

Intensivierte
Validierung der
Rechenprogramme
COCOSYS und
ASTEC

- Hauptband -

RS 1147

Abschlussbericht

Abschlussbericht/ Final Report

Reaktorsicherheitsforschung-
Vorhabens Nr.:/
Reactor Safety Research-Project No.:
RS 1147

Vorhabensitel / Project Title:
Intensivierte Validierung der
Rechenprogramme COCOSYS
und ASTEC

Intensified validation of the
simulation codes COCOSYS
and ASTEC

Autor / Author:
H.-J. Allelein, S. Arndt,
W. Klein-Heßling, W. Luther, K. Neu,
N. Reinke, S. Schwarz, B. Schwinges,
C. Spengler, G. Weber

Berichtszeitraum / Publication Date:
November 2007

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde lie-
gende F&E-Vorhaben wurde im
Auftrag des Bundesministeriums
für Wirtschaft und Technologie
(BMWi) unter dem Kennzeichen
RS 1147 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt
dieser Veröffentlichung liegt beim
Auftragnehmer.

Inhaltsverzeichnis

1	Fortsetzung der COCOSYS-Validierung	1
1.1	Überarbeitung der Validierungsmatrix für COCOSYS.....	1
1.2	Validierung des Jod-Moduls AIM	4
1.2.1	Jodverhalten im Containment	4
1.2.2	Jodmodul AIM	7
1.2.3	Mehrraumfähigkeit	7
1.2.4	Nachrechnung der in der ThAI-Versuchsanlage durchgeführten Jod-Mehrraumversuche	8
1.2.5	ThAI Jod-Mehrraumversuch Iod-12.....	9
1.2.6	Status der Jodmodellierung in COCOSYS-AIM	14
1.3	'Separate Effect-Tests'	16
1.3.1	Validierung der Filtermodellierung	16
1.3.2	Validierung des IVO-Sprühmodells in COCOSYS Nachrechnung des Versuchs HDR E11.1	26
1.3.3	Validierung der 'plume'-Modellierung	53
1.4	Validierung der Öl- und Kabelbrandmodellierung	61
1.5	Teilnahme an internationalen Standardproblemen (ISP)	64
1.5.1	Internationales Standard Problem ISP-47.....	65
2	Begleitung der ThAI-Versuche und deren Nutzung zur Validierung	115
2.1	Begleitung des ThAI-Versuchsprogramms und Mitwirkung bei dessen Planung	115
2.2	Versuch ThAI TH10.....	116
2.2.1	Experiment	116
2.2.2	COCOSYS-Simulationen	120

2.2.3	Rechenergebnisse	123
2.2.4	Vergleich zum HDR-Versuch E11.2.....	128
2.2.5	Zusammenfassung.....	129
2.2.6	Vorschlag für weitere Arbeiten	129
3	Anwendungsrechnungen	130
3.1	Erstellung / Erweiterung der Datensätze für KONVOI und SWR 72 sowie Durchführung beispielhafter Rechnungen	130
3.1.1	Rechnung zu PHEBUS-FPT1 mit den gekoppelten Systemcodes ATHLET-CD und COCOSYS	130
3.1.2	Rechnung zu KONVOI mit den gekoppelten Systemcodes ATHLET- CD und COCOSYS	137
3.1.3	Erweiterung des Datensatzes für SWR72.....	146
3.2	Nodalierungsstudie bezüglich des Aerosol- und Spaltproduktverhaltens und Untersuchung unterschiedlicher Kopplungsmethoden	147
4	ASTEC-Validierung	149
4.1	CPA Basisvalidierung.....	149
4.2	Intensivierte Validierung.....	164
4.2.1	Mehrraum-Fähigkeit der Jodmodellierung in ASTEC.....	164
4.2.2	ASTEC Validierung am PHEBUS FPT1 Versuch (ISP-46)	167
4.2.3	Validierung von Modellkorrekturen zum Aerosolabwaschen.....	178
4.2.4	Validierung von ASTEC-CPA im Rahmen des ISP 47	186
4.2.5	Validierung der implementierten Rekombinatormodelle.....	198
4.2.6	Validierung der MCCI-Module in ASTEC	202
4.3	Validierung des für ASTEC V1 modifizierten H ₂ -Verbrennungsmoduls ..	229

5	Generische ASTEC-Anwendungsrechnungen	235
5.1	Vergleichsrechnungen zur Primärkreisthermohydraulik in CESAR und ATHLET	235
5.1.1	Analyse eines Station Blackout (Notstromfall mit Ausfall aller Notstromdiesel) mit ASTEC V1 (CESAR) für einen WWER-440/213 und Vergleich mit ATHLET	235
5.1.2	Vergleichsrechnung mit ASTEC V1 zur Thermohydraulik in CESAR und ATHLET eines 5 %-SB LOCA in einem KONVOI Reaktor.....	239
5.2	Vergleich ASTEC/MELCOR am Beispiel eines 200 cm ² Lecks im heißen Strang einer KONVOI-Anlage	243
5.3	Analyse eines 80 cm ² -Lecks im kalten Strang eines DWR 1300 MWe mit ASTEC V1.2	247
5.4	Analyse des Kreislauf- und Containmentverhaltens für eine WWER-1000-Anlage bei Unfällen	254
5.4.1	ASTEC-Anwendung	254
5.4.2	Rechnungsergebnisse	255
5.4.3	Schlussbemerkungen.....	261
6	Qualitätssicherung und Nutzerbetreuung	263
6.1	Regressionstesten von COCOSYS.....	263
6.1.1	Qualitätssicherung und Nutzerbetreuung.....	263
6.1.2	Regressionstesten von COCOSYS unter Nutzung der FFT-Methode	263
6.2	Archivierung der Daten von COCOSYS zur Validierung und Anwendung	266
6.3	ASTEC Qualitätssicherung entsprechend GRS/IRSN Vereinbarung.....	267
6.4	Dokumentation der Anwendererfahrungen	268
6.5	Durchführung eines COCOSYS Workshops – Einführung eines Userforums.....	271

6.5.1	Beiträge seitens der GRS	274
6.5.2	Externe COCOSYS Validierung.....	276
6.5.3	Externe Anwendungsrechnungen	277
6.5.4	Zusammenfassung.....	279
7	Zusammenfassung	280
7.1	Stand der aktuellen Validierung von COCOSYS	280
7.2	Status der generischen Anwendung von COCOSYS	285
7.3	Stand der Validierung von ASTEC-CPA und der generischen Anwendung von ASTEC	288
7.4	Fazit	289
8	Literatur.....	290
9	Anhänge.....	294
10	Verteiler.....	295

Kurzfassung

Die in diesem Vorhaben durchgeführten Validierungs- und vor allem Anwendungsrechnungen zu Reaktoren der Typen KONVOI und WWER-1000 mit dem deutsch-französischen Integralcode ASTEC haben einen signifikanten Beitrag dazu geliefert, dass dieser heute quasi das Rückgrat der EU-geförderten Aktivitäten zu schweren Störfällen darstellt. Die EU hat ihre Aktivitäten zu schweren Störfällen derzeit im Rahmen ihres 6. Rahmenprogramms im Netzwerk SARNET gebündelt. Die SARNET-Aktivitäten beziehen sich direkt auf ASTEC oder sollen nach Umsetzung in qualifizierte Modelle in ASTEC ihren Niederschlag finden.

Die Validierung von COCOSYS erfolgte erfolgreich vor allem an Experimenten, die in der ThAI-Versuchsanlage durchgeführt wurden. Herauszuheben sind das gerade im internationalen Vergleich herausragende Ergebnis der 'blinden' Rechnung im Rahmen des ISP-47 und die Mehrraum-Versuche zum Jodverhalten, die die von der GRS als erste erkannte und realisierte Notwendigkeit eindrucksvoll bestätigen, für die belastbare Beschreibung des Jodverhaltens neben der Chemie auch das Transportverhalten (Thermohydraulik) zu berücksichtigen.

Mit den in diesem Bericht dokumentierten Arbeiten zu Validierung und Anwendung wird gezeigt, dass mit COCOSYS ein international als führend angesehenes Werkzeug für die Simulation schwerer Störfälle im Sicherheitseinschluss zur Verfügung steht. Seine Bedeutung für sicherheitstechnische Untersuchungen in realen Reaktoranlagen nimmt mit jedem Schritt seiner weiteren Entwicklung und Validierung weiter zu. Beleg für die bereits jetzt erreichte Akzeptanz ist der Einsatz von COCOSYS seitens der Industrie im derzeit laufenden Genehmigungsverfahren für den ersten z. Z. in Bau befindlichen EPR in Finnland.

Abstract

Calculations for validation and application of the French-German integral code ASTEC have significantly contributed to be more or less the backbone of the activities in the area of severe accidents funded by the EC. Within the 6th EC Framework Programme the activities for severe accidents are at present focused in the SARNET network. SARNET activities are directly related to ASTEC or shall find expression in qualified models for ASTEC.

The successful validation process of COCOSYS took mainly place in using experiment being performed in the ThAI facility. Especially the in international comparison outstanding result gained with a 'blind' calculation in the frame of the ISP-47 is as well worth to be mentioned particularly as the iodine multi-compartment tests, which confirm impressively the necessity of combined simulation of chemistry and transport behaviour (thermal-hydraulics) in order to receive reliable results, a process realized first by GRS.

The work for validation and application documented in this report demonstrates that COCOSYS is a computational tool for the simulation of severe accidents in the containment being ranked internationally in first place. Its significance for reactor safety analyses will increase with each further for the step in development and validation. Evidence for the already reached acceptance of COCOSYS is its industrial use in the present licensing procedure for first EPR just being under construction in Finland.

Einleitung

Dieser Abschlussbericht zum Vorhaben RS 1147 des BMWi "Intensivierte Validierung der Rechenprogramme COCOSYS und ASTEC" besteht aus 2 Teilen:

Teil 1: Hauptband

Teil 2: Anhänge

In Teil 2 sind meist englisch-sprachige, teilweise recht umfangreiche Dokumente zusammengestellt, die im Laufe der Bearbeitung dieses Vorhabens erstellt wurden und deren Übersetzung ins Deutsche einen unverhältnismäßig hohen Aufwand erfordert hätte. Diese Dokumente beschreiben die Arbeitsergebnisse zu einer im Arbeitsprogramm vorgesehenen Aufgabe in recht detaillierter Form.

Im Hauptband (Teil 1) werden zu diesen Aufgaben nur die Ergebnisse zusammenfassend dargestellt und auf den entsprechenden Anhang in Teil 2 verwiesen.

Das bei der COCOSYS-Validierung verfolgte Konzept besteht unverändert darin, zum einen Experimente zu nutzen, die eine möglichst präzise Aussage über die Qualität von Einzelmodellen erlauben, zum anderen sind Experimente erforderlich, die das Zusammenspiel verschiedener Vorgänge beinhalten und somit ermöglichen, modellierte Wechselwirkungen zu beurteilen.

Beispielhaft für die erste Gruppe seien hier die in den Versuchsanlagen ThAI, TOSQAN und MISTRA durchgeführten Thermohydraulikversuche und die im Labormaßstab durchgeführten Jodversuche RTF und CAIMAN genannt. Dagegen sind die Jod-Mehrraumversuche in ThAI ein Paradebeispiel für die zweite Gruppe von Experimenten, da in diesen gerade das räumliche und zeitliche Zusammenwirken von Jodchemie und dem von der Thermohydraulik entscheidend mitbestimmten Transportverhalten untersucht wurde.

Bezüglich der Validierung von ASTEC führt die GRS schwerpunktmäßig Arbeiten zu den Containmentmodulen CPA (Thermohydraulik), WEX und MEDICIS (beide Schmelze-Beton-Wechselwirkung) und IODE (Jodverhalten) durch. Mit der im Laufe dieses Vorhabens von den Entwicklern IRSN und GRS freigegebenen Versionen 1.0 bis 1.2 ergab sich mehr und mehr die Möglichkeit und auch im Hinblick auf die Nutzung von ASTEC durch Dritte die Notwendigkeit, mit dem Integralcode beispielhaft vollständige Störfallsequenzen zu rechnen. Die Rechnungen zu KONVOI und WWER-1000 nah-

men ebenso wie das ISP-46 zum Versuch PHEBUS-FPT1 hinsichtlich der Arbeitsintensität eine Sonderstellung ein.

Bei der Validierung von COCOSYS-Modellen nahm die ThAI-Versuchsanlage naturgemäß einen großen Raum ein. Neben der analytischen Begleitung des ThAI-Versuchsprogramms sind hier der Versuch zur zweiten Stufe des ISP-47 und die drei Jod-Mehrraumversuche hervorzuheben.

Entsprechend der derzeitig immer noch geltenden GRS-Codestrategie für die Simulation schwerer Störfälle sollen die beiden GRS-Systemcodes ATHLET-CD und COCOSYS auch in gekoppelter Weise genutzt werden, um so Störfallszenarien vollständig abzubilden und als Referenz für die Integralcodes MELCOR bzw. ASTEC zu nutzen. Die gekoppelte Nutzung der beiden Systemcodes wurde zum ersten Male im Rahmen des ISP-46 für den PHEBUS-Versuch FPT1 realisiert und anschließend mit erheblichem Aufwand auch für einen Störfall in Folge eines mittelgroßen Bruchs in einer KONVOI-Anlage, wobei hier dem eingeschränkten Modellumfang von ATHLET-CD - unvollständige Simulation der Phase schwerer Kernschädigung und fehlende Modellierung für das Versagen des Reaktordruckbehälters - Rechnung getragen werden musste.

1 Fortsetzung der COCOSYS-Validierung

1.1 Überarbeitung der Validierungsmatrix für COCOSYS

Die in Tab. 1-1 zusammengestellte Matrix für die Basisvalidierung gibt den Stand für COCOSYS zu Beginn dieses Vorhabens wieder.

Wie zu erwarten, hat der Validierungsumfang von COCOSYS durch die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Arbeiten stark zugenommen. Dies resultiert aus dem erweiterten Modellierungsumfang und auch aus den Ergebnissen des Validierungsprozesses selbst. Darüber hinaus stehen nun zahlreiche Versuche der ThAI-Versuchsanlage mit fortschrittlicher Instrumentierung zur Validierung der Thermohydraulik und des Jodverhaltens zur Verfügung.

Für die Felder Thermohydraulik, Jodverhalten, Schmelze-Beton-Wechselwirkung, Pyrolyse und 'jet'- und 'plume'-Verhalten gelang es im Zuge der Bearbeitung dieses Vorhabens, Versuche aus dem internationalen Raum für die Validierung heranzuziehen. Ob dies zukünftig auch für das europäische Netzwerk SARNET gilt, muss die Zukunft zeigen, bisher wurde so gut wie kein Versuch für die Gemeinschaft zur Verfügung gestellt, der die Validierung von COCOSYS signifikant bereichern könnte.

Zum Ende des Vorhabens umfasst die COCOSYS-Validierungsmatrix die in Tab. 1-2 zusammengestellten Versuche.

Eine zusammenfassende Darstellung des aktuellen Standes der Validierung findet sich in Kapitel 7.

Tab. 1-1 Matrix für die Basisvalidierung

Thermohydraulik inkl. Verteilung	<u>HDR T31.5</u> ^{a)}	<u>HDR E11.4</u> / <u>HDR E11.2</u>	<u>HYJET 4</u>	<u>FIPLOC-F2</u>
brennbare Gase	HDR E12.3	BMC Hx26	HDR E12.1	[NUPEC B-2-6] [NUPEC B-8-3]
Rekombinatoren	<u>BMC Gx4</u>	<u>HDR E11.8.1</u>		
Aerosole / Jod	<u>VANAM-M3</u>	<u>KAEVER</u> (Ein- und Mehrkomponenten-Aerosol)	LACE LA4	<u>ACE-RTF (3B und ISP41)</u> PHEBUS RTF3 und 5
Hydrodynamik	<u>GKSS-M1</u>			
'trockene' SBWW	<u>BETA V 5.1</u>	<u>ACE L2</u> und <u>L6</u>	SURC4	
'pool scrubbing'	1 Versuch aus der EPRI-II-Serie und eine POSEIDON-Versuchsreihe			
Innensprühen	<u>NUPEC M7-1</u>	HDR E11.1		
passive Systeme	<u>PANDA BC4</u>	<u>PANDA PC1</u>	<u>PANDA ISP42</u> (Phasen A, D, E, F)	
Pyrolyse	[HDR E41.7]	HDR E22.2		

_____ bereits nachgerechnete Versuche

[] im Sinne von Entwickler durchgeführter Testrechnungen (nach COCOSYS-QM)

a) nur Kurzzeitphase

Tab. 1-2 COCOSYS-Validierung

Thermohydraulik	BMC FIPLOC-F2, VANAM M2*, M3, M4 ThAI-Versuche TH1, TH2, TH5, TH7, J10, TH9, TH10, TH13 (ISP-47) HDR T31.5 (Kurzzeitphase), E11.2, E11.4 TOSQAN- und MISTRA-Versuche zum ISP-47, MISTRA: MICOCO,
H ₂ -Verbrennung	BMC lx2, lx7, lx23, Hx26 HDR E12.3.2 NUPEC B-2-6 und B-8-3 ¹⁾
Rekombinatoren	HDR E11.8.1 BMC Gx4
Aerosole	BMC VANAM-M2* und M3 KAEVER (Versuche K123, K148, K186, K187, K188, K159, K156, K90, K106, K138 und K151)
Jod	ACE-RTF 3B PHEBUS-RTF 3 und 5 ISP-41 Versuche: RTF P 0T2, RTF P1T1, PHEBUS-RTF 1, CAIMAN 97 (02 und 01/01) ThAI-Jod 6, 8 und 10
Hydrodynamik	GKSS-M1 (und zu einem gewissen Maß die unter 'passive Systeme' aufgeführten PANDA-Versuche)
Schmelze-Beton-Wechselwirkung ¹⁾	BETA V1.8, V3.3, V5.1 und V5.2 ACE L1, L2, L5, L6 und L8 COMET L1 MACE M3B und M4 OECD-MCCI CCI-2 und CCI-3
'pool scrubbing'	1 Versuch aus der EPRI-II Serie und eine POSEIDON-Versuchsreihe
Innensprühen	NUPEC M7-1 HDR E11.1
Passive Systeme	PANDA BC3, BC4, PC1, ISP-42 (Phasen A, D, E, F) BC V-213 (LB LOCA 1, SLB-G02)
Pyrolyse ²⁾ (nur Kabelbrand)	HDR E41.7 und E42 NIST ICFMP Nr. 3 (T1, T2, T3, T4, T5, T7, T10, T13, T16, T17, T18) iBMB-OSKAR ICFMP Nr. 4 (T1 und T3)
Jet- und 'plume'-Verhalten	HYJET 4 OECD-SETH (2 Versuche offen, 1 Versuch blind)

- 1) bis auf BETA V5.1 und ACE-L6 nur in 'stand alone' Version
- 2) im Sinne vom Entwickler selbst durchgeführte Testrechnungen (nach COCOSYS-QM)

1.2 Validierung des Jod-Moduls AIM

In einem Technischen Bericht /WEG 05/ sind die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Validierungsarbeiten samt vorangegangener modellseitiger Weiterentwicklung und der für das Jod-Modul AIM erreichte Stand der Validierung detailliert aufbereitet. Deswegen wird an dieser Stelle über die dieses Vorhaben betreffenden Aktivitäten nur zusammenfassend berichtet.

1.2.1 Jodverhalten im Containment

Das kinetische Verhalten des Jods in einem LWR-Containment ist sehr komplex. Dies liegt an der großen Zahl der Jodspezies in der Gas- und Wasserphase und ihrem teilweise sehr unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften. Jod tritt z. B. in der Gasphase als weitgehend inertes Gas (organisches Jod), als reaktives Gas (elementares Jod) und als Aerosol (Cäsiumjodid, Jodat) auf. Weiter laufen eine Reihe von chemischen Reaktionen und physikalischen Prozessen ab, mit denen Spezies fortwährend in andere umgewandelt werden. Viele dieser Reaktionen und Prozesse hängen wiederum von thermohydraulischen Parametern, der Dosisleistung und dem pH-Wert in den Sümpfen ab.

Das Ausbreitungs- und Ablagerungsverhalten der verschiedenen Jodspezies unterliegen einer starken Wechselwirkung mit der Thermohydraulik und dem Kernschmelzaerosol. In COCOSYS sind diese Wechselwirkungen durch eine enge numerische Kopplung von AIM an den Thermohydraulik- und den Aerosolmodul berücksichtigt. So können der Jodtransport im Containment, die lokale Ablagerung auf Oberflächen und die Verteilung zwischen Gas- und Wasserphase detailliert simuliert werden.

Zum besseren Verständnis der durchgeführten Modellverbesserungen an AIM und zur leichteren Interpretation der diversen Rechenergebnisse mit AIM wird hier das Jodverhalten exemplarisch für ein Kernschmelzszenario in einem DWR dargestellt. Es werden vor allem jene Prozesse beschrieben, die die Konzentration der luftgetragenen

Jodspezies im Containment und damit den Jodquellterm an die Umgebung beherrschen.

Bei einem Unfall mit teilweise oder ganz zerstörtem Reaktorkern gelangt das Spaltprodukt Jod aus dem Leck im Primärkreis und später Jodreste aus der Schmelze in das Containment. Ein Großteil des Jods reagiert bereits im Reaktordruckgefäß mit Cs. Es wird daher vor allem CsI freigesetzt. Nur maximal 5 % gelangen als I_2 und HI ins Containment.

CsI ist ein wasserlösliches, leicht hygroskopisches Aerosol, das mit den anderen Bestandteilen des Kernschmelzaerosols agglomeriert. Durch Sedimentation und Diffusiophorese wird CsI rasch auf den Containmentoberflächen abgelagert und mit dem abschließenden Wandkondensat in den Sumpf gespült.

