

**Nachweis der
Wirksamkeit von
H2-Rekombinatoren
auf der Basis ergän-
zender analytischer
Untersuchungen mit
COCOSYS für die
Referenzanlage GKN-2**

3609R01375

Anforderungen an den
Nachweis der Wirksamkeit von
H2-Rekombinatoren auf der
Basis ergänzender analytischer
Untersuchungen

Nachweis der Wirksamkeit von H₂-Rekombinatoren auf der Basis ergänzender analytischer Untersuchungen mit COCOSYS für die Referenzanlage GKN-2

Bericht zum Vorhaben:
"Anforderungen an den Nachweis
der Wirksamkeit von
H₂-Rekombinatoren auf der Basis
ergänzender analytischer
Untersuchungen"

Sebastian Band
Siegfried Schwarz
Martin Sonnenkalb

März 2012

Auftrags-Nr.: 858010

Anmerkung:

Das diesem Bericht zu Grunde liegende FE-Vorhaben 3609R01375 wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 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.

Kurzfassung

Zur Bewertung von Auswirkungen auslegungsüberschreitender Ereignisse in LWR Anlagen mit einer möglichen Integritätsgefährdung des Sicherheitsbehälters durch H₂-Verbrennungen, wurden bezüglich der Wirksamkeit der Wasserstoffgegenmaßnahmen – eines Konzepts passiver autokatalytischer Rekombinatoren – in einem DWR vom Typ Konvoi erweiterte Referenzanalysen für Unfallszenarien mit unterschiedlichen Zuständen bzgl. der Gasgemische im Sicherheitsbehälter und der konvektiven Randbedingungen durchgeführt. Ein Basiskonzept für DWR Konvoi wurde von der GRS im Rahmen von Vorhaben des BMU im Zeitraum bis 1998 untersucht; das endgültig realisierte Konzept der Referenzanlage GKN 2 wurde aber nicht erneut mit COCOSYS untersucht.

Bezüglich der Störfallabläufe im Primär- und Sekundärkreislauf, sowie des Verhaltens der Kernschmelze nach dem Versagen des Reaktordruckbehälters, wurden Ergebnisse von früheren MELCOR-Analysen aus der PSA der Stufe 2 der GRS verwendet. Diese waren Randbedingungen für die Analysen zu den Vorgängen im Sicherheitsbehälter, die mit COCOSYS analysiert wurden. Die COCOSYS Rechnungen wurden nach dem neuesten Stand der Technik des Rechenprogramms, sowie bezüglich der in der Zwischenzeit gewonnenen Erkenntnisse der Validierungen an Experimenten durchgeführt. Die für den Datensatz erforderlichen konstruktiven Angaben des Kernkraftwerks wurden überprüft. Das zur Simulation der Rekombinatoren genutzte Modell in COCOSYS wurde im Rahmen eines BMWi-Vorhabens an den Ergebnissen der kürzlich durchgeführten THAI-HR Versuche vorab überarbeitet und erneut validiert.

Die im Projekt mit COCOSYS durchgeführten Rechnungen für die vier betrachteten Szenarien (ND-Fall, ND*-Fall, MBL-Fall und SBL-Fall) mit verschiedenen Randbedingungen bezüglich der Simulation des Aerosolverhaltens sowie von H₂-Verbrennungen zeigen keine Gefährdung der Integrität des Sicherheitsbehälters auf. Wesentlich dazu tragen die installierten Rekombinatoren bei, die den in den Sicherheitsbehälter freigesetzten Wasserstoff frühzeitig beginnen abzubauen. So wird dadurch die Zündgrenze in den analysierten Szenarien nur kurzzeitig, frühzeitig und meist nur geringfügig und in wenigen Bereichen des Sicherheitsbehälters (meist in den Anlagenräumen) überschritten. Erstmals wurden mit COCOSYS noch begrenzt mögliche H₂-Verbrennungsvorgänge analysiert. Unterstellt wurden unterschiedliche Zündkriterien, wie z.B. eine anzunehmende Entzündung des Gasgemisches durch einen/die Rekombinatoren.

Die bei diesen lokalen H₂-Verbrennungsvorgängen berechneten, kurzzeitigen Druckanstiege liegen unterhalb ~0,5 bar, wobei die dafür benötigt Zeit zwischen 15 s (ND-Fall Zündung 8 Vol.% H₂, Druckanstieg ~0,25 bar), 30 s (MBL-Fall, Zündung bei 10 Vol.% H₂, Druckanstieg ~0,5 bar) und 80 s (ND-Fall „worst-case Szenario“, Druckanstieg ~0,42 bar) beträgt.

Zur Bewertung, ob unter unfallbedingten Belastungen durch Innendruck- und Temperaturerhöhung die Integrität des Sicherheitsbehälters als leckdichte Barriere gefährdet ist, sind strukturmechanische Berechnungen, bei denen die Bestimmung von Sicherheitsmargen gegenüber dem Integritätsverlust bzw. die Grenztragfähigkeit des Sicherheitsbehälters im Vordergrund stehen, erforderlich. Im Rahmen des Vorhabens wurden solche strukturdynamischen elastoplastischen Berechnungen mit dem für derartige Fragestellungen erprobten Finite Elemente Rechenprogrammsystem ADINA durchgeführt. Charakteristische Lastannahmen wurden aus verfügbaren Versuchsergebnissen als peakförmige Druck- und Temperaturverläufe festgelegt. Weiterhin wurden Annahmen zur druck- und temperaturbeaufschlagten Fläche des Sicherheitsbehälters aus den COCOSYS-Analysen im Vorhaben abgeleitet. Die Ergebnisse sind in einem separaten Bericht des Vorhabens dokumentiert.

Die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten COCOSYS-Analysen mit Verbrennung ergeben Lastannahmen für strukturmechanische Untersuchungen, die durch die durchgeführten Berechnungen, insbesondere durch die mit längerer Impulsdauer abgedeckt sind. Demnach werden für diese Lastannahmen mit den betrachteten Analysemodellen nur Spannungen im elastischen Bereich erwartet.

Die durchgeführten COCOSYS-Analysen bestätigen die Wirksamkeit des installierten Rekombinatorkonzeptes der Referenzanlage für ein erweitertes Unfallspektrum.

Abstract

For the assessment of effects of beyond design basis events in LWR plants with possible challenges of the containment integrity through H₂-deflagration, in regards to the effectiveness of hydrogen countermeasures – a concept of passive autocatalytic recombiners – in a PWR of KONVOI type, extended reference analyses for accident scenarios with different gas mixtures in the containment and as well different convective conditions for the fluid flows were conducted. A basic concept for PWR KONVOI type has been examined by GRS within the frame of BMU projects in a period up to 1998; the finally realised concept of the reference plant GKN 2 has not been re-evaluated with COCOSYS, though.

As to the accident sequence in the primary- and secondary coolant system as well as the behaviour of the core melt following the failure of the reactor pressure vessel, results of previous MELCOR-analyses from the PSA Level 2 by GRS were utilised. These were boundary conditions for the analyses of processes in the containment having been analysed with COCOSYS. The COCOSYS calculations were conducted according to the state-of-the-art of the computer code as well as based on experiences gained in the meantime of the validations on experiments. The constructive particulars of the NPP required for the data set were examined. The model in COCOSYS employed for the simulation of the passive autocatalytic recombiners (PARs), has been revised and validated in a project sponsored by the German BMWi before on the results of the recently conducted THAI-HR tests.

The calculations performed in the project for the four different cases (LP-case, LP*-case, MBL-case, SBL-case) with different boundary conditions related to the aerosol and hydrogen combustion modelling indicate no challenge of the containment integrity by local H₂-combustions. The installed PAR concept contributes an essential part towards it. The flammable limit in the analysed scenarios will be exceeded only for short time during the early core degradation phase and for the most part only slightly and just in a few areas of the containment (mainly in the inner containment part).

Possible H₂-combustion processes were analysed with COCOSYS for the first time. Various ignition criteria were implied, like f.i. a presumed ignition of the gas mixture by a/the recombiners. The pressure increases calculated at these local H₂-combustion processes to be lower than 0,5 bar, whereby the required time ranges between 15 s (LP-case ignition 8 Vol.% H₂, pressure increase ~0,25 bar), 30 s (MBL-case, ignition 10

Vol.% H₂, pressure increase ~0,5 bar) and 80 s (LP-case “worst-case scenario”, pressure increase ~0,42 bar). Despite remaining inaccuracies of the calculated pressure increases, large margins exist until the design basis pressure of the containment will be reached, since ignitable gas mixtures only occur during the early stages of the accident sequence, when the pressure in the containment is still low.

For the evaluation, whether in case of severe accident loads due to increase of internal pressure and temperature the integrity of the containment as leak-tight barrier is endangered, structure mechanical calculations are necessary, in which the determination of safety margins against the loss of integrity respectively the limit load bearing capacity of the containment constitutes a priority. Within the project such structure dynamical elastoplastic calculations were conducted with the Finite Element computer code ADINA, having been tested for such issues. Characteristic loading assumptions were determined as peak-like pressure and temperature sequences from already available test results. Furthermore, assumptions on the surface part of the containment loaded by pressure and temperature, derived from thermo-hydraulic COCOSYS calculations of hydrogen concentrations, conducted within the framework of the project. The results of the structural mechanics analyses are documented in a separate project report.

The COCOSYS analyses on combustion conducted within the framework of the project result in load assumptions for structure mechanical investigations which are covered through the calculations conducted, especially through the ones with a longer impulse duration. Consequently, for these load assumptions in the analysis models considered only strains in the elastic area are expected.

In general the new analyses underlines the efficiency of the installed PAR concept of the reference plant under extended severe accident conditions respectively scenarios.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Randbedingungen der COCOSYS-Analysen	3
2.1	COCOSYS-Datensatz der Referenzanlage.....	3
2.1.1	Allgemeine Angaben.....	3
2.1.2	Modellierung der Wände.....	6
2.1.3	Modellierung der Raumbereiche	6
2.1.4	Modellierung von Berstelementen und Türen.....	9
2.1.5	Sonstige Änderungen	10
2.1.6	Modellierung des Abwaschens von Aerosolen.....	12
2.1.7	Modellierung von H ₂ -Verbrennungsvorgängen.....	13
2.2	Überarbeitung des Reko-Modells und Validierung	14
2.3	Szenarienauswahl	18
2.4	Aufbereitung der Quell-Daten	19
2.4.1	Aufbereitung der Quell-Daten für den ND-Fall	21
2.4.2	Aufbereitung der Quell-Daten für den ND*-Fall	25
2.4.3	Aufbereitung der Quell-Daten für SBL- und MBL-Fall	26
3	Überprüfung des COCOSYS Datensatzes für eine KONVOI-Anlage bezüglich der Ausbildung und Auflösung einer atmosphärischen Schichtung	29
3.1	Zielsetzung	29
3.2	Ergebnisse der COCOSYS-Analyse	29
4	Ergebnisse der COCOSYS-Analysen	32
4.1	Überblick über die analysierten Szenarien.....	32
4.2	Vorgehen bei der Analyse der Zündfähigkeit der Gasgemische.....	34
4.3	Rechnungen ohne (dynamische) Aerosolsimulation und ohne H ₂ - Verbrennung.....	36
4.3.1	Charakteristische Unterschiede aller Fälle – SHB-Druck	36
4.3.2	ND*-Fall.....	37
4.3.3	ND-Fall	47

4.3.4	SBL-Fall.....	52
4.3.5	MBL-Fall	59
4.4	Rechnungen ohne (dynamische) Aerosolsimulation und mit H ₂ - Verbrennung mit Reko's als Zündquelle	65
4.4.1	Darstellung der Ergebnisse mit H ₂ -Verbrennung.....	65
4.4.2	Durchgeführte Analysen mit Reko's als Zündquelle	66
4.4.3	ND*-Fall.....	67
4.4.4	ND-Fall	68
4.4.5	SBL-Fall.....	77
4.4.6	MBL-Fall	81
4.5	Rechnungen ohne (dynamische) Aerosolsimulation und mit H ₂ - Verbrennung zu einem möglichst ungünstigen Zeitpunkt (<i>worst case</i>).....	91
4.5.1	Durchgeführte Analysen	91
4.5.2	ND*-Fall.....	92
4.5.3	ND-Fall	92
4.5.4	SBL-Fall.....	98
4.5.5	MBL-Fall	104
4.6	Diskussion der Rechnungen mit H ₂ -Verbrennung	109
4.7	Rechnungen mit (dynamischer) Aerosolsimulation und ohne H ₂ - Verbrennung.....	110
4.7.1	Zielsetzung	110
4.7.2	MBL-Fall	113
4.7.3	SBL-Fall.....	118
4.8	Rechnungen mit (dynamischer) Aerosolsimulation und mit H ₂ - Verbrennung mit Reko's als Zündquellen	125
4.8.1	Zielsetzung	125
4.8.2	MBL-Fall	125
4.8.3	SBL-Fall.....	129
4.9	Exemplarische Untersuchung des Einflusses des eingesetzten Reko- Modells	137
4.9.1	Zielsetzung	137

4.9.2	ND*-Fall und MBL-Fall ohne (dynamische) Aerosolsimulation und ohne H ₂ -Verbrennung	137
4.9.3	ND*-Fall und MBL-Fall ohne (dynamische) Aerosolsimulation und mit H ₂ -Verbrennung und Zündung am Reko bei 8 Vol.% H ₂	141
5	Zusammenfassung	143
6	Schlussfolgerungen	148
7	Literaturverzeichnis.....	150
8	Anhang A	153
8.1	Nodalisationsschemata.....	153

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1-1	RALOC/COCOSYS-Nodalisation (Querschnitt (B-B)) der Referenzanlage Konvoi mit eingezeichneten Nodalisierungszonen /TIL 98/.....	3
Abb. 2.1-2	Neue COCOSYS-Nodalisation (Schnitt B-B) der Referenzanlage Konvoi mit eingezeichneten Nodalisierungszonen (rot umrandeter Bereich: Anlagenräume)	4
Abb. 2.1-3	Neue COCOSYS-Nodalisation (Schnitt A-A) der Referenzanlage Konvoi mit eingezeichneten Nodalisierungszonen	5
Abb. 2.1-4	Neue COCOSYS-Nodalisation des Ringraums der Referenzanlage Konvoi mit eingezeichneten Nodalisierungszonen	8
Abb. 2.1-5	Skizze des Modellsystems	14
Abb. 2.2-1	Versuch Gx4, H ₂ -Einspeise- und Rekombinationsraten, experimentelle Werte und Ergebnis des COCOSYS-Modells (RATE_B1)	16
Abb. 2.2-2	Rekombinationsrate THAI-HR-2, Vergleich mit altem Reko-Modell der GRS (model_BXR) und der Gleichung von AREVA (corr_BXR).....	16
Abb. 2.2-3	Rekombinationsrate THAI-HR-2, Vergleich mit neuem Reko-Modell der GRS (COCOSYS) und der Gleichung von AREVA (AREVA correlation).....	17
Abb. 2.2-4	Rekombinationsrate Gx-4, Vergleich mit altem (COCOSYS old) und neuem Reko-Modell der GRS (COCOSYS) und der Gleichung von AREVA (AREVA correlation)	17
Abb. 2.4-1	Verteilung der Nachzerfallsleistung in Wasser in den Zonen (HEATW), auf Strukturen (HEATAB) (abgelagert) und luftgetragen (HEATL).....	21
Abb. 2.4-2	Verteilung der Nachzerfallsleistung im ASTRID-Datensatz nach Rechnung mit COCOSYS / AFP-Modul.....	22
Abb. 2.4-3	Vergleich der Nachzerfallsleistungen des ASTRID-Szenarios mit dem ND-Fall aus MELCOR	23

Abb. 2.4-4	Anteilige Verteilung der Nachzerfallsleistung (laut Astrid Rechnung)	24
Abb. 2.4-5	Überarbeitete Verteilung der Nachzerfallsleistung für ND-Fall.....	24
Abb. 2.4-6	Beispiel der Nachbearbeitung von MELCOR Daten für COCOSYS: Wärmeabgabe über die Hauptkühlmittelleitung; (SBL-Fall)	27
Abb. 3.2-1	Zeitliche Entwicklung einer Wasserstoffschichtung im SHB im Konvoi Datensatz bei Bedingungen ähnlich dem THAI – HM-2 Experiment.....	31
Abb. 3.2-2	Lage der Zonen aus Abb. 3.2-1 im SHB im Konvoi Datensatz	31
Abb. 4.2-1	Dreistoffdiagramm mit Gemischzusammensetzungen und Flammfrontgeschwindigkeiten ausgewählter THAI – HD Tests	35
Abb. 4.3-1	Druckentwicklung innerhalb des SHB für die verschiedenen Szenarien.....	36
Abb. 4.3-2	ND*-Fall, Stratifikation des Wasserstoffes in den Anlagenräumen	39
Abb. 4.3-3	ND*-Fall, Stratifikation, Dichte der Atmosphäre in ausgewählten Zonen, innerhalb und außerhalb des Trümmerschutzes	40
Abb. 4.3-4	ND*-Fall, Entwicklung des SHB Drucks.....	41
Abb. 4.3-5	ND*-Fall, Temperaturverlauf für ausgewählte Zonen in verschiedenen Höhen	41
Abb. 4.3-6	ND*-Fall, Entwicklung der H ₂ -Konzentrationen innerhalb der Anlagenräume und im Dom.....	43
Abb. 4.3-7	ND*-Fall, Entwicklung der H ₂ -Konzentration im Dom und in den Räumen hinter dem Trümmerschutz	43
Abb. 4.3-8	ND*-Fall, Abbau des Sauerstoff durch die Reko's	44
Abb. 4.3-9	Dreistoffdiagramme für den ND*-Fall, von oben links, nach unten rechts: D110, D12A, R73A, R52A, R67A, RSUA.....	45
Abb. 4.3-10	Dreistoffdiagramme für den ND*-Fall im Bereich der Reaktorgrube (oben links: R1U, oben rechts: R02, unten: R05A)	46
Abb. 4.3-11	ND-Fall, Druckentwicklung innerhalb des SHB.....	48
Abb. 4.3-12	ND-Fall, Temperaturverlauf für ausgewählte Zonen in verschiedenen Höhen	48

Abb. 4.3-13	ND-Fall, H ₂ -Konzentration innerhalb der Anlagenräume und im Dom	49
Abb. 4.3-14	ND-Fall, H ₂ -Konzentration im Dom und den Räumen hinter dem Trümmerschutz	50
Abb. 4.3-15	ND-Fall, Abbau des Sauerstoffs durch die Reko's.....	50
Abb. 4.3-16	Dreistoffdiagramme für den ND-Fall; von oben links, nach unten rechts: D110, D12A, R73A, R52A, R67A, RSUA.....	51
Abb. 4.3-17	SBL-Fall, Entwicklung des SHB-Drucks	53
Abb. 4.3-18	SBL-Fall, Temperaturverlauf für ausgewählte Zonen in verschiedenen Höhen	53
Abb. 4.3-19	SBL-Fall, H ₂ -Konzentration innerhalb der Anlagenräume und im Dom	55
Abb. 4.3-20	SBL-Fall, H ₂ -Konzentration im Dom und in den Räumen hinter dem Trümmerschutz	55
Abb. 4.3-21	SBL-Fall, Zunahme des Wasserstoffs in den Anlagenräumen nach RDB-Versagen.....	56
Abb. 4.3-22	SBL-Fall, Abbau des Sauerstoffs durch die Reko's	56
Abb. 4.3-23	Dreistoffdiagramme für den SBL-Fall; von oben links, nach unten rechts: D110, D12A, R73A, R52A, R67A, RSUA.....	58
Abb. 4.3-24	MBL-Fall, Entwicklung des SHB-Drucks.....	60
Abb. 4.3-25	MBL-Fall, Temperaturverlauf für ausgewählte Zonen in verschiedenen Höhen	61
Abb. 4.3-26	MBL-Fall, H ₂ -Konzentration innerhalb der Anlagenräume und im Dom	61
Abb. 4.3-27	MBL-Fall, H ₂ -Konzentration im Dom und in den Räumen hinter dem Trümmerschutz	62
Abb. 4.3-28	MBL-Fall, Abbau des Sauerstoffs durch die Reko's.....	62
Abb. 4.3-29	Dreistoffdiagramme für den MBL-Fall; von oben links, nach unten rechts: D110, D12A, R73A, R52A, R67A, RSUA.....	64

Abb. 4.4-1	ND*-Fall, Sauerstoffverbrauch durch Verbrennungen in Reaktorgrube oder RDB-Stutzenraum im Vergleich zur Rechnung ohne Verbrennung	68
Abb. 4.4-2	Veranschaulichung der Verbrennung mit Reko als Zündquelle (8 Vol.% H ₂) für den ND-Fall	70
Abb. 4.4-3	ND-Fall, Druckverlauf bei an Reko's gezündeten Verbrennungen (8 Vol.% H ₂) im Vergleich zum Basisfall	73
Abb. 4.4-4	ND-Fall, Verbrauch der Sauerstoffmasse durch H ₂ -Verbrennungen bei Zündungen an Reko's (8 Vol.%) im Vergleich zur Rechnung ohne Verbrennung	73
Abb. 4.4-5	ND-Fall, Entwicklung des SHB-Drucks für verschiedene Zündkonzentrationen	74
Abb. 4.4-6	ND-Fall, Verbrannte Wasserstoffmasse für unterschiedliche Zündkonzentrationen	75
Abb. 4.4-7	ND-Fall, Atmosphärentemperatur in der Plumezone D24A für unterschiedliche Zündkonzentrationen	76
Abb. 4.4-8	ND-Fall, Atmosphärentemperatur in der obersten Domzone (D110) für unterschiedliche Zündkonzentrationen	76
Abb. 4.4-9	ND-Fall, Zündung bei 8 Vol.%, Atmosphärentemperaturen in der obersten Domzone (D110), im Ringspalt (U45) und an der Außen- und Innenseite der Stahlschale (KD110-U45)	77
Abb. 4.4-10	Veranschaulichung der Verbrennung mit Reko als Zündquellen (8 Vol.% H ₂) für den SBL-Fall	79
Abb. 4.4-11	SBL-Fall, Druckverlauf bei an Reko's gezündeten Verbrennungen (8 Vol.% H ₂) im Vergleich zum Basisfall ohne Verbrennung	80
Abb. 4.4-12	SBL-Fall, Verbrannte H ₂ -Masse je nach Zündkonzentration	80
Abb. 4.4-13	SBL-Fall, Abhängigkeit des Druckpeaks von der H ₂ -Konzentration zum Zeitpunkt der Verbrennung	81
Abb. 4.4-14	Veranschaulichung der Verbrennung mit Reko als Zündquellen (8 Vol.% H ₂) für den MBL-Fall	83
Abb. 4.4-15	MBL-Fall, Druckverlauf bei an Reko's gezündeten Verbrennungen (8 Vol.% H ₂) im Vergleich zum Basisfall	84

Abb. 4.4-16	Veranschaulichung der Verbrennung mit Reko als Zündquelle (10 Vol.% H ₂) für den MBL-Fall	87
Abb. 4.4-17	MBL-Fall, Abhängigkeit des Druckpeaks von der Zündkonzentration	89
Abb. 4.4-18	MBL-Fall, Verbrannte H ₂ -Masse je nach Zündkonzentration	89
Abb. 4.4-19	MBL-Fall, Atmosphärentemperatur in der Plumezone D24A für unterschiedliche Zündkonzentrationen.....	90
Abb. 4.4-20	MBL-Fall, Atmosphärentemperatur in der obersten Domzone für unterschiedliche Zündkonzentrationen.....	90
Abb. 4.4-21	MBL-Fall, Zündung bei 10 Vol.%, Atmosphärentemperaturen in der obersten Domzone (D110), im Ringspalt (U45), und an der Außen- und Innenseite der Stahlschale (KD110-U45).....	91
Abb. 4.5-1	Veranschaulichung der Verbrennung mit möglichst großer Auswirkung für den ND-Fall	95
Abb. 4.5-2	ND-Fall, Vergleich des Druckanstiegs für Zündungen an Reko's bei 8 Vol.% H ₂ mit dem "worst-case" und dem Fall ohne Verbrennung.....	96
Abb. 4.5-3	ND-Fall, Entwicklung des Drucks bei der "worst-case" Verbrennung im Vergleich zum Basisfall.....	96
Abb. 4.5-4	ND-Fall, Temperaturverlauf in der "worst-case"-Rechnung im Vergleich zum Basisfall.....	97
Abb. 4.5-5	ND-Fall, Verbrannte H ₂ -Masse in der "worst-case"-Rechnung im Vergleich zum Fall mit Reko-Zündung bei 8 Vol.%.....	97
Abb. 4.5-6	Veranschaulichung der Verbrennung mit möglichst großer Auswirkung für den SBL-Fall.....	100
Abb. 4.5-7	SBL-Fall, Druckpeak im Fall mit "worst-case"-Verbrennung im Vergleich zum Fall mit Zündung bei 9 Vol.% an einem Reko und zum Basisfall.....	102
Abb. 4.5-8	SBL-Fall, Druckverlauf im Fall mit "worst-case"-Verbrennung im Vergleich zum Basisfall.....	102

Abb. 4.5-9	SBL-Fall, Temperaturverlauf im Dom und im Plume über dem DE-Turm A im Fall mit "worst-case"-Verbrennung im Vergleich zum Basisfall	103
Abb. 4.5-10	SBL-Fall, Verbrannte H ₂ -Masse in der "worst-case"-Rechnung im Vergleich zum Fall mit Reko-Zündung bei 8 Vol.%.....	103
Abb. 4.5-11	Veranschaulichung der Verbrennung mit möglichst großer Auswirkung für den MBL-Fall	106
Abb. 4.5-12	MBL-Fall, Druckpeak der "worst-case"-Rechnung im Vergleich zum Fall mit Zündung an Reko's bei 10 Vol.% und zum Basisfall.....	107
Abb. 4.5-13	MBL-Fall, Atmosphärentemperaturverlauf in der "worst-case"-Rechnung im Vergleich zum Basisfall	108
Abb. 4.5-14	MBL-Fall, Verbrannte H ₂ -Masse in der "worst-case"-Rechnung im Vergleich zum Fall mit Reko-Zündung bei 10 Vol.%.....	108
Abb. 4.7-1	MBL-Fall, Vergleich der in den SHB eingespeisten Energie für die Fälle ohne und mit dynamischer Aerosolsimulation.....	112
Abb. 4.7-2	SBL-Fall, Vergleich der in den SHB eingespeisten Energie für die Fälle ohne und mit dynamischer Aerosolsimulation.....	112
Abb. 4.7-3	MBL-Fall, Verteilung der NZL in den Fällen mit dynamischer (Rechnung) und ohne Aerosolsimulation (Abschätzung)	113
Abb. 4.7-4	MBL-Fall, Druckverlauf für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation.....	114
Abb. 4.7-5	MBL-Fall, Vergleich der Massenströmen aus den Dampferzeugertürmen zum Dom für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation.....	115
Abb. 4.7-6	MBL-Fall, Vergleich ausgewählter Raumtemperaturen im oberen Bereich des SHB für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation.....	115
Abb. 4.7-7	MBL-Fall, Vergleich ausgewählter Raumtemperaturen im unteren Bereich des SHB und im Sumpf (RSUA) für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation	116

Abb. 4.7-8	MBL-Fall, Vergleich ausgewählter Strukturtemperaturen in verschiedenen Bereichen des SHB für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation.....	117
Abb. 4.7-9	MBL-Fall, H ₂ -Konzentration ausgewählter, innerhalb des SHB hoch gelegener Räume, für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation.....	117
Abb. 4.7-10	MBL-Fall, H ₂ -Konzentration ausgewählter, innerhalb des SHB tief gelegener Räume, für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation.....	118
Abb. 4.7-11	SBL-Fall , Verteilung der NZL in den Fällen mit dynamischer (Rechnung) und ohne Aerosolsimulation (Abschätzung).....	119
Abb. 4.7-12	SBL-Fall , Druckverlauf für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation.....	120
Abb. 4.7-13	SBL-Fälle, Differenz des Kondensatflusses bzw. der Verdampfungsrate.....	120
Abb. 4.7-14	SBL-Fall, Vergleich der Massenströmen aus den Dampferzeugertürmen zum Dom für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation.....	122
Abb. 4.7-15	SBL-Fall, Vergleich ausgewählter Raumtemperaturen im oberen Bereich des SHB für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation.....	122
Abb. 4.7-16	SBL-Fall, Vergleich ausgewählter Raumtemp. im unteren Bereich des SHB und im Sumpf für die Fälle mit und ohne dyn. Aerosolsimulation.....	123
Abb. 4.7-17	SBL-Fall, Vergleich ausgewählter Strukturtemperaturen in verschiedenen Bereichen des SHB für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation.....	123
Abb. 4.7-18	SBL-Fall, H ₂ -Konzentration ausgewählter, innerhalb des SHB hoch gelegener Räume, für Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation.....	124
Abb. 4.7-19	SBL-Fall, H ₂ -Konzentration ausgewählter, innerhalb des SHB hoch gelegener Räume, für Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation.....	124

Abb. 4.8-1	MBL-Fall, Vergleich der Massenströmen aus den Dampferzeugertürmen zum Dom für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H ₂	126
Abb. 4.8-2	MBL-Fall, Verbrannte H ₂ -Masse für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H ₂	127
Abb. 4.8-3	MBL-Fall, Vergleich ausgewählter Raumtemperaturen im oberen Bereich des SHB für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H ₂	127
Abb. 4.8-4	MBL-Fall, Vergleich ausgewählter Raumtemperaturen im unteren Bereich des SHB und im Sumpf für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H ₂	128
Abb. 4.8-5	MBL-Fall, H ₂ -Konzentration ausgewählter, innerhalb des SHB hoch gelegener Räume, für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H ₂	128
Abb. 4.8-6	MBL-Fall, H ₂ -Konzentration ausgewählter, innerhalb des SHB tief gelegener Räume und im Sumpf, für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H ₂	129
Abb. 4.8-7	Veranschaulichung der Verbrennung mit Reko's als Zündquellen (8 Vol.% H ₂) für den SBL-Fall mit Aerosolsimulation	131
Abb. 4.8-8	SBL-Fall, Druckpeak der Verbrennung mit dynamischen Spaltprodukten gegenüber der statischen Rechnung	132
Abb. 4.8-9	SBL-Fall, Verbrannte H ₂ -Masse für den Fall mit dynamischer Aerosolsimulation bei Zündung an den Rekos bei 8 Vol.% im Vergleich zum Basisfall	132
Abb. 4.8-10	SBL-Fall, H ₂ -Masse, freigesetzt in den SHB aus dem Leck.....	133
Abb. 4.8-11	SBL-Fall, Vergleich des Sauerstoffabbaus für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, bei Zündung an Rekos bei 8 Vol.% H ₂	134
Abb. 4.8-12	SBL-Fall, H ₂ -Konzentration einiger ausgewählter, innerhalb des SHB hoch gelegener Räume, für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H ₂	134

Abb. 4.8-13	SBL-Fall, H ₂ -Konzentration einiger ausgewählter, innerhalb des SHB tief gelegener Räume, für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H ₂	135
Abb. 4.8-14	SBL-Fall, Vergleich der Massenströmen aus den Dampferzeugertürmen zum Dom für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H ₂	135
Abb. 4.8-15	SBL-Fall, Vergleich ausgewählter Raumtemperaturen im oberen Bereich des SHB für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H ₂	136
Abb. 4.8-16	SBL-Fall, Vergleich ausgewählter Raumtemperaturen im unteren Bereich des SHB und im Sumpf für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H ₂	136
Abb. 4.9-1	MBL-Fall, integraler Wasserstoffabbau, GRS-/AREVA-Reko-Modell	138
Abb. 4.9-2	MBL-Fall, integraler CO-Abbau, GRS-/AREVA-Reko-Modell	138
Abb. 4.9-3	MBL-Fall, integrale Energiefreisetzung bei der Rekombination, GRS-/AREVA-Reko-Modell.....	139
Abb. 4.9-4	ND*-Fall, integraler Wasserstoffabbau, GRS-/AREVA-Reko-Modell ..	139
Abb. 4.9-5	ND*-Fall, integraler CO-Abbau, GRS-/AREVA-Reko-Modell	140
Abb. 4.9-6	ND*-Fall, integrale Energiefreisetzung bei der Rekombination, GRS-/AREVA-Reko-Modell.....	140
Abb. 4.9-7	MBL-Fall, Abhängigkeit des Druckverlaufs vom verwendeten Reko-Modell, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H ₂	142
Abb. 8.1-1	Schnitt durch den SHB bei +2.0 m (Höhenkote: 2,1 m)	153
Abb. 8.1-2	Schnitt durch den SHB bei +6,0 m (Höhenkote: 5,3 m)	153
Abb. 8.1-3	Schnitt durch den SHB bei +9 m (Höhenkote: +8,8 m)	154
Abb. 8.1-4	Schnitt durch den SHB bei +12 m (Höhenkote +14,2 m)	154
Abb. 8.1-5	Schnitt durch den SHB bei +16,4 m (Höhenkote +17,5 m)	155
Abb. 8.1-6	Schnitt durch den SHB bei +16,4 m (Höhenkote +20 m)	155
Abb. 8.1-7	Schnitt durch den SHB bei +21,5 m (Höhenkote +23 m)	156
Abb. 8.1-8	Schnitt durch den SHB bei +29,28 m (Höhenkote +30,15 m)	156

Abb. 8.1-9	Schnitt (C-C) durch den SHB	157
Abb. 8.1-10	Schnitt (D-D) durch den SHB	157

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.2-1	Randbedingungen der Testrechnung zur Schichtung im Dombereich.....	30
Tab. 4.1-1	COCOSYS-Analysen und wesentlich Randbedingungen	32
Tab. 4.1-2	Charakteristische Zeitpunkte wesentlicher Ereignisse der untersuchten Szenarien	33
Tab. 4.4-1	Zeitliche Entwicklung und Bilanz der Verbrennungsrechnung mit Zündung an den Reko's bei 8 Vol.% H ₂ (ND-Fall)	69
Tab. 4.4-2	Zeitliche Entwicklung und Bilanz der Verbrennungsrechnung mit Zündung an den Reko's bei 8 Vol.% H ₂ (SBL-Fall).....	78
Tab. 4.4-3	Zeitliche Entwicklung und Bilanz der Verbrennungsrechnung mit Zündung an den Reko's bei 8 Vol.% H ₂ (MBL-Fall)	82
Tab. 4.4-4	Zeitliche Entwicklung und Bilanz der Verbrennungsrechnung mit Zündung an den Reko's bei 10 Vol.% H ₂ (MBL-Fall)	85
Tab. 4.5-1	Zeitliche Entwicklung und Bilanz der Verbrennungsrechnung mit möglichst großer Auswirkung, „worst-case“ (ND-Fall)	93
Tab. 4.5-2	Zeitliche Entwicklung und Bilanz der Verbrennungsrechnung mit möglichst großer Auswirkung (SBL-Fall)	98
Tab. 4.5-3	Zeitliche Entwicklung und Bilanz der Verbrennungsrechnung mit möglichst großer Auswirkung (MBL-Fall).....	104
Tab. 4.8-1	Zeitliche Entwicklung und Bilanz der Verbrennungsrechnung mit Zündung an den Reko's bei 8 Vol.% H ₂ , Vergleich MBL-Fall mit/ohne (dynamische) Aerosolsimulation	125
Tab. 4.8-2	Zeitliche Entwicklung und Bilanz der Verbrennungsrechnung mit Zündung an den Reko's bei 8 Vol.% H ₂ Vergleich SBL-Fall mit/ohne (dynamische) Aerosolsimulation	130

Tab. 4.9-1	Zeitliche Entwicklung und Bilanz der Verbrennungsrechnung mit Zündung an Reko's bei 8 Vol.% H ₂ , Vergleich MBL-Fall mit AREVA- und GRS-Modell	141
------------	---	-----

1 Einleitung

Zur Bewertung von Auswirkungen auslegungsüberschreitender Ereignisse in LWR Anlagen mit einer möglichen Integritätsgefährdung des Sicherheitsbehälters durch H₂-Verbrennungen, wurden bezüglich der Wirksamkeit der Wasserstoffgegenmaßnahmen in einem DWR vom Typ Konvoi – eines Konzepts passiver autokatalytischer Rekombinatoren (Reko) - erweiterte Referenzanalysen für Unfallszenarien mit unterschiedlichen Zuständen bzgl. der Gasgemische im Sicherheitsbehälter und der konvektiven Randbedingungen im Sicherheitsbehälter (SHB) durchgeführt. Ein Basiskonzept für DWR Konvoi wurde von der GRS im Rahmen von Vorhaben des BMU /TIL 98/ untersucht; das endgültig realisierte Konzept der Referenzanlage GKN 2 wurde aber nicht erneut mit COCOSYS untersucht.

Um die Entstehung brennbarer Gasgemische im SHB von DWR zu verhindern hat die Reaktorsicherheitskommission im Jahr 1994 die Installation von Reko's empfohlen. Die neuen Untersuchungen mit dem GRS Code COCOSYS greifen diesbezüglich auf der 419. Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) am 03.09.2009 gegebenen Empfehlungen zu: „Gefährdung des Sicherheitsbehälters von DWR durch Wasserstoffreaktionen infolge der Zünderwirkung von passiven autokatalytischen Reko's“ für vertiefte Analysen auf /RSK 09/.

Wasserstoff wird während eines Stör- bzw. Unfalls durch verschiedene Prozesse erzeugt: Wasserdampf-Zirkonium-Reaktionen bei hohen Temperaturen im Reaktorkern, Schmelze-Beton-Wechselwirkung oder Radiolyse, z.B. im Brennelementlagerbecken. Versuche in jüngere Zeit zur Wirksamkeit der Rekombinatoren an der THAI-Anlage bei Becker Technologies in Eschborn haben die Basis für eine erneute Bewertung des Reko-Modells in COCOSYS geliefert, aber auch gezeigt, dass Reko's unter bestimmten Bedingungen eine potentielle Zündquelle darstellen, so dass auch die Fragestellung nach einer Gefährdung der SHB-Integrität durch eine H₂-Verbrennung (durch einen Reko) untersucht wurde.

Mit den Analysen im Vorhaben soll die Umsetzbarkeit der regulatorischen Anforderungen an die Konzeption eines derartigen Systems überprüft werden. Mit den COCOSYS-Analysen wird die geforderte Nachweisführung der Effektivität des Reko-Systems unter den zugrunde zu legenden repräsentativen Unfallabläufen erbracht. Die ist konform mit den in Modul 7 des Sicherheitskonzepts für Kernkraftwerke, Revision D

/MER 09/ definierten Anforderungen zu einer ganzheitlichen Beurteilung der Wirksamkeit des Reko-Konzepts in deutschen Kernkraftwerken.

Zur Bewertung, ob unter unfallbedingten Belastungen durch Innendruck- und Temperaturerhöhung die Integrität des Sicherheitsbehälters als leckdichte Barriere gefährdet ist, sind strukturmechanische Berechnungen, bei denen die Bestimmung von Sicherheitsmargen gegenüber dem Integritätsverlust bzw. die Grenztragfähigkeit des Sicherheitsbehälters im Vordergrund stehen, erforderlich. Im Rahmen des Vorhabens wurden solche strukturdynamischen elastoplastischen Berechnungen mit dem für derartige Fragestellungen erprobten Finite Elemente Rechenprogrammsystem ADINA durchgeführt. Charakteristische Lastannahmen wurden aus verfügbaren Versuchsergebnissen als peakförmige Druck- und Temperaturverläufe festgelegt. Weiterhin wurden Annahmen zur druck- und temperaturbeaufschlagten Fläche des Sicherheitsbehälters aus den COCOSYS-Analysen im Vorhaben abgeleitet. Die Ergebnisse sind in einem separaten Bericht des Vorhabens in /SIV 11/ dokumentiert.

Nach einer Einleitung in Kapitel 1 werden im Kapitel 2 die Randbedingungen der Analysen dargestellt. Das betrifft die Überarbeitung und Erweiterung des COCOSYS-Datensatzes der Referenzanlage und die Aufbereitung der Eingangsdaten für die Analyse der 4 zu untersuchenden Szenarien.

Im Kapitel 3 werden Ergebnisse von Testrechnungen dargestellt, die belegen, dass mit dem überarbeiteten Datensatz H₂-Schichtungen im Dombereich prinzipiell berechnet werden können. Ob diese in der Referenzanlage unter den zu erwartenden Unfallbedingungen auftreten können, zeigen die in Kapitel 4 dargestellten Ergebnisse der COCOSYS-Analysen.

Im Kapitel 4 des Berichtes werden die Ergebnisse der zahlreichen Unfallanalysen mit COCOSYS zu den vier Szenarien dargestellt, die entsprechend der Vorhabensbeschreibung vorgesehen waren.

Kapitel 5 fasst die erzielten Ergebnisse zusammen und Kapitel 6 enthält die Schlussfolgerungen.

2 Randbedingungen der COCOSYS-Analysen

2.1 COCOSYS-Datensatz der Referenzanlage

2.1.1 Allgemeine Angaben

Der verwendete COCOSYS-Datensatz ist eine komplett überarbeitete und erweiterte Version des in /TIL 98/ verwendeten Datensatzes (Abb. 2.1-1). Er enthält jetzt insgesamt 281 Zonen einschließlich 54 Zonen, die zur Abbildung des Ringraums dienen und einer Zone zur Simulation der Umgebung. Der in Abb. 2.1-2 dargestellte Schnitt B-B durch die Referenzanlage zeigt die Nodalisierung innerhalb des SHB. Weitere Schnittzeichnungen mit Angaben zum Nodalisierungsschema sind im Anhang A zu finden.

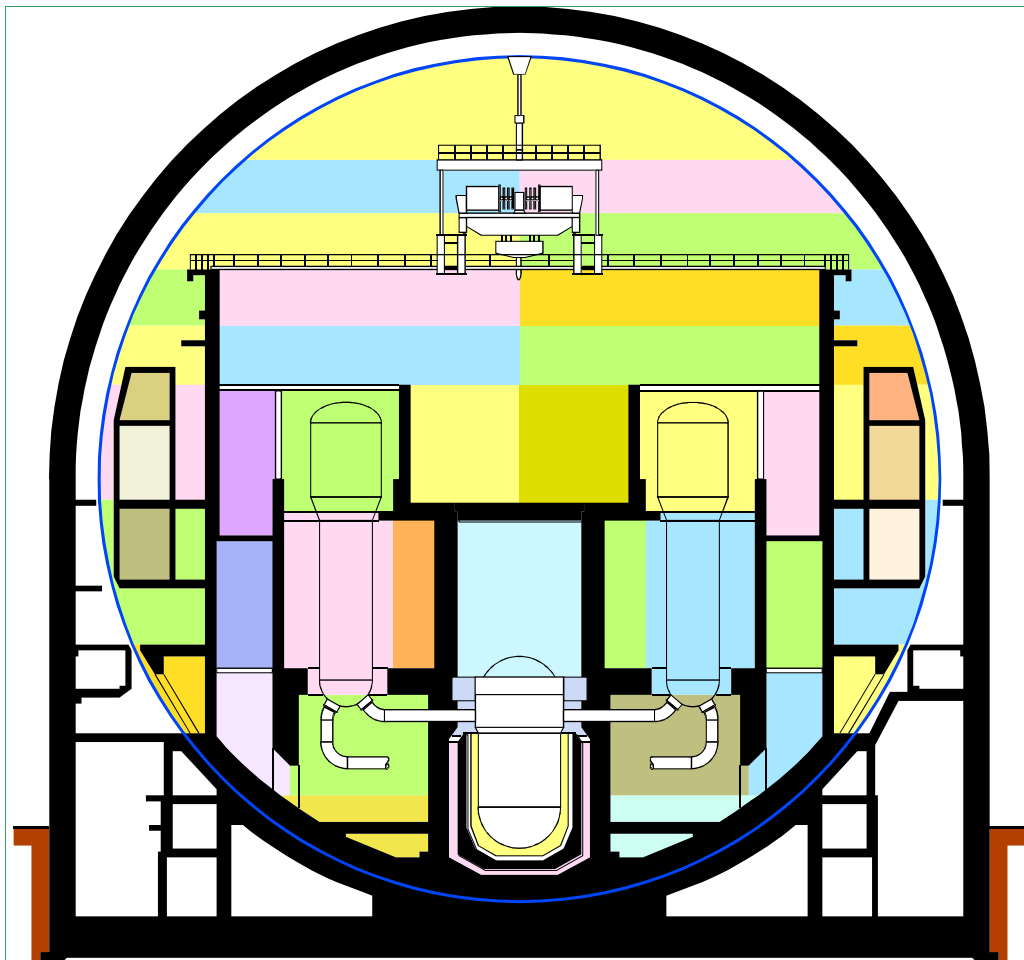


Abb. 2.1-1 RALOC/COCOSYS-Nodalisation (Querschnitt (B-B)) der Referenzanlage Konvoi mit eingezeichneten Nodalisierungszonen /TIL 98/

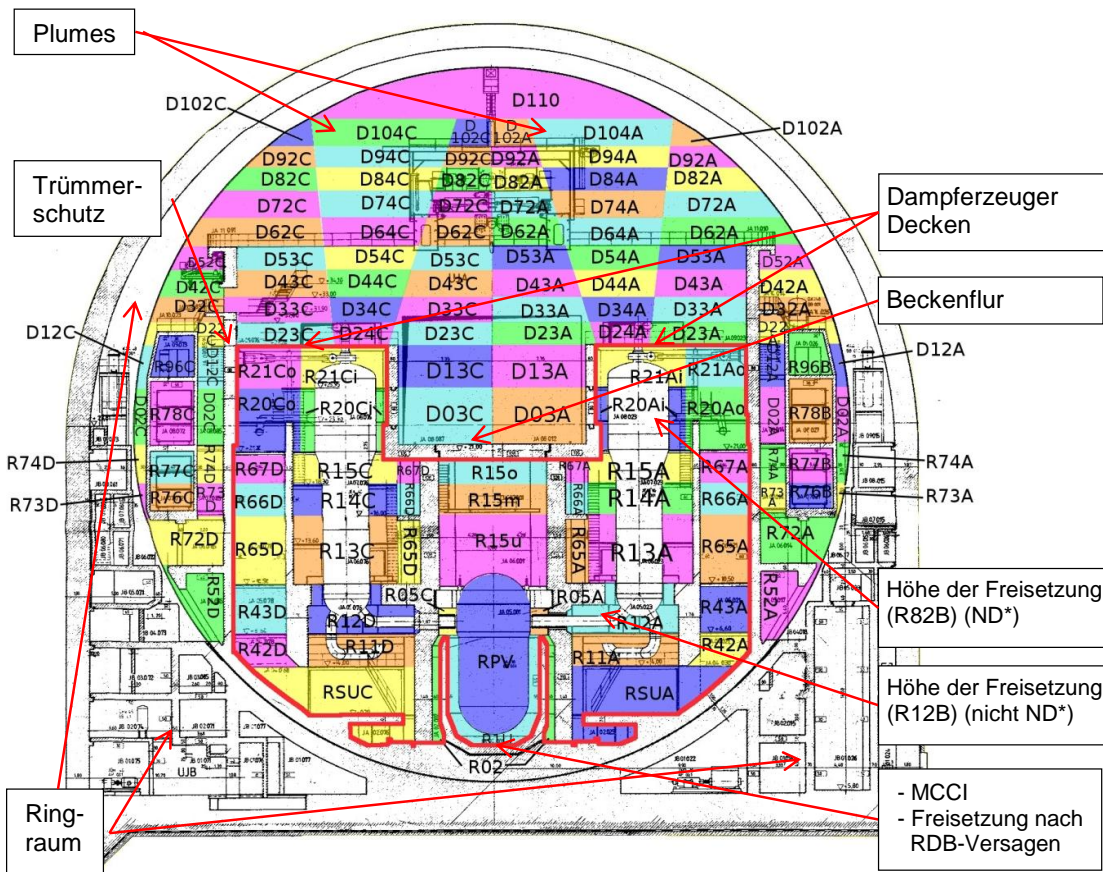


Abb. 2.1-2 Neue COCOSYS-Nodalisation (Schnitt B-B) der Referenzanlage Konvoi mit eingezeichneten Nodalisierungszonen (rot umrandeter Bereich: Anlagenräume)

Im Leistungsbetrieb unterscheidet man zwischen den Anlagen- und den Betriebsräumen. Bei Stör- und Unfällen lassen sich drei „Raumbereiche“ im SHB unterscheiden, in denen sich, wie die Analysen zeigen, unterschiedliche Atmosphärenzustände ausbilden. Das sind (1) die Anlagenräume, (2) der Dom und (3) die Räume hinter dem Trümmerschutzzylinder. Die beiden letzteren Raumbereiche bilden zusammen die Betriebsräume.

Der **Dom** umfasst alle mit „D“ beginnenden COCOSYS-Zonen. Seine untere Begrenzung ist die geodätische Höhe des Beckenflurs. Da der Trümmerschutzzylinder große Öffnungen oberhalb dieser Höhe aufweist (Abb. 2.1-2), ist bereits ab hier die Stahlschale die äußere Begrenzung des Doms. Insgesamt enthält der Dom 60 % des freien Volumens innerhalb der Stahlschale. In den unteren Teil des Doms hinein ragen die Lüftungsräume R76C bis R96C bzw. R76B bis R96B, sowie die Dampferzeugertürme.

Die Dampferzeugertürme gehören zu den **Anlagenräumen**, die in Abb. 2.1-2 farblich hervorgehoben (rot umrandet) sind. Die Anlagenräume sind ein im Leistungsbetrieb „nicht begehbare Bereich“ und durch Türen und Berstelemente/Berstmembrane von den restlichen Räumen (Betriebsräumen – Dom und Räume hinter dem Trümmerschutzzylinder) lüftungstechnisch getrennt. Nicht alle innerhalb des Trümmerschutzes liegenden Räumen gehören zu den Anlagenräumen, z. B. D05 (Brennelementbecken), R91D, R62A und auf der anderen Seite R62B + C, R59B + C und R70, sowie die in den Ebenen darunter liegenden Räume (Abb. 8.1-6, Schnitt in Höhenkote 20 m).

Als die **Räume hinter dem Trümmerschutz** werden im Folgenden die zwischen Trümmerschutzzylinder und SHB-Schale und unterhalb des Beckenflurs gelegenen Räume bezeichnet. Abb. 2.1-3 verdeutlicht dies.

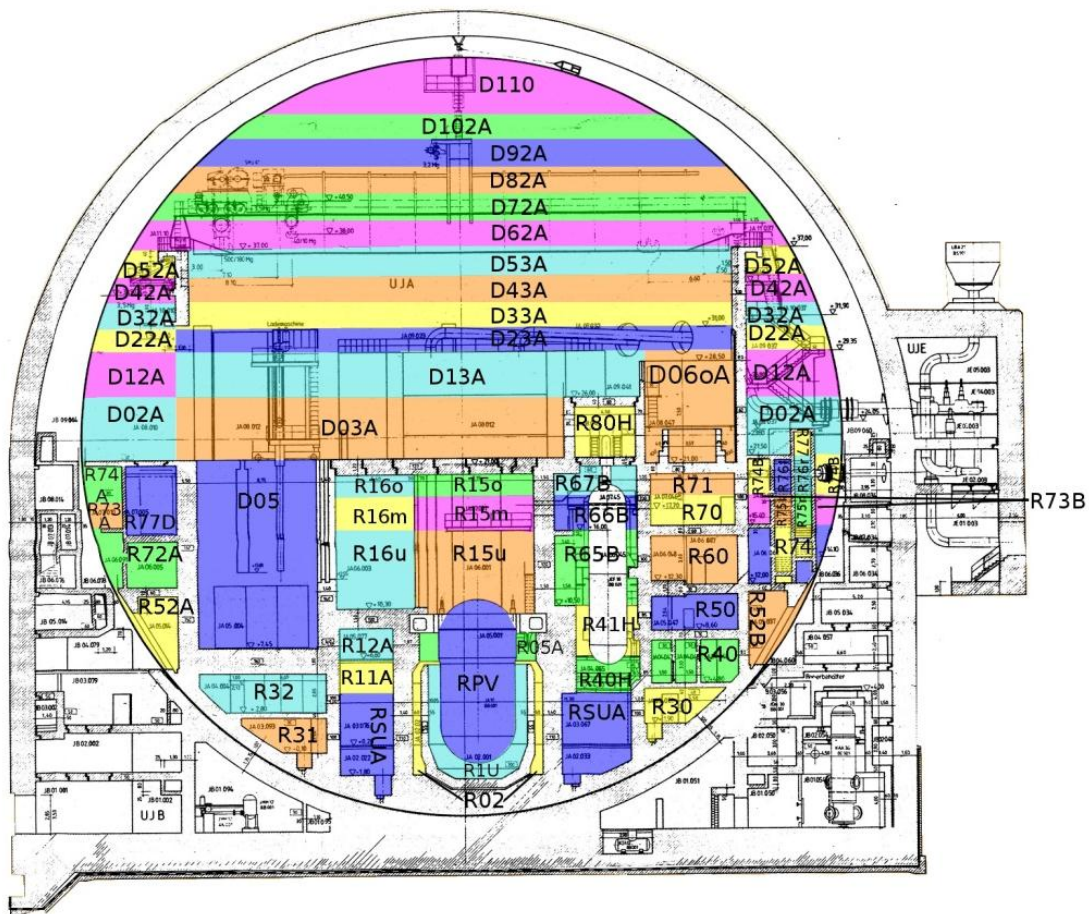


Abb. 2.1-3 Neue COCOSYS-Nodalisation (Schnitt A-A) der Referenzanlage Konvoi mit eingezeichneten Nodalisierungszonen

2.1.2 Modellierung der Wände

Die Verteilung sämtlicher Strukturen auf die Zonen wurde gründlich kontrolliert. Dazu wurden von der KWU verfügbare Vermessungen der Oberflächen mit Angabe der mittleren Wanddicken für alle Anlagenräume genutzt. Teilweise werden in COCOSYS Räume in mehrere Zonen unterteilt (siehe z.B. den oberen Teil der Dampferzeugertürme: R20Ai, R20Ao, R21Ai und R21Ao in Abb. 2.1-2). In diesen Fällen wurden die Baueingabepläne genutzt, und die Verteilung erfolgte nach geometrischen Gesichtspunkten. Oberflächen, die weder Böden, Decken oder Wänden zugeordnet werden konnten, wurden im Verhältnis 1:1:4 als Boden, Decke und Wände neu zugeordnet (Annahme einer quaderförmigen Geometrie). Einige Aspekte, die geometrische Fragen oder die Lage bestimmter Öffnungen, Türen, etc. betrafen, wurden bei einem Anlagenbesuch vor Ort geklärt.

2.1.3 Modellierung der Raumbereiche

Grundlegend ist eine adäquate Abbildung der geometrischen Gegebenheiten in COCOSYS wie in anderen Codes eine Grundvoraussetzung für belastbare Rechenergebnisse. Für COCOSYS liegen in der GRS langjährige Erfahrungen vor, welche Besonderheiten bei der Erstellung einer Nodalisation einer Anlage zu beachten sind /ALL 99, ALL 03, ALL 07/. Diese sind u.a. auch im COCOSYS-Handbuch niedergeschrieben /KLE 08/.

Wie die Abb. 2.1-1 und Abb. 2.1-2 zeigen, wurde der Datensatz gegenüber früheren Rechnungen grundlegend überarbeitet und erweitert. So sind mehr Ebenen im Dom (D03-D110 in Abb. 2.1-2) bzw. in den Anlagenräumen (R65A-R67A bzw. R65D-R67D) eingeführt worden, um die Simulation einer atmosphärischen Schichtung (Stratifikation) zu ermöglichen. Diese Erkenntnis ergab sich aus der Anwendung auf Experimente zur Bildung und Auflösung von Schichtungen /SCH 09, SCH 11/. Die feine Unterteilung aller Anlagenräume ist besonders für Fälle mit tief liegendem Leck (ND-Fall, MBL-Fall, SBL-Fall) von Bedeutung. Auch im ND*-Fall mit hoch gelegener Freisetzung über den Druckhalter(DH)-Abblasetank in die Anlagenräume ist sie von Bedeutung, da die Ebenen unterhalb des Freisetzungsortes in den Anlagenräumen wesentlich zur inneren Konvektion und zum Wärmeeintrag in die Strukturen beitragen. Letztlich ist dies generell auch für die Berechnung des Verhaltens aller Reko's von Bedeutung. Grundsätzlich wurde die Nodalisation für alle Rechnungen im Vorhaben unverändert beibehalten.

Zusätzlich wurden sogenannte „Plumes“ (Zonen D24A-D104A bzw. D24C-104C) im Datensatz im Bereich des Doms oberhalb der DE-Decken eingeführt. Sie dienen zur Simulation eines nach oben steigenden Gasgemisches. Beim Aufsteigen des Gases im Plume wird in diesen aus dem umgebenden Raumbereichen Gas mit hineingerissen und strömt im Plume mit nach oben. Dadurch vergrößert sich sein Volumen zunehmend. Ferner wird dadurch eine zunehmend gleichmäßige Durchmischung der Atmosphäre des betroffenen Raumbereiches (hier des gesamten Dombereichs) erreicht. Zonen, die tiefer (unterhalb des Plumes) liegen, werden dabei nicht durchmischt. Diese Änderungen am Datensatz, die auch für die Simulation von eventuell auftretenden Stratifikationen im Dombereich erforderlich waren, basieren auf Erkenntnissen aus der Nachrechnung von diesbezüglichen Experimenten /SCH 09, SCH 11/. In Kapitel 0 wird durch eine COCOSYS-Analyse gezeigt, dass durch diese Art der Modellierung Stratifikationen und der Auflösung, wie sie sich in Experimenten zeigte, prinzipiell berechenbar sind.

Die Plumes in der Abb. 2.1-2 sind überproportional groß dargestellt; während der Durchmesser des SHB bei 56 m liegt, haben die Plumes an ihrem Fußpunkt je einen Durchmesser von 2,2 m. Die Grundfläche des Plumes wurde dabei so gewählt, dass sie der Fläche der im SBL- bzw. ND*-Fall versagenden Berstelemente in den Decken der Dampferzeugertürme entspricht.¹

Die Nodalisierung des Ringraums musste an die neue Nodalisierung im Dombereich bzw. generell im SHB angepasst werden (siehe Abb. 2.1-4). Dies betrifft insbesondere die Anzahl der Ebenen, die modelliert wurden. Die sehr starke „thermische Kopplung“ zwischen den Zonen innerhalb und außerhalb des SHB über den Wärmeaustausch durch die Stahlschale (38 mm stark) erfordert aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit des Metalls das strikte Einhalten der gleichen Nodalisierungsregeln², die auch in den Anlagenräumen gelten.

¹ Sollten mehr Berstelemente in den DE-Decken versagen (wie z.B. im ND-Fall), so würde der Impuls des dabei strömenden Gases nicht mehr mit einem Plume im Dombereich beschrieben werden können. In Phasen nach dem Druckausgleich sind die Massenströme gering, und die Fläche hat nur einen geringen Einfluss. Individuelle Plumes, angepasst an jeden Rechenfall, würden einen Vergleich der Rechenergebnisse untereinander schwieriger gestalten.

² COCOSYS-Nodalisierungsregeln, z. B.: gleiche Höhe der Zonenmittelpunkte bei gekoppelten Räumen; „Sackgassen“-Räume, die nicht tatsächlich existieren, vermeiden, d.h. jeder Raum braucht mindestens zwei Verbindungen, etc.

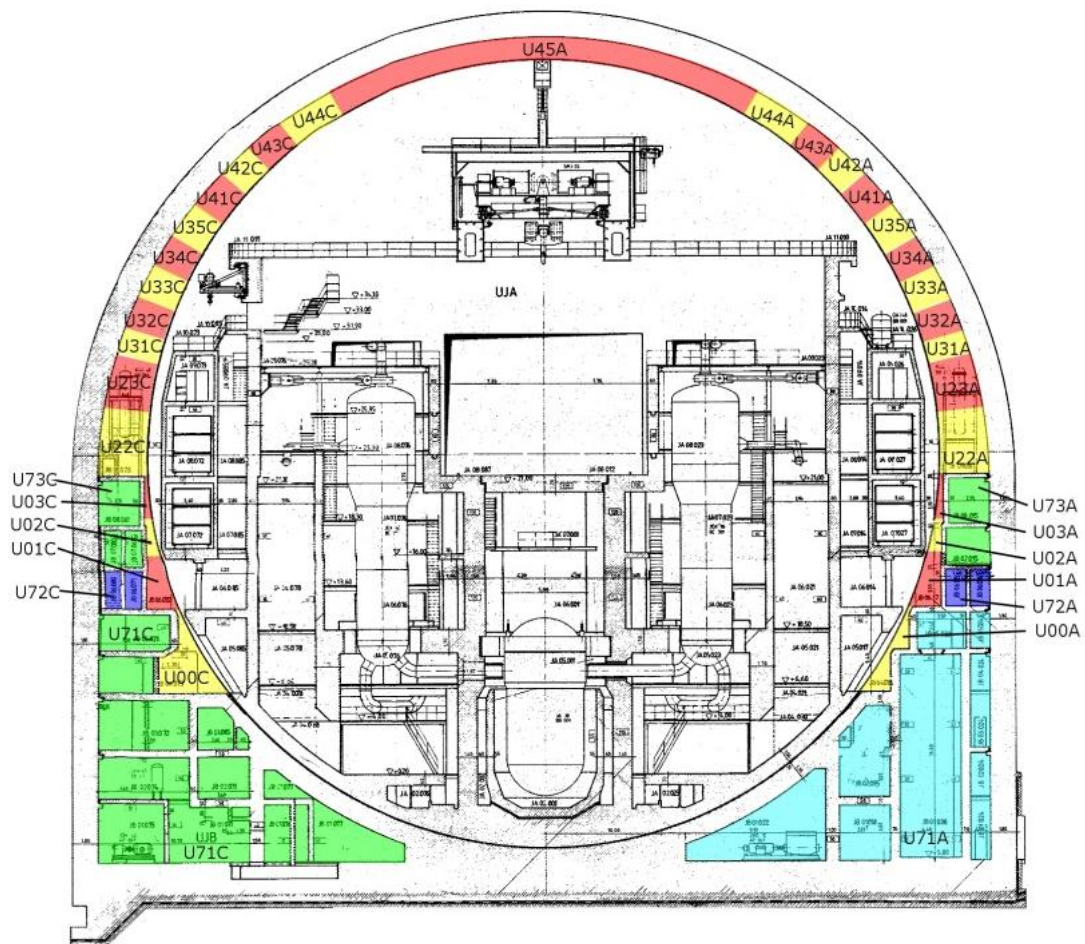


Abb. 2.1-4 Neue COCOSYS-Nodalisation des Ringraums der Referenzanlage Konvoi mit eingezeichneten Nodalisierungszonen

Jeder Raum bzw. hier jede Zone innerhalb des SHB (Dome oder obere Periferie), der durch die Stahlschale thermisch an einen Raum bzw. einer Zone im Ringraum gekoppelt ist, die auf der gleichen Höhe liegt, hat somit einen eigenen „Partner im Ringraum“ (so ist z.B. D92A mit U43A, D92C mit U43C oder D110 mit U45A thermisch gekoppelt). Dies bedeutet auch, dass der Ringraum bis zur Ebene des Beckenflurs in Quadranten, darüber in 180°-Sektoren unterteilt ist, da die Zonen innerhalb des SHB analog in Quadranten oder 180°-Sektoren unterteilt sind.

Der erste Ansatz, den Ringraum einfach horizontal in Ebenen – genau wie innerhalb im SHB – zu unterteilen, hatte unrealistische Temperaturschichtungen im Ringraum zur Folge. Dies lag an der überproportional großen Betonmasse (Struktur des Reaktorgebäudes), die der obersten Zone des Ringraums durch diese ungeeignete Nodalisation zugeordnet wurde. Deshalb wurde der Ringraum – bis zur Ebene des Beckenflurs (Tonnen U22A/U22C und höher) – durch Kegelschnitt ausgehend vom Zentrum des SHB

(siehe Abb. 2.1-4) unterteilt, was letztlich eine realistischere Temperaturverteilung ergab. Die Nodalisierung des Ringraum im Bereich unterhalb von U00A/U00C (siehe Abb. 2.1-4) ist bewusst grob gehalten, da ab dort keine nennenswerte thermische Kopplung zwischen SHB und Ringraum mehr existiert. Die Stahlschale des SHB verläuft hier innerhalb einer dicken Betonschicht, die den Wärmetransport zwischen SHB und Ringraum sehr stark behindert.

2.1.4 Modellierung von Berstelementen und Türen

In den Decken der Dampferzeugertürme (Räume R21Ai, R21Ao, R21Ci, R21Co in Abb. 2.1-2) sind eine größere Anzahl von Berstelementen eingebaut, deren Funktion es ist, bei einem definierten Differenzdruck zu versagen und so einen Druckausgleich zwischen den Anlagenräumen und dem Dombereich herzustellen. Fertigungstechnisch sind Toleranzen zum Versagensdruck angegeben, so dass in keinem Fall davon auszugehen ist, dass sämtliche Elemente bei genau dem gleichen Differenzdruck versagen. Im Modell in COCOSYS sind die Versagensdrücke für die einzelnen Elemente entsprechend einer Gauß-Verteilung gestaffelt worden. Bei einem Druckanstieg in den Anlagenräumen würden zuerst nur wenige Berstelemente versagen, und eine geringe Fläche freigeben. Sollte dies nicht ausreichen, um einen weiteren Anstieg der Druckdifferenz zu verhindern, würden nach und nach weitere Berstelemente nachgeben. Bei der Modellierung dieser Öffnungen wird auch die Möglichkeit einer Gegenströmung berücksichtigt. So wird die Hälfte des sich öffnenden Strömungsquerschnitts in den Fußpunkt des Plumes geführt (aus den Zonen R21Ai bzw. R21Ci nach D24A bzw. D24C), die andere Hälfte in die den Plume umgebende Zone (also z.B. aus R21Ao nach D23A). Je nachdem wie stark die Strömung und Druckdifferenzen über diese Öffnungen sind, ergeben sich Gegen- oder parallele Strömungen. Um eine Gegenströmung zu ermöglichen, muss je ein Raum (eine Zone) für eine Verbindung für Strömungen nach unten und eine für Strömungen nach oben existieren. Sämtliche Verbindungen in die Dampferzeugertürme, also z.B. von R15A oder R67A sind daher je zur Hälfte in R20Ai bzw. R20Ao geführt worden. Diese Nodalisierung ist erforderlich, da bei lumped parameter codes wie COCOSYS grundsätzlich keine Gegenströmung zwischen zwei durch Strömungspfade verbundenen Zonen berechnet werden kann.

Die meisten Türen innerhalb des SHB sind ebenfalls mit einem Berstelement versehen, das verhindert, dass bei Anstehen einer Druckdifferenz die Tür nicht versagt, sondern zuerst das Berstelement. Es muss angemerkt werden, dass prinzipiell die Möglichkeit,

dass ein Berstelement unter-/oberhalb des spezifizierten Versagensdrucks öffnet, für alle Berstelemente besteht. Allerdings wurden hier fertigungstechnisch keine Toleranzen angegeben, so dass die vorgegebenen Werte benutzt wurden. Eine diesbezügliche Parameterstudie konnte nicht durchgeführt werden, da die insgesamt 61 Berstelemente der Anlage im Datensatz umgesetzt wurden, was einen zu hohen zeitlichen Aufwand erfordert hätte.

Weiterhin ist davon auszugehen, dass Türen innerhalb des SHB nicht gasdicht sind. Schon im ursprünglichen Datensatz /TIL 98/ wurden sämtliche Türen mit einer gewissen erlaubten Leckage (einer definierten Öffnungsfläche auch im geschlossenen Zustand) abgebildet. Diese Fläche wurde aus den Daten zu den Volumenströmen des Lüftungssystems ermittelt. Während des Betriebs der Anlage wird zwischen den Anlagen- und Betriebsräumen eine definierte Druckdifferenz aufrechterhalten. Die Fördermengen, die dazu notwendig sind, entsprechen genau der Menge Gas, die durch Leckagen zurückfließt. Jede Tür verfügt in etwa über einen 1 mm breiten Spalt entlang des gesamten Türrahmens.

2.1.5 Sonstige Änderungen

Erwähnt werden sollte ebenfalls die Abbildung des Brennelementlagerbeckens im Datensatz. Da COCOSYS (noch) nicht in der Lage ist, eine Temperaturschichtung in Wasserpools zu simulieren – die Wassermasse des BE-Beckens aber wegen ihrer großen Wärmekapazität auch nicht ignoriert werden kann – wurde eine Unterteilung vorgenommen. Da in den berechneten Abläufen kein Sieden im BE-Becken zu erwarten ist, ist es ausreichend, eine 5 cm dicke Wasserschicht im BE-Beckenbereich direkt zu simulieren, die die oberste Schicht des Pools repräsentiert. Das darunter liegende Wasser wurde durch eine Wärmestruktur (wie eine Wand) mit nach unten zunehmender Schichtdicke simuliert. Die Wärmeleitung in dieser den Wasserpool simulierenden Wand wird von COCOSYS korrekt simuliert.

Neben der Ausrichtung des Datensatzes auf die Möglichkeiten Stratifikationen in den Anlagenräumen und im Dombereich zu simulieren, haben vor allem Verbesserungen an COCOSYS zur Notwendigkeit weiterer grundlegender Überarbeitungen geführt. Zu dem Zeitpunkt, an dem der ursprüngliche Konvoi Datensatz erstellt wurde, waren numerische Instabilitäten nur zu vermeiden, indem bei großen Strömungsverbindungen nicht die reale Querschnittsfläche, sondern eine reduzierte Verbindungsfläche verwen-

det wurde. In den jetzt verwendeten Datensätzen sind stets die realen Querschnittsflächen der Verbindungen modelliert.

Ältere COCOSYS-Versionen hatten auch Stabilitätsprobleme falls nicht genug Wasser in den Zonen vorhanden war. So waren im alten Datensatz teilweise sehr große Restwassermengen (bedingt durch anfallendes Kondensat) für einige Zonen vorgegeben, die nun zum Teil erheblich reduziert wurden. Zur Bestimmung der Restwassermengen wurde angenommen, dass sich auf Böden ein 1 mm dicker Wasserfilm ausbildet; für sonstige Strukturen wurde jeweils ein 0,1 mm dicker Wasserfilm angenommen.

Im Ergebnis der Analysen im Kap. 4.3 wird ausgeführt werden, welche Bedeutung das Abwaschen von abgelagerten Spaltprodukten für die Umverteilung eben dieser Spaltprodukte und der durch diese freigesetzte NZL hat. Daher mussten ausgehend von den Entwässerungsplänen der Konvoi-Referenzanlage die Drainage-Verbindungen sämtlicher Zonen neu bearbeitet werden. Im Ausgangsdatsatz wurden sämtliche Drainageverbindungen noch in den Hauptsumpf geleitet. Während der Erstellung des Datensatzes stellte sich heraus, dass dies nur für die Anlagenräume (also die Räume um den RDB, die Hauptkühlmittelleitungen und die Dampferzeuger) korrekt ist, während die Drainage der Betriebsräume in separate Räume (R30 bzw. R31 in Abb. 2.1-3) geleitet wird.

Für die Druckausgleichsklappen, die den Wassereinbruch vom Sumpf in den Ringspalt zwischen biologischen Schild und Tragschild simulieren, gab es zum Zeitpunkt der früheren Rechnung noch kein explizites Modell, so dass mit einer einfachen Sumpfverbindung gearbeitet wurde. Dieselbe Art von Klappen verbindet auch die Räume R31 und RSUA bzw. R30 und RSUC (siehe Abb. 2.1-3). In der jetzigen COCOSYS-Simulation können die Klappen, wie in Realität, sowohl durch eine festgelegte Atmosphärendruckdifferenz, wie auch durch eine entsprechend hohe (netto) Wassersäule geöffnet werden. Auf genau diese Art und Weise wird das Wasser, was durch Drainageverbindungen aus den Betriebsräumen in die Räume R31 und R30 geleitet wird in den Sumpf gelangen. Diese Besonderheiten wurden bei der Überarbeitung des Datensatzes bezüglich des Drainagesystems, das für den Wasserüberlauf zwischen Zonen zuständig ist, berücksichtigt.

2.1.6 Modellierung des Abwaschens von Aerosolen

Für die Analysen mit Verwendung des Aerosol- und Spaltproduktmoduls AFP (Kapitel 4.7 und 4.8) wurden auch die Angaben zur Modellierung des „Abwaschvorgangs von Aerosolen“ durch Kondensat von Wänden oder Böden und damit der Transport in den Sumpf des SHB überprüft. Das zurzeit in COCOSYS vorhandene Modell hat noch einige Schwächen, wie nachfolgend erläutert³. Ein neues Modell ist in Arbeit. Für die anderen Analysen sind Annahmen zur Umlagerung von Aerosolen durch Abwaschvorgänge indirekt in der vorgegebenen „statischen“ Verteilung der Aerosole und Spaltprodukte bzw. ihrer Nachzerfallsleistung enthalten.

Mit dem derzeit in COCOSYS implementierten Modell des Abwaschens von Aerosolen wird die Menge der abgewaschenen Aerosole mittels eines Eingabeparameters (CAERES) gesteuert bzw. vorgegeben. CAERES beschreibt, wie groß die zulässige Masse unlöslicher Aerosole ist, die sich auf einem Boden ablagern kann, ohne von einem darüber strömenden Wasserfilm mittransportiert zu werden.

Der Parameter CAERES wird in der Einheit kg/m^3 angegeben. Wird die Standardeingabe in COCOSYS verwendet – eine Wasserfilmdicke von 1 mm auf Böden bzw. 0,1 mm für Wände – so lassen sich die Flächen berechnen, auf denen jeweils z. B. 1,0 kg Aerosole (CAERES = 1,0) zurückgehalten werden. Das sind 1000 m^2 Bodenfläche oder 10000 m^2 Wandflächen. Bezogen auf den Konvoi-Datensatz bedeutet das: innerhalb des SHB gibt es 6496 m^2 Bodenflächen und 50067 m^2 sonstiger Flächen (i.d.R. Wandflächen). Bei den angesetzten Wasserfilmdicken und CAERES = 1 ergäben sich minimal lediglich ~11,5 kg Aerosole, die nicht in den Sumpf abgewaschen werden, vorausgesetzt alle Flächen werden mit dem entsprechenden Wasserfilm bedeckt, was nur in Ausnahmesituationen wirklich der Fall sein dürfte. Natürlich können sich zusätzlich Aerosole auf Flächen ablagern, die nicht vollständig von einem Kondensatfilm bedeckt sind, bzw. wo dieser nicht ausreicht, so dass es zur Drainage kommt.

Erste COCOSYS Rechnungen mit AFP, während derer die Funktionalität des Datensatzes geprüft wurde, wurden mit einem CAERES-Wert von 1,0 durchgeführt. Die Rechnungen wurden abgebrochen, da fast alle Spaltprodukte in den SHB-Sumpf ab-

³ Der aktuelle Stand des Wissens bzgl. der Aerosolphänomene wurde in weitere Modelle umgesetzt, die z.Zt. entwickelt und an Versuchen validiert werden. Diese können zukünftig zu einer verbesserten Beschreibung des Aerosoltransportes genutzt werden.

gewaschen wurden, so dass dieser durch die eingetragene Nachzerfallsleistung rasch siedete. Für die späteren Rechnungen wurde CAERES = 12,0 gewählt. Die Grundlage für die Wahl dieses Wertes bildete die Nachrechnung eines THAI-Versuches. Auch wenn aufgrund der Geometrie der THAI-Anlage die Versuche nicht wirklich auf eine Konvoi-Anlage 1:1 übertragbar scheinen, gibt es zurzeit keine andere Validierungsbasis. Überschlägig (unter Einbeziehung der Masse der in den SHB freigesetzten Aerosole in den einzelnen Rechenfällen) bedeutet dies, dass bei einer homogenen Verteilung der Aerosole und einer gleichmäßigen Beaufschlagung aller Flächen mit Kondensat ca. 33 % der als Aerosole in den SHB eingetragenen Spaltprodukte nicht in den Sumpf transportiert werden.

2.1.7 Modellierung von H₂-Verbrennungsvorgängen

Die Anwendung des bereits existierenden Verbrennungsmodelle in COCOSYS /KLE 12/ erlaubt die Berechnung von Wasserstoffverbrennung innerhalb einer Containment-Zone unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden Massen- und Energiebilanzen. Das neue Flammenfrontmodul FRONT /ECK 11/, das für ASTEC entwickelt und nach COCOSYS übertragen wurde, berechnet die Flammenfrontpropagation zwischen angrenzenden Zonen z.B. im SHB. Die Hauptidee des FRONT-Moduls besteht in der Berechnung der Flammenfrontgeschwindigkeit, die eine Verfolgung der Flammenausbreitung zwischen den Zonen eines Systems erlaubt. Die Flammenausbreitung findet in den Verbindungen des Systems (atmosphärische Verbindungen zwischen den Zonen) statt. Die Verbrennung selber findet in den Zonen des Systems statt und wird separat berechnet. Das neue FRONT-Modell beinhaltet auch die Überprüfung der Brennbarkeit der Gasgemische innerhalb einer Zone. Diese Überprüfung findet anhand des entsprechenden Dreistoffdiagramms für jede Zone statt. Innerhalb einer Zone ist weder die Lage der Zündquelle entscheidend, noch wird zwischen den Flammenausbreitungsrichtungen unterschieden, sondern von einer gleichmäßigen Flammenausbreitung ausgegangen. Die Randbedingungen für die Richtungsabhängigkeit einer möglichen Flammenausbreitung in benachbarte werden basierend auf den Dreistoffdiagrammen in COCOSYS berechnet (DECOR-Modell, s. a. /HEI 95/).

