerhalb des Sicherheitsbehälters eines DWR KONVOI	19
Abb. 3.2	Aufteilung des Ringraums eines DWR KONVOI in Ringspalt und separate Räume (RR-Räume)	21

Abb. 3.3	DWR KONVOI, Lüftungssysteme in SHB und Ringraum während des Normalbetriebes	23
Abb. 3.4	DWR KONVOI, Lüftungssysteme nach Gebäudeabschluss in SHB und im Ringraum während eines Störfalls.....	24
Abb. 3.5	Schema eines DWR KONVOI mit Lage der Durchführungen und Schleusen durch die Stahlschale des SHB	27
Abb. 3.6	Prinzipbild einer Notschleuse.....	28
Abb. 3.7	Prinzipbild eines Rohrleitungskompensators.....	29
Abb. 3.8	Prinzipbild einer Lüftungsabschlussklappe	29
Abb. 3.9	Prinzipbild einer Durchführung mit Druckglaseinschmelzung der Kabel	30
Abb. 3.10	Strukturmechanische Untersuchungen zum Versagen des SHB, Störstellen des Schalenkontinuums /GRS 01/.....	31
Abb. 3.11	Ergebnisse der strukturmechanischen Untersuchungen zum Versagen des SHB, potentielle Versagensinnendrucke der SHB-Schale /GRS 01/	32
Abb. 4.1	COCOSYS-Nodalisation des Sicherheitsbehälters der DWR Referenzanlage KONVOI mit eingezeichneten Zonengrenzen.....	36
Abb. 4.2	COCOSYS-Nodalisation des Ringraums der DWR Referenzanlage KONVOI mit eingezeichneten Zonengrenzen	36
Abb. 4.3	Ventilator- und Anlagenkennlinien von zwei in Parallelbetrieb befindlichen Ventilatoren der RR-Störfallabsaugung, Vergleich mit dem Förderdruck der realen Ventilator-kennlinie.....	39
Abb. 4.4	Druckdifferenz zwischen RR und Umgebung nach Gebäudeabschluss, Betrieb von 2 Ventilatoren der RR-Störfallabsaugung in Betrieb, COCOSYS	40
Abb. 4.5	Schnittdarstellung der Reaktorgrube und des Sumpfes des DWR KONVOI auf Höhe +2 m	45
Abb. 4.6	Schnittdarstellung der Reaktorgrube und des Sumpfes des DWR KONVOI mit COCOSYS Zonen	45
Abb. 4.7	CCI-Modul Rechnung, Kavernenkontur bei Durchdringung des Schildes und nach Schmelzeverlagerung in den SHB-Sumpf – Kontur der Betonerosion in der Reaktorgrube (orange), Ausgangskontur (schwarz, gestrichelt)	48

Abb. 5.1	Volumenstrom durch die SHB-Auslegungsleckage, MBL-Basisfall	55
Abb. 5.2	SHB-Druckverlauf, MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage.....	56
Abb. 5.3	Druckverlauf im Ringraum, MBL-Basisfall mit SHB- Auslegungsleckage.....	57
Abb. 5.4	H ₂ -Konzentration im RR-Ringspalt, MBL-Basisfall mit SHB- Auslegungsleckage.....	58
Abb. 5.5	H ₂ -Konzentration in separaten RR-Räumen (Zonen U7*A), MBL- Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage	59
Abb. 5.6	H ₂ -Konzentration in separaten RR-Räumen (Zonen U7*B), MBL- Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage	59
Abb. 5.7	Temperaturen der Atmosphäre im Ringspalt, MBL-Basisfall mit SHB- Auslegungsleckage.....	60
Abb. 5.8	Gesamtmasse in den SHB freigesetzter sowie luftgetragener und abgelagerter Aerosole im SHB, MBL-Basisfall mit SHB- Auslegungsleckage.....	61
Abb. 5.9	Masse luftgetragener und abgelagerter Aerosole im RR und in die Umgebung freigesetzter Aerosole, MBL-Basisfall mit SHB- Auslegungsleckage.....	62
Abb. 5.10	Gesamtaerosolmasse im Störfallfilter der RR-Störfallabsaugung, MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage	63
Abb. 5.11	Aerosol-Konzentration in ausgewählten Zonen entlang der Höhe des Ringspaltes, MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage.....	63
Abb. 5.12	Aerosol-Konzentration im Ringspalt in Abhängigkeit von der Partikelgrößenklasse (für ausgewählte Zeitpunkte), MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage	64
Abb. 5.13	Gesamtmasse freigesetzter Edelgase in den SHB sowie in die Umgebung, MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage.....	65
Abb. 5.14	Xe-Konzentration in ausgewählten Zonen entlang der Höhe des Ringspaltes, MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage.....	65
Abb. 5.15	Xe-Konzentration in separaten RR-Räumen entlang der Höhe des Ringraums, MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage	66
Abb. 5.16	SHB-Druckverlauf für den MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage (blau) im Vergleich zum Basisfall mit SHB- Auslegungsleckage (rot)	67