Im Wasser dissoziiert CsI und mit der Spezies I^- laufen unter dem Einfluss der radioaktiven Strahlung im Sumpf eine Vielzahl von Reaktionen ab, durch die neue Jodspezies gebildet werden. Vor allem die Bildung der flüchtigen Spezies I_2 und von organischem Jod (RI) ist von Bedeutung.

I_2 wird im Sumpf vor allem durch Radiolyse aus I^- , aber auch durch radiolytische Reduktion aus IO_3^- gebildet.

I_2 wird durch Hydrolyse wieder zersetzt. Diese Zersetzung ist stark vom pH-Wert im Sumpf abhängig. Bei hohem pH-Wert wird die I_2 -Konzentration im Sumpf stark reduziert.

Eine andere I_2 -Senkre im Sumpf stellen suspendierte Silberpartikel dar. Das Silberaerosol wird beim Niederschmelzen der Steuerstäbe gebildet und ins Containment freigesetzt, wo es sich ablagert und mit dem Wandkondensat in den Sumpf gespült wird. Dort bildet sich mit dem gelösten I_2 AgI, das schwer löslich und nicht flüchtig ist.

Organische Jodide, abgekürzt RI, werden im Sumpf in Gegenwart organischer Reste (z. B. Öle) oder auf Dekontaminationsanstrichen (Farbe) thermisch oder radiolytisch gebildet. Die RI-Bildung hängt auch vom pH-Wert ab.

Die im Sumpf gebildeten Gase I_2 und RI werden so lange durch Massentransfer in die Atmosphäre freigesetzt, bis sich ein Konzentrationsgleichgewicht einstellt. Bei 100 °C ist im Gleichgewicht die I_2 -Konzentration im Wasser ca. 10mal höher als im Gas und für CH_3I sind die Konzentrationen in etwa gleich groß. Da in einem LWR-Containment

abgelagertes partikelförmiges Jod sowie im Sumpf gelöstes Jod können resuspendieren und damit auch zum Quellterm beitragen.

1.2.2 Jodmodul AIM

Die Chemie im Jodmodul basiert auf dem Programm IMPAIR und beinhaltet ca. 50 unterschiedliche Reaktionen. AIM unterscheidet zwischen 14 Jodspezies in der Atmosphäre, 10 Jodspezies im Sumpf und 5 nicht Jod enthaltende Spezies wie Ag, org. Reste CH_3^+ und Ozon. Der Transport zwischen Atmosphäre und Sumpf sowie durch die Verbindungen wird berechnet. Das Verhalten der aerosolförmigen Jodspezies CsI und AgI kann direkt vom Aerosolmodell AFP berechnet werden. Ein weiterer Aspekt von AIM ist die direkte Anbindung an die Thermohydraulik, die es erlaubt, Chemie und Transportverhalten des Jods zu simulieren.

Eine detaillierte Beschreibung des aktuellen Modellierungsumfangs findet sich ebenso in /WEG 05/ wie die wesentlichen Ergebnisse zur abschließenden Phase des ISP-41 und zur Versuchsbegleitung der Jodversuche in ThAI.

1.2.3 Mehrraumfähigkeit

In aller Regel werden auch heute Jodrechnungen für das Containment international noch in Einraum-Geometrie durchgeführt, d. h. das gesamte Volumen des Containments von bis zu $70\,000\text{ m}^3$ wird als 1 Zone abgebildet. Dass dieser Ansatz weder durchgehend konservativ ist, noch erlaubt, den radiologischen Quellterm nach relevanten Spezies aufzuschlüsseln, versteht sich fast von selbst. Aus diesen Gründen ist es notwendig, die 'reine Jodchemie' um die Transportphänomene zu erweitern, wozu auch eine Kopplung zur Thermohydraulik und zum Aerosolverhalten - jeweils in Abhängigkeit von Zeit und Raum - gehört, und 'jodseitig' die sog. Mehrraumfähigkeit des Jodmodells. Weltweit wurde dieser Ansatz zuerst in COCOSYS - bzw. in einem seiner Vorläufercodes FIPLOC - realisiert.

Da bis zu der Durchführung der Jod-Mehrraumversuche Iod 10, 11 und 12 in der ThAI-Versuchsanlage weltweit keine Versuche zur Validierung zur Verfügung standen, wurde der Aerosolabbauversuch VANAM-M3 gedanklich für Jod adaptiert und so die grundsätzliche Fähigkeit der Modellierung aufgezeigt, Mehrraumeffekte simulieren zu können.

1.2.4 Nachrechnung der in der ThAI-Versuchsanlage durchgeführten Jod-Mehrraumversuche

Die in den letzten Jahren mit COCOSYS und seinen Vorläufercodes durchgeführten Rechnungen zeigten ausgeprägte Mehrraumeffekte, doch konnten diese Rechenergebnisse mangels geeigneter Experimente lange nicht bestätigt werden. Zur Validierung von COCOSYS-AIM standen bisher nur Jodversuche in kleinem und mittlerem Maßstab mit Behältervolumina bis 300 Liter, wie die kanadischen RTF (Radioiodine Test Facility)-Tests und die französischen CAIMAN (CAractérisation de l'Iode Moléculaire dans un Accident Nucléaire)-Tests, zur Verfügung. Diese sind aber wegen ihrer geringen Größe und einfachen Geometrie zur Überprüfung der Jod-Modellierung von Mehrraumeffekten wenig geeignet. Von der GRS wurden daher Jod-Mehrraumversuche in der 60 m³ ThAI-Versuchsanlage von Becker Technologies in Eschborn initiiert und wesentliche Teile der Auslegung erarbeitet. Aufgrund ihrer Zielsetzung und der für Jodversuche beachtlichen Behältergröße sowie der kontrollierten Fahrweise sind diese Jod-Experimente weltweit einzigartig.

Bereits bei der sehr umfangreichen analytischen Begleitung dieser ThAI-Versuche hat sich gezeigt, dass die Jodmodellierung von COCOSYS durchaus in der Lage ist, die beobachteten Effekte qualitativ abzubilden. Ein Ziel der detaillierten Nachrechnung war es, die noch bestehenden Modellschwächen zu identifizieren. Die Versuche, deren Ergebnisse und der Vergleich der berechneten Ergebnisse mit den experimentellen sind detailliert in einem Beitrag für die '14th International Conference on Nuclear Engineering' (ICONE 14) dargestellt (Anhang 9).

Primäres Ziel dieser Versuche war es, eine Datenbasis zur Validierung des Jod-Mehrraumverhaltens mit COCOSYS, ASTEC und anderen Codes zu generieren. Dabei standen die folgenden Prozesse im Mittelpunkt:

- Jodtransport bei geschichteter und durchmischter Behälteratmosphäre,
- Jodablagerung auf und Resuspension von Strukturoberflächen ohne und mit Wandkondensation und
- Jod -Massentransfer zwischen Sumpf und Atmosphäre.

Die Versuche Iod-10 und Iod-11 wurden unter trockenen Bedingungen, d. h. ohne Wandkondensation ausgeführt, während Iod-12 mit Wandkondensation durchgeführt

wurde. Im Folgenden wird nur Iod-12 näher beschrieben, die Ergebnisse der beiden vorangegangenen Versuche werden zusammengefasst. Seine Fahrweise zeigt wesentliche Elemente eines Kernschmelz-Unfallszenarios in einem LWR-Containment. Auch dort werden gleichzeitig trockene und nasse Oberflächen in geschichteter und durchmischter Containmentatmosphäre erwartet.

Die Ergebnisse der Nachrechnungen zu IOD10 und 11 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

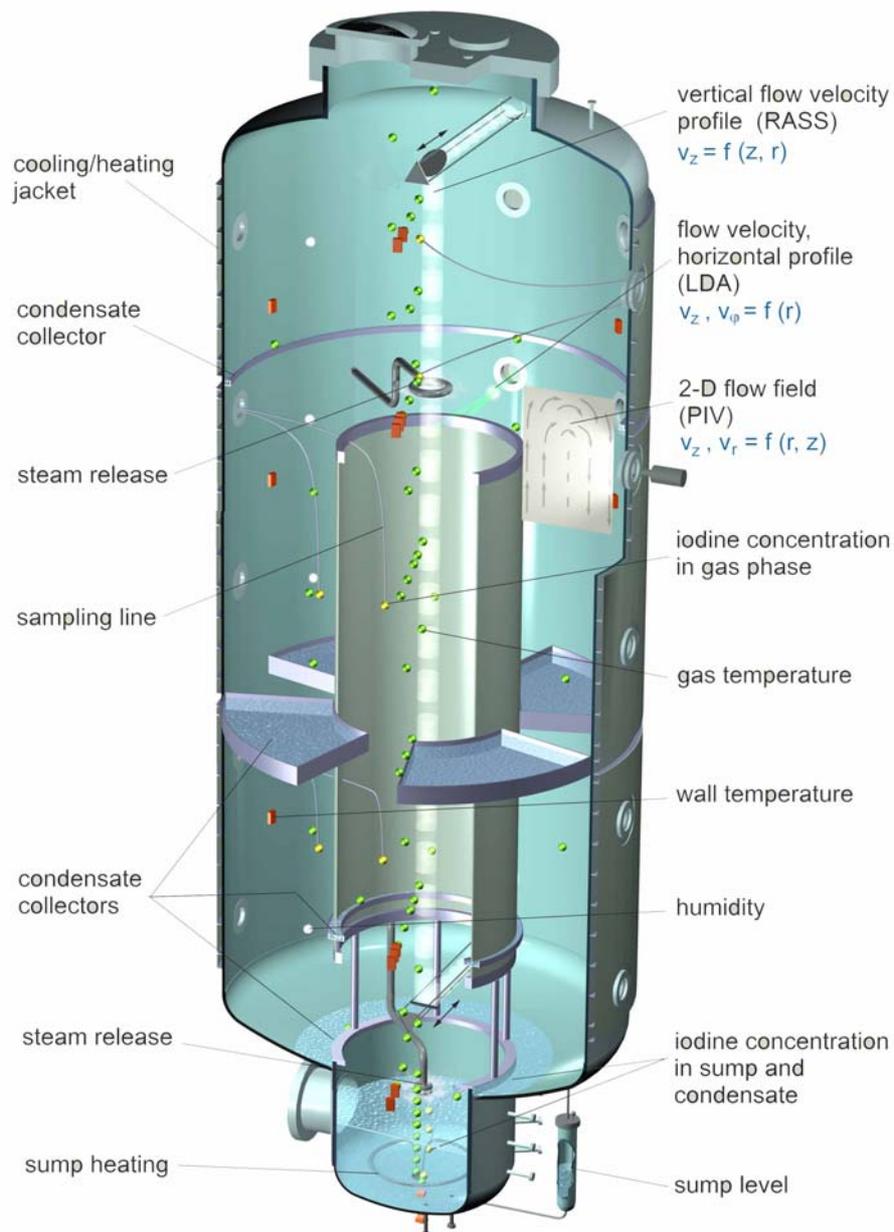
- In dem recht trockenen Versuch IOD 10 mit einer relativen Feuchte < 30 % reichen die konvektiven Strömungen aus, um das I_2 nach Auflösung der anfänglichen Schichtung weitgehend gleichmäßig über den gesamten Versuchsbehälter zu verteilen. Dieser Homogenisierungsprozess wird von COCOSYS-AIM unterschätzt.
- Im Versuch IOD 11 betrug die relative Feuchte in der Stratifikationsphase mehr als 75 %. Die anfänglich ausgeprägten Unterschiede in der Heliumkonzentration waren 3 Stunden nach Einleitung der Homogenisierung nicht mehr vorhanden. COCOSYS konnte dieses Heliumverhalten problemlos simulieren. Im Gegensatz zu Helium waren auch bei Versuchsende die I_2 -Konzentrationen im unteren Behältervolumen um ca. 1 Größenordnung niedriger als diejenigen im Kuppelbereich. COCOSYS-AIM berechnet diese Konzentrationsunterschiede zwar richtig, liegt aber insgesamt bis zu einem Faktor 5 über den Messergebnissen. Ein Grund könnte die modellmäßig nicht erfasste Reaktion des abgelagerten I_2 mit dem Eisen der Wandstrukturen zu nicht flüchtigem FeI_2 sein.

1.2.5 ThAI Jod-Mehrraumversuch Iod-12

Für den Jod-12-Mehrraumversuch war der Behälter (Abb. 1-2) durch zwei eingezogene Zwischenböden in fünf Räume unterteilt, die über Überströmöffnungen atmosphärisch verbunden waren: Sumpfraum mit dem Hauptsumpf, unterer Ringraum, oberer Ringraum mit dem flachen Zwischensumpf, Innenzylinderraum und Kuppel. Durch kontrolliertes Heizen des oberen Behälterbereichs wurde eine thermisch geschichtete, stabile Behälteratmosphäre aufgebaut. In den heißen Kuppelraum wurde dann ca. 1 g elementares Jod eingespeist.

Mit der umfangreichen und fortschrittlichen Instrumentierung werden alle wesentlichen thermohydraulischen Parameter, wie Temperatur, Feuchte, Gasgeschwindigkeiten etc.

an verschiedenen Stellen im Behälter gemessen. Die Konzentration des eingespeisten elementaren Jods (I_2), das mit dem radioaktiven Isotop I-123 markiert ist, wird in der Gasphase, in den Sümpfen, im Wandkondensat und als Ablagerung auf den trockenen Stahlwänden gemessen. Die sechs Messpositionen der Gaswaschflaschen, mit der das I_2 in der Gasphase gemessen wird, erlauben eine gute räumliche Auflösung der Jodverteilung im Behälter.



ThAI Test Vessel

Abb. 1-2 ThAI-Versuchsbehälter mit Instrumentierung

Der 60 m³ große wärmegegedämmte ThAI-Behälter (in der Abbildung mit umfangreicher Instrumentierung) hat einen Innendurchmesser von 3,2 m und eine Höhe von 9,2 m. Durch drei unabhängige Kühl-/Heizmäntel kann die vertikale Behälterwand abschnittsweise geheizt bzw. gekühlt werden.

Im Versuch Iod-12 baute sich die atmosphärische Schichtung nach einer Versuchszeit von drei Stunden durch Einspeisen von Dampf in den oberen Innenzylinderraum und durch Einspeisen von Helium (He) in den Sumpfraum bei gleichzeitigem Kühlen der beiden unteren Mäntel ab. Der Dampf füllte den Innenzylinder und strömte über die untere Kante in den Ringraum. In der Folge setzte eine Konvektionsströmung ein und verteilte das noch nicht auf den trockenen Stahlwänden abgelagerte gasförmige I₂ im gesamten Behälter. Durch die anhaltende Wandkondensation an den gekühlten Wänden und die so genannte "nasse I₂-Ablagerung" nahm in der Folge die Konzentration des gasförmigen Jods kontinuierlich ab.

COCOSYS/AIM-Vorausrechnung und Vergleich mit experimentellen Ergebnissen

In COCOSYS-Rechnungen kann für das Jod-Problem eine Nodalisierung (Abb. 1-3), die von der Thermohydraulik-Nodalisierung abweicht, verwendet werden. Damit wird einerseits den unterschiedlichen Anforderungen an die Genauigkeit der Teilmodelle Rechnung getragen und andererseits wird Rechenzeit gespart. Die Thermohydraulik-Nodalisierung des Behälters für Iod-12 umfasst 50 Zonen, 73 atmosphärische Strömungsverbindungen und 58 Wärmeleitschichten. Sie basiert auf Arbeiten und Erkenntnissen aus den bisher durchgeführten ThAI-Thermohydraulik-Versuchen. Die Nodalisierung erlaubt u. a. die Simulation von Gegenströmungen im oberen und unteren Ringraum und die Erfassung von Schichtungsphänomenen in der Kuppel.

Die bei der Vorausrechnung zugrunde gelegte Fahrweise entspricht bis auf kleine Abweichungen jener der tatsächlichen Versuchsführung. Die Vorausrechnung kann daher direkt mit der Messung verglichen werden.

Während der Schichtungsphase liegt die I₂-Konzentration im Sumpfraum unter der Nachweisgrenze und ist mehr als drei Größenordnungen kleiner als in der Kuppel (Abb. 1-4). Über Stunden gelangt kein Jod in die tief liegenden Räume. Erst mit der Dampfeinspeisung setzt eine großräumige Naturkonvektionsströmung ein, mit der Jod langsam in die unteren Räume transportiert wird. Diese konvektive Durchmischung ist aber nicht stark genug, um die Konzentrationen restlos anzugleichen. Es bleiben bis zum Versuchsende Konzentrationsunterschiede bis zu einem Faktor 4 bestehen.

In der Vorausrechnung wurde der Verlauf der I_2 -Konzentrationen (Abb. 1-5) mit den großen lokalen Konzentrationsunterschieden während der Schichtungsphase und dem teilweise Angleichen der Konzentration während der Durchmischungsphase im Großen und Ganzen korrekt vorhergesagt. Die I_2 -Konzentration wird nur während der Schichtungsphase in den unteren Räumen überschätzt und die I_2 -Abnahme wird in der Durchmischungsphase etwas unterschätzt. Ursache dafür sind Ungenauigkeiten in der thermohydraulischen Rechnung und in einem Jod-Teilmodell, das die I_2 -Resuspension beschreibt.

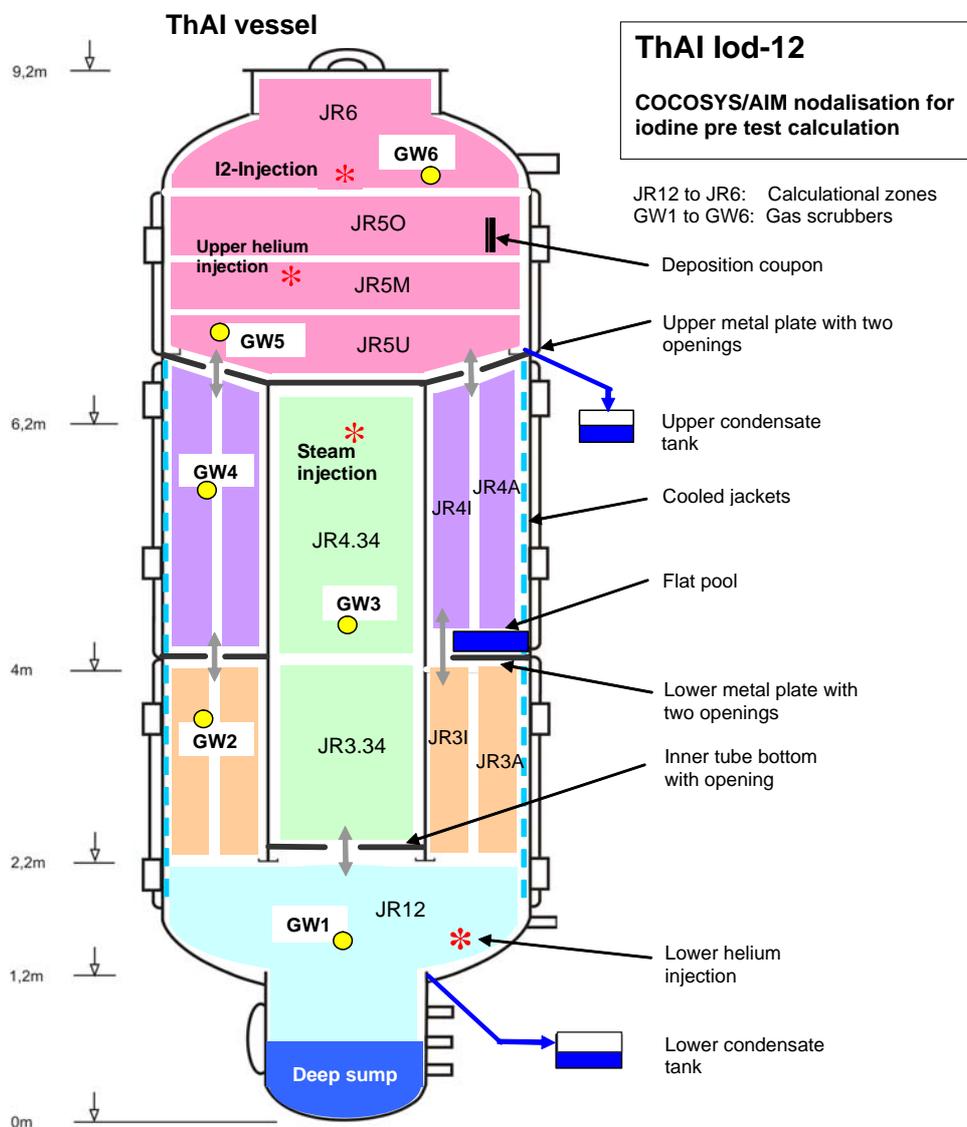


Abb. 1-3 Jod-Nodalisation mit 11 Zonen im Behälter und drei Umgebungszonen, eingezeichnet sind die Positionen für die I_2 - und He-Einspeisungen sowie die Gaswäscher und das Coupon zur Messung von abgelagertem I_2