Die Flammenfront wandert auf Basis der berechneten Randbedingungen in die entsprechenden Verbindungen der jeweiligen Zone und propagiert durch diese mit der dann berechneten Flammenfrontgeschwindigkeit. Diese setzt sich aus einem lamina- ren und einem turbulenten Anteil zusammen (für Details der Berechnung der einzelnen

Anteile s.a. /ECK 11/). Wenn die Flammenfront die entsprechende Verbindung durchquert hat, wird die Gasmischung in der angrenzenden neuen Zone wieder anhand des Dreistoffdiagramms auf Brennbarkeit hin überprüft. Liegt diese vor, kommt es zur Zündung und die Flammenfront kann durch weitere angrenzende Verbindungen in weitere Zonen propagieren. Liegt keine Brennbarkeit in der neuen Zone vor, so stoppt die Verbrennung und die Flammenfront endet in der entsprechenden Zone. Die Wiederentzündbarkeit einer Zone durch zuströmenden Wasserstoff über angrenzende Verbindungen ist möglich und wird in jedem Zeitschritt der Simulation ebenfalls anhand des Dreistoffdiagramms überprüft. Eine Skizze eines Anwendungsfalls zeigt Abb. 2.1-5, wobei eine Zündung in Zone R5 unterstellt ist.

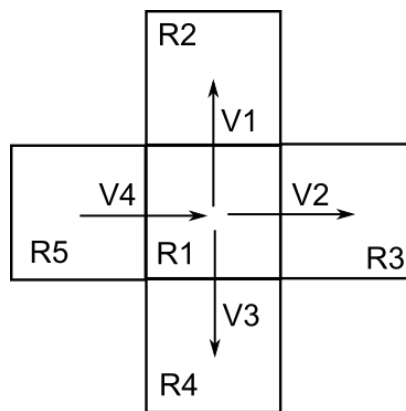


Abb. 2.1-5 Skizze des Modellsystems

Das FRONT-Modul beinhaltet modellinhärente Grenzen, die bei Anwendung des Modells auf die Geometrie eines Sicherheitsbehälters nicht vernachlässigt werden dürfen und in die kritische Bewertung der Ergebnisse mit einfließen müssen. Die im Modell verwendete Flammenfrontgeschwindigkeit setzt sich aus einem laminaren und einem turbulenten Anteil zusammen. Der laminare Anteil beruht auf der Liu-McFarlane-Korrelation und ist gültig für ein Gemisch aus Wasserstoff, Luft und Dampf bis zu einer Dampfkonzentration von ca. 25 Vol.% /ECK 11/.

2.2 Überarbeitung des Reko-Modells und Validierung

Das in COCOSYS in der Vergangenheit verwendete Reko-Modell stammt bereits aus dem Vorgängercode RALOC, und beruht auf der Annahme einer Arrhenius-typischen Reaktionskinetik im Bereich der katalytischen Platten. Für die Validierung stand damals nur der Versuch Gx4 am Battelle Modell Containment für AREVA-Reko's zur Verfü-

gung (Abb. 2.2-1). Nachrechnungen der neuen HR-Rekombinatorversuche in der THAI-Anlage bei Becker Technologies aus dem OECD-THAI Vorhaben mit diesem Modell in COCOSYS durch die GRS zeigten eine zum Teil starke Überschätzung der Rekombinationsleistung, die nicht erwartet wurde.

Neuere Erkenntnisse des Forschungszentrum Jülichs (FZJ) belegen, dass die Reaktionskinetik innerhalb von Rekombinatoren nicht nach einem Arrhenius-Ansatz verläuft, sondern durch die Diffusion von Wasserstoff an die katalytischen Platten bestimmt wird. Die Reaktionskinetik des GRS-Reko-Modells in COCOSYS wurde von einem Arrhenius- auf einen Diffusionsansatz geändert. Dieses neue Modell wurde in den hier vorgestellten Rechnungen – soweit nicht anders angegeben – verwendet.

Die erneute Berechnung der aktuellen HR-Versuche an der THAI-Anlage durch die GRS dargestellt hier am Beispiel des Versuchs HR-2 vor (Abb. 2.2-2) und nach (Abb. 2.2-3) Änderung des Reko-Modells in COCOSYS zeigen jetzt sehr gute Ergebnisse. Bei der erneuten Berechnung der alten Gx4-Versuche durch die GRS wurden zunächst die experimentellen Ergebnisse neu bewertet. Bedingt durch eine andersartige Konstruktion des damals verwendeten Reko's sind die tatsächlich am Reko-Austritt zu erwartenden H₂-Konzentrationen niedriger, als bisher angegeben bzw. gemessen. Berücksichtigt man dies stimmen die Ergebnisse des neuen Reko-Modells als auch der AREVA-Gleichung ebenfalls sehr gut überein (Abb. 2.2-4). Die AREVA-Gleichungen für die Reko's sind unverändert in COCOSYS implementiert.

Alle Details sind in einem separaten Bericht /NOW 10/ dargestellt.

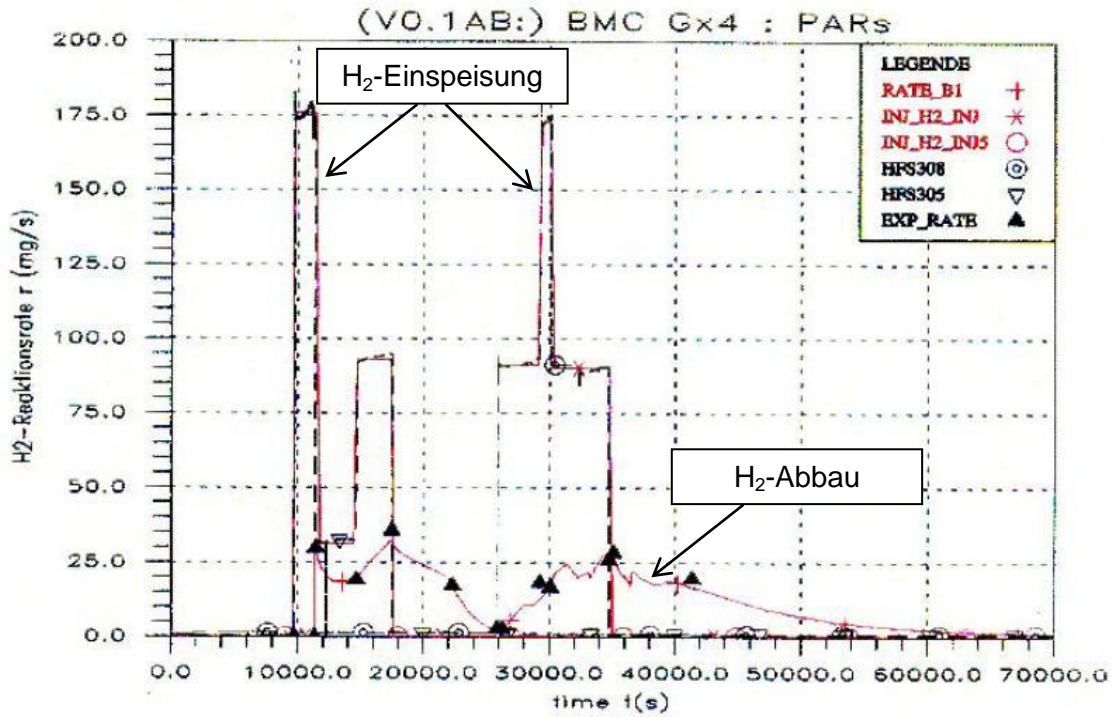


Abb. 2.2-1 Versuch Gx4, H₂-Einspeise- und Rekombinationsraten, experimentelle Werte und Ergebnis des COCOSYS-Modells (RATE_B1)

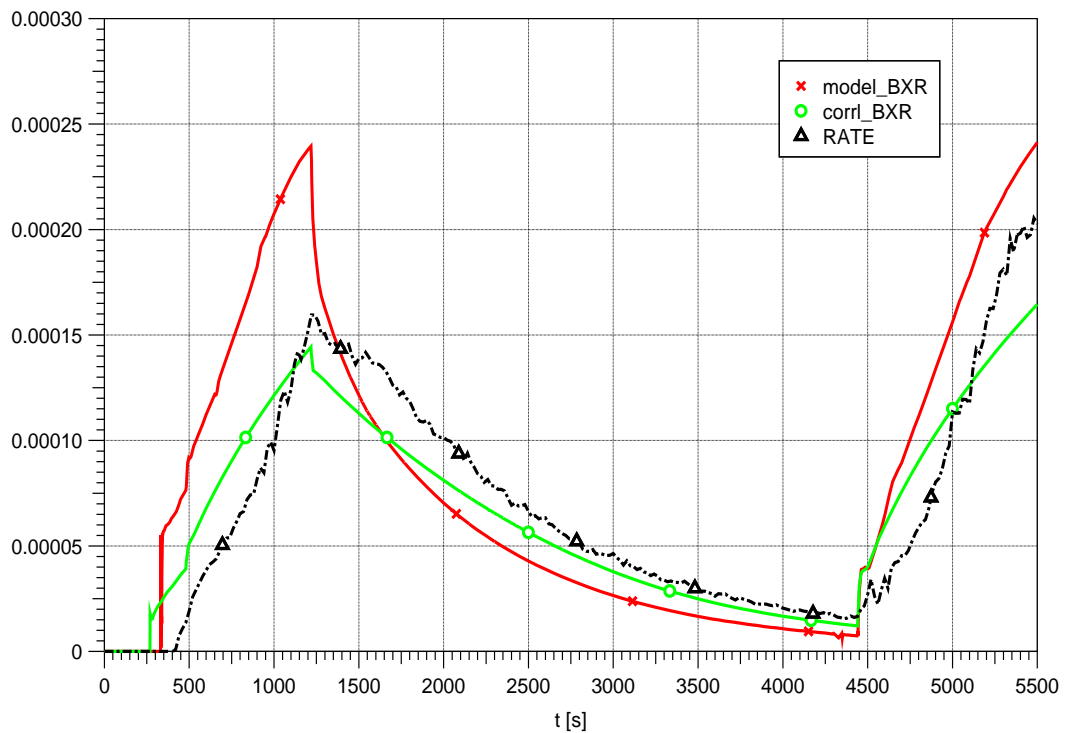


Abb. 2.2-2 Rekombinationsrate THAI-HR-2, Vergleich mit altem Reko-Modell der GRS (model_BXR) und der Gleichung von AREVA (corr_BXR)

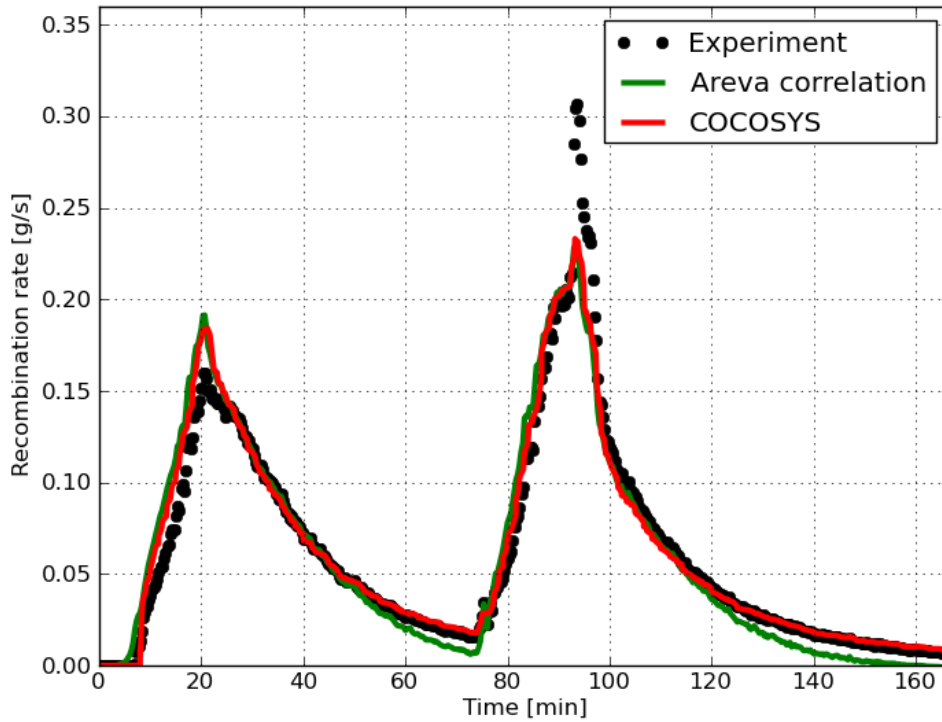


Abb. 2.2-3 Rekombinationsrate THAI-HR-2, Vergleich mit neuem Reko-Modell der GRS (COCOSYS) und der Gleichung von AREVA (AREVA correlation)

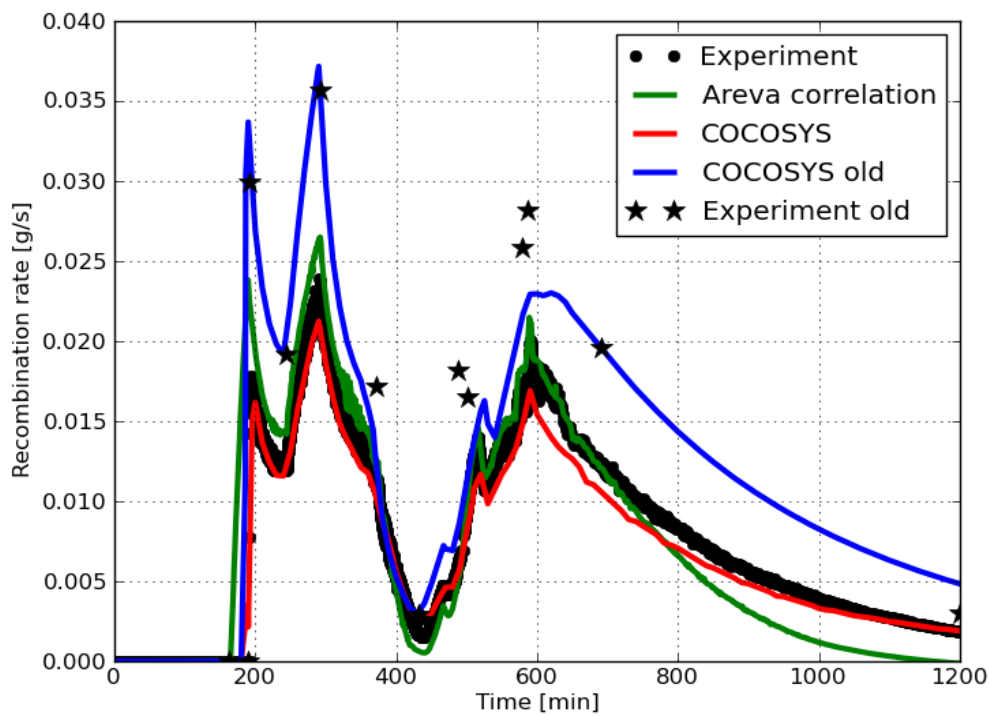


Abb. 2.2-4 Rekombinationsrate Gx-4, Vergleich mit altem (COCOSYS old) und neuem Reko-Modell der GRS (COCOSYS) und der Gleichung von AREVA (AREVA correlation)

2.3 Szenarienauswahl

Im Vorhaben wurden mit den nach Stand von Wissenschaft und Technik verfügbaren Modellen (Programm COCOSYS) und Methoden (detaillierter Datensatz einer Referenzanlage) die Wirksamkeit eines installierten Reko-Konzepts am Beispiel einer DWR-Referenzanlage des Typs Konvoi (GKN-2) analysiert und Anforderungen an einen Wirksamkeitsnachweis überprüft. Dazu wurde basierend auf den bisherigen Arbeiten der GRS ein erweitertes Fallspektrum analysiert. Die für COCOSYS erforderlichen Quellterme (Wasser-, Dampf-, Gas-, Aerosol- und Spaltproduktfreisetzung in den SHB) lagen bereits vor oder wurden aus den vorliegenden MELCOR-Analysen der PSA der Stufe 2 /SON 01/ gewonnen.

In /TIL 98/ wurden vier Unfallszenarien für die Analysen zum Reko-Basiskonzept ausgewählt. Die Auswahl der repräsentativen Unfallszenarien erfolgte im Wesentlichen auf der Basis folgender Kriterien bzw. Parameter: H₂- und CO-Freisetzung in den SHB (maximale Freisetzungsrate, langzeitige Freisetzungsrate, maximal freigesetzte H₂- und CO-Masse, Lage des Freisetzungsortes im SHB) und SHB-Zustand bei H₂/CO-Freisetzung (lokale Dampf- und Sauerstoffkonzentration, Temperatur der Strukturen im SHB (Kondensationspotential), Zustand konvektionsfördernder Öffnungen zwischen einzelnen Raumbereichen).

Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit und der Konsistenz zu den früheren Untersuchungen der GRS werden die nachfolgend beschriebenen zwei Fälle unter den veränderten Randbedingungen (u.a. realisiertes Reko-Konzept) erneut analysiert. Diese Fälle wurden ausgewählt, weil sie zu sehr unterschiedlichen SHB-Zuständen führen:

- **ND-Fall:** Kühlmittelverluststörfall durch Abriss der Druckhalter-Anschlussleitung mit unterstelltem Versagen sämtlicher aktiver Not- und Nachkühlsysteme
- **ND*-Fall:** Transiente infolge Totalausfalls der Dampferzeugerbespeisung; unterstelltes Versagen sämtlicher aktiven Not- und Nachkühlsysteme; Vermeidung eines potentiellen Hochdruckversagen des RDB durch primärseitige Druckentlastung.

In den Jahren 1998 bis 2001 führte die GRS im Anschluss an die Basisanalysen zum Reko-Konzept im Auftrag des BMU im Vorhaben SR 2306 umfangreiche methodische Untersuchungen zu einer PSA der Stufe 2 für einen DWR Konvoi durch /GRS 01/. In dieser wurden u.a. auch die anlageninternen Notfallmaßnahmen mit in die Bewertung einbezogen. Für die dazu erforderlichen Unfallanalysen wurde die zu diesem Zeitpunkt verfügbare neue Version MELCOR 1.8.4 eingesetzt /SON 01/. Die MELCOR-

Unfallanalysen mit einer gegenüber den hier vorgestellten Analysen erheblich größeren Nodalisierung des SHB zeigten bei bestimmten Unfallszenarien einen deutlich niedrigeren Dampfgehalt in der SHB-Atmosphäre und nachfolgend das Auftreten lokal begrenzter H₂-Verbrennungen trotz simuliertem Reko-System. Derartige Zustände im SHB waren bei den in /TIL 98/ zugrunde gelegten Fällen für die Reko-Konzeptionierung nicht (bedingt durch die getroffenen Annahmen bei den zugrunde gelegten Unfallszenarien gemäß RSK-Empfehlung von 1997 /RSK 97/) und nur unzureichend berücksichtigt worden. Dies sind Fälle, bei denen zu Beginn der Freisetzung von Wasserstoff in den SHB dort nur niedrige Dampfgehalte vorliegen. Gleichzeitig sind sie von hoher Relevanz (Ergebnis neuerer PSA der Stufe 1) und stellen damit andersartige Anforderungen an das Reko-Konzept, als die oben genannten beiden Fälle. Zusätzlich wirken sich auch noch unterschiedliche konvektive Randbedingungen im SHB auf die Wirksamkeit des Reko-Systems aus. Für die ergänzenden Analysen im Vorhaben wurden die folgenden Fälle ausgewählt:

- **MBL-Fall:** Kühlmittelverluststörfall durch mittleres Leck (200 cm²) an einer Hauptkühlmittelleitung (heißseitig); Verfügbarkeit der aktiven Notkühlung bis zur Umschaltung auf Sumpfrückförderung gegeben; Verfügbarkeit des sekundärseitigen Abfahrens über die Dampferzeuger gegeben
- **SBL-Fall:** Kühlmittelverluststörfall durch kleines Leck (10 cm²) an einer Hauptkühlmittelleitung (heißseitig); Verfügbarkeit der aktiven Notkühlung bis zur Umschaltung auf Sumpfrückförderung gegeben; Verfügbarkeit des sekundärseitigen Abfahrens über die Dampferzeuger gegeben.

Die Fälle ND und ND* sind schon einmal im Vorhaben SR 2227 der GRS /TIL 98/ analysiert wurden, allerdings zu diesem Zeitpunkt nicht für das letztendlich umgesetzte Reko-Konzept. Da die aktive Notkühlung in diesen beiden Szenarien als ausgefallen angenommen wurde, wird der SHB zeitweise durch den entstehenden Wasserdampf inertisiert. In diesem Punkt unterscheiden sich die beiden „neuen“ Szenarien MBL und SBL erheblich.

2.4 **Aufbereitung der Quell-Daten**

Die im Vorhaben durchgeführten Analysen unterscheiden sich u.a. grundlegend dadurch, ob das Aerosolverhalten im SHB mit COCOSYS simuliert wurde (Fälle in den Kap. 4.7 und 4.8) oder ob nur vereinfachend (wie in den alten Analysen aus /TIL 98/)

von einer unveränderlichen (statischen) Massenverteilung der Aerosole oder Spaltprodukte auf Wände, Böden und den Sumpf sowie die Atmosphäre des SHB ausgegangen wurde.

Generell wurden zunächst für alle vier betrachteten Unfälle Analysen durchgeführt (Kap. 4.3 bis 4.5), bei denen basierend auf vorliegenden Erkenntnissen von einer unveränderlichen Massenverteilung der Aerosole auf Wände, Böden, den Sumpf sowie die Atmosphäre ausgegangen wird und nur die zeitlich veränderliche Nachzerfallsleistung (NZL) dieser Aerosole berücksichtigt wird. Bei diesen Rechnungen wird die Nachzerfallsleistung in den Anteilen wassergetragen, luftgetragen und auf Strukturen abgelagert in Tabellenform in den jeweiligen COCOSYS-Zonen vorgegeben, ohne dass das Aerosolmodell aktiv ist. Die Werte stammen i.d.R. aus den dazugehörigen MELCOR-Analysen (siehe Beschreibung in nachfolgenden Kapiteln).

Eine Zielsetzung des Vorhabens war es, abschließend den Einfluss dieser Vereinfachung durch eine komplette Simulation mit Aerosolverhalten in COCOSYS auf den Unfallablauf zu untersuchen. Dazu wurden für den SBL- und den MBL-Fall Rechnungen durchgeführt, in denen die Aerosolmodelle in COCOSYS aktiviert wurden, d.h. das zeitliche Verhalten der Aerosole und Spaltprodukte im SHB berechnet wird. Bei den Rechnungen mit aktiviertem Aerosolmodell berechnet COCOSYS die räumliche Verteilung der Spaltprodukte/Aerosole und je nach Eingabemodus auch den Zerfall der radioaktiven Spaltprodukte und deren Zerfallsenergie bzw. NZL. In den hier vorgestellten Rechnungen wird die Änderung der NZL, d.h. der Zerfall der radioaktiven Elemente für die verschiedenen Familien⁴ nicht gerechnet, sondern die NZL in Tabellenform vorgegeben, um eine bessere Übereinstimmung mit den Rechnungen ohne Aerosolmodell zu erreichen.

Des Weiteren konnte bei den Fällen ND und ND* auf die in den früheren Analysen /TIL 98/ verwendeten Quell-Daten (Freisetzung von Wasser, Dampf und H₂, von Komponenten abgestrahlte Wärme etc.) direkt zurückgegriffen werden, wohingegen für die beiden neuen Fälle MBL und SBL die MELCOR-Daten erst für COCOSYS aufbereitet und angepasst werden mussten. Dies wird nachfolgend für die einzelnen Fälle beschrieben.

⁴ MELCOR ordnet die radioaktiven Elemente in mindesten 16 Gruppen (z.B. Edelgase, Iod oder Urane) ein, und gibt für jede dieser Gruppen die zeitliche Änderung der NZL an. Nuklide und Zerfallsketten werden nicht berechnet. Analog wurde die Eingabe in COCOSYS aufgebaut.

2.4.1 Aufbereitung der Quell-Daten für den ND-Fall

An den direkt verwendeten früheren Quelldaten für COCOSYS wurden Änderungen nur bzgl. der Modellierung der NZL der Spaltprodukte vorgenommen, um neueren Erkenntnissen bzgl. des Aerosolverhaltens im SHB zu entsprechen. So war MELCOR⁵ zum damaligen Zeitpunkt nicht in der Lage gewesen, Abwaschprozesse von Aerosolen bzw. Spaltprodukten von Wänden zu berechnen. Damit fanden derartige Prozesse in den für die alten Analysen abgeleiteten unveränderlichen Massenverteilungen der Aerosole in COCOSYS auch keine Berücksichtigung. Dies sollte geändert werden, und die durch die Abwaschvorgänge von Aerosolen bedingte Umverteilung der NZL von Strukturen auf das Wasser im Sumpf näherungsweise modelliert werden. Die mit MELCOR berechnete und für COCOSYS bislang genutzte Verteilung der Nachzerfallsleistung (NZL) ist in Abb. 2.4-1 dargestellt. Der Anteil der NZL der auf Strukturen abgelagerten Spaltprodukte (HEATAB) wird ab ca. 12000 s sehr dominant, wohingegen die in das Wasser freigesetzte NZL gering bleibt (HEATW). Der Abfall der NZL danach ist durch den generellen zeitlichen Abfall der NZL begründet (Gesamt), nicht durch Abwaschvorgänge.

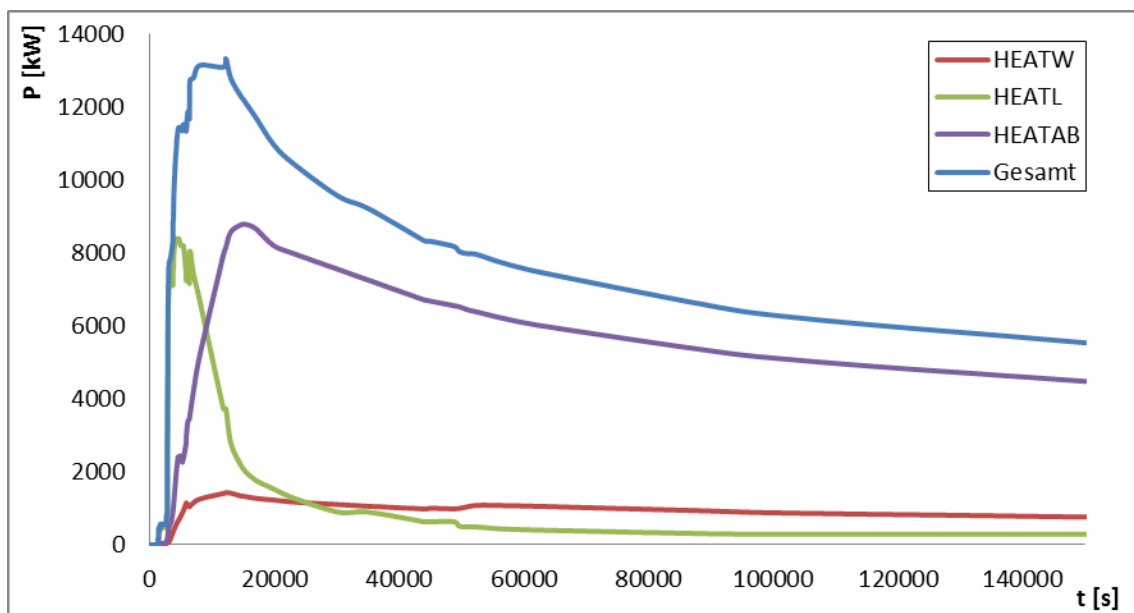


Abb. 2.4-1 Verteilung der Nachzerfallsleistung in Wasser in den Zonen (HEATW), auf Strukturen (HEATAB) (abgelagert) und luftgetragen (HEATL)

⁵ Für diese Rechnung wurde MELCOR 1.8.3 verwendet. Bei den Rechnungen für den MBL- und SBL-Fall wurde MELCOR 1.8.4 verwendet. Neue Analysen z.B. mit MELCOR 1.8.6 waren nicht vorgesehen. MELCOR 1.8.6 wäre in der Lage, Abwaschvorgänge von Aerosolen näherungsweise zu berechnen.

Zur Berücksichtigung möglicher Umverteilungsprozesse der Aerosole im SHB wurde eine COCOSYS-Rechnung eines zeitlich und von der Nachzerfallsleistung (NZL) relativ ähnlichen Unfallablaufs herangezogen, in der derartige Prozesse modelliert sind. Der verwendete Datensatz (ASTRID) ist extrem grob (8 Zonen); beschreibt aber auch die Konvoi-Anlage. Da die für Ablagerung der Aerosole zur Verfügung stehenden Strukturoberflächen und die zur Wärmeaufnahme zur Verfügung stehenden Strukturvolumen identisch sind, ist die Projektion der dort gewonnenen Erkenntnisse auf den vorliegenden Fall gerechtfertigt. Die sich aus der Rechnung ergebende Verteilung der NZL der Aerosole verteilt auf Strukturen, Sumpf, Atmosphäre und Restwassermengen in Zonen ist in Abb. 2.4-2 dargestellt.

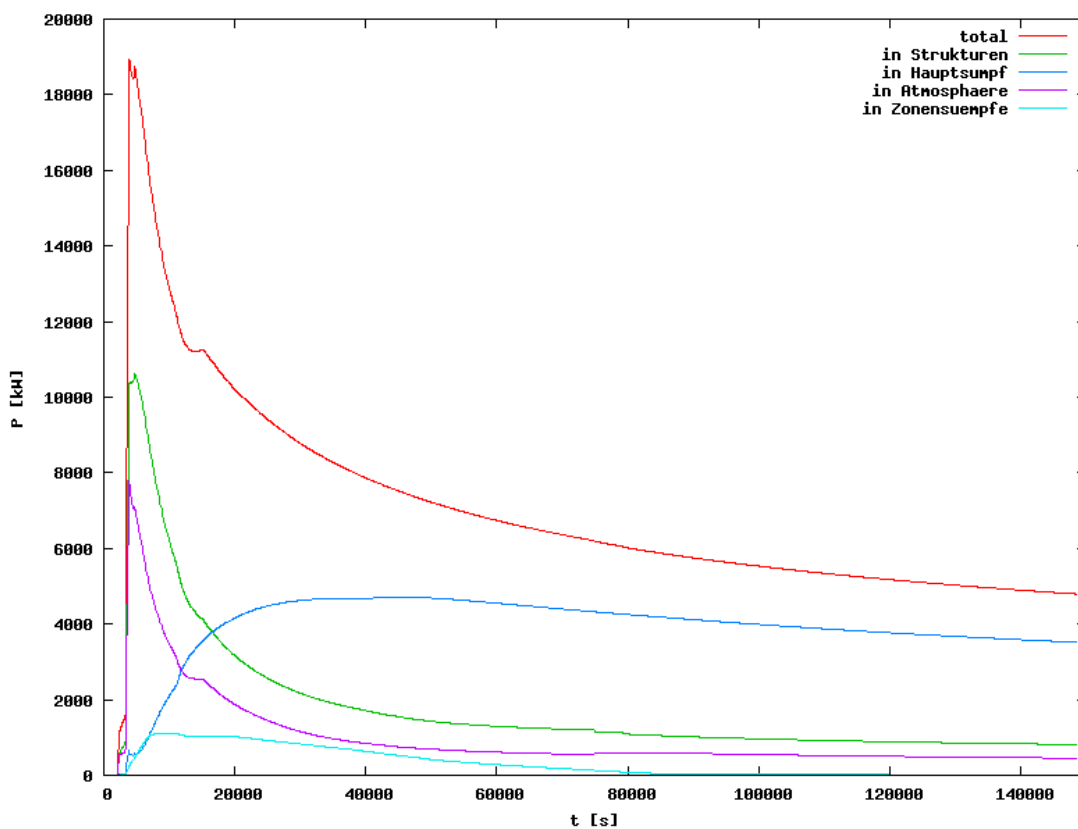


Abb. 2.4-2 Verteilung der Nachzerfallsleistung im ASTRID-Datensatz nach Rechnung mit COCOSYS / AFP-Modul

Offensichtliche Unterschiede betreffen zum einen die gesamte NZL aller Spaltprodukte im SHB und zum anderen das Verhältnis abgelagerter Spaltprodukte (Freisetzung der NZL auf Strukturen) und der in den (Haupt-)Sumpf transportierten Spaltprodukte. Hier dominiert langfristig der vom Wasser getragene Anteil der Spaltprodukte bzw. die NZL-Freisetzung dort. Darüber hinaus fällt auf, dass der Anteil der in die Atmosphäre des

SHB freigesetzten Leistung auch im Langzeitverhalten eine größere Rolle spielt (MELCOR-Rechnung ca. 5 %, ASTRID-Rechnung: 9-10 %). Der Unterschied in der gesamten NZL zwischen dem ND-Fall aus MELCOR und der ASTRID-Rechnung für die frühe Phase des Ablaufs ist außerdem zu berücksichtigen. Er ist bedingt durch unterschiedliche Ausgangsinventare in den beiden Rechnungen. Wie in Abb. 2.4-3 zu erkennen ist, verhält sich die gesamte NZL in beiden Fällen langfristig ab ca. 15000 s dann gleich, wenn die Werte der ASTRID Rechnung um ca. 800 kW nach oben verschoben werden.

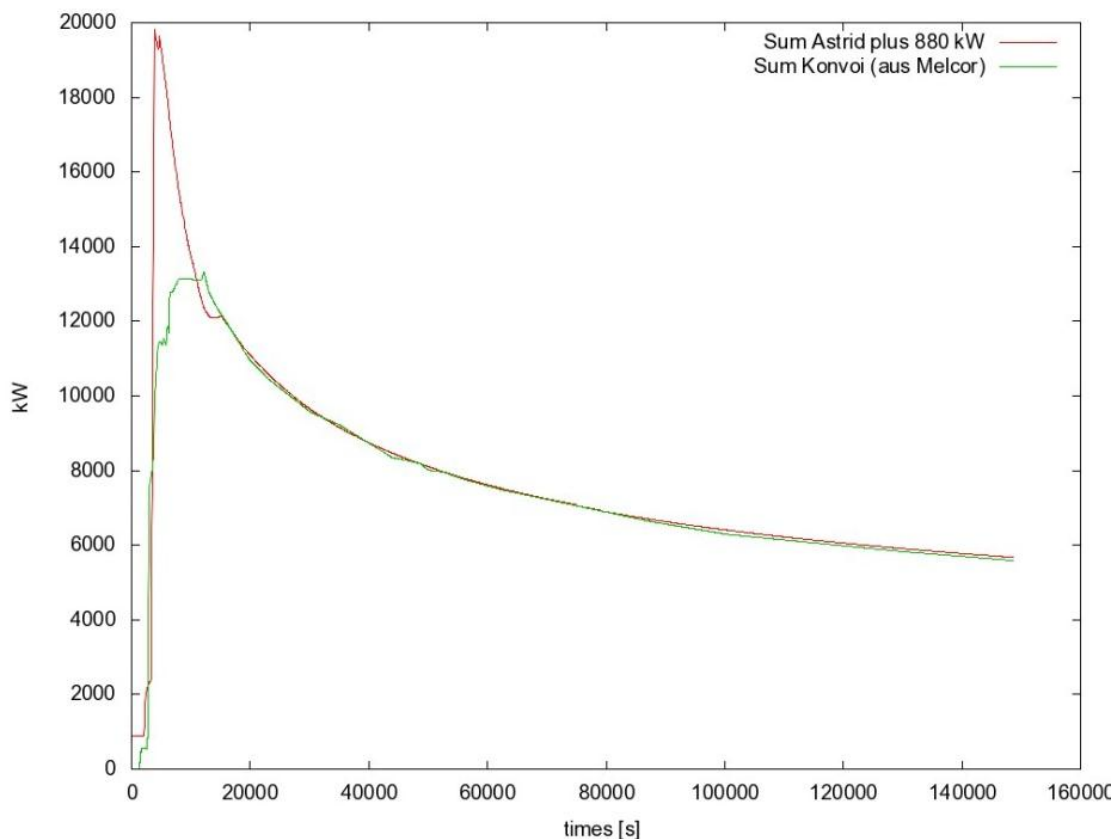


Abb. 2.4-3 Vergleich der Nachzerfallsleistungen des ASTRID-Szenarios mit dem ND-Fall aus MELCOR

Um die Verteilung der Spaltprodukte in der ASTRID-Rechnung für den ND-Fall zu nutzen, wurden die zeitliche Entwicklung der verschiedenen Aerosolvorgänge (Ablagerung, Abwaschen, etc.) und der daraus resultierende Anteil an der Freisetzung der NZL jeweils bestimmt. Durch Multiplikation der gesamten NZL aus dem ND-Fall mit den in Abb. 2.4-4 dargestellten Faktoren ergibt sich eine realistischere Verteilung der NZL auf Atmosphäre, Wände, Sumpf und Restwassermengen in anderen Räumen (siehe Abb. 2.4-5).

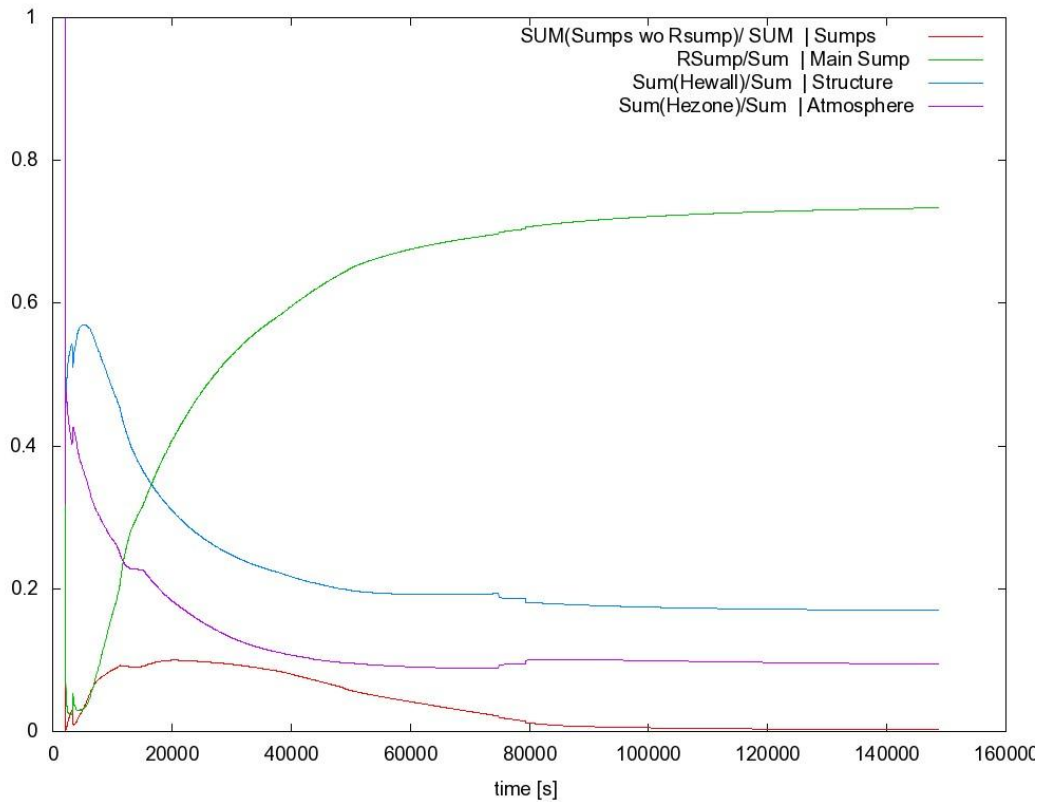


Abb. 2.4-4 Anteilige Verteilung der Nachzerfallsleistung (laut Astrid Rechnung)

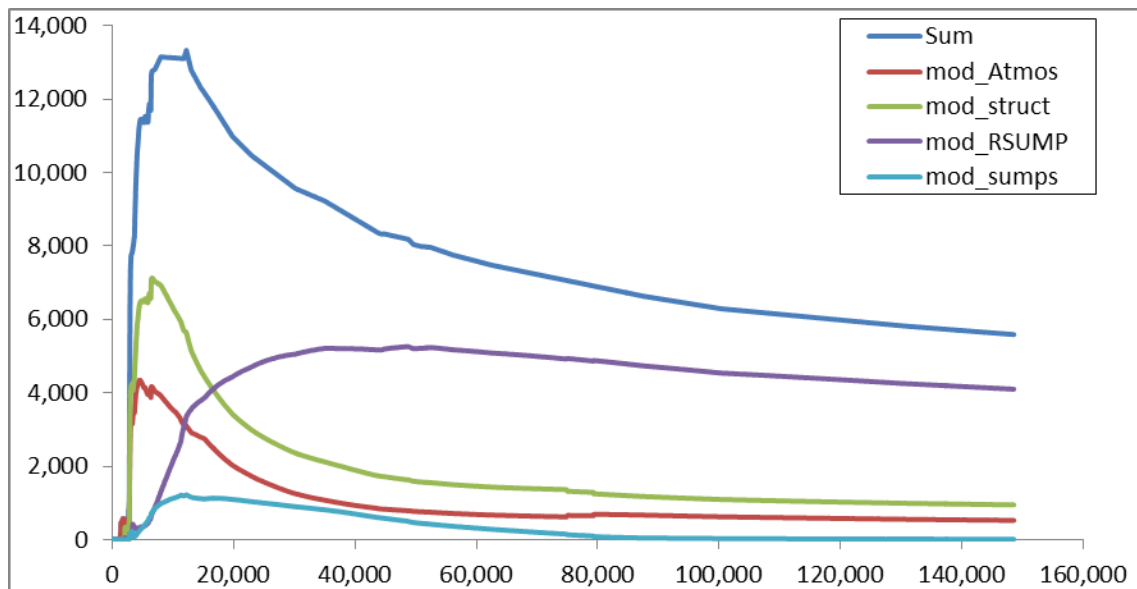


Abb. 2.4-5 Überarbeitete Verteilung der Nachzerfallsleistung für ND-Fall

Neben dieser globalen Aufteilung der gesamten Nachzerfallsleistung war noch eine detaillierte Aufteilung auf die verschiedenen Zonen im SHB sowie deren Strukturen und Restwassermengen sowie den SHB-Sumpf vorzunehmen. Dabei wurden Zonen, für die ein Eintrag von Spaltprodukten mit der Gasströmung von vornherein als unrealis-

tisch erschien, ausgeschlossen. Dies wurde im Nachhinein z. B. anhand des Wasserdampftransports in diese Zonen verifiziert. Ansonsten wurden die Aerosole bzw. die NZL homogen (mangels weiterer Detailinformationen) auf sämtliche Bodenstrukturen mit mehr als 10 m² Fläche (Wände oder Decken spielen eine untergeordnete Rolle), sämtliche Zonen mit mehr als 60 m³ Volumen und Restwassermengen größer 100 l verteilt. Die Verteilung in den Sumpf war separat ermittelt worden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass diese Art der Bestimmung der Verteilung der Spaltprodukte bzw. Aerosole im SHB nur eine grobe Näherung darstellt, die erforderlich war, da detaillierte Analysen der Zustände im SHB mit dynamischer Aerosolsimulation mit COCOSYS erst zum Ende des Vorhabens vorgesehen waren. Mit diesen sollte abschließend geklärt werden, welchen Einfluss derartige Vereinfachungen bei der Aerosolsimulation auf den Unfallablauf haben,

2.4.2 Aufbereitung der Quell-Daten für den ND*-Fall

Bei der Nachbereitung der vorhandenen Quelldaten für den ND*-Fall sollten ebenfalls die Angaben zur Verteilung der NZL der Spaltprodukte überprüft werden. Die Überprüfung zeigte, dass im zur Verfügung stehenden COCOSYS-Input für diesen Fall die Nachzerfallsleistung nicht wie im ND-Fall auf Strukturen, Zonen und Wassermengen verteilt angegeben wurde, sondern noch stärker vereinfachend nur durch zwei Tabellen, die die NZL der abgelagerten und die NZL der luftgetragenen und im Wasser gelösten Spaltprodukte gemeinsam beschreiben. Da auf die alten MELCOR-Ergebnisse nicht mehr elektronisch zurückgegriffen werden konnte und sich die aus den Rechnungen des ASTRID-Datensatz für den ND-Fall gewonnenen Erkenntnisse aufgrund des komplett anderen Ablaufs (sowohl zeitlich als auch räumlich) nicht auf den ND*-Fall anwenden lassen, mussten weitergehende Abschätzungen vorgenommen werden.

Im ersten Schritt musste die zeitlich abhängige NZL für alle luftgetragenen und im Wasser gelösten Spaltprodukte aus der vorhandenen Tabelle abgeschätzt werden. Hierzu wurde ein noch verfügbarer Plot mit MELCOR-Ergebnissen verwendet. Zusätzlich berücksichtigt wurde ein unterstelltes Abwaschen von Aerosolen von den Wänden (ca. 30 %). Die Verteilung der Spaltprodukte auf die einzelnen Zonen und Strukturen erfolgte dann analog dem Vorgehen im ND-Fall, d.h. in der Regel homogen über alle Zonen und Strukturen. Die Auswertung der im Vorhaben später durchgeführten Rechnungen mit (dynamischer) Aerosolsimulation zeigt, dass die abgeschätzten Ab-

wascheffekte damit immer noch unterschätzt wurden. Auch wurde eine stärkere Ablagerung von Spaltprodukten im oberen Bereich der Anlagenräume des SHB, die durch die starke anfängliche atmosphärische Stratifikation im ND*-Fall bedingt auch durch die hohe Lage der Freisetzung über den DH-Abblasetank durchaus realistisch erscheint (siehe Ergebnisse in Kap. 4.1.1), nicht modelliert.

Des Weiteren musste der Freisetzungsort des Gasgemisches aus dem DH-Abblasetank in den SHB im Datensatz festgelegt werden. Im Unfallablauf findet bis zum Zeitpunkt des RDB-Versagens der Stoff- und Energieeintrag in den SHB über den DH-Abblasetank statt. Die Öffnungen der Berstelemente am Tank befinden sich in Zone R66B/R67B (siehe Abb. 2.1-3). Eine direkte Einspeisung in diese Zonen führt in COCOSYS modellbedingt zu einer unrealistischen Vermischung nach unten. Da die Berstscheiben am Abblasetank oben liegen, würde austretender Dampf/H₂ zur Raumdecke darüber strömen. Von dort können Dampf/H₂ nur bei sehr hohem Impuls in Richtung des Reaktorraums strömen, da an der Decke eine nach unten nicht durchgezogene Wand den Raum unterteilt. Somit bleiben nur die Strömungspfade an der Decke in Richtung Hauptkühlmittelpumpen-Raum R82B, da in entgegengesetzter Richtung der Anlagenraum endet. Da der Abblasetank relativ nah an R82B und relativ weit von R82C entfernt steht, liegt die Vermutung nahe, dass Gase in R82B strömen. Daher wird der Massen- und Energieeintrag im Datensatz direkt in die Zone R82B realisiert (siehe z.B. Abb. 8.1-10).

2.4.3 Aufbereitung der Quell-Daten für SBL- und MBL-Fall

Für den SBL-Fall (genau wie für den MBL-Fall) mussten die Quelldaten für COCOSYS aus den noch vorhandenen MELCOR Ausgabedateien aufbereitet werden. Die in den SHB eingetragene Wärme von den wichtigsten Komponenten des Primärkreises, sowie die Massenströme bzw. die Enthalpie von aus dem Leck austretendem Dampf/Wasser und Wasserstoff sowie freigesetzter Dampf, H₂, CO₂ bzw. CO aus der Beton-Schmelze-Wechselwirkung wurden aus den MELCOR Rechnungen als Tabellen herausgeschrieben. Mehr als 1000 zeitabhängige Werte jedes Parameters für den betrachteten Unfallzeitraum waren verfügbar. Die Nachbearbeitung hatte zum Ziel, durch eine Reduzierung der Zeitpunkte die Rechenzeit für COCOSYS für diesen Unfallzeitraum deutlich zu senken. Bei der Aufarbeitung der Daten wurde darauf geachtet, dass die integral eingetragene Masse/Energie mit den von MELCOR vorgegebenen Werten übereinstimmen und der dynamische Prozess nicht verfälscht wird. Ein Beispiel für ei-

ne solche Bearbeitung ist in Abb. 2.4-6 am Beispiel der Wärmeabgabe von einer Hauptkühlmittelleitung dargestellt.

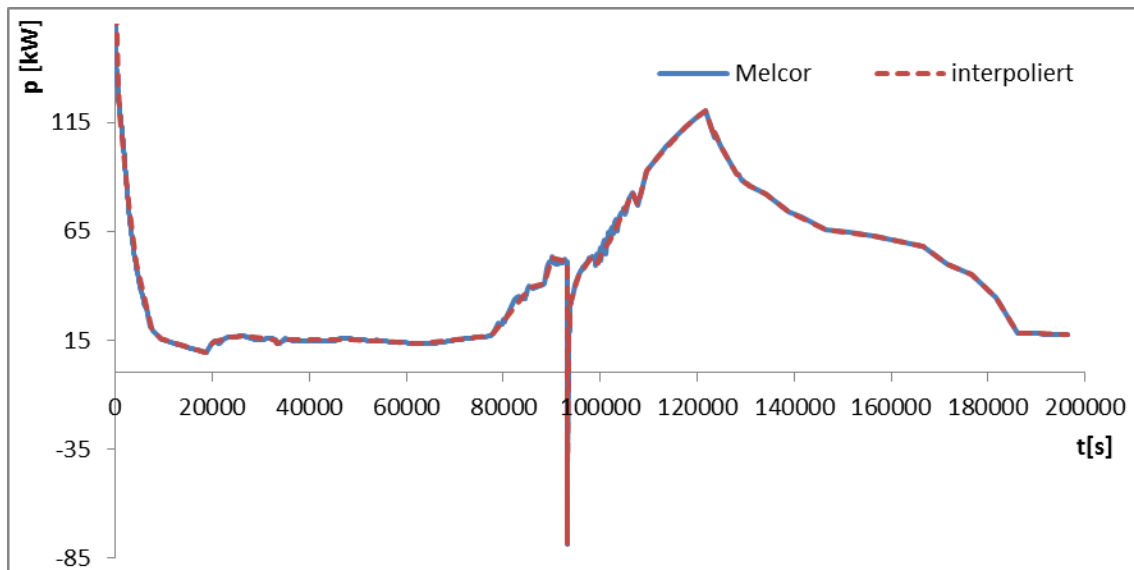


Abb. 2.4-6 Beispiel der Nachbearbeitung von MELCOR Daten für COCOSYS: Wärmeabgabe über die Hauptkühlmittelleitung; (SBL-Fall)

Die aus den MELCOR Ausgabedaten verfügbaren Angaben zu den Spaltprodukten und deren Nachzerfallsleistung lagen nicht in Tabellenform vor. Die Erstellung solcher Tabellen aus den Ausgabedateien⁶ der Rechnungen mit MELCOR war aus technischen Gründen auch nicht mehr möglich. Daher musste auf die in Textform vorliegenden Ausgaben zurückgegriffen werden. Zwar ist die zeitliche Auflösung wesentlich größer als bei der Verwendung der Plot-Dateien, aber immer noch fein genug, um den Unfallablauf hinreichend genau wieder zu geben⁷.

Die Masse der freigesetzten Spaltprodukte wurde, sortiert nach Gruppen, zu jedem Zeitschritt ausgelesen. Ebenso wurde mit den Daten der Nachzerfallsleistung, ebenfalls für jede Gruppe, verfahren. MELCOR erfasst die verschiedenen Spaltprodukte in Gruppen, oder Familien, nicht wie in COCOSYS als einzelne Elemente mit verschiedenen Isotopen. Zerfallsreihen bzw. die Umwandlung von Elementen einer Familie in an-

⁶ Gemeint sind hier die MELCOR-Plot-Dateien.

⁷ Die Anzahl der verfügbaren Ausgabedateien ist für die entscheidenden Phasen (während der Kernzerstörung bzw. nach RDB-Versagen) höher und damit ausreichend.

dere Elemente werden in MELCOR nur durch eine Anpassung der Nachzerfallsleistung wiedergegeben, die Masse einer solchen Gruppe/Familie nimmt nicht ab.

Das eigentliche Auslesen der entsprechenden Daten aus den MELCOR Rechnungen wurde mittels eines Python⁸-Skripts realisiert. Zunächst wurden, wie bei den beiden Fällen ND-Fall und ND*-Fall auch, sogenannte statische Verteilungen der Spaltprodukte und ihrer NZL auf die einzelnen Räume/Zonen und den Sumpf ermittelt. In allen Zonen des SHB im MELCOR Datensatz wurden die Massen [kg] der verschiedenen Spaltproduktfamilien mit ihren spezifischen Nachzerfallsleistungen [W/kg] (ebenfalls aus dem MELCOR-Datensatz) multipliziert und je nach Depositionsart der Energie (Luft/Wasser/Struktur) getrennt aufsummiert. Um das von MELCOR nicht simulierte Abwaschverhalten von Aerosolen zu simulieren, ist in beiden Fällen eine Umverteilung von 20 % der auf Strukturen abgelagerten Aerosole in den Sumpf angesetzt worden. Die im Vergleich zum ND-/ND*-Fall reduzierte Größe der Umverteilung ist damit begründet, dass bei diesen Szenarien die Kondensationsvorgänge an Strukturen während der Kernzerstörungsphase geringer sind, da die mittleren Dampfgehalte in der Atmosphäre geringer sind (sogenannte trockene Szenarien). Die Verteilung der Spaltprodukte bzw. deren NZL auf die einzelnen COCOSYS-Zonen und die dazugehörigen Strukturen wurde dann auf dieselbe Art und Weise wie in den anderen beiden Fällen durchgeführt, nämlich homogen. Der Anteil im Sumpf wurde getrennt ermittelt.

Die Auswertung der im Vorhaben später durchgeführten Rechnungen mit (dynamischer) Aerosolsimulation zeigt, ob diese Annahmen gerechtfertigt sind, bzw. generell wie groß der Einfluss auf den Unfallablauf ist.

⁸ Python: objektorientierte Programmiersprache (siehe <http://www.python.org>)

3 Überprüfung des COCOSYS Datensatzes für eine KONVOI-Anlage bezüglich der Ausbildung und Auflösung einer atmosphärischen Schichtung

3.1 Zielsetzung

In verschiedenen Experimenten zur Reaktorsicherheitsforschung wurde die Ausbildung und die Auflösung von atmosphärischen Schichtungen beobachtet /HDR 94/. Da die mit einer Schichtung verbundene inhomogene Gasverteilung einen starken Einfluss auf die Brennbarkeit hat, wurde der Konvoi – Datensatz unter Randbedingungen ähnlich dem THAI – HM-2 Experiment /SCH 11/ überprüft. In diesem Experiment war zunächst im oberen Bereich des Versuchsbehälters eine „Leichtgasschicht“ bestehend aus Stickstoff und Wasserstoff hergestellt worden. Anschließend war die Schichtung durch Dampf, der unten im Behälter eingespeist wurde, aufgelöst worden.

3.2 Ergebnisse der COCOSYS-Analyse

Für die Überprüfungsrechnung wurden in den Konvoi Datensatz statt der Berstelemente in die Decken der Dampferzeugertürme Öffnungen mit den Grundflächen der Plumes eingetragen. Die initialen Temperaturdifferenzen in den Zonen wurden entfernt. Genauso wurden alle Restwassermassen (z.B. Wasser im BE-Becken, oder auch gewisse Wassermengen als Kondensat in Räumen mit sehr großen Flächen; insgesamt etwas über 700 l) in einzelnen Zonen, auskommentiert, um die Anfangsbedingungen möglichst ähnlich zum Experiment zu gestalten. Als Einspeisepunkte für den Wasserstoff wurde der Raum direkt unterhalb der Öffnung in den Dampferzeugerdecken gewählt (siehe Abb. 3.2-2, vergleichbar zu THAI HM-2, wo der Dampf im unteren Bereich des Versuchsbehälters eingespeist wurde). Der Wasserdampf wurde in der späteren Phase in die Reaktorgrube eingespeist (siehe Abb. 3.2-2, vergleichbar zu THAI HM-2 /SCH 11/. Die zuerst angedachte lineare Skalierung der experimentellen Wasserstoffeinspeiserate zum freien Gesamtvolumen und der experimentellen Dampfeinspeiserate zu den Kondensationsflächen ließ sich nicht durchführen, insbesondere deshalb, weil die Abströmflächen zum Dom für den Wasserstoff zu klein waren und weil bezüglich des Dampfes der Massen- und Energieeintrag in den Einspeiseraum zu groß war. Die Einspeiseraten mussten deshalb reduziert werden. Die Randbedingungen des Tests sind in Tab. 3.2-1 zusammengefasst.

Tab. 3.2-1 Randbedingungen der Testrechnung zur Schichtung im Dombereich

Zeit (s)	[kg/s]	COCOSYS Zone	Vorgang
0.00 – 5000	-	-	Stationärphase
5000 – 47000	0.03 kg/s	R21AiP* (DE–Turm A)	H ₂ -Einspeisung
47000 – 50000	-	-	Test der Stabilität der Schichtung
50000 – 74000	3.5 kg/s	R1U (Reaktorgrube)	Dampfeinspeisung zur Schichtungsauflösung
74000 – 80000	-	-	Endphase

* Plume-Zone R21AiP wurde für diese Rechnung hinzugefügt.

In der Rechnung bildete sich während der Einspeisung oberhalb der Position der Wasserstoffeinspeisung ein Gemisch bestehend aus 68 Vol.% Luft und 32 Vol.% Wasserstoff aus, während im unteren Bereich der Wasserstoffanteil nur 2 Vol.% betrug (Abb. 3.2-1). Die anschließende Dampfeinspeisung löste die Schichtung sukzessive von unten her auf. Dies entspricht ziemlich genau den Vorgängen, wie sie auch im THAI - HM-2 Experiment aufgetreten sind, zu dem mit COCOSYS eine erfolgreiche blinde Rechnung durchgeführt wurde /SCH 11/. Die Erkenntnisse dieser Rechnung sind in die Nodalisierung der Konvoi-Anlage eingeflossen.

Es ist also möglich, mit den Konvoi Datensatz den Aufbau (oberhalb der Einspeiseposition) und die Auflösung von atmosphärischen Schichtungen zu rechnen, wenn die entsprechenden Randbedingungen z.B. durch die Lage des Lecks oder geometrisch bedingt durch die Berstelemente in den DE-Decken vorliegen. Die in den nächsten Kapiteln vorgestellten Rechenergebnisse zu den Kernschmelz Szenarien zeigen ebenfalls atmosphärische Schichtungen, z.B. Schichtungen innerhalb der Anlagenräume, so wie zwischen Anlagenräumen und Dom. Eine sukzessive Auflösung der Schichtung im Dom tritt jedoch nicht auf, da die Randbedingungen nicht gegeben sind. Stattdessen ist die Domatmosphäre stets in sich durchmischt. Dies wird darauf zurückgeführt, dass im Störfall, im Gegensatz zum Experiment, innerhalb des Doms einerseits Wärmequellen (Reko's und Nachzerfallsleistung der Spaltprodukte) und andererseits Wärmesenken (Kondensation an der Sicherheitsbehälterschale) existieren, die eine Vermischung begünstigen. Im Experiment dagegen war es ein Ziel, eine vorhandene (bewusst erzeugte) Leichtgasschicht durch eine tiefliegende Dampfeinspeisung z.B. wieder aufzulösen, um u.a. den Mechanismus zu studieren /SCH 09, SCH 11/.

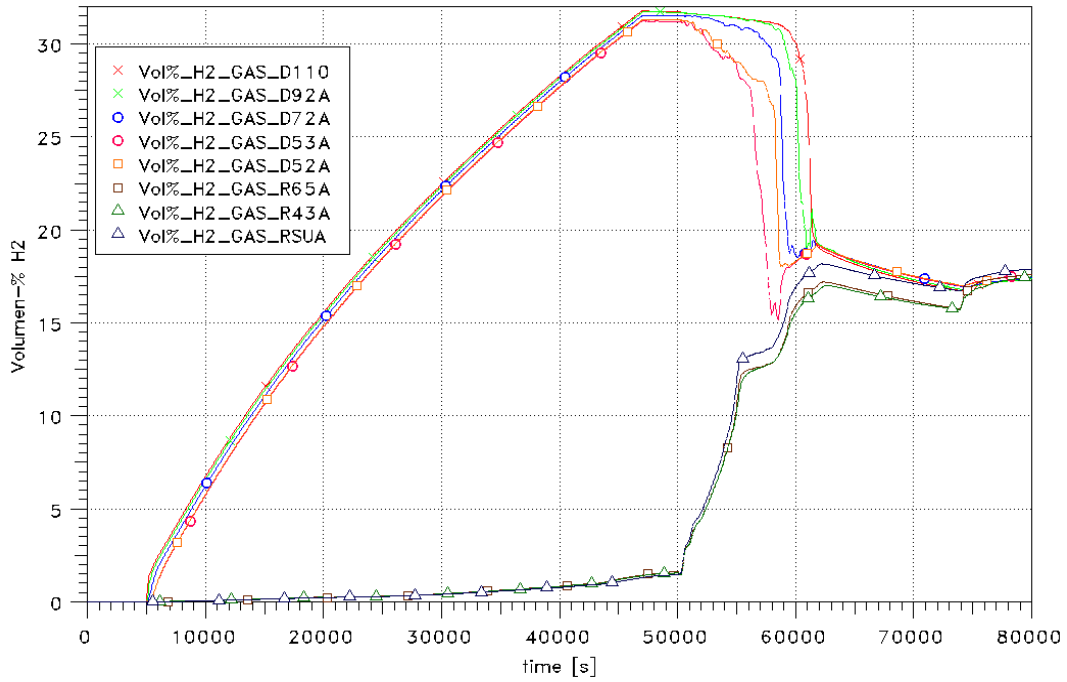


Abb. 3.2-1 Zeitliche Entwicklung einer Wasserstoffschichtung im SHB im Konvoi Datensatz bei Bedingungen ähnlich dem THAI – HM-2 Experiment

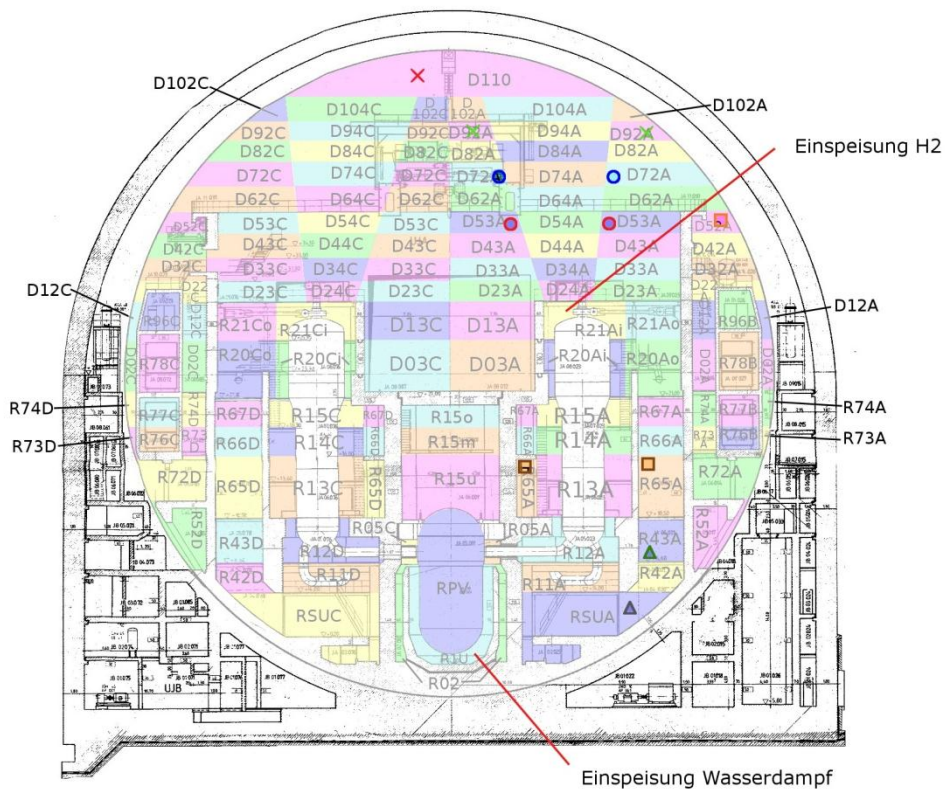


Abb. 3.2-2 Lage der Zonen aus Abb. 3.2-1 im SHB im Konvoi Datensatz

4 Ergebnisse der COCOSYS-Analysen

4.1 Überblick über die analysierten Szenarien

Wie in Kap. 2.3 beschrieben, wurden Analysen zu den folgenden 4 Szenarien durchgeführt. Die Randbedingungen sind in Tab. 4.1-1 zusammengefasst

- **ND-Fall:** Kühlmittelverluststörfall durch Abriss der Druckhalter-Anschlussleitung mit unterstelltem Versagen aller aktiver Not- und Nachkühlsysteme
- **ND*-Fall:** Transiente infolge Totalausfalls der Dampferzeugerbespeisung; unterstelltes Versagen aller aktiven Not- und Nachkühlsysteme; Vermeidung eines potentiellen Hochdruckversagen des RDB durch primärseitige Druckentlastung.
- **MBL-Fall:** Kühlmittelverluststörfall durch mittleres Leck (200 cm²) an einer Hauptkühlmittleitung (heißseitig); Verfügbarkeit der aktiven Notkühlung bis zur Umschaltung auf Sumpfrückförderung gegeben; Verfügbarkeit des sekundärseitigen Abfahrens über die Dampferzeuger gegeben
- **SBL-Fall:** Kühlmittelverluststörfall durch kleines Leck (10 cm²) an einer Hauptkühlmittleitung (heißseitig); Verfügbarkeit der aktiven Notkühlung bis zur Umschaltung auf Sumpfrückförderung gegeben; Verfügbarkeit des sekundärseitigen Abfahrens über die Dampferzeuger gegeben.

Tab. 4.1-1 COCOSYS-Analysen und wesentlich Randbedingungen

Randbedingung	ND-Fall	ND*-Fall	MBL-Fall	SBL-Fall
Keine dynamische Aerosolsimulation, keine H ₂ -Verbrennung, GRS-Rekomodell	X	X	X	X
Keine dynamische Aerosolsimulation, H ₂ -Verbrennungen mit Zündung durch Reko bei diversen Konzentrationen, GRS-Rekomodell	X	X	X	X
Keine dynamische Aerosolsimulation, H ₂ -Verbrennung mit Zündung zum ungünstigsten Zeitpunkt, GRS-Rekomodell	X	X	X	X
Mit dynamischer Aerosolsimulation, keine H ₂ -Verbrennung, GRS-Rekomodell			X	X
Mit dynamischer Aerosolsimulation, H ₂ -Verbrennungen mit Zündung durch Reko, GRS-Rekomodell			X	X
Keine dynamische Aerosolsimulation		X	X	

Randbedingung	ND-Fall	ND*-Fall	MBL-Fall	SBL-Fall
on, keine H ₂ -Verbrennung, AREVA-Rekomodell				
Keine dynamische Aerosolsimulation, H ₂ -Verbrennungen mit Zündung durch Reko bei 8 Vol.%, AREVA-Rekomodell		X	X	

Charakteristische Zeiten der Abläufe sind in der nachfolgenden Tab. 4.4-1 enthalten. Details des Ablaufes können in /SON 98/ und /SON 01/ nachgelesen werden.

Tab. 4.1-2 Charakteristische Zeitpunkte wesentlicher Ereignisse der untersuchten Szenarien

	Beginn Kühlmittleintrag in den SHB [s]	Beginn Kernschmelzen [s]	RDB-Versagen [s]	Durchdringen des biologischen Schildes [s]
ND-Fall	0	1900	6308	43799
ND*-Fall	4908	12600	23254	61600
MBL-Fall	0	20700	31867	48597
SBL-Fall	0	79200	93290	122704

Das auslösende Ereignis wurde jeweils zum Zeitpunkt 0 s unterstellt. Der Zeitpunkt des Beginns des Kernschmelzens variiert stark und liegt bei den beiden „neuen“ Szenarien deutlich später. Dies war eine der Randbedingungen der ausgewählten Analysen, um eine Bewertung des Reko-Konzeptes unter möglichst unterschiedlichen Anlagenzuständen zu ermöglichen.

Beim Vergleich der Zeitspannen zwischen den Ereignissen fallen nicht nur die stark unterschiedlichen Zeitpunkte des RDB-Versagens auf, sondern auch die Unterschiede in der Zeitspanne danach bis zum Durchdringen des biologischen Schildes als Folge der Betonerosion. Diese ist in den neueren Szenarien (SBL, MBL) deutlich kürzer gegenüber den beiden „alten“ Fällen (ND, ND*), da die Modellierung der Reaktorgrube in MELCOR zwischenzeitlich erweitert worden war /SON 98, SON 01/. So wurde erst in den neuen Rechnungen das axiale Durchdringen der Fundamentplatte bis zur Lüftungsspinne berücksichtigt, das deutlich schneller erfolgt, als das radiale Durchdringen des biologischen Schildes. Daraus ergeben sich die kürzeren Zeitspannen zwischen RDB-Versagen und dem Sumpf-Schmelze-Kontakt nach Durchdringen des biologi-

schen Schildes, ein für den weiteren Unfallablauf wesentlicher Vorgang da damit der Dampfeintrag infolge des verdampfenden Wassers eher einsetzt.

4.2 Vorgehen bei der Analyse der Zündfähigkeit der Gasgemische

Aussagen über die Brennbarkeit eines Gasgemisches können anhand eines Dreistoffdiagramms (Abb. 4.2-1) getroffen werden. Darin eingetragen sind die Zündgrenzen für aufwärtsgerichtete und horizontale Verbrennungsvorgänge, sowie für abwärtsgerichtete. Zusätzlich ist auch der Übergang zum Detonationsgebiet eingetragen. Ein Luft-Wasserstoffgemisch muss mindestens 4 Vol.% Wasserstoff (dementsprechend 96 Vol.% Luft) enthalten, um zündfähig zu sein. Für abwärtsgerichtete Verbrennungsvorgänge sind mehr als 8,7 Vol.% Wasserstoff erforderlich. Ein Gemisch aus z.B. 10 Vol.% Wasserstoff, 30 Vol.% Luft und 60 Vol.% Dampf ist gerade noch zündfähig. Eine Erhöhung des Dampfanteils auf 62 Vol.% bei einer Reduktion des Luftanteils auf 28 Vol.% würde das Gemisch inertisieren.

Bei den folgenden Darstellungen der COCOSYS-Ergebnisse beinhaltet die „HYDROGEN-Achse“ Wasserstoff plus Kohlenmonoxid aus der Beton-Schmelze-Wechselwirkung. Die „AIR-Achse“ stellt, wie bei normalen Atmosphärenbedingungen, ein Gemisch aus 79 Vol.% Stickstoff und 21 Vol.% Sauerstoff (gerundet) dar. Da aufgrund der Rekombination von Sauerstoff und Wasserstoff zu Wasser der Sauerstoffanteil der Atmosphäre abnimmt, wird für die Dreistoffdarstellung der „überschüssige“ Stickstoffanteil dem Dampfanteil zugeschlagen, da er ebenfalls inertisierend wirkt. Kohlendioxid aus der Beton-Schmelze-Wechselwirkung wird ebenfalls dem Dampfanteil hinzugerechnet, da er ebenfalls inertisierend wirkt.

In der THAI Versuchsanlage wurden in den Jahren 2008 und 2009 etwa 30 Deflagrationstests durchgeführt /KAN10/. Die Anlage hat eine Höhe von 9 m und einen Durchmesser von 3.2 m. Es wurden Tests mit auf- und abwärtsgerichteter Verbrennung durchgeführt. In Abb. 4.2-1 sind die Gemischzusammensetzungen ausgewählter Versuche, sowie die Flammfrontgeschwindigkeiten, die anhand der in /KAN10/ dargestellten Isochronen ermittelt wurden, eingetragen. Die Versuche decken die in den COCOSYS-Rechnungen auftretenden Gemischzusammensetzungen ab. Sie zeigen eine Zunahme der Flammfrontgeschwindigkeit mit zunehmender H₂-Konzentration und eine Abnahme der Geschwindigkeit mit zunehmendem Dampfgehalt. Bei reinen Wasserstoff-Luftgemischen mit H₂-Konzentration kleiner als 7,5 Vol.% war die Verbrennung

langsam und unvollständig. Somit wurden die Versuche mit Dampf (Anteile von 25 Vol.% und 47 Vol.%) mit höheren H₂-Konzentration durchgeführt (10 Vol.% und 12 Vol.%), wobei sowohl die auf- wie die abwärtsgerichtete Verbrennung untersucht wurde. Die Flammfrontgeschwindigkeiten waren mit 1,4 bis 4,3 m/s langsam.

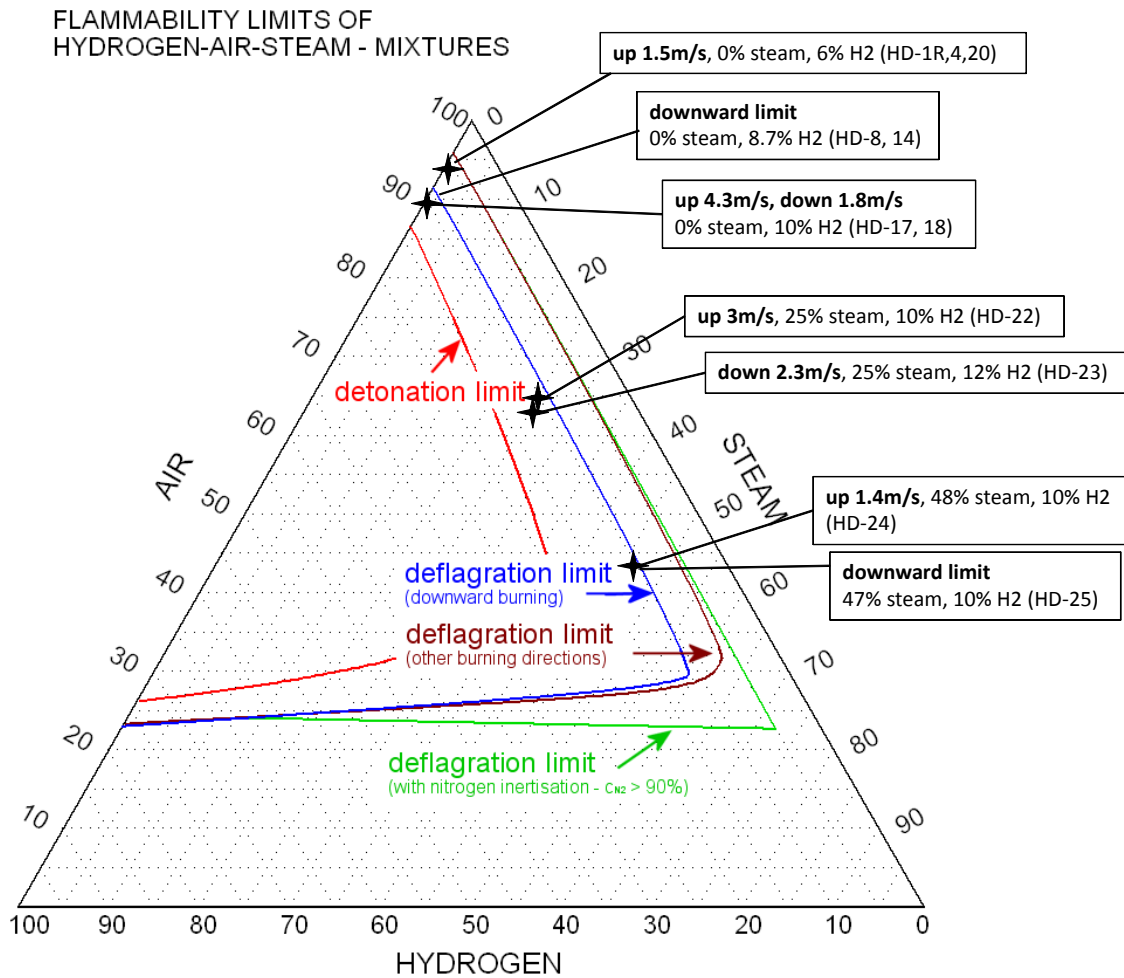


Abb. 4.2-1 Dreistoffdiagramm mit Gemischzusammensetzungen und Flammfrontgeschwindigkeiten ausgewählter THAI – HD Tests

Auch wenn die THAI Ergebnisse nicht direkt auf den SHB einer realen Anlage übertragen werden können, geben sie dennoch eine Vorstellung, was für Flammfrontgeschwindigkeiten zu erwarten sind. Auf diesen Sachverhalt wird im Kap. 4.4 noch einmal verwiesen.