Abb. 5.17	Druckverlauf im Ringraum, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage.....	67
Abb. 5.18	H ₂ -Konzentration im RR-Ringspalt, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage.....	69
Abb. 5.19	Zustände in einzelnen Zonen des Ringspaltes, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage.....	69
Abb. 5.20	H ₂ -Konzentration in separaten RR-Räumen (Zonen U7*A), MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage.....	70
Abb. 5.21	Zustände in separaten RR-Räumen (Zonen U7*A), MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage.....	71
Abb. 5.22	H ₂ -Konzentration in separaten RR-Räumen (Zonen U7*B), MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage.....	71
Abb. 5.23	Zustände in separaten RR-Räumen (Zonen U7*B), MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage.....	72
Abb. 5.24	Temperaturen der Atmosphäre im Ringspalt, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage.....	73
Abb. 5.25	Aerosol-Konzentration in ausgewählten Zonen des Ringspaltes, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage (ausgefüllte Marker) im Vergleich zum Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage (offene Marker).....	74
Abb. 5.26	Aerosolmasse im Störfallfilter der RR-Störfallabsaugung, Vergleich MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage (grün) und Fall mit SHB-Auslegungsleckage (rot).....	74
Abb. 5.27	Masse luftgetragener und abgelagerter Aerosole im RR und aus dem SHB freigesetzte Aerosole, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage.....	75
Abb. 5.28	Xe-Konzentration in ausgewählten Zonen des Ringspaltes, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage (ausgefüllte Marker) im Vergleich zum Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage (offene Marker).....	75
Abb. 5.29	H ₂ -Konzentration in ausgewählten Zonen des Ringspaltes, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Leckage am „günstigsten Ort“ (ausgefüllte Marker) im Vergleich zum Fall mit Leckage am „ungünstigsten Ort“ (offene Marker).....	77
Abb. 5.30	H ₂ -Konzentration in ausgewählten Zonen (U01*) des Ringspaltes in Umfangsrichtung, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Leckage am „günstigsten Ort“ (ausgefüllte Marker) im Vergleich zum Fall mit Leckage am „ungünstigsten Ort“ (offene Marker).....	78

Abb. 5.31	H ₂ -Konzentration in ausgewählten Zonen (U01*) auf verschiedenen Ebenen des Ringspalt, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage (ausgefüllte Marker) und Leckage am „günstigsten Ort“ im Vergleich zum Fall mit Leckage am „ungünstigsten Ort“ (offene Marker).....	78
Abb. 5.32	Aerosol-Konzentration im Ringspalt, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage (ausgefüllte Marker) und Leckage am „günstigsten Ort“ im Vergleich zum Fall mit Leckage am „ungünstigsten Ort“ (offene Marker).....	79
Abb. 5.33	Aerosolmasse im Filter der RR-Störfallabsaugung, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage am „günstigsten Ort“ (grün) im Vergleich zum Fall mit Leckage am „ungünstigsten Ort“ (rot)	79
Abb. 5.34	Druckverlauf im Ringraum, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Ausfall der RR-Störfallabsaugung	82
Abb. 5.35	H ₂ -Konzentration im Ringspalt, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage mit Ausfall der RR-Störfallabsaugung (ausgefüllte Marker) im Vergleich zum Fall mit laufender RR-Störfallabsaugung (offene Marker).....	83
Abb. 5.36	H ₂ -Konzentration in separaten RR-Räumen (Zonen U7*A), MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Ausfall der RR-Störfallabsaugung.....	83
Abb. 5.37	H ₂ -Konzentration in separaten RR-Räumen (Zonen U7*B), MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Ausfall der RR-Störfallabsaugung.....	84
Abb. 5.38	Zustände in separaten RR-Räumen (Zone U74B, U74C,), MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Ausfall der RR-Störfallabsaugung.....	84
Abb. 5.39	Temperaturen der Atmosphäre im Ringspalt, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Ausfall der RR-Störfallabsaugung	85
Abb. 5.40	Aerosol-Konzentration im Ringspalt, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage mit Ausfall der RR-Störfallabsaugung (ausgefüllte Marker) im Vergleich zum Fall mit laufender RR-Störfallabsaugung (offene Marker).....	85
Abb. 5.41	Masse luftgetragener und abgelagerter Aerosole im RR und aus dem SHB über die Druckentlastung freigesetzter Aerosole, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Ausfall der RR-Störfallabsaugung.....	86
Abb. 5.42	Masse aus dem RR in die Umgebung freigesetzter Aerosole, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage mit Ausfall der RR-	