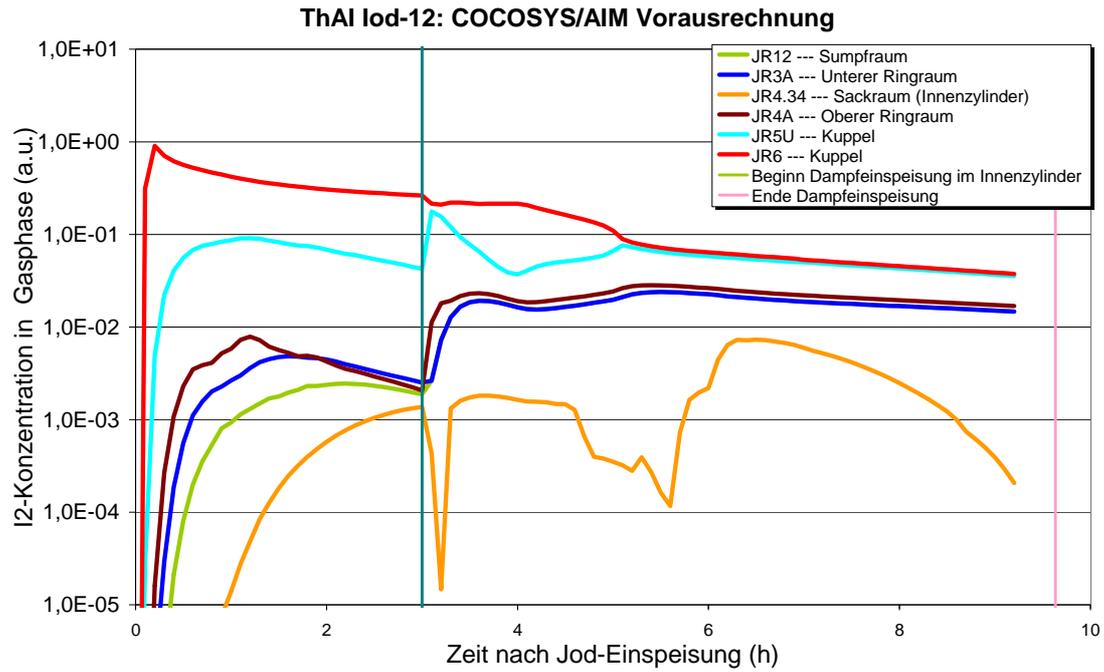


Abb. 1-4 Vorausgerechnete Jod-Konzentrationen in der Gasphase im Mehrraumversuch Iod-12

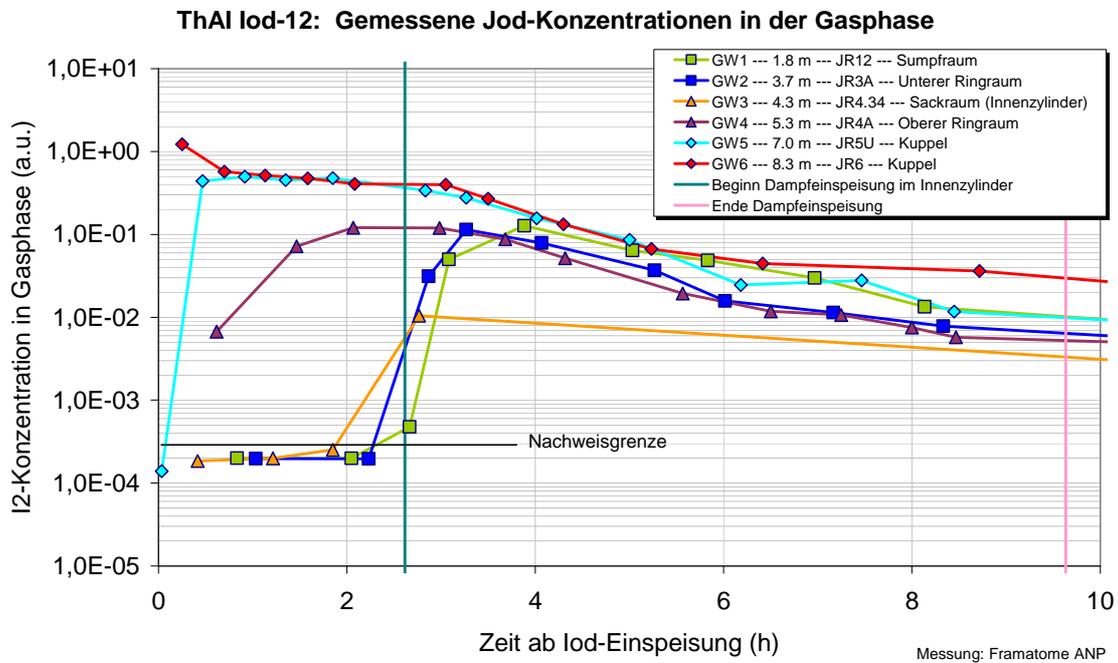


Abb. 1-5 Gemessene Jod-Konzentrationen in der Gasphase im Mehrraumversuch Iod-12

Schlussfolgerungen

Die ThAI-Jodversuche unter kontrollierten thermohydraulischen Bedingungen in einer Mehrraumgeometrie sind weltweit einzigartig. Erstmals können wesentliche Aspekte der Mehrraum-Modellierung für Jod in COCOSYS, ASTEC und anderen Codes validiert werden. Die Versuchsergebnisse bestätigen eindrucksvoll die mit COCOSYS-AIM vorhergesagten, sehr ausgeprägten Mehrraumeffekte auf die Ausbreitung und das Verhalten des Jods in der Containmentatmosphäre und in den Sümpfen.

Bei geschichteter Behälteratmosphäre ist die Verteilung von gasförmigem I_2 stark inhomogen. Die Konzentrationsunterschiede betragen mehrere Größenordnungen.

Im Übergangsbereich zwischen geschichteten und durchmischten Bedingungen resuspendiert I_2 stark an den trockenen Wänden und wird in der Folge in Räume mit niedriger I_2 -Konzentration transportiert. Die trockenen Stahloberflächen wirken als I_2 -Zwischenspeicher.

Bei durchmischter Atmosphäre wird die I_2 -Ablagerung auf den nassen Wänden teilweise durch Resuspension von den trockenen Wänden kompensiert. Dies führt dazu, dass im Gegensatz zum ebenfalls eingespeisten inerten Gas Helium, I_2 zum Versuchsende in der gut durchmischten Atmosphäre nicht vollständig homogen verteilt ist.

Die in den ThAI-Versuchen gemessenen Mehrraumeffekte beim Jodverhalten sind auch in großen LWR-Containments mit ihren komplexen Geometrien zu erwarten. Ihre hinreichend genaue Simulation ist nicht nur für die Berechnung des Jod-Quellterms aus der Anlage, sondern wegen der starken Nachzerfallsleistung des Jods auch für die Analyse von Thermohydraulik, Wasserstoffverteilung und Aerosolverhalten im Containment essentiell.

1.2.6 Status der Jodmodellierung in COCOSYS-AIM

Die Teilnahme am ISP-41 / follow up, Phase 2, war ein wesentlicher Validierungsschritt für AIM. Durch die vier Versuche wurde ein weites Parameterfeld abgedeckt. Die COCOSYS/AIM-Ergebnisse der blinden Rechnung waren ziemlich schlecht. Die Konzentrationen des elementaren Jods (I_2) in der Gasphase wurde um mehr als eine Größenordnung überschätzt und die Organoiodkonzentrationen um bis zu einer Größenordnung unterschätzt. Durch Modelländerungen, wie zur pH-Abhängigkeit der radiolytischen I_2 -Bildung im Sumpf, konnten mit den offenen Rechnungen bereits bessere Er-

gebnisse erzielt werden. Zufrieden stellend waren die Ergebnisse aber erst in den so genannten optimierten Rechnungen, bei denen die tatsächlich verwendeten chemischen Parameter, vor allem jene für Ablagerung und Resuspension, aller Teilnehmer bekannt waren. Die modifizierten Werte lagen in einem Unsicherheitsband von $\times/:$ Faktor 2 um die empfohlenen Werte. Eine solche "Feinabstimmung" ist nur mit Hilfe einer entsprechend großen, experimentellen Datenbasis möglich. Es überrascht daher nicht, dass AECL und IRSN, die die Versuche für das ISP zur Verfügung gestellt hatten, auch die besten Rechenergebnisse erzielten. Die COCOSYS/AIM-Ergebnisse landeten im Mittelfeld aller teilnehmenden Codes.

Das ISP-41 zeigte drei notwendige Modellverbesserungen an AIM auf: (1) Einbau eines Modells zur Berechnung der pH-Wert-Entwicklung im Sumpf, (2) Überprüfung und Verbesserung der Jod/Ozon-Reaktion im Gas und (3) Ausbau der Kopplung zwischen AIM und dem Thermohydraulik-Modul für eine realistischere Beschreibung des Iod-Massentransfers.

Einen weiteren Schwerpunkt der durchgeführten Arbeiten stellen die begleitenden Rechnungen zu den Jod-ThAl-Versuchen dar. Diese sind vor allem den Jod-Transportphänomenen gewidmet. Anhand der durchgeführten Einraumversuche konnten unter anderem die Modelle für Jod-Ablagerung und Resuspension auf Stahl ohne und mit Wandkondensation grundlegend überarbeitet werden. Die Modelle sind auch für die Versuchsauswertung unverzichtbar. Auch die Eigenschaft der Stahlwände, I_2 zwischenzuspeichern und wieder abzugeben, wird jetzt von AIM gut beschrieben.

Die drei durchgeführten Jod-Mehrraumversuche sind weltweit einzigartig. Mit COCOSYS/AIM wurden bereits in Auslegungsrechnungen I_2 -Konzentrationsunterschiede in der Gasphase von mehreren Größenordnungen vorhergesagt. Sie sind ausgeprägter als die für aerosolförmiges und organisches Jod. In den Versuchen IOD 10, 11 und 12 wurde dies eindrucksvoll bestätigt.

Alle drei Vorausrechnungen der Jod-Mehrraumversuche sind qualitativ in guter Übereinstimmung mit den später durchgeführten Messungen. Die ausführlichen Nachrechnungen zeigen Defizite bei der Modellierung der Resuspension und die fehlende Modellierung der Reaktion von abgelagertem I_2 mit Eisen der Ablagerungsfläche zu nicht flüchtigem FeI_2 auf.

AIM-Rechnungen zeigen, dass in einem realen Containment unter Unfallbedingungen die I_2 -Konzentrationsunterschiede wegen der radiolytischen I_2 -Bildung (ThAl hat keine

Strahlenquelle) noch stärker sind. Dieser Mehrraumeffekt hat nicht nur auf den Jod-Quellterm Auswirkungen, sondern beeinflusst wegen der starken Nachzerfallsleistung des Jods auch die Thermohydraulik und die H₂-Verteilung im Containment.

Da Modellverbesserungen im Allgemeinen mit sehr aufwändigen Entwicklungs- und Validierungsarbeiten verbunden sind, wird vorgeschlagen, diese auf jene Reaktionen zu konzentrieren, die den größten Beitrag zur Unsicherheit des berechneten Jodquellterms liefern. Welche Reaktionen dies sind, kann anhand einer Unsicherheits- und Sensitivitätsstudie ermittelt werden. Diese muss neben unsicheren chemischen Modellen und Parametern auch unsichere thermohydraulische und aerosolphysikalische Größen einschließen.

Auch wenn deutliche Fortschritte bei der Modellierung des chemischen Verhaltens von Jod und insbesondere bei der Modellierung der Jod-Transportprozesse im Containment gemacht wurden, sind derzeit belastbare Jod-Quelltermrechnungen mit COCOSYS-AIM kaum möglich. So weist das Chemiemodell noch immer erhebliche Lücken auf. Diese betreffen unter anderem die pH-Wert-Entwicklung im Sumpf, die Jod/Ozon-Reaktion und die I₂-Ablagerung auf Dekontaminationsanstrichen. Darüber hinaus sind einige Reaktionskonstanten nur sehr ungenau bekannt, z. B. jene der Organoiodbildung. Weiterhin sind auch einige Teile der Mehrraumsimulation mit COCOSYS-AIM noch nicht validiert. Dies betrifft z. B. das Verhalten von elementarem Jod und aerosolförmigem Jodat in Gegenwart eines Kernschmelzaerosols.

Die mit den durchgeführten Arbeiten erzielten Verbesserungen in COCOSYS-AIM haben dazu geführt, dass die Jodmodellierung dort im internationalen Vergleich nunmehr als durchaus "state-of-the-art" angesehen werden kann.

1.3 'Separate Effect-Tests'

1.3.1 Validierung der Filtermodellierung

In nuklearen Anlagen sind Filtersysteme installiert, um im Normalbetrieb die mit der Abluft freigesetzten radioaktiven Aerosole auf zulässige Werte zu begrenzen bzw. unter Störfallbedingungen den in die Umgebung freigesetzten Quellterms wesentlich zu verringern. Um mit COCOSYS die Wirkung von solchen Filtern simulieren zu können, wurden entsprechende Modelle für Faser- und Granulatfilter implementiert. Dabei sind

neben den thermohydraulischen Prozessen auch die Rückwirkungen auf das Aerosol- und Spaltproduktverhalten modelliert.

Da die Filtermodelle in COCOSYS bereits in FIPLOC implementiert worden waren, wurde im ersten Schritt eine Verifikation anhand eines realen Störfalls in einer Brennelementfabrik vorgenommen. Anschließend sollte die eigentliche Validierung der Faser- und Granulatfilter erfolgen. Da sich jedoch bereits bei der vorgeschalteten Verifikation erhebliche Probleme zeigten, war es im für diese Arbeiten vorgesehenen Rahmen nicht mehr möglich, die Validierung vorzunehmen, zumal für Granulatfilter noch keine ausreichenden Daten beschafft werden konnten. Die Validierung der Filtermodelle durch Nachrechnung geeigneter Experimente steht somit noch aus und soll zusammen mit den Arbeiten zu Granulatfiltern erfolgen.

Das Faserfiltermodell wurde ursprünglich von Battelle Ingenieurtechnik, Eschborn, übernommen, in FIPLOC implementiert und an einigen Stellen ergänzt /WEG 97/ und später auf Granulatfilter erweitert. Es ist weitgehend mechanistisch aufgebaut und daher für die verschiedensten Faserfiltertypen (Grob-, Fein-, Absolutfilter, etc.) universell einsetzbar. Der Einfluss der Filterbeladung auf den Druckverlust wird berücksichtigt und die Aerosolabscheidung durch Diffusion, Sperreffekt (Interception), Trägheit (Impaction) und Gravitation ist modelliert. Anhand von Herstellerangaben zum Druckabfall am Filter und zur größten Durchlässigkeit eines Filters (MPPS - most penetrating particle size) kann das Modell zusätzlich kalibriert werden.

Zum Vergleich mit FIPLOC wurde der Störfall mit UF_6 -Freisetzung in der RBU Hanau von 1987 mit COCOSYS nachgerechnet. Als Nodalisierung wurde das gleiche Schema mit 4 Zonen, 4 Verbindungen, einem Lüftungssystem sowie einem Grob- und einem Feinfilter entsprechend verwendet. Zu den beiden simulierten Filtern liegen Angaben vor, mit denen die vom Filtermodell berechneten Werte für Druckverlust, MPPS und Filterwirkungsgrad für eine vorgegebene Strömungsgeschwindigkeiten bzw. einen Volumenstrom durch den Filter kalibriert werden können.

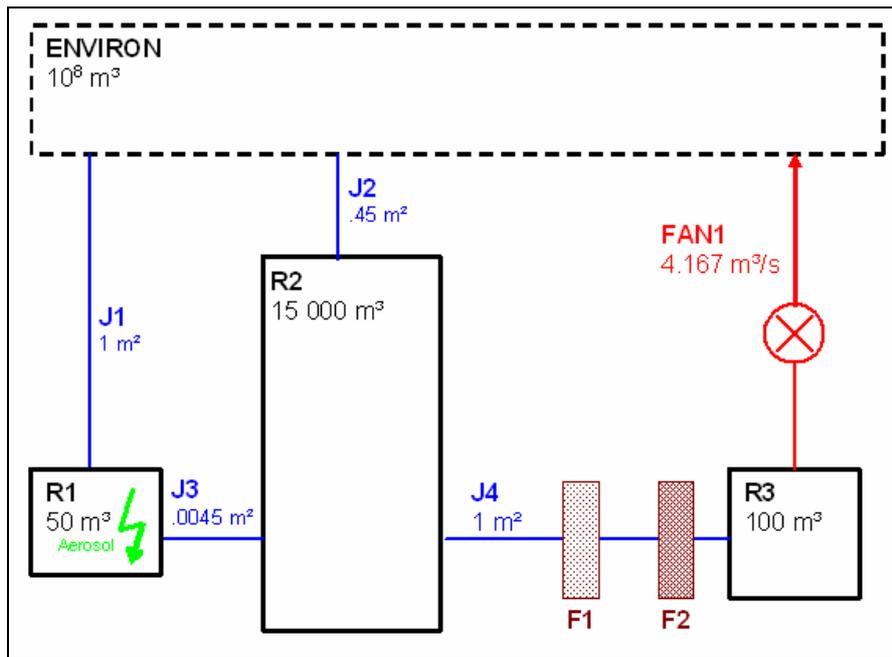


Abb. 1-6 Zonen-Nodalisierung der RBU

Während des Störfalles wurde über einen Zeitraum von 12 Minuten 35.2 kg Aerosol in R1 freigesetzt. Die Werkhalle (R2) wurde während des gesamten Störfalles durch ein Lüftungssystem (R3 und FAN1) entlüftet. Die damalige FIPLOC Rechnung /WEG 97/ ergab, dass vom freigesetztem Aerosol 1.64 kg am Grobfilter (Filter F1) und 2.06 kg am Feinfilter (F2) zurückgehalten wurden. Berechnete 0.2 kg Aerosol mit vorwiegend feinen Partikeln gelangte in die Umgebung, das restliche Aerosol wurde an Oberflächen in der Anlage (R1 und R2) abgeschieden.

Der Vergleich der von FIPLOC und COCOSYS ermittelten Werte für die Filter zeigte mehrere Unterschiede. Die geringen Abweichungen zwischen den in beiden Programmen aus den gleichen Eingabedaten berechneten Druckverlusten für den unbeladenen Zustand (OLD PRESS.DROP), z. B. 8.81 Pa in FIPLOC und 8.79 Pa in COCOSYS für den Filter F1 werden auf unterschiedliche Rechengenauigkeiten zurückgeführt und sind nicht relevant.

Wesentlich größer ist der Unterschied zwischen den berechneten MPPS und insbesondere den Filterwirkungsgraden (Tab. 1.3).

Tab. 1-3 Filterdurchlässigkeit und -effektivität mit FIPLOC und COCOSYS berechnet

	Durchlässigkeit		Effektivität	
	FIPLOC	COCOSYS	FIPLOC	COCOSYS
Filter 1	6.5E-7	6.9E-7	3.0E-2	1.8E-2
Filter 2	4.0E-7	4.3E-7	3.7E-1	2.2E-1

Als eine Ursache wurden die für die Kalibrierung verwendeten Randbedingungen Druck, Temperatur und Luftfeuchtigkeit zur Berechnung der Stoffwerte identifiziert. Da in beiden Programmen unterschiedliche Stoffwertfunktionen genutzt werden, treten hier Abweichungen auf. In Abb. 1-7 ist der Einfluss von Druck und Temperatur auf die berechnete Filterporosität dargestellt. Diese Abhängigkeiten sind auf den Einfluss von Gasdichte (nimmt mit p zu) und Viskosität des Gases (nimmt mit T zu) zurückzuführen. Eine genauere Recherche ergab, dass vom Filterhersteller die während der Druckverlustmessung verwendeten p und T nicht explizit vorgegeben werden, sondern nur der Temperaturbereich, in dem der Filter eingesetzt werden kann (z. B. 0 bis 120 °C). Dieser Bereich ist im Wesentlichen durch die Temperaturbeständigkeit des Filtermediums (Vlies, Papier, etc.) gegeben. Im Gegensatz dazu schreibt die DIN/EN-Norm 1822-1 die Bedingungen bei der Messung des Filterwirkungsgrades vor: $T = 23 \pm 5$ °C und relative Feuchte < 75 %. Exakte Vorschriften über den Gasdruck der zuströmenden Atmosphäre existieren nicht, es ist aber Umgebungsdruck anzunehmen. Während in FIPLOC für die Kalibrierung des Filters die Bedingungen der im Datensatz in der stromaufwärts liegenden Zone verwendet werden, kommen nun in COCOSYS die Default-Werte $T = 23$ °C, $p = 0.981$ bar (Normdruck entsprechend DIN 1945) und rel. Feuchte = 50 % zur Anwendung. Bei Verfügbarkeit der genauen verwendeten Randbedingungen können diese in COCOSYS auch explizit eingegeben werden.

Testrechnungen mit COCOSYS ergaben allerdings, dass sich damit zwar die Unterschiede zwischen den MPPS aber nicht die zwischen den berechneten Filterwirkungsgraden begründen lassen. Vor der Validierung der Filtermodelle ist diese Diskrepanz unbedingt zu klären, d. h. ob der Fehler in COCOSYS oder FIPLOC liegt. U. U. sind dazu auch die Reaktivierung des FIPLOC Codes und die Wiederholung einer Rechnung notwendig. Für die Validierung der Faserfiltermodelle in COCOSYS kann dann anschließend auf die Ergebnisse aus der FIPLOC Validierung zurückgegriffen werden /WEG 99/.

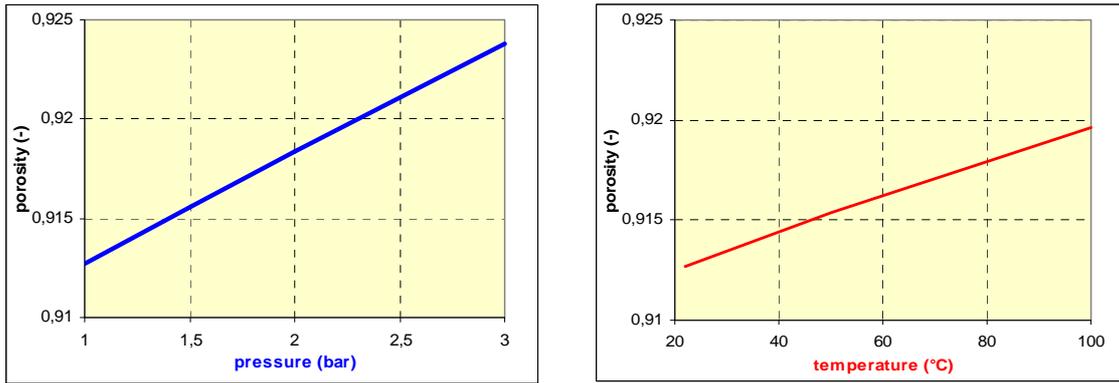


Abb. 1-7 Druck- und Temperaturabhängigkeit der korrigierten Filterporosität

Im Weiteren werden die mit FIPLOC und COCOSYS berechneten Parameter für den ausgewählten Störfall verglichen.