4.3 Rechnungen ohne (dynamische) Aerosolsimulation und ohne H₂-Verbrennung

Wie in den früheren Untersuchungen mit COCOSYS in /TIL 98/ wurden zunächst alle 4 Fälle ohne eine (dynamische) Simulation des Aerosolverhaltens durchgeführt. Die in Sumpf, auf Wänden und im Mittel in allen Zonen in der Gasphase freigesetzte Nachzerfallsleistung der Aerosole wurde überschlägig bestimmt (Basis MELCOR Rechnungen bzw. eigene Analysen, siehe Kap. 2.4).

4.3.1 Charakteristische Unterschiede aller Fälle – SHB-Druck

In Abb. 4.3-1 ist die Entwicklung des Drucks innerhalb des SHB für die 4 verschiedenen Szenarien dargestellt. Zusätzlich wurden die Zeitpunkte des RDB-Versagens und des Durchschmelzen des biologischen Schildes markiert. Bei den untersuchten Szenarien – bis auf den ND* Fall – beginnt in der Rechnung jeweils mit dem Auftreten des Lecks zum Zeitpunkt 0 s die Freisetzung in den SHB. Im ND* Szenario kommt es erst beim Versagen der Berstscheiben des Druckhalterabblasetanks (4908 s) zu einer Freisetzung in den Sicherheitsbehälter. Daher bleibt in diesem Szenario der Druck bis zu diesem Zeitpunkt konstant bei 1 bar.

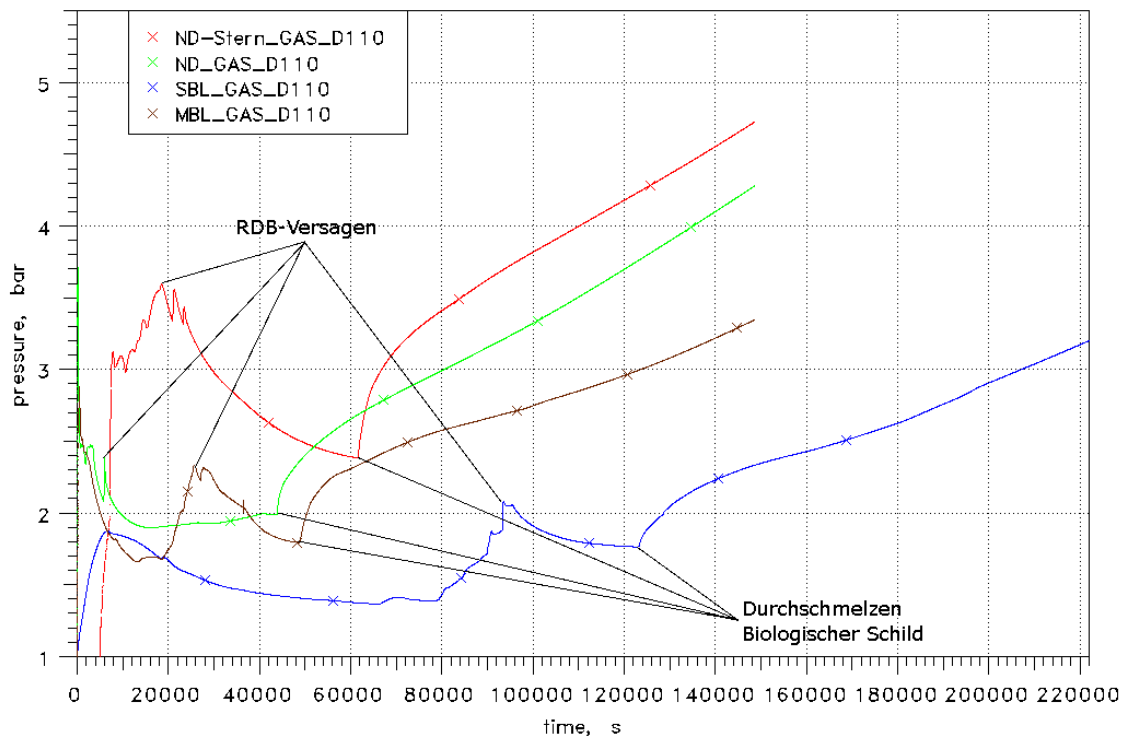


Abb. 4.3-1 Druckentwicklung innerhalb des SHB für die verschiedenen Szenarien

Der SHB-Druckanstieg nach dem Einsetzen der Sumpf-Schmelze-Wechselwirkung nach RDB-Versagen fällt im MBL- und SBL-Fall etwas geringer aus, als im ND*- und ND- Fall. Dies liegt auch an der größeren Wassermasse, die durch die unterstellte Notkühleinspeisung vor Kernzerstörung in den SHB gelangt ist. Sie kann ein Vielfaches der Wärme, verglichen zum ND- und ND*-Fall, aufnehmen und kommt deshalb nicht so nahe an die Siedebedingungen heran. Erreicht werden die Siedebedingungen in keiner der Rechnungen.

Im SBL-Fall läuft die Wärmeabfuhr über die DE weiter und das Leck zunächst überspeist. Somit tritt aus dem Leck unterkühltes Wasser aus und der geringere Massen- und Energieeintrag verursacht einen geringeren Druckanstieg im SHB. Durch die relativ lange Kühlung des Kerns kommt es vglw. später zum RDB-Versagen. Daher wird durch die reduzierte NZL die Zeit zum Durchschmelzen des biologischen Schildes verlängert, und die Beton-Schmelze-Wechselwirkung setzt bei deutlich reduzierter NZL ein, und der Druckanstieg ist erheblich geringer.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der einzelnen Analysen beschrieben.

4.3.2 ND*-Fall

In der frühen Störfallphase bleibt der Druck im Reaktorkreislauf solange unter dem Ansprechdruck der Sicherheitsventile des DHs, solange noch Wärme an die DE abgeführt wird, d.h. noch Wasser in den DE ist (ca. 1 h). Danach steigt der Druck im Reaktorkreislauf an und das DH-SV öffnet zyklisch. Etwas später versagen bei 4908 s die Berstscheiben auf dem Abblasetank und die Dampf- und Wasserfreisetzung in den SHB beginnt. Der Druck in den Anlagenräumen steigt schnell an und in der Decke der Dampferzeugertürme öffnen sich einige Berstelemente, insbesondere die, für die die niedrigsten Versagensdrücke angegeben wurden. Dabei entstehen in der Decke des DE-Turms A eine Öffnung von insgesamt $1,5 \text{ m}^2$, die in die Plumezone D24A führt und eine gleich große Öffnung zu D23A. In der Decke des zweiten DE-Turms C entstehen, symmetrisch zu A, Öffnungen mit gleichen Querschnitten, jeweils zur Plumezone D24C und zu Zone D23C. Im nachfolgenden Störfallverlauf versagen keine weiteren Berstelemente mehr.

Während der Freisetzung aus dem Primärkreis über den DH-Abblasetank verläuft die Strömung aus beiden Dampferzeugertürmen in den Dom und es tritt fast keine Rück-

strömung auf. Während der Freisetzung aus der Reaktorgrube nach RDB-Versagen gibt es zunächst an jedem DE-Turm eine Gegenströmung, danach stellen sich eine Ausströmung aus DE-Turm A und eine Rückströmung über DE-Turm C ein. Vom Dom strömt Atmosphäre auch in die Räume hinter dem Trümmerschutzzylinder (periphere Betriebsräume) und von dort durch die Türleckagen in die unteren Anlagenräume. Da die Öffnungen in den Dampferzeugertürmen bezogen auf die gesamte Fläche der Berstelemente klein sind und die Türleckagen noch kleiner sind, bilden sich große Unterschiede zwischen den Atmosphärenzusammensetzungen der Raumbereiche Dom, Anlagenräume und Räume hinter dem Trümmerschutzzylinder (Peripherie) aus.

Durch die hohe Lage der Freisetzung in den SHB über den DH-Abblasetank nimmt der ND*-Fall eine besondere Stellung im Vergleich zu den anderen 3 Fällen ein. Während in den anderen Szenarien die Freisetzung bis zum RDB-Versagen an einer tiefen Stelle in den Anlagenräumen liegt, nämlich am heißen Strang des Loops, an den auch der Druckhalter anschließt, liegt sie im ND*-Fall im oberen Teil der Anlagenräume (siehe Abb. 2.1-2). Dadurch kommt es in den ersten 23000 s zu einer atmosphärischen Schichtung (Stratifikation) innerhalb der Anlagenräume. In Abb. 4.3-2 ist zu erkennen, dass in den ersten 23000 s eine deutlich geringere H_2 -Konzentration in den unteren Bereichen der Anlagenräumen (R65A und R66A) als in den darüber gelegenen Räumen (R67A-R21Ai) auftritt. In Folge von zwei Phasen starker Wasserstofffreisetzung aus dem Primärkreis steigen die Konzentrationen in R67A bis R21Ai jeweils über 10 Vol.% an. Zwischen den Maxima sinkt die Konzentration wieder ab, weil die Wasserstofffreisetzung sehr klein wird, weiterhin Dampf freigesetzt wird, der den Wasserstoff in den Dom schiebt und die Reko's Wasserstoff verstärkt abbauen. Nach dem RDB-Versagen (23254 s) und der darauf folgenden Freisetzung in der Reaktorkaverne wird die Atmosphäre der Anlagenräume vermischt und die H_2 -Konzentrationen gleichen sich an.

Auch der Verlauf der Atmosphärentemperaturen (Abb. 4.3-5) zeigt bis 23254 s die Schichtung; die unteren Anlagenräume haben bis zum RDB-Versagen eine deutlich niedrigere Temperatur als die oberen Anlagenräume oder der Dom. Der kurzzeitige Temperaturanstieg bei ca. 7100 s ist durch eine sehr hohe Einspeiserate heißen Wassers, das aus dem Leck austritt, zu erklären, das zum Teil bis in den Sumpf gelangt. In den Anlagenräumen sind die Atmosphärentemperaturen insbesondere während der Schmelze-Beton-Wechselwirkung stark überhitzt. Diese wird in COCOSYS nicht simuliert, sondern stattdessen die mit MELCOR berechnete Wärmeabgabe der Schmelze als Zeitverlauf vorgegeben.

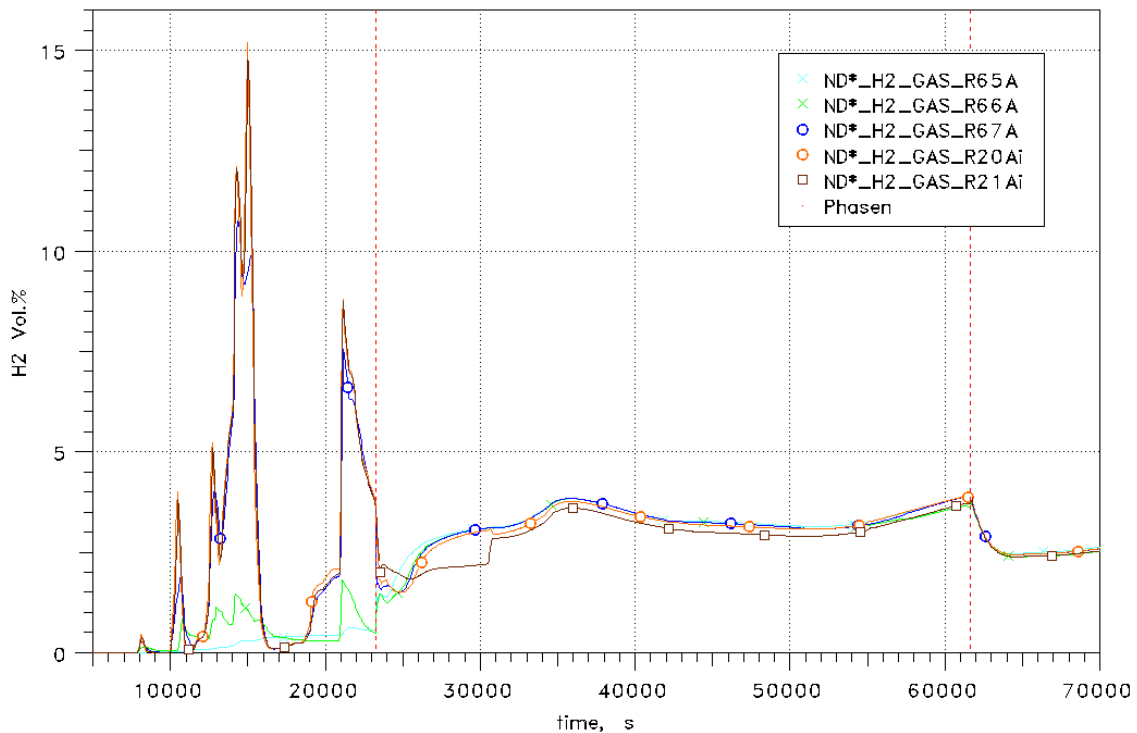


Abb. 4.3-2 ND*-Fall, Stratifikation des Wasserstoffes in den Anlagenräumen

Betrachtet man die Dichte (Abb. 4.3-3), so erkennt man, dass bis zum Versagen des RDBs in den unteren Anlagenräumen (s. RSUA) die Dichte der Atmosphäre deutlich über der Dichte der höher gelegenen Anlagenräumen, oder des Doms liegt. Deutlich zu erkennen ist auch wie stark der Rohrkanal (R52A, der zu den Räumen hinter dem Trümmerschutzhilf gehört) von den Vorgängen im restlichen SHB isoliert ist. Bis ca. 80000 s sind die Dichteänderungen innerhalb des Rohrkanals fast ausschließlich durch Änderungen im SHB-Druck (siehe Abb. 4.3-4) zu erklären.

Der Druck (Abb. 4.3-4) innerhalb des SHB steigt nach dem Versagen der Berstscheiben am Abblasetank sehr schnell auf ca. 3,1 bar an. Durch den andauernden Eintrag von Dampf und Gasen erreicht er aber erst bei ca. 18500 s mit 3,6 bar sein vorläufiges Maximum. Nach RDB-Versagen bis zum Zeitpunkt nach 61000 s an dem die Schmelze den biologischen Schild in radialer Richtung durchdrungen hat, fällt der Druck im SHB ab, weil die Dampf- und Gasfreisetzung stark zurückging. Ab 61600 s steigt der Druck wieder an, da das in die Grube eindringende Wasser anhaltend verdampft. Die Erosion des Betons kommt trotzdem nicht zum Erliegen und H_2 , CO und CO_2 werden weiterhin in der Reaktorgrube freigesetzt. Die Lüftungsspinne im Fundamentbereich wurde in dieser Analyse vernachlässigt. Die Rechnung wurde beendet, bevor der Zeitpunkt der Druckentlastung des SHB erreicht ist.

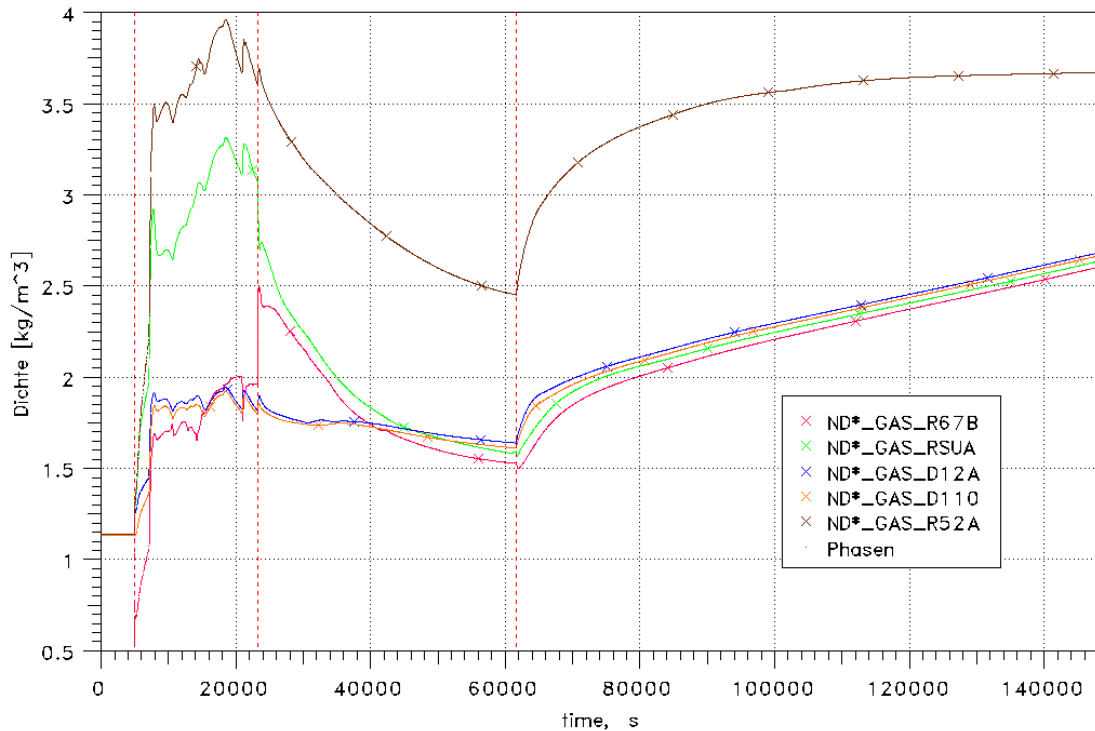


Abb. 4.3-3 ND*-Fall, Stratifikation, Dichte der Atmosphäre in ausgewählten Zonen, innerhalb und außerhalb des Trümmerschutzes⁹

Der zeitliche Verlauf der H_2 -Konzentrationen ist in Abb. 4.3-6 für den Bereich des Doms sowie für die Anlagenräume dargestellt. Oberhalb der Dampferzeugertürme ist die Domatmosphäre stets durchmischt; dort gibt es nur geringe Konzentrationsunterschiede. Wie bereits erläutert, entstehen in Folge von zwei starken Phasen der Wasserstofffreisetzungen aus dem Primärkreis Maxima der Konzentrationen in den oberen Anlagenräumen. Wegen der begrenzten Strömungsquerschnitte in den Dampferzeugerdecken fließt der Wasserstoff nur langsam in den Dom ab. Dieser Vorgang ist an den schwach ausgeprägten Maxima der H_2 -Konzentrationen im Dom zu erkennen.

⁹ Die Phasen geben jeweils die Zeitpunkte an, wenn a) die Bestscheiben am DH-Abblasetank versagen, wenn b) der RDB bzw. c) das biologische Schild (durch Erosion) versagen.

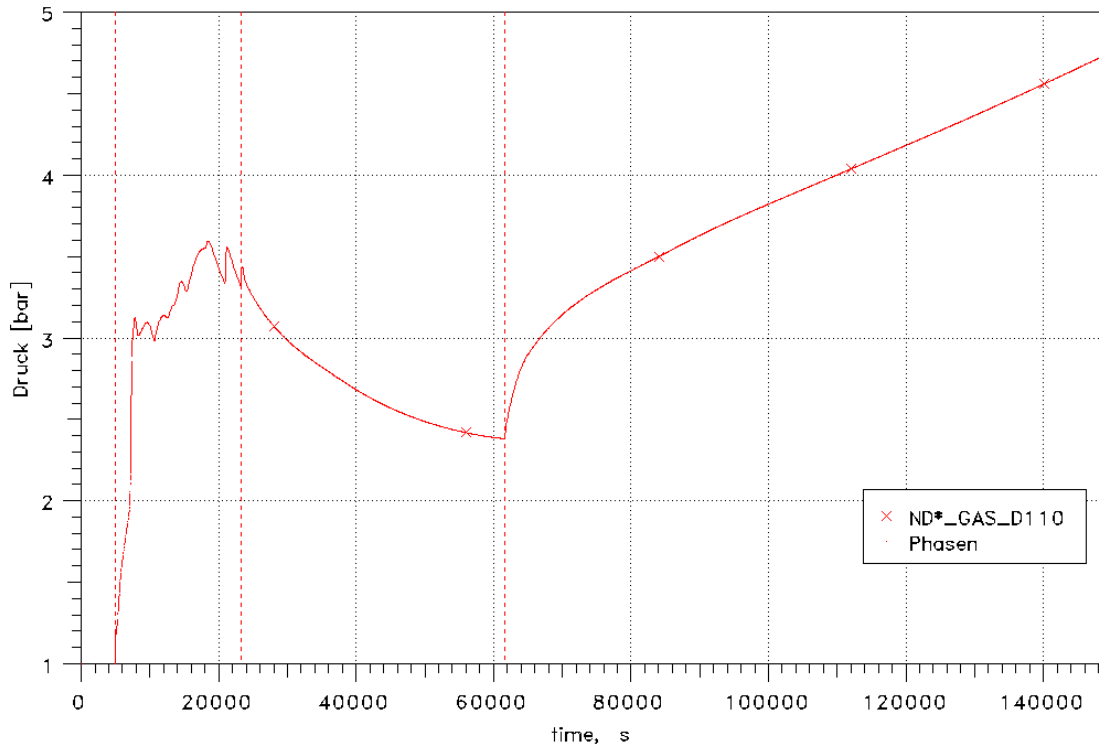


Abb. 4.3-4 ND*-Fall, Entwicklung des SHB Drucks

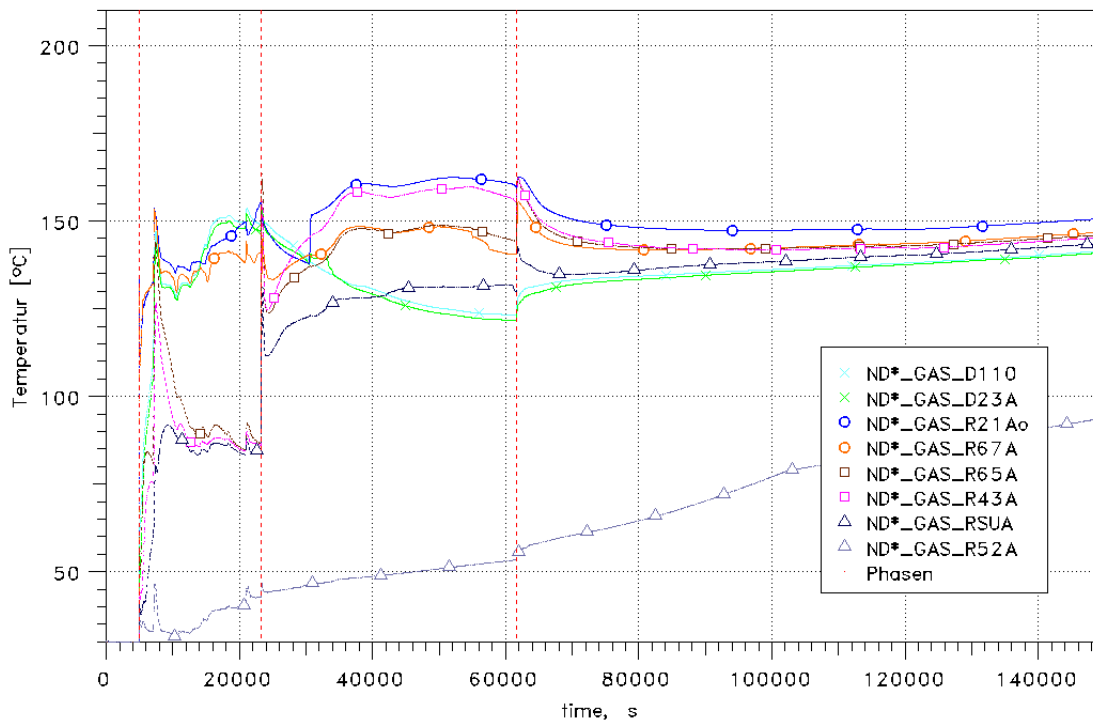


Abb. 4.3-5 ND*-Fall, Temperaturverlauf für ausgewählte Zonen in verschiedenen Höhen

Während der frühen Phase der Beton-Schmelze-Wechselwirkung (ab 23000 s bis 61600 s) sind die H_2 -Konzentrationen in den Anlageräumen deutlich höher als im Dom, da der Atmosphären austausch zwischen beiden Raumbereichen relativ schwach ist. Mit Beginn der starken Dampfproduktion in der Reaktorgrube aufgrund des Kontakts von Sumpfwasser mit Schmelze (ab 61600 s) verstärkt sich der Atmosphären austausch und die Konzentrationen des Doms und der Anlageräume nähern sich an. Überlagert wird das Ganze vom Abbau von H_2 durch die Reko's.

Wie bereits erläutert gelangt Atmosphäre vom Dom in die Räume hinter dem Trümmerschutzzylinder (und unterhalb des Beckenflurs), weil es dort anfangs noch kälter ist und von dort aus durch Türleckagen eine geringe Strömung in die unteren Anlageräume besteht. Während der frühen Freisetzungsphasen wird durch die Dampffreisetzung auch ein Teil der Dom-Atmosphäre in den Bereich hinter dem Trümmerschutzzylinder geschoben. Insgesamt ist diese Strömung sehr schwach. Deshalb steigen die H_2 -Konzentrationen auch nur sukzessiv von oben nach unten an, von R74A über R72A nach R52A (Abb. 4.3-7 und Schnitt C-C in Anhang). Der verstärkte Anstieg der H_2 -Konzentration in allen Räumen ab ca. 80000 s ist eine Folge der nachlassenden Rekombination, da der Sauerstoff aufgebraucht ist und die Freisetzung aus der Beton-Schmelze-Wechselwirkung anhält. Der Raum R52A zeigt ab ca. 100000 s ein abweichendes Verhalten, das eine Folge der geringen Einströmung und der Kondensation des Dampfes ist, die stärker als die Zuströmung sind, so dass sich der Wasserstoff anreichert.

Neben dem Wasserstoff ist der Sauerstoffanteil für die Brennbarkeit der Gasmischung von besonderer Bedeutung. In Abb. 4.3-8 ist der Abbau des Sauerstoffs durch die Reko's dargestellt. Ab ca. 10300 s reicht die H_2 -Konzentration an den ersten Reko's aus, um diese zu „starten“, aber für die nächste dreiviertel Stunde kommt es aufgrund der geringen H_2 -Konzentrationen nur zu einem Verbrauch von insgesamt 40 kg O_2 in Folge der Rekombination (zu wenig um in der Abbildung erkennbar zu sein). Da während der Freisetzung aus dem DH-Abblasetank die Atmosphäre in den Anlageräumen noch stark geschichtet ist, gelangt auch kein Wasserstoff an die Reko's in den unteren Anlageräumen. Diese starten erst nach dem RDB-Versagen, wenn Wasserstoff aus der Schmelze-Beton-Wechselwirkung entsteht. Ab ca. 70000 s ist eine Abnahme der Abbauleistung zu erkennen, da vielen Reko's jetzt nicht mehr der nötige Sauerstoff zur Verfügung steht. Dies bedeutet zugleich, dass die Atmosphäre nicht mehr brennbar ist und gleichzeitig die Wasserstoffkonzentration in Folge der anhaltenden Beton-Schmelze-Wechselwirkung aber stetig ansteigt.

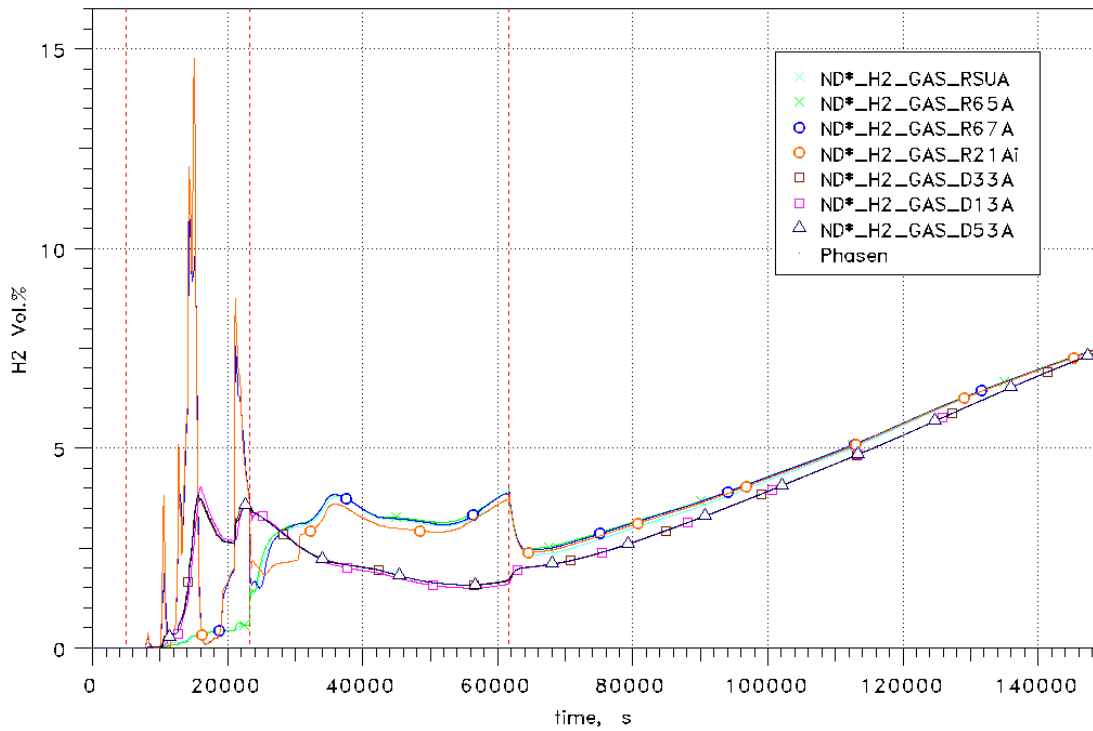


Abb. 4.3-6 ND*-Fall, Entwicklung der H₂-Konzentrationen innerhalb der Anlagenträume und im Dom

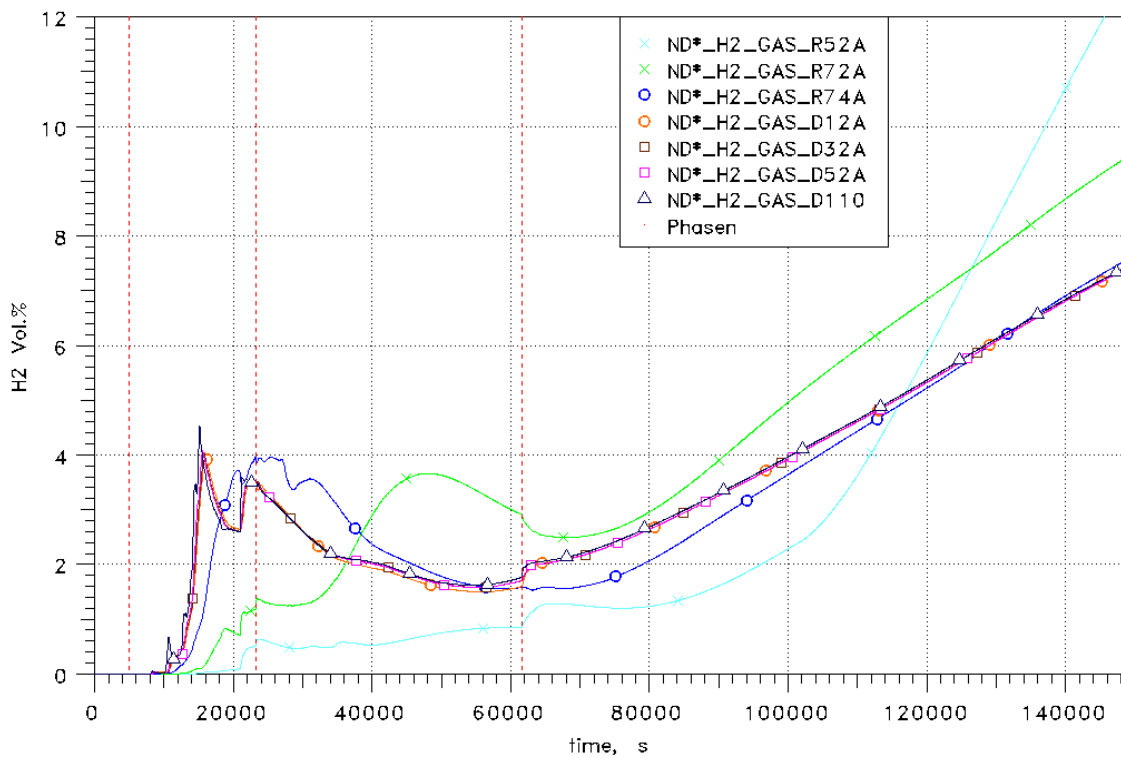


Abb. 4.3-7 ND*-Fall, Entwicklung der H₂-Konzentration im Dom und in den Räumen hinter dem Trümmerschut

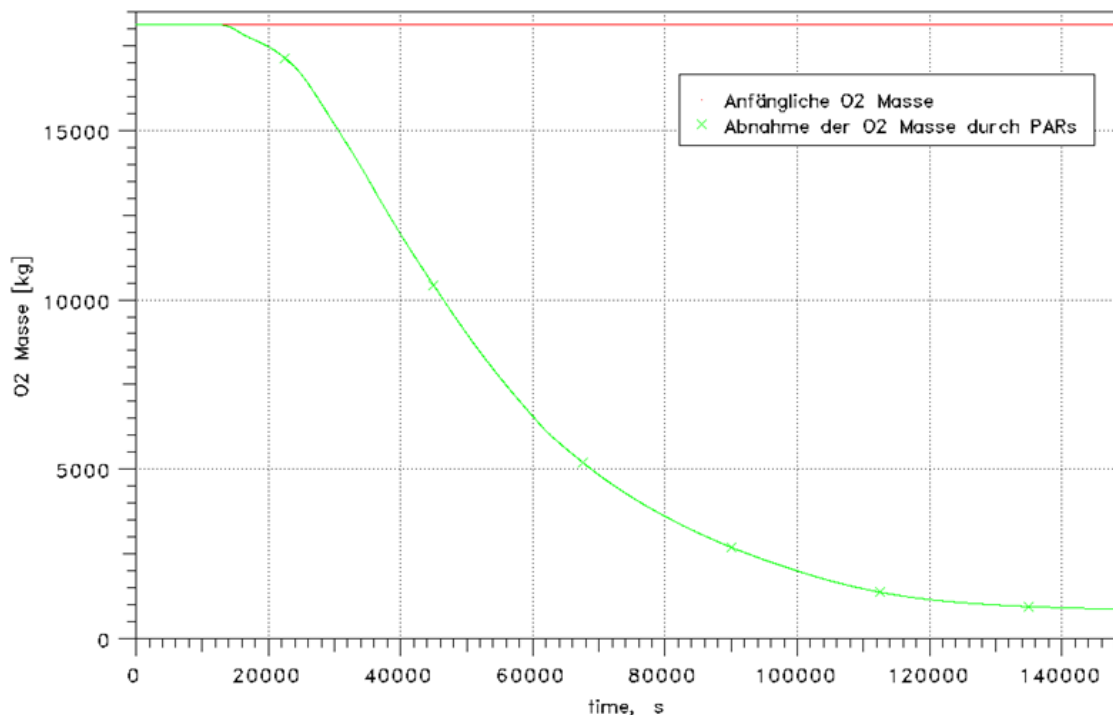


Abb. 4.3-8 ND*-Fall, Abbau des Sauerstoff durch die Reko's

In Abb. 4.3-9 sind Dreistoffdiagramme für ausgewählte Zonen dargestellt: für die oberste Domzone (D110), eine Zone auf Höhe des Beckenflurs, aber außerhalb des Trümmerschutzes (D12A), die Zone direkt darunter (R73A), eine Zone des Rohrkanals (R52A), eine Zone unter der Decke der Anlagenräume (R67A) sowie ein Teil des Sumpfes (RSUA). Die dargestellten Zonen wurden so gewählt, dass sie einen guten Überblick über die verschiedenen Zonen des Containments geben. R73A und R52A liegen außerhalb des Trümmerschutzes aber unterhalb der Beckenflurs, D110 sowie D12A repräsentieren den Dom, während R67A die Anlagenräume abbildet. Diese Darstellung wird für alle Fälle beibehalten.

Während des gesamten Unfallablaufs wird das Gasgemisch in keiner der dargestellten Zonen brennbar. In den oberen Anlagenräumen werden zwar während der Freisetzung aus dem Primärkreis zeitweise H_2 -Konzentrationen über 10 Vol.% erreicht (siehe Abb. 4.3-6), jedoch ist dort der Sauerstoff zu diesem Zeitbereich durch die vorhergehende Dampffreisetzung verdrängt worden, so dass das Gemisch nicht brennbar ist (Dampf-inertisierung). Im Dombereich wird die Zündgrenze für aufwärtsgerichtete und horizontale Verbrennungen im Deckelabstellplatz D06oA und D06oC, sowie in mehreren Zonen zwischen Trümmerschutz und SHB überschritten. Diese Überschreitungen treten aber nur kurzzeitig auf und sind meist nur gering. Einzig in R84 (Gang zwischen

Druckhalterarmaturenraum, Deckelabstellplatz und Beckenflur; siehe Abb. 8.1-7) wird die Grenze für abwärtsgerichtete Verbrennungen knapp überschritten.

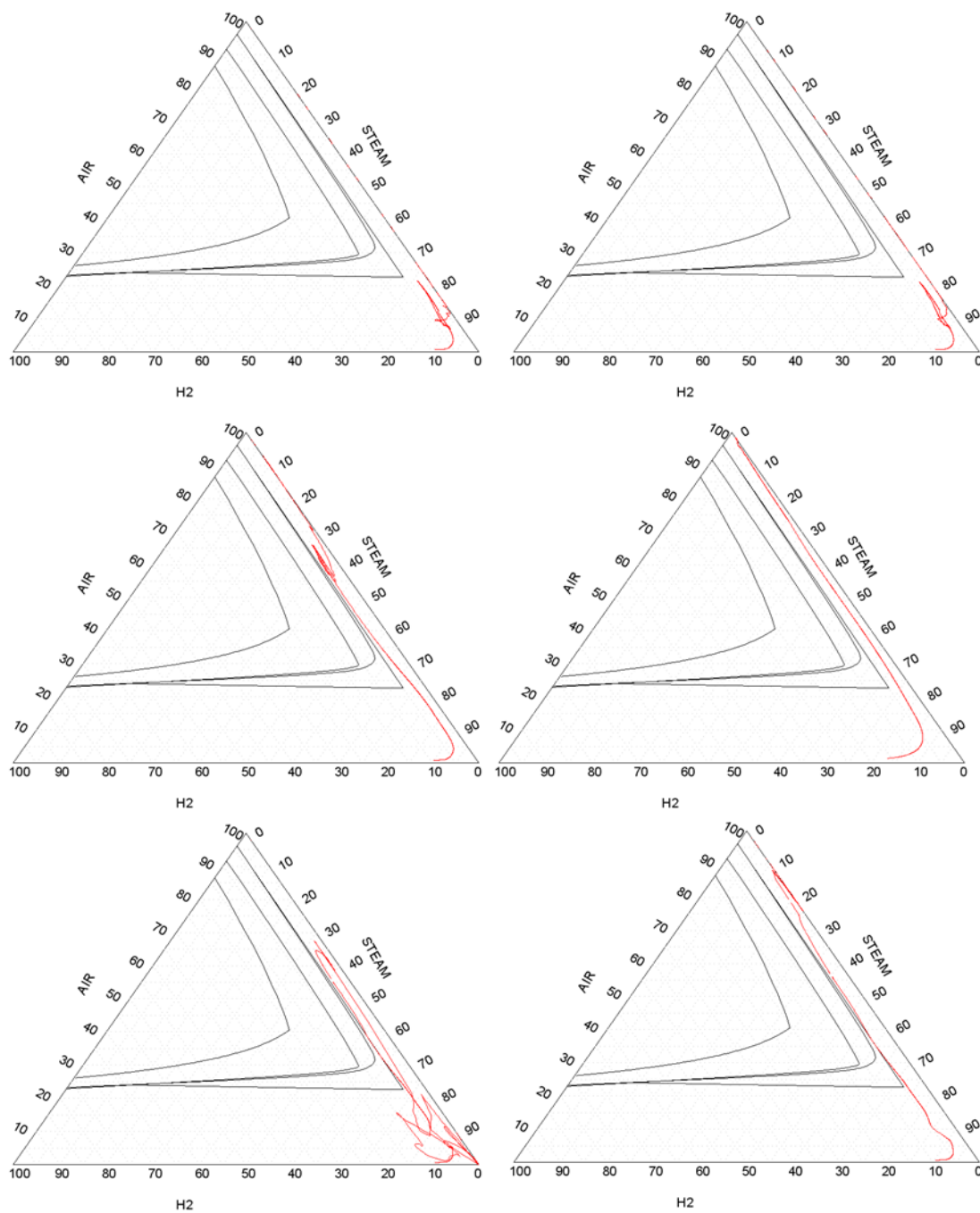


Abb. 4.3-9 Dreistoffdiagramme für den ND*-Fall, von oben links, nach unten rechts: D110, D12A, R73A, R52A, R67A, RSUA

Für den ND*-Fall muss noch auf drei weitere Raumbereiche hingewiesen werden (Abb. 4.3-10). In der Reaktorgrube (R1U), dem Spalt zwischen Tragschild und biologischen Schild (R02), und dem RDB-Stützenraum (R05A-R05D) wird zeitweise nach RDB-

Versagen durch Freisetzung bei der Beton-Schmelze-Wechselwirkung eine Gas Mischung berechnet, die detonationsfähig ist. Dies ist dadurch begründet, dass Verbrennungsvorgänge in dieser Analyse ausgeschlossen wurden. Tatsächlich ist zu erwarten, dass es schon vorher zu einer Zündung kommt, denn auf Grund der durch die Schmelze erzeugten Hitze oder dem Austrag heißer Partikel aus der Schmelze liegen die Atmosphärentemperaturen dort weit über 1000 °C und somit erheblich über der Selbstzündungstemperatur von Wasserstoff (585 °C).

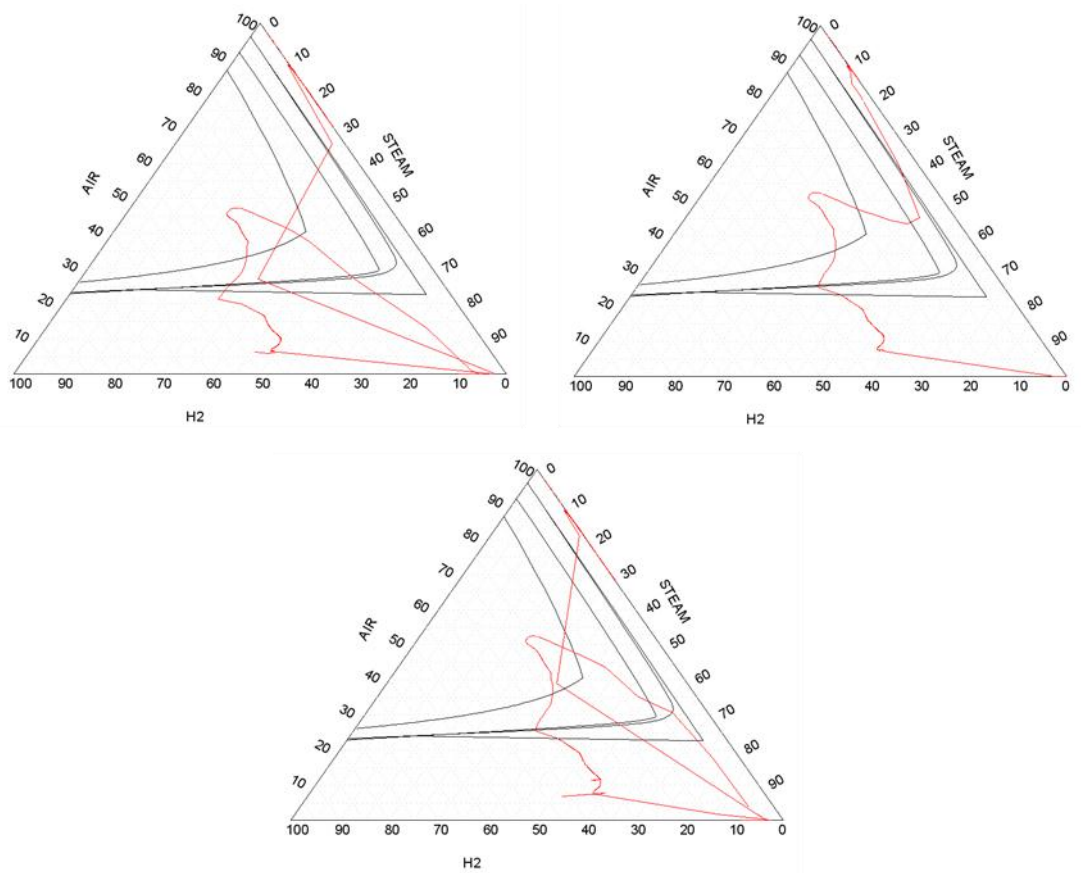


Abb. 4.3-10 Dreistoffdiagramme für den ND*-Fall im Bereich der Reaktorgrube (oben links: R1U, oben rechts: R02, unten: R05A)

4.3.3 ND-Fall

Der ND-Fall ist der am schnellsten ablaufende der vier untersuchten Fälle. Bereits nach 1,75 Stunden (6308 s) versagt der RDB und die Schmelze gelangt in die Reaktorgrube. Dieser Zeitpunkt liegt deshalb so früh, da hier ein sehr großes Leck unterstellt wurde und zusätzlich (wie im ND*-Fall) der komplette Ausfall der aktiven Notkühlung unterstellt wurde. Lediglich die Druckspeicher speisen in der früher Störfallphase in den RKL ein.

Bedingt durch das große Leck in Folge des Abrisses der DH-Verbindungsleitung steigt der SHB-Druck (Abb. 4.3-11) nahezu instantan auf 3,7 bar an. Dieser hohe Druckpeak führt auch zum Versagen vieler Berstelemente in den Decken der Dampferzeugertürme (11,5 m² von R21Ai->D24A, 41,5 m² von R21Ao-> D23A, 11,5 m² von R21Ci->D24C und 24,5 m² von R21Co->D23C). Die größere Anzahl im DE-Turm A ist mit der Lage des Lecks unterhalb dieses Turms begründet. Zusätzlich versagen auch mehrere Berstelemente im Trümmerschutzzylinder zwischen Anlagenräumen und hinter dem Trümmerschutz gelegenen Räumen, wie z.B. dem Rohrkanal. Da zudem das Leck tief im SHB in den Anlagenräumen liegt, kommt es durch all diese Öffnungen zu einer starken Ausströmung aus den Anlagen- in die Betriebsräume des SHB und damit zur Durchmischung der Atmosphäre des gesamten SHB. Dies tritt in keinem der anderen Fälle in diesem Maße auf, da bei diesen die Berstelemente im Trümmerschutzzylinder geschlossen bleiben.

Nach dem ersten Peak fällt der SHB-Druck, bedingt durch sehr hohe Kondensationsraten an den (noch) kalten Strukturen und nachlassendem Leckmassenstrom sehr schnell wieder ab. Erst später nach RDB-Versagen und Durchdringen des biologischen Schildes durch die Schmelze steigt der SHB-Druck wieder durch den Sumpfwasser-Schmelze-Kontakt stetig an. Dies würde im späteren Verlauf auch zum SHB-Venting führen, das hier aber nicht berechnet wurde.

Die gute Durchmischung der Atmosphäre bewirkt eine relativ homogene Temperaturentwicklung (Abb. 4.3-12). Selbst der Rohrkanal, der in den anderen Szenarien einen eher langsamen Temperaturanstieg erfährt, erreicht ebenfalls sehr schnell Temperaturen von knapp 80 – 90 °C bis zum Versagen des biologischen Schildes und danach auch deutlich über 100 °C.

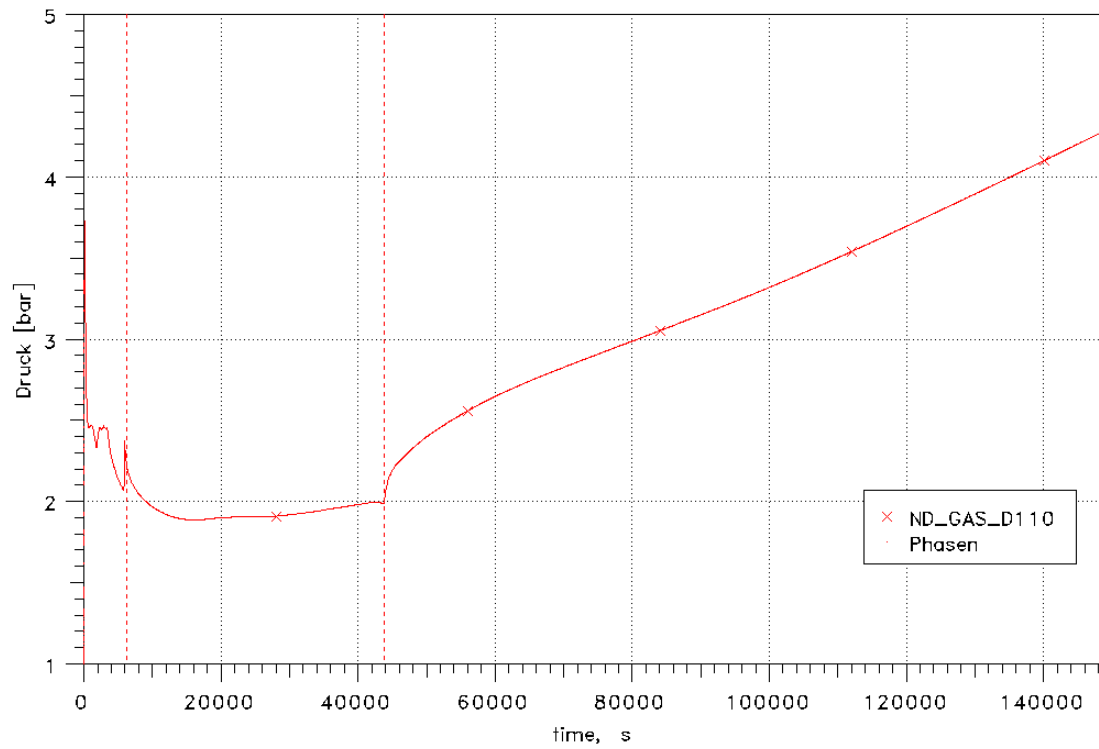


Abb. 4.3-11 ND-Fall, Druckentwicklung innerhalb des SHB

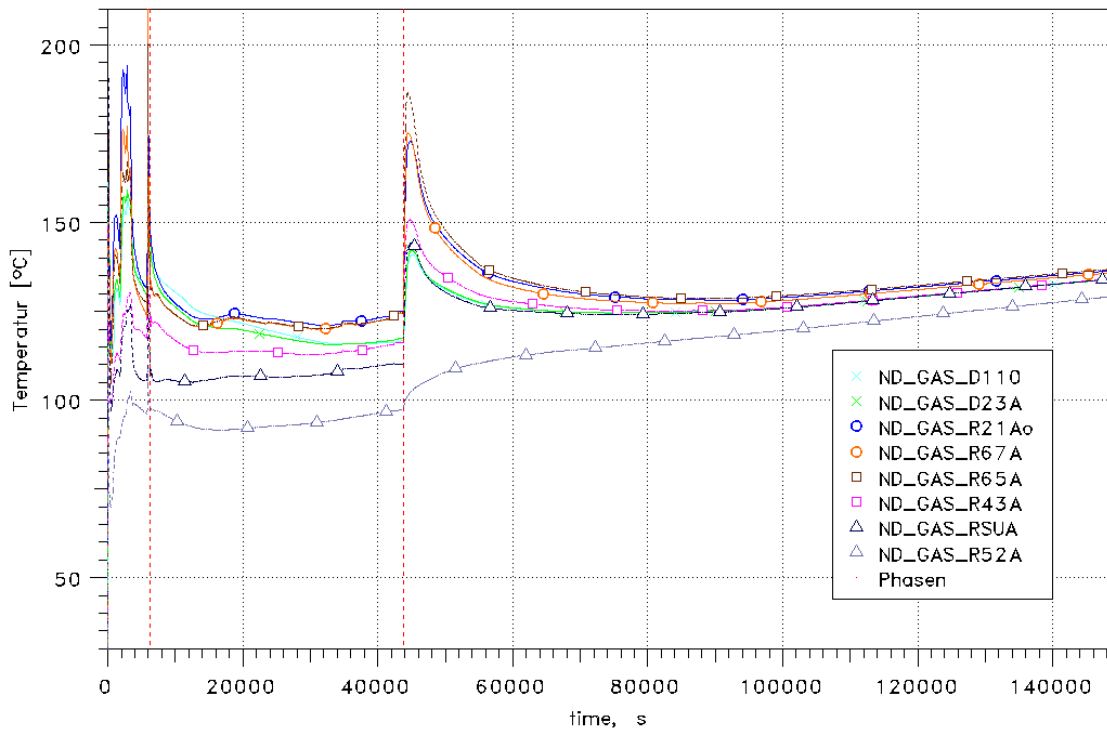


Abb. 4.3-12 ND-Fall, Temperaturverlauf für ausgewählte Zonen in verschiedenen Höhen

Aufgrund der guten Durchmischung der Atmosphäre zeigen die in Abb. 4.3-13 bzw. Abb. 4.3-14 dargestellten H₂-Konzentrationen in verschiedenen Zonen eine sehr homogene Entwicklung. Deshalb sind alle Reko's am Abbau des Wasserstoffs und somit des Sauerstoffes (siehe Abb. 4.3-15) beteiligt. Ab etwa 50000 s geht die Abbauleistung der Reko's bedingt durch die abnehmende Sauerstoffkonzentration (Abb. 4.3-15) deutlich zurück.

Abb. 4.3-16 zeigt die gleiche repräsentative Auswahl von Dreistoffdiagrammen für verschiedene Raumbereiche innerhalb des SHB. Wegen der guten Durchmischung und des hohen Dampfgehalts der Atmosphäre in allen Raumbereichen sowie der effektiven Wirksamkeit des Reko-Konzeptes treten brennbare Zustände (Überschreitung der Grenzen für aufwärtsgerichtete und horizontale Verbrennung) nur in wenigen Zonen und für relativ kurze Zeiten in der frühen Phase der Kernzerstörung auf, z.B. in R67A, einem Raum in der Nähe des Lecks in den Anlagenräumen.

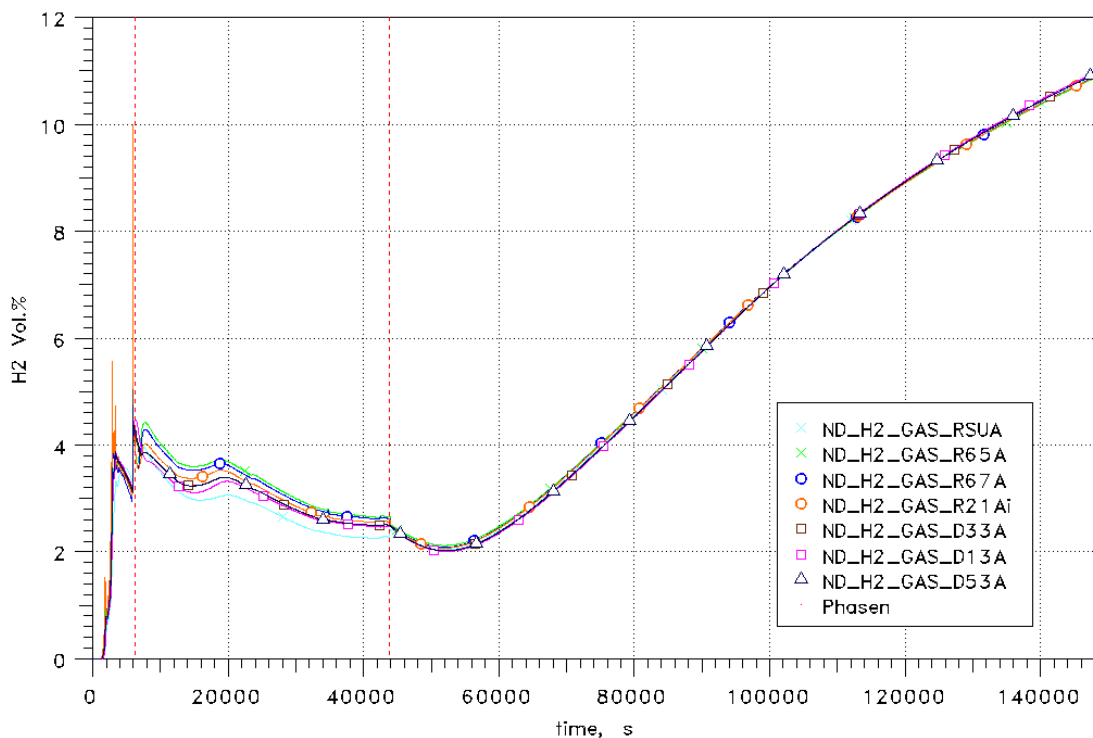


Abb. 4.3-13 ND-Fall, H₂-Konzentration innerhalb der Anlagenräume und im Dom

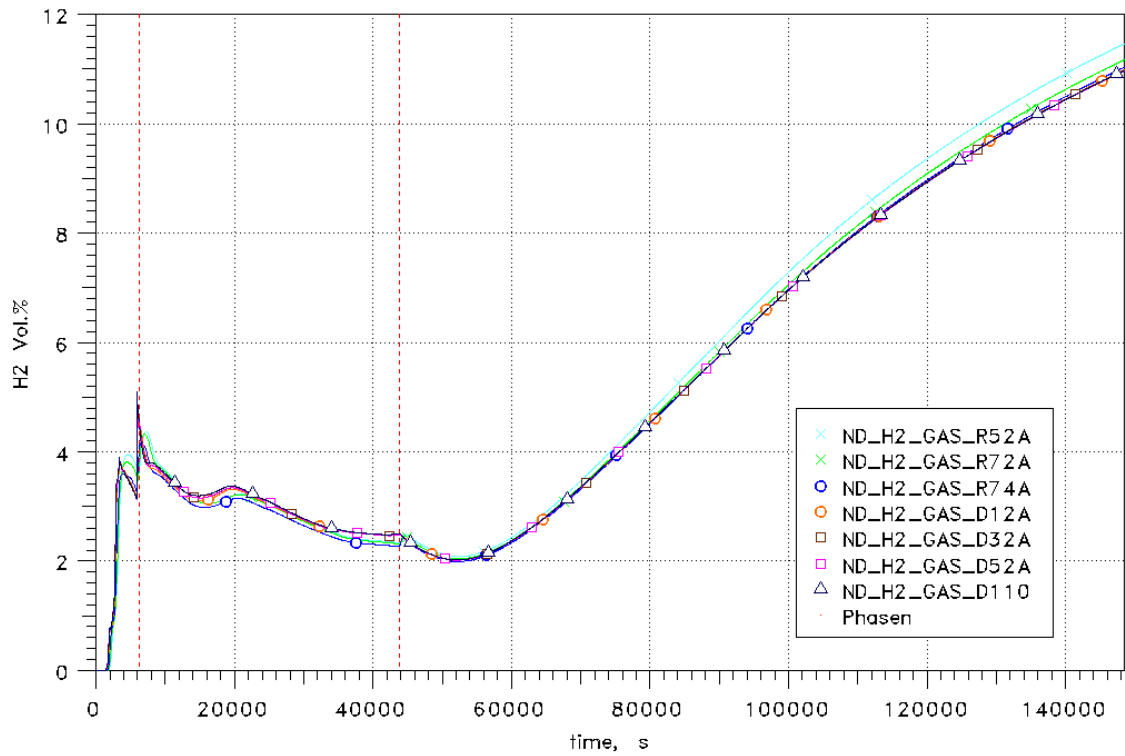


Abb. 4.3-14 ND-Fall, H₂-Konzentration im Dom und den Räumen hinter dem Trümerschutz

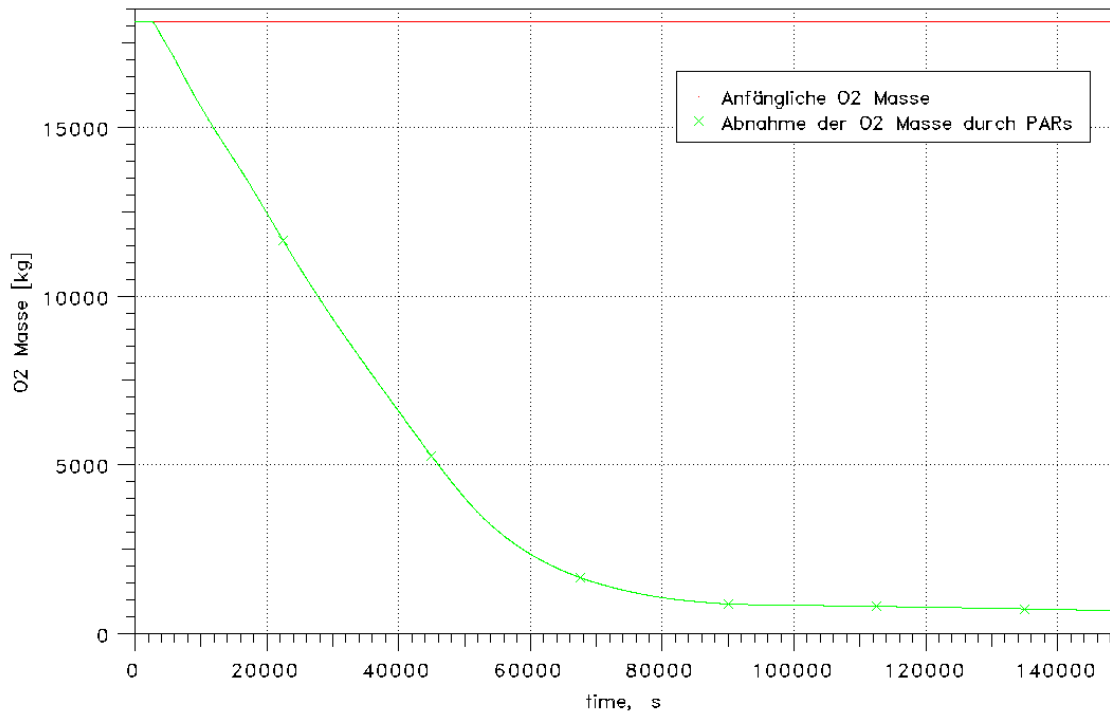


Abb. 4.3-15 ND-Fall, Abbau des Sauerstoffs durch die Reko's

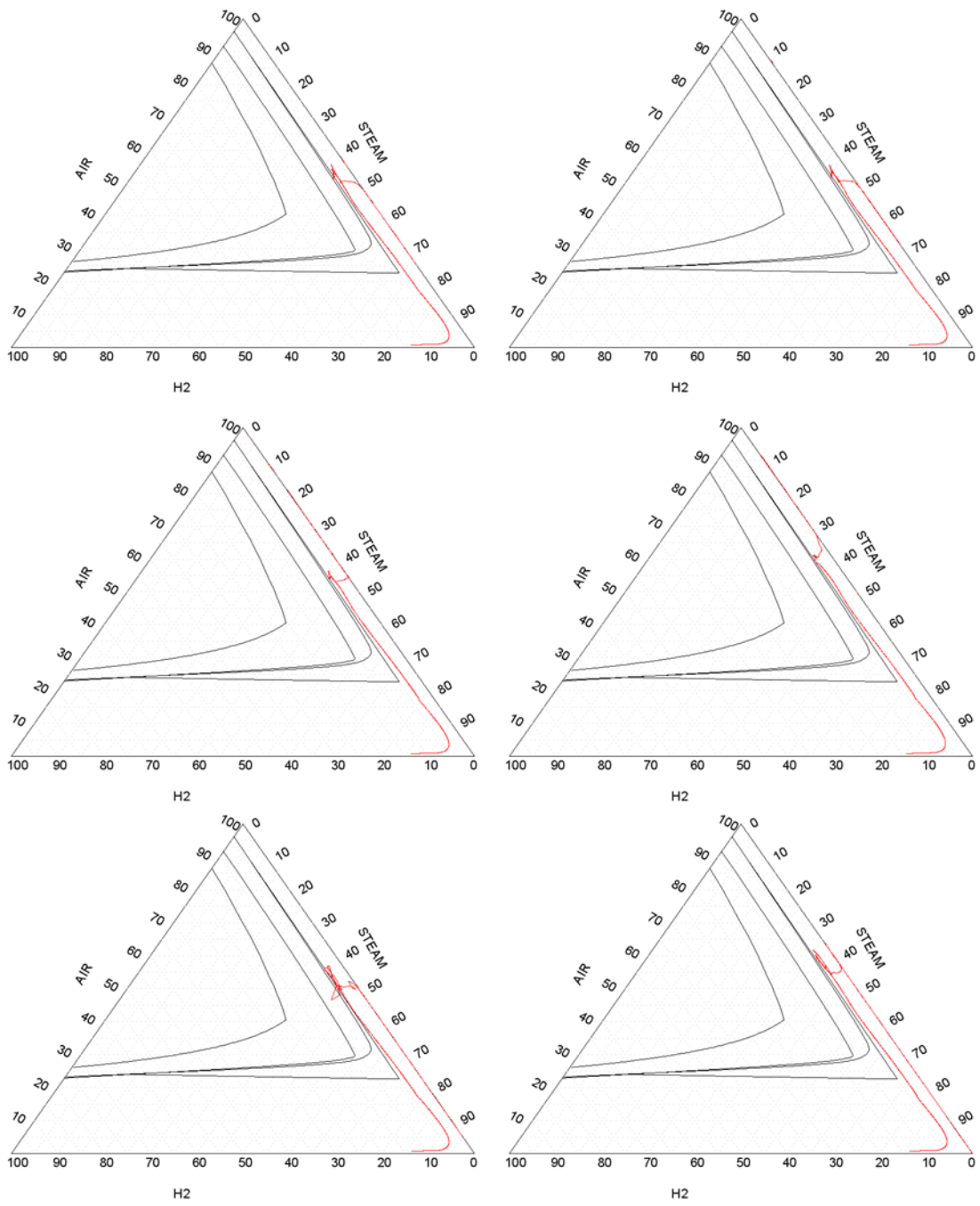


Abb. 4.3-16 Dreistoffdiagramme für den ND-Fall; von oben links, nach unten rechts:
D110, D12A, R73A, R52A, R67A, RSUA

4.3.4 SBL-Fall

Das SBL-Szenario ist das erste der beiden neuen Szenarien, die analysiert wurden. Der größte Unterschied zu den beiden oben diskutierten Fällen besteht darin, dass die Notkühleinseisung zunächst auslegungsgemäß arbeitet, dann aber beim Umschalten auf Sumpfbetrieb, nachdem die Flutbecken leer sind, versagt (Annahme der Analyse). Dadurch kommt es nachfolgend zum Verlust der Kernkühlung und zum Kernschmelzen. In der MELCOR-Analyse, von der die Daten stammen /SON 01/, wurde jetzt auch die Lüftungsspinne im Fundamentbereich der Reaktorgrube simuliert, sodass es innerhalb einer kürzeren Zeitspanne nach RDB-Versagen als in den beiden oben beschriebenen Fällen zum Kontakt von Schmelze mit Sumpfwasser kommt.

Während der ersten 65350 s tritt aus dem kleinen Leck (10 cm²) nur Wasser aus, das auch nur teilweise verdampft. Dies ist begründet mit der verfügbaren DE-Wärmeabfuhr, die auch den Energieeintrag in den SHB im Vergleich zu den anderen Szenarien deutlich begrenzt. Wegen dieser geringen Massen- und Energiefreisetzung steigt der Druck im SHB nur langsam an (Abb. 4.3-17). Durch den geringen Druckpeak als Folge des kleinen Lecks wird nur eine geringe Anzahl von Berstelementen versagen, noch weniger als beim ND*-Fall. In dieser Rechnung entstehen pro DE-Turm je zwei Öffnungen von nur je 0,5 m², die jeweils in die Plumezonen D24A und D24C, sowie in die Zonen D23A und D23C gehen. Bis zum RDB-Versagen (93290 s) geht die Strömung aus beiden Dampferzeugertürmen immer in den Dom. Beim RDB-Versagen unter erhöhtem Systemdruck (ca. 30 bar) kommt es neben dem Schmelzeaustrag in die Reaktorgrube zu einer kurzzeitigen starken Freisetzung von Dampf und H₂, der im RKL gespeichert war durch die Reaktorgrube in die angrenzenden Räume. Dadurch versagen im DE-Turm C weitere Berstelemente und es entsteht eine Öffnung vom 1 m² nach D23C, aus der die Strömung bis 96000s ebenfalls in den Dom geht. Danach stellt sich hier eine schwache Gegenströmung ein. Bedingt durch die Strömungszustände zu diesem Zeitpunkt im SHB versagen im DE-Turm A keine weiteren Berstelemente. Wie beim ND*-Fall gibt es ebenfalls eine schwache Strömung vom Dom in die Räume hinter dem Trümmerschutz (Peripherie) und von dort durch die Türleckagen zurück in die unteren Anlagenräume.

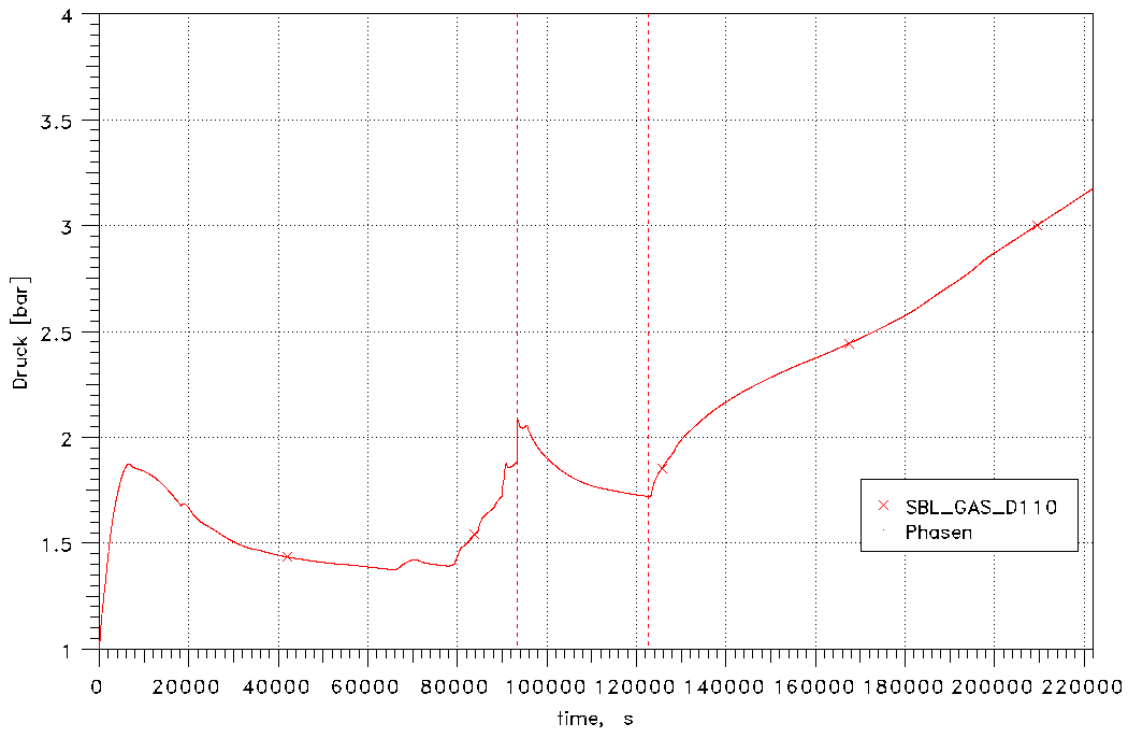


Abb. 4.3-17 SBL-Fall, Entwicklung des SHB-Drucks

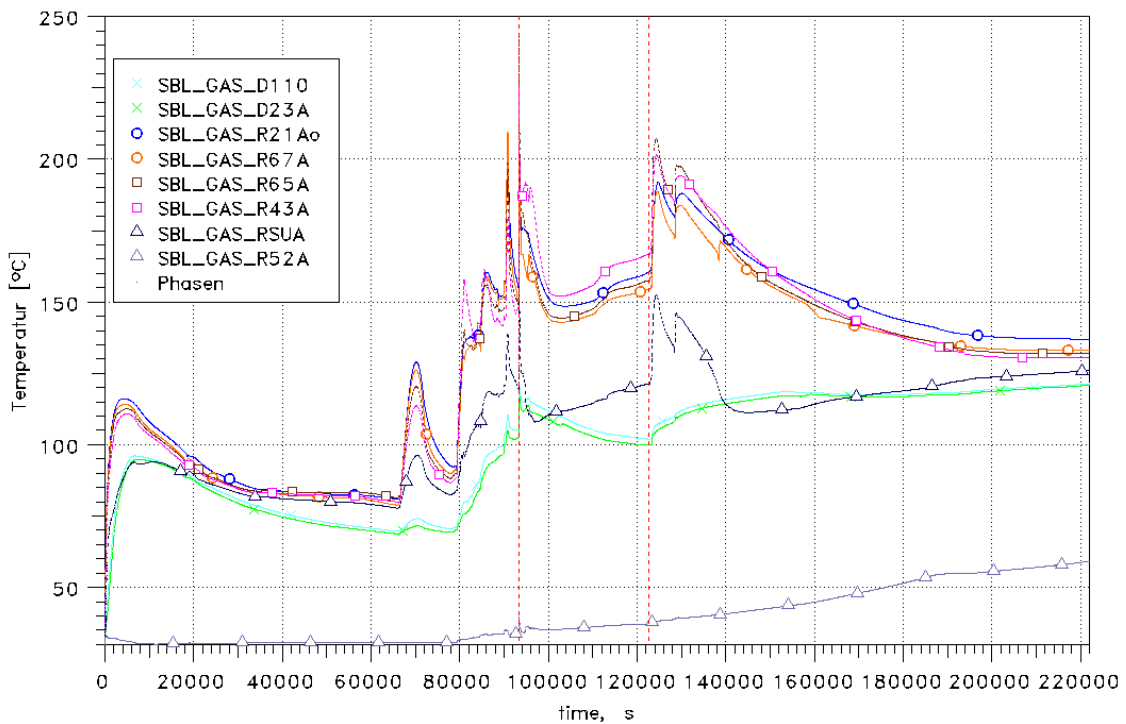


Abb. 4.3-18 SBL-Fall, Temperaturverlauf für ausgewählte Zonen in verschiedenen Höhen

Während der Phase, in der nur Wasser aus dem Leck austritt (bis 65350 s), steigen die Atmosphärentemperaturen (Abb. 4.3-18) im Vergleich zum ND*-Fall nur moderat an.

Durch die nachfolgende Freisetzung von Dampf und Wärme als Folge der einsetzenden Kernzerstörung kommt es in den Anlagenräumen dann zu stark überhitzten Atmosphärenzuständen und somit zu großen Temperaturunterschieden zum Dom (Abb. 4.3-18). Diese Unterschiede treten auch wegen der schlechten Konvektion bedingt durch die sehr kleinen Verbindungsöffnungen zwischen Anlagenräumen und Dom auf.

Weil der Wasserstoff in den Anlagenräumen im unteren Bereich freigesetzt wird, ist die Atmosphäre in allen Anlagenräumen gut durchmischt. Weil die Öffnungen zum Dom und zu den Betriebsräumen klein sind, sind die meiste Zeit die H_2 -Konzentrationen innerhalb der Anlagenräume deutlich höher, als im Dom (Abb. 4.3-19). Für zwei kurze Zeitphasen, nämlich einmal kurz nach der Kernzerstörung, und einmal kurz nach dem RDB-Versagen kehrt sich dieses Verhältnis um. Dies liegt zum einem an der Zusammensetzung des Leckmassenstromes (nach der Kernzerstörung werden ab 86000 s in zwei Stunden nur 70 kg Wasserstoff aber 23 t Wasserdampf aus dem Leck ausgetragen), zum anderen am anhaltenden H_2 -Abbau durch die Reko's.

Nach den RDB-Versagen bei 93290 s steigen die H_2 -Konzentration in den Anlagenräumen kurzzeitig auf über 15 Vol.% an, was bei den anderen Szenarien in dieser Phase nicht auftritt. Der Grund dafür ist, dass bei dem SBL-Fall das RDB-Versagen bei einem relativ hohem Systemdruck (ca. 30 bar) eintritt und im Primärkreislauf zu diesem Zeitpunkt noch sehr viel Wasserstoff gespeichert ist, der dann über die entstehende Öffnung im RDB-Boden durch die Reaktorgrube austritt.

Auch während der Schmelze-Beton-Wechselwirkung sind die H_2 -Konzentrationen in den Anlagenräumen höher als im Dom. Abb. 4.3-21 zeigt für die Anlagenräume die Bilanz aus Wasserstoffproduktion, Abbau durch die Reko's, sowie Zu- und Abströmung. Mit Beginn der Sumpfwasser-Schmelze-Wechselwirkung und der damit einhergehenden hohen Dampfproduktion nähern sich die H_2 -Konzentrationen der Anlagenräume und des Doms wieder an. Die H_2 -Konzentration liegt bis 160000 s im Dom in den Räumen hinter dem Trümmerschutz deutlich unterhalb der 4 Vol.% Grenze. In letzteren Räumen ist auch in diesem Szenario deutlich eine Aufkonzentration des Wasserstoffs zu beobachten (Abb. 4.3-20). Die Ursache ist dieselbe wie im ND*-Fall, die geringe Einströmung von Atmosphäre aus dem Dom. Dabei ist die Kondensation von Dampf höher als dessen Einströmung und der nichtkondensierbare Wasserstoff kann sich anreichern. Langfristig steigt die H_2 -Konzentration wegen der nachlassenden Rekombination durch den verbrauchten Sauerstoff (Abb. 4.3-22) und der anhaltenden Freisetzung aus der Betonerosion im gesamten SHB wieder an.