	Störfallabsaugung (grün) im Vergleich zum Fall mit laufender RR-Störfallabsaugung (rot)	86
Abb. 5.43	Xe-Konzentration in ausgewählten Zonen des Ringspalt, MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage mit Ausfall der RR-Störfallabsaugung (ausgefüllte Marker) im Vergleich zum Fall mit laufender RR-Störfallabsaugung (offene Marker).....	87
Abb. 5.44	H ₂ -Konzentration ausgewählter Zonen im Ringspalt, MBL-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage und Ausfall der RR-Störfallabsaugung (offene Marker) und mit Einsatz der Zu-/Abluftanlagen des RR (ausgefüllte Marker).....	89
Abb. 5.45	H ₂ -Konzentration ausgewählter RR-Räume, MBL-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage und Ausfall der RR-Störfallabsaugung (offene Marker) und mit Einsatz der Zu-/Abluftanlagen des RR (ausgefüllte Marker).....	89
Abb. 5.46	Zustände im Bereich der SBH-Leckage (U01B), MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Einsatz der Zu-/Abluftanlagen des RR	90
Abb. 5.47	Aerosol-Konzentration in Zonen entlang der Höhe des Ringspalt, Variante mit 10-facher Leckage und Einsatz der Zu-/Abluftanlagen des RR	90
Abb. 5.48	Xe-Konzentration in ausgewählten Zonen des Ringspalt, Variante mit 10-facher Leckage und Einsatz der Zu-/Abluftanlagen des RR	91
Abb. 5.49	Masse in die Umgebung freigesetzter Aerosole aus dem RR über Abluftsystem des RR (rot) und aus dem SHB über gefilterte Druckentlastung (blau), MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage und Einsatz der Zu-/Abluftanlagen des RR.....	91
Abb. 5.50	Masse im Bedarfsfilter zurückgehaltener Aerosole (rot) und in die Umgebung freigesetzter Aerosole über SHB-Druckentlastung (blau), MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage mit Nutzung der Bedarfsfilteranlage.....	92
Abb. 5.51	H ₂ -Konzentration im RR-Ringspalt, Variante mit 10-facher Auslegungsleckage und Einsatz der Umluftanlage	94
Abb. 5.52	Angenommene Platzierung der 4 Rekos im RR-Bereich oberhalb der obersten Bühne (22,5-m-Ebene).....	95
Abb. 5.53	Vergleich der H ₂ -Konzentration ausgewählter Zonen im Ringspalt, MBL-Fälle mit Ausfall der RR-Störfallabsaugung ohne (offene Marker) und mit Rekos im RR (ausgefüllte Marker)	96

Abb. 5.54	Abbaurrate an Wasserstoff durch die Rekombination im Ringraum, MBL-Fälle mit Ausfall der RR-Störfallabsaugung und Rekos im RR.....	97
Abb. 5.55	Zustände im Bereich der SBH-Leckage (U01B) im Ringraum, MBL-Fälle mit Ausfall der RR-Störfallabsaugung und Rekos im RR.....	97
Abb. 5.56	SHB-Druck, Vergleich ND*-Basisfall und MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage.....	99
Abb. 5.57	RR-Druck, Vergleich ND*-Basisfall und MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage.....	99
Abb. 5.58	Atmosphärentemperatur im SHB (Peripherie), Vergleich ND*-Basisfall (rot) und MBL-Basisfall (schwarz) mit SHB-Auslegungsleckage.....	101
Abb. 5.59	Atmosphärentemperatur in RR-Räumen, Vergleich ND*-Basisfall und MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage.....	101
Abb. 5.60	H ₂ -Masse im SHB, Vergleich ND*-Basisfall (blau) und MBL-Basisfall (rot) mit SHB-Auslegungsleckage.....	102
Abb. 5.61	H ₂ -Konzentration im Ringspalt, Vergleich ND*- und MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage.....	103
Abb. 5.62	H ₂ -Konzentration in separaten RR-Räumen (Zonen U7*A), Vergleich ND*- und MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage.....	103
Abb. 5.63	H ₂ -Konzentration in separaten RR-Räumen (Zonen U7*B), Vergleich ND*- und MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage.....	104
Abb. 5.64	Aerosol-Konzentration in Zonen entlang der Höhe des Ringspaltes (Zonen U7*B), Vergleich ND*- und MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage.....	105
Abb. 5.65	Xe-Konzentration in Zonen entlang der Höhe des Ringspaltes, Vergleich ND*- und MBL-Basisfall mit SHB-Auslegungsleckage.....	105
Abb. 5.66	SHB-Druck, Vergleich ND*-Fall und MBL-Fall mit 10-facher SHB-Leckage.....	106
Abb. 5.67	H ₂ -Konzentration im Ringspalt, Vergleich ND*-Fall und MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage.....	107
Abb. 5.68	H ₂ -Konzentration in RR-Räumen (Zonen U7*A), Vergleich ND*-Fall und MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage.....	107
Abb. 5.69	H ₂ -Konzentration in RR-Räumen (Zonen U7*B), Vergleich ND*-Fall und MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage.....	108