In Abb. 1-8 sind die Dekontaminationsfaktoren des Grobfilters F1 und des Feinfilters dargestellt. Der Verlauf der von beiden Programmen ermittelten partikelgrößenabhängigen Abscheidkurven für beide Filter ist sehr ähnlich. Neben oben aufgeführten Ursachen ist zu berücksichtigen, dass die FIPLOC-Werte aus den Darstellungen in /WEG 97/ nur näherungsweise bestimmt werden konnten.

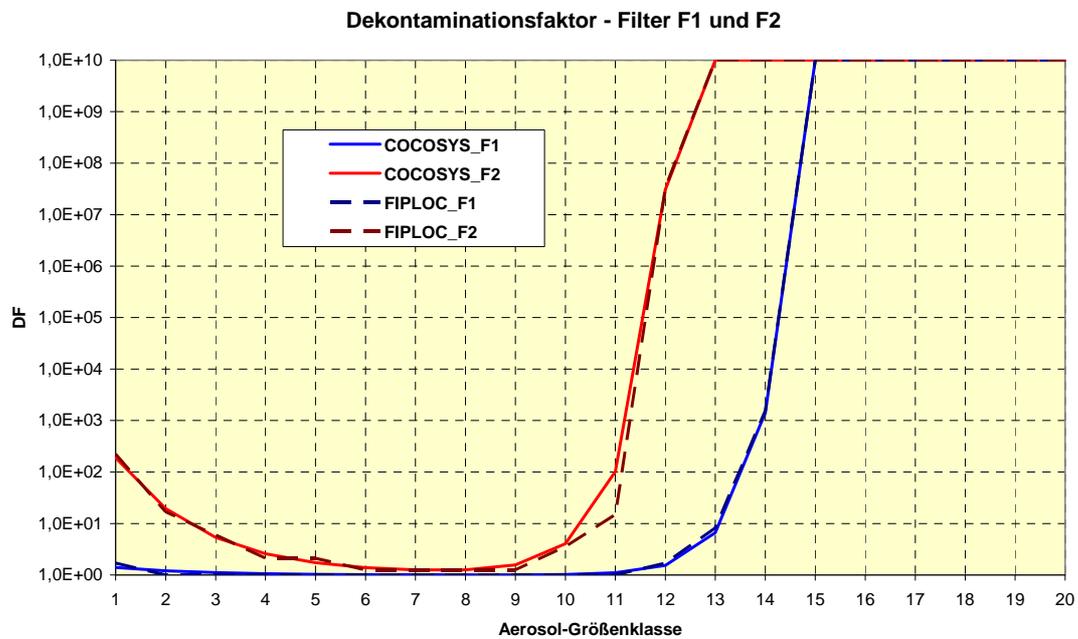


Abb. 1-8 Partikelgrößenabhängige Dekontaminationsfaktoren der Filter

Die luftgetragenen Aerosolmassen im Freisetzungsraum R1, in der Werkhalle R2 und in der Umgebung ENVIRON sind in Abb. 1-9 (FIPLOC Ergebnisse) und in Abb. 1-10 (COCOSYS) dargestellt. Hier treten wesentlich größere Unterschiede zwischen FIPLOC und COCOSYS auf. FIPLOC berechnet einerseits für R1 und R2 größere Maximalwerte als auch für R2 einen langsameren Abfall. Gleichzeitig erreicht die luftgetragene Aerosolmasse in der Umgebung etwa 2 Größenordnungen höhere Werte als in COCOSYS.

Da die Atmosphäre aus der Werkhalle R2 über die Filter abgesaugt wird, ist die Partikelkonzentration dort für die Rückhaltung in den Filtern des Abluftsystems entscheidend. Die oben angesprochene geringere Aerosolkonzentration lässt vermuten, dass in COCOSYS die Rückhaltung des Aerosols in den Filtern wesentlich größer ist. Ein Vergleich der Beladung des Fein- und des Grobfilters (Abb. 1-11 und Abb. 1-12) zeigt jedoch ein umgekehrtes Verhalten, d.h. eine ca. dreimal stärkere Beladung des Feinfilters F1 in FIPLOC. Ein weiterer qualitativer Unterschied ist, dass der Grobfilter F2 in COCOSYS kaum beladen wird. In beiden Rechnungen nimmt die Filterbeladung etwa 3 Stunden nach Unfallbeginn nur noch unwesentlich zu, da die Aerosolkonzentration in der Werkhalle bereits stark zurückgegangen ist.

In Abb. 1-13 ist die Aerosolmassenbilanz für die COCOSYS Rechnung dargestellt. Der Massenbilanzfehler (*DIFFERENCE*) ist kleiner als 0.1 % und damit ein eventuell vermuteter Fehler in COCOSYS keine Erklärung für die Unterschiede. Da die von beiden Programmen ermittelten Rückhaltefaktoren (siehe Abb. 1-8) im Prinzip gleich sind und damit ähnliche Filterbeladungen zu erwarten wären, bleibt nur ein abweichendes Ablagerungsverhalten in R1 und R2 als mögliche Erklärung. In /WEG 97/ sind aber keine entsprechenden Angaben enthalten sind. Dies spricht für eine Wiederholung der FIPLOC Rechnung und insbesondere dem genauen Abgleich der für die Aerosolrechnung verwendeten Modelloptionen.

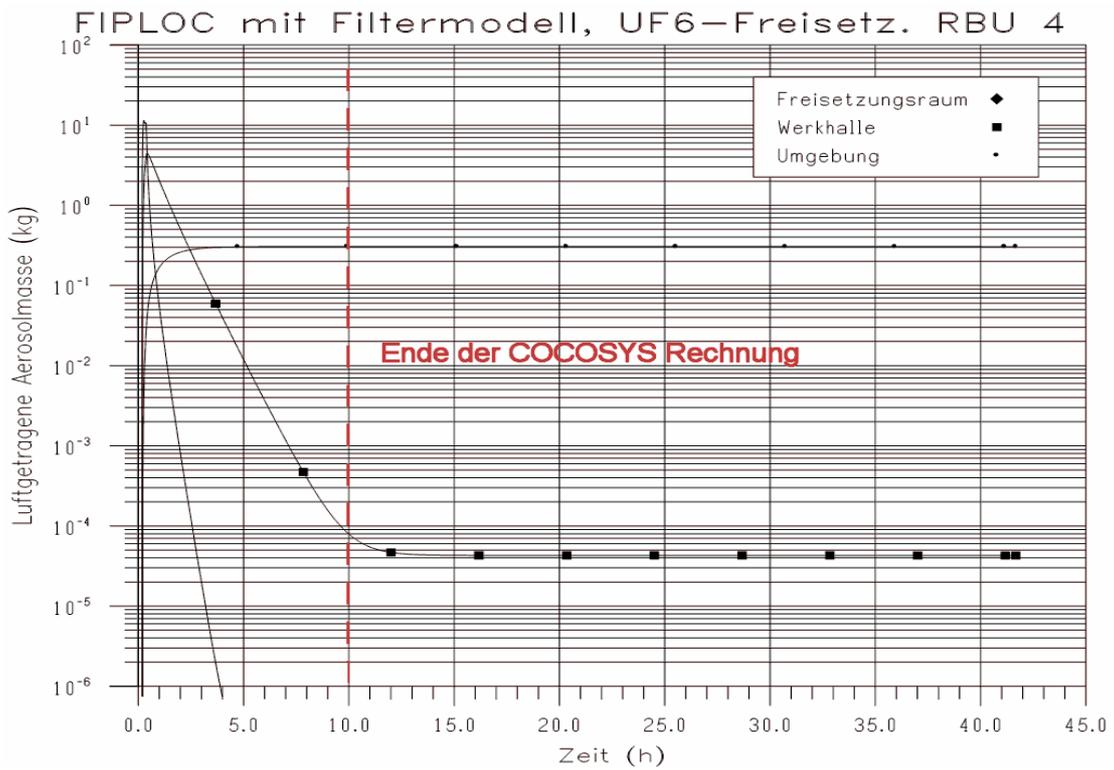


Abb. 1-9 FIPLOC, RBU, luftgetragene Aerosolmassen

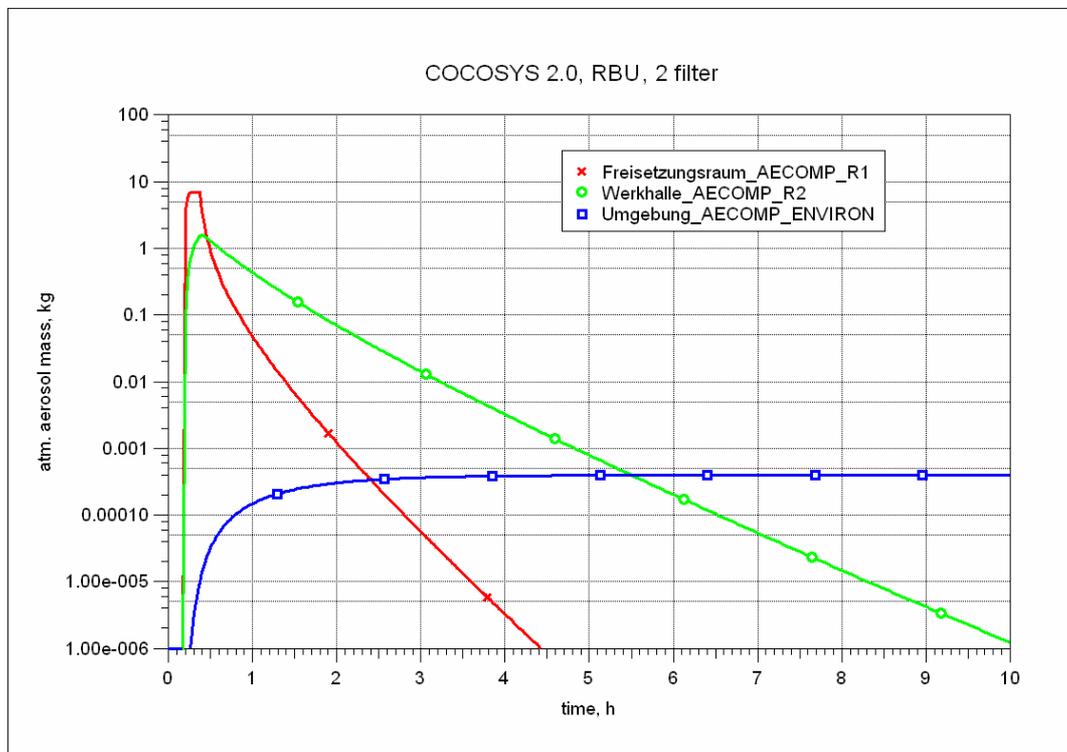


Abb. 1-10 COCOSYS, RBU, luftgetragene Aerosolmassen

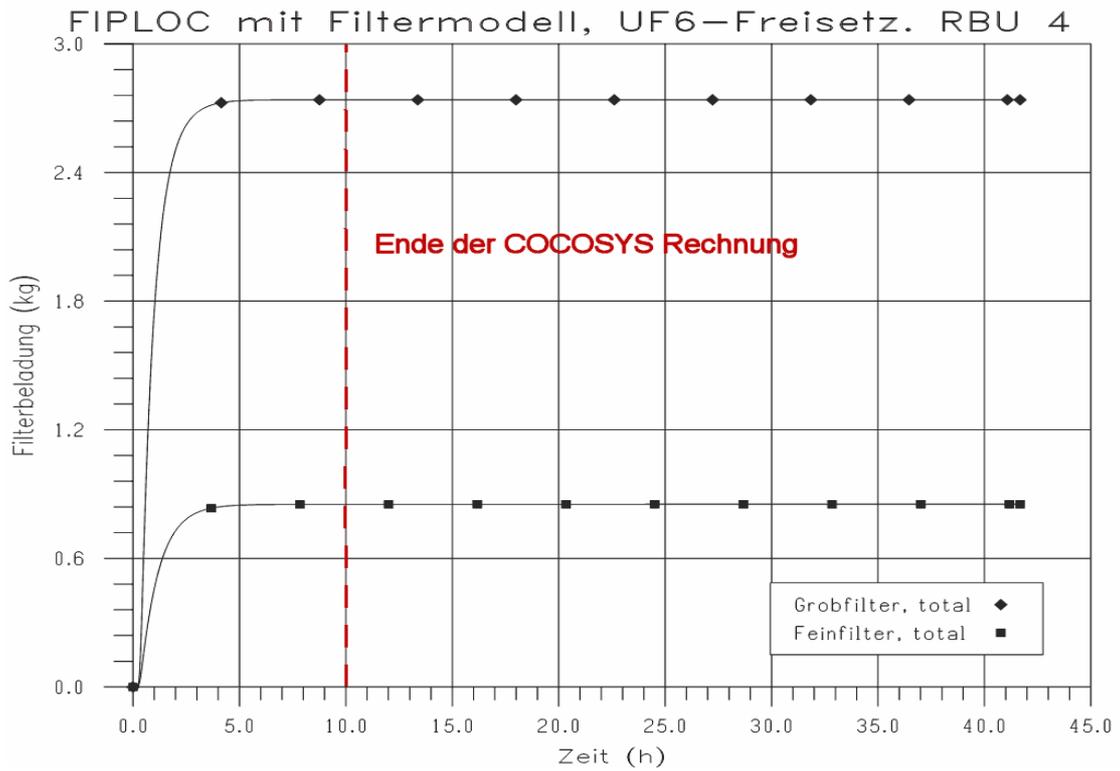


Abb. 1-11 FIPLOC, RBU, in Filtern F1 und F2 abgelagerte Aerosolmassen

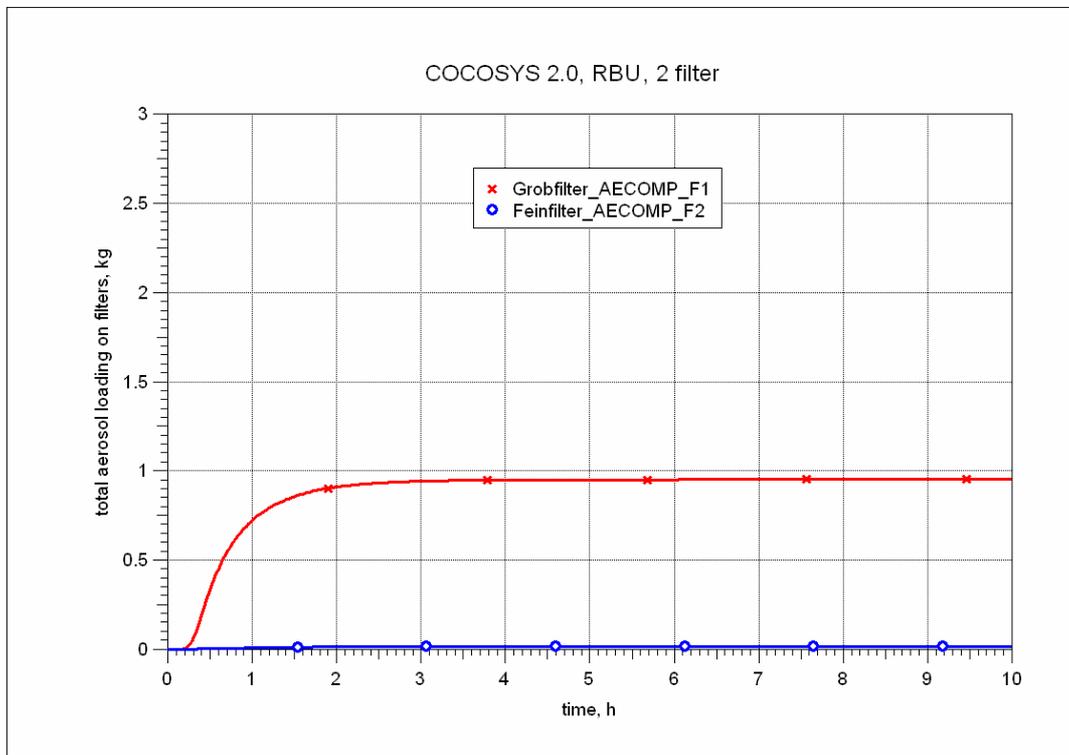


Abb. 1-12 COCOSYS, RBU, in Filtern F1 und F2 abgelagerte Aerosolmassen

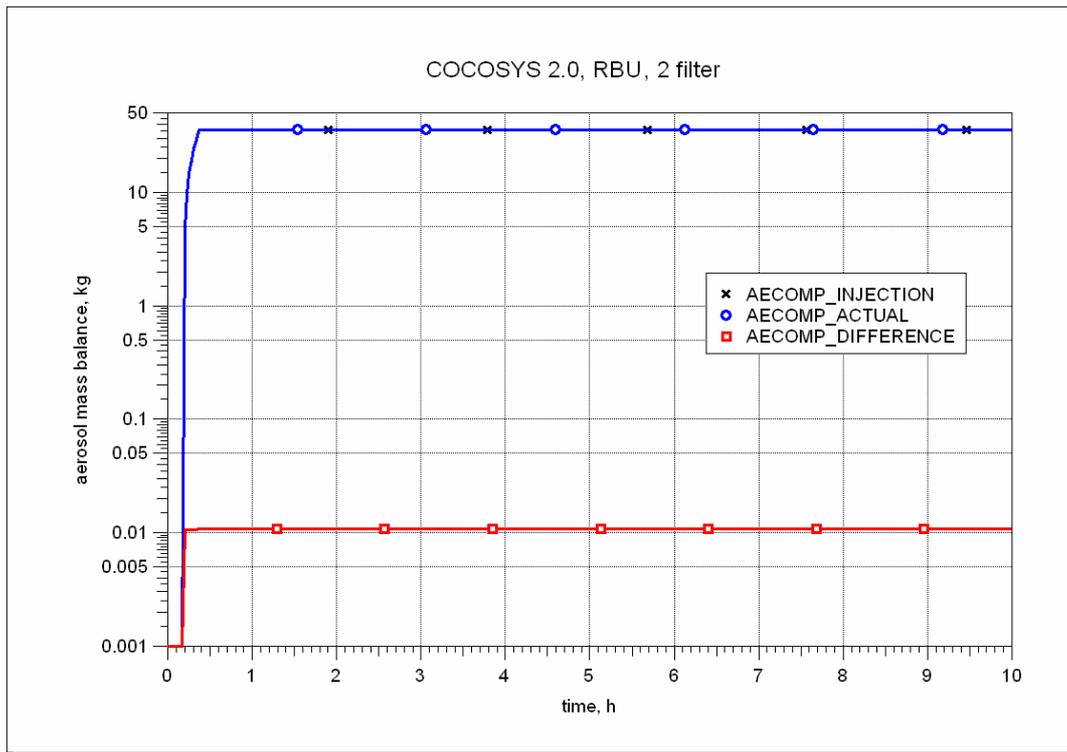


Abb. 1-13 COCOSYS, RBU, Aerosolmassenbilanz

Entsprechend der FIPLOC Rechnung beträgt der Druckabfall am Grobfilter 35 Pa und der am Feinfilter 99 Pa. Von COCOSYS werden 31 Pa bzw. 88 Pa berechnet (Abb. 1-14). Diese kleineren Werte entsprechen der geringeren Filterbeladung in COCOSYS. Auch spiegelt der Anstieg des Druckverlustes über den Filter F1 die zunehmende Beladung des Filters wider.

In Abb. 1-15 ist das mit COCOSYS berechnete Zeitverhalten des Rückhaltefaktors für den Filter F1 dargestellt. Unter den angenommenen Bedingungen ist der Rückhaltefaktor konstant. Dieses Ergebnis ist nicht unerwartet, da im untersuchten Störfall die thermohydraulischen Randbedingungen in der stromaufwärts liegenden Zone R2 konstant sind. Weiterhin ist eine Randbedingung des Filtermodells, dass die Filtrationswirkung (Rückhaltung von Aerosolen) unabhängig von der Aerosolbeladung ist. Dies ist verschieden zum Strömungswiderstand, der mit zunehmender Aerosolbeladung linear anwächst.