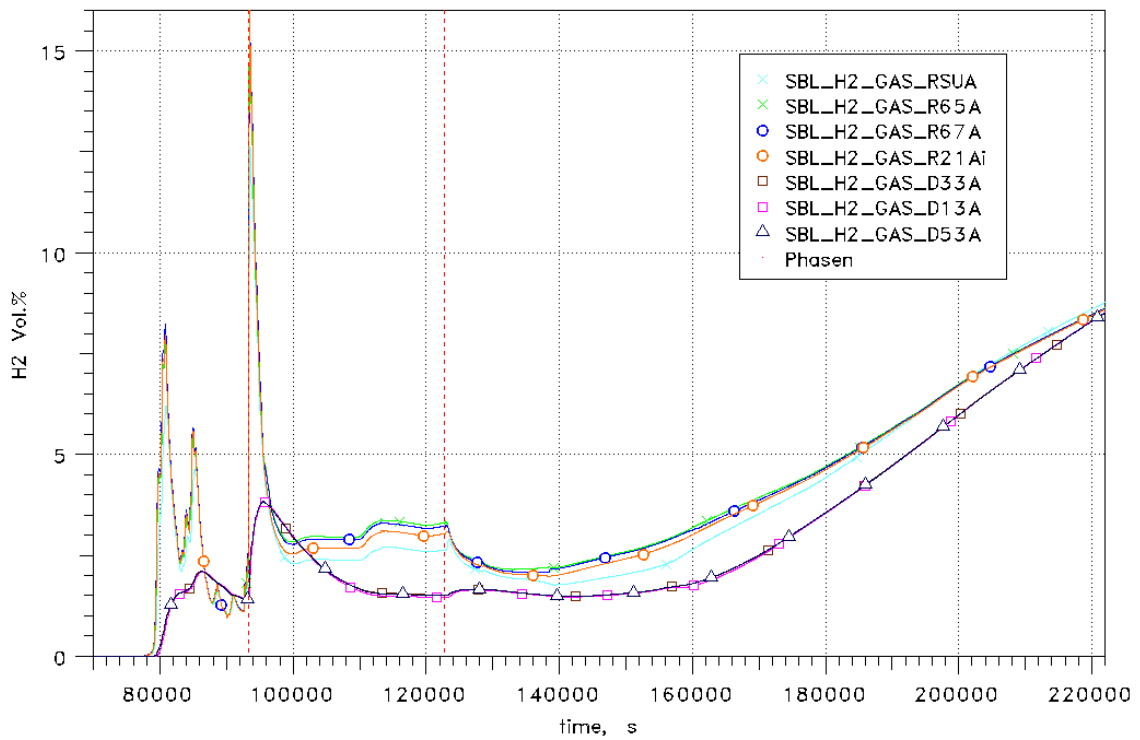


Abb. 4.3-19 SBL-Fall, H₂-Konzentration innerhalb der Anlagenräume und im Dom

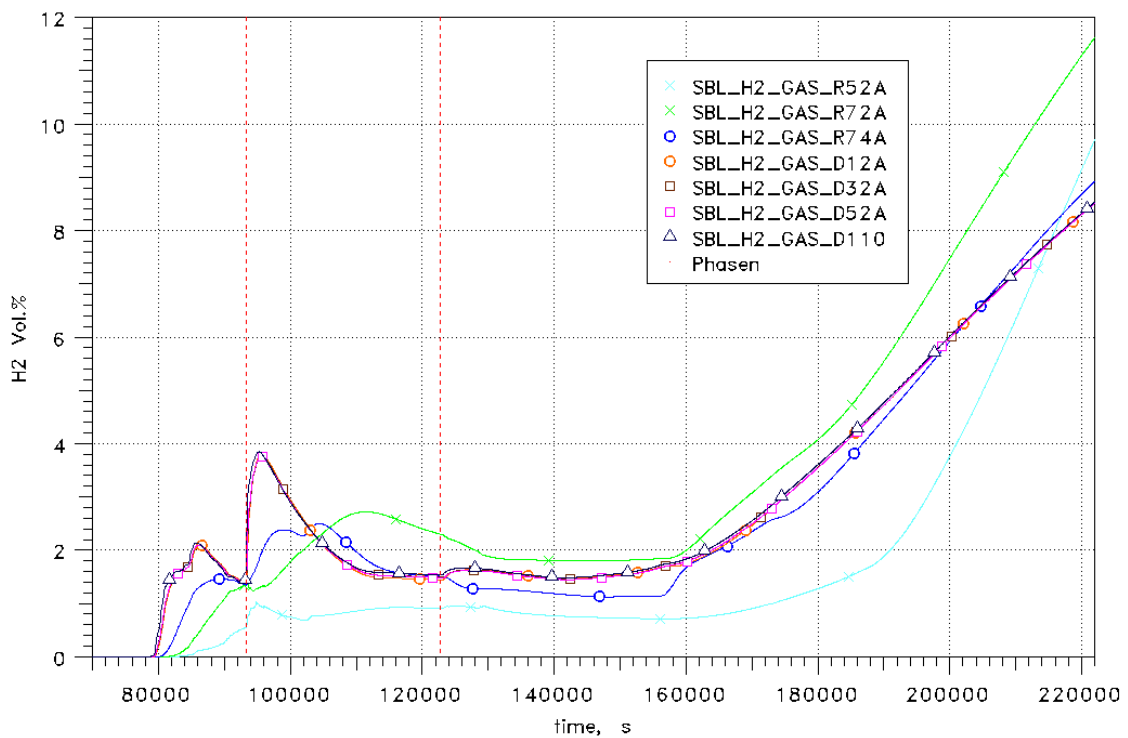


Abb. 4.3-20 SBL-Fall, H₂-Konzentration im Dom und in den Räumen hinter dem Trümmerschut

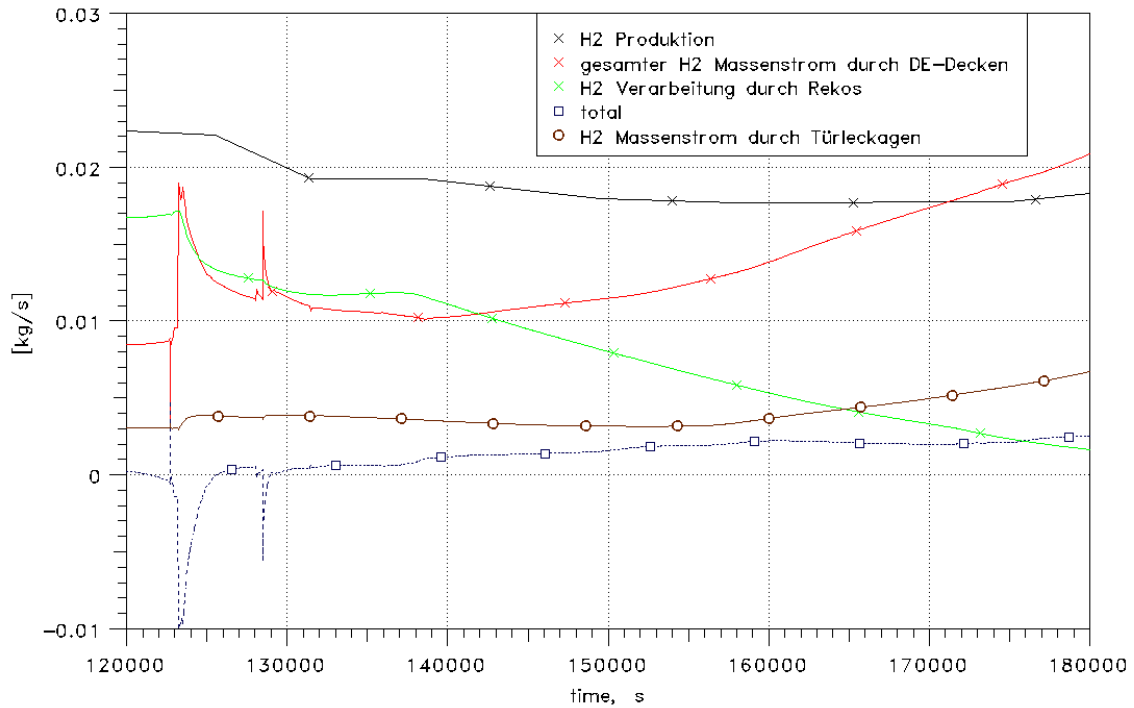


Abb. 4.3-21 SBL-Fall, Zunahme des Wasserstoffs in den Anlagenräumen nach RDB-Versagen

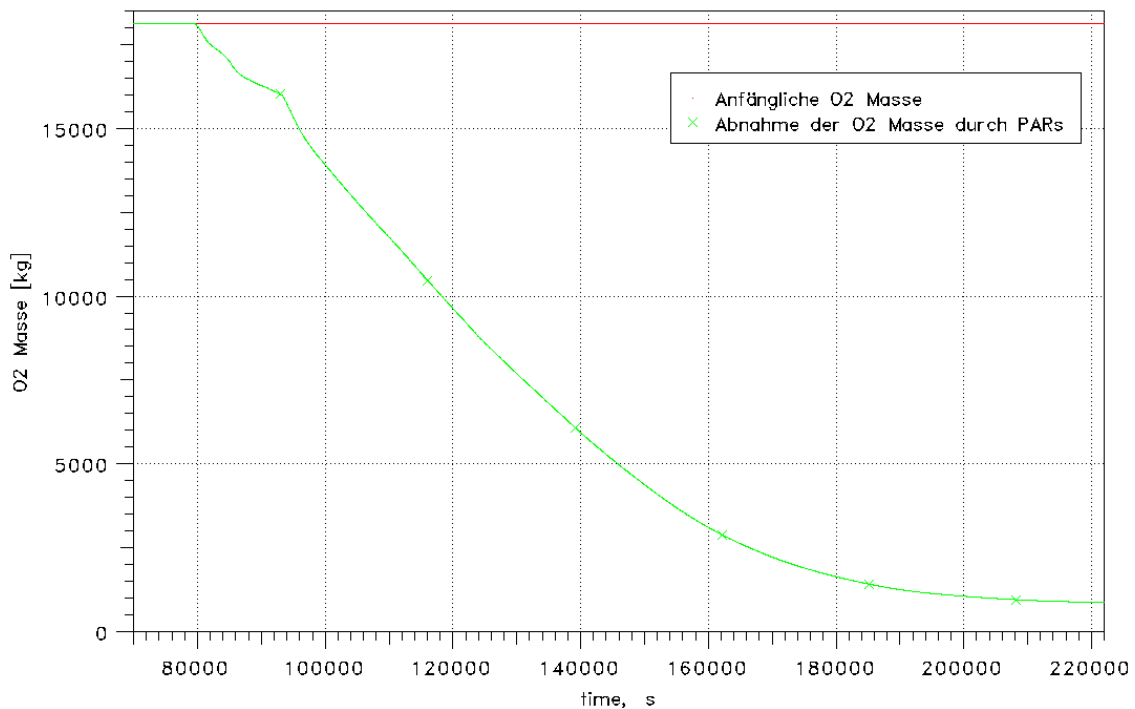


Abb. 4.3-22 SBL-Fall, Abbau des Sauerstoffs durch die Reko's

In Abb. 4.3-22 ist der Abbau des Sauerstoffs dargestellt. Besonders interessant ist, dass man in diesem Szenario auch im Abbau des Sauerstoffs den Zeitpunkt des RDB-

Versagens bei 93290 s erkennen kann. Durch den Druckpeak beim Versagen des RDB versagen weitere Berstfolien und die Konvektion wird besser, so dass alle Reko's besser arbeiten zu können.

Abb. 4.3-23 zeigt wieder eine exemplarische Auswahl der Dreistoffdiagramme für verschiedene Räume. Aus Gründen der Vergleichbarkeit sind dieselben Räume wie schon im ND-Fall für die Darstellung herangezogen worden. Bei den dargestellten Räumen wird die Zündgrenze nur in R67A geringfügig für Verbrennungen in Aufwärtsrichtung und in RSUA auch geringfügig für Verbrennungen in Abwärtsrichtung überschritten. Aus Abb. 4.3-19 wird ersichtlich, dass auch Räume benachbart zu R67A kurzzeitig brennbare Zustände aufzeigen. Bei der Durchsicht aller Dreistoffdiagramme fiel auf, dass außerhalb der Anlagenräume nur für eine sehr kurze Zeit D24A, und bedingt durch die Kondensation des Wasserdampfs die Aufzugsräume (R64u, R64m, R64oi/R64oo und R65) brennbare Bedingungen aufwiesen. Der oben beschriebene Anstieg der H_2 -Konzentration ab 160000 s in z.B. R52A erzeugt keine brennbaren Zustände, da der Sauerstoffgehalt in der Anlage zu diesem Zeitpunkt nur noch gering ist (siehe auch Abb. 4.3-22 und Abb. 4.3-23).

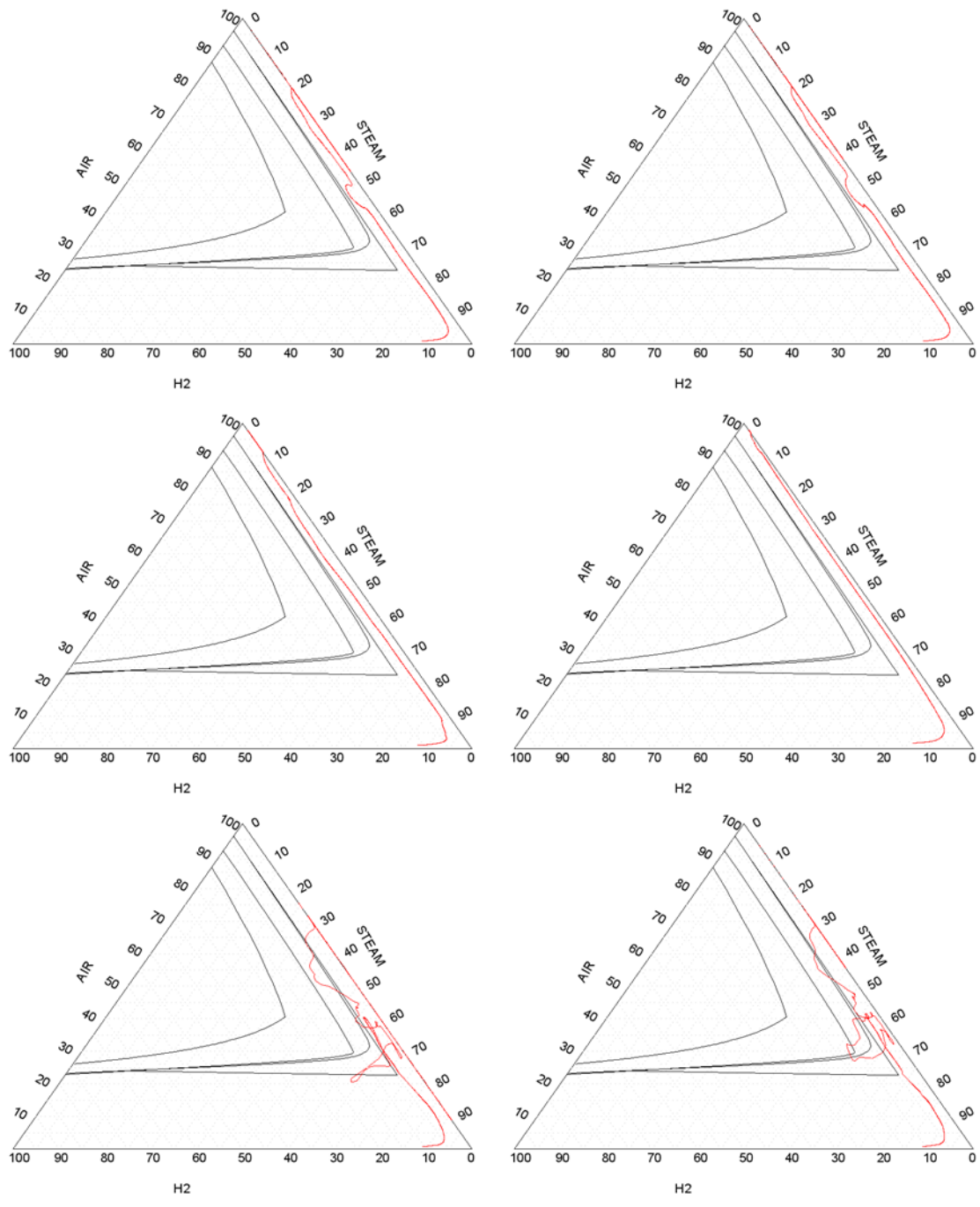


Abb. 4.3-23 Dreistoffdiagramme für den SBL-Fall; von oben links, nach unten rechts:
D110, D12A, R73A, R52A, R67A, RSUA

4.3.5 MBL-Fall

Das MBL-Szenario ist das zweite der beiden neuen Szenarien, die analysiert wurden. Auch in diesem Fall arbeitet die Notkühlein speisung zunächst auslegungsgemäß, fällt dann aber beim Umschalten auf Sumpfbetrieb, nachdem die Flutbecken leer sind, aus (Annahme der Analyse). Dadurch kommt es nachfolgend zum Verlust der Kernkühlung und zum Kernschmelzen. In der MELCOR-Analyse, von der die Daten stammen /SON 01/, wurde wiederum die Lüftungsspinne im Fundamentbereich der Reaktorgrube simuliert, sodass es wie im SBL-Fall innerhalb einer kürzeren Zeitspanne als in den beiden ersten beschriebenen Fällen (ND* und ND) zum Kontakt von Schmelze mit Sumpfwasser kommt.

Mit Auftreten des mittleren Lecks von 200 cm² im heißen Strang des mit dem DH verbundenen Loops entstehen durch den anfänglichen Druckpeak größere Verbindungen durch das Versagen von Berstelementen in den beiden Dampferzeugertürmen zum Dom. Diese sind je 3,5 m² groß in beiden DE-Türmen (R21Ai -> D24A, R21Ao -> D23A, R21Ci -> D24C, R21Co -> D23C). Dadurch bildet sich eine große Konvektionsschleife aus, die aus dem DE-Turm A oberhalb des Lecks in den Dom führt und zurück aus dem Dom durch den DE-Turm C in die Anlagenräume. Diese Schleife besteht während des gesamten Unfallablaufs. Die Türen oder andere Berstelemente im Trümmerschutzzylinder bleiben auch in diesem Fall geschlossen.

Der in Abb. 4.3-24 dargestellte Verlauf des SHB-Drucks spiegelt den Unfallablauf wider. Nach einem starken Druckanstieg auf fast 3 bar in Folge des Lecks fällt der Druck durch den Eintrag kalten Wassers aus dem Leck ab, bevor er während der Kernzerstörungsphase wieder ansteigt. Nach RDB-Versagen fällt der Druck ab, bis er nach dem Versagen des biologischen Schildes wieder ansteigt, bedingt durch die anhaltende Schmelze-Sumpfwasser-Wechselwirkung. Die Rechnung wurde beendet, bevor das SHB-Venting erforderlich würde.

Beim Auftreten des Lecks steigen auch die Temperaturen kurzzeitig auf bis zu 170 °C an (in Abb. 4.3-25 nahe Zeit 0 s). Durch die Not- und Nachkühlsysteme wird dann zunächst kaltes Wasser in den SHB freigesetzt, was man auch deutlich an der Entwicklung der Temperaturen (Abb. 4.3-25) innerhalb des SHB sieht. In diesem Szenario sind, bedingt durch die Größe des Lecks, die Flutbecken schon nach 5900 s erschöpft. Aufgrund der mit beginnender Kernaufheizung freigesetzten sehr heißen Gase (ab

18500 s) steigen die Temperaturen erneut an. Der Wassereinbruch in die Reaktorgrube nach dem Versagen des biologischen Schildes in Richtung Lüftungsspinne (bei 48600 s), der zur starken Wasserdampfproduktion beim Kontakt des Wassers mit der Schmelze führt, sorgt dann für ein vorläufiges Maximum.

Die Freisetzung von Wasserstoff erreicht zwischen 21000 s und 23000 s ihr Maximum. In dieser Zeitspanne werden 375 kg Wasserstoff freigesetzt. Diesen Peak kann man auch in den H₂-Konzentrationen in den Anlagenräumen (Abb. 4.3-26) und im Dom (Abb. 4.3-27) erkennen. In den Räumen hinter dem Trümmerschut (Peripherie) lässt sich wieder ein langsames Aufkonzentrieren des Wasserstoffs beobachten, da die Konvektion durch die geschlossenen Verbindungen über den Trümmerschutzzylinder (außer angesetzter Türleckagen) behindert ist. Ab 80000 s steigt die H₂-Konzentration langfristig an, da der Sauerstoff aufgebraucht ist.

Der Verlauf der in Abb. 4.3-28 dargestellten durch Reko's abgebauten Sauerstoffmenge ist relativ gleichmäßig. Ca. 20500 s nach Beginn des Unfalls beginnen die Reko's mit dem Abbau des Wasserstoffs und ab ca. 80000 s beginnt die Sauerstoffkonzentration den weiteren Abbau zu beschränken.

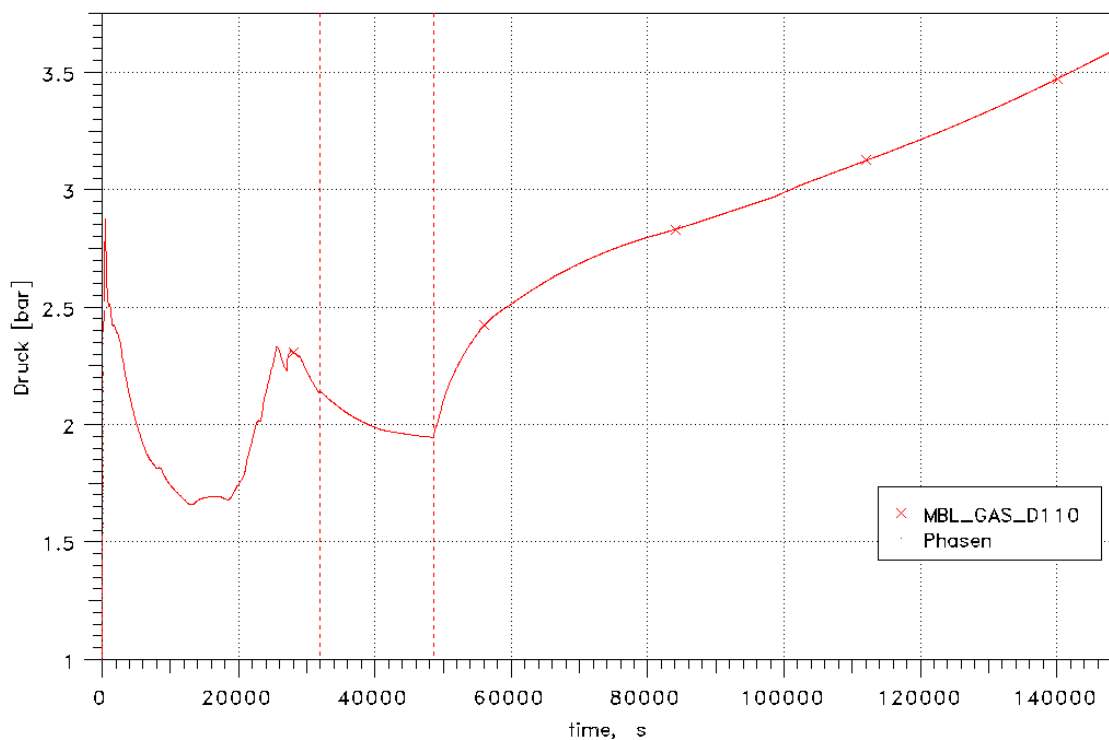


Abb. 4.3-24 MBL-Fall, Entwicklung des SHB-Drucks

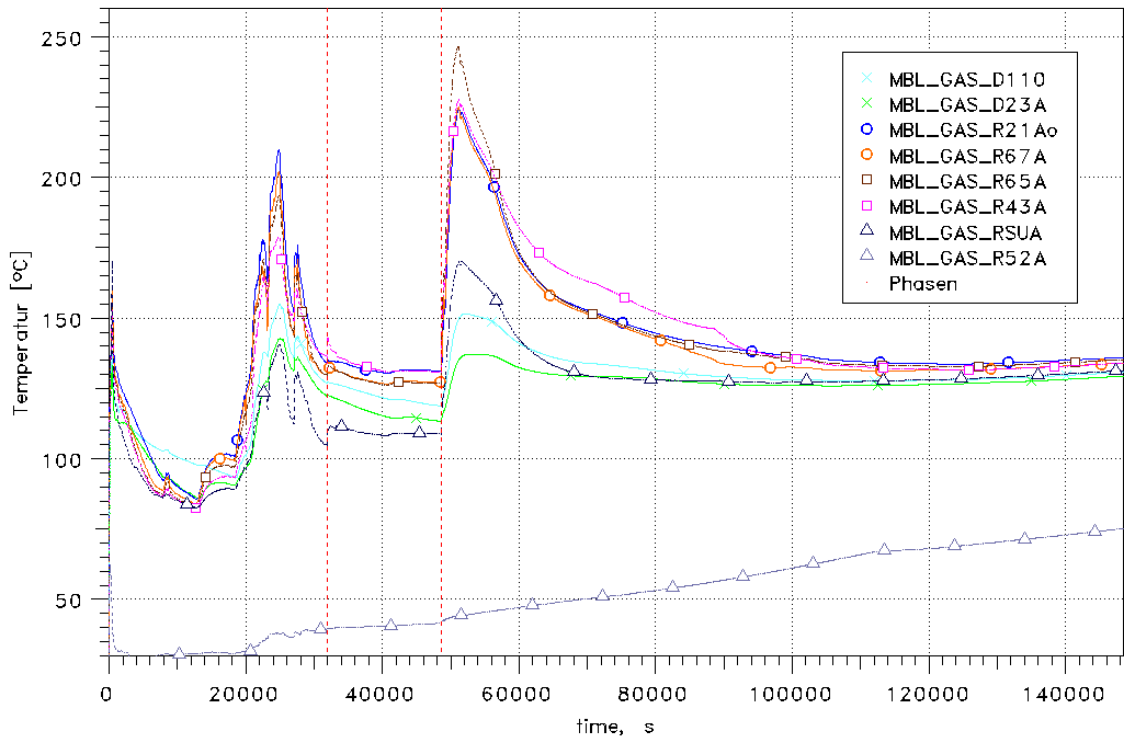


Abb. 4.3-25 MBL-Fall, Temperaturverlauf für ausgewählte Zonen in verschiedenen Höhen

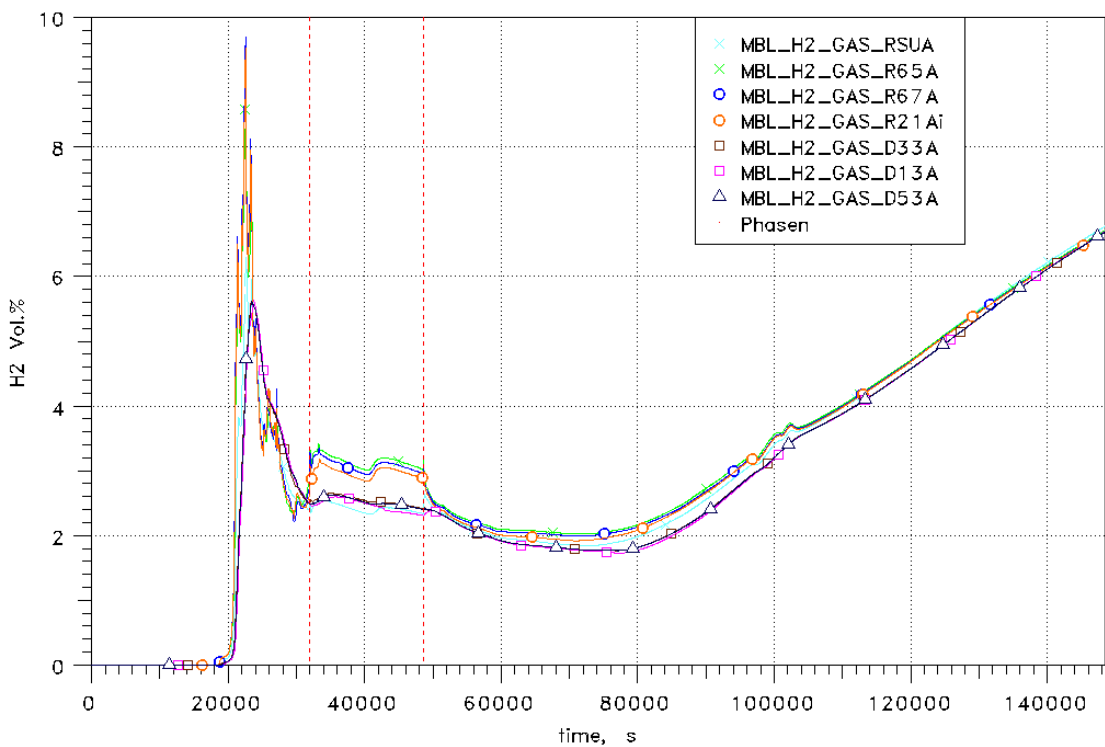


Abb. 4.3-26 MBL-Fall, H₂-Konzentration innerhalb der Anlagenräume und im Dom

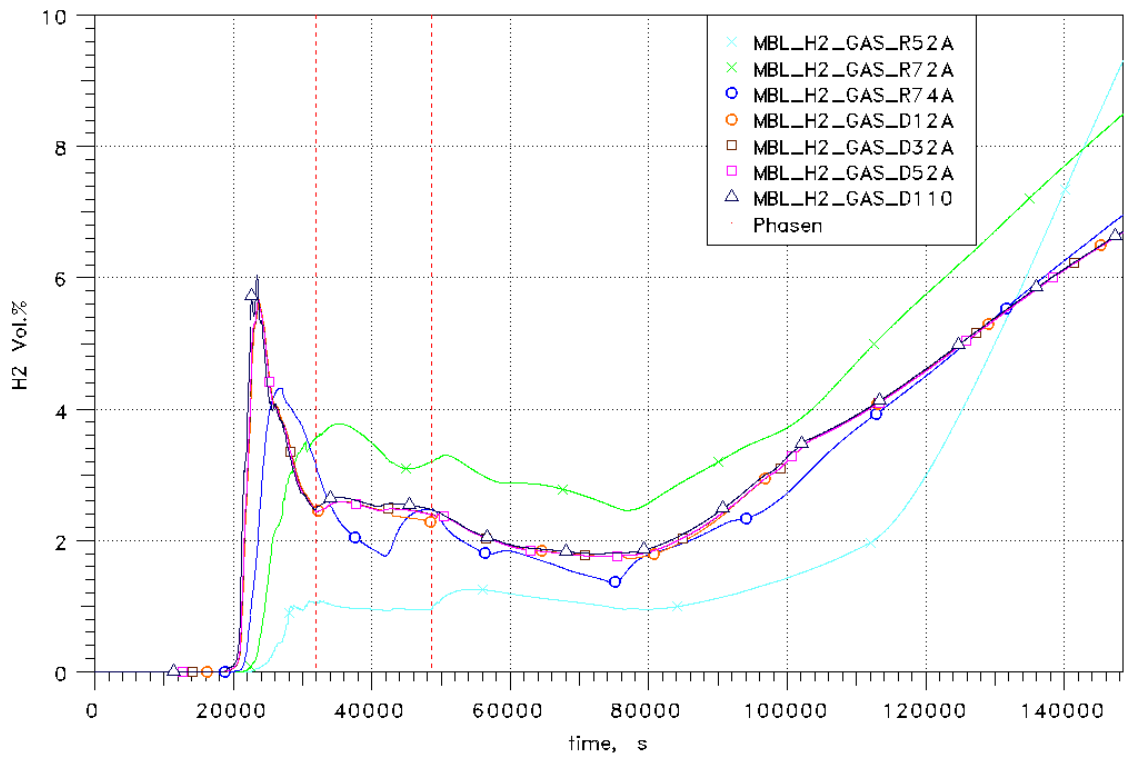


Abb. 4.3-27 MBL-Fall, H₂-Konzentration im Dom und in den Räumen hinter dem Trümmerschut

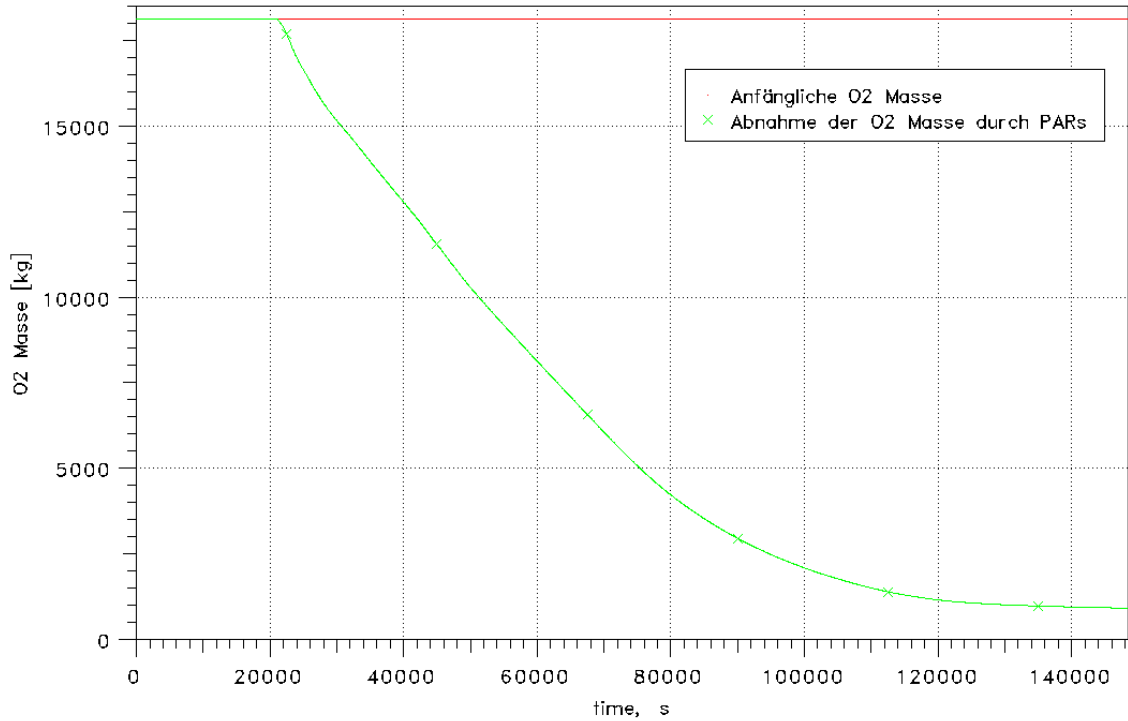


Abb. 4.3-28 MBL-Fall, Abbau des Sauerstoffs durch die Reko's

Die Analyse der Brennbarkeit zeigt die in allen hier untersuchten Szenarien größte Anzahl von Zonen, in denen eine Deflagration möglich ist. Dies liegt an der vglw. trockenen Atmosphäre (Kondensation des Dampfes in den Anlagenräumen während des Austrages von kaltem Wasser aus dem Leck im RKL bei der Einspeisung mit den Notkühlsystemen) und der anfänglich schnellen Freisetzung des Wasserstoffs (relativ hohe Freisetzungsrates). Besonderes Augenmerk muss vor allem auf die Tatsache gerichtet werden, dass auch eine erhöhte Anzahl von Zonen im Dom den Dreistoffdiagrammen zufolge brennbar werden. 52 Zonen über dem Beckenflur im Dombereich sind in der Lage eine Wasserstoffverbrennung zu erfahren (D06oA, D06oC, D102A, D102C, D104A, D104C, D110, D12A, D12C, D13A, D13C, D22A, D22C, D23A, D23C, D24A, D24C, D32A, D32C, D33A, D33C, D34A, D34C, D42A, D42C, D43A, D43C, D44A, D44C, D52A, D52C, D53A, D53C, D54A, D54C, D62A, D62C, D64A, D64C, D72A, D72C, D74A, D74C, D82A, D82C, D84A, D84C, D92A, D92C, D94A und D94C). Die hohe Zonenanzahl ist bedingt durch die feine Unterteilung des Doms in der gewählten Nodalisation, d.h. trotz allem ist nur ein Teil des Doms betroffen - i.d.R. die Plumezonen. Dabei wird allerdings nur die Zündgrenze für aufwärtsgerichtete und horizontale Verbrennungen überschritten und meist nur in sehr geringem Maße, so dass nur kleine Flammfrontgeschwindigkeiten zu erwarten sind.

In Abb. 4.3-29 sind aus Gründen der Vergleichbarkeit der Fälle wieder die Dreistoffdiagramme für die gleichen Räume dargestellt. In R67A sowie den angrenzenden Räumen in der Nähe des Lecks werden alle Verbrennungsgrenzen (aufwärts, horizontal, abwärts) deutlich überschritten. In D110 und D12A, sowie in RSUA werden die Zündgrenzen nur für aufwärtsgerichtete und horizontale Verbrennungen geringfügig überschritten. Die Analyse der Dreistoffdiagramme weiterer Räume zeigt, dass außerdem in R12B sowie in den angrenzenden unteren Anlagenräumen kurzzeitig auch die Verbrennungsgrenzen überschritten werden.

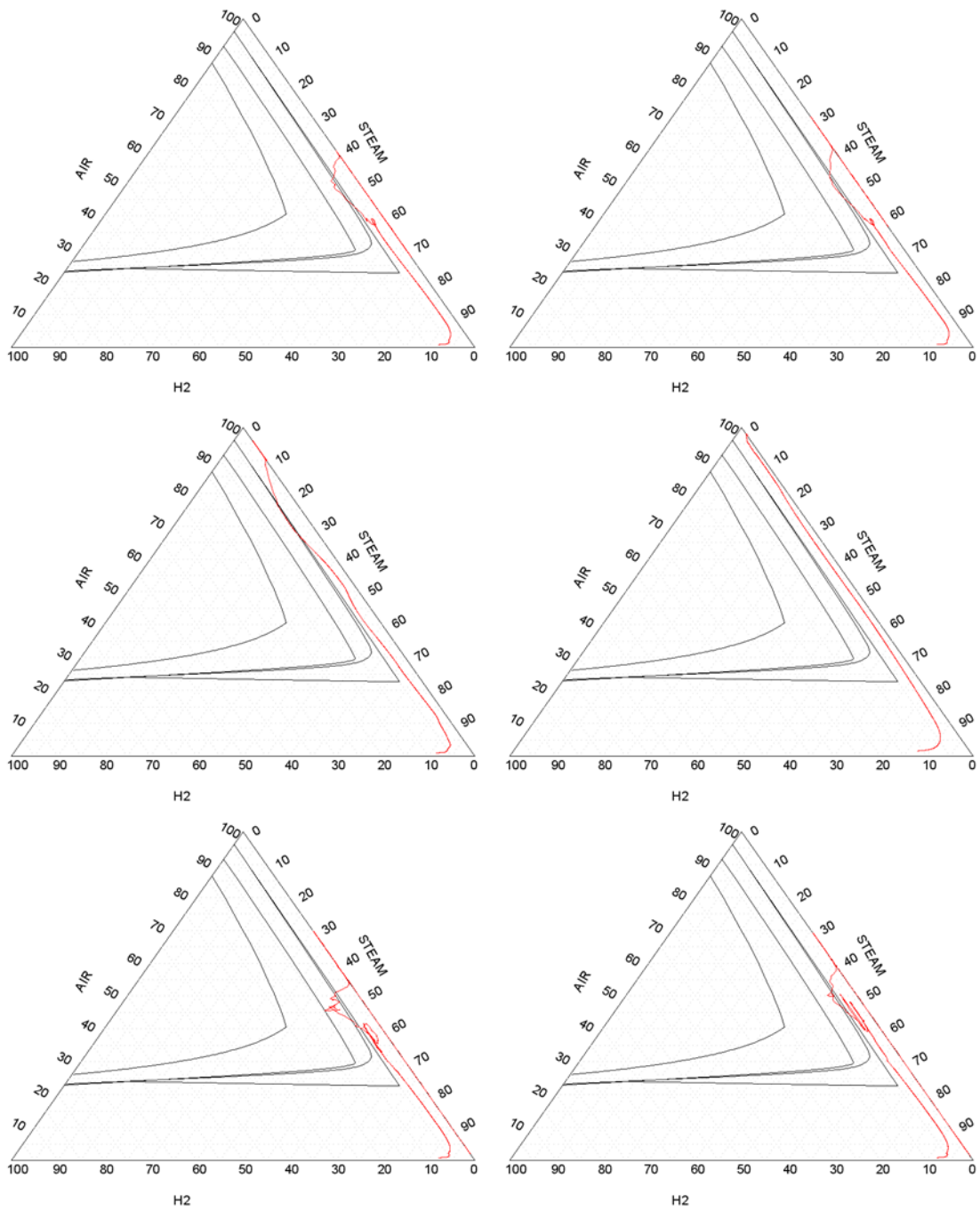


Abb. 4.3-29 Dreistoffdiagramme für den MBL-Fall; von oben links, nach unten rechts:
D110, D12A, R73A, R52A, R67A, RSUA

4.4 Rechnungen ohne (dynamische) Aerosolsimulation und mit H₂-Verbrennung mit Reko's als Zündquelle

4.4.1 Darstellung der Ergebnisse mit H₂-Verbrennung

Um die möglichen Auswirkungen von H₂-Verbrennungen zu untersuchen sind zwei Arten von Rechnungen durchgeführt worden:

1. Reko als Zündquelle: Die Zonen, in denen Reko's aufgestellt sind, wurden als Zonen, in denen eine Verbrennung starten kann, d.h. eine Zündquelle angenommen wurde, angegeben. Die Zündkriterien wurden in einem Bereich variiert, der sich aus den Versuchen an der THAI-Anlage für Reko's der Firma AREVA ergab. Dort wurden Reko's als mögliche Zündquellen bei höheren H₂-Konzentrationen (8 Vol.% bis 10 Vol.%) identifiziert /KAN 10/. Zusätzlich wurde immer in COCOSYS auch abgefragt, ob in dem entsprechenden Zündraum auch keine Dampf inertisierung zum Zündzeitpunkt vorliegt.
2. Ungünstigster Zündzeitpunkt (worst case): Es wurde abgeschätzt, in welcher Zone zu welchem Zeitpunkt eine Zündung gestartet werden müsste, damit die „schwerwiegendsten Auswirkungen“ (zu erwartender stärkster Druck- und/oder Temperaturanstieg als Folge der Verbrennung) auftreten würde, d.h. die Verbrennung sich also über das größte Volumen (größte Anzahl von Zonen) ausbreiten würde und somit auch die größte Menge an Wasserstoff verbrannt würde. Auch eine mögliche Flammenpropagation in Bereiche, die nahe der SHB-Schale liegen, wurde in die Betrachtung einbezogen. Diese Analysen sind im Sinne einer pessimistischen Betrachtungsweise anzusehen. Konkrete Annahmen über die Zündquelle wurden dabei nicht getroffen, d.h. es wurde unterstellt, dass diese vorhanden sei. Zusätzlich wurde immer in COCOSYS auch abgefragt, ob in dem entsprechenden Zündraum auch keine Dampf inertisierung zum Zündzeitpunkt vorliegt.

Bei den H₂-Verbrennungen handelt es sich je nach Gaszusammensetzung teilweise um hochdynamische Prozesse; daher ist die Darstellung der Flammenausbreitung im Ergebnis der COCOSYS-Rechnung etwas aufwendig. Zur Verdeutlichung des Verbrennungsprozesses wurde eine Kombination aus graphischer Darstellung und Tabelle gewählt. Die graphische Darstellung erfolgt mittels dreier Schnitte des SHB mit eingezeichneter COCOSYS-Nodalisation, dem B-B Schnitt (oben in Abb. 4.4-2 z.B.), dem D-

D Schnitt (unten in Abb. 4.4-2 z.B.) sowie einem weiteren horizontalen Schnitt je nach Notwendigkeit der Aussage (in der Mitte in Abb. 4.4-2 z.B.). Die Wahl dieser Schnitte erlaubt es, sämtliche Anlagenräume, beide Plumes und fast alle großen offenen Räume (Ausnahmen: Deckelabstellplatz (D06oA, D06oC) und das Brennelementlagerbecken (D05)) im Dombereich des SHB auf diesen beiden Schnitten darzustellen. Das Fortschreiten der Verbrennung wird durch rote Zahlen in den betroffenen Zonen entsprechend der Zündreihenfolge dargestellt. Bereiche die von der Verbrennung nicht erfasst werden, sind abgedunkelt dargestellt, erfasste Bereiche hell und rot umrandet eingezeichnet.

Zusätzlich wurde der zeitliche Ablauf der Verbrennungen in Tabellenform erfasst und bilanziert (siehe z.B. Tab. 4.4-1). Grün markierte Zonen in der ersten Spalte der Tabellen stehen für Zonen, in denen eine Verbrennung anfang. Die nächsten beiden Spalten geben jeweils den Startzeitpunkt und das Ende der Verbrennung in einer Zone an. Angaben zum Verlauf der Flammenfrontpropagation sind in den Abbildungen enthalten. Die Spalte Bilanz gibt integrale Werte zur verbrannten H_2 -Masse und der dabei freigesetzten Energie an, die während des der Verbrennung nachfolgenden nächsten¹⁰ „COCOSYS print out“ ausgeschrieben wurden. In einzelnen Zonen (gelb markiert) kam es erst nach einer ungewöhnlich langen Zeit zum Erlöschen der Verbrennung. Dies ist auf noch vorhandene Defizite im Verbrennungsmodell zurückzuführen, was aber keine nennenswerten Einflüsse auf die generelle Aussage hat.

4.4.2 Durchgeführte Analysen mit Reko's als Zündquelle

Aus Versuchen an der THAI-Anlage ist bekannt, dass die Zündung durch AREVA-Reko's im Bereich zwischen 8 Vol.% und 10 Vol.% Wasserstoff erfolgt. Daher wurden für jedes der Szenarien zunächst vier Rechnungen durchgeführt:

- a. Analyse mit einer Zündung bei 8 Vol.% H_2 ,
- b. Analyse mit einer Zündung bei 7,5 Vol.% H_2 , um eine Vorstellung zu erhalten, inwiefern ein Zündung bei einer niedrigeren Konzentrationen kritischer sein könnte,
- c. Analyse mit einer Zündung bei 9 Vol.% H_2 und

¹⁰ COCOSYS schreibt in regelmäßigen Abständen (nach einer gewissen Zahl von Zeitschritten) alle Parameter sehr detailliert als Text in eine Datei. Darunter sind auch Angaben zur Gesamtbilanz.

d. Analyse mit einer Zündung bei 10 Vol.% H₂.

Zusätzlich wurde ein Set von Rechnungen durchgeführt, in denen neben den Reko's (bei 8 Vol.%) auch eine Selbstentzündung des extrem heißen Gasgemisches in der Reaktorgrube bzw. im RDB-Stutzenraum (in diesen Zonen ab 6 Vol.%) zugelassen wurde.

In weiteren Rechnungen wurde angenommen, dass die Zündung in einer Zone mit Reko erfolgt, sobald die Zündgrenze für aufwärtsgerichtet Verbrennung überschritten ist, also bei 4 bis 5 Vol.% H₂. Die Auswertung dieser Analysen zeigte die Ausbildung „stehender Flammen“ über einen längeren Zeitbereich nahe des Lecks im Bereich der Hauptkühlmittelpumpen, ein Vorgang der eher unrealistisch ist. Dieses hängt mit noch vorhandenen Einschränkungen des Verbrennungsmodells in COCOSYS zusammen und die Ergebnisse wurden verworfen.

Wie bereits erwähnt wurde immer in COCOSYS auch abgefragt, ob in dem entsprechenden Zündraum brennbare Gasgemische vorliegen, d.h. auch keine Dampfinsertierung zum Zündzeitpunkt.

4.4.3 ND*-Fall

In keiner der Rechnungen, bei der ausschließlich die Reko's als Zündquelle dienen sollen, kommt es zu einer Verbrennung. Dieses Ergebnis hat sich aus den Rechnungen ohne Verbrennung (siehe Kap. 4.3.2) bereits angedeutet.

Wird die Möglichkeit einer Zündung in der Reaktorgrube bzw. im RDB-Stutzenraum bei 6 Vol.% Wasserstoff unterstellt, so kommt es in diesen Bereichen immer wieder zu Zündungen (307 mal), wobei der größte Teil dieser Verbrennungen weniger als eine Sekunde andauert. Insgesamt werden dadurch 63 kg Wasserstoff verbrannt und 9 GJ Energie freigesetzt. Wie in Abb. 4.4-1 zu sehen ist, hat diese Art der Verbrennung nur einen geringen Einfluss auf den Abbau des Wasserstoffs/Sauerstoffs. Es gibt nur einen vernachlässigbaren Unterschied zur Rechnung ohne Verbrennung, in der der Sauerstoff nur durch die Reko's verbraucht wird. Auf eine weitere Auswertung wurde daher verzichtet.

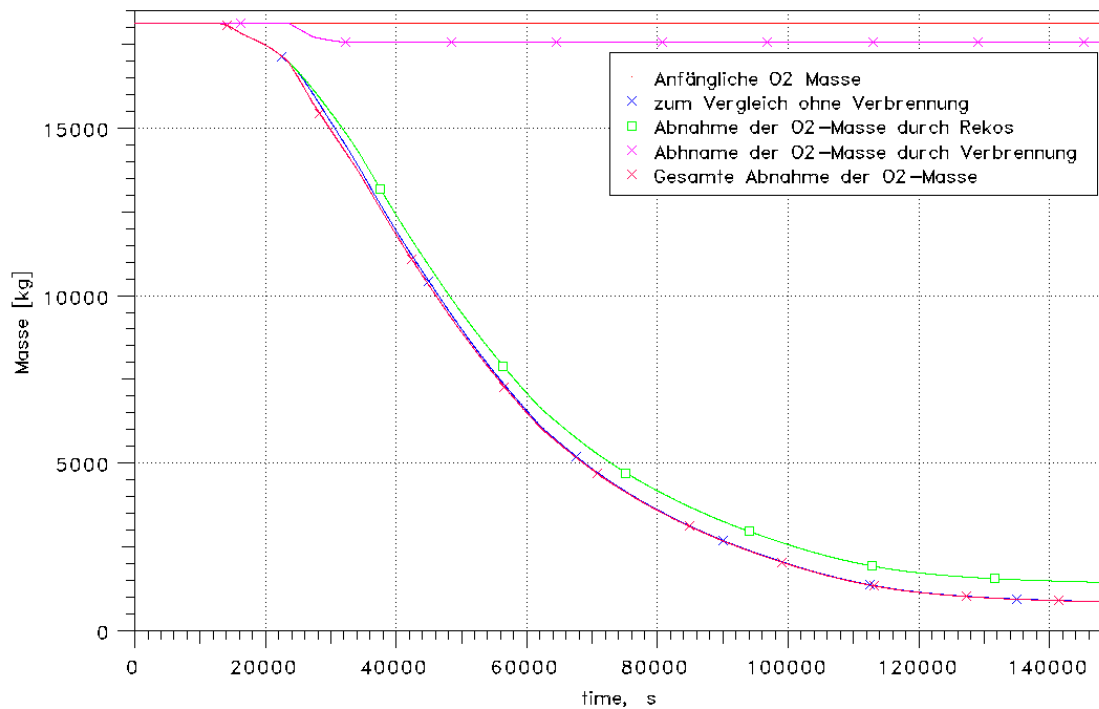


Abb. 4.4-1 ND*-Fall, Sauerstoffverbrauch durch Verbrennungen in Reaktorgrube oder RDB-Stutzenraum im Vergleich zur Rechnung ohne Verbrennung

4.4.4 ND-Fall

Die Rechnung mit einer Wasserstoffentzündungen an den Reko's ab einer H₂-Konzentration von 8 Vol.% haben im ND-Szenario einen Verbrennungsvorgang ergeben, bei dem in drei Zonen nahezu zeitgleich Verbrennungen bei 5928,5 s starten. Dies liegt in einem Zeitbereich einer sehr starken Wasserstoff- und auch Dampf freisetzung aus dem Primärkreis. Die Zeitpunkte der einzelnen Entzündungen sind in Tab. 4.4-1 angegeben. Die grün unterlegten Zonen sind Zonen, in denen eine Verbrennung begann. Zone R13A ist dabei mehrfach als Zündquelle aufgeführt, da es dort zu wiederholten Entzündungen am Reko kommt. Die Reihenfolge der Zonen in der Tabelle, entspricht der zeitlichen Reihenfolge in der die Zonen entzündet werden, wobei die Flamme, die eine Zone entzündet, nicht unbedingt die Zone in der darüberstehenden Tabellenzeile sein muss, da 3 zeitgleiche Zündungen erfolgten.

Die „langsame“ Propagation der Flammen durch den SHB ist den sehr großen Querschnitten der Verbindungen geschuldet. Die Propagation der Flamme in dieser Rechnung ist trotzdem noch schneller, als es anhand der entsprechenden THAI-Versuche zu erwarten wäre. Das kommt auch daher, dass die Propagation eine Summe aus der Atmosphärgeschwindigkeit und der Geschwindigkeit der Flammenfront ist. Die einzi-

gen engen Verbindungen, die zu einer weiteren Beschleunigung der Flamme führen könnten, sind die Öffnungen der Berstelemente in den Decken der Dampferzeugertürme. Allerdings haben bei diesem Szenarium wie in Kap. 4.3.3 beschrieben eine große Anzahl von Berstfolien versagt, so dass eine Flammenpropagation in der Form „Jet-Ignition“ ausgeschlossen werden kann, unabhängig davon, ob im Dom brennbare Bedingungen vorliegen. In dieser Analyse zeigt sich, dass im Dombereich auch nur in wenigen COCOSYS-Zonen brennbare Zustände vorliegen.

Tab. 4.4-1 Zeitliche Entwicklung und Bilanz der Verbrennungsrechnung mit Zündung an den Reko's bei 8 Vol.% H₂ (ND-Fall)

Zone	zündet bei [s]	erlischt bei [s]	Dauer [s]	Bilanz
R13A	5928,5	5929,7	1,3	Durch die Verbrennung von insgesamt 425 kg Wasserstoff wurden 64 GJ Energie s freigesetzt. Bis zum Zeitpunkt 6511,1s wurden 253 kg Wasserstoff verbrannt, wobei 30 GJ Energie freigesetzt wurden.
R65B	5928,5	6078,8	150,3	
R66B	5928,7	5977,1	48,4	
R14A	5929,3	6056,6	127,3	
R67B	5929,5	5959,3	29,8	
R15A	5929,7	5972,2	42,5	
R20Ai	5930,6	5957,1	26,5	
R20Ao	5930,6	5957,5	26,9	
R80H	5931,0	5944,1	13,1	
R65A	5931,2	5949,7	18,5	
R21Ao	5931,8	5952,3	20,5	
R66C	5931,9	5996,6	64,8	
R13A	5931,9	5933,9	2,0	
R21Ai	5932,0	5950,8	18,8	
D23A	5932,2	6200,5	268,3	
R66A	5932,3	5941,2	9,0	
D24A	5932,4	5945,6	13,3	
D34A	5932,7	6163,6	230,9	
D44A	5933,2	6135,9	202,7	
D54A	5933,7	6134,1	200,3	
D64A	5934,3	6133,1	198,8	
D74A	5935,0	76022,6	70087,6	
R67A	5935,7	5949,1	13,4	
R13A	5937,9	5940,9	3,0	
R82B	5938,0	5948,5	10,5	

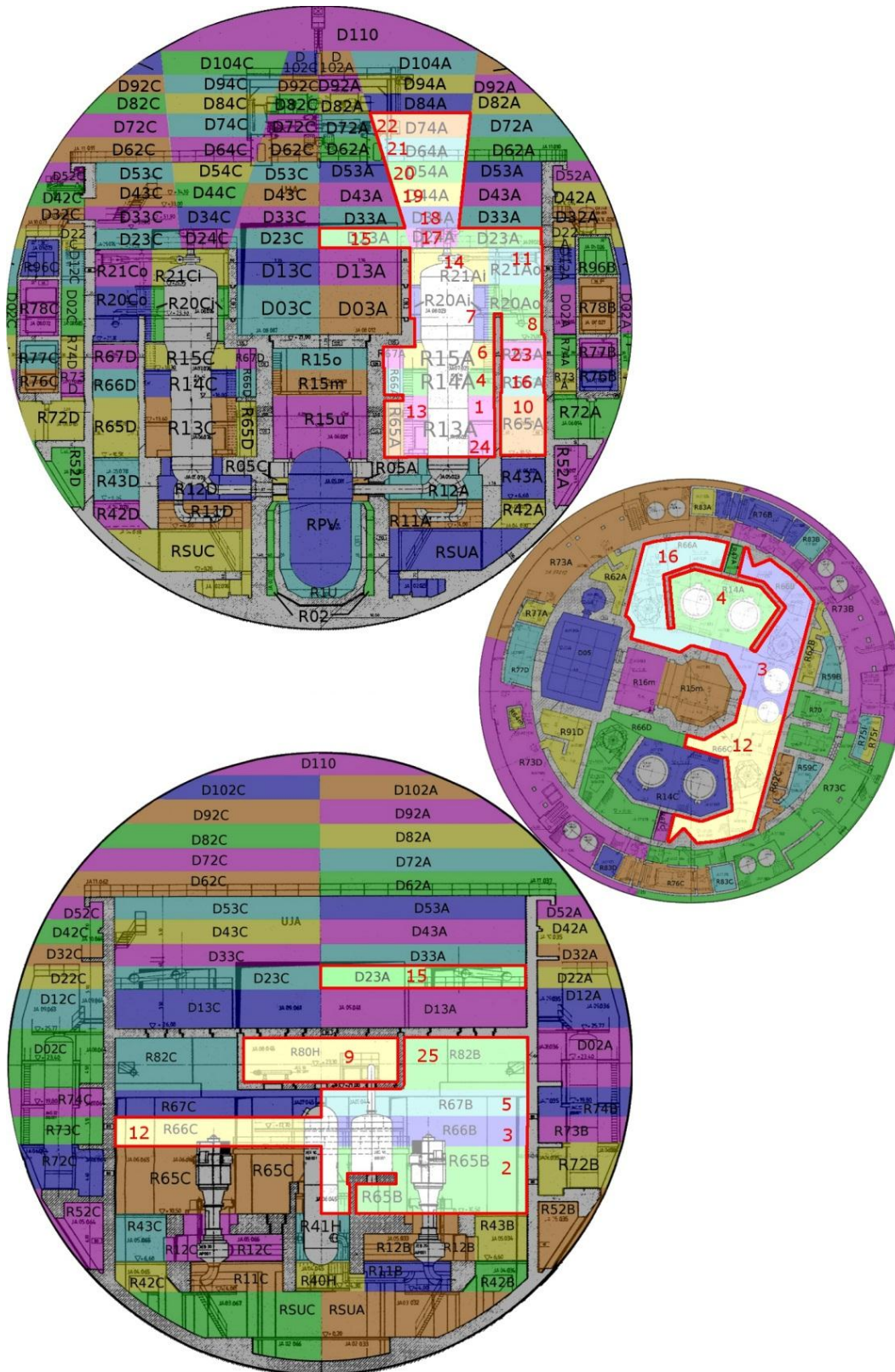


Abb. 4.4-2 Veranschaulichung der Verbrennung mit Reko als Zündquelle (8 Vol.% H₂) für den ND-Fall

Die lang anhaltende Wasserstoffverbrennung in der COCOSYS-Zone D74A (fast 19,5 h) ist unrealistisch. Sie tritt auch in den anderen ND-Verbrennungsrechnungen nicht auf. Aus diesem Grund ist die Bilanz der Verbrennung in Tab. 4.4-1 auch bis zum Zeitpunkt 6511,1 s angegeben.¹¹ Das zugrunde liegende Modell der Verbrennung in COCOSYS verwendet nur zur Entzündung das Dreistoffdiagramm, zum Erlöschen existiert kein entsprechendes Modell. Daher muss der Anwender Wasserstoff- und Sauerstoffkonzentrationen, bei denen die Verbrennung erlischt, von Hand für alle Zonen identisch vorgeben. Gewählt wurden jeweils 0,2 Vol.%.

In Abb. 4.4-2 sind die Zonen, in der es zu einer Verbrennung kommt hervorgehoben und mit Nummern in der Reihenfolge der Entzündung dargestellt. Die Verbrennung erfasst nur einen kleinen Teil der Anlagenräume und propagiert entlang der Plumezonen in den Dom, erreicht aber nicht die an die SHB-Schale angrenzenden Zonen. Weitere Zonen, die seitlich oder oberhalb an den Verbrennungsbereich angrenzen, werden von der Verbrennung nicht erfasst, weil ihre H₂-Konzentrationen kleiner als 4 bis 5 Vol.% sind (Flammenausbreitungskriterien). Darunterliegende Zonen werden auch nicht erfasst, wenn 9 bis 10 Vol.% Wasserstoff nicht überschritten sind (Flammenausbreitungskriterium).

Wird die zur Entzündung notwendige H₂-Konzentration auf 7,5 Vol.% reduziert, so verläuft die Verbrennung relativ ähnlich, insgesamt propagiert die Flamme nicht so weit (es wird nur die unterste Plumezone entzündet). Auch ist die Reihenfolge der Zündung etwas anders, da in dieser Rechnung R66B aus R65B entzündet werden muss.

Der Druck steigt aufgrund der Verbrennung um ca. 0,3 bar gegenüber der Rechnung ohne Verbrennung (siehe Abb. 4.4-3) an. Es kommt dadurch aber nicht zum Versagen weiterer Berstelemente. Dass der Druckanstieg so gering ausfällt, liegt hauptsächlich an zwei Faktoren: (1) Es werden bei weitem nicht alle Zonen erfasst, d.h. es gibt große Volumina, die die Expansion des Gases „auffangen“ können. (2) Die Verbrennung läuft insgesamt relativ langsam ab, was bei den niedrigen H₂-Konzentrationen in Kombination mit hohen Dampfkonzentrationen auch zu erwarten ist. Die vergleichsweise hohen Druckanstiege bei verschiedenen Experimenten treten vor allem deshalb auf, weil fast das gesamte Gasvolumen der Versuchsbehälter an der Verbrennung teilnimmt.

¹¹ Nächster Zeitpunkt einer COCOSYS-Ausgabe von Werten in Textform nach Ende der anfänglichen Verbrennung.

Die Verbrennung setzt innerhalb kurzer Zeit etwa 200 kg Sauerstoff um (Abb. 4.4-4). Das ist wenig im Vergleich zum langfristigen Verbrauch durch die Reko's. Somit nähern sich die im SHB enthaltenen Sauerstoffmassen der Rechnungen mit und ohne Verbrennung bald wieder an. In Abb. 4.4-4 ist auch die rampenförmige Abnahme der Sauerstoffmasse aufgrund der als unrealistisch anzusehenden langanhaltenden Verbrennung in der Domzone D74A zu sehen. Der langfristige Druckverlauf wird davon nur unwesentlich beeinflusst (Abb. 4.4-3).

Werden zusätzlich zu der Verbrennung initiiert durch Reko's bei 8 Vol.% Verbrennungen in der Reaktorgrube simuliert, so hat dies einen relativ geringen Einfluss auf den Unfallablauf. Die Abweichung in der bis 6520 s umgesetzten Wasserstoffmenge beträgt nur 0,5 %. Auch die Reihenfolge und Entzündung der Zonen ist fast identisch (zumindest im Bereich ohne die Reaktorgrube).

Wird die Zündgrenze der Reko's auf 9 Vol.% Wasserstoff erhöht, verändert sich die Reihenfolge der Entzündungen und zusätzlich werden die Zonen R43B, R12B, R20Co, R67C und R15o entzündet. Eine weitere Erhöhung der Zündgrenze auf 10 Vol.% führt auch wieder nur zu einer minimalen Änderung gegenüber dem Fall mit 8 Vol.%. Die Flamme propagiert bis in Zone D84A im Plume und D33A im Dom. Zusätzlich werden auch R67C, R15o, R20Co und R43B gegenüber der Rechnung mit Zündgrenzen bei 8 Vol.% entzündet. In keinem der Fälle erreicht die Flamme Zonen nahe der SHB-Schale.

Vergleicht man die Druckentwicklungen der verschiedenen Verbrennungsrechnungen (Abb. 4.4-5), so sieht man, dass die Unterschiede eher gering ausfallen. Die höchste Druckspitze wird bei einer Verbrennung bei 8 Vol.% erreicht, wobei die Zusatzbedingung mit Zündung in der Reaktorgrube nur einen etwas geringeren maximalen Druck ergeben. Dies liegt wohl an der geringeren Wasserstoffmasse in der Startzone. Insgesamt fällt der Druckanstieg, mit ca. 0,35 bar eher gering aus. Vor allem durch den zu diesem Zeitpunkt noch relativ niedrigen Druck im SHB besteht aufgrund des Druckpeaks keinerlei Gefahr für die SHB-Integrität. Nach etwa 1000 s ist der Druck wieder in die Nähe des Druckes ohne Verbrennung gesunken.

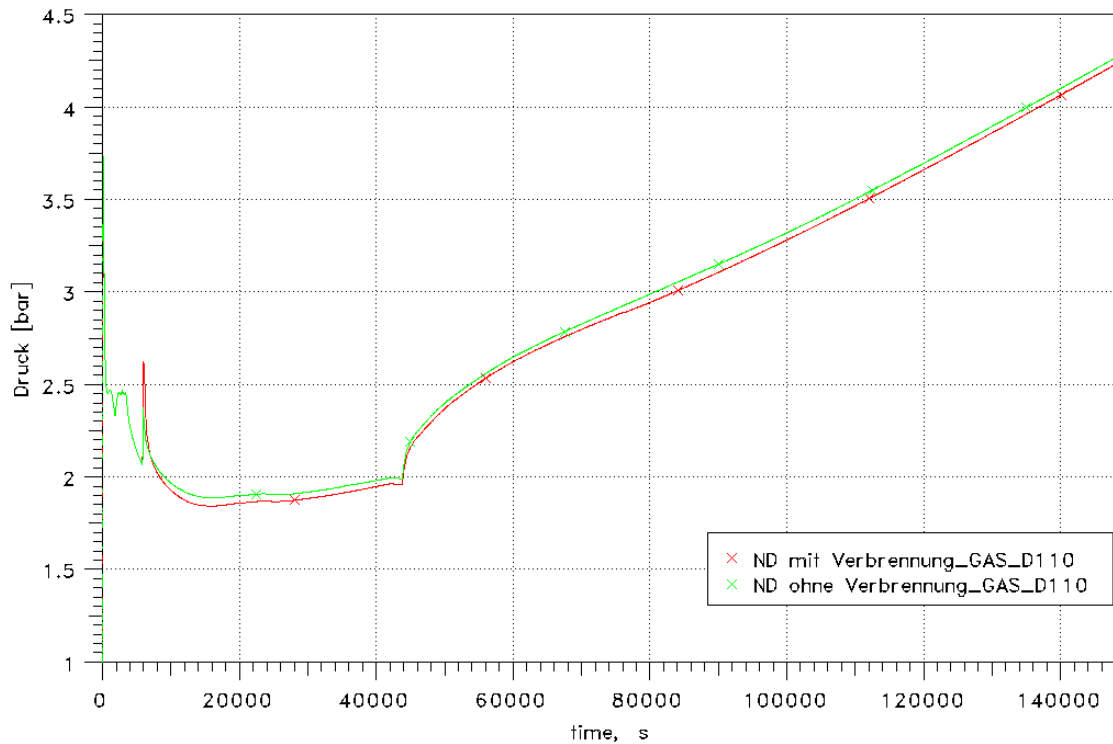


Abb. 4.4-3 ND-Fall, Druckverlauf bei an Reko's gezündeten Verbrennungen (8 Vol.% H₂) im Vergleich zum Basisfall

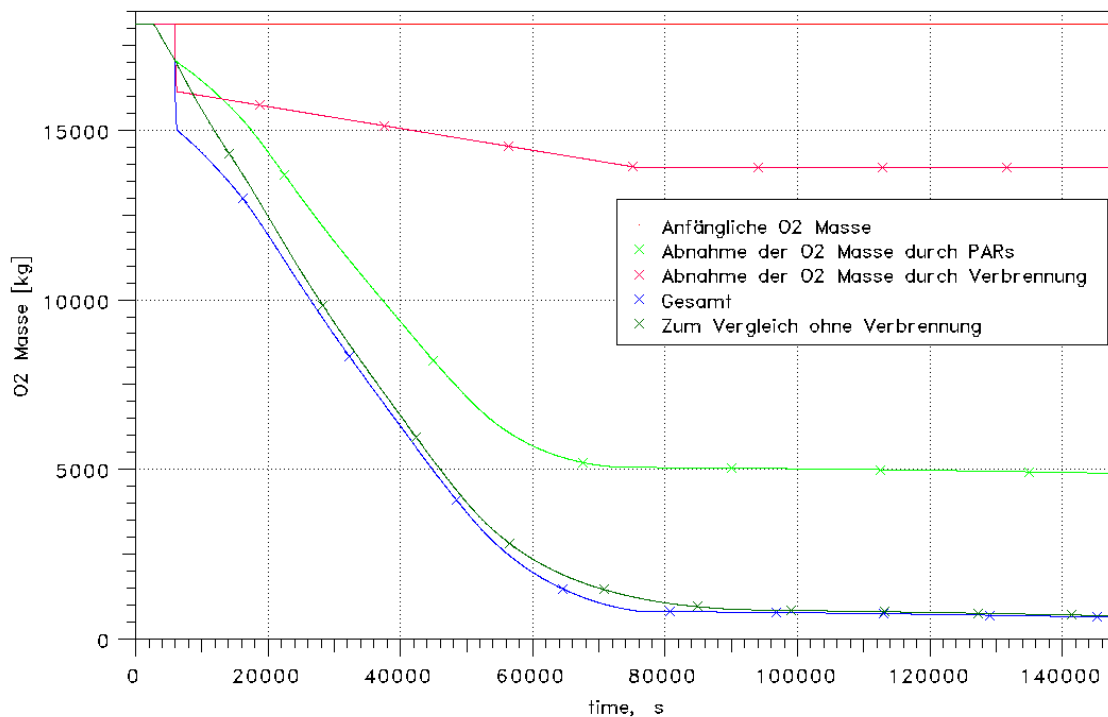


Abb. 4.4-4 ND-Fall, Verbrauch der Sauerstoffmasse durch H₂-Verbrennungen bei Zündungen an Reko's (8 Vol.%) im Vergleich zur Rechnung ohne Verbrennung

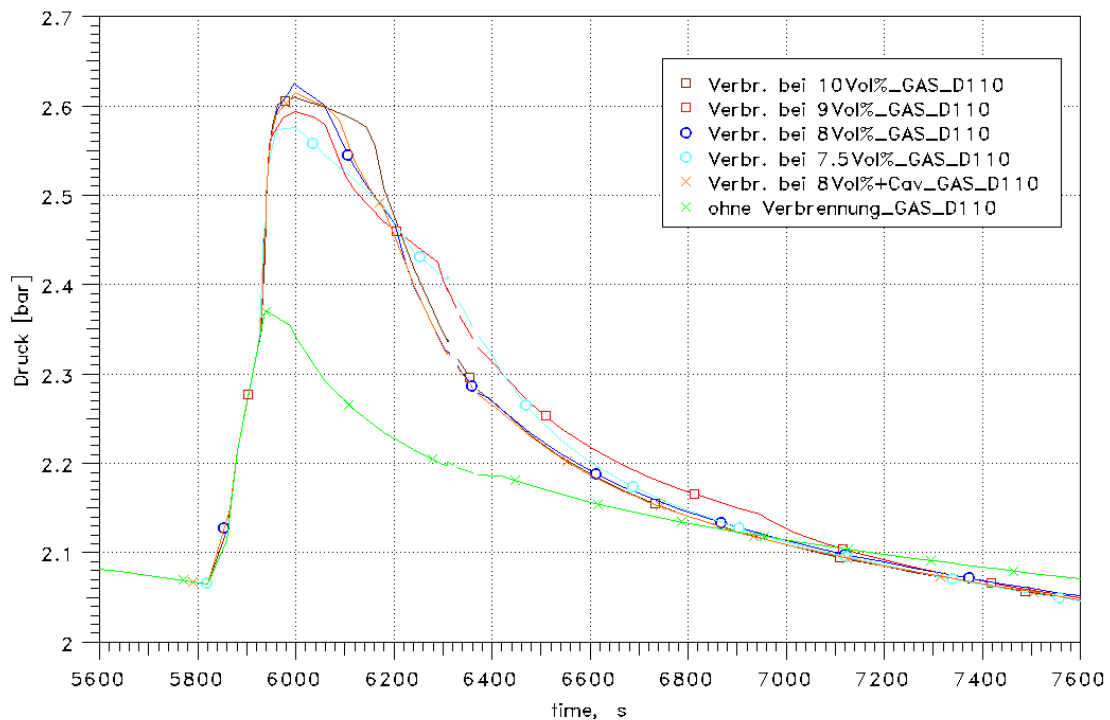


Abb. 4.4-5 ND-Fall, Entwicklung des SHB-Drucks für verschiedene Zündkonzentrationen

Trotz unterschiedlicher Zündkonzentrationen setzen alle Verbrennungen innerhalb eines Zeitfensters von nur 6 s ein, was in der zeitlichen Auflösung der Abbildung nicht zu erkennen ist. Der Grund für die Enge des Zeitfensters ist der mit der hohen Freisetzungsrates verbundene schnelle Anstieg der H_2 -Konzentration in den „Zündzonen“ nahe des Lecks. Die starke Freisetzung von Dampf und Wasserstoff verursacht auch den raschen Druckanstieg in der Rechnung ohne Verbrennung.

In Abb. 4.4-6 sind die umgesetzten Wasserstoffmassen für die verschiedenen Zündansätze dargestellt. Die Verbrennung, die bei 8 Vol.% beginnt, verbrennt den Wasserstoff am schnellsten und erzeugt dadurch den stärksten Anstieg im Druck, für die Entwicklung eines möglichst hohen Druckpeaks ist, wie auch zu erwarten war, eine möglichst hohe Verbrennungsrate und nicht eine möglichst hohe insgesamt umgesetzte Masse nötig.

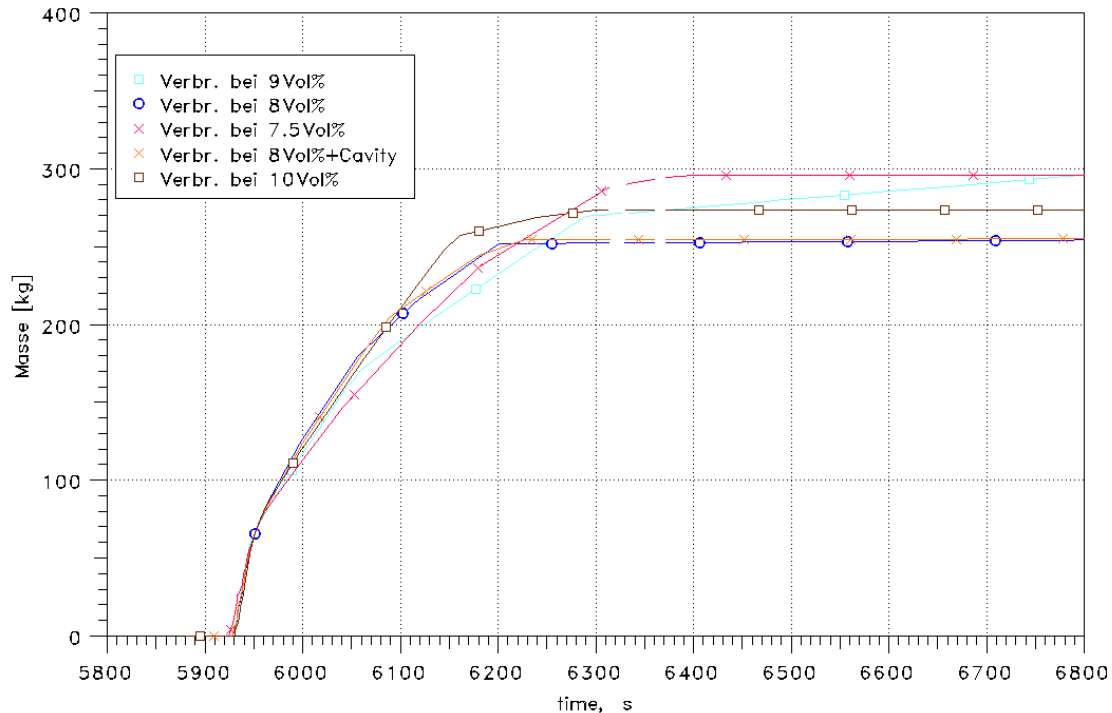


Abb. 4.4-6 ND-Fall, Verbrannte Wasserstoffmasse für unterschiedliche Zündkonzentrationen

Der von der Verbrennung verursachte Temperaturanstieg wird in den nachfolgenden Abbildungen für die Atmosphäre am Austritt des Dampferzeugerturms (in der Plumezone D24A), in der obersten Domzone (D110) und für die daran angrenzende Stahlschale gezeigt. D110 hat von den an der Stahlschale anliegenden Zonen, meist die höchsten Atmosphärentemperaturen. Beispielhaft wird anhand des ND-Falles (Abb. 4.4-9) und MBL-Falles (Abb. 4.4-21) gezeigt, dass die Temperatur der Stahlschale wegen der nur kurzzeitigen Erhöhung der Atmosphärentemperaturen und der großen Wärmekapazität dieser 3,8 cm dicken Stahlwand nur geringfügig ansteigt, was keine Gefährdung der SHB-Integrität darstellt.