Abb. 5.70	Aerosol-Konzentration in Zonen entlang der Höhe des Ringspaltes, Vergleich ND*-Fall und MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage	109
Abb. 5.71	Xe-Konzentration in ausgewählten Zonen des Ringspaltes, Vergleich ND*-Fall und MBL-Fall mit 10-facher Auslegungsleckage.....	109
Abb. 5.72	SHB-Druckverlauf, MBL-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne (rot) und mit (blau) Schmelzeverlagerung in den Sumpf.....	111
Abb. 5.73	Integral erzeugte H ₂ - und CO-Masse, MBL-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne und mit Schmelzeverlagerung in den Sumpf	111
Abb. 5.74	H ₂ -Konzentration im SHB, MBL-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne (schwarz) und mit (rot) Schmelzeverlagerung in den Sumpf	113
Abb. 5.75	H ₂ -Konzentration in ausgewählten RR-Räumen (Zonen U7*B), MBL-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne (offene Marker) und mit (ausgefüllte Marker) Schmelzeverlagerung in den Sumpf	113
Abb. 5.76	Aerosol-Konzentration in Zonen entlang der Höhe des Ringspaltes, MBL-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne (offene Marker) und mit (ausgefüllte Marker) Schmelzeverlagerung in den Sumpf	114
Abb. 5.77	Xe-Konzentration in ausgewählten Zonen des Ringspaltes, MBL-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne (offene Marker) und mit (ausgefüllte Marker) Schmelzeverlagerung in den Sumpf	114
Abb. 5.78	Integral erzeugte H ₂ - und CO-Masse, ND*-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne und mit Schmelzeverlagerung in den Sumpf	116
Abb. 5.79	SHB-Druckverlauf, ND*-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne (rot) und mit (blau) Schmelzeverlagerung in den Sumpf	116
Abb. 5.80	H ₂ -Konzentration im SHB, ND*-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne (schwarz) und mit (rot) Schmelzeverlagerung in den Sumpf	118
Abb. 5.81	H ₂ -Konzentration in separaten RR-Räumen (Zonen U7*B), ND*-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne (offene Marker) und mit (ausgefüllte Marker) Schmelzeverlagerung in den Sumpf	118
Abb. 5.82	Aerosol-Konzentration in Zonen entlang der Höhe des Ringspaltes, ND*-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne (offene Marker) und mit (ausgefüllte Marker) Schmelzeverlagerung in den Sumpf	119

Abb. 5.83 Xe-Konzentration in ausgewählten Zonen des Ringspaltes, ND*-Fälle mit 10-facher Auslegungsleckage ohne (offene Marker) und mit (ausgefüllte Marker) Schmelzeverlagerung in den Sumpf 119

Tabellenverzeichnis

Tab. 4.1	Zeitpunkte charakteristischer Ereignisse /SON 01/	43
Tab. 4.2	Chemische Betonzusammensetzung der Reaktorgrube für die Referenzanlage GKN-2.....	49
Tab. 4.3	Effektive Wärmeübergangskoeffizienten zwischen homogener oxidischer Schmelze und Beton (in axialer und radialer Richtung)	49
Tab. 4.4	Zusammenstellung der Analysen: Basisfall und Variantenrechnungen	51

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de