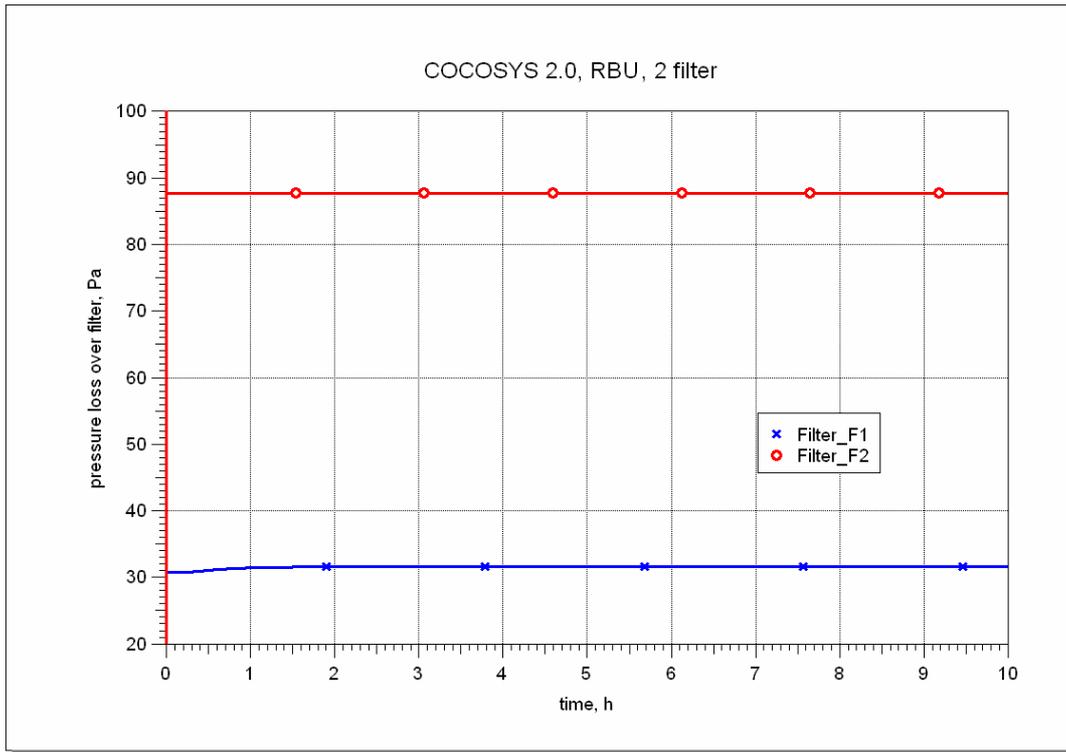


Abb. 1-14 COCOSYS, RBU, Druckverlust über die Filter F1 und F2

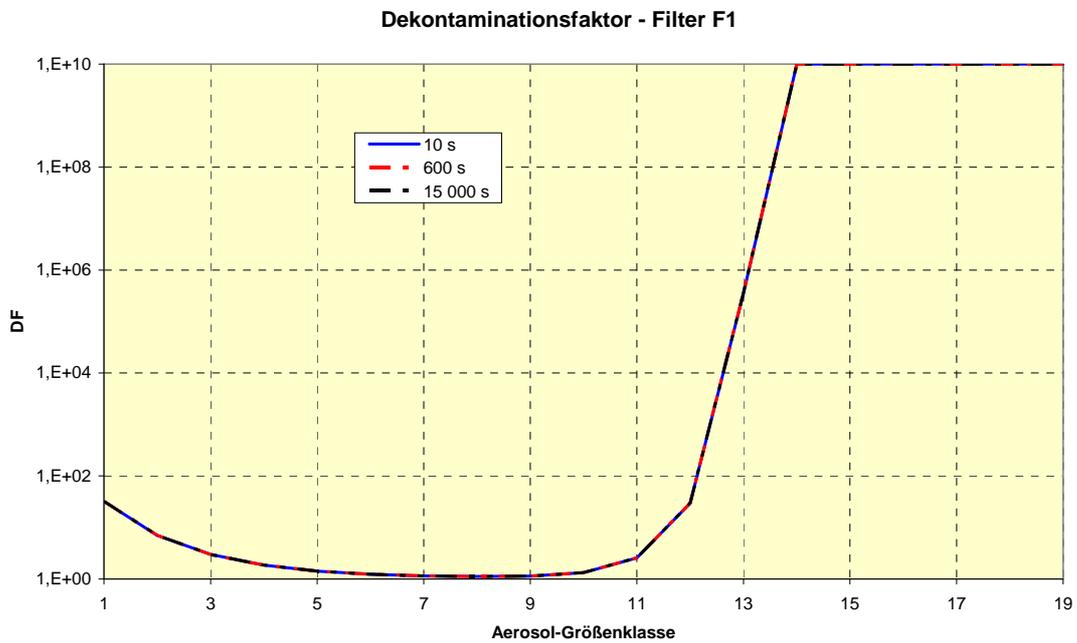


Abb. 1-15 COCOSYS, RBU, Zeitverhalten des Dekontaminationsfaktor, Filter F1

1.3.2 Validierung des IVO-Sprühmodells in COCOSYS

Nachrechnung des Versuchs HDR E11.1

Sprühsysteme sind oftmals in Kernkraftwerken installiert, um die unter Störfallbedingungen auftretenden Druck- und Temperaturbelastungen und durch Auswaschen von Aerosolen und Spaltprodukten den in die Umgebung freigesetzten Quellterm zu reduzieren. Um diese Vorgänge detailliert simulieren zu können, wurden in COCOSYS verschiedene thermohydraulische Sprühmodelle implementiert [ARN 01]. In den in COCOSYS implementierten Sprühsystemen wird davon ausgegangen, dass keine direkten Wechselwirkungen zwischen den Tröpfchen auftreten (keine Agglomeration, keine Interaktion). Weiterhin besteht keine Interaktion zwischen den Sprühtröpfchen und der konvektiven Strömung in den einzelnen Raumbereichen.

Zur Überprüfung des Sprühmodells wurde der HDR Versuch E11.1 nachgerechnet. Für die Nachrechnung wurde die verbesserte Nodalisierung für die E11.2 und E11.4 Versuche verwendet. Da die Kühlleistung der Instrumentenkühlung für diesen Versuch noch nicht ausgewertet worden war, waren zusätzliche Vorarbeiten notwendig.

Während schwerer Störfälle kann sich besonders bei oben oder in der Mitte des Containments liegenden Bruchstellen des Primärkreislaufes (ND*-Fall) eine Wasserstoffschichtung im Containment ergeben. Das heiße leichte Gas steigt nach oben in die Kuppel und kann dort zu gefährlichen H₂-Aufkonzentrationen führen. Der E11.1-Versuch war entsprechend konzipiert und die Versuchsergebnisse zeigen diese starke Temperatur- und Leichtgasschichtung zwischen oberem und unterem Sicherheitsbehälter, die durch den Einsatz des Innensprühsystems kaum verändert wird. Anders als bei dem E11.2 Versuch gibt es hier nur eine obere Dampf- und Gasfreisetzung. Der Einsatz des Innensprühsystems macht diesen Versuch für die COCOSYS Validierung besonders attraktiv.

Das HDR-Stahlschalen-Containment (Abb. 1-16) mit 60 m Höhe, 20 m Durchmesser und einem Gesamtvolumen von 11.300 m³ besteht im Wesentlichen aus einem unteren Teil mit starker Raumunterteilung und einer großen leeren Kuppel mit etwa 5.000 m³. Es wurde zur schweren Störfallsimulation in einer realen Anlage durch die Öffnung der Montageklappen in den beiden HDR-Treppenhäusern ein ähnlicher Konvektionsweg erschlossen, wie er sich bei realen Anlagen über die Dampferzeugertürme ergeben würde. Hier ist fast ein 1:1-Maßstab zu realen deutschen DWR-Containments mit Stahlschale gegeben. Somit sind diese Versuche besonders wertvoll, da solche geometrischen Ähnlichkeiten in keinem Modellcontainment gegeben sind. Meist haben

Modellcontainments neben der Längenabweichung noch abweichende quasi konstante Peripheriebedingungen oder sie haben keine starken Raumunterteilungen oder die falsche Mischung zwischen Stahl- und Betonstrukturen. Der äußerst dichte HDR-Sicherheitsbehälter ist, wie die DWR-Anlagen, auch von einem Betongebäude umgeben, so dass ein Innen-Ringraum mit etwa 3.000 m³ entsteht.

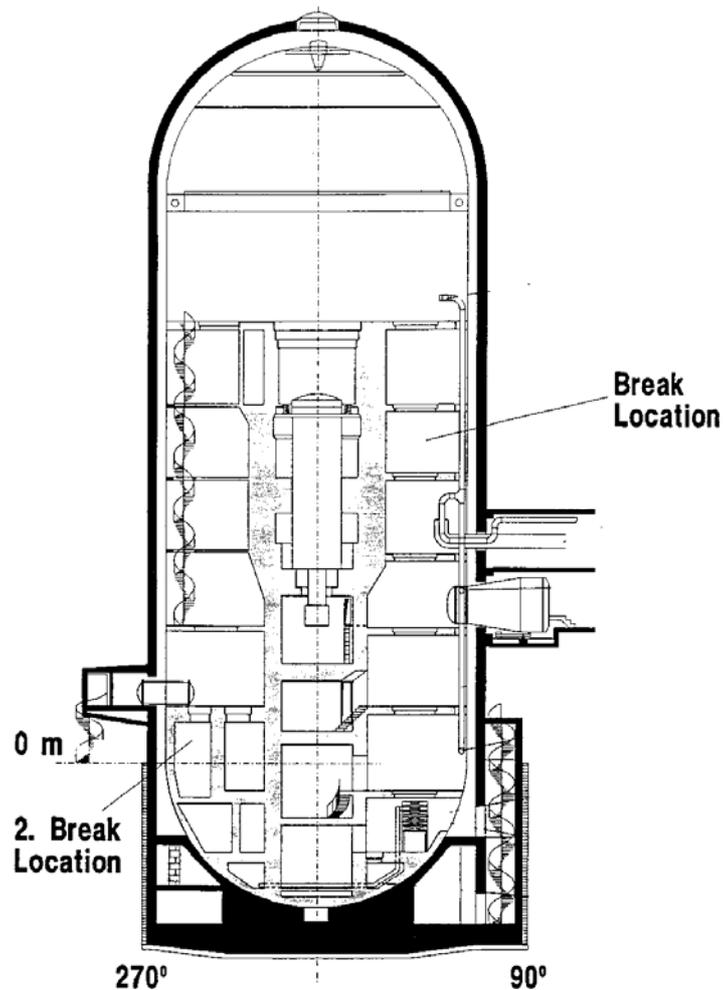


Abb. 1-16 HDR-Containment mit Bruchzonen

Diese Vorteile der Realitätsnähe werden durch Nachteile gestört, die nicht nur wegen der Größe und der damit zusammenhängenden Datenfülle entstehen. Die Komplikationen sollen hier nur stichwortartig genannt werden:

- Entstehung von Spalträumen zwischen hinterem Innenbeton und der SB-Stahlschale;

- Fehler in der sich laufend ändernden Datendokumentation zu den Raumverbindungen im SB;
- Irritationen aufgrund zunächst fehlerhafter Massenstromauswertungen seitens der Experimentatoren (wie z.B. auch beim ISP-29);
- äußerst dürftige Messtechnik bei der Instrumentenkühlung, die etwa 20 % der Gesamtenergie aus dem SB extrahieren kann.

Ziel unserer Nachanalyse war es, das gesamte Gebäude, alle Energiequellen und -senken sowie alle Freisetzungen bis zur Druckentlastung, d.h. Ende der Datenaufnahme zu simulieren. Besondere Aufmerksamkeit wird hier der Validierung des IVO-Innensprühmodells gewidmet.

1.3.2.1 Nodalisierung

Insbesondere zur Verbesserung der COCOSYS-Ergebnisse für den Versuch E11.2 wurde die bestehende 92-Zonen Nodalisierung der HDR-Anlage auf 171 Zonen, 700 Verbindungen und 308 Strukturen erweitert.

Der etwa 60 m hohe HDR-SB wird dabei in 15 Ebenen (19 Levels) unterteilt, von der unteren Sumpfzone R1 bis zur Ringraumzone A52A oben. Grundsätzlich werden die physikalischen Zonen des stark unterteilten HDR-Containments jeweils mit einer Zone dargestellt. Damit es feste Vorgaben für die Strömungswege gab, wurden vor den Versuchen viele Türen in Offenstellung verriegelt und lockere Abdeckbleche entfernt. So konnten dann doch wieder gut miteinander verbundene Zonen entstehen, die eine Zonenzusammenfassung ermöglichten. In Abb. 1-17 wird beispielsweise die Zusammenfassung von Räumen auf Ebene 5 (1501, 1505, 1506, 1507, 1512) zur Modellzone "R19" gezeigt. So ergeben sich ohne den Dom und abzüglich der 2 Wassertanks und der Umweltzone 90 SB-Raumzonen auf 8 Ebenen (bzw. 12 Zonen-Ebenen).

Der Dom ist in 40 Zonen (Name beginnt mit 'D') in 6 Ebenen mit jeweils 7 Zonen (obere Schicht nur 5) eingeteilt worden. Der Ringraum wird mit 25 Zonen (Name beginnt mit 'A') simuliert (Abb. 1-19).

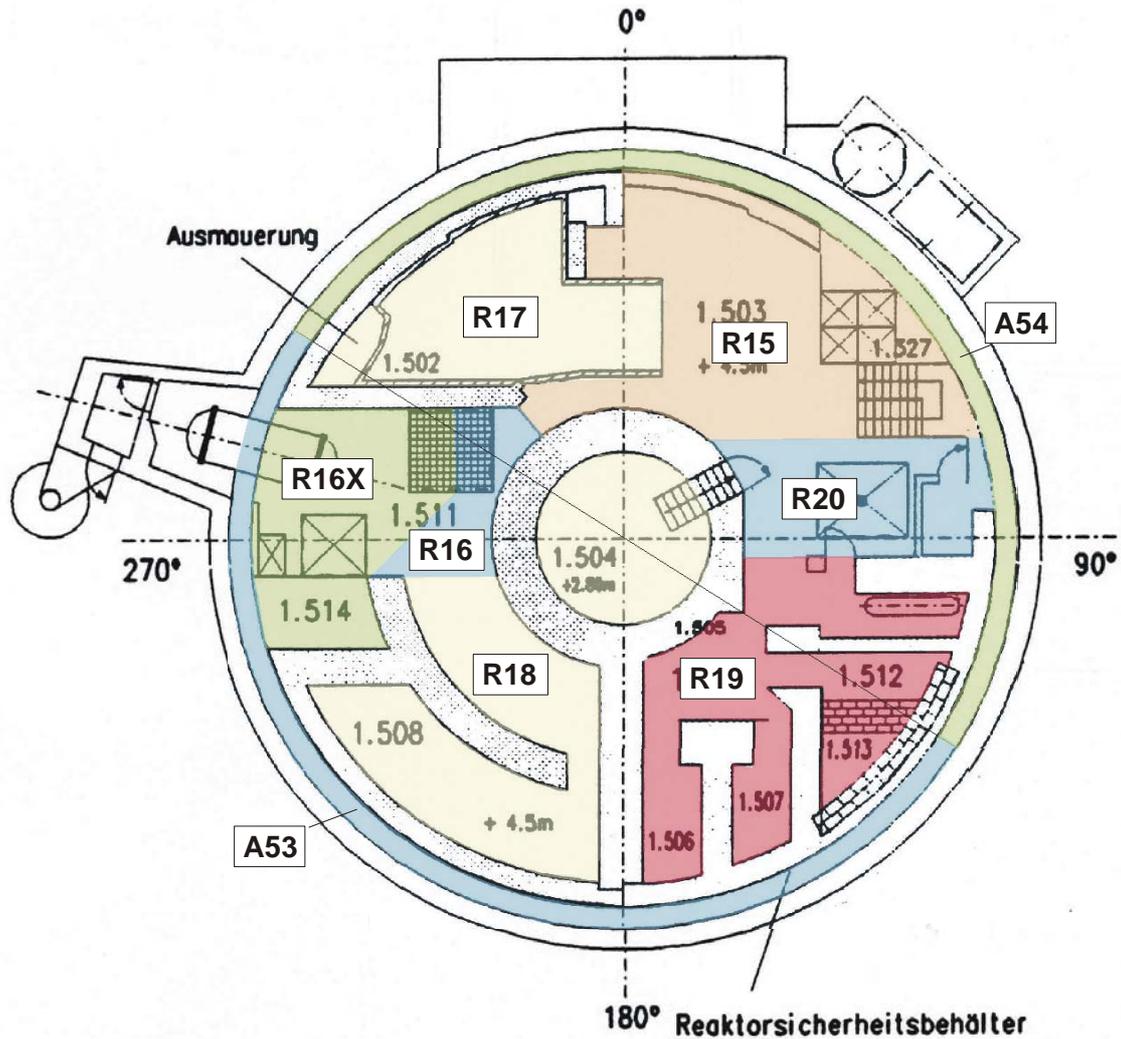


Abb. 1-17 Nodalisierung der 1500 Ebene

Der manchmal zwischen äußerem Innenbeton und SB befindliche Spalt wird mit 13 Zonen (Name beginnt mit 'F') simuliert, da sich dort auch ein Gas- und Wassertransport einstellt, der von der globalen Konvektion ausgeschlossen ist. Außerdem ergeben sich dadurch eine Vergrößerung der Betonoberfläche im SB und eine andere lokale Strukturzuweisung für den SB-Stahl. Im Versuchsverlauf steht der untere Bereich dieses Spaltes im Sumpfbereich unter Wasser. Die Spalt- und Ringraumzonen sind so unterteilt worden, dass sie den 13 Hauptunterteilungsebenen entsprechen. Ebenen 2 und 3 werden im Ringraum zusammengezogen. Es sind für diese Zonen sowie für den gesamten Dom jeweils 180°-Segmente gewählt worden, und zwar von 120° bis 300°.

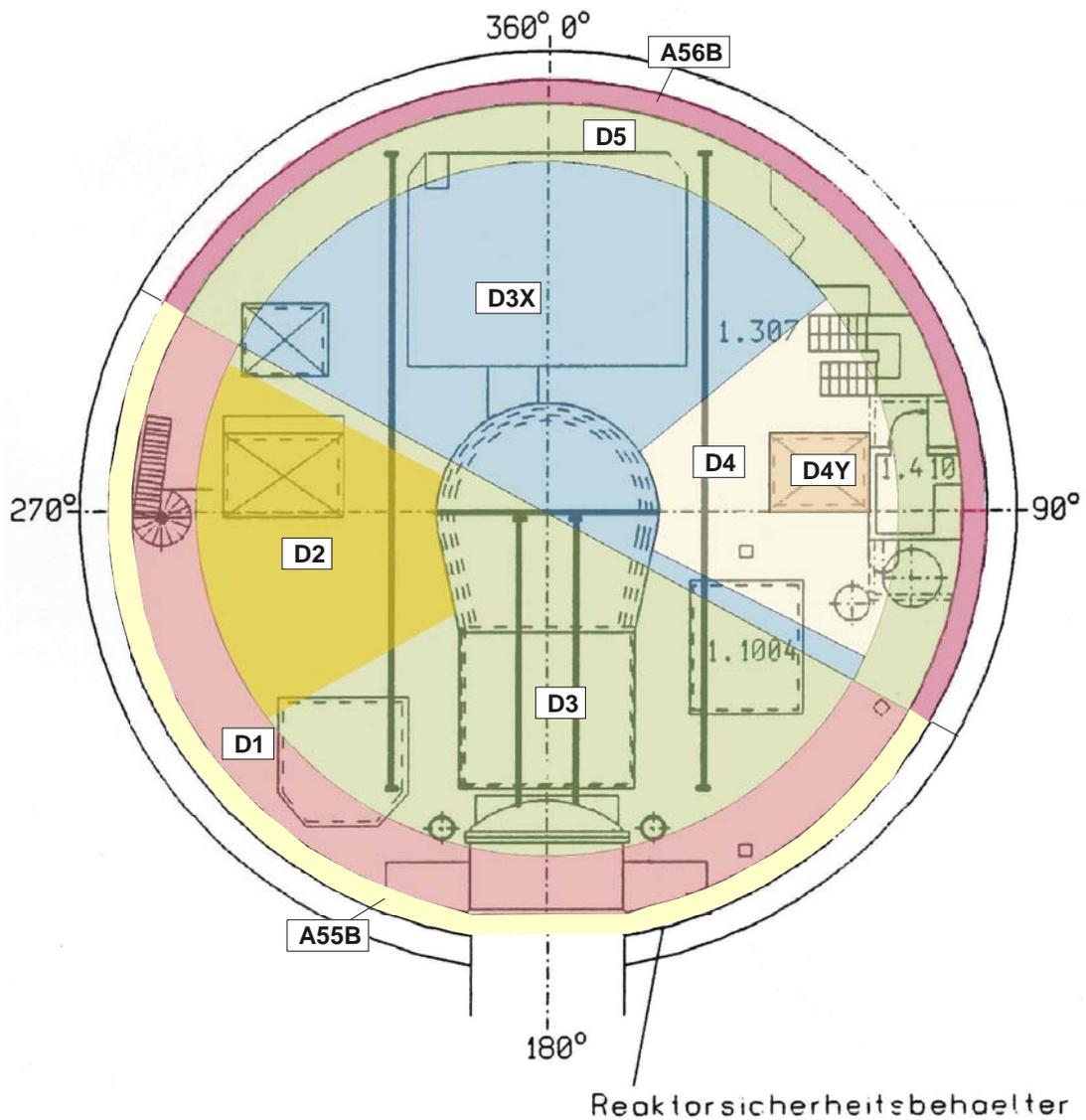


Abb. 1-18 Nodalisierung des HDR-Doms

Die HDR-Ebenen 6 und 7 unterhalb der Bruchebene werden genauso horizontal unterteilt wie die untere 4er-Bruchebene. Dies erfolgt, um das physikalische Verhalten bei der Konvektion heißer Gase zu simulieren, die sich vornehmlich an der Decke entlang bewegen, als auch, um die angebrachte Messtechnik zu validieren, die meist in den mittleren oder unteren Teilen dieser Räume angebracht ist. Nach der 3D-Analyse bei E11.2 für den oberen Bruchraum 1805 /ALL 01/ wurde dort eine sorgfältigere Nodalisation eingeführt. Der obere Bruchraum selbst wird in zwei Ebenen und der nach oben gehende Schacht bis zur Kuppel in jeweils 3 Zonen (Montageschacht, Treppenhaus, Lüftungsschacht) eingeteilt. Aufgrund der Erkenntnis, dass sich die heißen Gase in engen Ausbreitungsbereichen bewegen, wurden außerdem sog. "plume"-Zonen zur bes-

seren Simulation der H₂-Aufkonzentration in der Kuppel installiert, die statt 100 m³ nur noch 20 m³ Volumen repräsentieren. In COCOSYS werden die atmosphärischen Konvektionen von den Wassermassenströmen getrennt berechnet. Das in den Sumpf ablaufende Wasser wird meistens durch den Ablauf an Wänden simuliert. Das gleiche Modell wurde bei E11.2 angewendet, um das Außensprühen zu simulieren.