Im ND-Fall steigt in D24A, wo eine Verbrennung stattfindet, die Temperatur auf 570 °C an (Abb. 4.4-7). In D110, wohin nur warme Atmosphäre durch die Plumes transportiert wird, erreicht die Temperatur nur 270 °C und liegt damit für etwa 400 s oberhalb von 200 °C (Abb. 4.4-8). Auf die Temperatur der Stahlschale hat dies nur eine geringe Auswirkung. Sie steigt in diesem Zeitraum um weniger als 10 °C an (Abb. 4.4-9). Wie der Druck sind auch die Atmosphärentemperaturen nach etwa 1000 s wieder in die Nähe der Temperaturen der Rechnung ohne Verbrennung abgesunken. Ausnahme bleibt der Fall mit Zündung bei 8 Vol.% und der langen Verbrennung in Zone D74A.

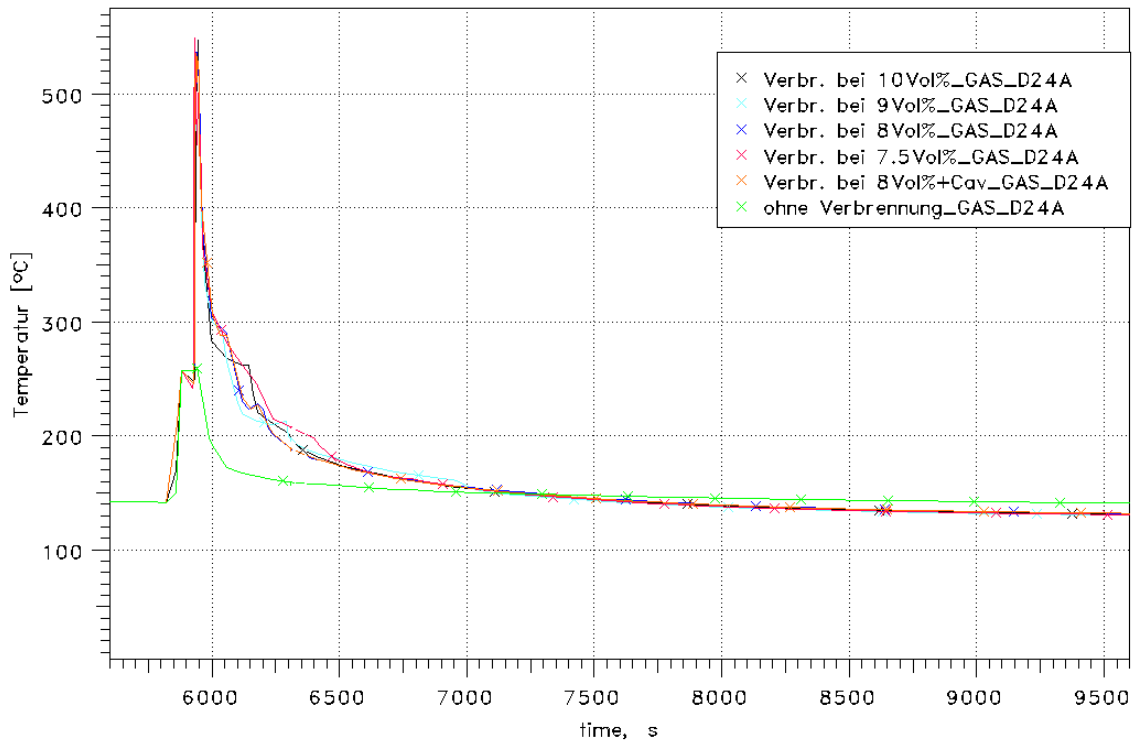


Abb. 4.4-7 ND-Fall, Atmosphärentemperatur in der Plumezone D24A für unterschiedliche Zündkonzentrationen

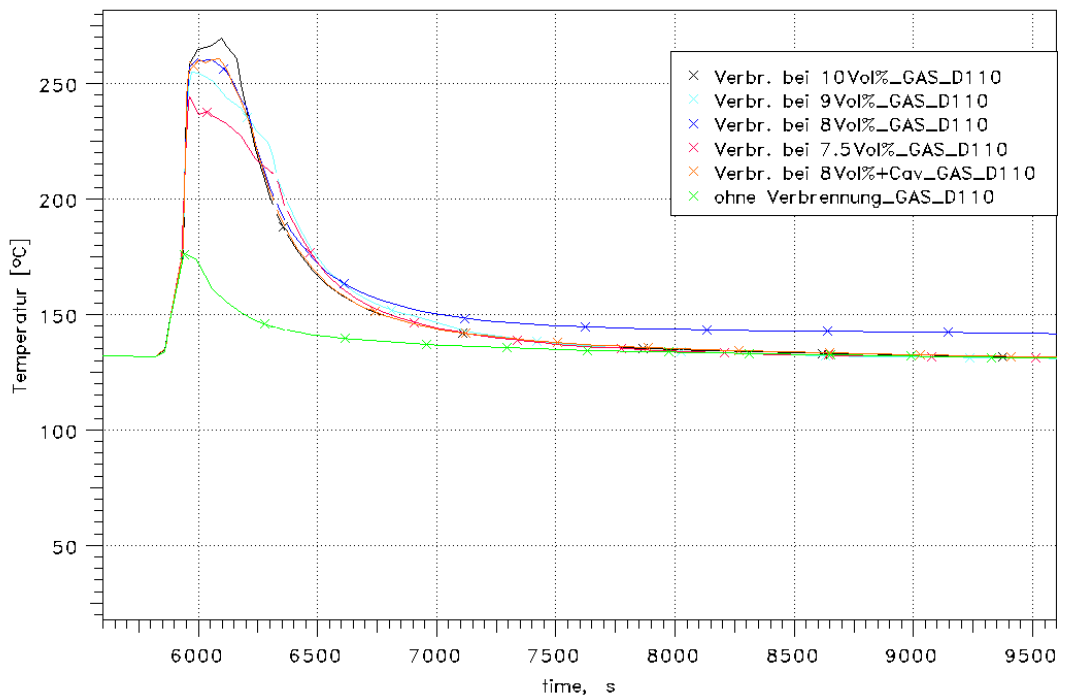


Abb. 4.4-8 ND-Fall, Atmosphärentemperatur in der obersten Domzone (D110) für unterschiedliche Zündkonzentrationen

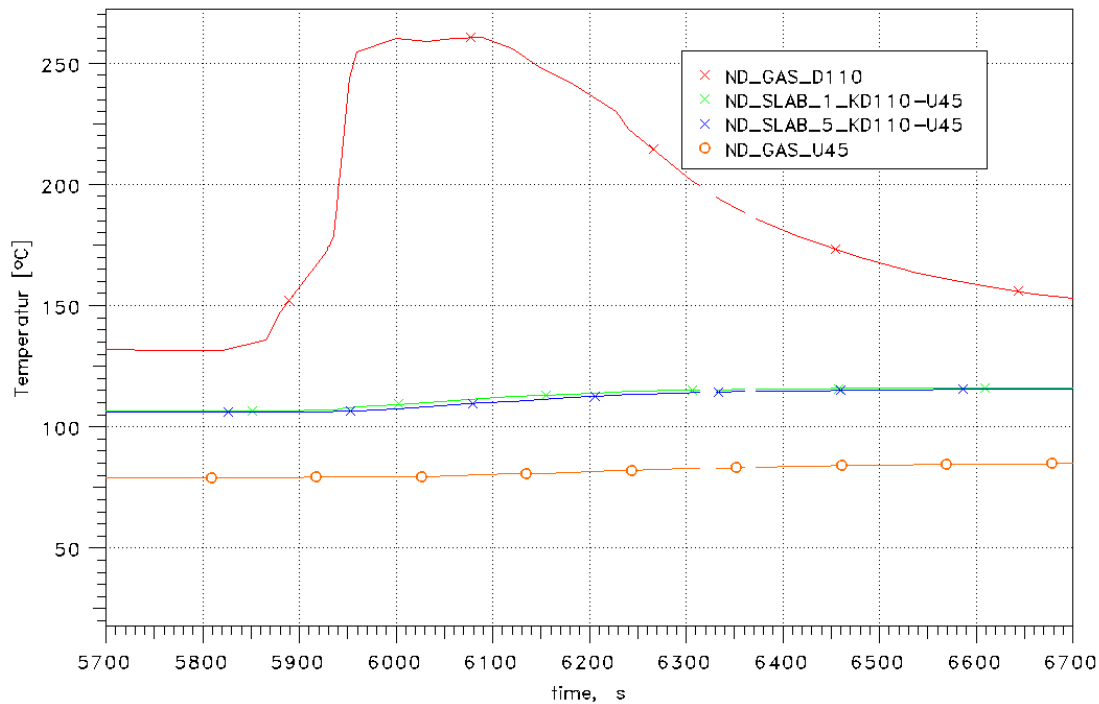


Abb. 4.4-9 ND-Fall, Zündung bei 8 Vol.%, Atmosphärentemperaturen in der obersten Domzone (D110), im Ringspalt (U45) und an der Außen- und Innen-seite der Stahlschale (KD110-U45)

4.4.5 SBL-Fall

Im SBL-Szenario mit Reko-Zündung bei 8 Vol.% kommt es infolge der ersten starken Wasserstofffreisetzung bei 80184 s zur ersten Verbrennung. Details zum Verbrennungsablauf und den sich an die erste Verbrennung anschließenden Verbrennungen sind in Tab. 4.4-2 und Abb. 4.4-10 enthalten.

Diese erste Verbrennung hat einen kurzzeitigen Druckanstieg von ca. 0,06 bar (siehe Abb. 4.4-11) gegenüber der Rechnung ohne Verbrennung zur Folge. Variationen hinsichtlich der notwendigen H_2 -Konzentration an den Reko's, um eine Verbrennung auszulösen, haben hier relative geringe Auswirkungen. Bei der ersten Verbrennung werden immer dieselben Zonen erfasst, erst die erneuten Entzündungen betreffen je nach Rechnung andere Zonen. Die Zündzeitpunkte unterscheiden sich leicht: so zündet der Reko in R12B bei 8 Vol.% Wasserstoff 80184 s nach Störfalleintritt (siehe Tab. 4.4-2), bei 10 Vol.% hingegen erst bei 80228 s. Die umgesetzten Wasserstoffmassen (siehe Abb. 4.4-12) sind bis auf die Zündung bei 10 Vol.% relativ gleich. Dass bei der Zündung bei erhöhter H_2 -Konzentration weniger verbrennt, mag überraschen, lässt sich

aber durch den längeren Zeitraum von der ersten H₂-Freisetzung bis zur Zündung, in der sich der Wasserstoff weiter verteilen kann und durch die Reko's abgebaut wird, erklären. Auch die durch die Verbrennung hervorgerufenen Druckpeaks (Abb. 4.4-13) sind relativ identisch und mit maximal 0,08 bar auch vergleichsweise gering. Dementsprechend steigen auch die Atmosphärentemperaturen z.B. in der obersten Domzone nur geringfügig an.

Tab. 4.4-2 Zeitliche Entwicklung und Bilanz der Verbrennungsrechnung mit Zündung an den Reko's bei 8 Vol.% H₂ (SBL-Fall)

Zone	zündet bei [s]	erlischt bei [s]	Dauer [s]	Bilanz
R12B	80184,0	80964,8	780,8	Bis zum Zeitpunkt 81000 s wurden 113 kg Wasserstoff verbrannt, wobei 13 GJ Energie freigesetzt wurden. Insgesamt wurden durch die Verbrennung von 184 kg Wasserstoff 22 GJ Energie freigesetzt.
R13A	80185,4	80233,9	48,6	
R65B	80185,4	80315,1	129,7	
R05B	80185,5	80212,8	27,3	
R43B	80187,0	80734,4	547,4	
R14A	80189,6	80229,8	40,1	
R66B	80190,9	80297,6	106,7	
R15A	80191,5	80226,9	35,4	
R20Ao	80193,7	80225,8	32,1	
R20Ai	80194,0	80229,3	35,3	
R67B	80197,5	80226,1	28,6	
R21Ao	80200,0	80227,3	27,3	
R05B	80253,5	80963,1	709,6	
R12B	84744,0	85622,1	878,1	
R78B	93459,1	93483,0	23,9	
R85B	93462,9	93476,8	13,9	
R85A	93473,0	93677,3	204,3	
R78C	93484,5	93507,3	22,8	
R85C	93488,2	93501,2	12,9	
R85D	93497,6	93826,6	329,0	
R85D	93958,0	94034,1	76,1	
R85D	94162,0	94343,8	181,8	

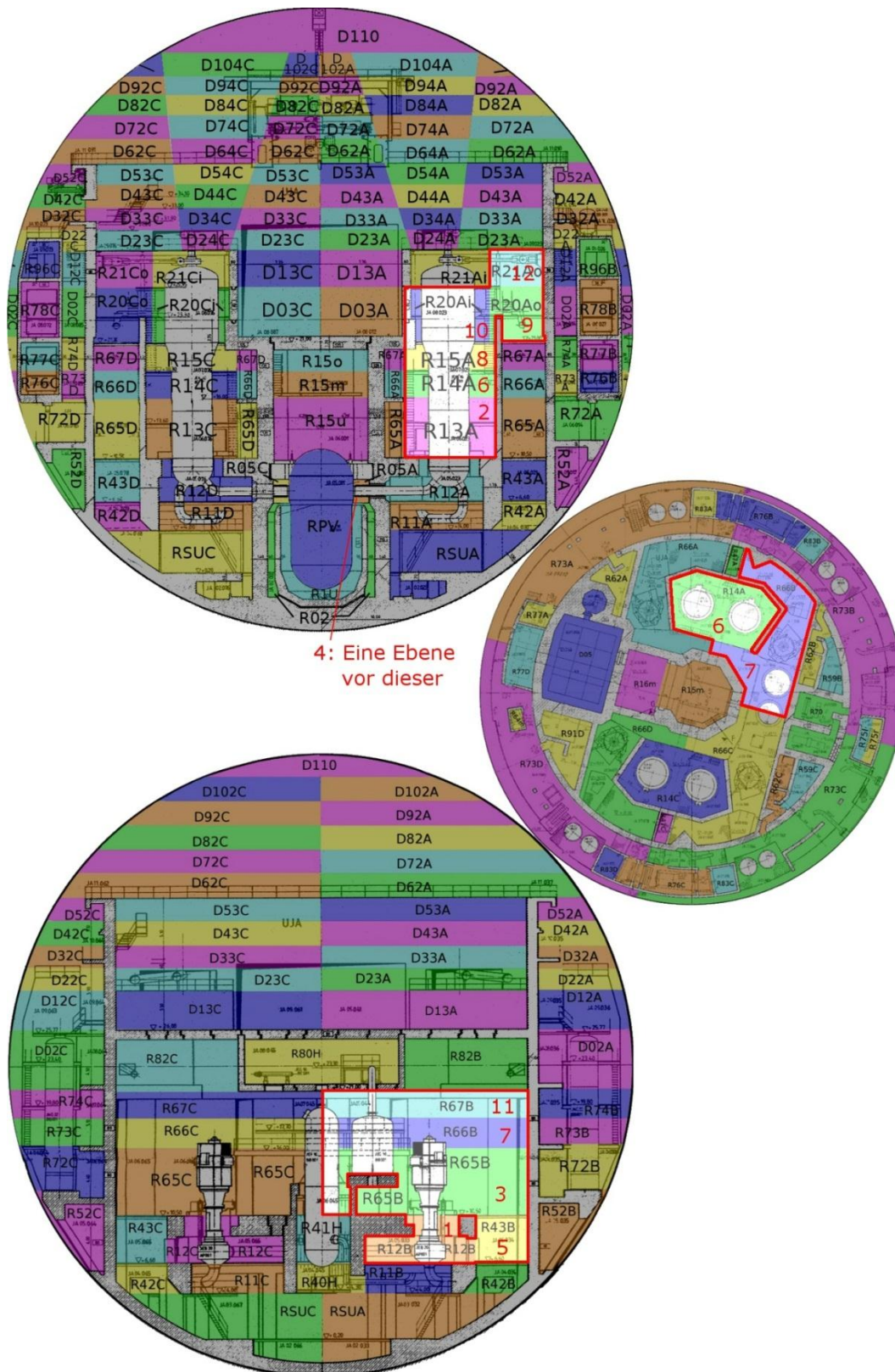


Abb. 4.4-10 Veranschaulichung der Verbrennung mit Reko als Zündquellen (8 Vol.% H₂) für den SBL-Fall

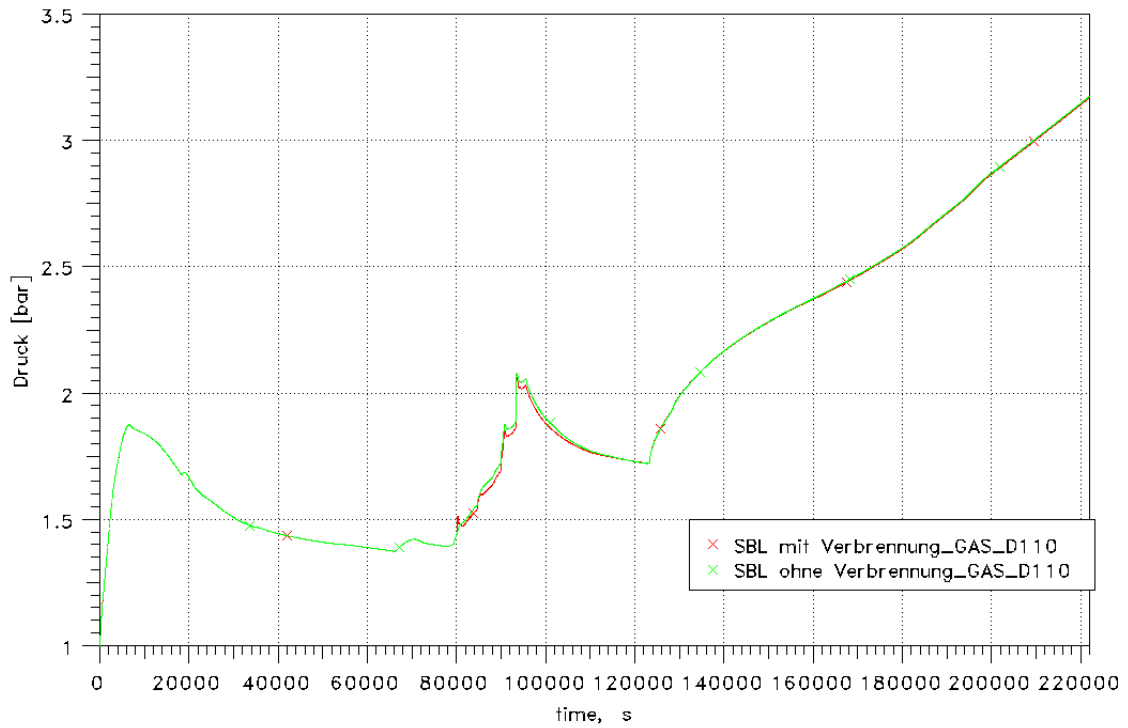


Abb. 4.4-11 SBL-Fall, Druckverlauf bei an Reko's gezündeten Verbrennungen (8 Vol.% H₂) im Vergleich zum Basisfall ohne Verbrennung

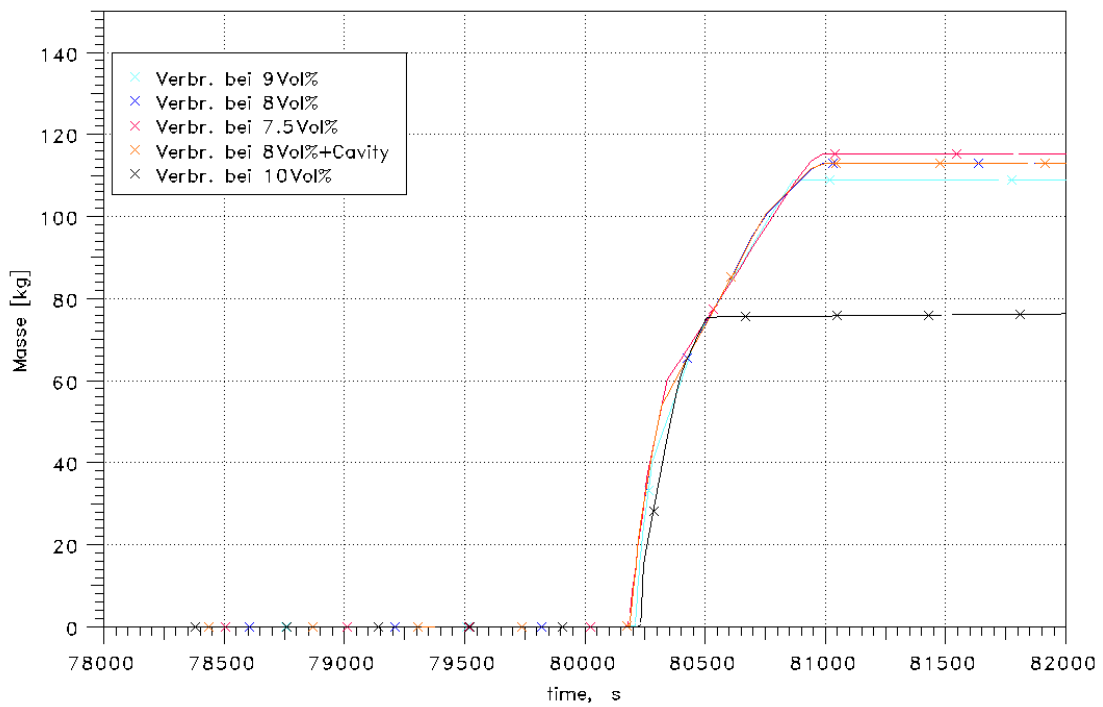


Abb. 4.4-12 SBL-Fall, Verbrannte H₂-Masse je nach Zündkonzentration

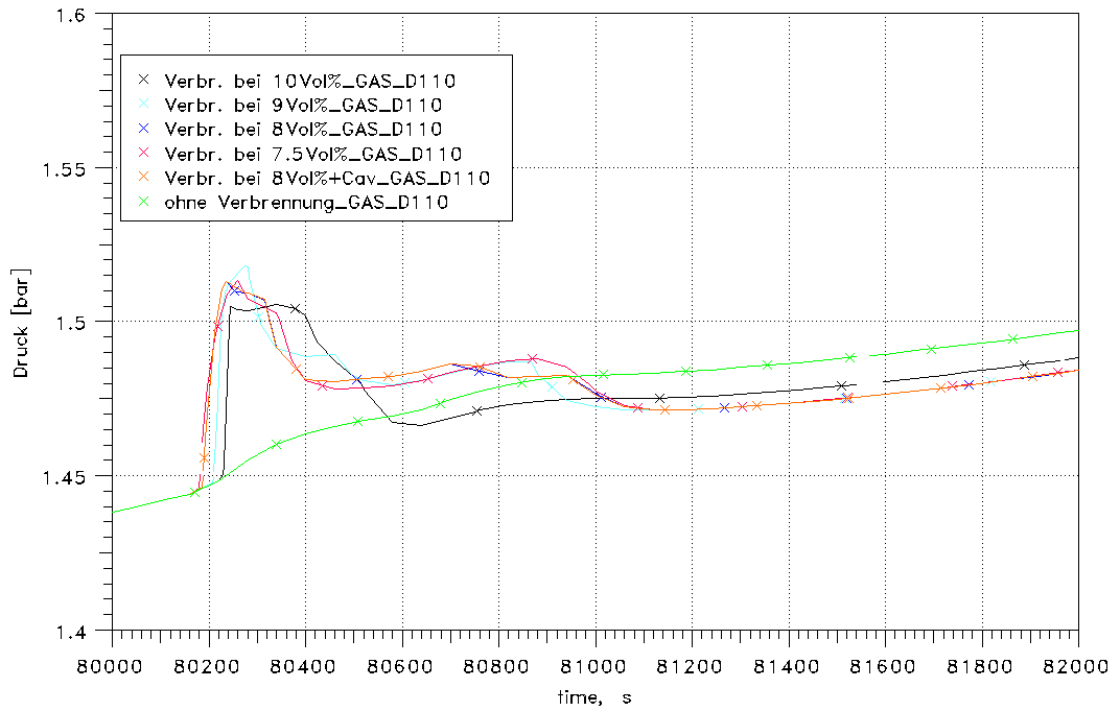


Abb. 4.4-13 SBL-Fall, Abhängigkeit des Druckpeaks von der H₂-Konzentration zum Zeitpunkt der Verbrennung

4.4.6 MBL-Fall

Beim MBL-Szenario mit unterstellter Zündung bei 8 Vol.% Wasserstoff in Zonen mit Reko's kommt es während der anfänglich sehr starken Wasserstofffreisetzung aus den Primärkreis zu einer einzigen Verbrennung, die 22268 s nach Störfalleintritt in R13A beginnt. Die Verbrennung läuft von dort zuerst entlang der Dampferzeuger im Turm A nach oben, bevor weitere Anlagenräume entzündet werden. Während des gesamten Ablaufs kommt es zu keiner Entzündung von Zonen im Dombereich. Der Verlauf der Verbrennung ist in Abb. 4.4-14 dargestellt. Die roten Zahlen geben die Reihenfolge der Entzündung der Zonen an. Die genauen Zündzeitpunkte, so wie die Zeitpunkte, an denen die Flamme in den jeweiligen Zonen erlischt, sind in Tab. 4.4-3 angegeben.

Auffällig ist der sehr lange Verbrennungszeitraum in Zone R67C, eine über 1,65 h „frei im Raum“ stehende Flamme ist fragwürdig. Aus diesem Grund ist auch die verbrannte H₂-Masse bzw. die freigesetzte Energie nicht realistisch. Die zweite Zeile in der Spalte „Bilanz“ gibt an, wie viel Wasserstoff bis 23000 s verbrannt wurde und wie viel Energie dabei frei wurde, dies würde einer Verbrennungsdauer von 706 s entsprechen.

Tab. 4.4-3 Zeitliche Entwicklung und Bilanz der Verbrennungsrechnung mit Zündung an den Reko's bei 8 Vol.% H₂ (MBL-Fall)

Zone	zündet bei [s]	erlischt bei [s]	Dauer [s]	Bilanz
R13A	22268,0	22327,9	59,9	Bis zum Zeitpunkt 23000 s wurden 164 kg Wasserstoff verbrannt, wobei 19 GJ Energie freigesetzt wurden. Insgesamt wurden durch die Verbrennung von 279 kg Wasserstoff 33 GJ Energie freigesetzt.
R14A	22271,1	22311,7	40,6	
R15A	22272,4	22307,1	34,7	
R20Ao	22274,1	22298,1	24,1	
R20Ai	22274,1	22297,8	23,7	
R21Ao	22278,1	22296,1	17,9	
R65B	22282,2	22564,5	282,3	
R65A	22284,6	22310,4	25,8	
R65C	22288,0	22336,5	48,5	
R66B	22289,3	22544,3	255,0	
R66C	22292,9	22332,1	39,2	
R67C	22295,0	28257,5	5962,5	
R20Co	22295,9	22321,9	26,0	
R20Ci	22295,9	22324,5	28,6	
R21Co	22299,5	22321,3	21,8	
R80H	22309,4	22333,2	23,8	
R82C	22326,4	22376,5	50,1	

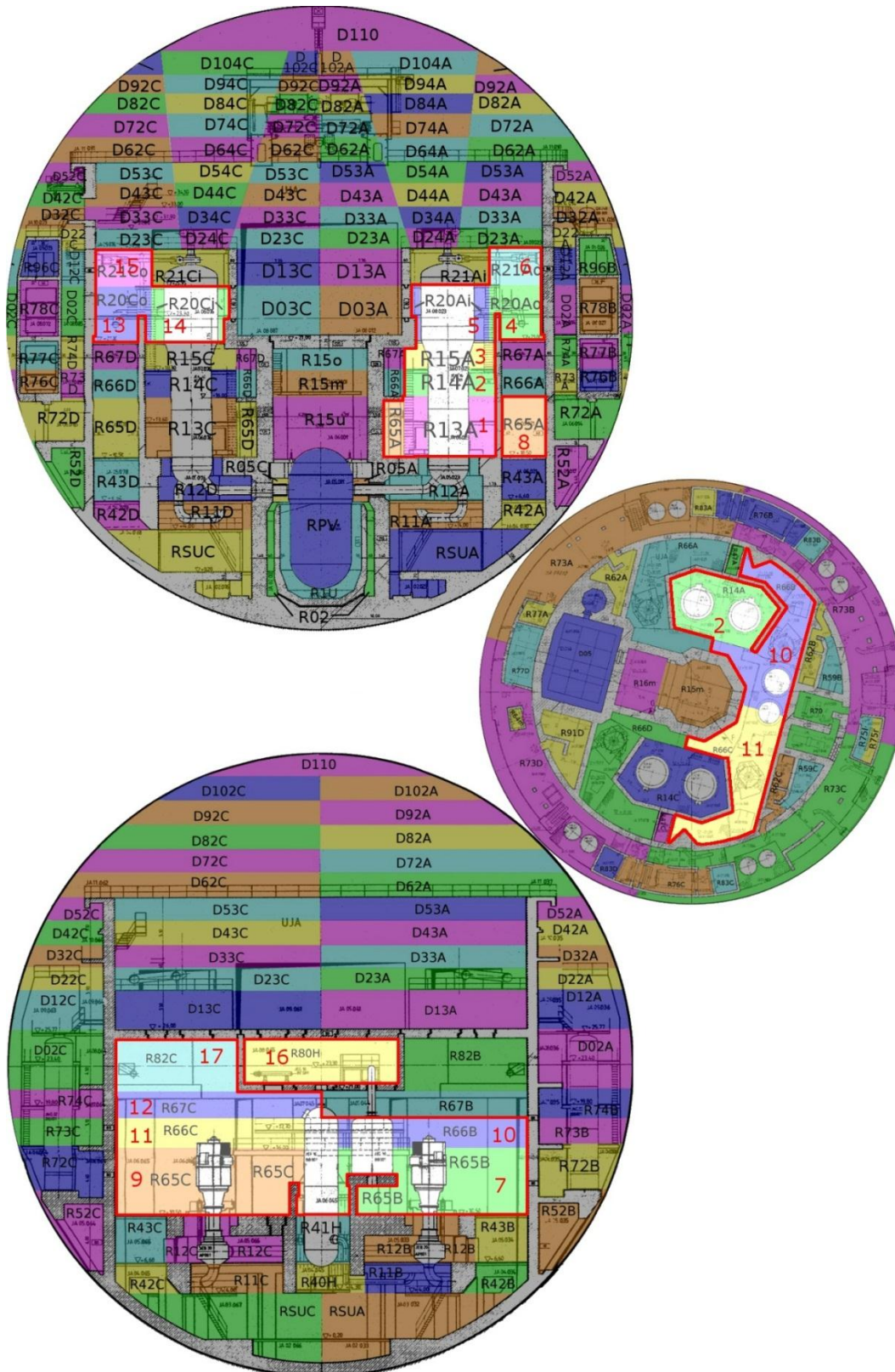


Abb. 4.4-14 Veranschaulichung der Verbrennung mit Reko als Zündquellen (8 Vol.% H₂) für den MBL-Fall

Durch die Verbrennung kommt es – wie in Abb. 4.4-15 zu sehen – zu einer Erhöhung des Drucks um ca. 0,1 bar gegenüber der Rechnung ohne Verbrennung. Die Auswirkungen auf den langfristigen Verlauf von Druck und Temperaturen sind sehr klein.

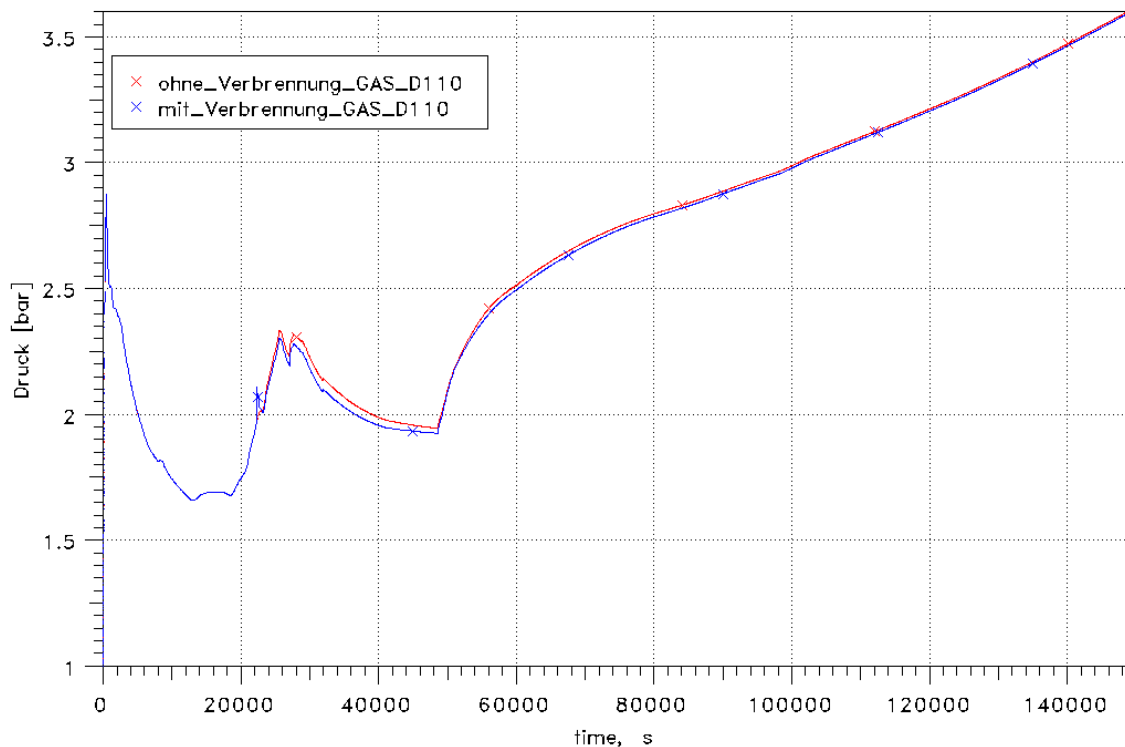


Abb. 4.4-15 MBL-Fall, Druckverlauf bei an Reko's gezündeten Verbrennungen (8 Vol.% H₂) im Vergleich zum Basisfall

Unterstellt man eine Entzündung des Gasmisches an Reko's bei einer H₂-Konzentration von 7,5 Vol.%, so ergibt sich eine geringere Reichweite der Flammenpropagation. Die Zonen im DE-Turm C (R20Co, R20Ci und R21Co) werden genau wie R80H und R82C nicht entzündet.

Die Zündung bei 9 Vol.% Wasserstoff setzt wiederum mehr Masse (260 kg Wasserstoff) um und erfasst dabei auch einen größeren Teil der Anlagenräume (zusätzlich R21Ai, R66A, R67B, R67A und R82B). Außerdem gelangt die Flammenfront nun auch in den Dom (D24A, D34A, D44A, D23C und D54A).

Die Entzündung bei 10 Vol.% hätte größere Auswirkungen, so dass sie nachfolgend komplett dargestellt wird. In Tab. 4.4-4 sind die betroffenen Zonen aufgelistet, in Abb. 4.4-16 sind die betroffenen Zonen herausgestellt. Wie zu sehen ist, läuft die Verbrennung bis in die oberste Domzone D110. Diese Verbrennungssimulation ist die einzige, bei der wegen des Druckpeaks bei der Verbrennung weitere Berstmembrane in den

DE-Decken versagen. So versagt die Berstmembran zwischen D02A und R73 und die Berstmembran zwischen R91C und R53C. Auch in dieser Rechnung kommt es in einzelnen Zonen wieder zu lang anhaltenden Verbrennungen, was auf die nicht hinreichend genau vorgebbaren Kriterien zur Verlöschung der Flammen zurückzuführen ist.

Tab. 4.4-4 Zeitliche Entwicklung und Bilanz der Verbrennungsrechnung mit Zündung an den Reko's bei 10 Vol.% H₂ (MBL-Fall)

Zone	zündet bei [s]	erlischt bei [s]	Dauer [s]	Bilanz
R13A	22516,0	22526,7	10,7	Bis zum Zeitpunkt 23000 s wurden 251 kg Wasserstoff verbrannt, wobei 30 GJ Energie freigesetzt wurden. Insgesamt wurden durch die Verbrennung von 426 kg Wasserstoff 51 GJ Energie freigesetzt.
R14A	22518,4	22527,0	8,5	
R15A	22519,5	22527,0	7,5	
R12B	22520,1	22525,8	5,6	
R05B	22520,6	22522,0	1,4	
R65B	22520,8	22525,2	4,4	
R20Ao	22520,8	22527,3	6,5	
R20Ai	22520,8	22527,2	6,4	
R67B	22521,1	22528,9	7,9	
R66A	22521,1	22529,3	8,2	
R67A	22521,1	22527,5	6,4	
R66B	22521,5	22529,4	7,9	
R43B	22521,5	22542,0	20,5	
R80H	22521,7	22528,5	6,7	
R82C	22521,9	22527,7	5,8	
R11B	22522,0	22556,0	34,0	
R82B	22522,0	22526,6	4,5	
R21Ao	22522,6	22528,0	5,5	
R67C	22522,6	22529,9	7,3	
D23A	22522,6	22577,3	54,6	
R41H	22522,7	22556,7	34,1	
R65C	22522,7	22537,0	14,3	
R21Ai	22522,9	22528,6	5,6	
D24A	22523,0	22527,1	4,1	
R05B	22523,1	22585,5	62,4	
R66C	22523,3	22532,4	9,1	
D34A	22523,3	22528,3	5,0	
R20Ci	22523,3	22529,5	6,1	
R20Co	22523,3	22528,9	5,6	
D44A	22523,7	22561,9	38,3	
R15C	22523,7	22531,2	7,5	
D54A	22524,1	22558,4	34,3	
D33A	22524,3	22576,8	52,5	
D64A	22524,6	22536,6	11,9	

Zone	zündet bei [s]	erlischt bei [s]	Dauer [s]	Bilanz
R14C	22524,7	22532,5	7,8	
R65A	22524,8	22534,4	9,6	
R21Co	22524,8	22530,3	5,4	
D23C	22524,9	22532,4	7,4	
R67D	22525,0	22531,2	6,2	
D74A	22525,2	22577,5	52,3	
R21Ci	22525,5	22531,6	6,1	
D24C	22525,7	22529,2	3,5	
D84A	22525,8	22577,0	51,2	
R66D	22526,3	22533,2	7,0	
D34C	22526,3	22581,9	55,6	
D94A	22526,5	24781,8	2255,3	
R12A	22526,8	22542,6	15,8	
D104A	22527,2	22576,5	49,3	
D44C	22527,3	25079,0	2551,8	
D54C	22528,3	24837,5	2309,2	
D110	22528,6	22558,0	29,5	
D64C	22529,6	24809,5	2279,9	
R12B	22530,2	24749,5	2219,3	
R05A	22530,7	22585,5	54,8	
D33C	22531,0	22588,4	57,5	
R43A	22538,9	22887,5	348,7	
R05B	30688,0	48629,4	17941,4	
R05A	30768,0	47174,5	16406,5	

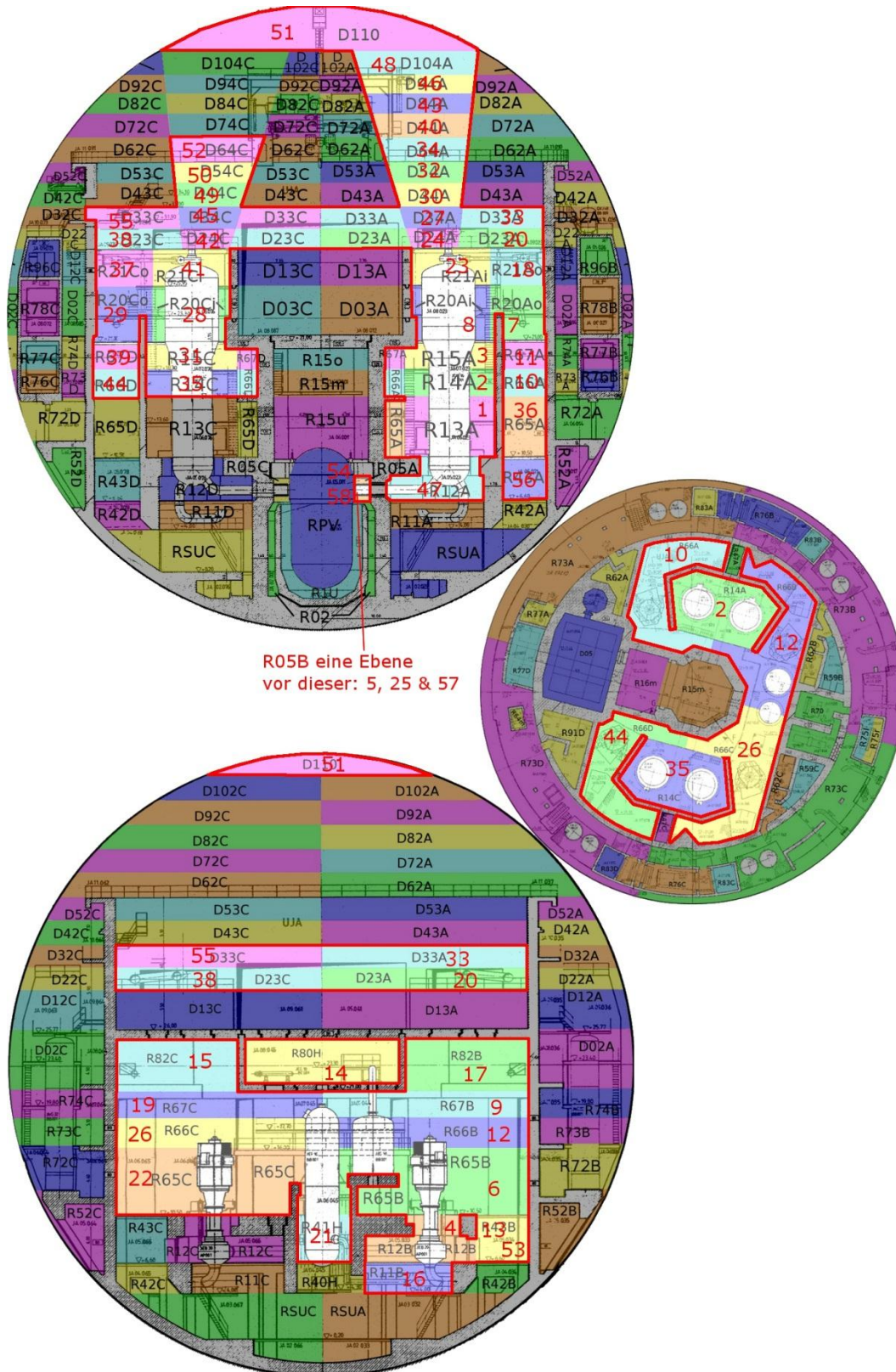


Abb. 4.4-16 Veranschaulichung der Verbrennung mit Reko als Zündquelle (10 Vol.% H₂) für den MBL-Fall

In Abb. 4.4-17 ist der maximale Druck, der bei der Verbrennung bei den verschiedenen Zündkonzentrationen erreicht wird, dargestellt. In Abb. 4.4-18 sind die bei den Verbrennungen umgesetzten Wasserstoffmassen dargestellt. Wie auch im ND-Fall erzeugt der bei einer Zündung bei 10 Vol.% berechnete Verbrennungsverlauf den größten Druckpeak, da mehr Zonen betroffen sind und mehr Wasserstoff umgesetzt wird. Dabei steigt der Druck von 2 bis auf 2,5 bar, was allerdings noch weit unterhalb des Auslegungswertes der SHB Schale liegt.

Abb. 4.4-19 und Abb. 4.4-20 zeigen die Anstiege der Atmosphärentemperaturen am Austritt der Dampferzeugertürme und in der obersten Domzone. In der Rechnung mit 10 Vol.% Zündung verbrennt in der obersten Domzone 30 s lang Wasserstoff, wodurch dort die Atmosphärentemperatur kurzzeitig bis auf 350 °C ansteigt. Sie sinkt dann zwar schnell wieder ab, bleibt jedoch insbesondere wegen der unrealistisch lang andauernden Verbrennungen in den Plumezonen D94A, D44C und D64C insgesamt 400 s lang oberhalb von 200 °C. Die Temperatur der SHB-Schale steigt in diesem Zeitraum nur um etwa 10 °C an (Abb. 4.4-21), was die geringe Auswirkung der kurzzeitigen Verbrennung direkt unter der Stahlschale demonstriert.

Wie beim ND-Fall sind die Temperaturen nach etwa 1000 s in die Nähe der Rechnung ohne Verbrennung abgesunken. Eine Ausnahme bildet die oberste Domzone bei den Rechnungen mit 9 Vol.% und 10 Vol.% Zündung, weil hier, wie oben beschrieben, lang andauernde Verbrennungen im Dom auftreten, die aber unrealistisch erscheinen.

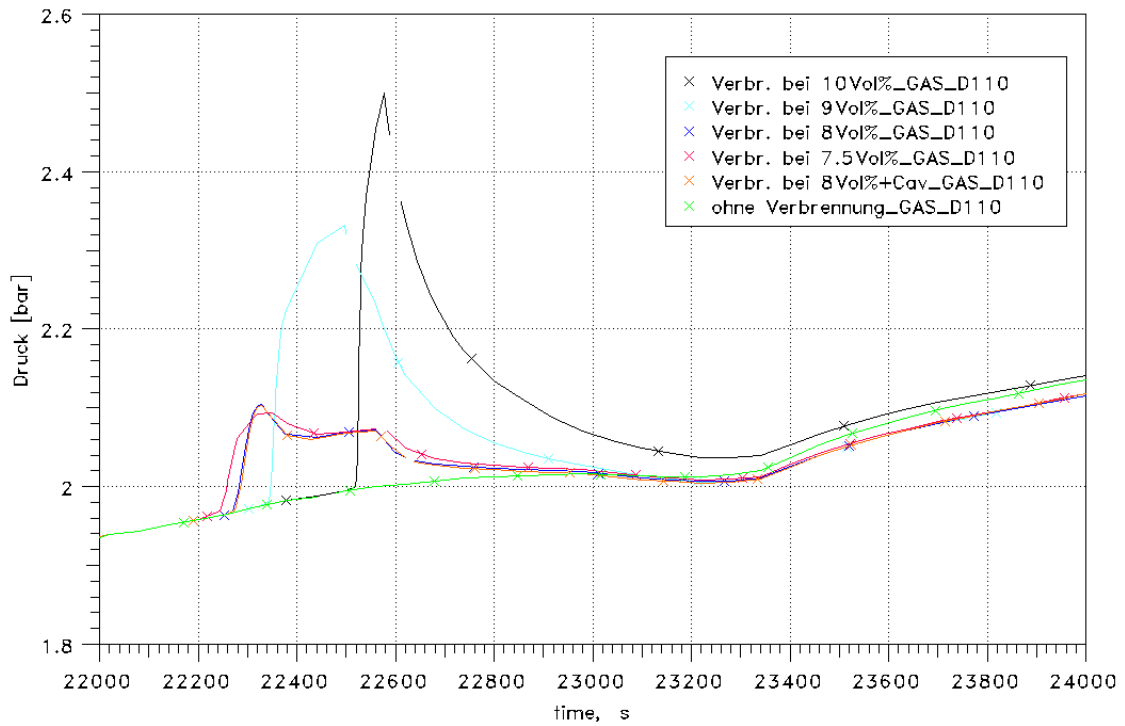


Abb. 4.4-17 MBL-Fall, Abhängigkeit des Druckpeaks von der Zündkonzentration

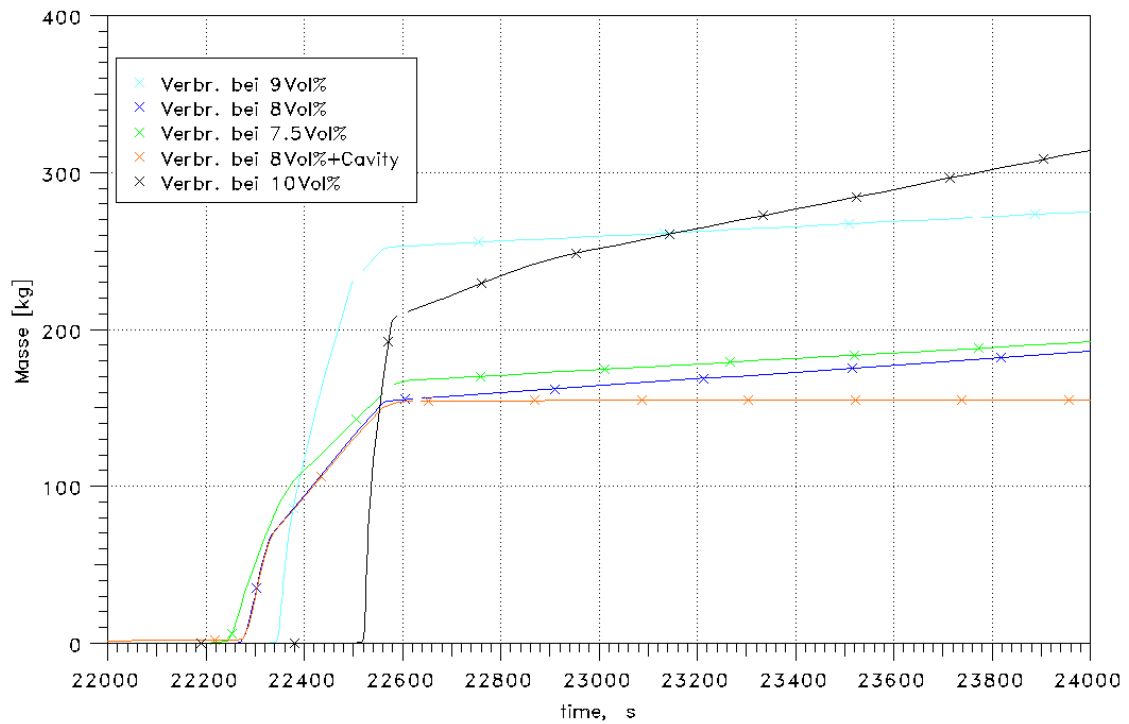


Abb. 4.4-18 MBL-Fall, Verbrannte H₂-Masse je nach Zündkonzentration

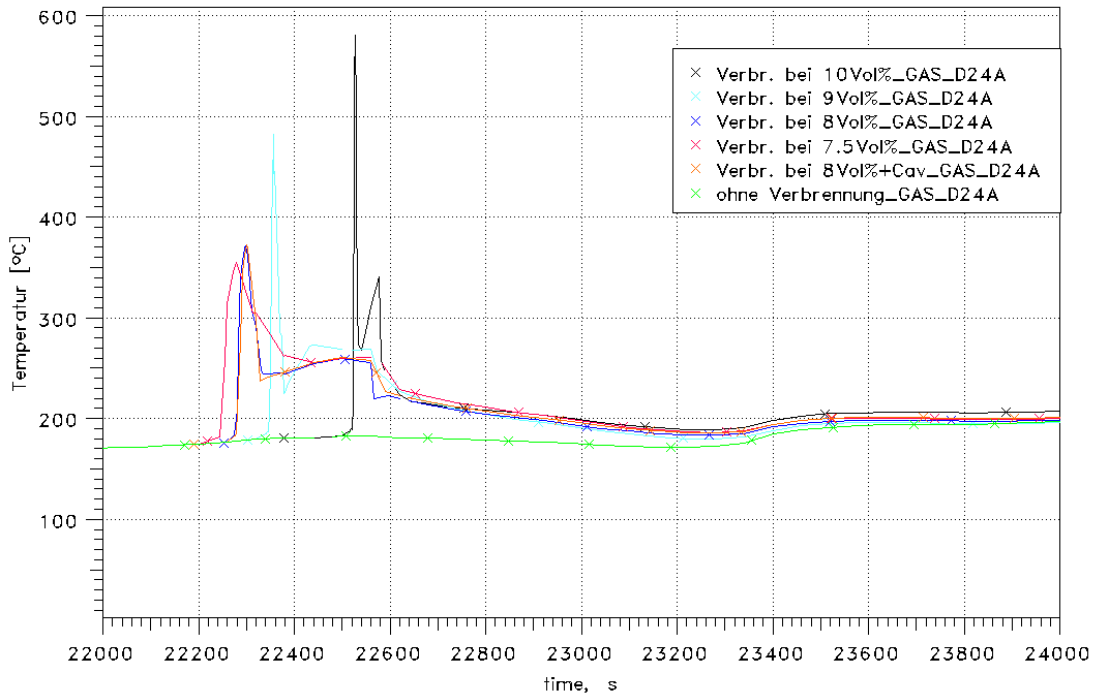


Abb. 4.4-19 MBL-Fall, Atmosphärentemperatur in der Plumezone D24A für unterschiedliche Zündkonzentrationen

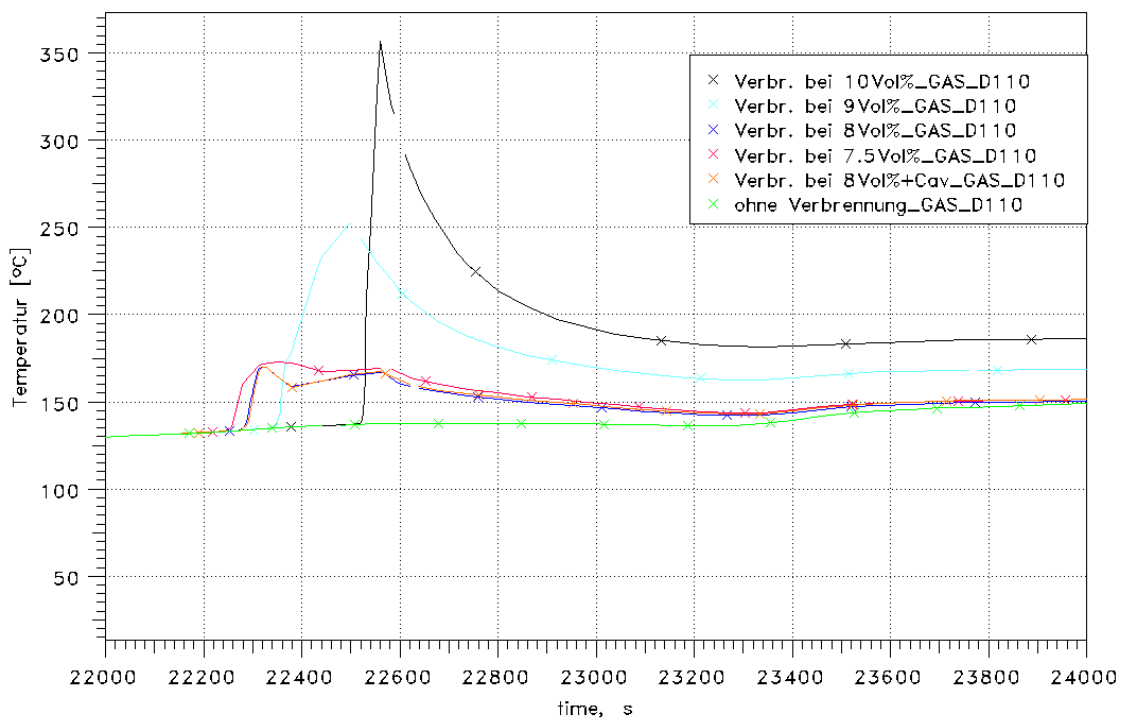


Abb. 4.4-20 MBL-Fall, Atmosphärentemperatur in der obersten Domzone für unterschiedliche Zündkonzentrationen

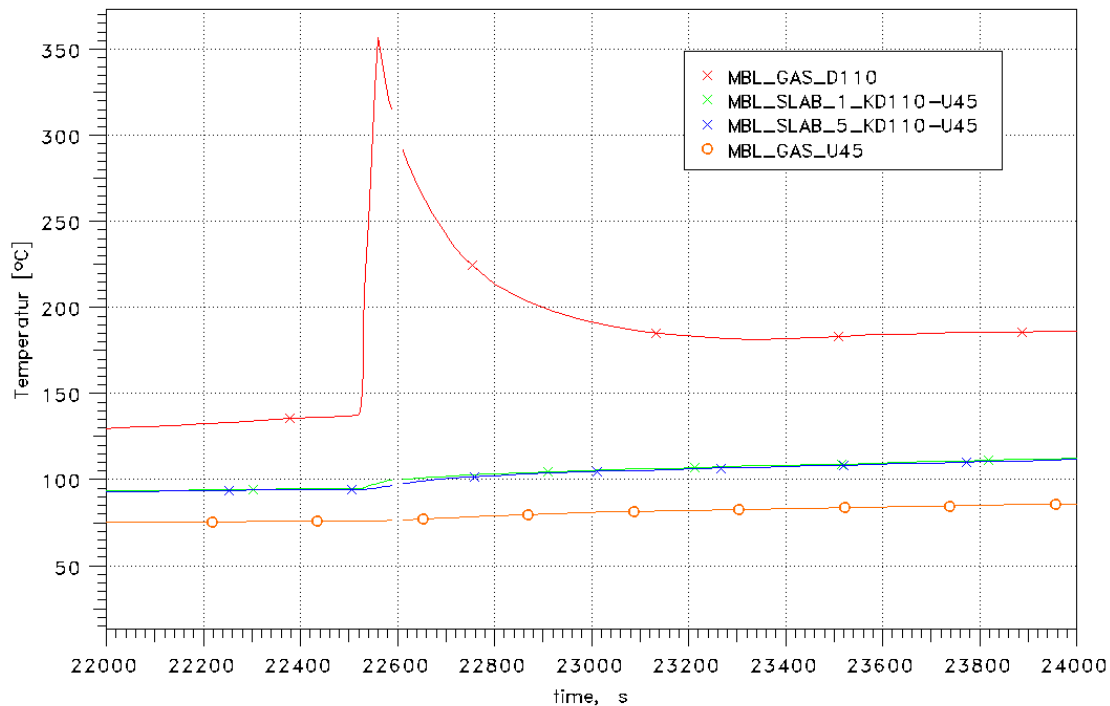


Abb. 4.4-21 MBL-Fall, Zündung bei 10 Vol.%, Atmosphärentemperaturen in der obersten Domzone (D110), im Ringspalt (U45), und an der Außen- und Innenseite der Stahlschale (KD110-U45)

4.5 Rechnungen ohne (dynamische) Aerosolsimulation und mit H₂-Verbrennung zu einem möglichst ungünstigen Zeitpunkt (*worst case*)

4.5.1 Durchgeführte Analysen

Neben den Analysen mit Wasserstoffentzündung an Reko's wurde in weiteren Rechnungen versucht, die maximale Belastung des SHB durch H₂-Verbrennungen zu ermitteln, indem eine Verbrennung unter den ungünstigsten Bedingungen (*worst case*) gestartet wurde. Dazu wurde eine Zündzone mit einem definierten Zeitpunkt der Zündung deklariert. Um diese Daten zu ermitteln, wurde in den Rechnungen ohne Verbrennung, alle Zonen dahin gehend überprüft, wann sie selbst und möglichst viele der angrenzenden Zonen brennbar sind. Es ist davon auszugehen, dass eine Verbrennung, die sich über möglichst große Raumareale erstreckt und somit auch die größte Menge Wasserstoff in der geringsten Zeit umsetzt, die stärksten Auswirkung auf den SHB hat. Die Wahrscheinlichkeit für ein derartiges Ereignis ist sehr klein.

Die Startzone und der Startzeitpunkt wurden mit Hilfe von Dreistoffdiagrammen ermittelt. Im ersten Schritt wurden für alle Zonen über den gesamten Unfallzeitraum derartige Diagramme erstellt. Diese wurde daraufhin analysiert, ob innerhalb der Zonen eine Verbrennung möglich ist und es wurde eine Liste dieser Zonen erstellt. Daraufhin wurde anhand von Plots, die den Wasserstoffverlauf in den Zonen von „erhöhtem Interesse“ (Anlagenräume, Dom und Zonen zwischen Trümmerschutz und SHB) darstellen, Zeiträume ermittelt, in denen die H₂-Konzentration oberhalb von 4 Vol.% liegt (untere Verbrennungsgrenze). Diese Zeiträume wurden feiner unterteilt und für die Zonen, die als relevant identifiziert wurden, wurden wieder Dreistoffdiagramme erstellt. Die auf diese Art anfallenden Sets von Dreistoffdiagrammen wurde dahingehend analysiert, inwiefern eine möglichst weite Propagation der Flammenfront zu erwarten ist. So wurden die Zündzone und letztlich auch der Zündzeitpunkt auf ca. 100 - 200 s genau festgelegt. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Analysen beschrieben.

4.5.2 ND*-Fall

Wie bereits in Kap. 4.4.3 aufgeführt, kommt es in keiner der Rechnungen, bei der ausschließlich die Reko's als Zündquelle dienen sollen, zu einer Verbrennung. Dieses Ergebnis hat sich aus den Rechnungen ohne Verbrennung (siehe Kap. 4.3.2) bereits angedeutet. Demzufolge ließ sich auch kein Fall finden, bei dem Verbrennungen, außer denen in der Reaktorgrube zu merklichen Auswirkungen führt.

4.5.3 ND-Fall

Tab. 4-7 zeigt den Verlauf der „worst-case“-Rechnung für den ND-Fall. Abb. 4.5-1 zeigt den Ablauf der Verbrennung. In diesem Fall startet die Verbrennung in R12B – nahe des Lecks. Die Zone brennt für eine Sekunde und dann erlischt die Verbrennung zunächst. Nur drei Sekunden später entzündet sich die Flamme in R12B erneut und die Flammenfront breitet sich dann durch mehrere Zonen aus. Hieran zeigt sich, wie empfindlich das gesamte System auf die Wahl des Zündzeitpunktes reagiert. Im Vergleich zum Fall mit Reko-Zündung (Kap. 4.4.4), bei der nahezu Zeitgleich Verbrennungen in den Räumen R13A, R65B und R66B ausgelöst wurden und sich die Flammenfront dann über eine Reihe von Räumen ausbreitete, erfasst die Verbrennung unter „worst-case“-Randbedingungen größere Bereiche des SHB und erreicht sogar Zonen unterhalb der SHB-Schale im Dom (Abb. 4.5-1). Hierbei ist allerdings unterstellt, dass eine Zündquelle im Raum R12B vorhanden ist. Die Verbrennung erzeugt mit ca. 0,46 bar

auch einen deutlich stärkere Druckerhöhung (siehe Abb. 4.5-2). Der gesamte Druckverlauf ist in Abb. 4.5-3 dargestellt. Durch den Druckpeak kommt es zu keinem Versagen von zusätzlichen Berstelementen in den DE-Decken, da bereits zu Beginn des Ereignisses durch das große Leck eine große Anzahl von Berstelementen versagt hat.

Die Atmosphärentemperatur in der obersten Domzone (Abb. 4.5-4) steigt auf ein Maximum von 370 °C, bleibt aber nur etwa 300 s oberhalb von 200 °C.

Im Vergleich zum Fall mit Verbrennung gestartet durch Reko's bei 8 Vol.% H₂ werden nur 225 kg verbrannt; im Vergleichsfall hingegen 425 kg (siehe Abb. 4.5-5). Da der Umsatz im „worst-case“ Fall schneller erfolgt, ist der sich ergebende Druckpeak höher.

Langfristig sind dadurch trotzdem keinen nennenswerten Unterschiede zu sehen (siehe Druckverlauf in Abb. 4.5-3).

Tab. 4.5-1 Zeitliche Entwicklung und Bilanz der Verbrennungsrechnung mit möglichst großer Auswirkung, „worst-case“ (ND-Fall)

Zone	zündet bei [s]	erlischt bei [s]	Dauer [s]	Bilanz
R12B	5935,4	5936,5	1,1	Bis zum Zeitpunkt 6383,7 s wurden 205 kg Wasserstoff verbrannt, wobei 24 GJ Energie freigesetzt wurden. Insgesamt wurden durch die Verbrennung von 225 kg Wasserstoff 27 GJ Energie freigesetzt.
R12B	5939,7	5945,2	5,5	
R13A	5940,0	5941,7	1,7	
R65B	5940,0	5942,0	2,0	
R05B	5940,0	5940,6	0,6	
R43B	5940,3	5942,1	1,9	
R11B	5940,6	5942,3	1,6	
R14A	5940,6	5942,2	1,6	
R66B	5940,7	5943,3	2,5	
R15A	5941,0	5942,9	1,9	
R67B	5941,2	5944,2	3,0	
R20Ao	5941,4	5944,9	3,4	
R20Ai	5941,4	5944,9	3,4	
R65A	5941,6	5950,8	9,2	
R15o	5941,6	5944,8	3,2	
R80H	5941,9	5947,7	5,8	
R66A	5942,2	5947,6	5,4	
R21Ao	5942,2	5945,3	3,1	
R66C	5942,3	6029,5	87,2	
R67A	5942,3	5947,4	5,1	
R05A	5942,3	5944,7	2,4	
R05C	5942,3	5944,5	2,2	

Zone	zündet bei [s]	erlischt bei [s]	Dauer [s]	Bilanz
R21Ai	5942,5	5945,5	3,0	
D23A	5942,6	6033,3	90,6	
R67C	5942,8	5950,1	7,3	
D24A	5942,9	5945,3	2,4	
D34A	5943,2	6002,5	59,3	
D44A	5943,7	5996,6	52,9	
D33A	5943,8	6025,6	81,8	
D54A	5944,2	5994,1	50,0	
D64A	5944,7	5991,9	47,2	
R20Ci	5944,8	5997,0	52,2	
R20Co	5944,9	5989,6	44,7	
D43A	5944,9	6022,3	77,3	
D74A	5945,2	6014,2	69,0	
D84A	5945,8	6011,8	65,9	
D53A	5946,1	6019,8	73,7	
D94A	5946,4	6020,6	74,2	
D104A	5947,1	6007,9	60,8	
D62A	5947,3	6019,0	71,6	
R82B	5947,9	5954,4	6,5	
D110	5948,3	6023,3	75,0	
D72A	5949,6	6018,8	69,2	
R05B	6492,0	7452,9	960,9	
R05A	6542,7	11684,0	5141,3	
R05C	6612,0	6817,5	205,5	

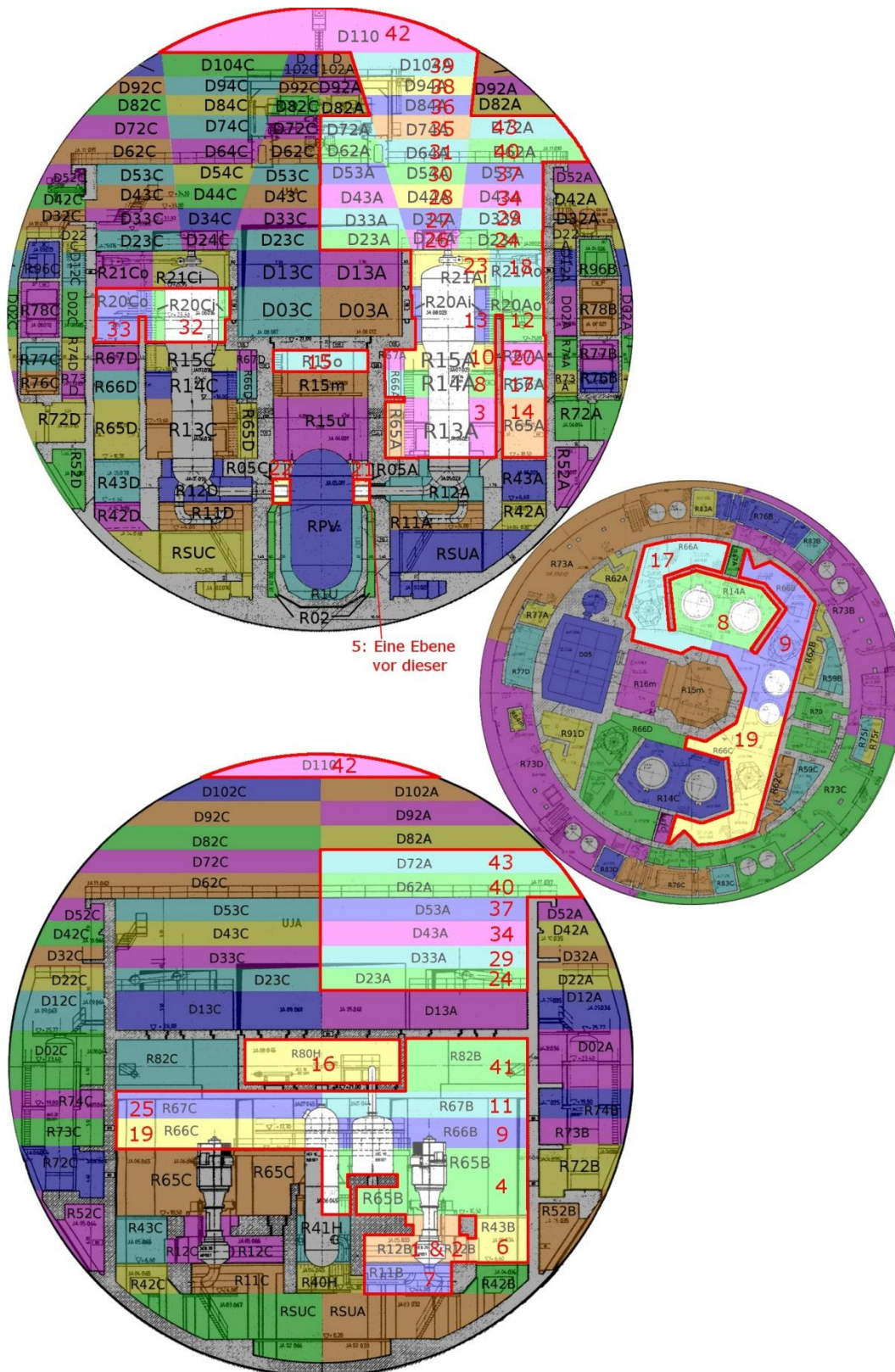


Abb. 4.5-1 Veranschaulichung der Verbrennung mit möglichst großer Auswirkung für den ND-Fall

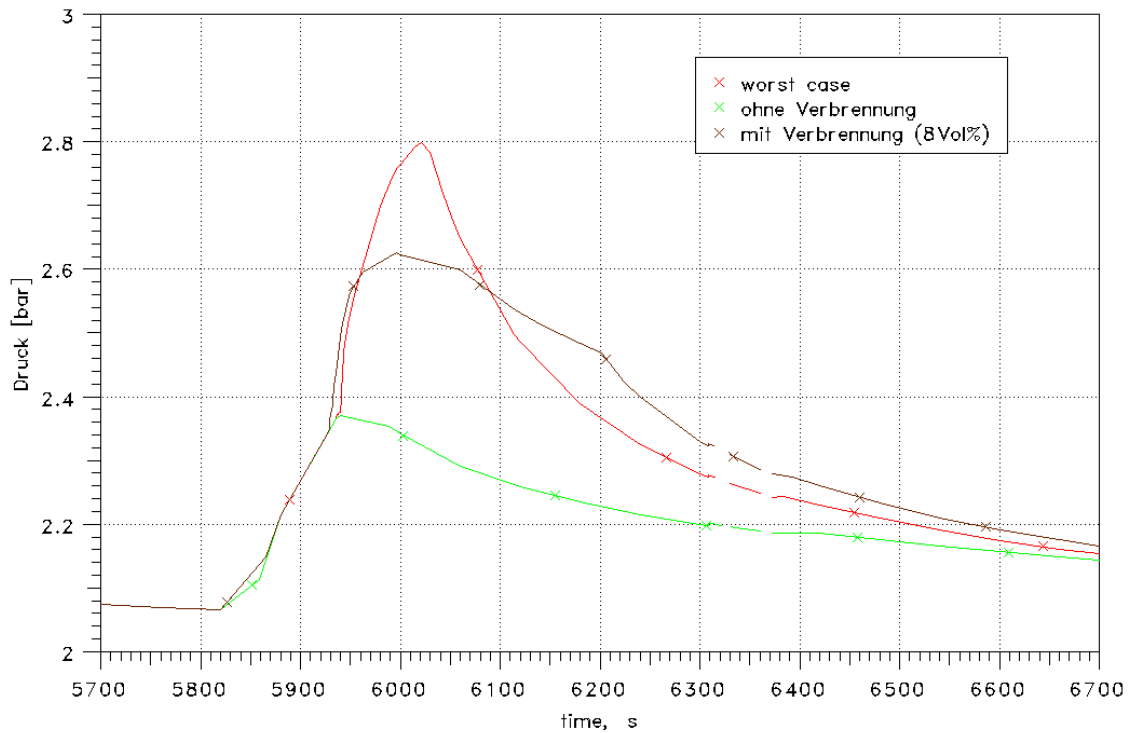


Abb. 4.5-2 ND-Fall, Vergleich des Druckanstiegs für Zündungen an Reko's bei 8 Vol.% H₂ mit dem "worst-case" und dem Fall ohne Verbrennung

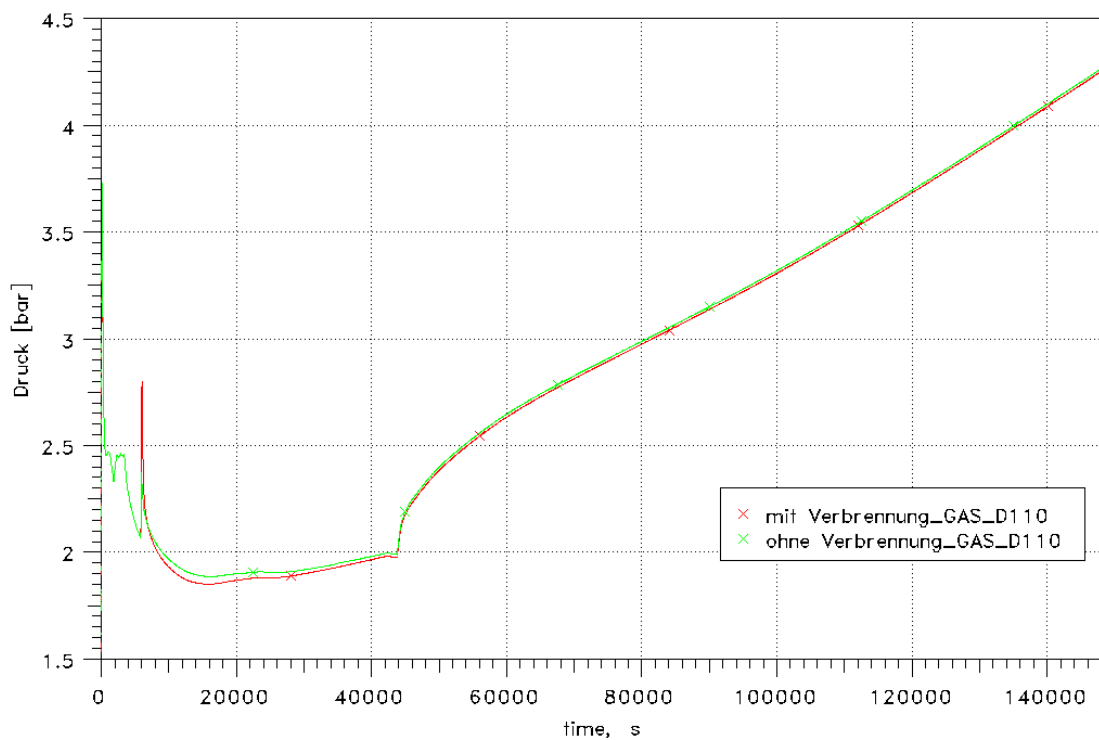


Abb. 4.5-3 ND-Fall, Entwicklung des Drucks bei der "worst-case" Verbrennung im Vergleich zum Basisfall

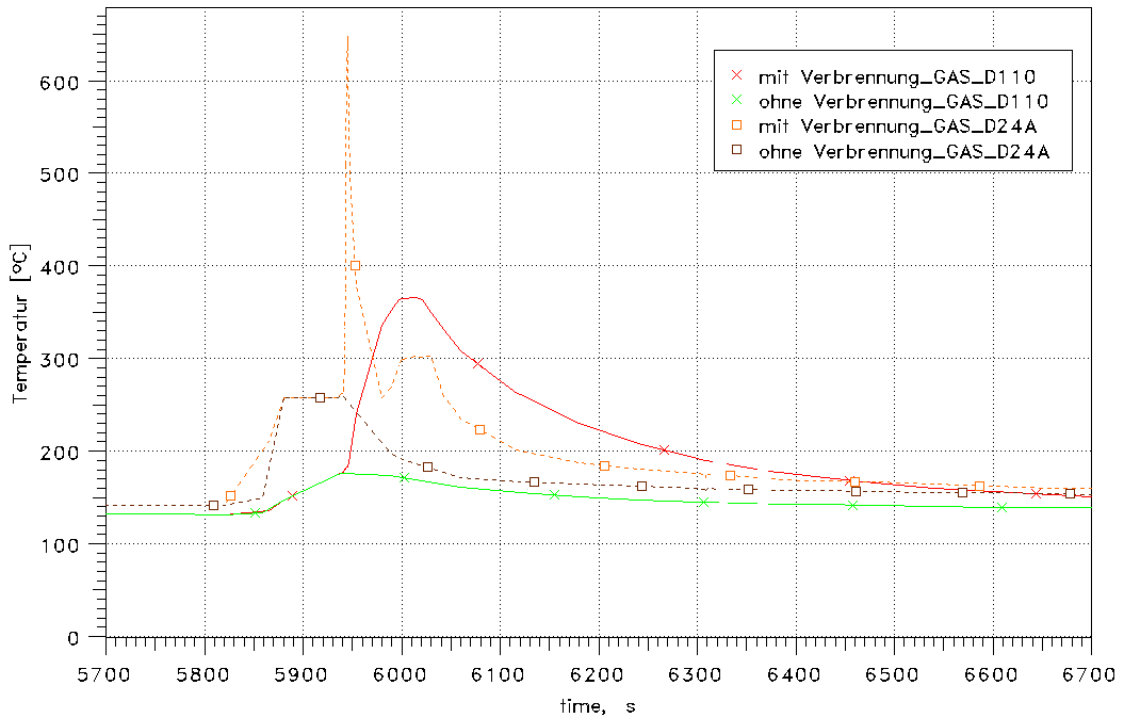


Abb. 4.5-4 ND-Fall, Temperaturverlauf in der "worst-case"-Rechnung im Vergleich zum Basisfall

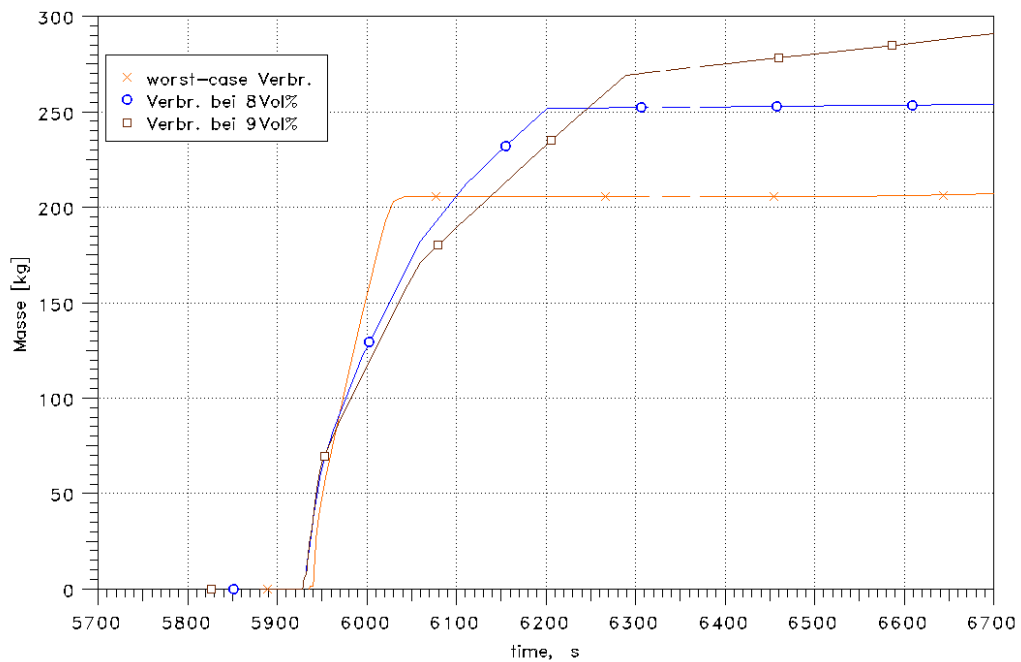


Abb. 4.5-5 ND-Fall, Verbrannte H_2 -Masse in der "worst-case"-Rechnung im Vergleich zum Fall mit Reko-Zündung bei 8 Vol.%

4.5.4 SBL-Fall

Tab. 4.5-2 listet die Start- sowie Stoppzeiten der Zonen, in denen es zu einer Verbrennung, kommt auf. Auch in dieser Analyse sind einige der Verbrennungszeiten wiederum viel zu lang. Besonders D44A fällt mit einer Verbrennungsdauer von über 33 h negativ auf. Die Zündung für den „worst-case“-Fall erfolgt in Raum R12B bei 80903 s, einem Raum in der Nähe des Lecks (vgl. Abb. 4.5-6).

Tab. 4.5-2 Zeitliche Entwicklung und Bilanz der Verbrennungsrechnung mit möglichst großer Auswirkung (SBL-Fall)

Zone	zündet bei [s]	erlischt bei [s]	Dauer [s]	Bilanz
R12B	80903,3	80986,2	82,9	Bis zum Zeitpunkt 82000 s wurden 69 kg Wasserstoff verbrannt, wobei 8 GJ Energie freigesetzt wurden. Insgesamt wurden durch die Verbrennung von 1215 kg Wasserstoff 145 GJ Energie freigesetzt. Dies ist durch teils unrealistisch lange Verbrennungsvorgänge bedingt.
R13A	80904,8	80924,4	19,6	
R65B	80904,8	80928,0	23,1	
R05B	80905,5	80915,3	9,9	
R43B	80906,5	80992,5	86,0	
R14A	80908,0	80922,8	14,8	
R05C	80908,5	80910,8	2,3	
R15A	80909,4	80922,3	12,9	
R05A	80909,5	80911,7	2,2	
R66B	80909,8	80922,3	12,6	
R12C	80910,0	80952,3	42,3	
R12A	80910,0	80946,8	36,7	
R65C	80910,6	80936,6	26,0	
R20Ao	80911,1	80921,5	10,4	
R67A	80911,2	80920,5	9,3	
R20Ai	80911,3	80921,6	10,3	
R05D	80912,2	80942,7	30,5	
R66C	80912,5	80929,2	16,7	
R67B	80912,8	80925,4	12,7	
R82B	80912,8	80921,7	8,9	
R80H	80913,4	80923,1	9,7	
R66A	80914,3	80923,4	9,2	
R67C	80914,3	80925,8	11,5	
R21Ao	80914,7	80923,2	8,5	
R05A	80914,7	80998,0	83,4	
R21Ai	80914,8	80924,4	9,6	
D24A	80914,9	80921,1	6,3	
R43C	80914,9	81046,6	131,7	
R20Co	80915,2	80926,8	11,6	
R20Ci	80915,2	80927,5	12,3	

Zone	zündet bei [s]	erlischt bei [s]	Dauer [s]	Bilanz
D34A	80915,2	92097,2	11181,9	
D44A	80915,7	200319,8	119404,1	
R65A	80916,3	80933,9	17,6	
R21Co	80917,7	80927,1	9,4	
R13C	80919,0	80935,8	16,8	
R21Ci	80920,9	80929,9	9,1	
D24C	80921,0	80927,3	6,4	
D34C	80921,5	179410,7	98489,2	
R82C	80931,0	80952,2	21,2	
R12B	84471,6	178047,9	93576,4	
R05B	84760,4	85921,7	1161,3	
R65B	84768,4	164710,3	79941,9	
R12A	93301,4	94011,7	710,3	
R43B	93307,8	94092,2	784,4	
R13C	93322,3	93457,2	135,0	
R14C	93322,3	93450,8	128,5	
R43C	93327,1	94177,1	850,0	
R65C	93333,3	94148,4	815,1	
R67A	93341,7	93969,0	627,3	
R67B	93341,7	94023,3	681,7	
R82B	93368,0	93622,5	254,5	

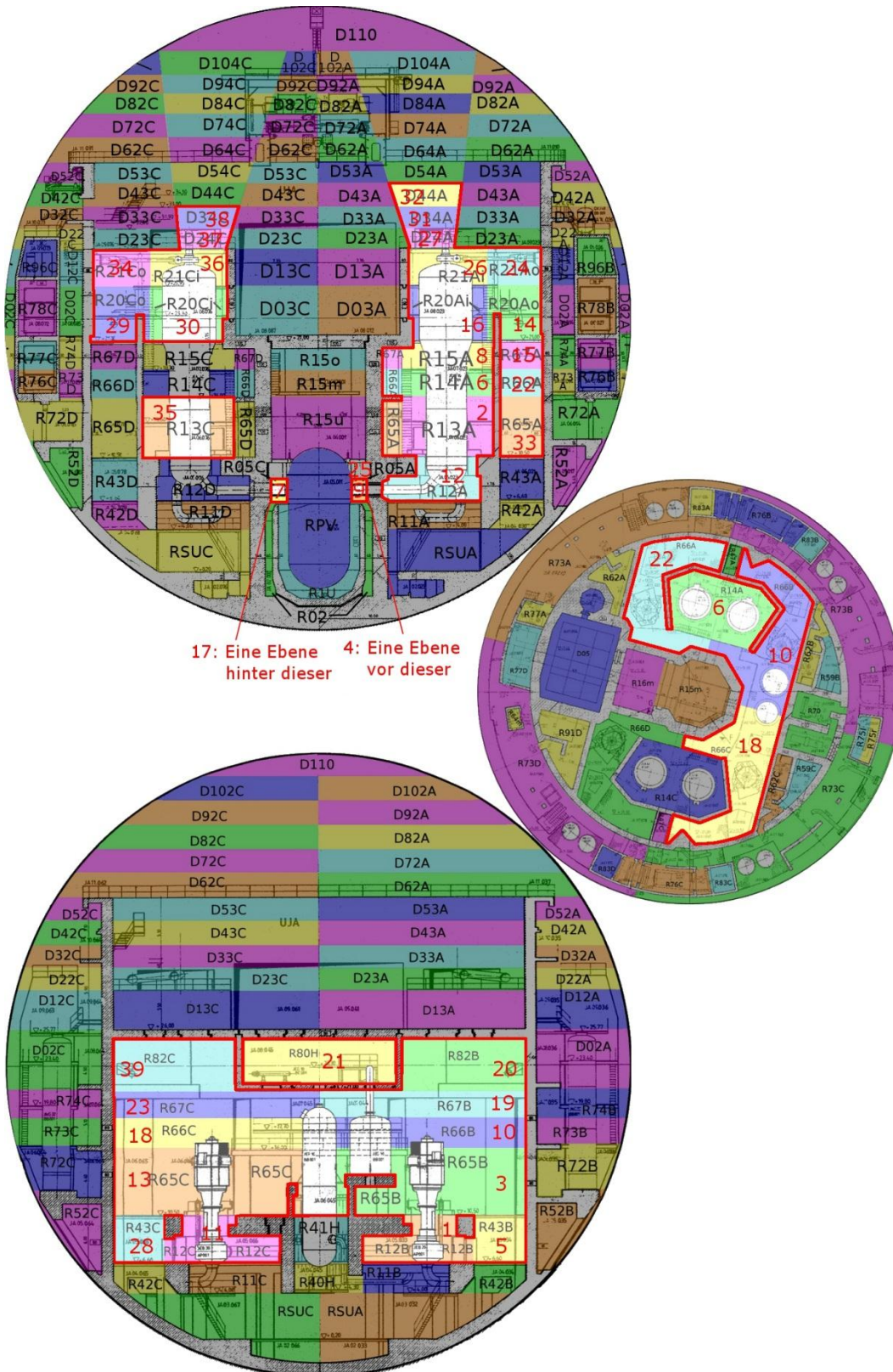


Abb. 4.5-6 Veranschaulichung der Verbrennung mit möglichst großer Auswirkung für den SBL-Fall

Der in Abb. 4.5-7 dargestellte Druckpeak fällt zwar gegenüber den anderen Rechnungen mit H₂-Verbrennung höher aus, ist aber mit gerade einmal 0,12 bar im Vergleich zu den anderen „worst-case“-Rechnungen gering. Trotzdem reicht dieser Druckpeak aus, um 4 weitere Berstelemente (je 2 mit je 1 m² Fläche in den Decken der Dampferzeugertürme) zu öffnen. Dies deshalb, da durch den geringen Druckpeak beim Öffnen des Lecks nur sehr wenige Berstelemente in den DE-Decken versagt haben.

Durch das Versagen der 4 zusätzlichen Berstelemente ergibt sich nachfolgend ein anderes Konvektionsverhalten. Es bildet sich ein deutlich ausgeprägter Konvektionsloop aus. So strömt die Atmosphäre durch alle Öffnungen im DE-Turm A aus den Anlagenräumen in den Dom und aus diesem in den DE-Turm C und die darunter befindlichen Anlagenräume zurück.

Der gesamte Druckverlauf der „worst-case“-Rechnung ist in Abb. 4.5-8 dargestellt. Bis auf einen leicht erhöhten Druckpeak ist im dargestellten Zeitbereich kaum ein Unterschied zur Rechnung ohne Verbrennung zu erkennen. Die Atmosphärentemperatur der obersten Domzone erhöht sich ebenfalls nur geringfügig (Abb. 4.5-9). Im Vergleich zum Fall mit Verbrennung gestartet durch Reko's bei 8 Vol.% H₂ werden nur 61 kg (bis 81000 s) H₂ verbrannt. Das sind 52 kg weniger als in diesem Vergleichsfall (siehe Abb. 4.5-10), aber wie in der Abbildung zu erkennen ist, ist der Massenumsatz schneller, was einen höheren Druckpeak zur Folge hat (siehe Abb. 4.5-7).

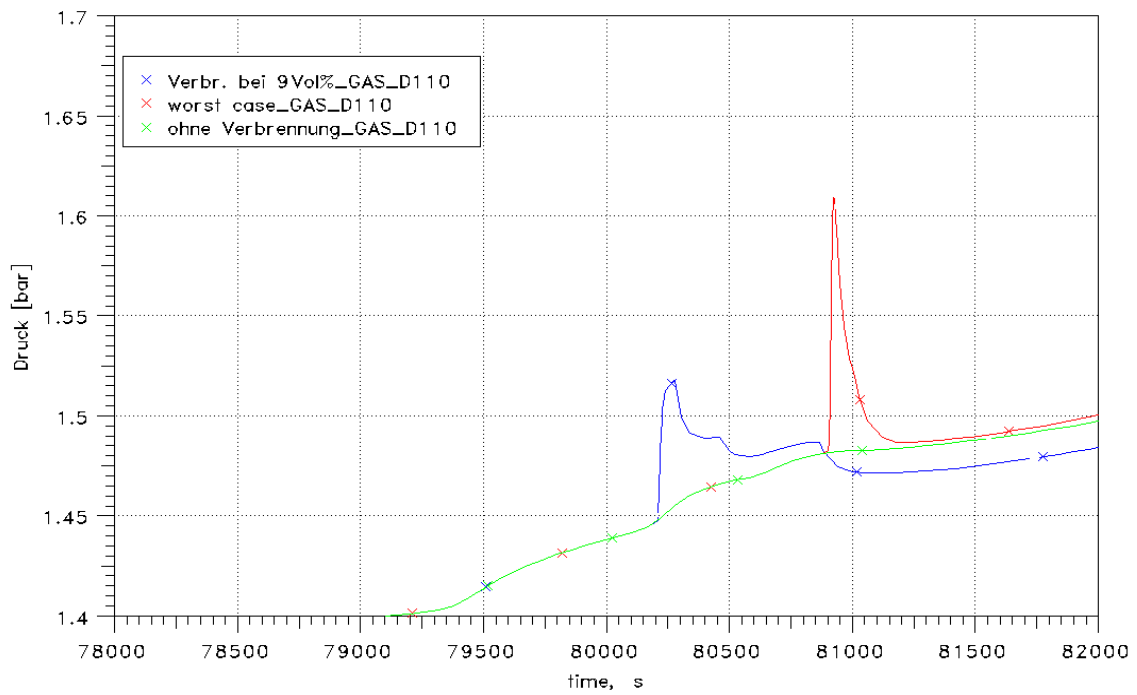


Abb. 4.5-7 SBL-Fall, Druckpeak im Fall mit "worst-case"-Verbrennung im Vergleich zum Fall mit Zündung bei 9 Vol.% an einem Reko und zum Basisfall

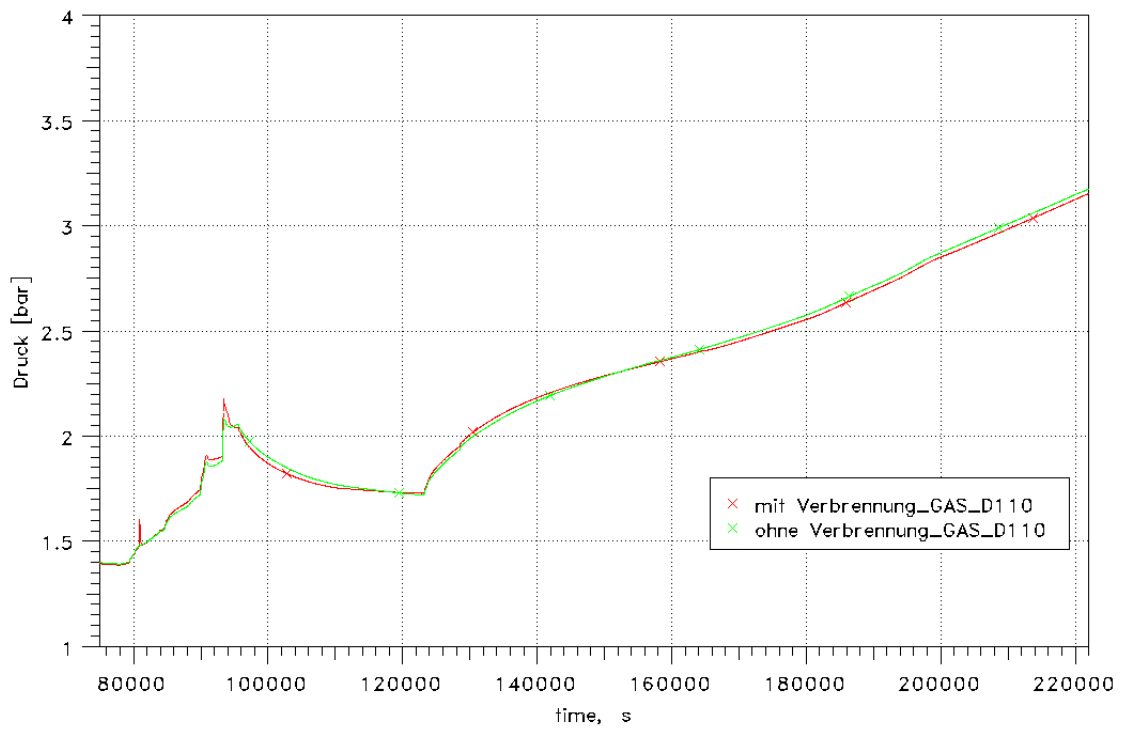


Abb. 4.5-8 SBL-Fall, Druckverlauf im Fall mit "worst-case"-Verbrennung im Vergleich zum Basisfall

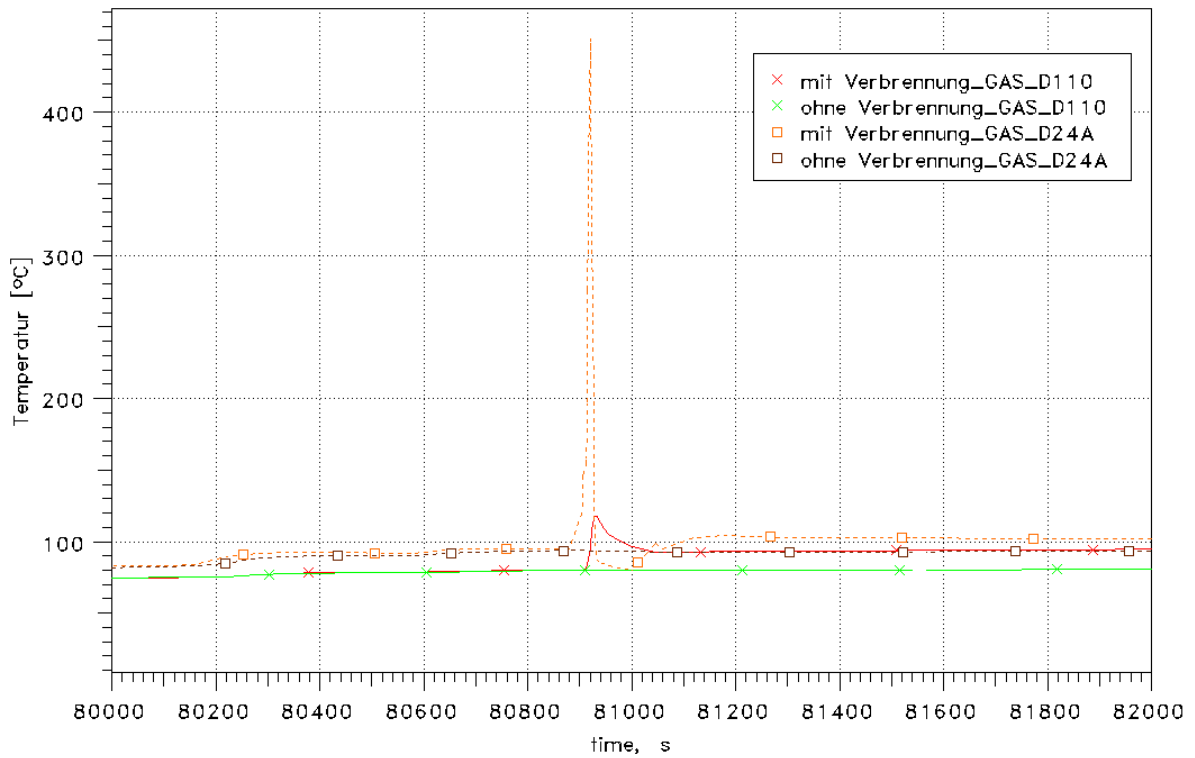


Abb. 4.5-9 SBL-Fall, Temperaturverlauf im Dom und im Plume über dem DE-Turm A im Fall mit "worst-case"-Verbrennung im Vergleich zum Basisfall

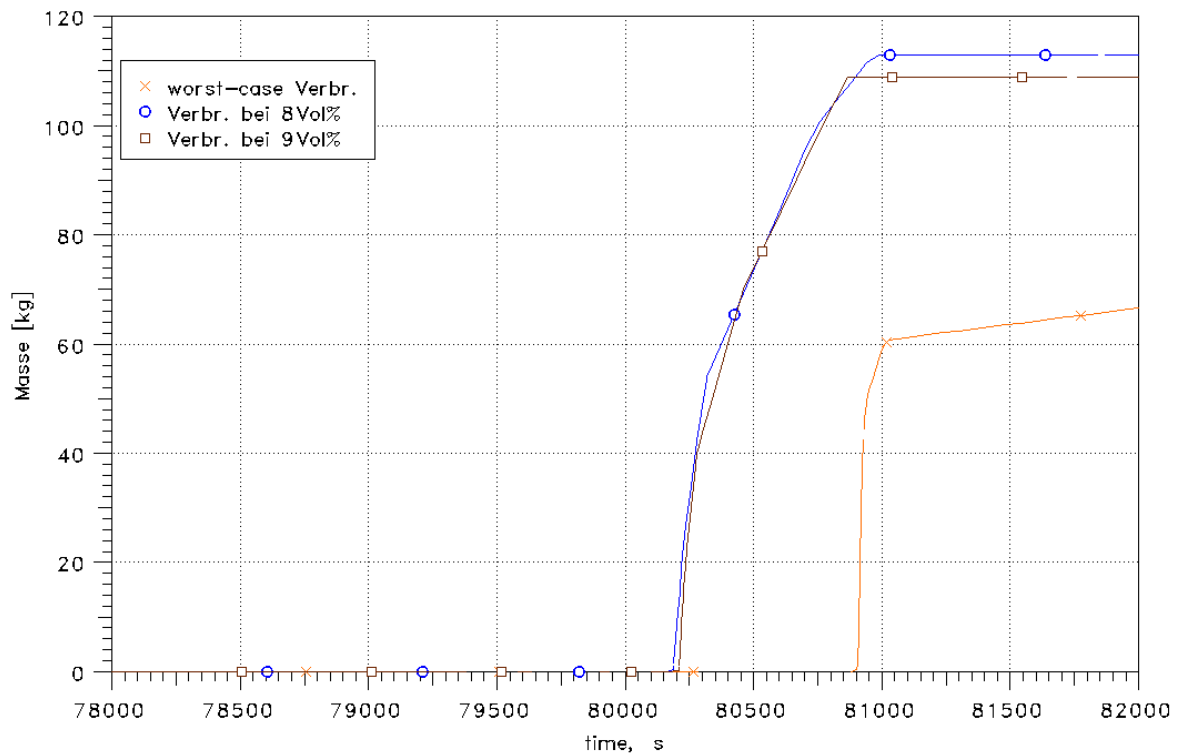


Abb. 4.5-10 SBL-Fall, Verbrannte H_2 -Masse in der "worst-case"-Rechnung im Vergleich zum Fall mit Reko-Zündung bei 8 Vol.%

4.5.5 MBL-Fall

Der zeitliche Ablauf der Verbrennung ist in Tab. 4.5-3 dargestellt. Abb. 4.5-11 veranschaulicht die komplexe Flammenausbreitung, die im Bereich der Reaktorgrube in R1U startet. Der Verbrennungsvorgang ist ähnlich weitreichend, wie bei der Analyse mit einer Verbrennung bei 10 Vol.% gezündet durch einen Reko (vgl. Kap. 4.4.6). Dort lag die Zündzone allerdings höher, in R13A. In R1U selbst ist kein Reko vorgesehen und die Zündquelle wurde unterstellt.

Tab. 4.5-3 Zeitliche Entwicklung und Bilanz der Verbrennungsrechnung mit möglichst großer Auswirkung (MBL-Fall)

Zone	zündet bei [s]	erlischt bei [s]	Dauer [s]	Bilanz
R1U	22500,0	22515,1	15,1	Bis zum Zeitpunkt 23000 s wurden 279 kg Wasserstoff verbrannt, wobei 33 GJ Energie freigesetzt wurden. Insgesamt wurden durch die Verbrennung von 396 kg Wasserstoff 47 GJ Energie freigesetzt.
R05B	22506,6	22550,6	44,1	
R12B	22507,0	22513,1	6,1	
R13A	22507,6	22511,3	3,8	
R65B	22507,6	22511,8	4,2	
R43B	22508,3	22528,6	20,4	
R05C	22508,4	22516,6	8,2	
R11B	22508,5	22530,2	21,6	
R05A	22508,8	22516,7	7,9	
R14A	22509,1	22512,7	3,7	
R66B	22509,3	22514,3	5,0	
R65C	22509,7	22526,2	16,5	
R15A	22509,8	22513,0	3,2	
R67B	22510,5	22517,2	6,7	
R66A	22510,6	22517,2	6,6	
R20Ao	22510,8	22516,0	5,2	
R20Ai	22510,8	22516,0	5,2	
R66C	22511,0	22520,1	9,1	
R67A	22511,0	22516,2	5,2	
R80H	22511,2	22518,3	7,1	
R82C	22511,4	22517,1	5,7	
R65A	22511,5	22521,9	10,4	
R82B	22511,5	22516,0	4,5	
R67C	22512,1	22518,4	6,2	
R21Ao	22512,5	22517,6	5,1	
D23A	22512,6	22556,7	44,2	
R21Ai	22512,7	22518,6	5,9	
D24A	22512,8	22516,8	4,0	
R20Ci	22512,9	22520,7	7,8	

Zone	zündet bei [s]	erlischt bei [s]	Dauer [s]	Bilanz
R20Co	22512,9	22518,4	5,5	
D34A	22513,2	22518,4	5,2	
R15C	22513,3	22520,6	7,3	
D44A	22513,6	22543,4	29,8	
D33A	22513,8	22552,2	38,5	
D54A	22514,1	22542,6	28,5	
R67D	22514,3	22520,3	6,0	
D64A	22514,7	22541,5	26,9	
R21Co	22515,0	22521,2	6,2	
R12A	22515,1	22529,6	14,5	
D23C	22515,2	22546,6	31,4	
D74A	22515,3	22552,9	37,6	
D43A	22515,7	23134,3	618,7	
D84A	22515,9	22552,6	36,7	
D94A	22516,6	24622,8	2106,2	
R21Ci	22516,8	22523,6	6,8	
R12B	22517,3	24355,6	1838,3	
D104A	22517,3	22552,2	34,9	
D24C	22517,6	22558,5	40,9	
D110	22518,7	22555,3	36,6	
D33C	22521,0	22565,8	44,8	
R43A	22525,4	22748,2	222,8	
R43B	22544,8	25083,0	2538,2	
R1U	30556,0	30817,0	261,0	
R1U	31140,0	31158,7	18,7	
R05D	31140,0	31584,8	444,8	

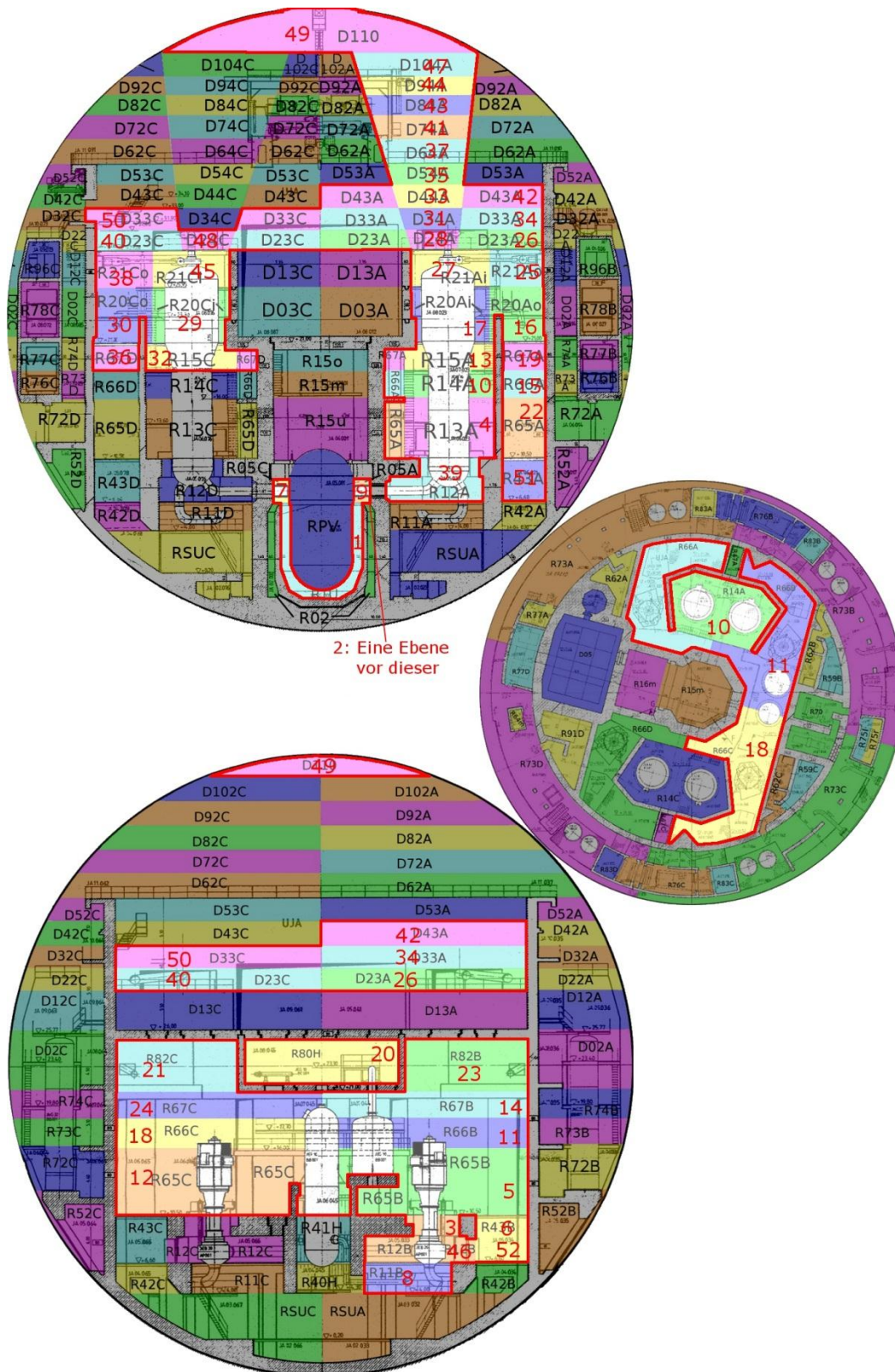


Abb. 4.5-11 Veranschaulichung der Verbrennung mit möglichst großer Auswirkung für den MBL-Fall

Wie die Darstellung in Abb. 4.5-12 zeigt, erhöht sich der Druck bei der „worst-case“-Rechnung um ca. 0,04 bar gegenüber der durch Reko's bei 10 Vol.% Wasserstoff initiierten Verbrennung. Dazu musste der Zündzeitpunkt nur um 18 s vorgezogen werden. Bis auf die Größe des Druckpeaks unterscheidet sich der Verlauf des SHB-Drucks nur unmerklich von dem im Falle einer durch Reko's gezündeten Verbrennung (siehe Abb. 4.4-15). Durch die Verbrennung versagt ein weiteres Berstelement zwischen R30 und R90C. Dies hat aber nur sehr geringe Auswirkungen auf den Unfallablauf.

Der Temperaturverlauf der „worst-case“-Rechnung Abb. 4.5-13 ist sehr ähnlich dem Fall mit Reko-Zündung bei 10 Vol.% Wasserstoff. Im Vergleich zum Fall mit Verbrennung gestartet durch Reko's bei 10 Vol.% H₂ werden 279 kg verbrannt. Das sind 28 kg mehr als in diesem Vergleichsfall (Abb. 4.5-14). In der Abbildung ist ebenfalls zu erkennen, dass die Masse im „worst-case“ Fall geringfügig schneller umgesetzt wird, was dementsprechend einen geringfügig höheren Druckpeak zur Folge hat. Insgesamt sind die Auswirkungen vergleichbar, wie zum Fall mit Zündung bei 10 Vol.% durch Reko's.

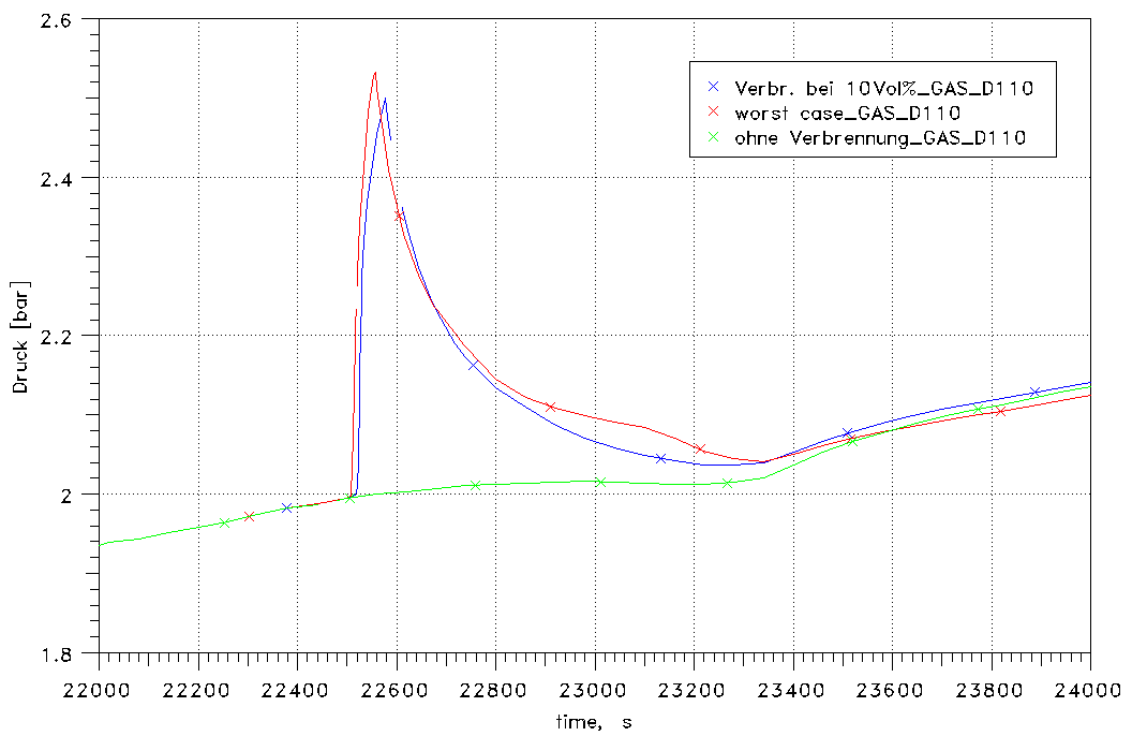


Abb. 4.5-12 MBL-Fall, Druckpeak der "worst-case"-Rechnung im Vergleich zum Fall mit Zündung an Reko's bei 10 Vol.% und zum Basisfall

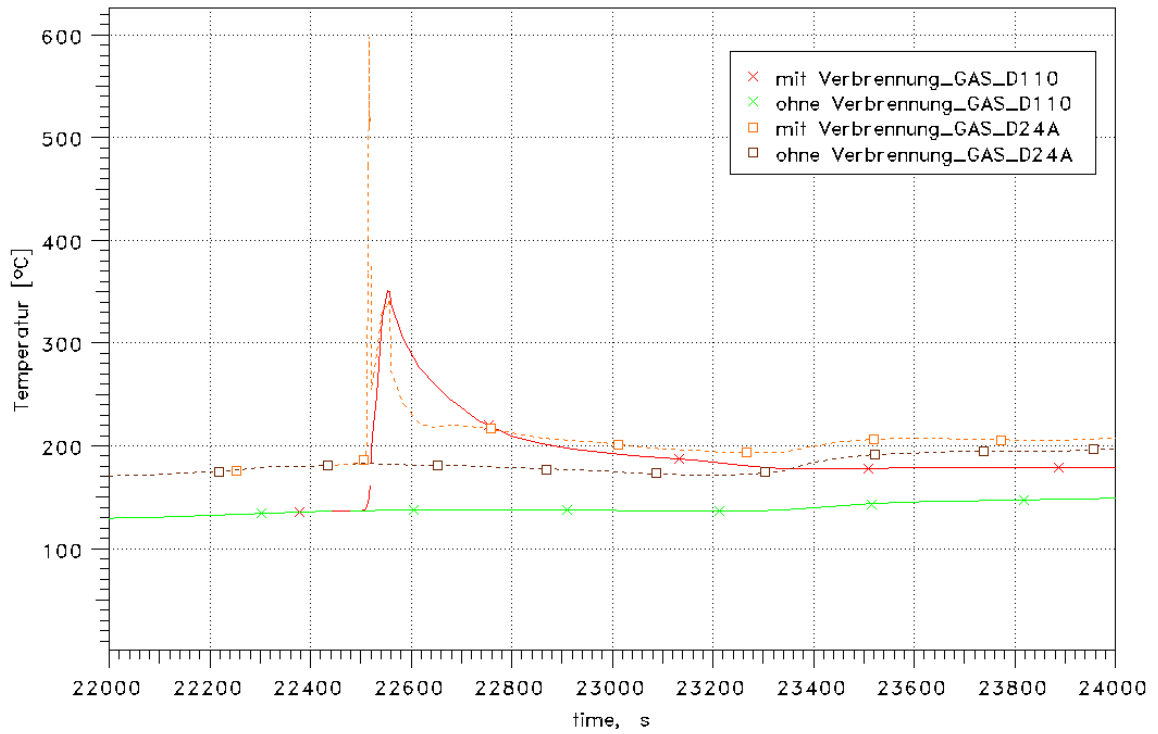


Abb. 4.5-13 MBL-Fall, Atmosphärentemperaturverlauf in der "worst-case"-Rechnung im Vergleich zum Basisfall

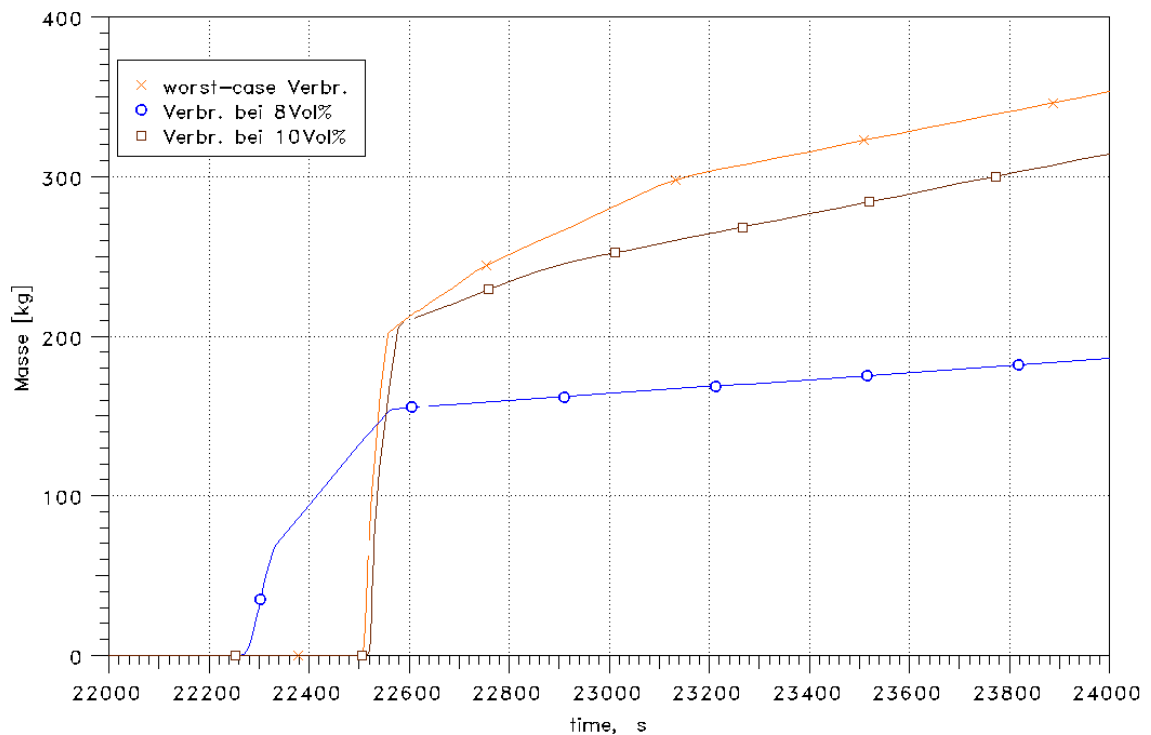


Abb. 4.5-14 MBL-Fall, Verbrannte H₂-Masse in der "worst-case"-Rechnung im Vergleich zum Fall mit Reko-Zündung bei 10 Vol.%

4.6 Diskussion der Rechnungen mit H₂-Verbrennung

Die in den vorgehend beschriebenen Rechnungen ermittelte Reihenfolge der Flammenausbreitung als Folge der Zündung des Gasgemisches in einzelnen Räumen/Zonen und damit verbunden die berechneten Ausbreitungsgeschwindigkeiten erscheinen realistisch. Stichprobenhafte Kontrollen anhand von Dreistoffdiagrammen und den zu erwartenden Flammenausbreitungsgeschwindigkeiten bei den vorliegenden H₂-Konzentrationen und Gaszusammensetzungen (insbesondere Dampfanteile), sowie den zu addierenden Gasgeschwindigkeiten, ergaben keine Widersprüche zu experimentellen Daten, die z.B. in den THAI-Versuchen /KAN 10/ ermittelt wurden bzw. auf diesen basierenden Abschätzungen.

Bekannt ist, dass die zur Berechnung von Turbulenzen in der Strömung und der Beschleunigung der Flammenfront benötigten freien Parameter im FRONT-Modell anhand von „Small Scale“ Versuchen (THAI, ENACEFF) bestimmt wurden /ECK 11/. Dabei ist die Geschwindigkeit, mit der der Wasserstoff verbrannt wird bzw. sich die Flamme ausbreitet, auch für die Höhe des Druckpeaks verantwortlich. Unsicherheiten in der Berechnung der Höhe des Druckpeaks verbleiben, da diese freien Parameter mangels experimenteller Daten nicht auch an größeren Versuchsanordnungen validiert werden konnten. Der berechnete Druckpeak und die Zeitdauer bis zum Maximum können aber als realistische Anhaltswerte betrachtet werden, da in THAI-Experimenten bei ähnlichen Gemischzusammensetzungen vergleichbare Flammfrontgeschwindigkeiten auftraten /KAN 10/. Der berechnete Druckpeak sowie der sich ergebende Gesamtdruck sind in den berechneten Fällen gering. Eine Gefährdung der SHB-Integrität ist nicht zu erwarten, da eine relativ hohe Marge zum Auslegungsdruck des SHB besteht. Eine dynamische Strukturanalyse zur Belastung des SHB durch Verbrennungslasten wurde im Vorhaben ebenfalls durchgeführt und ist in /SIV 11/ dokumentiert. Die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten COCOSYS-Analysen mit Verbrennung ergeben Lastannahmen für strukturmechanische Untersuchungen, die durch die durchgeführten Berechnungen, insbesondere durch die mit längerer Impulsdauer abgedeckt sind. Demzufolge waren Analysen basierend auf den COCOSYS-Ergebnissen nicht mehr erforderlich.

Wie bereits angesprochen, bereitet auch das letztlich verwendete Flammfrontmodell in COCOSYS immer noch Schwierigkeiten in einzelnen Fällen bezüglich der Berechnung des Erlöschens einer Wasserstoffverbrennung in einzelnen Raumbereichen. Dies sind in der Regel einzelne Zonen in COCOSYS, die volumenmäßig klein sind und keine in

sich abgeschlossenen Räume der Anlage darstellen. Dies führt vor allem bei Rechnungen mit Zündungen bei niedrigen H_2 -Konzentrationen zu Problemen mit teilweise extrem langen Verbrennungszeiten, durch die große Mengen an H_2 in einem langen Zeitraum verbrannt werden. Inwiefern eine diesbezüglich korrekte Simulation danach oder langfristig zu anderen Abläufen oder z.B. zu wiederholten Zündungen führen könnte, kann nicht geklärt werden. Solche „stehenden Flammen“ mit einem langsamen Abbrand des Gasgemisches erscheinen generell unrealistisch.

Zum Auffinden des Zeitpunktes und der Zone, in der die (äußerst unwahrscheinliche) „worst-case“-Verbrennung in den untersuchten Fällen initiiert wurde, wurden Dreistoffdiagramme verwendet, die aus Rechnungen ohne Verbrennung stammen. Das Auswahlverfahren birgt Unsicherheiten und setzt generell das Vorhandensein einer Zündquelle voraus. Nach der Entzündung einer Zone kommt es bedingt durch die Expansion zu einem Gasvolumenstrom in angrenzende Zonen und es ist möglich, dass diese dadurch erst brennbar werden. Auch könnte zu einem etwas anderen als dem gewählten Zündzeitpunkt möglicherweise eine noch etwas größere Zahl von Zonen von der Verbrennung erfasst werden. Letztlich wurde bei diesen Rechnungen pessimistisch angenommen, dass am jeweiligen Ort eine Zündquelle exakt zu diesem Zeitpunkt gegeben ist. Das Ergebnis zeigt einen ca. 25 % höheren Druckpeak beim ND-Fall und einen 50 % höheren beim SBL-Fall. Allerdings sind die Absolutwerte der Druckerhöhung bei letzterem gering. Beim MBL-Fall war der Unterschied nicht nennenswert.

4.7 Rechnungen mit (dynamischer) Aerosolsimulation und ohne H_2 -Verbrennung

4.7.1 Zielsetzung

Ein Ziel des Vorhabens war es, durch abschließende COCOSYS-Analysen mit dynamischer Aerosolsimulation, d.h. vollständiger Berechnung des Transports und der Ablagerung der Spaltprodukte und Aerosole im SHB zu zeigen, welchen Einfluss dies im Vergleich zu den vorher beschriebenen Rechnungen mit vorgenommener „statischer“ Verteilung der Spaltprodukte auf verschiedene Zonen (Wasser- und Gasphase) und deren Strukturen hat. Aufgrund der vielfältigen Wechselwirkung und der unterschiedlichen konvektiven Vorgänge im SHB lassen sich die Auswirkungen einer vollständigen Aerosolsimulation nicht ohne Analysen abschätzen. So kann z.B. ein größerer Eintrag von Spaltprodukten in die Wasservorlage einer Zone zu einer schnelleren Verdamp-

fung des Restwassers führen oder beim Eintrag in den SHB-Sumpf können dort Siedezustände auftreten¹². Auch lassen sich nur so Abwaschvorgänge von Aerosolen von Wänden und Böden genau erfassen.

Für die beiden neuen Fälle SBL und MBL waren aus den MELCOR-Analysen noch die erforderlichen Ausgangsdaten zur Berücksichtigung verschiedener Klassen von Spaltprodukten analog der MELCOR-Einteilung erhältlich. Zunächst wurde verglichen, ob die integral in den SHB eingespeiste Energie (durch Leckmassenstrom, Wärmeabgabe von Strukturen und von der Schmelze-Beton-Wechselwirkung, NZL der Aerosole) für die Analysen mit und ohne dynamische Aerosolsimulation übereinstimmen. Abb. 4.7-1 und Abb. 4.7-2 zeigen für MBL- und SBL-Fall den zeitlichen Verlauf der insgesamt in den SHB eingespeisten Energie. In den Abbildungen „rot“ dargestellt ist der Verlauf der insgesamt eingespeisten Energie für die Fälle ohne (dynamische) Aerosolsimulation (Legende: ... INJECTION) im Vergleich jeweils zur neuen Rechnung mit Aerosolsimulation in „grün“ (Legende: ... dynamic). Zwischen diesen beiden Größen bestehen für beide Rechnungen jeweils keine Unterschiede. Des Weiteren wurde die integral freigesetzte Energie durch die NZL der Spaltprodukte („blau“, Legende: ...decay_heat) für die Fälle mit dynamischer Aerosolsimulation getrennt dargestellt. Es wird ersichtlich, dass ihr Beitrag an der insgesamt in den SHB eingetragenen Energie vergleichsweise gering ist.

¹² Auf Besonderheiten bzgl. des modellierten Aerosolverhaltens bzw. der Abwaschvorgänge von Aerosolen von Wänden und Böden wurde in Abschnitt 2.1.6 eingegangen.

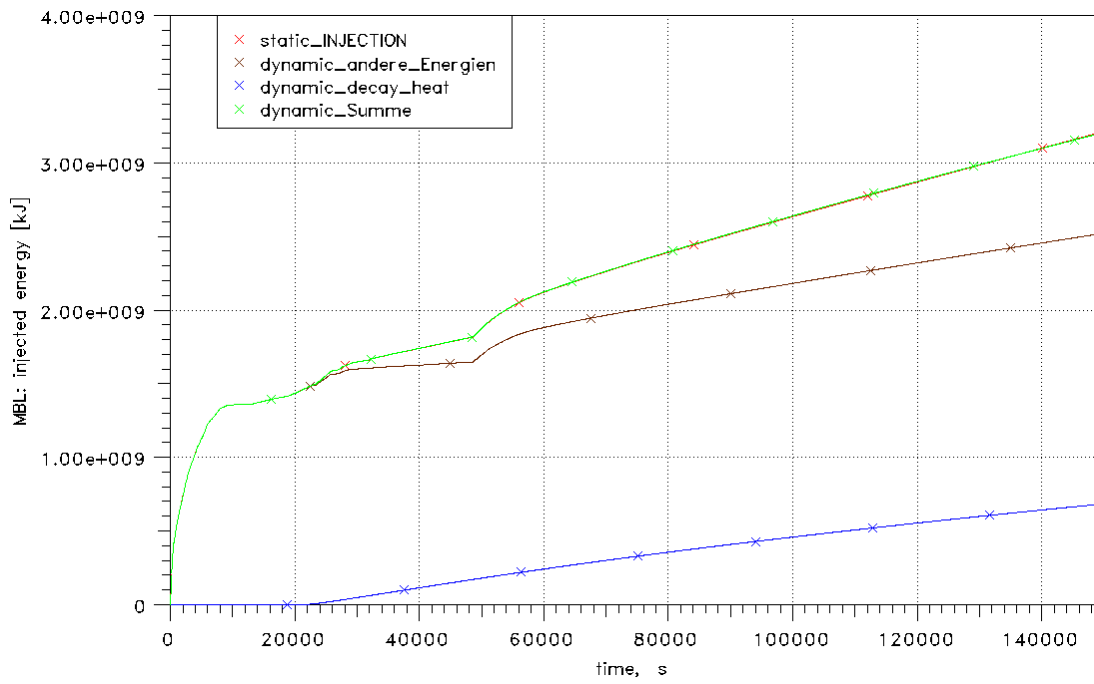


Abb. 4.7-1 MBL-Fall, Vergleich der in den SHB eingespeisten Energie für die Fälle ohne und mit dynamischer Aerosolsimulation

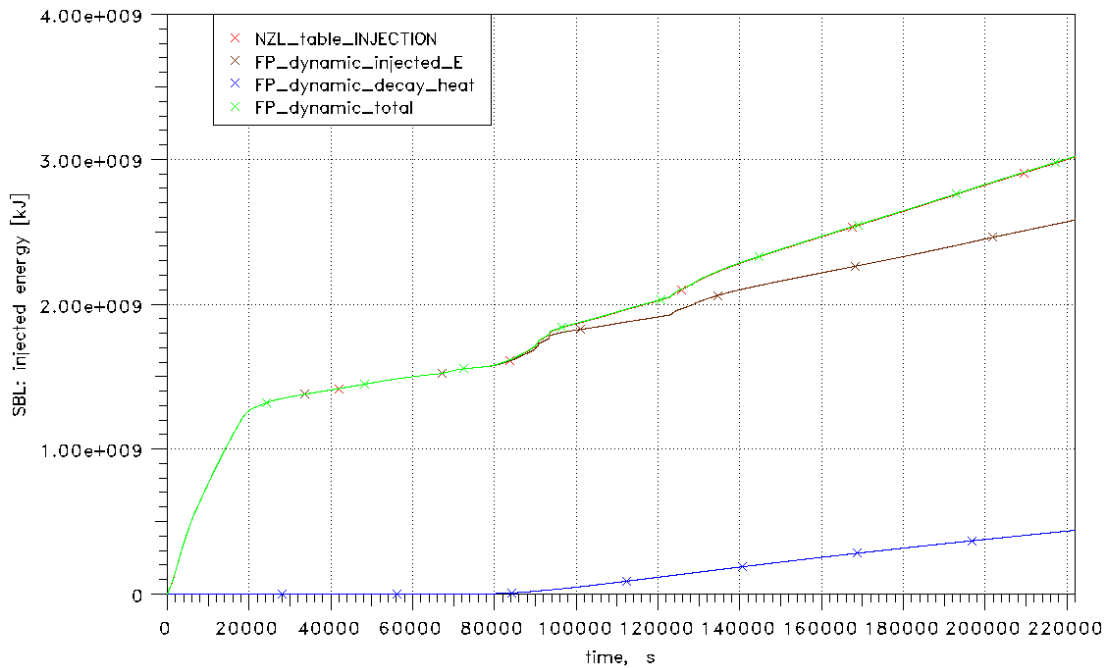


Abb. 4.7-2 SBL-Fall, Vergleich der in den SHB eingespeisten Energie für die Fälle ohne und mit dynamischer Aerosolsimulation

4.7.2 MBL-Fall

In Abb. 4.7-3 werden die freigesetzte NZL (Wärmestrom) der luftgetragenen, im Wasser gelösten sowie der auf Strukturen abgelagerten Spaltprodukte für beide Rechnungen (mit und ohne dynamische Aerosolsimulation) detailliert verglichen. Hier zeigt sich, dass die in das Wasser freigesetzte Nachzerfallsleistung einen deutlich höheren Anteil im Fall mit (dynamischer) Aerosolsimulation hat, d.h. die für die anderen Fälle abgeschätzte Verteilung der Spaltprodukte diesen Effekt unterschätzt. Auch nimmt der Anteil der NZL der im Wasser befindlichen Spaltprodukte deutlich schneller zu. Das Maximum wird bei ca. 38500 s erreicht und nicht erst bei ca. 58500 s, wie im Fall ohne dynamische Aerosolsimulation angenommen. Es ist ferner zu erkennen, dass sich die Summe der freigesetzten NZL (Wärmestrom) für die beiden Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation leicht unterscheidet. Für die Fälle ohne dynamische Aerosolsimulation ist die insgesamt freigesetzte NZL geringfügig geringer. Gründe dafür sind in der vereinfachten Simulation der Freisetzung der NZL in den anderen Fällen ohne dynamische Aerosolsimulation zu suchen.

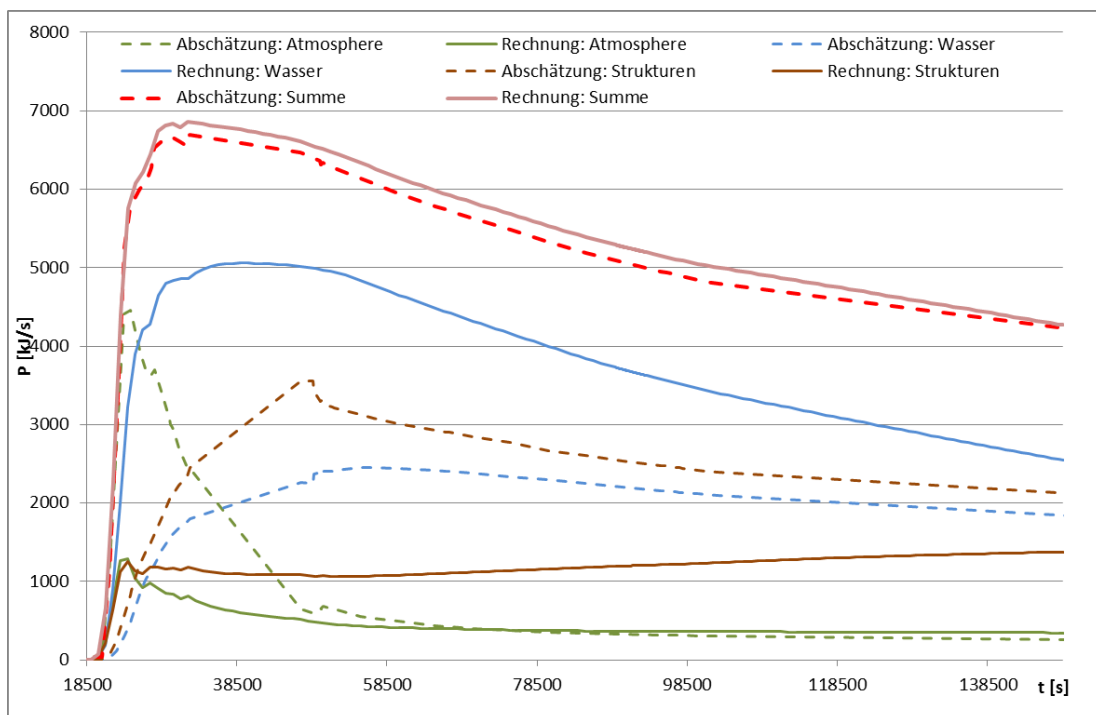


Abb. 4.7-3 MBL-Fall, Verteilung der NZL in den Fällen mit dynamischer (Rechnung) und ohne Aerosolsimulation (Abschätzung)

Der Vergleich der beiden Analysen für den MBL-Fall erfolgt zunächst anhand des SHB-Druckverlaufes. Der SHB-Druck (Abb. 4.7-4) steigt im Fall mit (dynamischer) Aerosol-

simulation nach Beginn der Kernzerstörung etwas weniger an (ca. 0.1 bar). Der SHB-Druckabfall nach RDB-Versagen bis zum Wassereinbruch in die Reaktorgrube ist etwas niedriger, als im Vergleichsfall. Danach ist der SHB-Druckanstieg tendenziell etwas größer bis zum Rechnungsende.

Im MBL-Fall öffnet sich in beiden Rechnungen die gleiche Anzahl von Berstmembranen in den Decken der Dampferzeugertürme. Der verstärkte Eintrag von Spaltprodukten in den Sumpf, die höhere Wassertemperatur (Abb. 4.7-7) und die dadurch erhöhte Verdampfungsrate haben einen sehr geringen kaum sichtbaren Einfluss auf die Massenströme durch die Dampferzeugertürme (dargestellt in Abb. 4.7-5).

Die erhöhte Verdampfungsrate des Sumpfes (Dampf bei Sättigungstemperatur) zusammen mit der im Vergleich zum Fall ohne Aerosolsimulation geringeren NZL der in die Atmosphäre des SHB freigesetzten Aerosole hat eine Reduktion der Atmosphären-temperatur in den Zonen zur Folge (siehe Abb. 4.7-6 bzw. Abb. 4.7-7). Dagegen ist die Sumpftemperatur deutlich höher, bedingt durch die stärkeren Abwascheffekte und die damit höhere freigesetzte NZL (Legende FLUID_RSUA in Abb. 4.7-7).

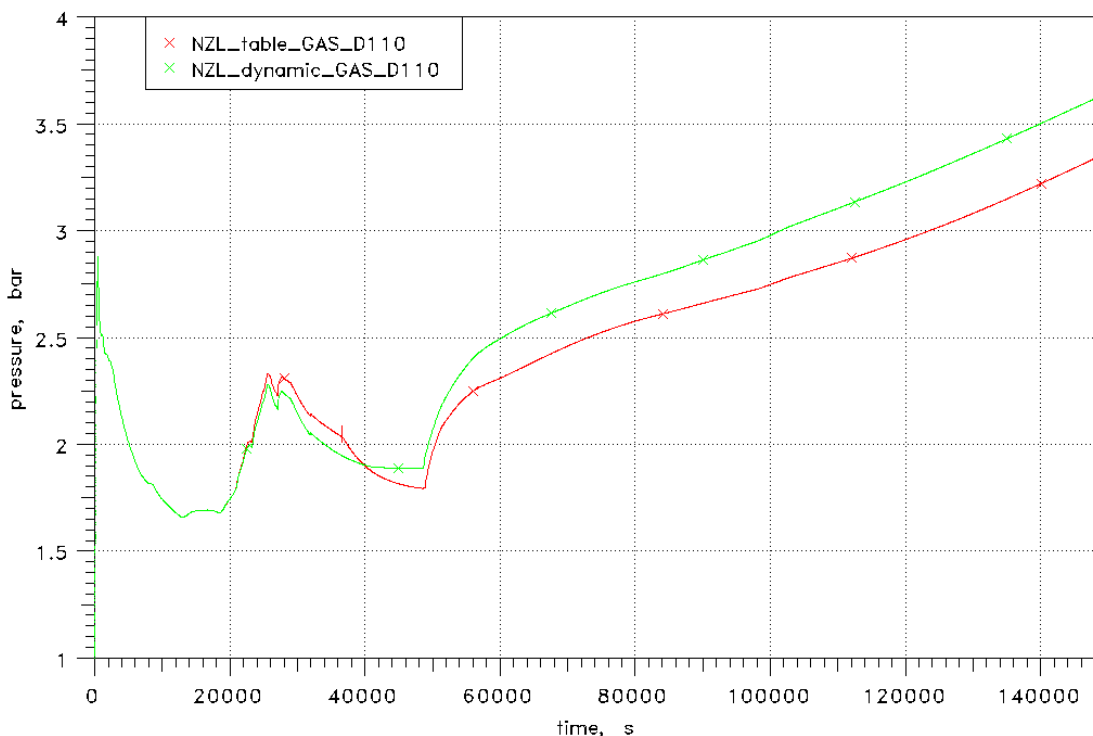


Abb. 4.7-4 MBL-Fall, Druckverlauf für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation

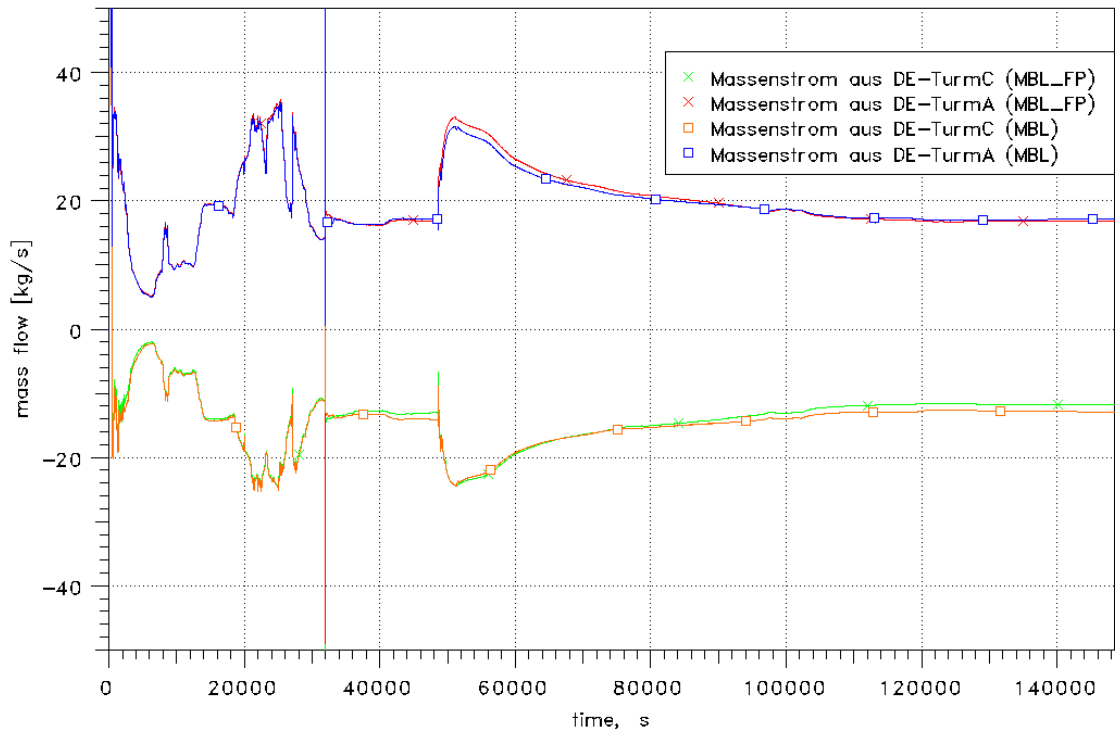


Abb. 4.7-5 MBL-Fall, Vergleich der Massenströmen aus den Dampferzeugertürmen zum Dom für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation

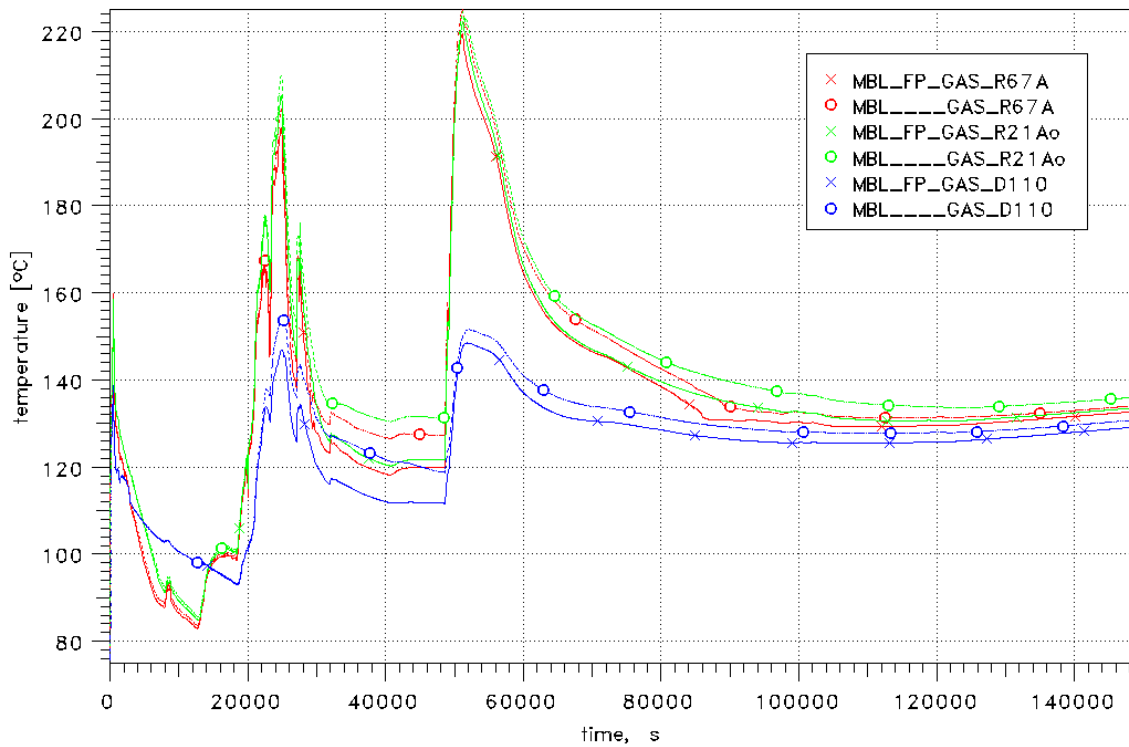


Abb. 4.7-6 MBL-Fall, Vergleich ausgewählter Raumtemperaturen im oberen Bereich des SHB für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation

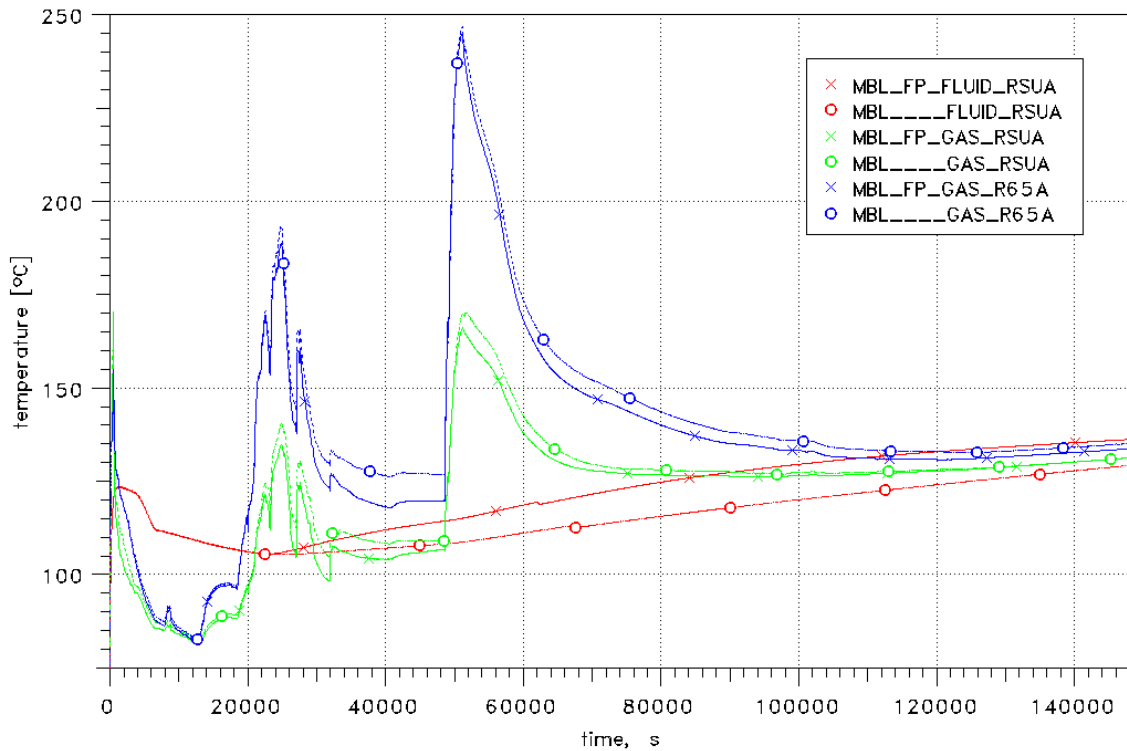


Abb. 4.7-7 MBL-Fall, Vergleich ausgewählter Raumtemperaturen im unteren Bereich des SHB und im Sumpf (RSUA) für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation

Die Unterschiede in der Verteilung der NZL bzw. der Aerosole auf die Strukturen machen sich besonders bei deren Aufheizung bemerkbar (siehe Abb. 4.7-8). Zusätzlich bedingt die Simulation der Abwascheffekte von Aerosolen von Strukturen eine stark ausgeprägte, zeitlich abhängige Diskrepanz zwischen beiden Rechnungen bzgl. der Strukturtemperaturen.

In Abb. 4.7-9 und Abb. 4.7-10 sind die Wasserstoffkonzentrationen in ausgewählten Raumbereichen dargestellt. Der Einfluss durch die dynamische Simulation der Aerosolverteilung ist relativ gering und wird nur in der Phase zwischen RDB-Versagen bei 31867s und Versagen des biologischen Schildes bei 48597s durch die Erosion deutlicher sichtbar.

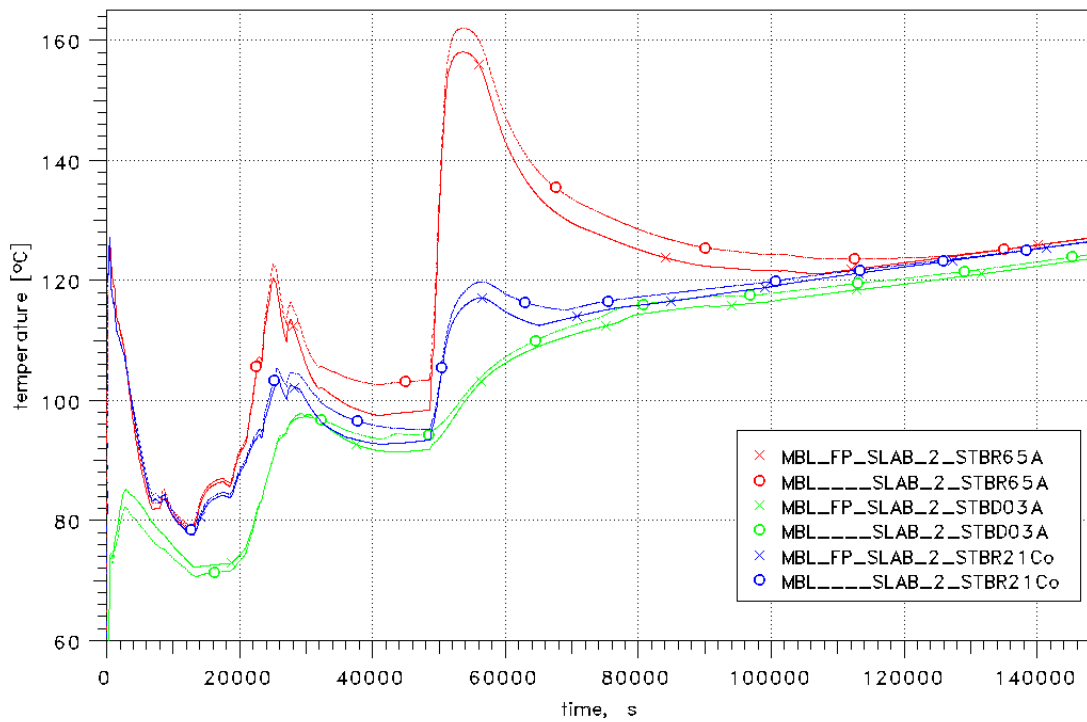


Abb. 4.7-8 MBL-Fall, Vergleich ausgewählter Strukturtemperaturen in verschiedenen Bereichen des SHB für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosol-simulation

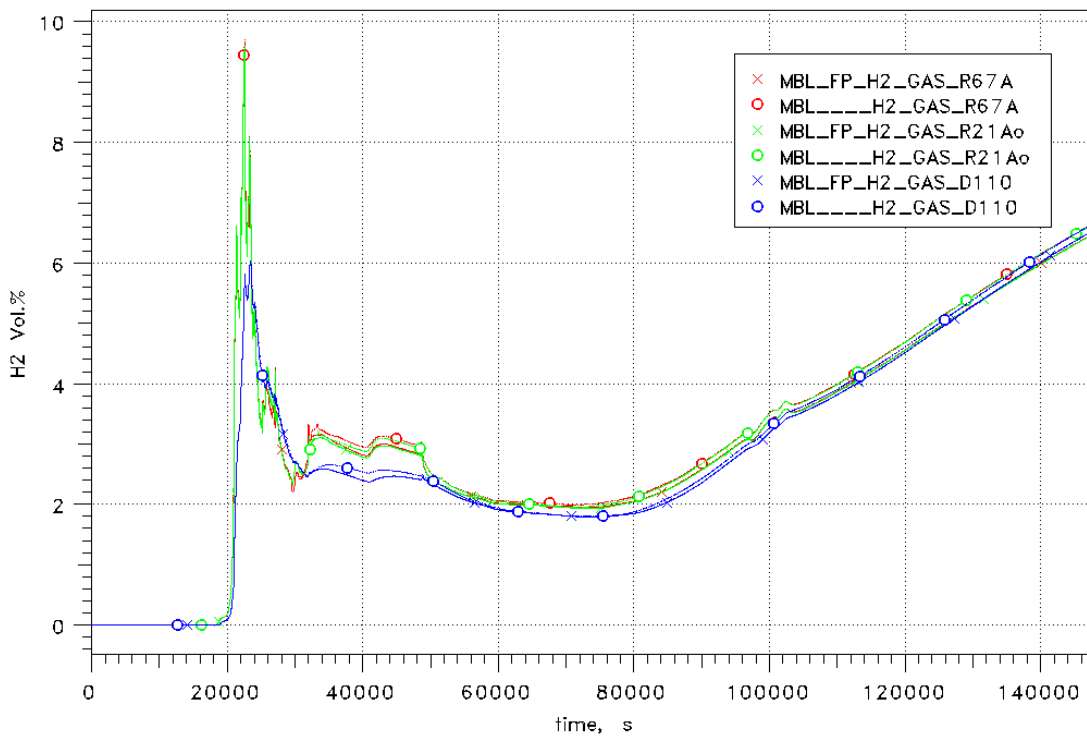


Abb. 4.7-9 MBL-Fall, H₂-Konzentration ausgewählter, innerhalb des SHB hoch gelegener Räume, für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation

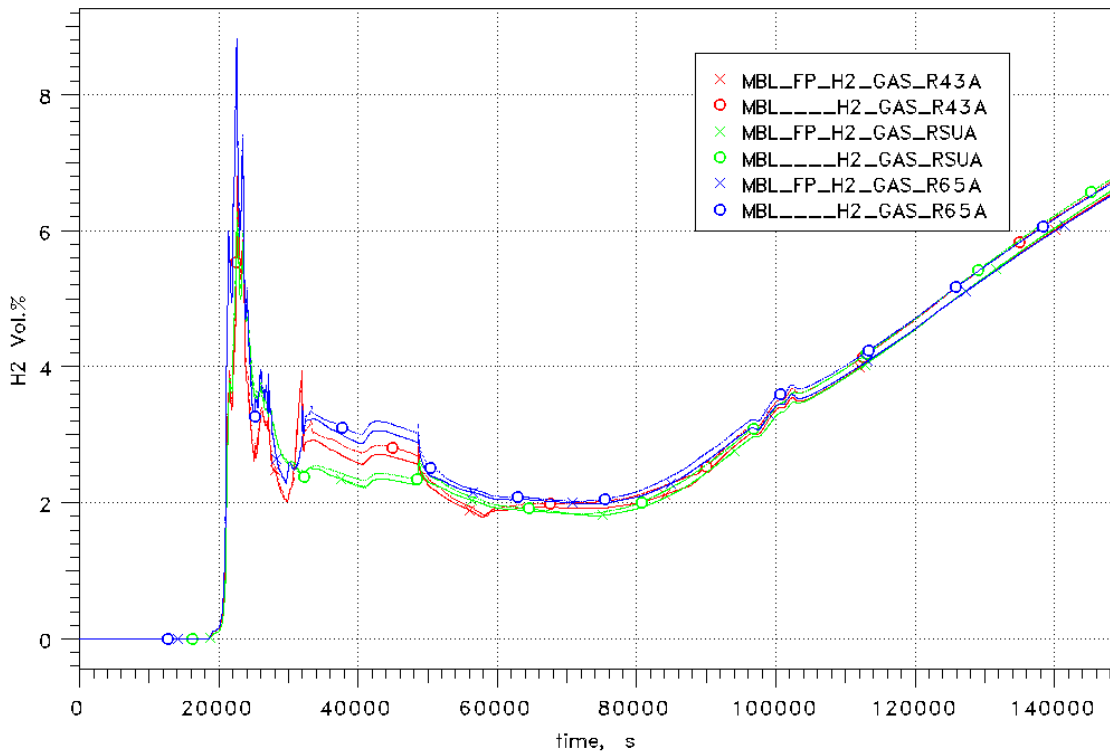


Abb. 4.7-10 MBL-Fall, H₂-Konzentration ausgewählter, innerhalb des SHB tief gelegener Räume, für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation

4.7.3 SBL-Fall

In Abb. 4.7-11 werden die freigesetzte NZL der luftgetragenen, im Wasser gelösten sowie der auf Strukturen abgelagerten Spaltprodukte für beide Rechnungen ohne und mit dynamische Aerosolsimulation detailliert verglichen. Hier zeigt sich, dass auch in diesem Fall die in das Wasser freigesetzte Nachzerfallsleistung einen deutlich höheren Anteil im Fall mit (dynamischer) Aerosolsimulation hat, d.h. die für die anderen Fälle abgeschätzte Verteilung der Spaltprodukte diesen Effekt unterschätzt. Auch nimmt der Anteil der NZL der im Wasser befindlichen Spaltprodukte deutlich schneller zu; allerdings sind die Maxima nur ca. halb so hoch, was mit der relativ langen Zeit bis zur ersten Freisetzung aus dem Kern, und somit der generell niedrigeren NZL zusammenhängt. Das Maximum der freigesetzten NZL in das Wasser wird bei ca. 105000 s erreicht und nicht erst bei ca. 130000 s, wie im Fall ohne dynamische Aerosolsimulation angenommen. Es ist ferner zu erkennen, dass sich die Summe der freigesetzten NZL für die beiden Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation auch in diesem Fall leicht unterscheidet. Für die Fälle ohne dynamische Aerosolsimulation ist die insgesamt freigesetzte NZL geringfügig geringer. Gründe dafür sind die Gleichen, wie oben.