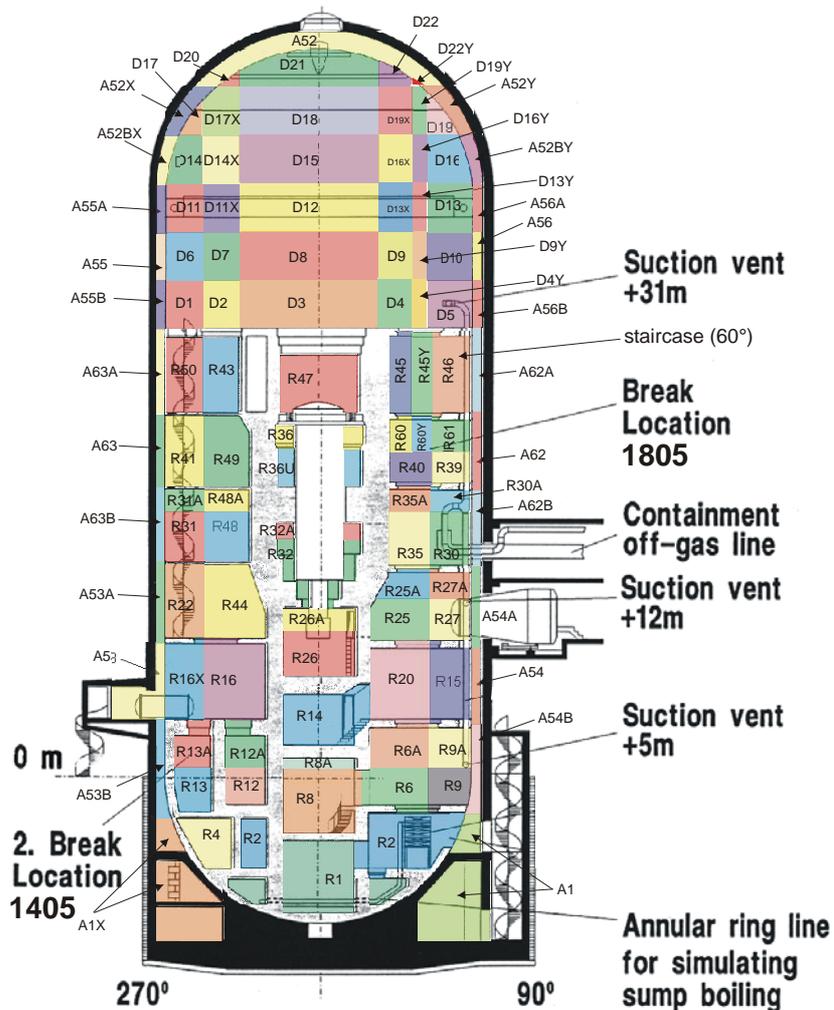


Abb. 1-19 Nodalisierung der HDR-Anlage (Seitenansicht)

Der sehr hohe Raum 1704 wurde in 4 Ebenen unterteilt, siehe R33, R33A, R34 und R51. Die einzig wirkliche "dead end"-Zone ist der Raum 1801 (BE-Lagerbecken). Der wurde mit 3 Zonen simuliert, R38, R65, R66. Der vom PHDR als dead end-Zone deklarierte Raum 1802 (Lagerraum für frische BE) war offensichtlich durchlöchert durch eine undichte Setzsteinwand und andere nicht erkannte Öffnungen (angeblich zugesetzte Lüftungen).

Bei den Versuchen stellten sich wie vorgegeben zwei Hauptkonvektionswege ein, und zwar der aufsteigende Weg über das Treppenhaus und die daneben liegenden geöffneten Montageklappen zwischen 45° und 90°. Dieser Weg startet bei Zone R2 und endet bei Zone D22 und der absteigende Weg über das Wendeltreppenhaus und die daneben liegenden Montageklappen bei etwa 270°. Aus dem Dom gelangt je nach Versuch der Rückstrom bis hinunter auf Ebene 6 oder 5.

1.3.2.2 Freisetzungen und Energiesenken

Im Folgenden werden die verschiedenen Quellen und Senken im Versuchsablauf kurz beschrieben. Der gesamte Ablauf ist in Abb. 1-20 dargestellt.

- Dampffreisetzung in den Raum 1805

Die Dampffreisetzung setzte sich aus zwei verschiedenen Quellen zusammen. Diese sind die Freisetzung aus dem RDB (BD1185) und die Freisetzung aus der externen Dampfleitung (EX1185).

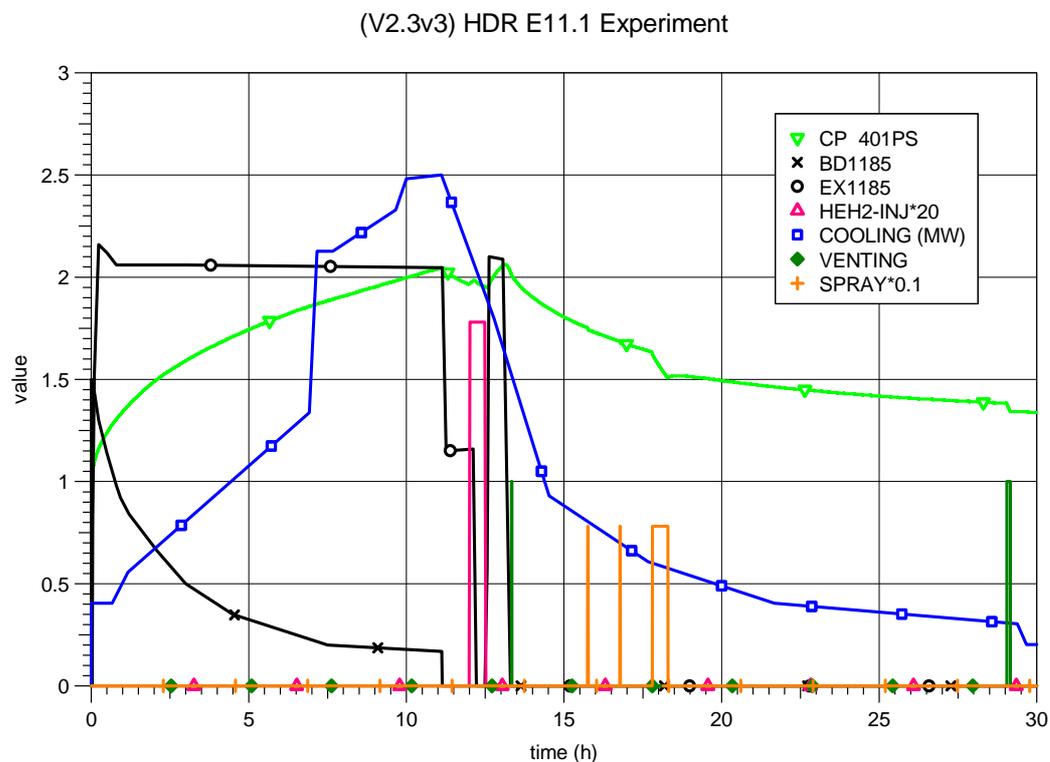


Abb. 1-20 Quellen und Senken des gesamten Versuchs

- H₂-He-Gasgemischfreisetzung in Raum 1805

Bei E11.1 wurde ein 40 % zu 60 % H₂-He und bei E11.2 jedoch 15 % zu 85 % H₂-He-Gemisch verwendet. Da im COCOSYS-Datensatz ein Gasgemisch H₂+HE als Komponente verwendet wird, mussten die Stoffwerte des Gasgemisches neu berechnet werden, weil der Eingabedatensatz auf E11.2 basierte. Als Freisetzungsangabe ist aus den Berichten lediglich die integral freigesetzte Gesamtgasmasse von 161 kg und aus der Messung RT7101 aus /PHDR 89/ die Temperatur von etwa 120 °C bekannt. Für diesen Zeitraum wurde daher eine konstante Freisetzungsrage angenommen.

- Innensprühen in Domzonen (SPR111)

Der Einsatz des Sprühsystems bei E11.1 war mit Schwierigkeiten verbunden, die in den Berichten beschrieben sind. Statt 100 t/h in einer Stunde konnte das System innerhalb einer halben Stunde nur 15 t Wasser sprühen, wobei noch zweimal ein minutenlanges Sprühen vorausging. Dies ergibt einen konstanten Massenstrom von 7.81 kg/s und einen Energieeintrag von 1.25 GJ durch das 20 °C kalte Wasser. Zum hier benutzten Innensprühsystem gibt es nur die Angabe, dass es durch Korrosionsprodukte erheblich verstopft war. Die 3 Sprühkränze befinden sich in 45.6, 48.3 und 49.7 m Höhe, also innerhalb der oberen Domzonen (D20, D21, D21X, D22, D22Y).

- Venting aus dem SB über Filter in die Umwelt

Es gab ein Wasserstoffproblem in der Kuppel sicher auch durch das vorherige Sprühen, so dass zuerst schon eine Minute lang ab 48.000 s (13 h 20 min) bei 1.5 m gevented wurde. Was das zur Entspannung der H₂-Konzentration in der Kuppel bringt, bleibt unklar.

Nach etwa 29 h wurde dann wiederum aus 0 m von 104.562 - 104.983 s gevented. Ab etwa 31.5 h wurde mehrfach an verschiedenen Positionen abwechselnd gevented.

Position	Höhenkote	Modellzone
Oben	32 m	D5
Mitte	12 m	R27
unten	1.5 m	R9

- Ringraumlüftung

Wie auch bei E11.2 lief die Ringraumlüftung während der gesamten Versuchszeit mit $11.000 \text{ m}^3/\text{h} \sim 3 \text{ m}^3/\text{s}$.

- Die Speicherwärme der heißen Komponenten (RDB + Druckhalter)

Gerade zu der Zeit der Gaseinspeisung ist bei E11.2 bei vielen Nachanalysen (siehe auch /ALL 01/) ein starker Druckabfall unter den Messwert zu verzeichnen, der offensichtlich zu stärkeren Ausgleichsströmungen führt, als tatsächlich auftreten. Dies führt von Anfang an zu einer größeren H_2 -He-Verteilung im SB als gemessen. Der schwächere gemessene Druckabfall hat mehrere mögliche Ursachen:

- Die Rückverdampfung an heißen Strukturen wird unterschätzt. Dies wird aber mit unserem hier verwendeten "DRAIN_WALL"-Modell normalerweise gut simuliert. Außerdem gibt es nicht soviel heiße benetzte Strukturen in oder unter der Bruchraumebene.
- Ein weiterer Grund für eine unkontrollierte Dampfproduktion gerade zu dieser Zeit ist der $\sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$ heiße RDB, der z.B. in den Räumen 1905 (R47) und 1701 für das Tropf- und Speicherwasser aus R47 erreichbar ist. Im Boden von 1905 (R47) wurden wegen der angebrachten Instrumentierung mehrere Öffnungen nach 1701 geschaffen und so kann von dort dauernd Wasser auf den heißen RDB gelaufen sein. Der war zwar isoliert, aber ob er wasserdicht war, wird angezweifelt.

Diese kleinen oberen Dampfquellen sind allerdings eine relativ große treibende Kraft während der alleinigen H_2 -He-Einspeisung.

Leider ist die Größenordnung und die zeitliche Zuordnung nur sehr grob abschätzbar und die Freisetzungsorte könnten die Räume 1701, 1704, 1905 ein.

Nun könnte man diese zusätzliche Dampffreisetzung während der Druckabfallphase so abstimmen, dass der Druckverlauf validiert würde. Diese Methode wurde in einer vorangegangenen Analyse für E11.2 (siehe /ALL 01/) einigermaßen erfolgreiche angewendet. Inzwischen sind wir aber der Meinung, dass die Auswertung der Kühlenergie noch viel größere Abweichungen verursachen kann und man kann die fehlende Dampfmenge zumindest für E11.1 ganz grob auch durch geringere Kühlung in der Druckabfallphase simulieren.

- Instrumentenkühlung

Die relativ großen Schwierigkeiten bei den COCOSYS-Nachanalysen für den Versuch E11.2 und auch hier zu Anfang der E11.1-Analyse sind vermutlich durch die großen Unsicherheiten bei der Ermittlung der Kühlenergie bedingt. Von PHDR selbst die Bandbreite der Kühlleistung mit erheblichem Streubereich ± 0.3 MW für den Versuch E11.2 angegeben worden. Für E11.2 bei 93.000 s Rechendauer sind das ± 28 GJ und für E11.1 mit 118.200 s ± 35 GJ Streubreite für die Kühlenergie. In Abb. 1-21 ist die Kühlleistung für E11.1 und in Abb. 1-22 die Kühlenergie für diesen Versuch eingetragen. Dargestellt sind jeweils 3 Kurven: Mit "cooling" (blaue Kurve) ist die validierte Kühlleistung, mit der der Druck validiert werden konnte, dargestellt und unter "COSE111IN" (grüne Kurve) steht die Auswertung aus /HUE 01/ unter der Annahme eines konstanten Kühlwassermassenstroms. Da aber dieser nicht konstant war, wurden die Kühlleistungen nochmals revidiert - "NESK111" (rote Kurve) /HUE 02/. Dieser Kurvenverlauf, der den wechselnden Massenstromangaben aus dem Versuchsprotokoll folgt, kommt dem validierten Verlauf näher und zeigt das typische Verhalten eines massebehafteten Systems, das in der Aufheizphase sowohl Wärme in sich als auch Wärme aus dem SB aufnimmt und später die gespeicherte Wärme abgibt, wobei die tatsächliche Energieübertragung vom SB in das Kühlsystem gedämpft und verzögert gemessen wird. Die vermeintlich gemessene Wärmeabfuhr (die lediglich aus Temperaturdifferenz und Massenstrom erfolgt) aus dem Containment ist also anfänglich in der Aufheizphase zu klein und später in der Abkühlphase zu groß. Mit der geringeren Energieabfuhr in der Abkühlphase können dann auch etwaige anerkannte Dampfleckagen aus dem Primärkreis kompensiert werden. Die großen Diskrepanzen im Kühlenergie-transfer treten bei E11-1 ab 11 h auf, wenn die Aufheizphase beendet ist. Den dann validierten, sich nach dem gemessenen Gesamtdruck richtenden Kühlenergieabzug kann man z. B. aus Abb. 1-21 genau verfolgen, wobei der wegfallende BD-Dampfstrom und der reduzierte externe Dampfmassenstrom natürlich sofort auch einen Abfall der Kühlleistung nach sich ziehen. Wenn nur noch Gas eingespeist wird, fällt die abgeführte Kühlleistung beträchtlich (bei 12.3 - 12.5 h). Setzt die externe Dampfeinspeisung wieder ein, so steigt auch wieder die Kühlleistung etc.. Diese "schnellen" Änderungen kann ein träges massebehaftetes Kühlsystem über sehr träge Betriebsinstrumentierungen nicht anzeigen.

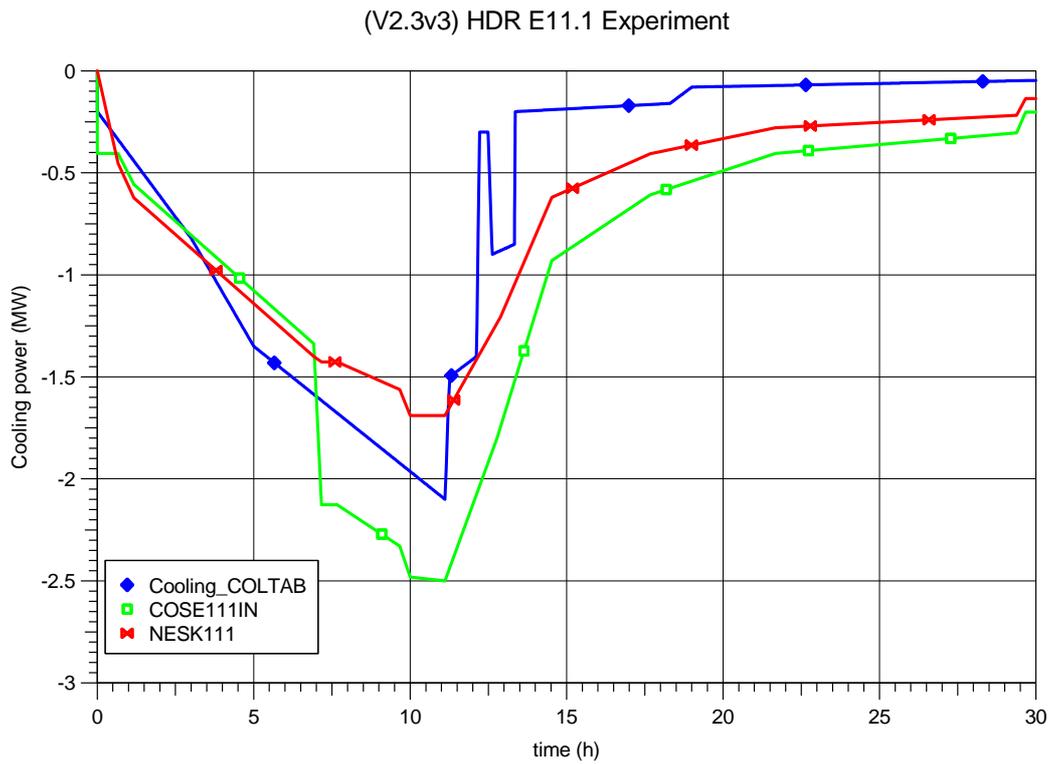


Abb. 1-21: Wärmeabfuhr durch Instrumentenkühlung bei HDR E11.1

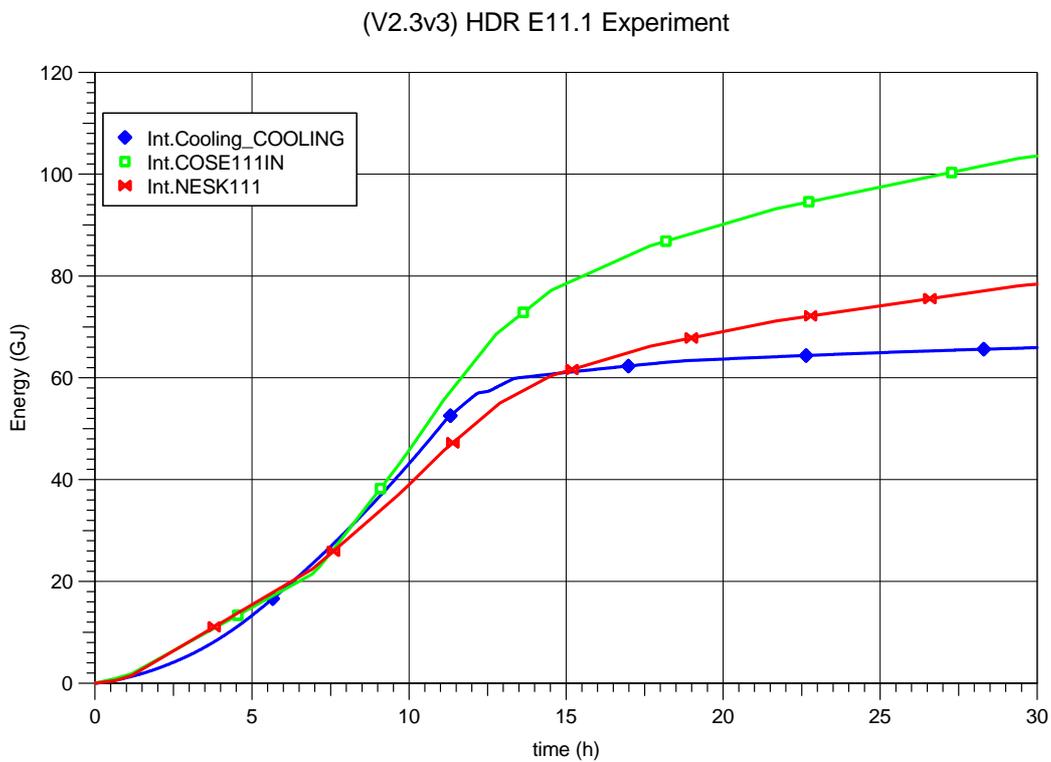


Abb. 1-22 Integrale Wärmeabfuhr durch Instrumentenkühlung bei E11.1

1.3.2.3 Rechenergebnisse

In den hier dargestellten Rechnungen wird das IVO Sprühmodell aus COCOSYS verwendet. Der Durchmesser der Sprühdüse wurde mit 1 cm und der mittlere Tröpfchendurchmesser mit 1 mm vorgegeben, entsprechend gängiger KWU-Ausführungen (z. B. Angra 2). Eine Spezifikation des Innensprühsystems der HDR-Anlage liegt leider nicht vor. Die 6 Domboden-Zonen D1, D2, D3, D3X, D4, D5 werden als Nichtgleichgewichtszonen berechnet. Eine Interaktion zwischen Sprühtröpfchen und Atmosphärenströmung wird in COCOSYS nicht berücksichtigt. Daher wurde in einer Parameterrechnung versucht, die durch die Sprühtröpfchen erzeugte Turbulenz durch Gebläsesysteme zu simulieren. Im Folgenden werden die Ergebnisse beider Rechnungen dargestellt. Dabei werden die Rechenergebnisse mit Gebläse blau und die ohne rot dargestellt.

Die Eingabe der Sprühpfade wurde teilweise den Messergebnissen angepasst. Das Sprühwasser wurde in 32 verschiedene Anteile mit 19 verschiedenen Pfaden aufgeteilt. 10 Anteile (also fast 1/3 der Gesamtmenge) gelangen nach Durchlaufen der entsprechenden Zonen an die zugehörigen Strukturen. 9 Anteile durchlaufen die gesamte Höhe des Doms. 12 Anteile entstehen im oberen Domteil und erscheinen erst wieder am Domboden. Hiermit werden die Wasseranteile der offensichtlich nicht ordnungsgemäßen Sprühsystemfunktion simuliert. Das gleiche gilt für den einen Anteil, der sofort in die Umwelt geleitet wird. Dies kann man hier als Wirkungsgrad eines nicht gut funktionierenden (korrodiert und verrottet) Systems bezeichnen. Grob kann man sagen, dass je 1/3 des Wassers ordnungsgemäß durch die Zonen fliegt, an die Wände gelangt oder fast ohne Wechselwirkung auf den 13 m tieferen Boden fällt. In den oberen Zonen wurde die Fallhöhe der meisten Pfade drastisch reduziert, da die Sprühkränze selbst zur Mehrheit im unteren Teil dieser Zonen angebracht sind.

- Druckverlauf

Um die Ergebnisse zu verstehen, muss man sich nochmals die vielfältigen Einspeisungen, Sprüh- und Ventvorgänge bis 33 h vergegenwärtigen. Nach dem 12-stündigen Aufheizvorgang aus dem RDB und der externen Dampfquelle durch die Einspeisungen in Raum 1805 wurde dort auch ein He-Wasserstoffgemisch eingespeist, gefolgt von einer weiteren externen Dampfeinspeisung im selben Freisetzungsraum 1805, die dann den maximalen Druck von etwa 2.08 bar im SB generieren. Dies ist die Simulation der in-vessel-Phase bei einem schweren Störfall mit oberer Freisetzung. Bis zum Haupt-sprühvorgang (3. Sprühen) bei 18 h sinkt der Druck asymptotisch auf 1.64 bar. Das

Sprühen bewirkt einen Druckabfall von 0.13 bar auf 1.51 bar. Der spätere Abkühlvorgang verläuft dann sehr langsam. Bei 29 h vented man kurzzeitig um 0.5 bar und bei 32 h endgültig bis zum Ausgleichsdruck bei 33 h.

Abb. 1-23 und Abb. 1-24 (schwarz: Experiment, rot: Basisrechnung, blau: Rechnung mit durch Gebläse erzeugter Turbulenz) zeigen die gute Übereinstimmung zwischen Druckrechnung und -Messung, die angesichts des iterativen Vorgehens bei der Anpassung der Kühlenergie an den Druckverlauf auch nicht verwunderlich ist. Zur Zeit des Sprühens jedenfalls gibt es einen fast konstanten Kühlenergieabzug und der Druckverlauf ist dort nicht durch Kühlenergieänderungen berechnet worden. In Abb. 1-24 sind die jeweils einminütigen ersten und zweiten Sprühphasen sowie die 30-minütige dritte Sprühphase deutlich als Druckabfall ersichtlich.

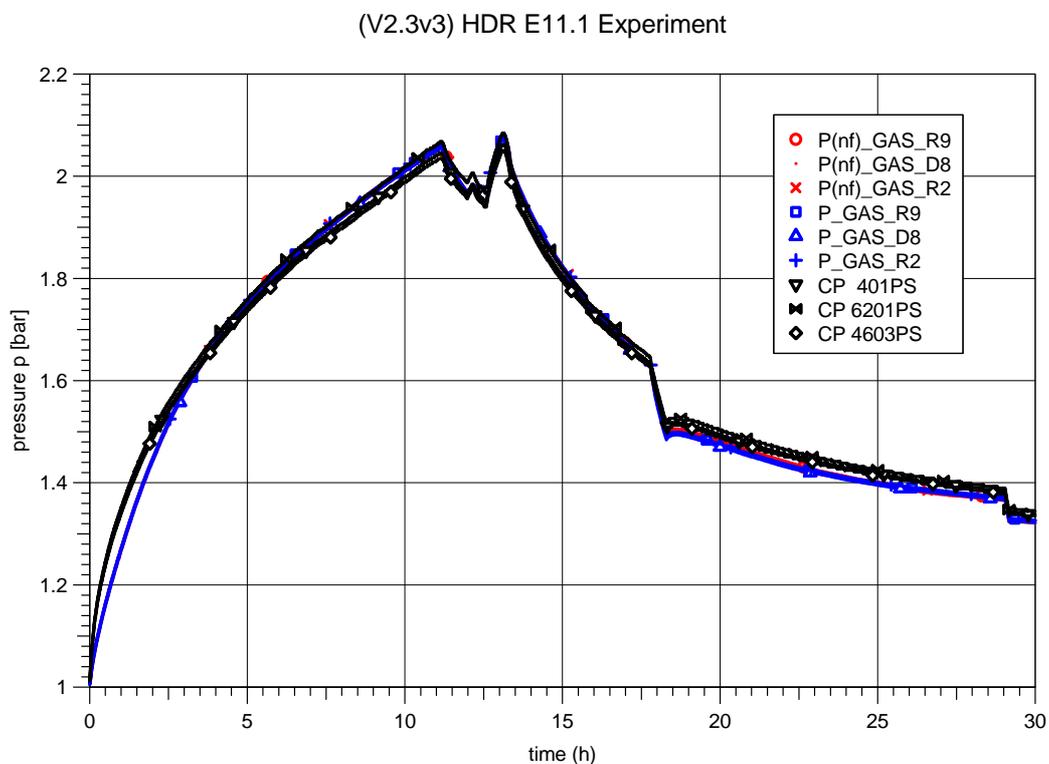


Abb. 1-23 HDR E11.1 – Druckverlauf

(V2.3v3) HDR E11.1 Experiment

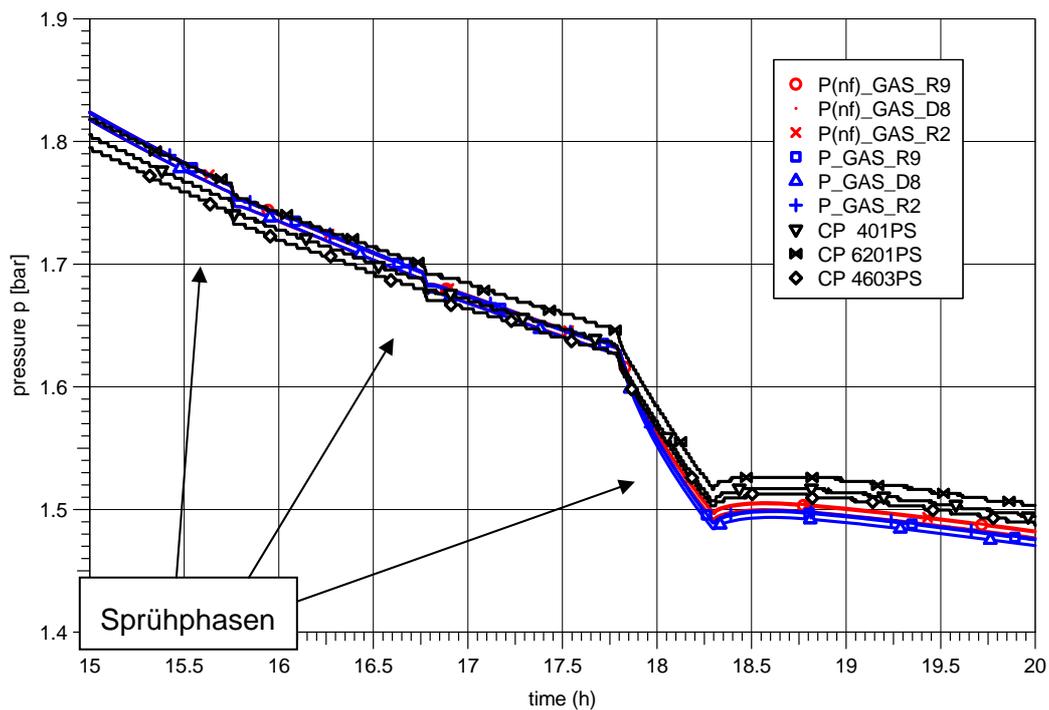


Abb. 1-24 Druckverlauf während der Sprühphasen

- Temperaturen und Konzentrationen im Dombereich

Hauptaugenmerk des E11.1 Versuchs sind die Auswirkungen eines Innensprühsystems während eines Unfallablaufs im Kernkraftwerk. Daher werden zunächst die Vergleiche für Temperaturen und Konzentrationen im Dombereich dargestellt und insbesondere während der Sprühphase detailliert betrachtet.

Die Abb. 1-25 bis Abb. 1-29 zeigen den Vergleich der Temperaturverläufe im Dombereich für verschiedene Höhen. Die Temperaturänderungen durch das Sprühsystem werden etwas unterschätzt. Diese sind einerseits bedingt durch die Wechselwirkung mit den Sprühtröpfchen als auch durch die erzeugte Turbulenz (zusätzliche Vermischung). Die Unterschätzung gilt insbesondere für die ersten beiden kurzen Sprühphasen. Interessant ist die Temperaturerhöhung im unteren Dombereich (Abb. 1-29).

Die Unterschiede in beiden Rechnungen machen sich insbesondere für die H_2+He -Konzentrationen bemerkbar (Abb. 1-30 bis Abb. 1-33). Im oberen Bereich führt das Innensprühen zu einer Konzentrationserhöhung, welche aber durch die folgende Durchmischung wieder absinkt. In der Rechnung ohne Gebläse wird zwar die Konzentrationserhöhung gerechnet, aber die folgende Durchmischung unterschätzt (Abb. 1-31), während in der Rechnung mit Gebläse die Konzentrationserhöhung unterschätzt wird.

Die Vernachlässigung der Durchmischung führt zu einer langfristigen Abweichung der berechneten Konzentration im oberen Dombereich, so dass die Verwendung von Gebläsen zur Anregung von zusätzlichen "Turbulenzen" empfohlen wird. Im unteren Dombereich sind die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung deutlich größer als im oberen Dombereich.

(V2.3v3) HDR E11.1 Experiment

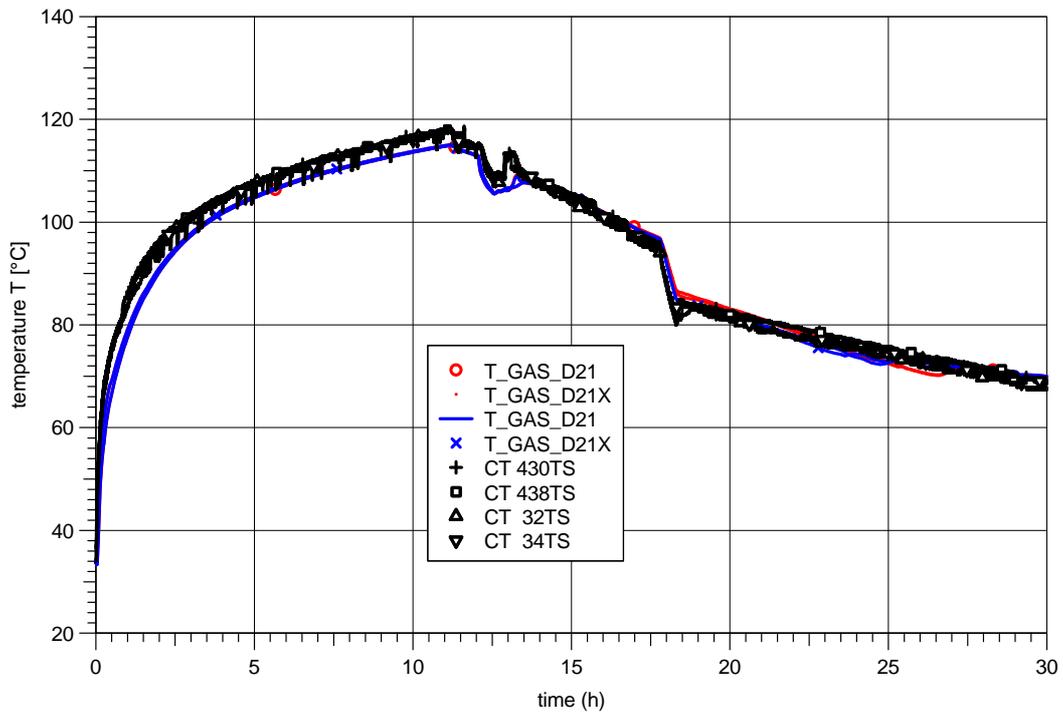


Abb. 1-25 HDR E11.1 - Temperaturverlauf im Dom - Zone D21

(V2.3v3) HDR E11.1 Experiment

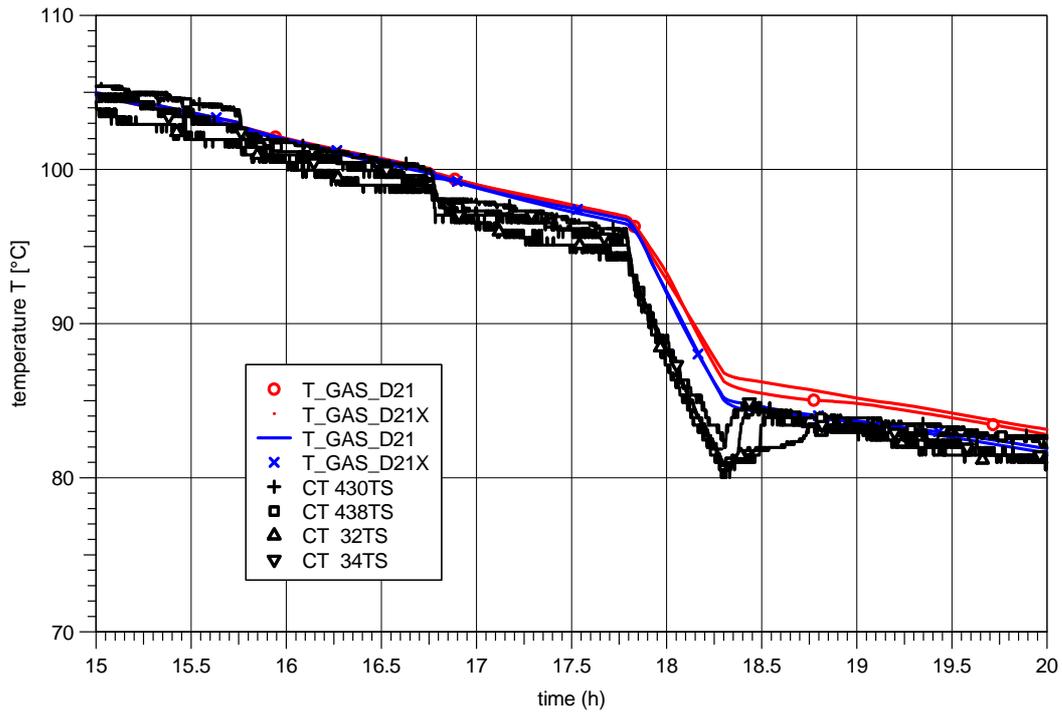


Abb. 1-26 HDR E11.1 - Temperaturverlauf im Dom - Zone D21 (Sprühphase)

(V2.3v3) HDR E11.1 Experiment

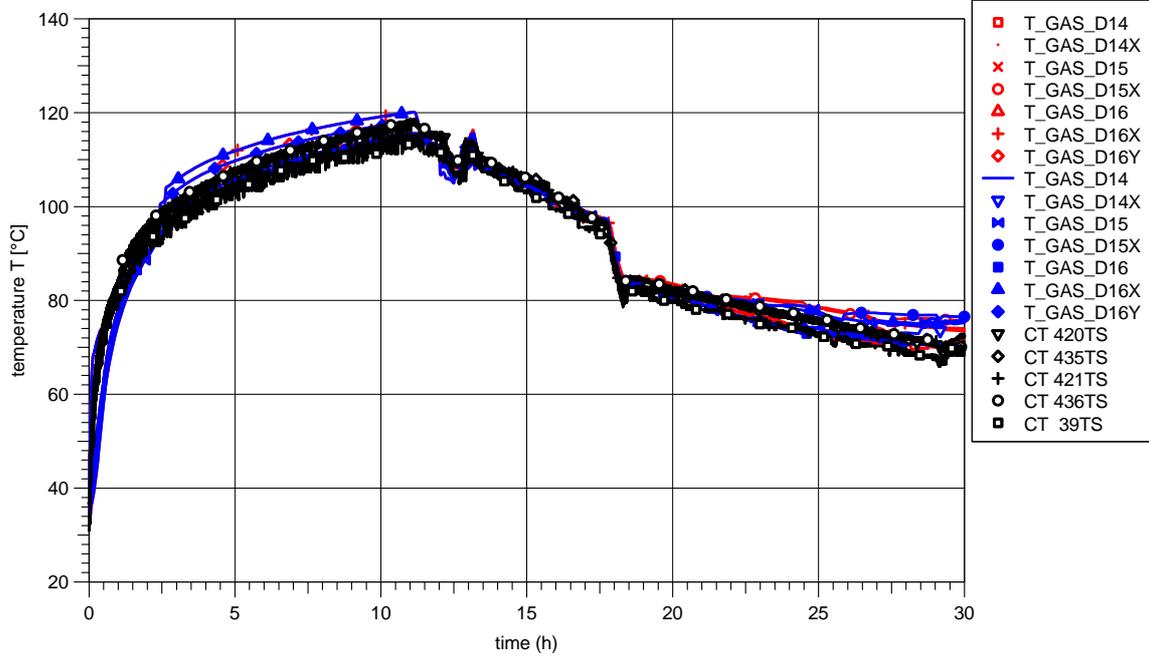


Abb. 1-27 HDR E11.1 - Temperaturverlauf im Dom – Zonen D14 bis D16

(V2.3v3) HDR E11.1 Experiment

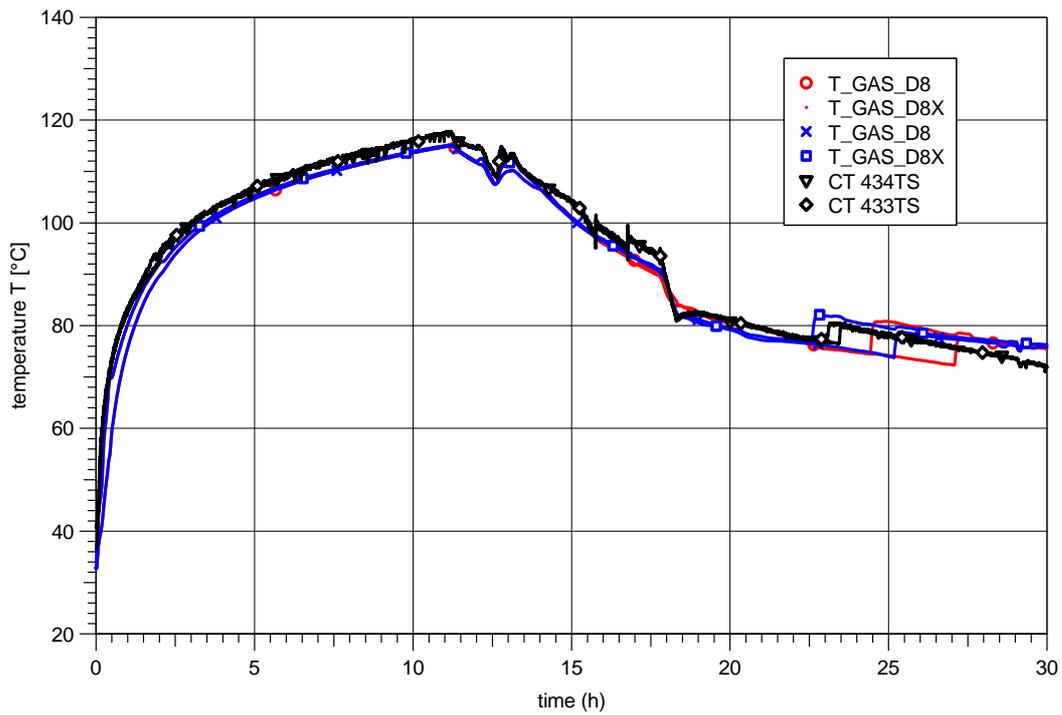


Abb. 1-28 HDR E11.1 - Temperaturverlauf im Dom - Zone D8

(V2.3v3) HDR E11.1 Experiment

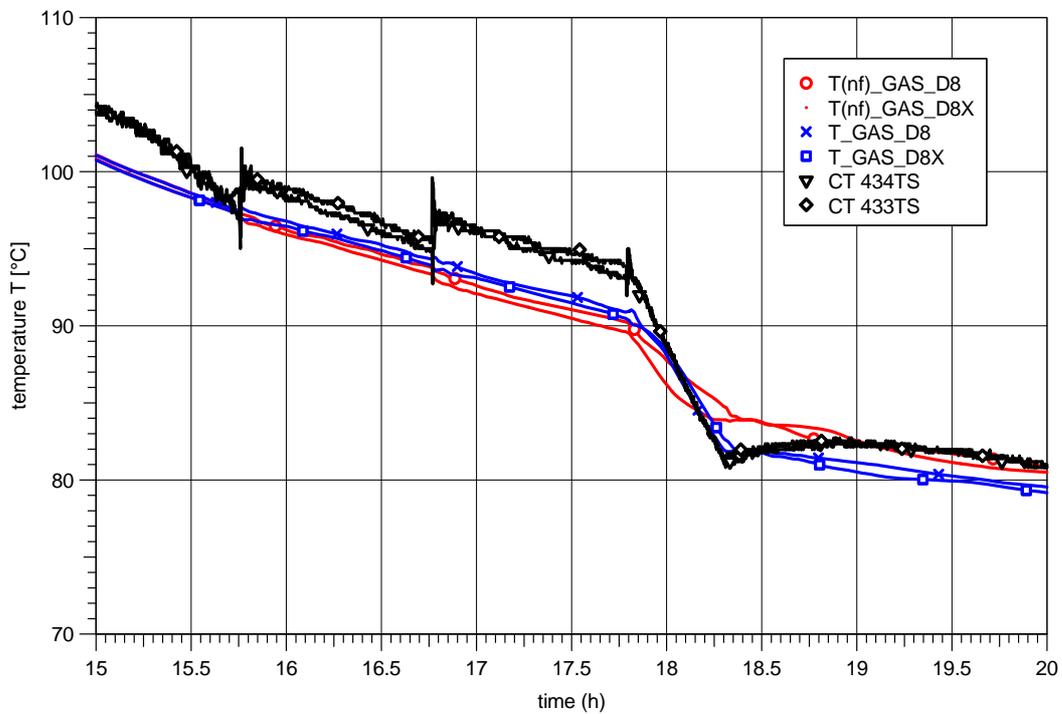


Abb. 1-29 HDR E11.1 - Temperaturverlauf im Dom - Zone D8 (Sprühphase)