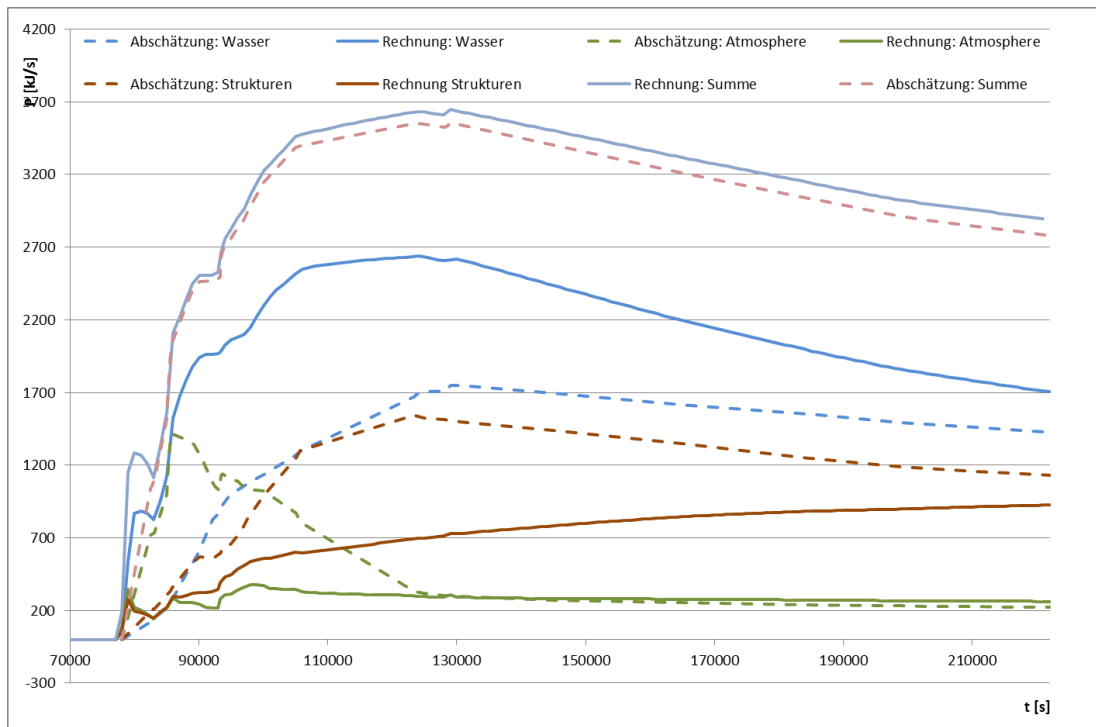


Abb. 4.7-11 SBL-Fall, Verteilung der NZL in den Fällen mit dynamischer (Rechnung) und ohne Aerosolsimulation (Abschätzung)

Der Vergleich der beiden Analysen erfolgt auch hier zunächst anhand des SHB-Druckverlaufes. Hier ist die Auswirkung auf den Druck durch die dynamische Aerosolsimulation fast vernachlässigbar (siehe Abb. 4.7-12). Dies verwundert zunächst, da auch hier der Vergleich der freigesetzten NZL der luftgetragenen, im Wasser gelösten sowie auf Strukturen abgelagerten Spaltprodukte für beide Rechnungen deutliche Unterschiede zeigt. Durch den in der Rechnung mit dynamischer Aerosolsimulation integral höheren Anteil der ins Wasser abgegebenen Wärme wird dort auch eine höhere Verdampfungsrate erwartet. Die Auswertung zeigt, dass dies nur teilweise der Fall ist. In Abb. 4.7-13 sind die Differenz des gesamten Kondensatflusses und der gesamten Verdampfungsraten aus Wasserpools für die beiden Rechnungen dargestellt. Dabei wurden die Werte der Rechnung ohne Aerosolsimulation von den Werten der Rechnung mit dynamischer Aerosolsimulation abgezogen. Der Vergleich erfolgt für die relevante Störfallphase ab ca. 95000 s. Die Kondensationsrate in den Rechnungen mit dynamischer Aerosolsimulation (SBL_FP) ist für einen größeren Zeitbereich deutlich geringer (negativ) als im Vergleichsfall, die Verdampfungsraten hingegen sind nahezu identisch. Dies lässt sich durch den überschätzten Energieeintrag in die Strukturen (NZL der abgelagerten Spaltprodukte) im Fall ohne dynamische Aerosolsimulation erklären. Trotz dieser Unterschiede ist der Einfluss auf den SHB-Druck (siehe Abb. 4.7-12) vergleichsweise gering.

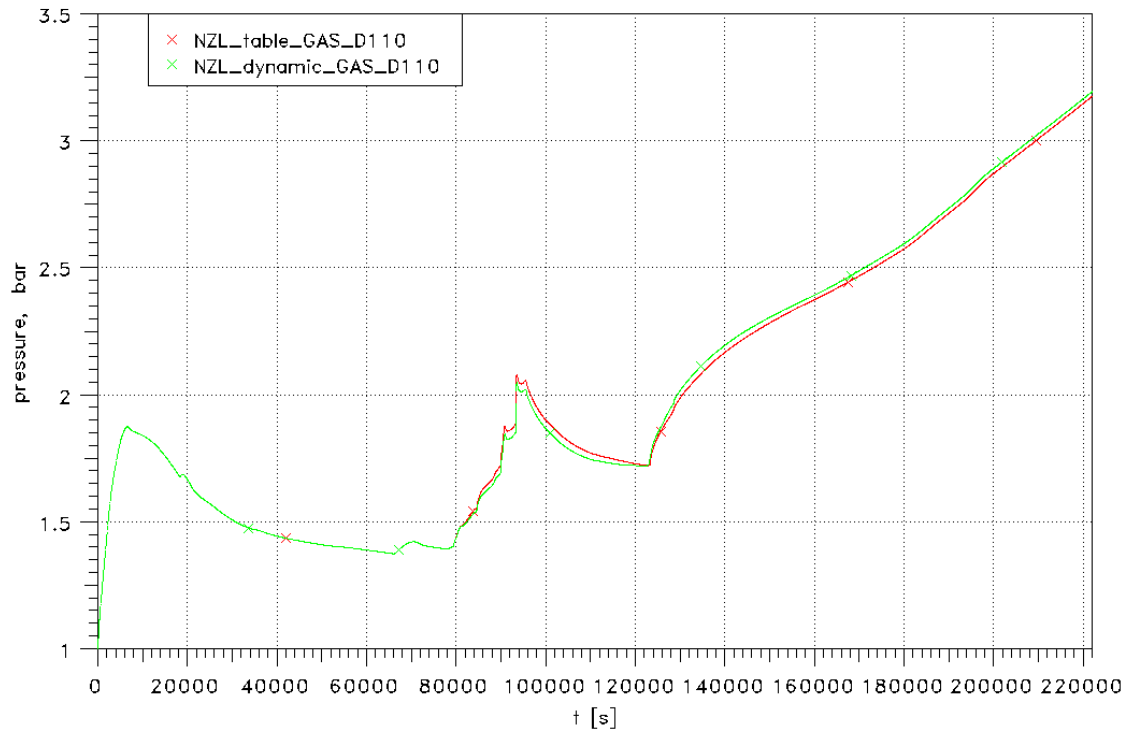


Abb. 4.7-12 SBL-Fall, Druckverlauf für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosol-simulation

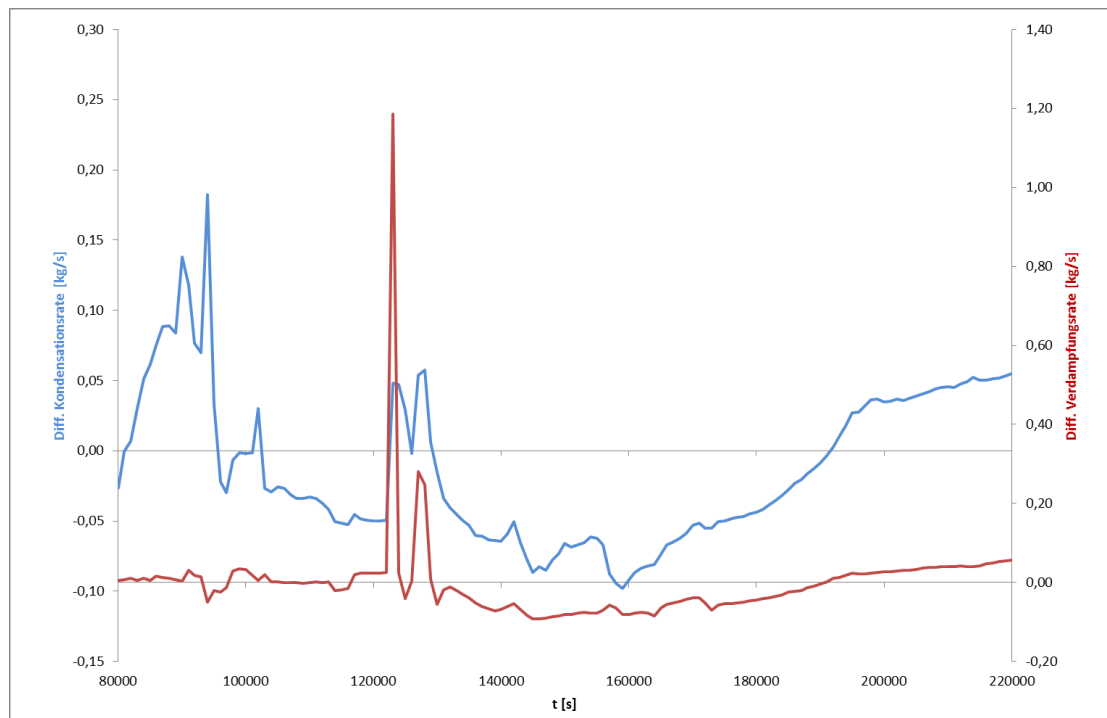


Abb. 4.7-13 SBL-Fälle, Differenz des Kondensatflusses bzw. der Verdampfungsrates

Während im MBL-Fall die Unterschiede zwischen beiden Fällen (mit/ohne dynamische Aerosolsimulation) eher lokal waren, ergeben sich im SBL-Fall auch global geänderte

Randbedingungen (Versagen von Berstmembranen). Bei beiden Rechnungen versagen bedingt durch das unterstellte kleine Leck nach einigen Sekunden Berstmembranen mit je 1 m² in den Decken der beiden Dampferzeugertürme. Im Fall ohne dynamische Aerosolsimulation versagen beim RDB-Versagen (bei ca. 30 bar Systemdruck) nochmals Berstmembranen mit einer Fläche von 1 m² im DE-Turm C. Im anderen Fall mit dynamischer Aerosolsimulation (Legende: SBL_FP) hingegen versagen zu diesem Zeitpunkt Berstmembranen mit einer Gesamtfläche von 2 m² auf dem anderen DE-Turm A. Die sich ergebenden Strömungen durch diese Öffnungen unterscheiden sich daher ab diesem Zeitpunkt deutlicher. Sie sind für beide Fälle in Abb. 4.7-14 dargestellt. Die verbleibenden Unsicherheiten in der Simulation des Versagens der Berstmembrane generell sind höher zu bewerten, als der Einfluss durch die dynamische Aerosolsimulation auf deren Verhalten.

In Abb. 4.7-15 und Abb. 4.7-16 sind Temperaturen in ausgewählten Zonen und dem Sumpf im Vergleich der beiden Rechnungen dargestellt. Insbesondere durch die stärkere Konvektion im Fall mit dynamischer Aerosolsimulation bedingt sind die Temperaturen in den Anlagenräumen deutlich geringer, da Wärme besser an Strukturen abgegeben werden kann. Überlagert bleiben die Effekte durch die Unterschiede in der Aerosolsimulation, die hier nicht quantifizierbar sind.

Die erhöhte Konvektion zusammen mit der unterschiedlichen Verteilung der NZL auf die Strukturen und die Abwascheffekte der Aerosole bedingen auch wieder für deutlich unterschiedliche Strukturtemperaturen in den Anlagenräumen und eine geringfügig erhöhte Strukturtemperatur im Dombereich (Abb. 4.7-17).

Die gegenüber dem Fall ohne dynamische Aerosolsimulation erhöhte Konvektion nach RDB-Versagen führt auch zu einer leicht reduzierten Wasserstoffkonzentration in den Anlagenräumen und einer entsprechend erhöhten Konzentration im Dom (siehe Abb. 4.7-18 bzw. Abb. 4.7-19). Generell sind die Unterschiede gering.

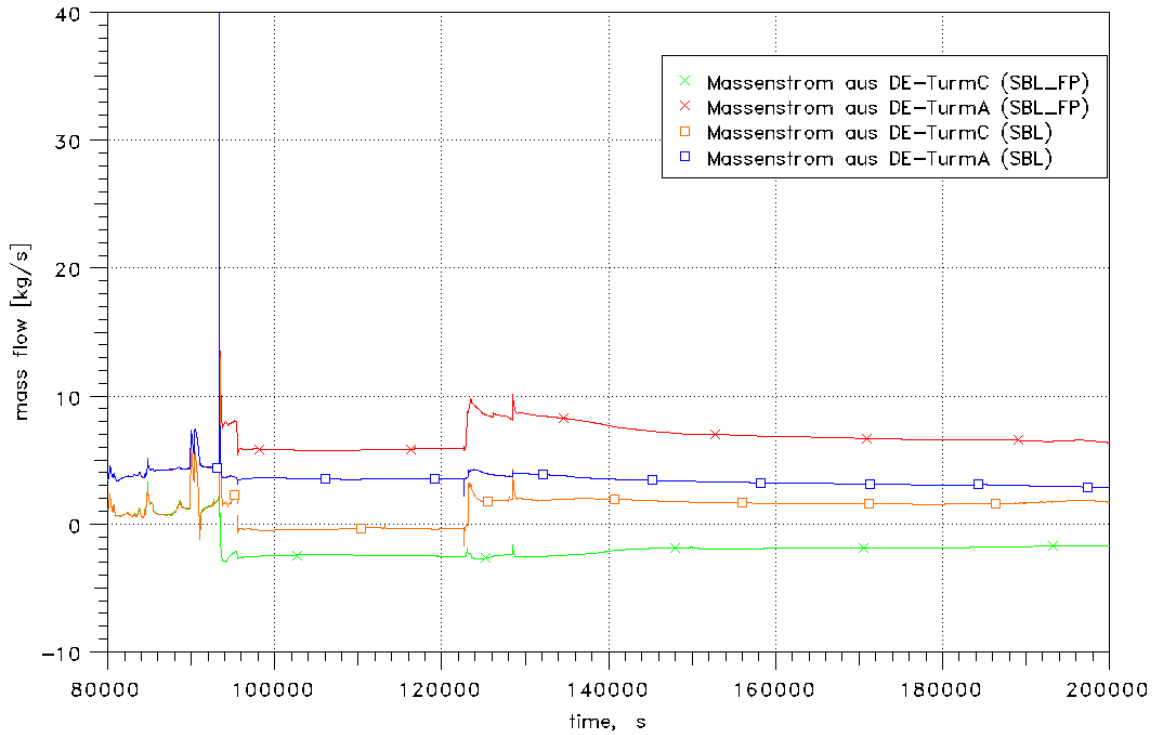


Abb. 4.7-14 SBL-Fall, Vergleich der Massenströmen aus den Dampferzeugertürmen zum Dom für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation

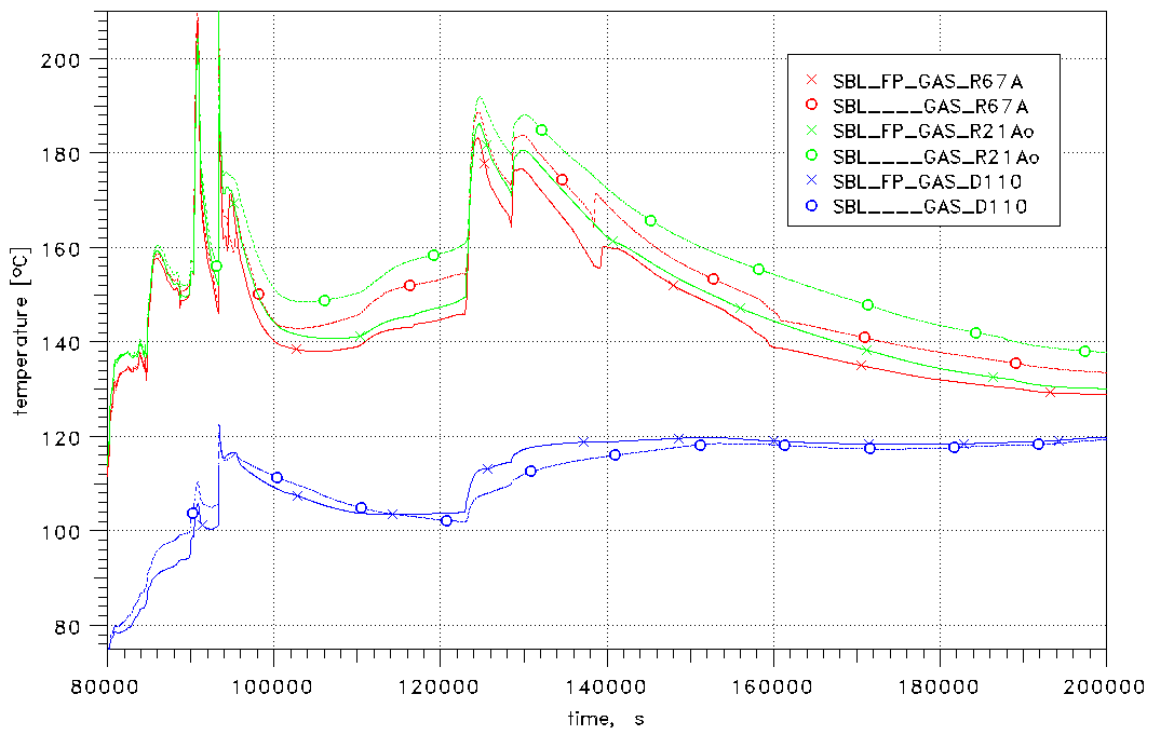


Abb. 4.7-15 SBL-Fall, Vergleich ausgewählter Raumtemperaturen im oberen Bereich des SHB für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation

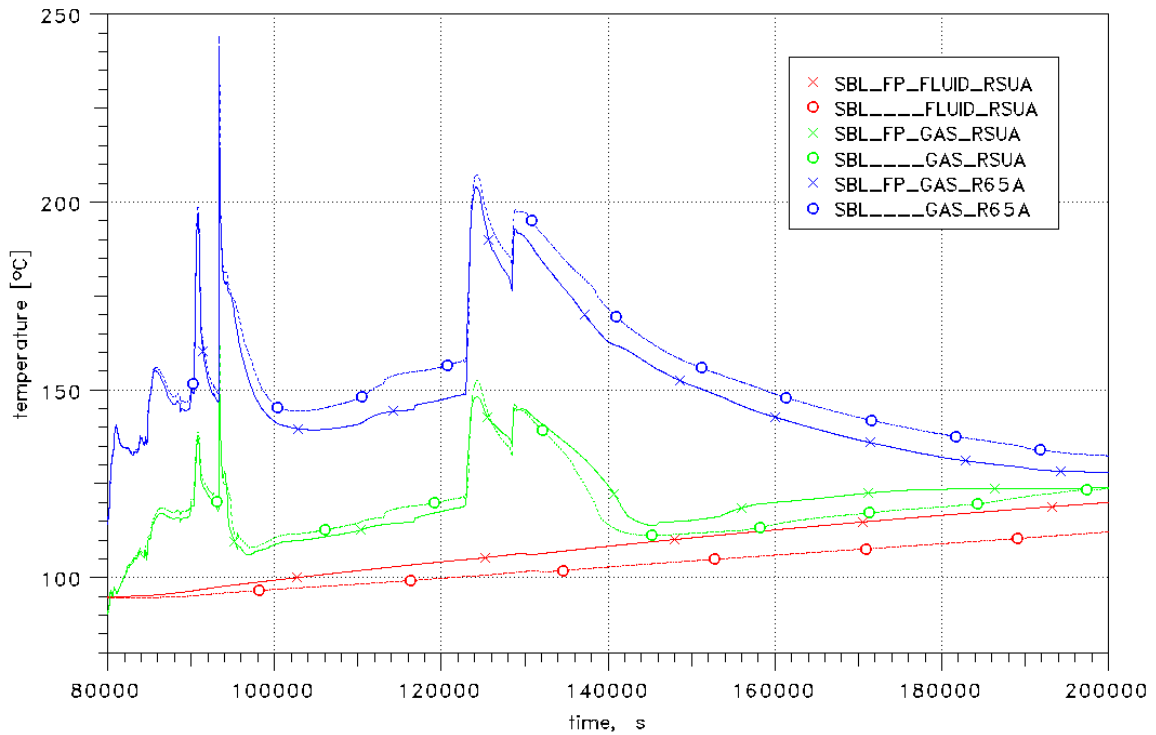


Abb. 4.7-16 SBL-Fall, Vergleich ausgewählter Raumtemp. im unteren Bereich des SHB und im Sumpf für die Fälle mit und ohne dyn. Aerosolsimulation

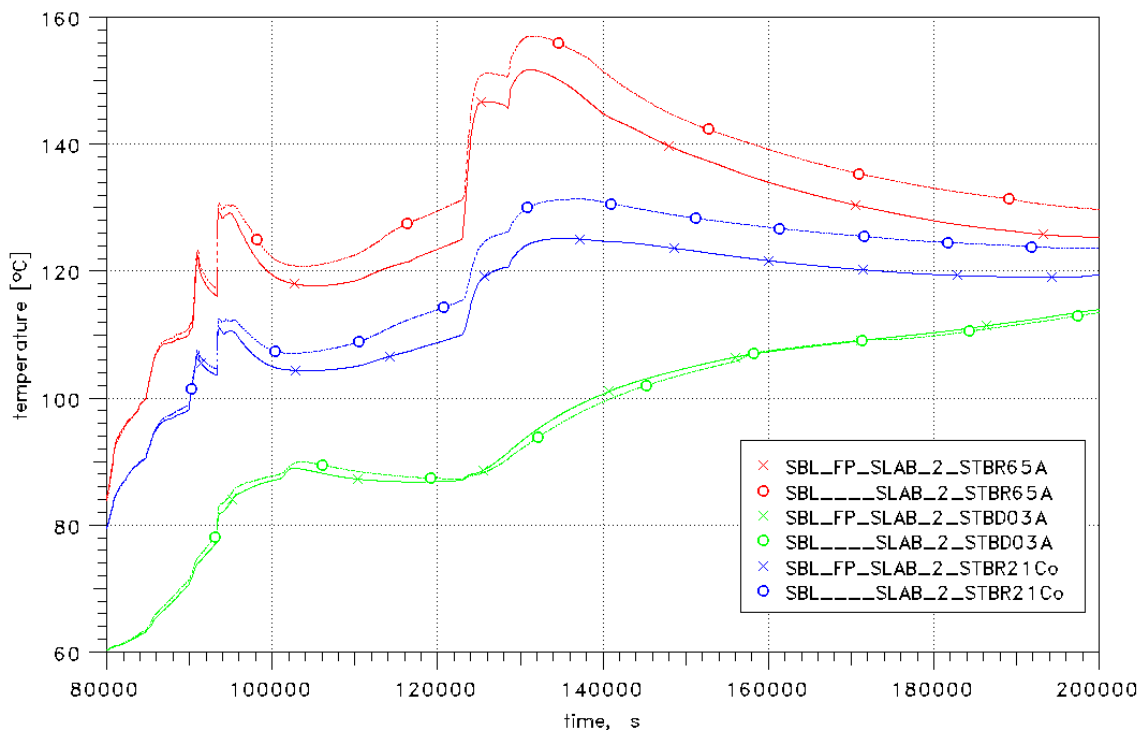


Abb. 4.7-17 SBL-Fall, Vergleich ausgewählter Strukturtemperaturen in verschiedenen Bereichen des SHB für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosol-simulation

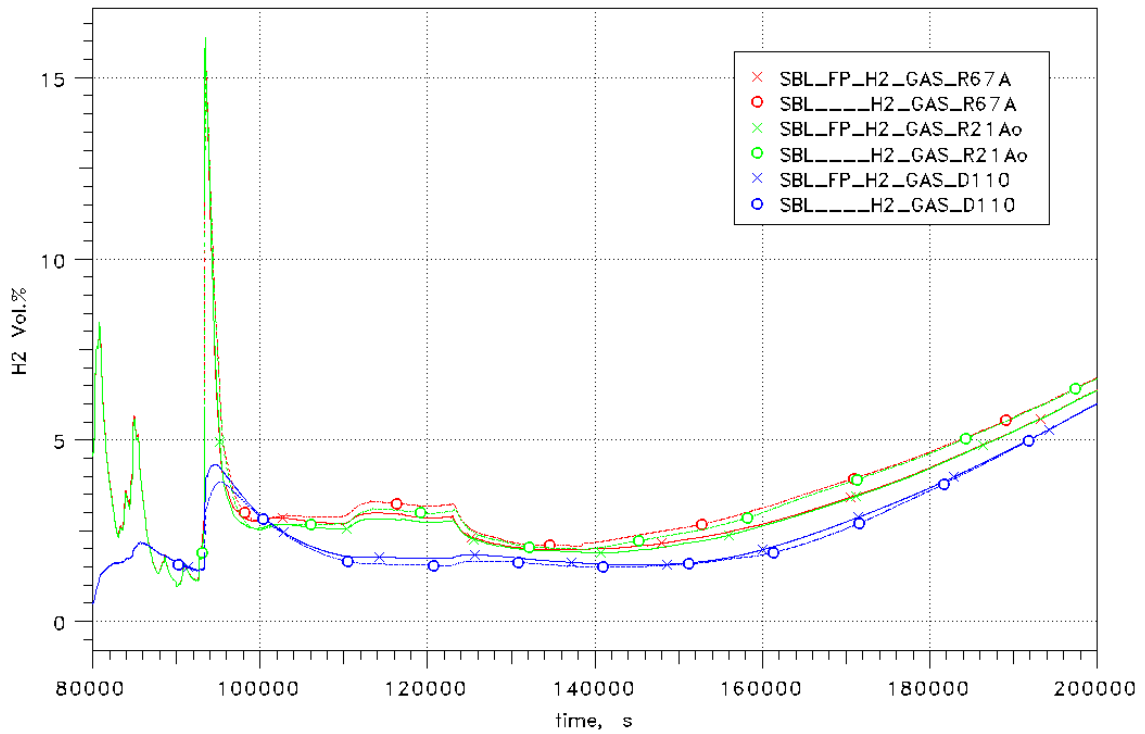


Abb. 4.7-18 SBL-Fall, H₂-Konzentration ausgewählter, innerhalb des SHB hoch gelegener Räume, für Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation

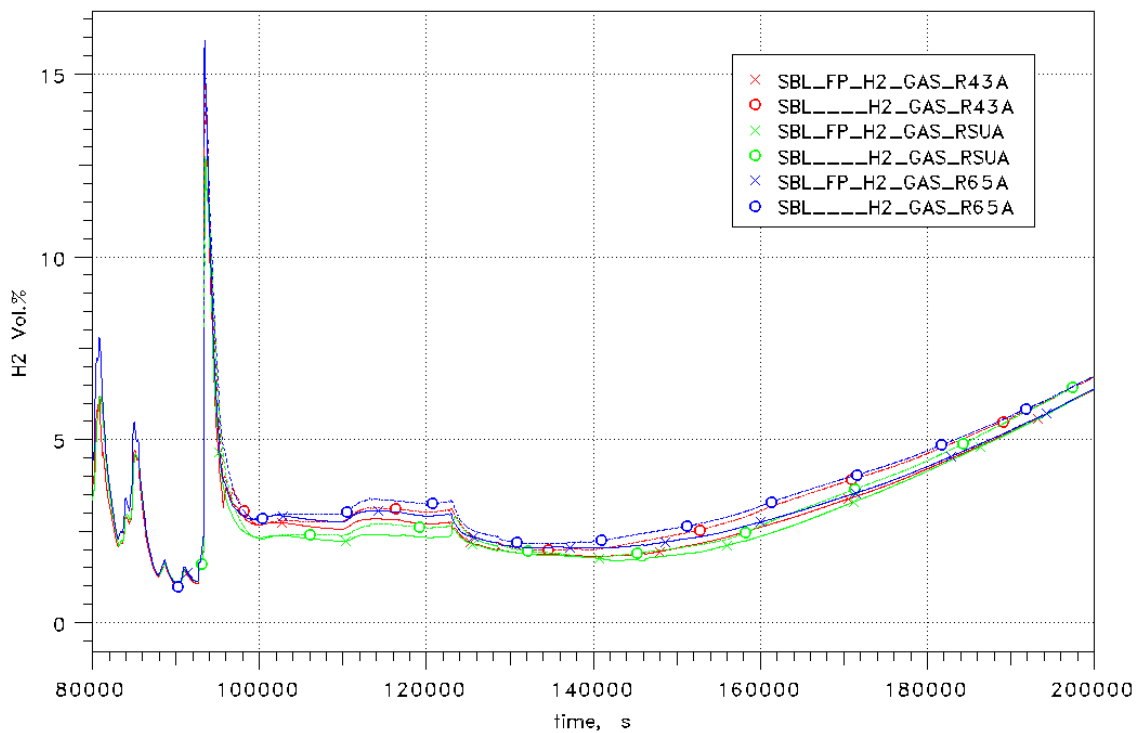


Abb. 4.7-19 SBL-Fall, H₂-Konzentration ausgewählter, innerhalb des SHB hoch gelegener Räume, für Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation

4.8 Rechnungen mit (dynamischer) Aerosolsimulation und mit H₂-Verbrennung mit Reko's als Zündquellen

4.8.1 Zielsetzung

Abschließend wurden zwei Rechnungen durchgeführt, bei denen zusätzlich zur dynamischen Aerosolsimulation auch H₂-Verbrennungsvorgänge berechnet wurden. Ziel war es, auch diesen Einfluss auf den Unfallablauf und das Reko-Verhalten noch zu erfassen. Die Verbrennung wurde durch Reko's bei 8 Vol.% H₂ gestartet.

4.8.2 MBL-Fall

Tab. 4.8-1 enthält den zeitlichen Ablauf der Verbrennung und die betroffenen Raumbereiche für die neue Analyse (mit dynamischer Aerosolsimulation) im Vergleich zum Fall aus Kap. 4.4.6 (ohne dynamischer Aerosolsimulation).

Tab. 4.8-1 Zeitliche Entwicklung und Bilanz der Verbrennungsrechnung mit Zündung an den Reko's bei 8 Vol.% H₂, Vergleich MBL-Fall mit/ohne (dynamische) Aerosolsimulation

Zone	zündet [s]	erlischt [s]	Dauer [s]	Bilanz	Zone	zündet [s]
R13A	22268,0	22328,3	60,3	Durch die Verbrennung von 277 kg Wasserstoff wurden 33 GJ Energie freigesetzt.	R13A	22268,0
R14A	22271,0	22311,9	40,8		R14A	22271,1
R15A	22272,4	22307,2	34,9		R15A	22272,4
R20Ao	22274,0	22298,2	24,2		R20Ao	22274,1
R20Ai	22274,2	22297,9	23,8		R20Ai	22274,1
R21Ao	22278,1	22296,1	18,0		R21Ao	22278,1
R65B	22282,2	22565,0	282,8		R65B	22282,2
R65A	22284,6	22310,5	25,9		R65A	22284,6
R65C	22288,0	22336,7	48,7		R65C	22288,0
R66B	22289,3	22544,7	255,4		R66B	22289,3
R66C	22293,0	22332,3	39,3		R66C	22292,9
R67C	22295,0	28303,3	6008,3		R67C	22295,0
R20Co	22295,9	22322,0	26,1		R20Co	22295,9
R20Ci	22296,0	22324,6	28,6		R20Ci	22295,9
R21Co	22299,6	22321,5	21,9		R21Co	22299,5
R80H	22309,5	22333,3	23,8		R80H	22309,4
R82C	22327,0	22379,6	52,6		R82C	22326,4

Der Ablauf der Verbrennung bei Zündung durch Reko's bei 8 Vol.% H₂ unterscheidet sich gegenüber der Rechnung ohne (dynamische) Aerosolsimulation nur minimal. Die Verbrennung wird zum gleichen Zeitpunkt 22268 s nach Beginn des Ablaufes jeweils im Raum R13A ausgelöst. Geringfügige Abweichungen ergeben sich in den Startzeiten und der Dauer der Verbrennung in den einzelnen Zonen. Insgesamt werden ca. 0,5 % weniger Wasserstoff verbrannt bzw. 0,5 % weniger Energie freigesetzt. Dies ist dadurch begründet, dass zu diesem frühen Zeitpunkt die dynamische Aerosolsimulation quasi noch keine Unterschiede im Anlagenverhalten hervorbrachte.

Nachfolgend sind die Einflüsse der dynamischen Aerosolsimulation bei H₂-Verbrennungen anhand ausgewählter Parameter (Massenströme, verbrannte H₂-Masse, Raumtemperatur, H₂-Konzentration) nochmals verdeutlicht. Insgesamt sind die Einflüsse der dynamischen Spaltproduktverteilung im Zusammenhang mit H₂-Verbrennungen relativ gering.

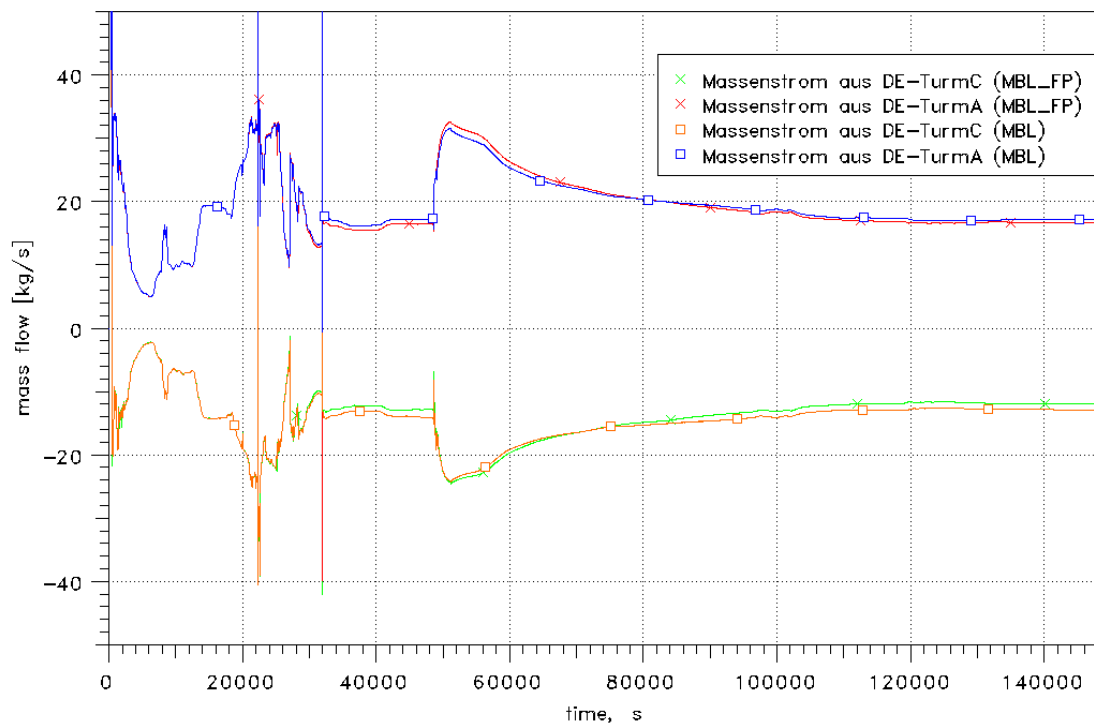


Abb. 4.8-1 MBL-Fall, Vergleich der Massenströmen aus den Dampferzeugertürmen zum Dom für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H₂

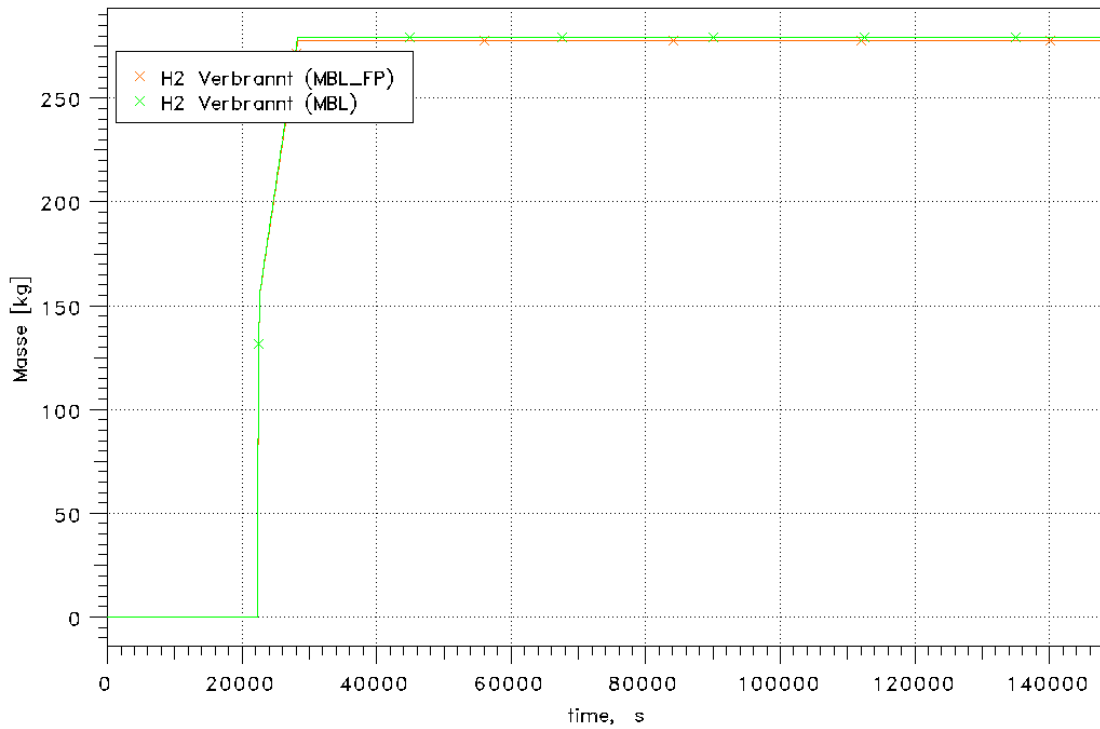


Abb. 4.8-2 MBL-Fall, Verbrannte H₂-Masse für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H₂

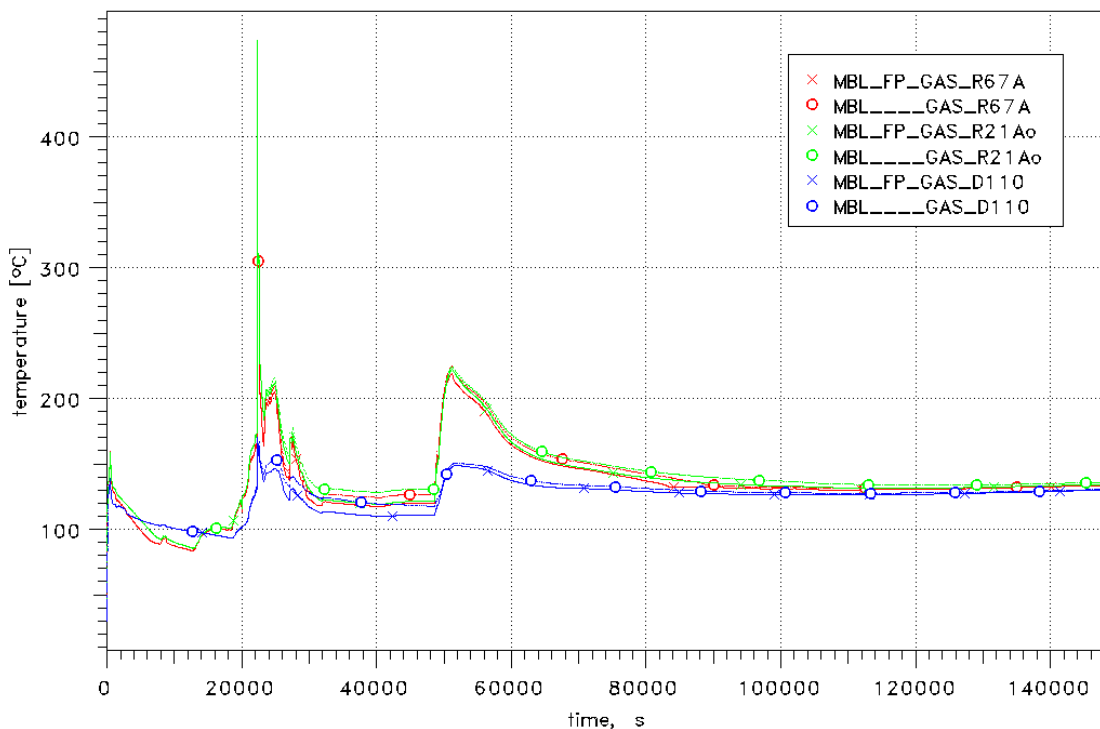


Abb. 4.8-3 MBL-Fall, Vergleich ausgewählter Raumtemperaturen im oberen Bereich des SHB für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H₂

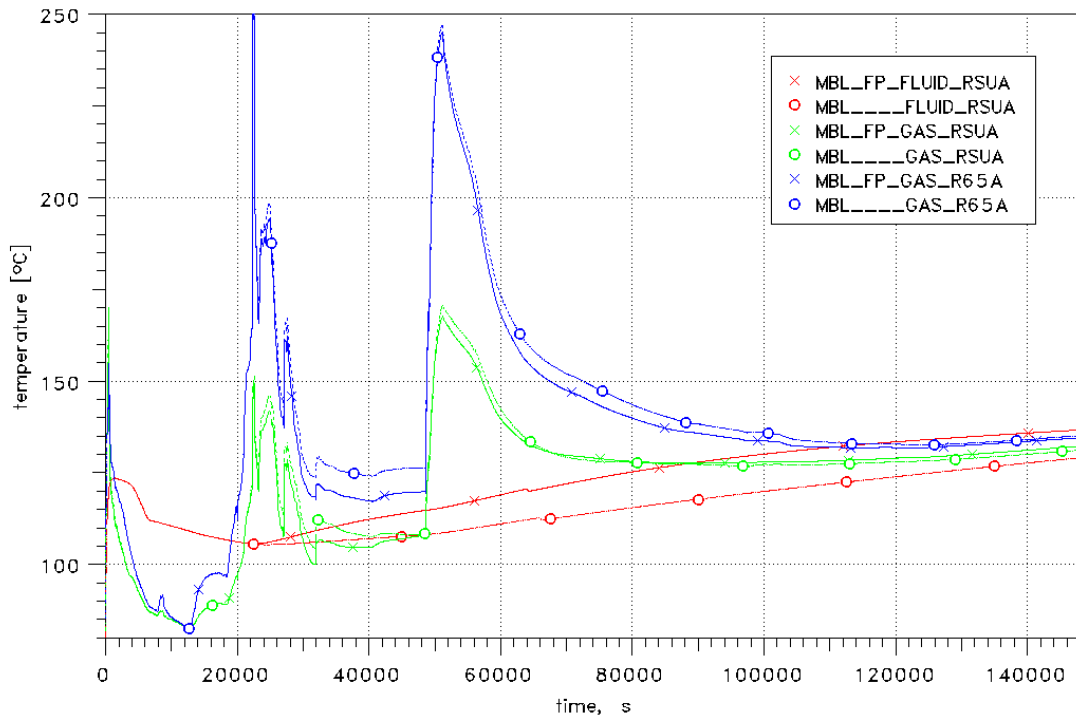


Abb. 4.8-4 MBL-Fall, Vergleich ausgewählter Raumtemperaturen im unteren Bereich des SHB und im Sumpf für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H₂

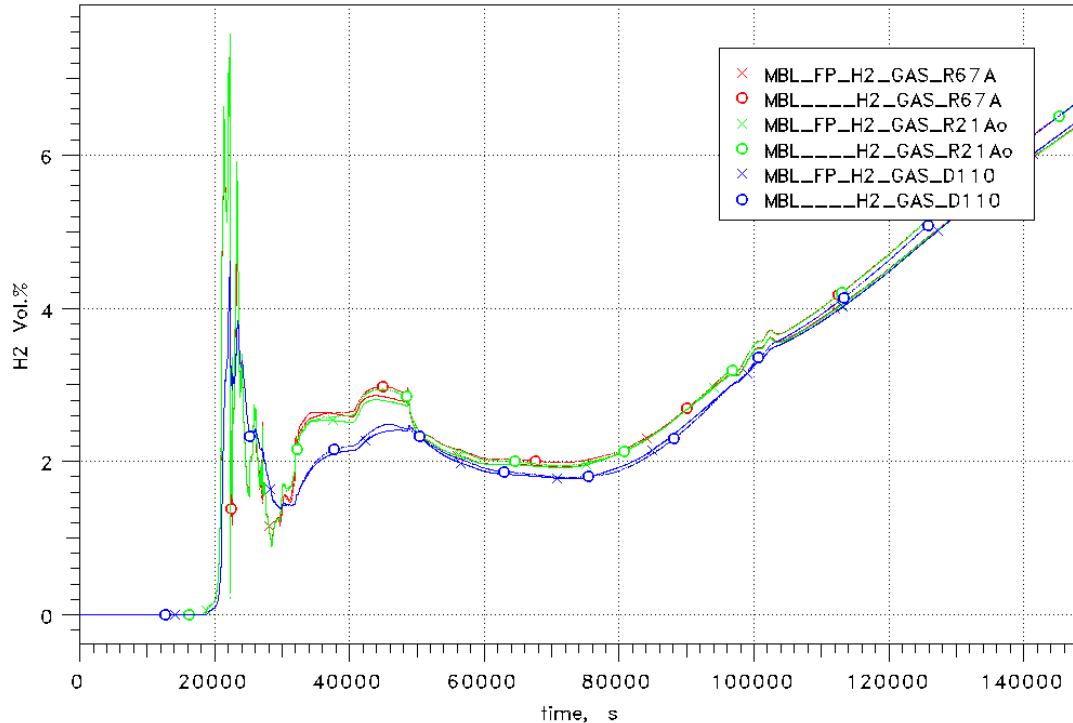


Abb. 4.8-5 MBL-Fall, H₂-Konzentration ausgewählter, innerhalb des SHB hoch gelegener Räume, für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H₂

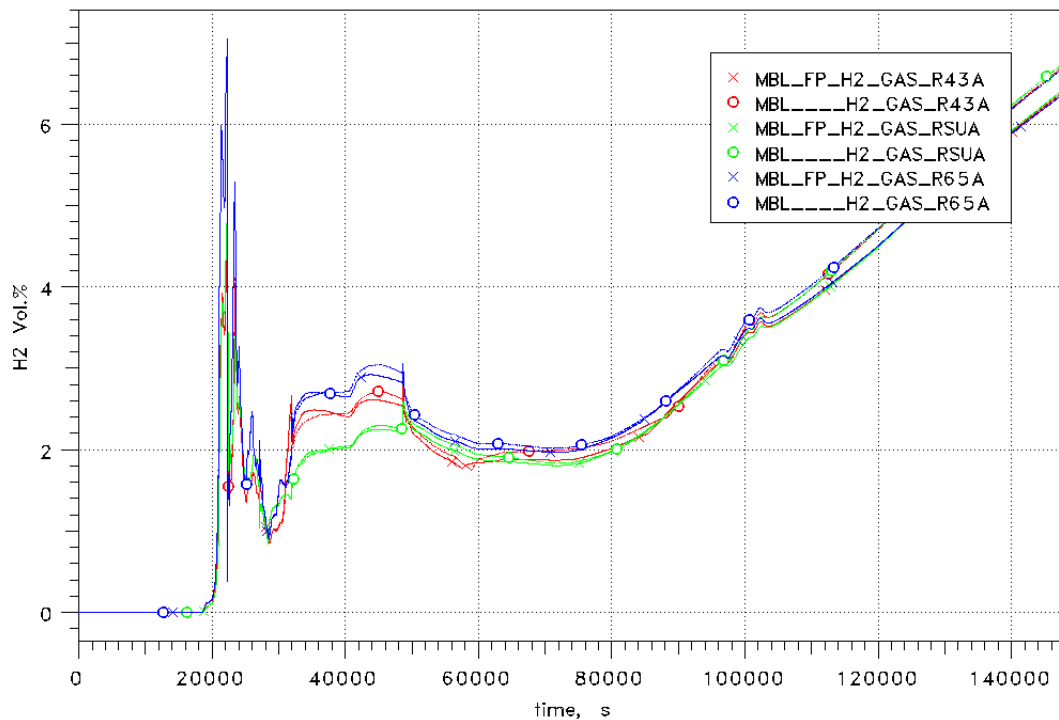


Abb. 4.8-6 MBL-Fall, H₂-Konzentration ausgewählter, innerhalb des SHB tief gelegener Räume und im Sumpf, für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H₂

4.8.3 SBL-Fall

Tab. 4.8-2 enthält den zeitlichen Ablauf der Verbrennung und die betroffenen Raumbereiche für die neue Analyse (mit dynamischer Aerosolsimulation) im Vergleich zum Fall aus Kap. 4.4.5 (ohne dynamischer Aerosolsimulation). Die graphische Aufbereitung des Verbrennungsvorganges ist in Abb. 4.8-7 zu finden.

Während im MBL-Fall kaum ein Unterschied zwischen den beiden Rechnungen mit/ohne H₂-Verbrennung festzustellen war, da die Unterschiede durch die dynamische Aerosolsimulation sich erst später auswirkten, sind die Unterschiede im SBL-Fall deutlicher. Die H₂-Verbrennung wird bei gleichen Zündkriterien ca. 435 s später an einem höher in den Anlagenräumen platzierten Reko in der Zone R65B (R12B im Vergleichsfall) gezündet wird. Dies war anhand des sehr ähnlichen Druckverlaufes (vgl. Abb. 4.7-12) nicht zu erwarten gewesen. Der resultierende Druckunterschied ist gegenüber der Rechnung ohne dynamische Aerosolsimulation und gegenüber der Rechnung ohne Verbrennung aber mit dynamischer Aerosolsimulation in Abb. 4.8-8 aufgezeigt. In der hier beschriebenen Rechnung ist der Druckanstieg etwas höher, liegt aber auch unter

0,1 bar. Insgesamt ist eine größere Anzahl von Zonen in die Verbrennung einbezogen, da im Differenzzeitraum von 435 s auch mehr H₂ in den SHB eingeströmt war. Der starke Beitrag am Massenumsatz (siehe Abb. 4.8-9) und somit auch der Energieerzeugung bei der erneuten Entzündungen bei 93319 s – 93331 s ist durch die sehr hohen H₂-Freisetzungen zum Zeitpunkt des RDB-Versagens (siehe Abb. 4.8-10) zu erklären. Insgesamt werden ca. 70 kg H₂ mehr verbrannt.

Tab. 4.8-2 Zeitliche Entwicklung und Bilanz der Verbrennungsrechnung mit Zündung an den Reko's bei 8 Vol.% H₂ Vergleich SBL-Fall mit/ohne (dynamische) Aerosolsimulation

Zone	zündet [s]	erlischt [s]	Dauer [s]	Bilanz	Zone	zündet [s]
R65B	80620,0	80883,5	263,5	Bis zum Zeitpunkt 82000 s wurden 82 kg Wasserstoff verbrannt, wobei 9 GJ Energie freigesetzt wurden. Insgesamt wurden durch die Verbrennung von 298 kg Wasserstoff 35 GJ Energie freigesetzt.	R12B	80184,0
R13A	80623,9	80752,0	128,1		R13A	80185,4
R66B	80627,5	80674,0	46,5		R65B	80185,4
R65C	80628,3	80690,1	61,9		R05B	80185,5
R14A	80628,5	80675,7	47,1		R43B	80187,0
R15A	80630,3	80668,8	38,4		R14A	80189,6
R66C	80631,4	80672,7	41,3		R66B	80190,9
R66A	80631,6	80649,5	17,9		R15A	80191,5
R67B	80632,1	80653,6	21,5		R20Ao	80193,7
R67A	80632,3	80644,7	12,4		R20Ai	80194,0
R20Ao	80632,5	80650,5	18,1		R67B	80197,5
R20Ai	80632,8	80651,5	18,6		R21Ao	80200,0
R80H	80633,4	80646,4	13,0		R05B	80253,5
R67C	80633,6	80658,8	25,2			
R82B	80634,1	80644,9	10,7			
R20Co	80634,6	80652,9	18,3			
R20Ci	80634,6	80653,7	19,1			
R21Ao	80636,2	80649,6	13,4			
R21Co	80638,0	80652,3	14,3			
R65A	80643,2	80672,4	29,2			
R82C	80659,5	80693,7	34,2			
R43B	93319,9	94160,6	840,7		R12B	84744,0
R13A	93321,6	93378,8	57,1		R78B	93459,1
R65B	93321,9	94033,6	711,6		R85B	93462,9
R13C	93327,4	93383,5	56,2		R85A	93473,0
R14C	93329,4	93380,9	51,5		R78C	93484,5
R65A	93331,3	93496,8	165,5		R85C	93488,2
					R85D	93497,6
					R85D	93958,0
					R85D	94162,0

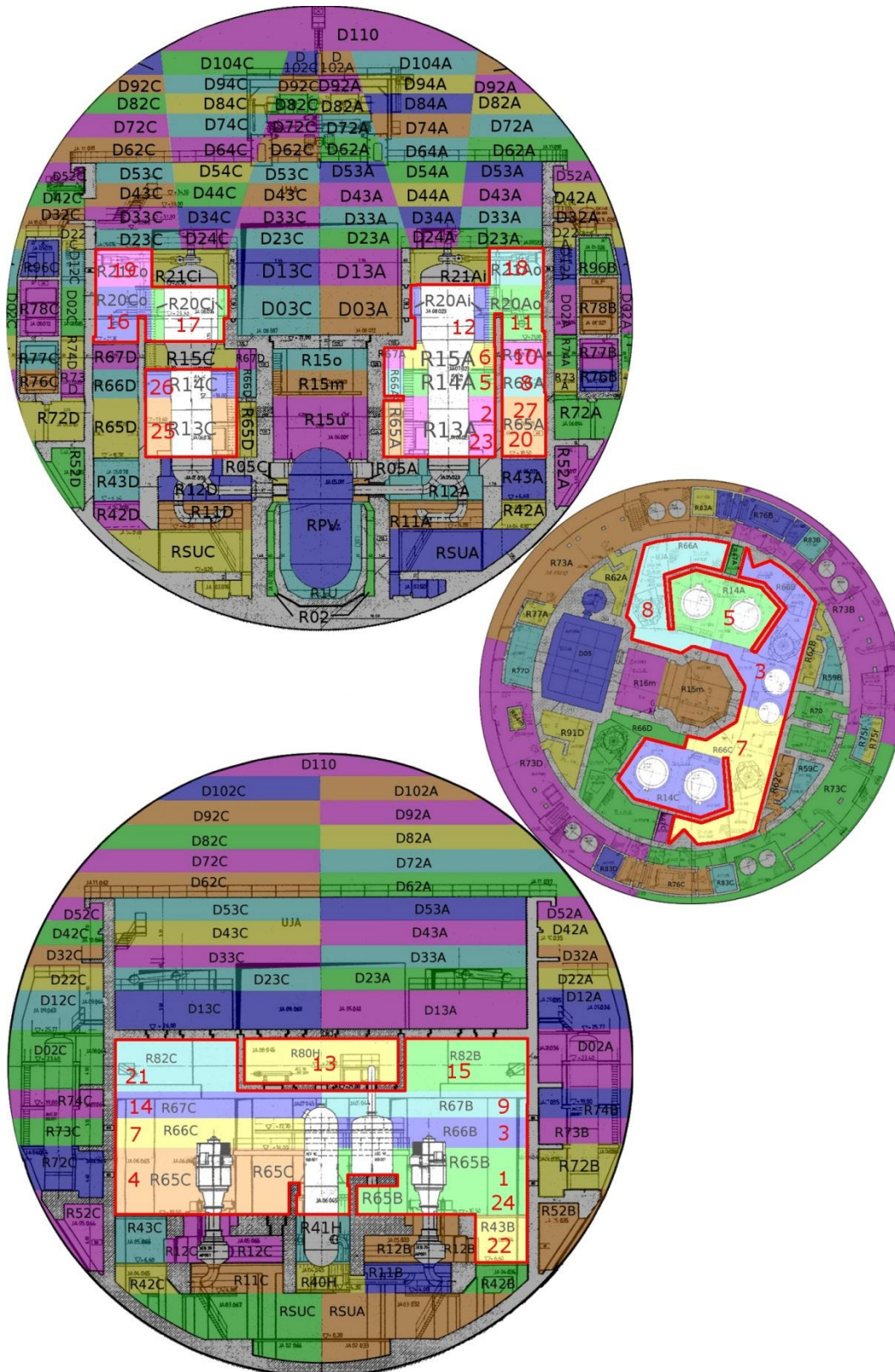


Abb. 4.8-7 Veranschaulichung der Verbrennung mit Reko's als Zündquellen (8 Vol.% H₂) für den SBL-Fall mit Aerosolsimulation

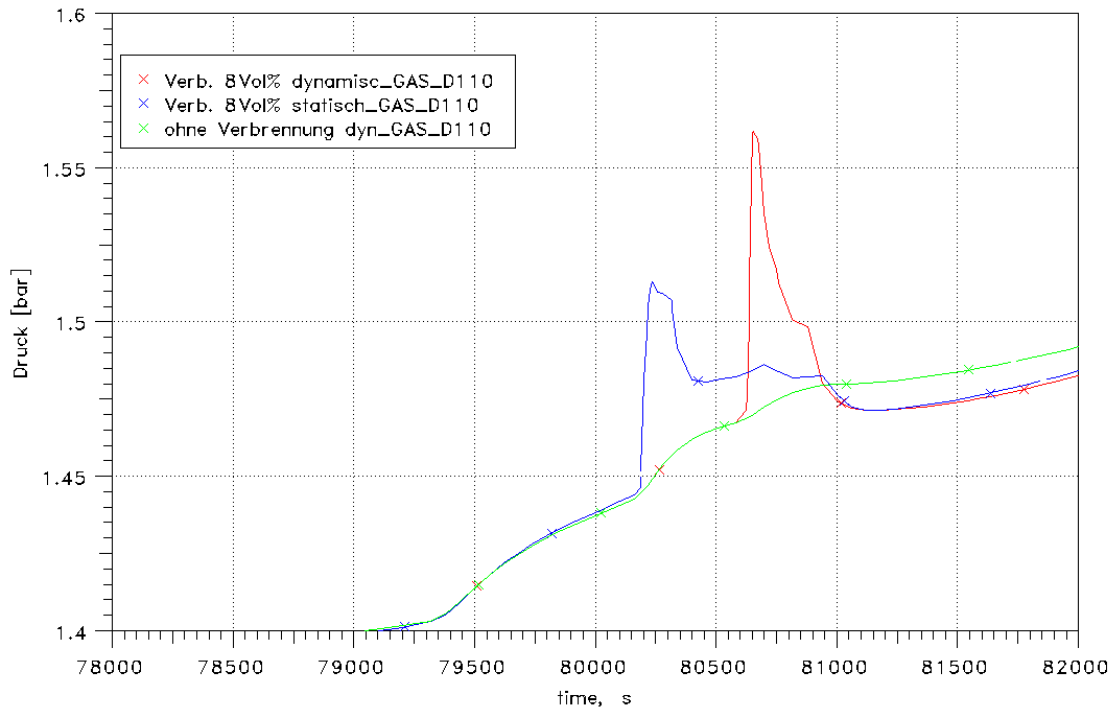


Abb. 4.8-8 SBL-Fall, Druckpeak der Verbrennung mit dynamischen Spaltprodukten gegenüber der statischen Rechnung

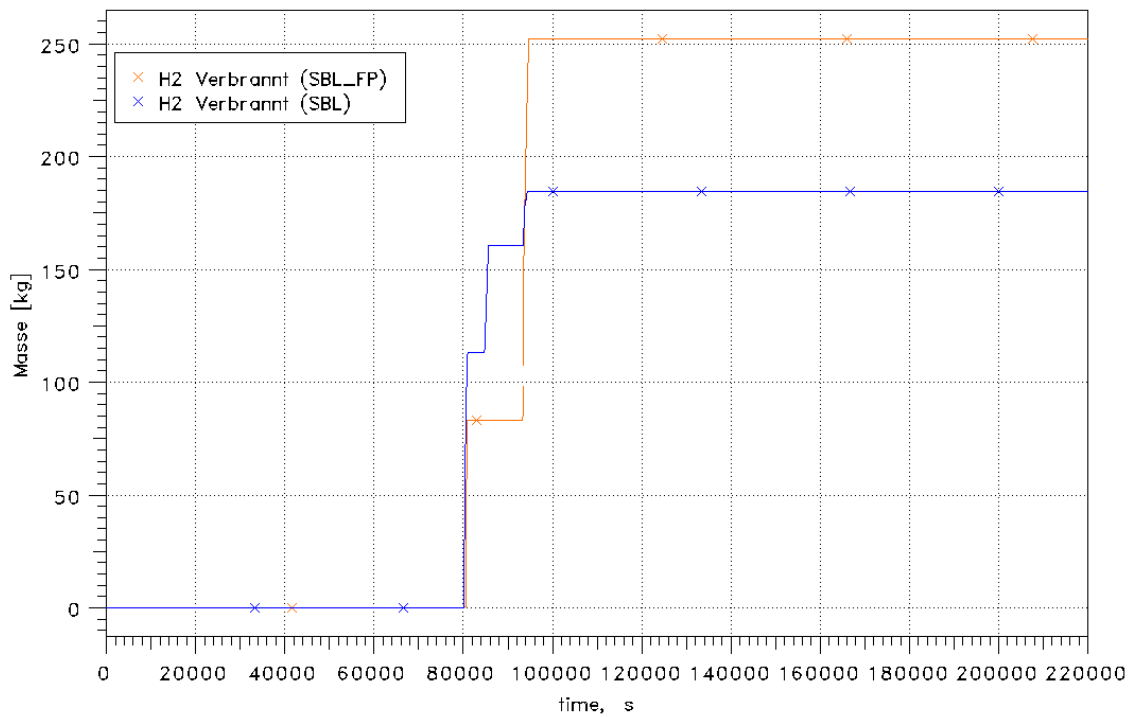


Abb. 4.8-9 SBL-Fall, Verbrannte H₂-Masse für den Fall mit dynamischer Aerosolsimulation bei Zündung an den Rekos bei 8 Vol.% im Vergleich zum Basisfall

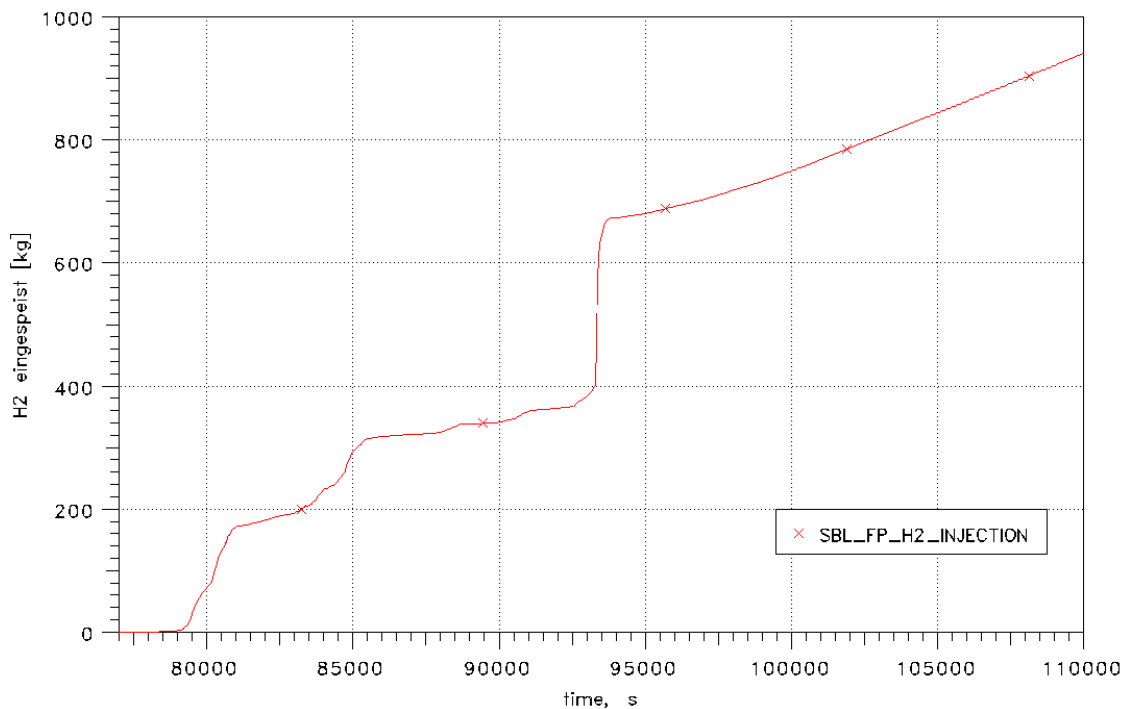


Abb. 4.8-10 SBL-Fall, H₂-Masse, freigesetzt in den SHB aus dem Leck

Dass der Einfluss der dynamischen Spaltproduktverteilung einen stärkeren Einfluss im SBL-Fall hat, als im MBL-Fall, mag daran liegen, dass die Konvektionsströmungen zwischen Anlagen- und Betriebsräumen (Dom) im SBL-Fall stark eingeschränkt sind, so dass sich geringe Änderungen der H₂-Konzentrationen sowie der in die Zonen eingebrachten Energie stärker auswirken können.

Die größere verbrannte H₂-Masse im Fall mit dynamischer Aerosolsimulation (SBL_FP-Fall) verändert natürlich auch den Sauerstoffabbau. Trotzdem ist bereits ab ca. 113000 s ist die integral abgebaute O₂-Masse wieder nahezu identisch, was auch durch die Wechselwirkung zwischen H₂-Umsatz durch Verbrennung und Rekombination zurückzuführen ist. Den erhöhten Wasserstoffumsatz bei der Verbrennung kann man auch in den reduzierten H₂-Konzentrationen in Abb. 4.8-12 und Abb. 4.8-13 erkennen. Dieser Effekt wird von den in Kap. 4.7.3 schon diskutierten Effekten überlagert.

Die Einflüsse der Verbrennung auf den Massenstrom durch die DE-Türme zum Dom (Abb. 4.8-14) bzw. die Raumtemperaturen (Abb. 4.8-15 und Abb. 4.8-16) sind bis aus den kurzzeitigen Peak bei der Verbrennung nicht sehr ausgeprägt.

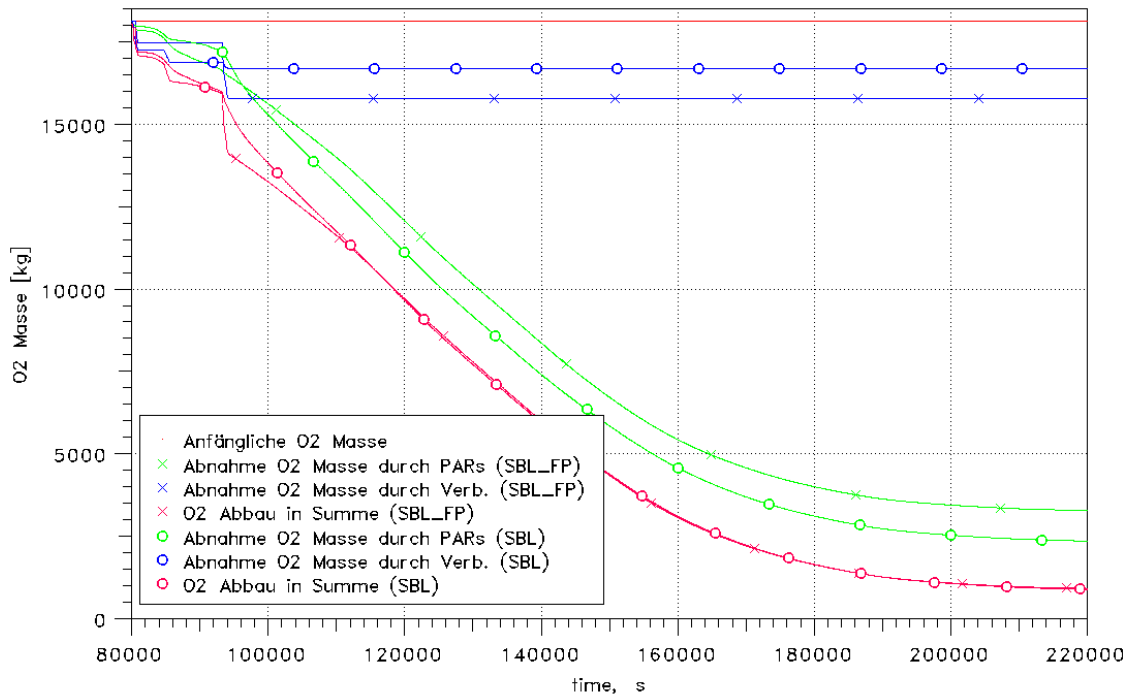


Abb. 4.8-11 SBL-Fall, Vergleich des Sauerstoffabbaus für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, bei Zündung an Rekos bei 8 Vol.% H₂

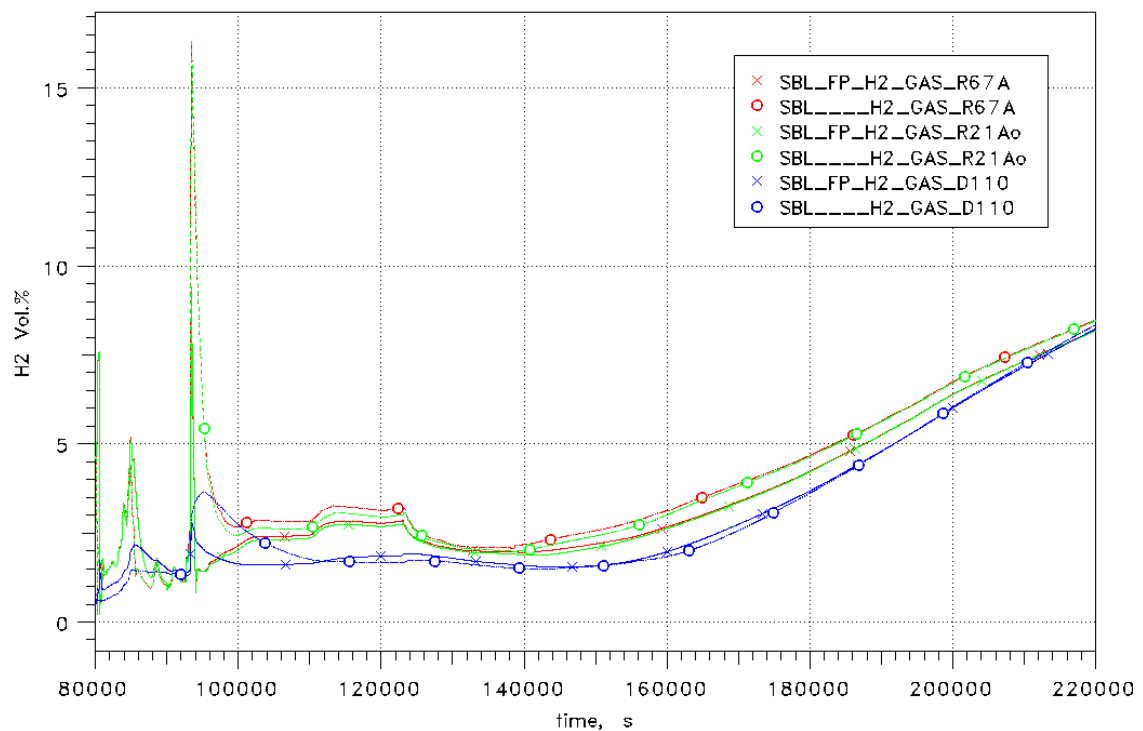


Abb. 4.8-12 SBL-Fall, H₂-Konzentration einiger ausgewählter, innerhalb des SHB hoch gelegener Räume, für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H₂

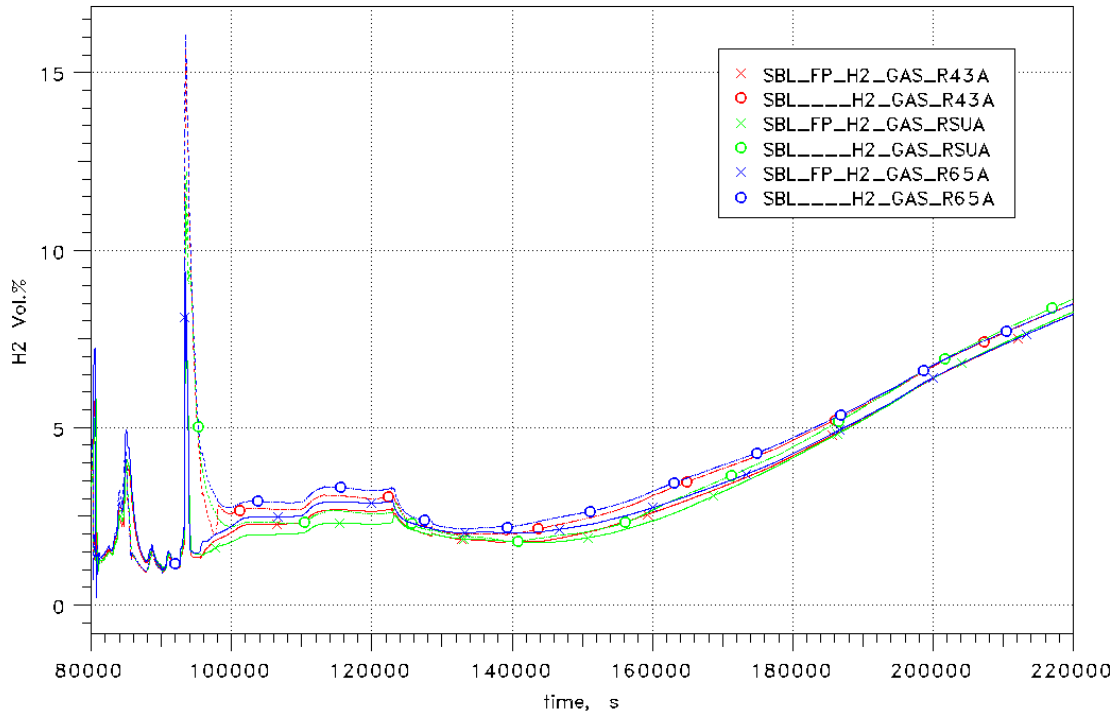


Abb. 4.8-13 SBL-Fall, H₂-Konzentration einiger ausgewählter, innerhalb des SHB tief gelegener Räume, für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H₂

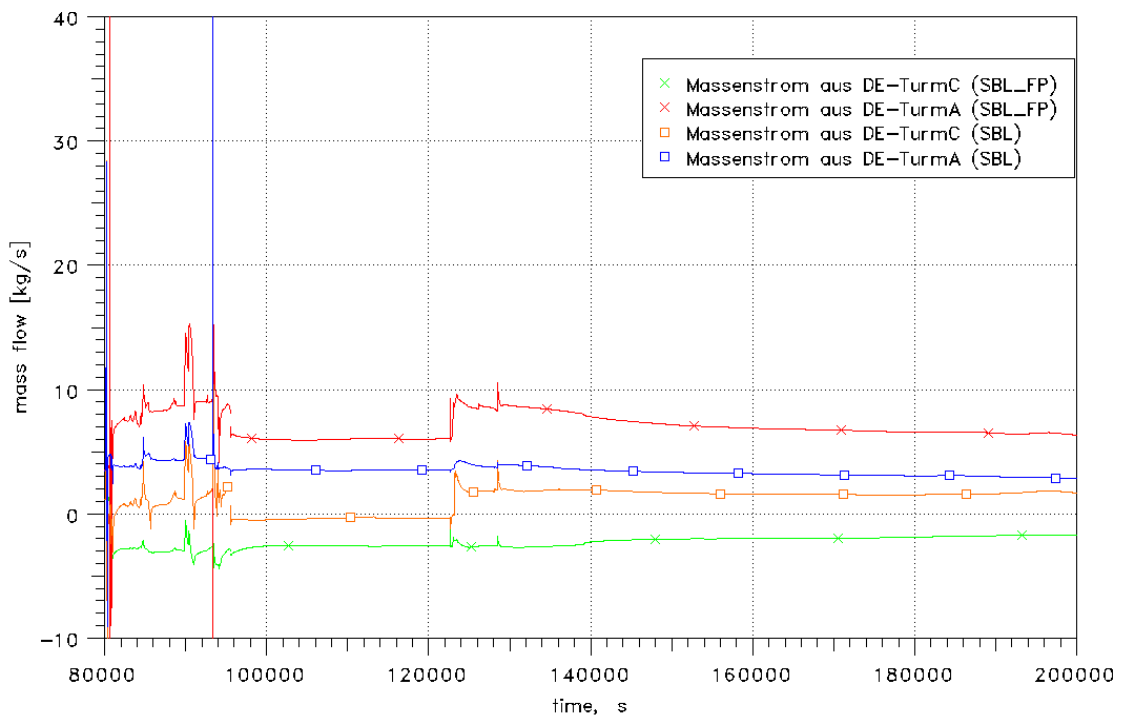


Abb. 4.8-14 SBL-Fall, Vergleich der Massenströmen aus den Dampferzeugertürmen zum Dom für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H₂

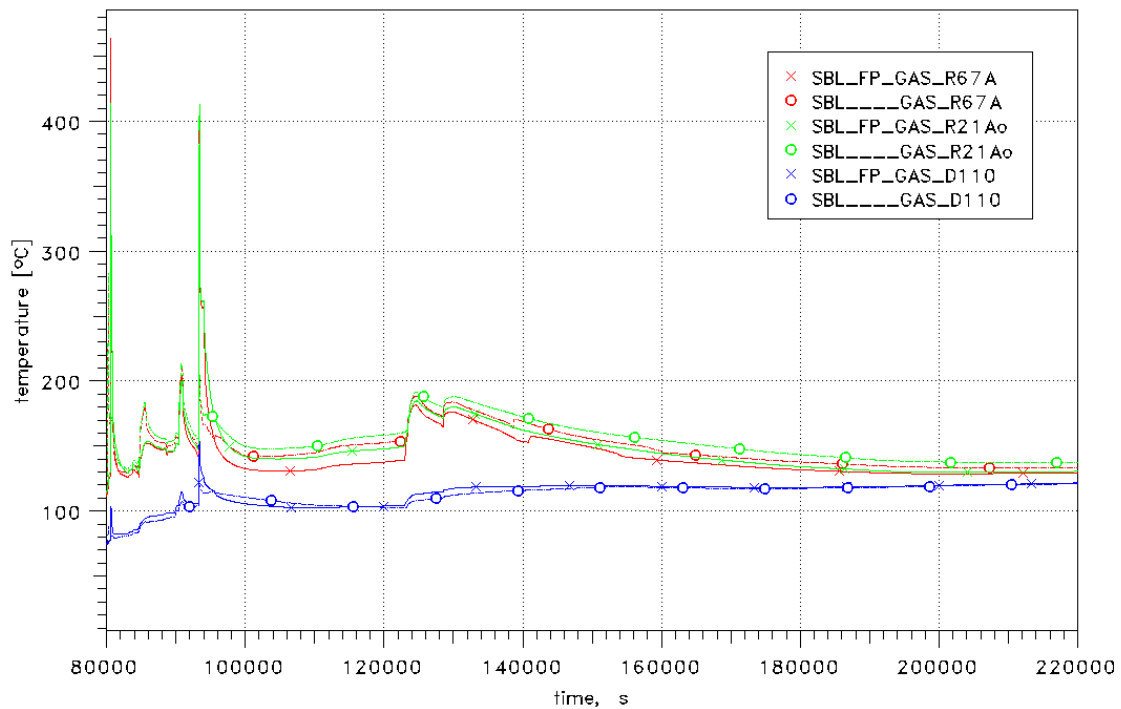


Abb. 4.8-15 SBL-Fall, Vergleich ausgewählter Raumtemperaturen im oberen Bereich des SHB für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H₂

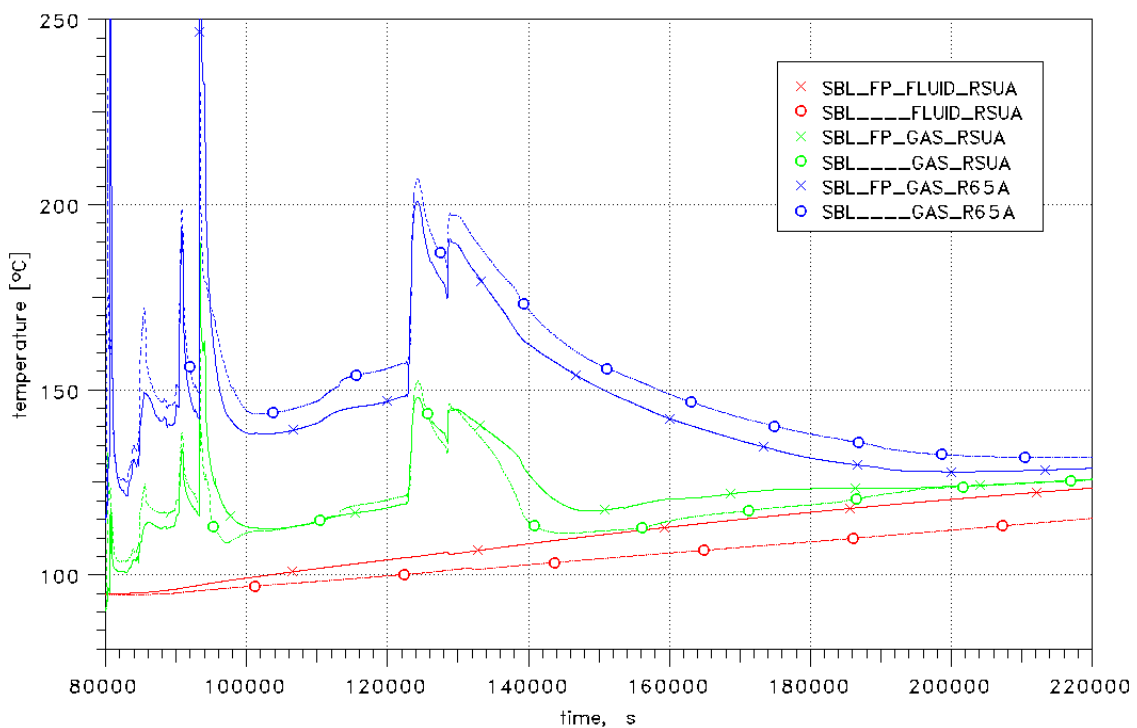


Abb. 4.8-16 SBL-Fall, Vergleich ausgewählter Raumtemperaturen im unteren Bereich des SHB und im Sumpf für die Fälle mit und ohne dynamische Aerosolsimulation, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H₂

4.9 Exemplarische Untersuchung des Einflusses des eingesetzten Reko-Modells

4.9.1 Zielsetzung

In Kap. 2.1.7 wurde eingangs über die Aktualisierung des in COCOSYS eingesetzten GRS-Reko-Modells berichtet. Der nach der Aktualisierung des GRS-Modells vorgenommene Vergleich der Anwendung dieses Modells zu den von AREVA bereitgestellten Abbaugleichungen für die unterschiedlichen Reko-Typen, die in COCOSYS unverändert implementiert sind, zeigte nur kleine verbleibende Unterschiede. Zum Nachweis der Übertragbarkeit dieser Aussagen auf die Anlage wurden für ND*-Fall und MBL-Fall Analysen mit diesen in COCOSYS vorhandenen AREVA-Abbaugleichungen durchgeführt. Bei den Rechnungen wurde keine (dynamische) Aerosolsimulation durchgeführt. Es wurden zunächst 2 Rechnungen ohne H₂-Verbrennung durchgeführt. Danach wurde für beide Fälle wieder eine Zündung an den Reko's bei 8 Vol.% H₂ unterstellt, wenn die Bedingungen erfüllt sind. Bewusst ausgewählt wurde der ND*-Fall als einer der beiden Fälle, um zu analysieren, ob auch mit Anwendung der AREVA-Gleichungen sich das gleiche Bild zeigt, d.h. keine Verbrennung bei den unterstellten Kriterien auftritt.

4.9.2 ND*-Fall und MBL-Fall ohne (dynamische) Aerosolsimulation und ohne H₂-Verbrennung

Der Vergleich der Ergebnisse beschränkt sich im Weiteren auf den Vergleich der integralen Abbauraten an H₂ und CO sowie der freigesetzten Energie durch die Rekombination. Für die CO-Rekombinationsraten war keine Validierung des GRS-Reko-Modells möglich, da die vorhandenen Versuche nicht zugänglich waren.

In den Abb. 4.9-1 bis Abb. 4.9-6 sind für beide Fälle die Größen - integrale Abbauraten an H₂ und CO sowie freigesetzte Energie durch die Rekombination - dargestellt. Die dargestellten Parameter stimmen weitgehend gut überein. Die Unterschiede betreffen den Startzeitpunkt der Reaktion, der im GRS-Modell etwas früher liegt, und den CO-Abbau, der etwas unterschiedlicher ist, als der H₂-Abbau. Hier wurden mangels Daten zur Validierung die gleichen Ansätze implementiert, wie für H₂ und nur die Angaben zu den Stoffwerten ausgetauscht. Generell liegen die Ergebnisse im Rahmen der zu erwartenden Unterschiede.

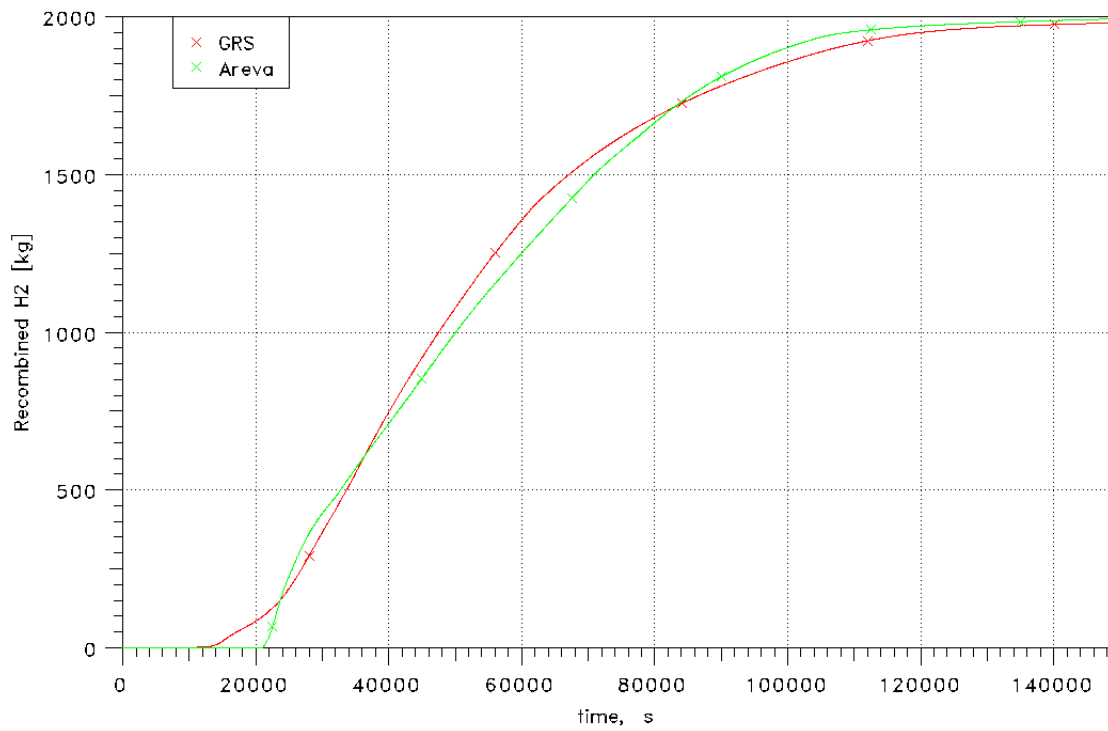


Abb. 4.9-1 MBL-Fall, integraler Wasserstoffabbau, GRS-/AREVA-Reko-Modell

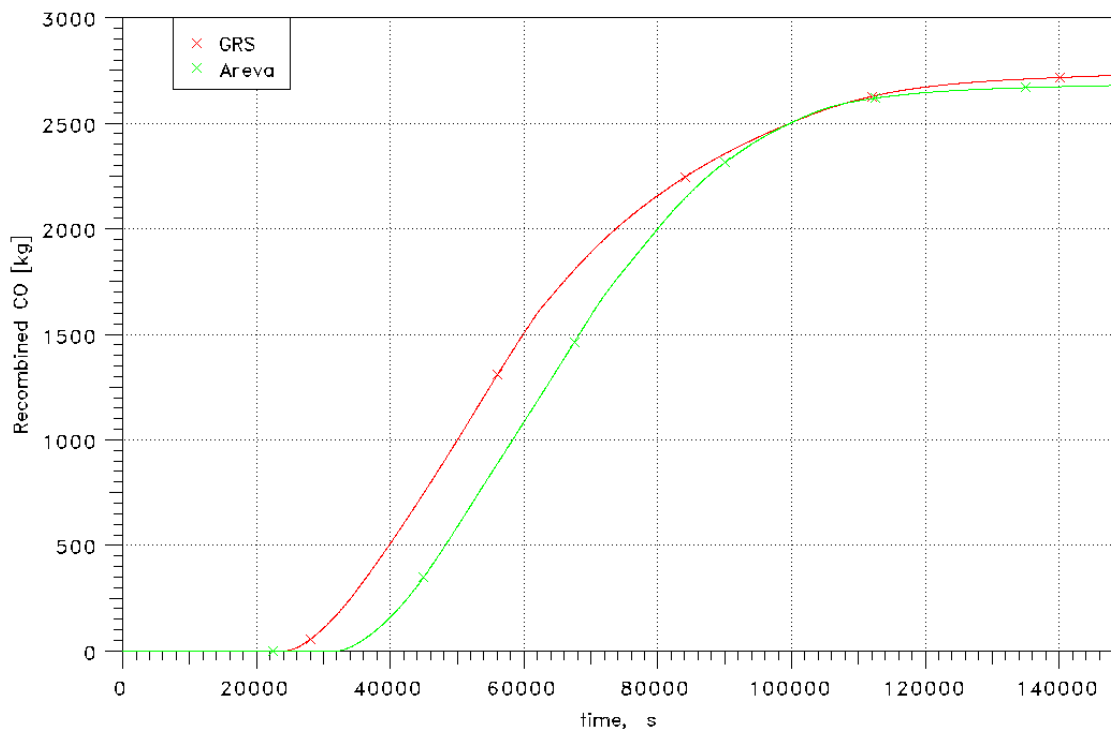


Abb. 4.9-2 MBL-Fall, integraler CO-Abbau, GRS-/AREVA-Reko-Modell

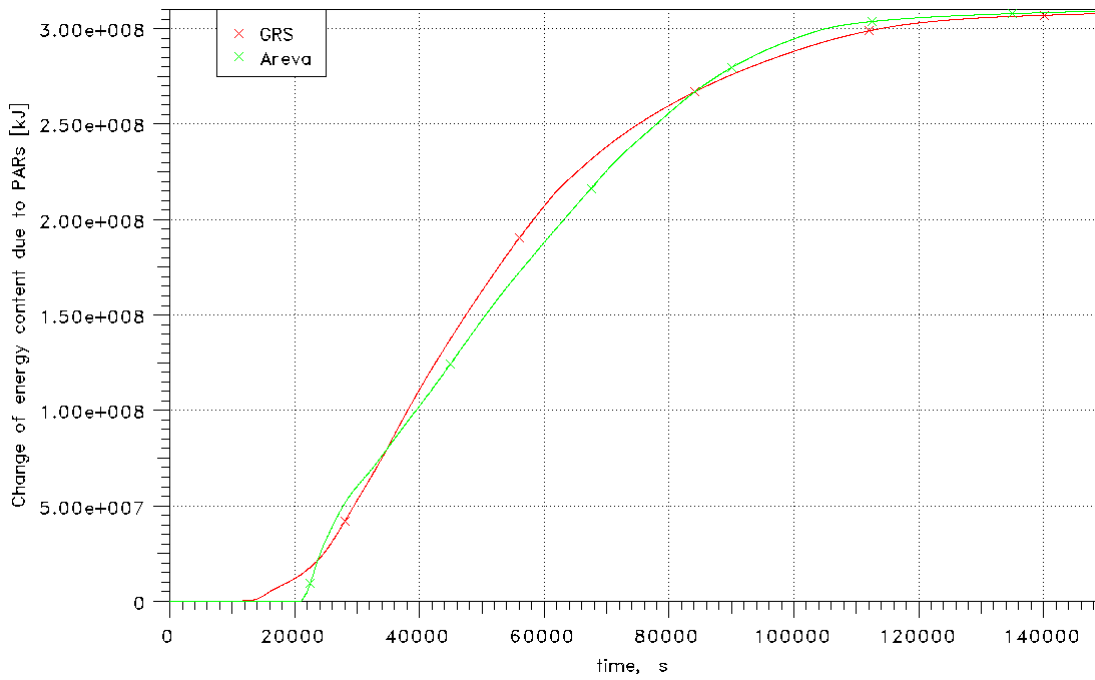


Abb. 4.9-3 MBL-Fall, integrale Energiefreisetzung bei der Rekombination, GRS-/AREVA-Reko-Modell

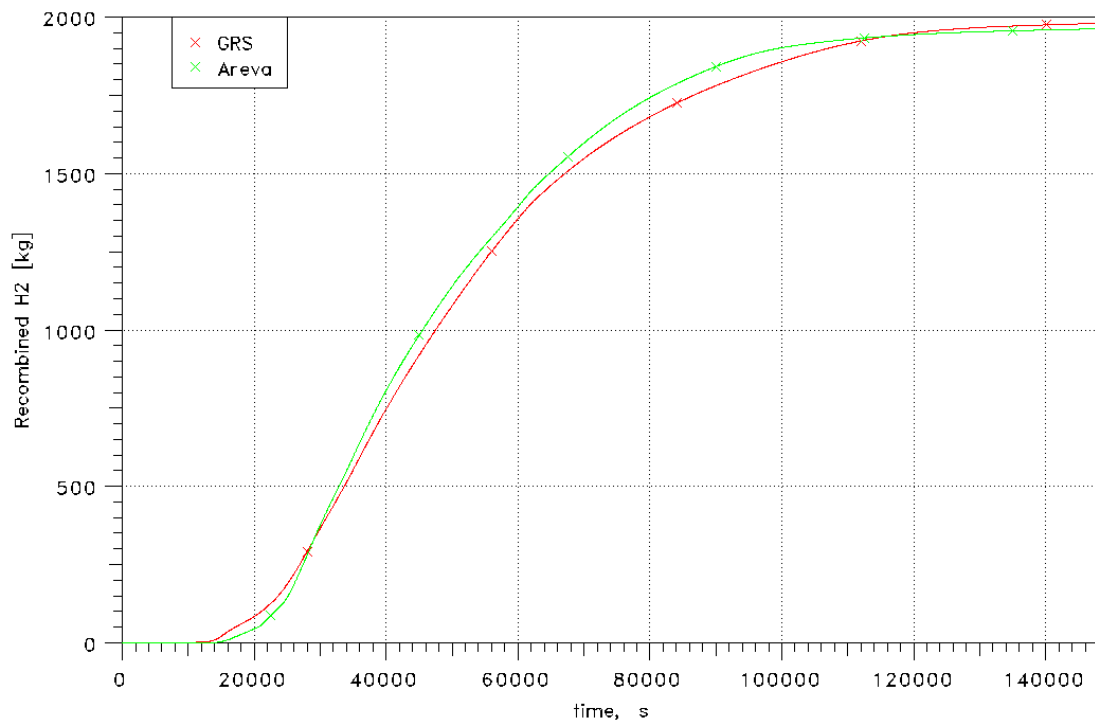


Abb. 4.9-4 ND*-Fall, integraler Wasserstoffabbau, GRS-/AREVA-Reko-Modell

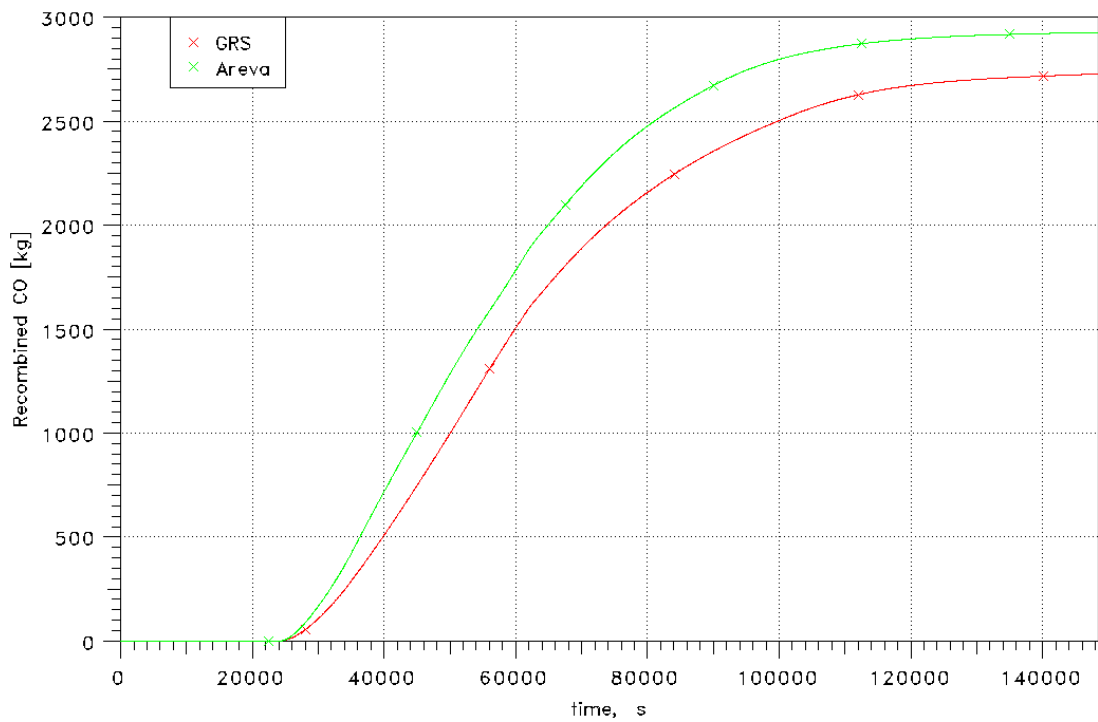


Abb. 4.9-5 ND*-Fall, integraler CO-Abbau, GRS-/AREVA-Reko-Modell

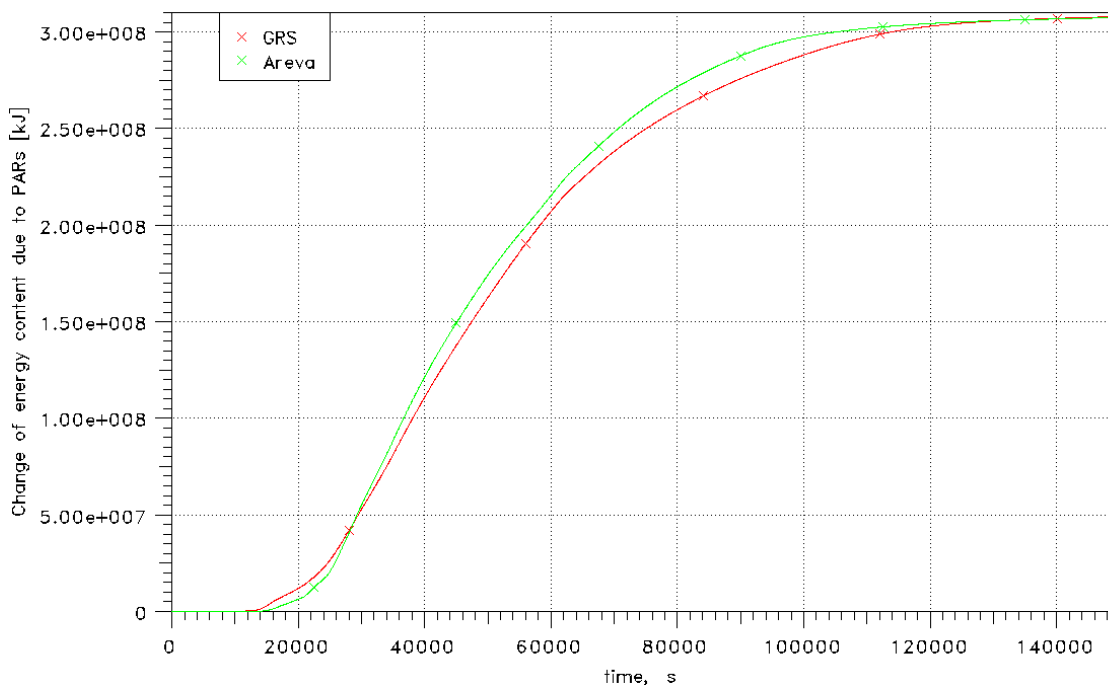


Abb. 4.9-6 ND*-Fall, integrale Energiefreisetzung bei der Rekombination, GRS-/AREVA-Reko-Modell

4.9.3 ND*-Fall und MBL-Fall ohne (dynamische) Aerosolsimulation und mit H₂-Verbrennung und Zündung am Reko bei 8 Vol.% H₂

Abschließend wurden für beide Fälle wieder Analysen mit unterstellter Zündung durch Reko's bei 8 Vol.% H₂ durchgeführt. Es zeigt sich auch hier, dass für den ND*-Fall auch unter Verwendung des AREVA-Modells der H₂-Abbau so stark ist, dass keine brennbaren Gasgemische in den relevanten Räumen auftraten. Für den MBL-Fall war eine Rechnung möglich und diese wurde durchgeführt. Die Zeitpunkte der Verbrennung sind für beide Fälle in Tab. 4.9-1 gegenübergestellt (Vergleichsfall siehe Kap. 4.4.6).

Tab. 4.9-1 Zeitliche Entwicklung und Bilanz der Verbrennungsrechnung mit Zündung an Reko's bei 8 Vol.% H₂, Vergleich MBL-Fall mit AREVA- und GRS-Modell

Zone	zündet [s]	erlischt[s]	Dauer [s]	Bilanz	Zone	zündet [s]
R13A	22280,0	22325,5	45,5	Durch die Verbrennung von 226 kg Wasserstoff wurden 27 GJ Energie freigesetzt.	R13A	22268,0
R14A	22283,0	22320,8	37,8		R14A	22271,1
R15A	22284,3	22316,6	32,3		R15A	22272,4
R20Ao	22285,9	22308,3	22,3		R20Ao	22274,1
R20Ai	22286,0	22308,0	22,0		R20Ai	22274,1
R21Ao	22289,9	22306,4	16,5		R21Ao	22278,1
R65B	22293,8	22564,9	271,1		R65B	22282,2
R65A	22296,9	22323,3	26,4		R65A	22284,6
R65C	22299,7	22366,7	67,0		R65C	22288,0
R66B	22300,7	22544,9	244,2		R66B	22289,3
R66C	22304,6	22359,3	54,6		R66C	22292,9
R67C	22306,7	26736,0	4429,3		R67C	22295,0
					R20Co	22295,9
					R20Ci	22295,9
					R21Co	22299,5
					R80H	22309,4
				R82C	22326,4	

Die Verbrennung in dieser Rechnung läuft sehr ähnlich ab, wie die in der Rechnung mit der GRS-Korrelation (vgl. Kap. 4.4.6). Die Zündung erfolgt in der gleichen Zone R13A nahe des Lecks nur 12 s später. Die Flammenausbreitung erfolgt in der gleichen Art und Weise, wie im Vergleichsfall. Nur endet die Verbrennung bei Verwendung der AREVA-Korrelation in der Zone R67C, während sie im Vergleichsfall noch durch R20Co, R20Ci, R21Co, R80H und R82C propagiert. Dadurch werden statt insgesamt 279 kg H₂ nur 226 kg (mit AREVA-Reko-Modell) verbrannt. Diese kleinen Unterschiede

zeigen sich auch beispielsweise im Druckverlauf (Abb. 4.9-7). Andere charakteristische Parameter sind quasi gleich, so dass auf einen erneuten Vergleich verzichtet wird.

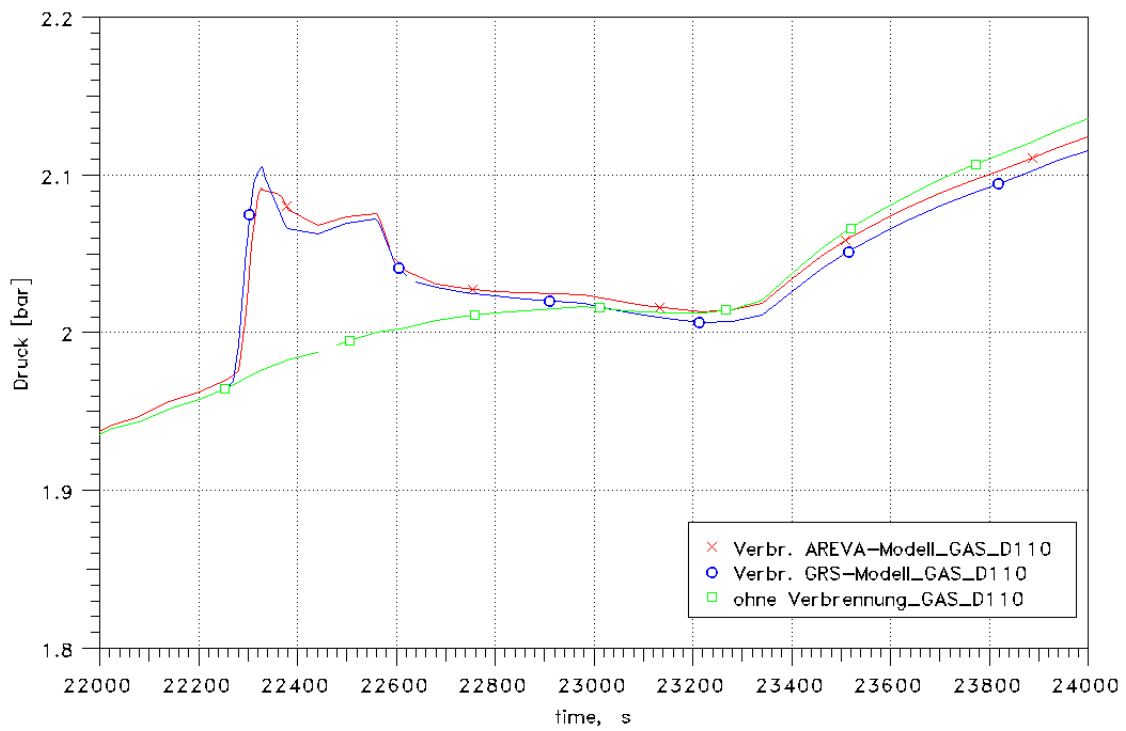


Abb. 4.9-7 MBL-Fall, Abhängigkeit des Druckverlaufs vom verwendeten Reko-Modell, Zündung am Reko bei 8 Vol.% H₂

5 Zusammenfassung

Zur Überprüfung der Wirksamkeit von Reko's wurden für einen DWR des Typs Konvoi (Referenzanlage GKN-2) vier Kernschmelzzenarien: ND-, ND*-, MBL- und SBL-Fall mit COCOSYS erneut untersucht. Die Szenarien sind gekennzeichnet durch:

- **ND-Fall:** Kühlmittelverluststörfall durch Abriss der Druckhalter-Anschlussleitung mit unterstelltem Versagen aller aktiver Not- und Nachkühlsysteme
- **ND*-Fall:** Transiente infolge Totalausfalls der Dampferzeugerbespeisung; unterstelltes Versagen aller aktiven Not- und Nachkühlsysteme; Vermeidung eines potentiellen Hochdruckversagens des RDB durch primärseitige Druckentlastung.
- **MBL-Fall:** Kühlmittelverluststörfall durch mittleres Leck (200 cm²) an einer Hauptkühlmittleitung (heißseitig); Verfügbarkeit der aktiven Notkühlung bis zur Umschaltung auf Sumpfrückförderung gegeben; Verfügbarkeit des sekundärseitigen Abfahrens über die Dampferzeuger gegeben
- **SBL-Fall:** Kühlmittelverluststörfall durch kleines Leck (10 cm²) an einer Hauptkühlmittleitung (heißseitig); Verfügbarkeit der aktiven Notkühlung bis zur Umschaltung auf Sumpfrückförderung gegeben; Verfügbarkeit des sekundärseitigen Abfahrens über die Dampferzeuger gegeben.

Randbedingungen, Rechenmethode

Die Störfallabläufe im Primär- und Sekundärkreislauf, sowie das Verhalten der Kernschmelze nach dem Versagen des Reaktordruckbehälters, wurden in früheren MELCOR-Analysen berechnet /SON 98, SON 01/. Die ersten beiden Fälle ND und ND* wurden bereits bei der Konzipierung des Reko-Konzeptes berücksichtigt /TIL 98/. Die anderen beiden Fälle sind ein Ergebnis der später in der GRS durchgeführten methodischen Studien zur PSA der Stufe 2. Durch die unterstellte Funktion der aktiven Notkühlung bis zum Zeitpunkt der Umschaltung auf Sumpfrückförderbetrieb ergaben sich charakteristisch unterschiedliche Anlagenzustände. So liegt hier aufgrund des Störfallverlaufs während der Kernzerstörungsphase in den meisten Bereichen der Anlagen- und Betriebsräume keine Dampf inertisierung mehr vor, anders als bei ND- und ND*-Fall.

Die von MELCOR ermittelten Freisetzungsraten in den SHB (Dampf, Wasser, Wasserstoff und andere Gasen, sowie Wärme und Nachzerfallsleistung) sind Randbedingungen für die COCOSYS-Rechnungen, die entsprechend aufbereitet wurden.

Der COCOSYS-Datensatz basiert auf einem älteren GRS-Datensatz, der im Vorhaben SR 2306 /TIL 98/ für die Konzipierung des Reko-Systems erstmals eingesetzt wurde. Er wurde umfangreich überarbeitet und bezüglich der in der Zwischenzeit gewonnenen Erkenntnissen von Validierungsrechnungen des Programms COCOSYS an Experimenten in der Nodalisierung erweitert. Auch erfolgte eine umfangreiche Überprüfung (auch vor Ort) wesentlicher konstruktiver Daten des Kernkraftwerks – der Referenzanlage GKN-2. Ergänzt wurde auch das in GKN-2 implementierte Reko-Konzept, anders als in den früheren Rechnungen, wo im Wesentlichen nur ein Basiskonzept analysiert worden war. Die Simulation der Reko's in COCOSYS beruht jetzt auf dem überarbeiteten GRS-Reko-Modell, das an neuen Ergebnissen der vor kurzem durchgeführten THAI-HR Versuche /KAN 10/ erfolgreich validiert wurde. Vergleichsweise wurde für ausgewählte Rechnungen auch das AREVA-Modell in COCOSYS herangezogen.

Rechenergebnisse

Bei den Szenarien ND*, MBL und SBL versagen wegen des geringen Druckpeaks beim Öffnen des Lecks bzw. beim Versagen der Berstscheiben auf dem DH-Abblasetank nur eine begrenzte Anzahl von Berstelementen in den Dampferzeugertürmen und als Strömungspfade durch den Trümmerschutz stehen nur Türleckagen, die zwar klein aber insgesamt nicht unerheblich sind, zur Verfügung. Wegen der eingeschränkten Konvektionsmöglichkeit der Atmosphäre ergeben sich starke Unterschiede in den Atmosphärenzusammensetzungen der drei Hauptraumbereiche: Anlagenräume, Dom und Räume hinter dem Trümmerschutz (Peripherie). Im ND-Szenario hingegen versagen aufgrund der anfänglich sehr starken Druckpeaks beim unterstellten doppelseitigen Abriss der DH-Verbindungsleitung eine große Anzahl von Berstelementen sowohl in den Decken der DE-Türme als auch an anderen Orten im Trümmerschutzzyylinder, so dass sich eine gute Naturkonvektion zwischen Anlagenräumen, Dom und Räumen hinter dem Trümmerschutz ausbilden kann, die die Atmosphäre dieser Raumbereiche stets gut vermischt.

In der ersten Serie von Rechnungen für alle vier Szenarien ist eine mögliche Wasserstoffverbrennung (wie bei den früheren Rechnungen in /TIL 98/) unterdrückt

worden. Die Ergebnisse zeigen für alle untersuchten Fälle eine hohe Wirksamkeit der Rekos und daher nur in relativ kurzen Zeitspannen lokal brennbare Gasgemische auf. Im ND*-Fall waren diese Zeiträume sehr kurz und betrafen auch nur einzelne Zonen. Sie treten hauptsächlich während der ersten Phase der Wasserstofffreisetzung aus dem Primärkreislauf auf (frühe Kernzerstörungsphase), sowie im SBL-Fall während und kurze Zeit nach dem Versagen des Reaktordruckbehälters. Letzteres da der RDB in diesem Fall unter erhöhtem Innendruck versagt (ca. 30 bar) und zu diesem Zeitpunkt eine erhebliche Menge H_2 im RKL gespeichert war.

Die Zündgrenze wird i.d.R. nur in wenigen Bereichen des SHB überschritten. Diese befinden sich in Teilen der Anlagenräume insbesondere nahe des Lecks, aber weniger im Dom und den Räumen hinter dem Trümmerschutz (Peripherie). Dabei bleibt die Atmosphäre bis auf wenige Ausnahmen unterhalb der Zündgrenze für abwärtsgerichtete Verbrennung. Generell liegen zumeist Dampf-Luft-Wasserstoff-Gemische vor, bei denen entsprechend der Ergebnisse der THAI-HD Experimente /KAN 10/ nur langsame und unvollständige Verbrennungen zu erwarten sind. Daraus resultieren keine relevanten SHB-Belastungen.

In der zweiten Serie von Rechnungen sind H_2 -Verbrennungen simuliert worden (sofern noch möglich), wobei die Reko's als Zünder angenommen wurden. Dabei wurden basierend auf den Ergebnissen der THAI-HR Experimente für jedes Szenario je vier Rechnungen mit Zündkonzentrationen zwischen 7,5 und 10 Vol.% Wasserstoff durchgeführt. Zusätzlich wurde eine Parameterstudie mit Zündung bei 4 Vol.% (unterste Zündgrenze für aufwärtsgerichtete Verbrennung) durchgeführt. Generell wurde das Auftreten von Verbrennungsvorgängen in der Regel nur einmal zu einem frühen Zeitpunkt während der Freisetzung von H_2 und Dampf bei der anfänglichen Kernzerstörung berechnet bzw. festgestellt. Generell verhinderten die installierten Reko's die Aufkonzentration von H_2 überwiegend und somit großräumige Verbrennungsvorgänge. Lokale Verbrennungsvorgänge lassen sich nicht vollständig ausschließen, stellen aber auch keine Gefährdung der SHB-Integrität dar.

In einer dritten Serie wurde jeweils ein „worst case“ gesucht, d.h. es wurde pessimistisch unterstellt, dass die Verbrennung zu einem Zeitpunkt einsetzt, wenn die schwerwiegendsten Verbrennungsauswirkungen auf den SHB zu erwarten sind. Dabei wurde aus den Rechenergebnissen der Zeitabschnitt ermittelt, in dem in einem Maximum an Zonen gleichzeitig brennbare Zustände auftraten. Gezündet wurde dann in einer Zone, von der aus die Flammfront in möglichst große Bereiche erfassen konnte. Das Vorhan-

densein einer Zündquelle in dem betroffenen Zündraum wurde unterstellt. „Worst case“ – Zustände gab es nur in sehr kurzen Zeitfenstern. Die Zündungen mussten auch hier stets in den unteren Anlagenräumen angenommen werden und traten meist in Folge der ersten starken Wasserstofffreisetzungen aus dem Primärkreis bei der Kernzerstörung auf. Die Verbrennungsvorgänge führten i.d.R. zu etwas stärkeren Druckbelastungen, als in den anderen untersuchten Fällen, stellen aber auch hier keine Gefahr für die Integrität des SHB dar.

Die Analysen belegen, dass das Reko-Konzept effektiv dazu beiträgt, dass in vielen Raumbereichen insbesondere außerhalb der Anlagenräume kaum noch zündfähige Gasgemische vorhanden sind, insbesondere keine, die weite Raumbereiche gleichzeitig erfassen und so im Wesentlichen nur Teile der Anlagenräume von verbleibenden lokalen H₂-Verbrennungen erfasst werden können. Dies bestätigt auch die in /TIL 98/ dokumentierten früheren Erkenntnisse. In einigen Rechnungen propagiert die Flamme auch in die ersten „Plumezonen“ oberhalb des Austritts aus den Dampferzeugertürmen im unteren Dombereich. In nur wenigen Fällen verläuft die Flammfront unter bestimmten Annahmen durch die Plumezonen durch bis in die oberste Domzone. Dies sind der MBL-Fall bei Zündung an Reko's spät bei 10 Vol.% H₂, sowie die „worst case“-Fälle von ND- und MBL-Szenario. Hier wurde pessimistisch das Vorhandensein einer Zündquelle zum ungünstigsten Zeitpunkt unterstellt. Die dabei erfassten Bereiche im Dom sind vergleichsweise klein (Volumen) im Verhältnis zu den nicht erfassten Raumbereichen im Dom. Im ND*-Fall treten keine Verbrennungen unter realistischen Randbedingungen auf, außer in der Reaktorgrube nach RDB-Versagen.

Bei einer Reko-Zündung bei 4 Vol.% Wasserstoff (untere Verbrennungsgrenze für aufwärtsgerichtete Verbrennung) zeigen die Rechnungen zumeist lang andauernde Verbrennungsvorgänge (wie stehende Flammen) im Bereich der Hauptkühlmittelpumpen (nahe des Lecks), aber keine größere Flammenausbreitung. Dieser Vorgang wird als unrealistisch bewertet.

Die bei den lokalen H₂-Verbrennungsvorgängen berechneten, kurzzeitigen Druckanstiege liegen unterhalb ~0,5 bar, wobei die dafür benötigte Zeit zwischen 15 s (ND-Fall Zündung 8 Vol.% H₂, Druckanstieg ~0,25 bar), 30 s (MBL-Fall, Zündung bei 10 Vol.% H₂, Druckanstieg ~0,5 bar) und 80 s (ND-Fall „worst-case Szenario“, Druckanstieg ~0,42 bar) beträgt. Trotz verbleibender Ungenauigkeiten der berechneten Druckanstiege bestehen große Margen bis zum Erreichen des Auslegungsdruckes des Sicherheitsbehälters, da zündfähige Gasgemische nur im frühen Unfallverlauf vorliegen,

wenn der Druck im Sicherheitsbehälter noch niedrig ist. Die sich aus den COCOSYS-Analysen ergebenden Lastannahmen für strukturmechanische Untersuchungen sind durch die im Vorhaben außerdem durchgeführten strukturdynamischen Berechnungen /SIV 11/, insbesondere der Fälle mit längerer Impulsdauer, abgedeckt. Demnach werden für diese Lastannahmen mit den betrachteten Analysemodellen in /SIV 11/ nur Spannungen im elastischen Bereich erwartet.

Der Druckanstieg als Folge der Verbrennung ist auch deshalb nur gering, weil nur ein kleiner Bereich des SHB von der Verbrennung erfasst wird und somit ein großes „nichtbrennendes“ Volumen vorhanden ist, in das die heißen Gase expandieren. Des Weiteren ist der Druckanstieg klein, weil die Zündgrenze in den meisten Zonen nur geringfügig überschritten wird und der Brand sich deshalb nur relativ langsam ausbreitet.

Die Temperatur der SHB-Schale erhöht sich aufgrund der Verbrennung nur geringfügig, auch in den Fällen, in denen der Brand direkt unterhalb der SHB-Stahlschale stattfindet. Das ist mit der kurzen Brenndauer und der großen Wärmekapazität der Schale begründet.

Durch die Rekombination wird der Sauerstoff bis auf einen geringfügigen Rest i.d.R. innerhalb 24 h nach Beginn der H₂-Freisetzung verbraucht, so dass langfristig die Atmosphäre durch den verbleibenden Stickstoff und zusätzlich durch den Dampfanteil inertisiert wird. Dabei gehen die Analysen davon aus, dass die Schmelze-Beton-Wechselwirkung anhält.

Abschließende Vergleichsrechnungen zwischen dem GRS-Reko-Modell und den AREVA-Korrelationen ergaben keine großen Unterschiede, sowohl für die Validierungs- als auch die Anwendungsfälle.

6 Schlussfolgerungen

Die vorliegenden Rechnungen sowie die im Vorhaben durchgeführten strukturmechanischen Analysen (separat in /SIV 11/ dokumentiert) bestätigen die Wirksamkeit des Reko-Konzeptes anhand der Analyse von vier verschiedenen Unfallszenarien und zeigen keine Gefährdung der SHB-Integrität z.B. durch H_2 -Verbrennungen während der analysierten Unfallszenarien auf. Wesentlich dazu tragen die Reko's bei, die freigesetzten Wasserstoff bereits frühzeitig beginnen, abzubauen. So wird die Zündgrenze nur noch kurzzeitig und meist nur geringfügig und in wenigen Bereichen des SHB überschritten.

Auch die anzunehmende Zündung des Atmosphäremisches durch die Reko's stellt keine Gefährdung dar, da diese frühzeitig bei niedrigen H_2 -Konzentrationen erfolgt und die aus den lokalen Verbrennungen resultierenden Druckanstiege gering sind. Da zudem eine Zündung nur im frühen Unfallverlauf während der anfänglichen Kernzerstörungsphase und intensiven H_2 -/Dampffreisetzung aus dem Primärkreislauf erfolgt, wenn der Druck noch niedrig ist, bleibt er deshalb weit unterhalb des Auslegungsdruckes der SHB-Stahlschale.

Mit so genannten „worst case“ Verbrennungs-Rechnungen, die nur bei einer Zündung der Gasgemische in einem sehr kleinen Zeitfenster möglich und daher eher unwahrscheinlich sind, werden auch nur unwesentlich stärkere Druckanstiege als in den Basiszenarien berechnet. Die bei lokalen H_2 -Verbrennungsvorgängen berechneten, kurzzeitigen Druckanstiege liegen unterhalb $\sim 0,5$ bar, wobei die dafür benötigte Zeit zwischen 15 s (ND-Fall Zündung 8 Vol.% H_2 , Druckanstieg $\sim 0,25$ bar), 30 s (MBL-Fall, Zündung bei 10 Vol.% H_2 , Druckanstieg $\sim 0,5$ bar) und 80 s (ND-Fall „worst-case Szenario“, Druckanstieg $\sim 0,42$ bar) beträgt. Die lokale Temperatur der SHB-Schale steigt aufgrund der Verbrennung ebenfalls nur geringfügig an.

Trotz verbleibender Ungenauigkeiten der berechneten Druckanstiege bestehen große Margen bis zum Erreichen des Auslegungsdruckes des Sicherheitsbehälters, da zündfähige Gasgemische nur im frühen Unfallverlauf vorliegen, wenn der Druck im Sicherheitsbehälter noch niedrig ist. Die sich aus den COCOSYS-Analysen ergebenden Lastannahmen für strukturmechanische Untersuchungen sind durch die im Vorhaben außerdem durchgeführten strukturdynamischen Berechnungen /SIV 11/, insbesondere der Fälle mit längerer Impulsdauer, abgedeckt. Demnach werden für diese Lastan-

nahmen mit den betrachteten Analysemodellen in /SIV 11/ nur Spannungen im elastischen Bereich erwartet.

Eine weitere Validierung des Verbrennungsmoduls FRONT in COCOSYS wäre wünschenswert, z.B. an weiteren THAI-Versuchen, auch um die bestehenden kleineren Fehler (lang anhaltende Verbrennungen in einzelnen Zonen) zu beheben. Auch könnten z.B. großskalige Experimente mit einem erweiterten Fallspektrum dazu beitragen, weitere Einsicht in den Verlauf von H₂-Verbrennungen unter Unfallbedingungen zu erlangen, sowie Daten zur Validierung des Rechenmodells zu erhalten. Es könnten darüber hinaus auch in der THAI-Anlage z.B. Rohrleitungen und Gitterböden, wie sie in den Anlagenräumen vorhanden sind, eingebaut werden, um den Einfluss auf Verbrennungsvorgänge zu untersuchen. Es könnte auch die Auswirkung einer Flamme untersucht werden, die in einen Raumbereich eintritt, in dem die Zündgrenze nur sehr geringfügig bis gar nicht überschritten ist, wie z.B. im Dombereich.

Die Berstelemente in den Strömungspfaden, insbesondere die durch den Trümmereschutzzyylinder führen, versagen nur im ND-Szenario bei hohen anfänglichen Druckpeaks. Deshalb sollte bezüglich dieser Elemente eine detaillierte Bestandsaufnahme vorgenommen werden und überlegt werden, ob die Versagensdrücke zu verringern sind, da bessere konvektive Randbedingungen die H₂-Verteilung und den H₂-Abbau durch die Reko's fördern würden. Es sollte auch eine weitere Abschätzung des Unsicherheitsbandes bezüglich des Versagensdrucks der Berstelemente in den DE-Decken gemacht werden. Eine Einschränkung des Unsicherheitsbandes könnte größere Öffnungsflächen bei kleineren Druckpeaks zu Folge haben, was ebenfalls günstig wäre. Wenn ein anderes Öffnungsverhalten und somit eine stärkere Auswirkung auf die Konvektion zwischen Anlagen- und Betriebsräumen zu erwarten ist, sollte dies mit einer COCOSYS-Rechnung untersucht werden, um zu zeigen, dass das Risiko für verbleibende Verbrennungen weiter zu reduzieren ist.

Da brennbare Zustände hauptsächlich während der Freisetzung aus dem Primärkreis bei der Kernzerstörung auftreten und die Freisetzungsraten somit einen dominierenden Einfluss haben, wäre es wünschenswert, diese zum Vergleich von einer Rechnung mit einem anderen Programm z.B. ATHLET-CD zu erhalten.

7 Literaturverzeichnis

- /ALL 99/ Allelein, Hans-Josef, et al.
Entwicklung und Verifikation eines Containment-Code-Systems (COCOSYS) und eines deutsch-französischen Integralcodes (ASTEC) - Verifikation, Validierung und Anwendung der COCOSYS-Ausgangsversion
Abschlußbericht RS 979, Teil 2, GRS - A - 2737, GRS Köln, 1999.
- /ALL 03/ Allelein, Hans-Josef, et al.
Weiterentwicklung und Fortsetzung der Validierung des Containment-Codesystems COCOSYS und des deutsch-französischen Integralcodes ASTEC Teil 3: Weiterentwicklung und Fortsetzung der Validierung von ASTEC
Abschlußbericht RS 1099, Teil 3, GRS - A - 2962, GRS Köln, 2003
- /ALL 07/ Allelein, Hans-Josef, et al.
Intensivierte Validierung der Rechenprogramme COCOSYS und ASTEC
Abschlußbericht RS 1147, Teil I, GRS - A - 3330/I, GRS Köln, 2007
- /ECK 11/ Eckel, J., Erdmann, W.
The ASTEC Flame FRONT Module Model Description and Parameter Studies
ASTECV2/DOC/11-05, 2011
- /HDR 94/ HDR Sicherheitsprogramm, Kernforschungszentrum Karlsruhe,
Auswertung der experimentellen und analytischen Ergebnisse der Wasserstoffverteilungsversuche, Auswertebereicht Versuchsgruppe E11,
Technischer Fachbericht PHDR 117-94, Februar 1994
- /HEI 95/ Heitsch, M.
Das Verbrennungsmodell DECOR für das Programmsystem RALOC mod4.0
GRS-A-2292, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 1995

- /KAN 10/ Kanzleiter, T., G. Langer,
Hydrogen Deflagration Tests in the THAI Test Facility,
Reactor Safety Research Project 150 1326, OECD-NEA THAI Project, Becker Technologies Eschborn Germany, Report No. 150 1326-H-2, January 2010, beschränkte Verfügbarkeit des Berichtes
- /KLE 08/ Klein-Heßling, W.
COCOSYS V2.4, Quality Assurance Handbook
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH,
Dezember 2008
- /KLE 12/ Klein-Hessling, W., et al.
COCOSYS V2.4 User's Manual
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, März 2012
- /MER 09/ Mertins, M. et. al.
Sicherheitsanforderungen für Kernkraftwerke: Kriterien für den anlageninternen Notfallschutz" (Modul 7), Revision D, GRS, April 2009
- /NOW 10/ Nowack, H.,
Umstellung des COCOSYS Rekombinatormodells auf eine diffusionskontrollierte Reaktionskinetik,
GRS-A-3542, April 2010
- /RSK 97/ RSK-Ergebnisprotokoll vom 17.12.1997,
Maßnahmen zur Risikominderung bei Freisetzung von Wasserstoff in den Sicherheitsbehälter von bestehenden Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor nach auslegungsüberschreitenden Ereignissen,
Empfehlung der RSK vom 17.12.1997
- /RSK 09/ RSK-Ergebnisprotokoll vom 03.09.2009,
Gefährdung des Sicherheitsbehälters von DWR durch Wasserstoffreaktionen infolge der Zünderwirkung von passiven autokatalytischen Reko's,
Empfehlung der RSK vom 03.09.2009

- /SCH 09/ Schwarz, S.,
Simulation of development and dissolution of atmospheric stratifications
with COCOSYS,
3rd COCOSYS User Workshop, June 3rd – 5th 2009, Garching
- /SCH 11/ Schwarz, S. et. al.,
Benchmark on Hydrogen Distribution in a Containment based on the
OECD-NEA THAI HM-2 Experiment,
Nuclear Technology pp. 594 – 603 (September 2011)
- /SIV 11/ Sievers, J. et. al.: Strukturdynamische Untersuchungen eines Sicherheits-
behälters vom Typ Konvoi, GRS-A-3653, Dezember 2011
- /SON 98/ Sonnenkalb, M.
Unfallanalysen für DWR mit dem Integralcode MELCOR 1.8.3,
GRS-A-2579, Juni 1998
- /SON 01/ Sonnenkalb, M.,
Unfallanalysen für DWR vom Typ Konvoi (GKN-2) mit dem Integralcode
MELCOR 1.8.4, GRS-A-2954, Dezember 2001
- /TIL 98/ Tiltmann, M., J. Rohde,
Wirksamkeit eines Systems katalytischer Reko's in Sicherheitsbehältern
von DWR-Anlagen deutscher Bauart,
GRS-A-2628, Oktober 1998

8 Anhang A

8.1 Nodalisationsschemata

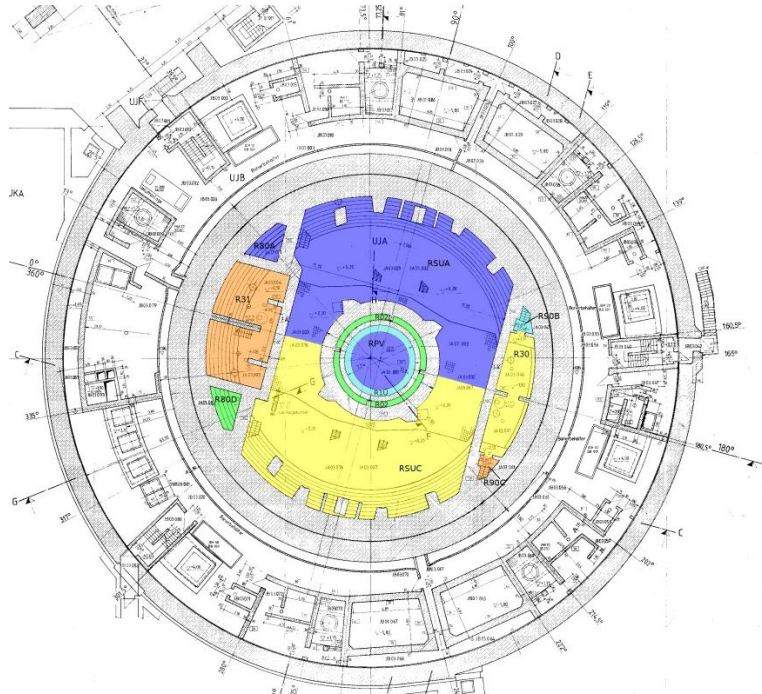


Abb. 8.1-1 Schnitt durch den SHB bei +2.0 m (Höhenkote: 2,1 m)

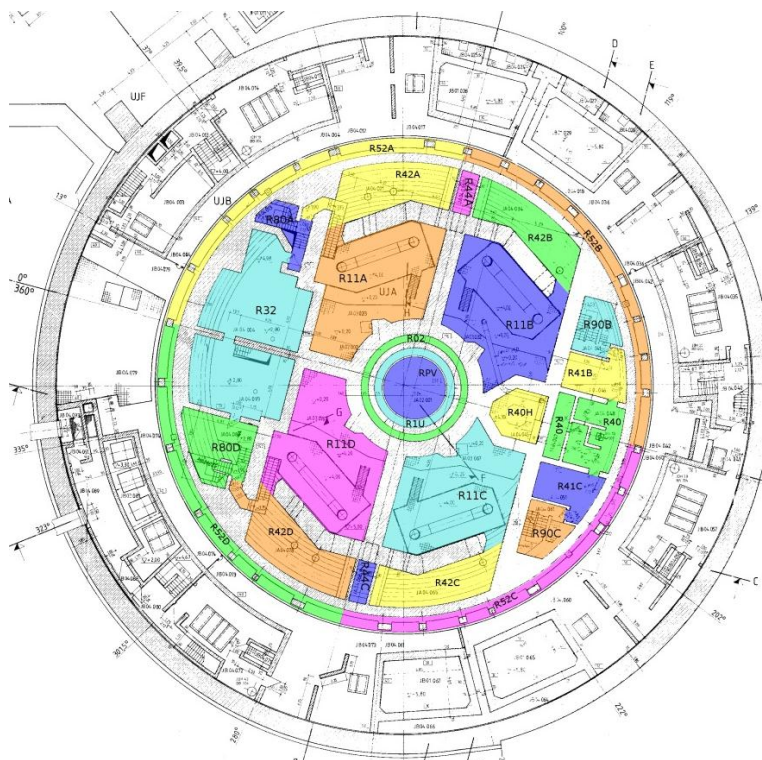


Abb. 8.1-2 Schnitt durch den SHB bei +6,0 m (Höhenkote: 5,3 m)

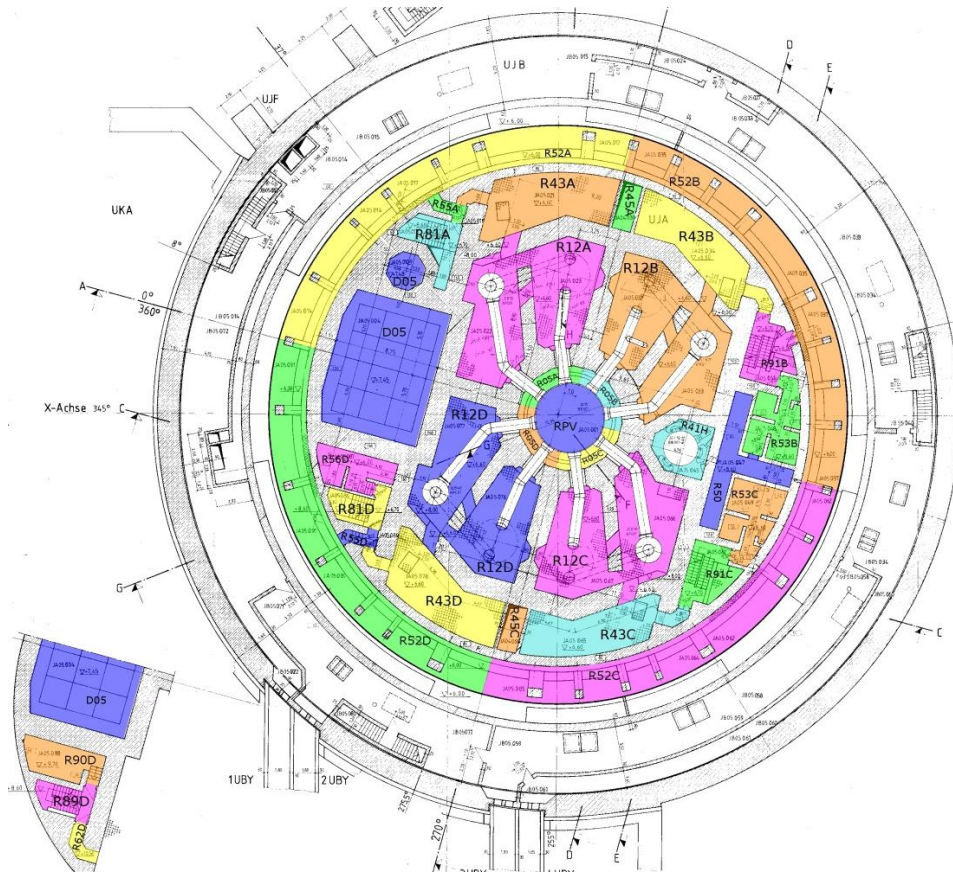


Abb. 8.1-3 Schnitt durch den SHB bei +9 m (Höhenkote: +8,8 m)

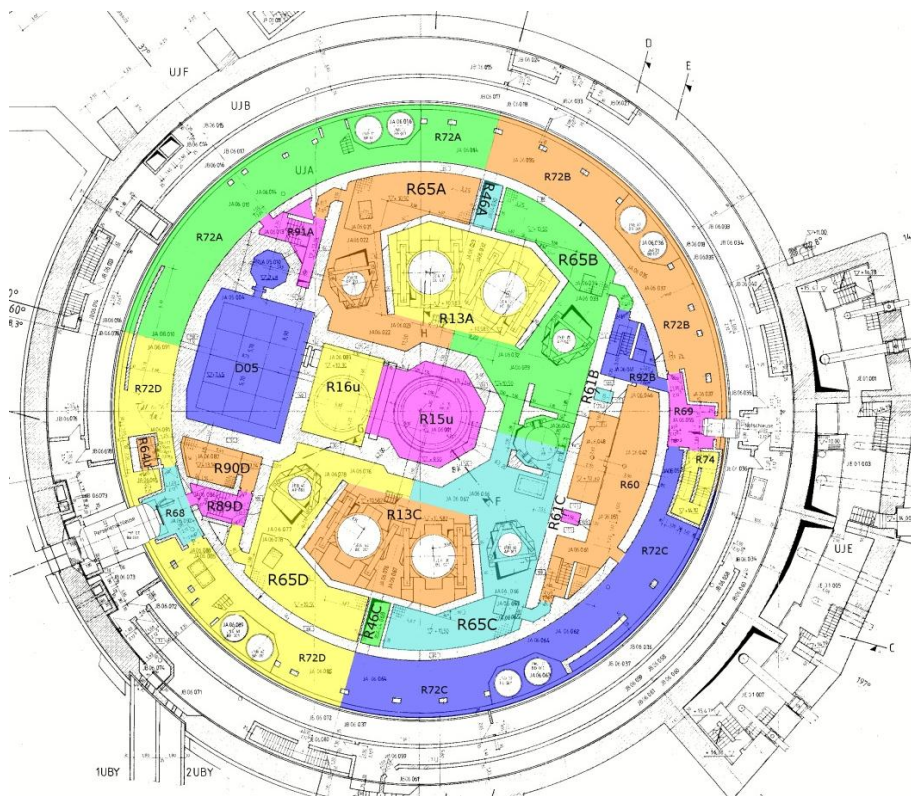


Abb. 8.1-4 Schnitt durch den SHB bei +12 m (Höhenkote +14,2 m)

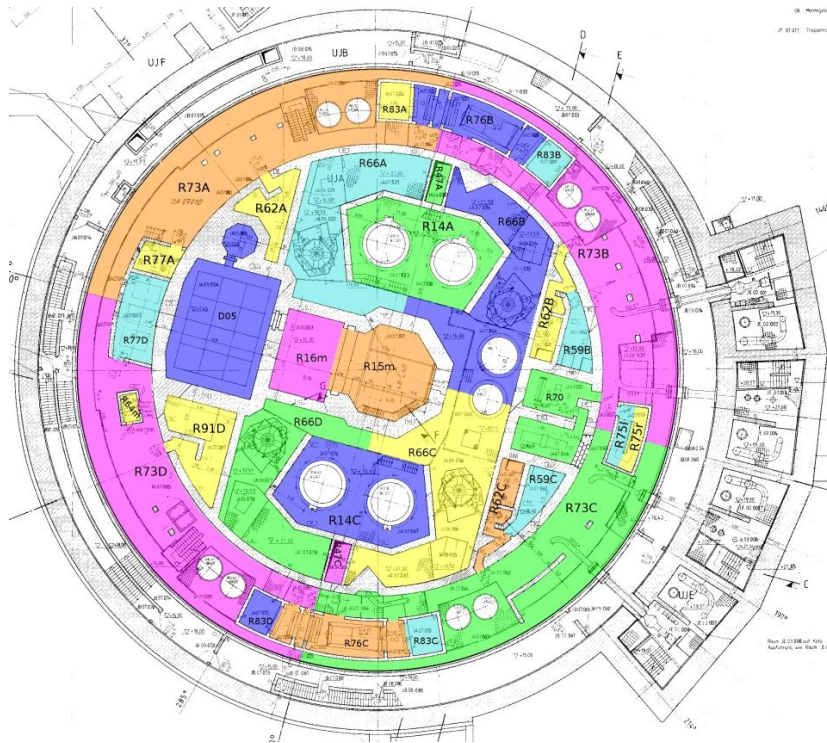


Abb. 8.1-5 Schnitt durch den SHB bei +16,4 m (Höhenkote +17,5 m)

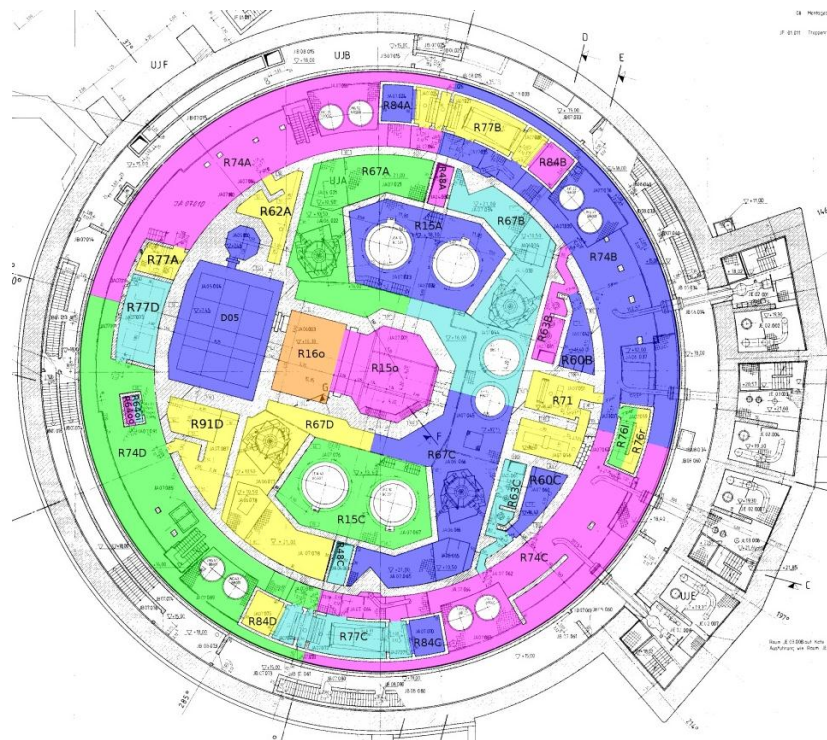


Abb. 8.1-6 Schnitt durch den SHB bei +16,4 m (Höhenkote +20 m)

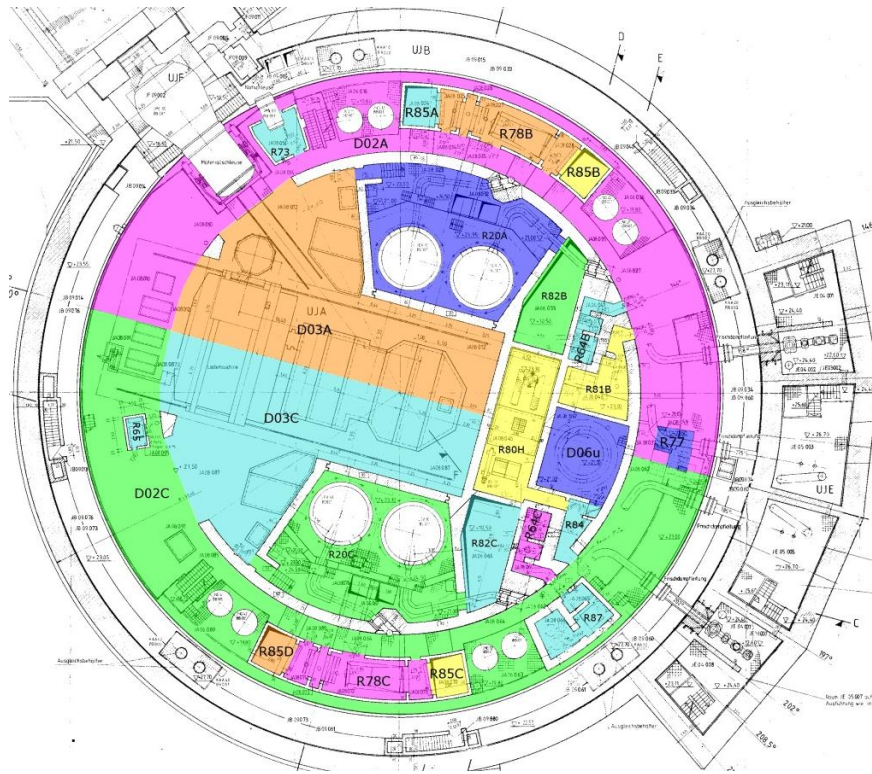


Abb. 8.1-7 Schnitt durch den SHB bei +21,5 m (Höhenkote +23 m)

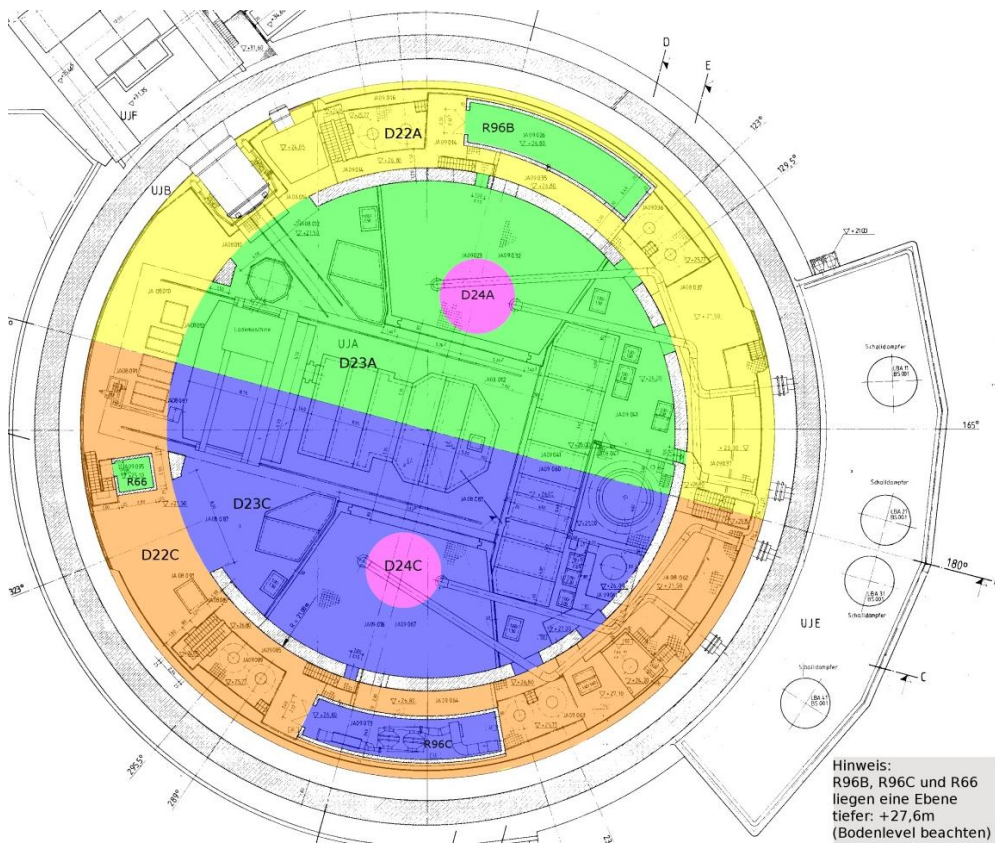


Abb. 8.1-8 Schnitt durch den SHB bei +29,28 m (Höhenkote +30,15 m)

Verteiler

Druckexemplare:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Referat RS I 3 (Herrn Ludwig) 4 x

Bundesamt für Strahlenschutz

Abteilung Z (Herrn Möller) 1 x

Kernkraftwerk Neckarwestheim (GKN-2)

Herrn Schwarz 1 x

Physikerbüro Bremen

Herrn Brettner 1 x

GRS

Bibliothek (hog) 1 x

Autoren

(bas, scz, som) je 1 x

Gesamt

11 x

PDF-Version:

Bundesamt für Strahlenschutz

AG-F (Herrn Dr. Volland)

Kernkraftwerk Neckarwestheim (GKN-2)

Herr Ehlkes

GRS

Geschäftsführer	(wfp, stj)
Bereichsleiter	(erv, paa, prg, rot, stc, ver, zir)
Abteilungsleiter / PL	(som)
Projektcontrolling	(roo)
Autoren	(arn, grb, siv, bas, scz, klh, wff)
TECDO	(wev)

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum
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