(V2.3v3) HDR E11.1 Experiment

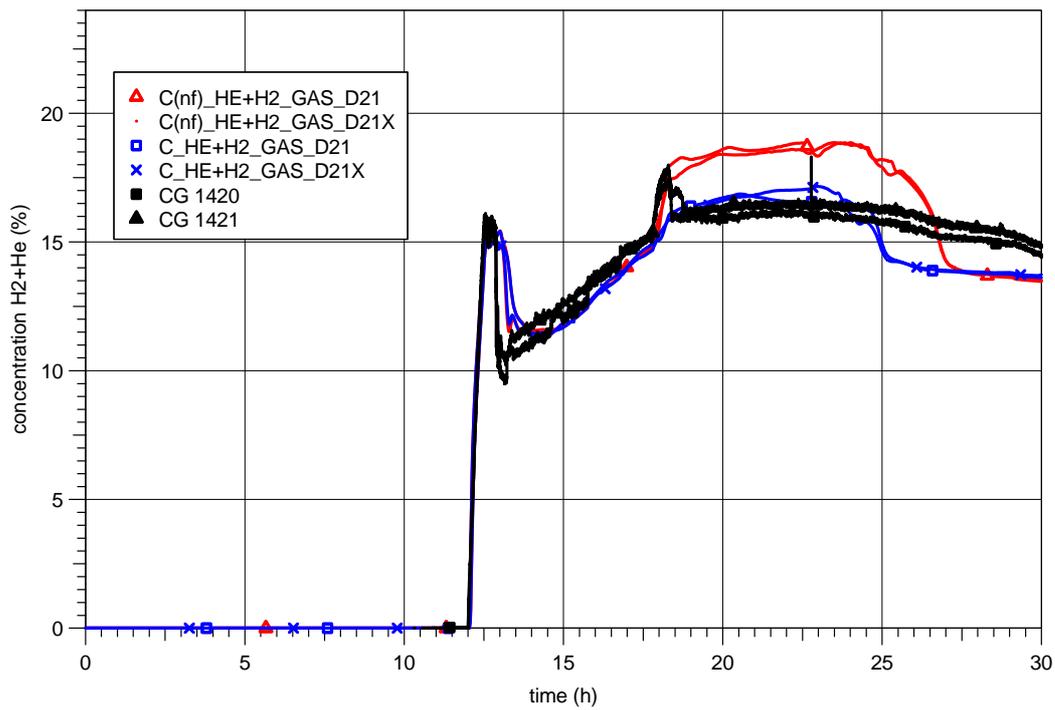


Abb. 1-30 HDR E11.1 – He+H₂-Konzentrationen im Dom - Zone D21

(V2.3v3) HDR E11.1 Experiment

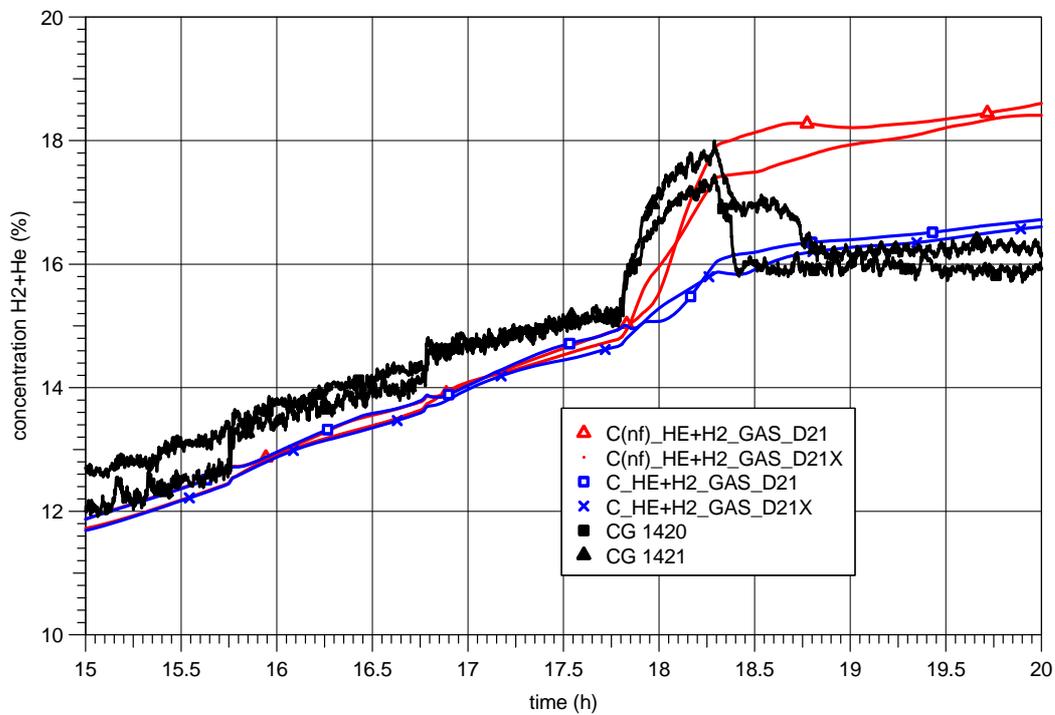


Abb. 1-31 HDR E11.1 – He+H₂-Konzentrationen im Dom - Zone D21 (Sprühphase)

(V2.3v3) HDR E11.1 Experiment

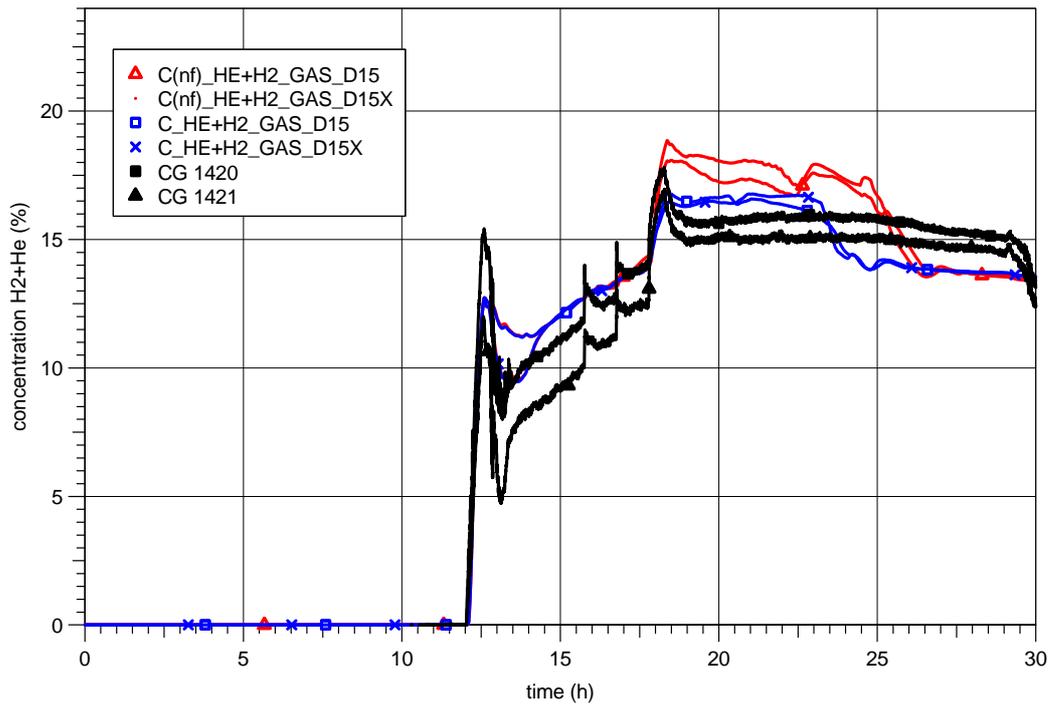


Abb. 1-32 HDR E11.1 – He+H₂-Konzentrationen im Dom - Zone D15

(V2.3v3) HDR E11.1 Experiment

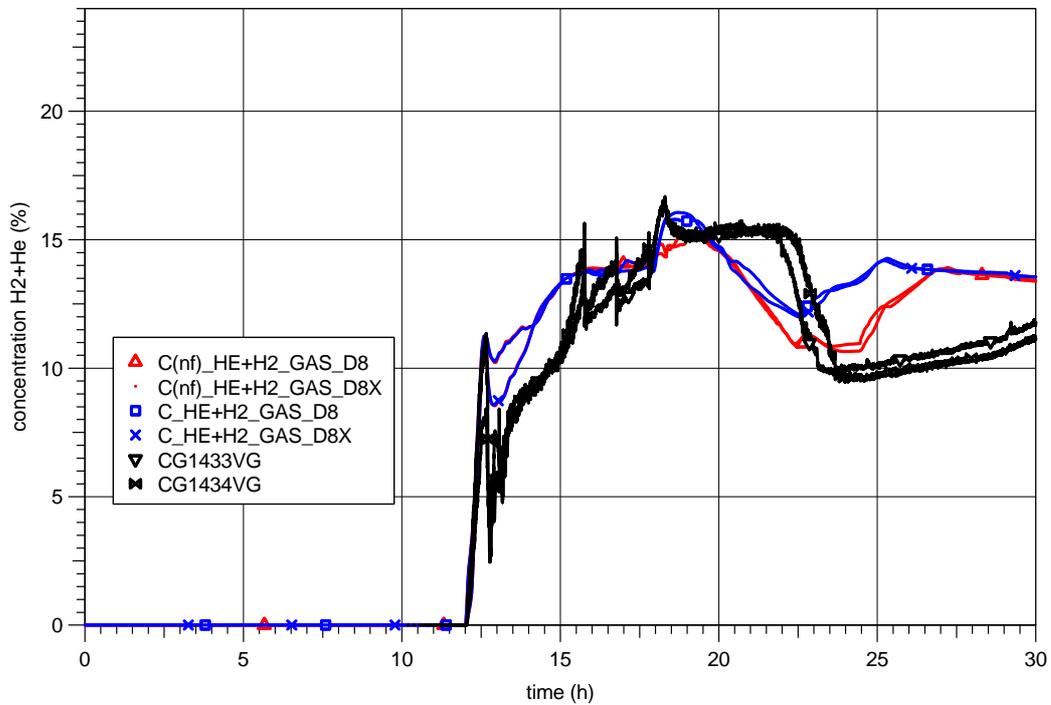


Abb. 1-33 HDR E11.1 – He+H₂-Konzentrationen im Dom - Zone D8

- Weitere Temperaturen und H₂+He-Konzentrationen

Im Folgenden werden einige exemplarische Ergebnisse für die Temperaturen im Sicherheitsbehälter dargestellt. Diese beschränken sich auf Ergebnisse im Hauptkonvektionsloop im Treppen- und im Wendeltreppenhaus in verschiedenen Ebenen.

Die Temperaturen sind gut validiert, wenn auch das Thermoelement CT8101TS in Raum 1801 nach dem Sprühen einen deutlichen Temperaturanstieg zeigt (Abb. 1-34), der von der Rechnung nicht gezeigt wird. Auch die H₂-He-Konzentration Abb. 1-39 ist dort nicht gut getroffen, da offensichtlich dort mehr heißes Wasser in den Raum gelangt und damit mehr Dampfdruck aufgebaut wird als berechnet. Die Ergebnisse für die Sumpfbereiche sind gut.

Abb. 1-35 und Abb. 1-40 zeigen die Validierungen für die 4er-Ebene und die darüber liegende 5er-Ebene für beide Treppenhausseiten, auch hier sind die Temperaturen und Konzentrationen gut nachgerechnet. Ähnliches gilt auch für die 6er-Ebene in den Abb. 1-36 und Abb. 1-41. Man sieht bei den Konzentrationsberechnungen eine leichte Überschätzung der Leichtgaskonzentrationen zu Beginn der Freisetzung. Zum Verständnis der Verläufe sollte man sich immer die Versuchsführung vergegenwärtigen. In Abb. 1-41 sieht man z.B. deutlich die Konzentrationsänderungen durch das Venten bei 29 und 32 h.

Die 7er-Ebenen-Ergebnisse sind in den Abb. 1-37 und Abb. 1-42 zu sehen. Da sie direkt unter der Einspeiseebene liegen, haben sie schon ein deutlich anderes Verhalten als die darunter liegenden Ebenen. Diese Zwischenebene verhält sich aber auch zur darüber liegenden 8er-Bruchebene gänzlich anders, siehe Abb. 1-38 und Abb. 1-43.

In der 7er-Ebene treten anfänglich auch zwischen dem Treppenhaus (R35) und dem Wendeltreppenhaus (R48) verschiedene Temperaturen auf. Die sich im Wendeltreppenhaus von oben nach unten bewegendes heiße Gas wird in (R31A und R48A) zur Ruhe kommen und hauptsächlich dann an den Decken der 7er-Zonen entlang seitlich wieder in die Bruchebene gezogen. Die Temperaturmessstellen der 7er-Ebene liegen hier noch im "kalten" Bereich des Containments. Im Wesentlichen heizt sich die Bruchebene (Level 8) und alle darüber liegenden Raumbereiche auf und die Durchmischung unter der Bruchebene ist sehr gering. Dies zeigen im Wesentlichen auch die H₂+He-Konzentrationen. Eine gute Berechnung der Temperaturschichtung ist Voraussetzung, um überhaupt eine stimmige Gaskonzentration berechnen zu können. Auch die in der Bruchzone R60 auftretende Überhitzung wird berechnet. Allerdings kann

man ab etwa 15 h eine Überhitzung von CT8501TS im Bruchraum feststellen, die nicht berechnet wird. Dies ist nicht nur hier ein deutlicher Hinweis auf eine weitere Energie- bzw. Dampfzufuhr aus dem aufgeheizten Primärkreis, die hier nicht simuliert wurde.

In den Bruchzonen und darüber wird der anfängliche H₂+He-Freisetzungsspeak gut nachgerechnet (Abb. 1-43), dann erfolgt aber schon die in dieser Rechnung nicht berücksichtigte kleine Dampffreisetzung in der Bruchzonenumgebung, die zunächst durch Verdrängung zur Steigerung der H₂-He-Konzentration in und oberhalb der Bruchzone führt.

Das in die obere Kuppelzone geschobene Gasgemisch aus H₂+He-Dampf erreicht durch die Dampfkondensation etwa nur eine mittlere Konzentration von 16 %, siehe Abb. 1-32 und Abb. 1-33. Der Tendenz nach kann COCOSYS dieses Verhalten unter Verwendung der Turbulenzfans simulieren. Die Turbulenzgeneratoren sind aber möglicherweise auch für den zu frühen Zusammenbruch der Schichtung bei 24 h (29 h gemessen) verantwortlich. Eine wesentliche Aufkonzentration wie beim Außensprühen bei E11.2 wird hier nicht beobachtet.

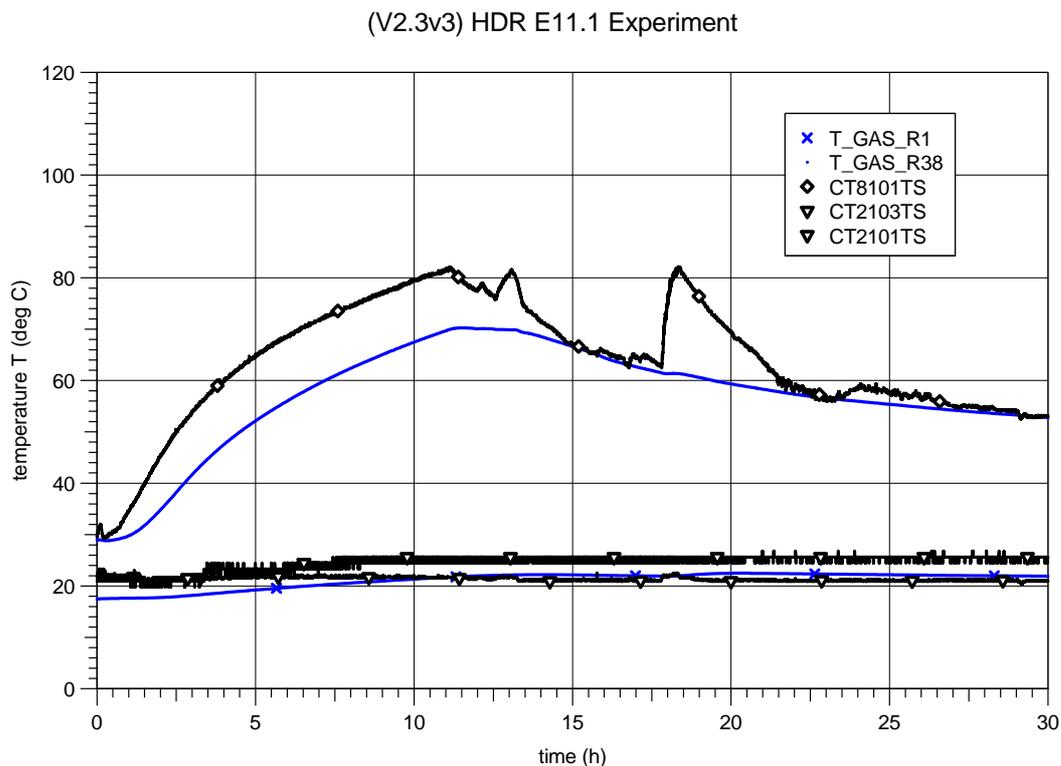


Abb. 1-34 HDR E11.1 - Temperaturverlauf in Zone R1 und R38

(V2.3v3) HDR E11.1 Experiment

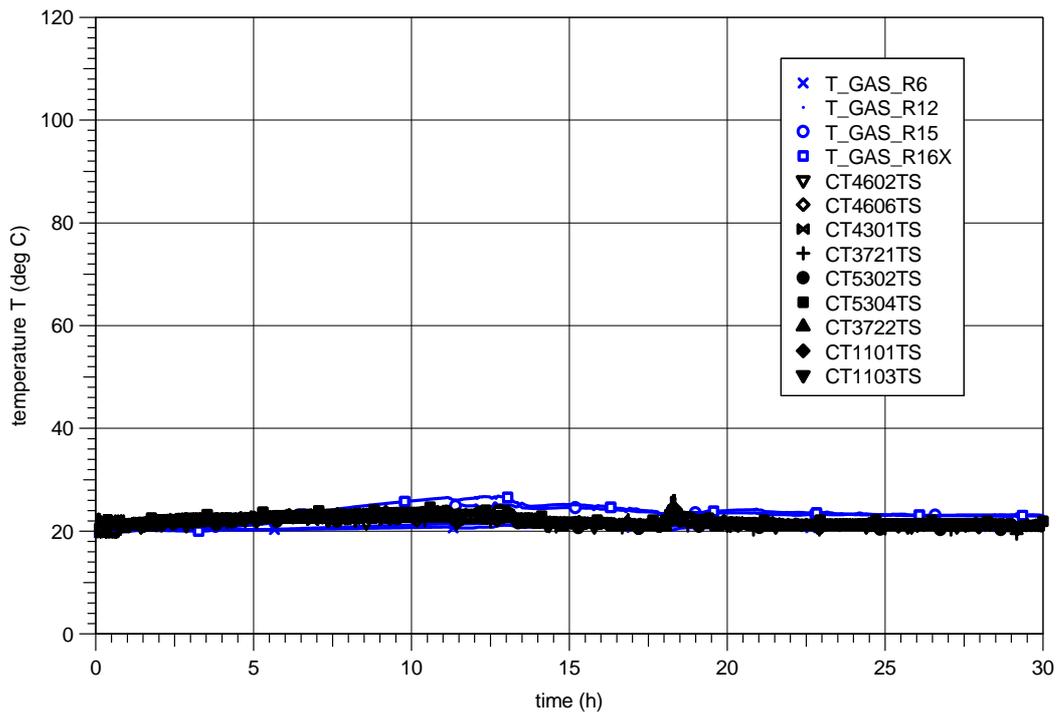


Abb. 1-35 HDR E11.1 - Temperaturverlauf in 1400&1500 Ebene

(V2.3v3) HDR E11.1 Experiment

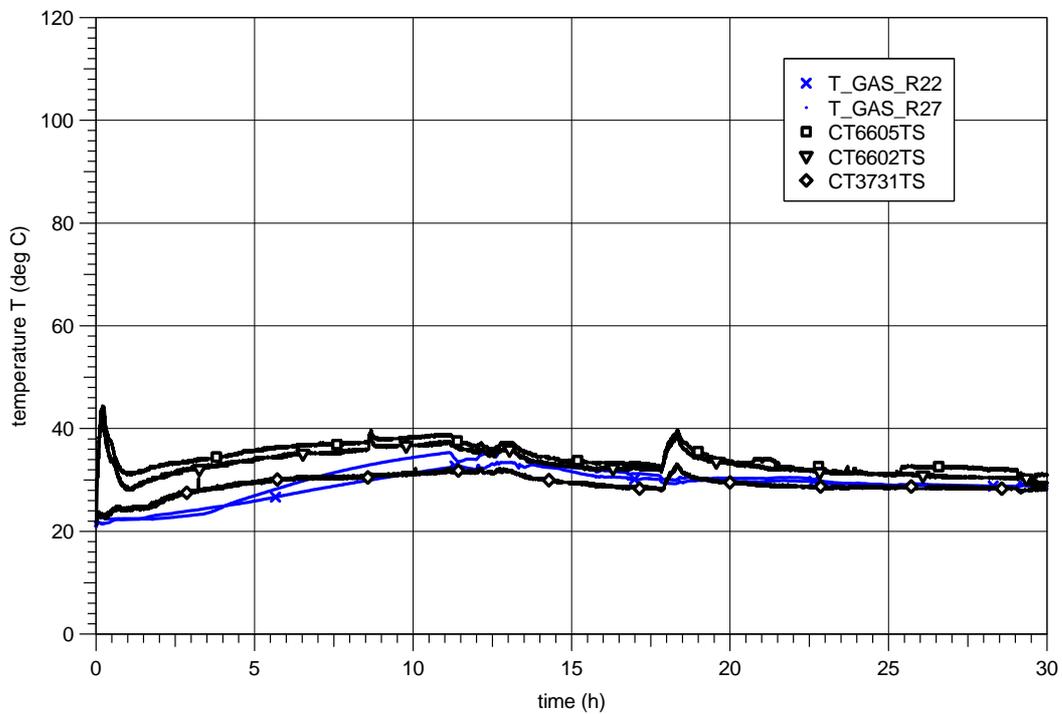


Abb. 1-36 HDR E11.1 - Temperaturverlauf in 1600 Ebene

(V2.3v3) HDR E11.1 Experiment

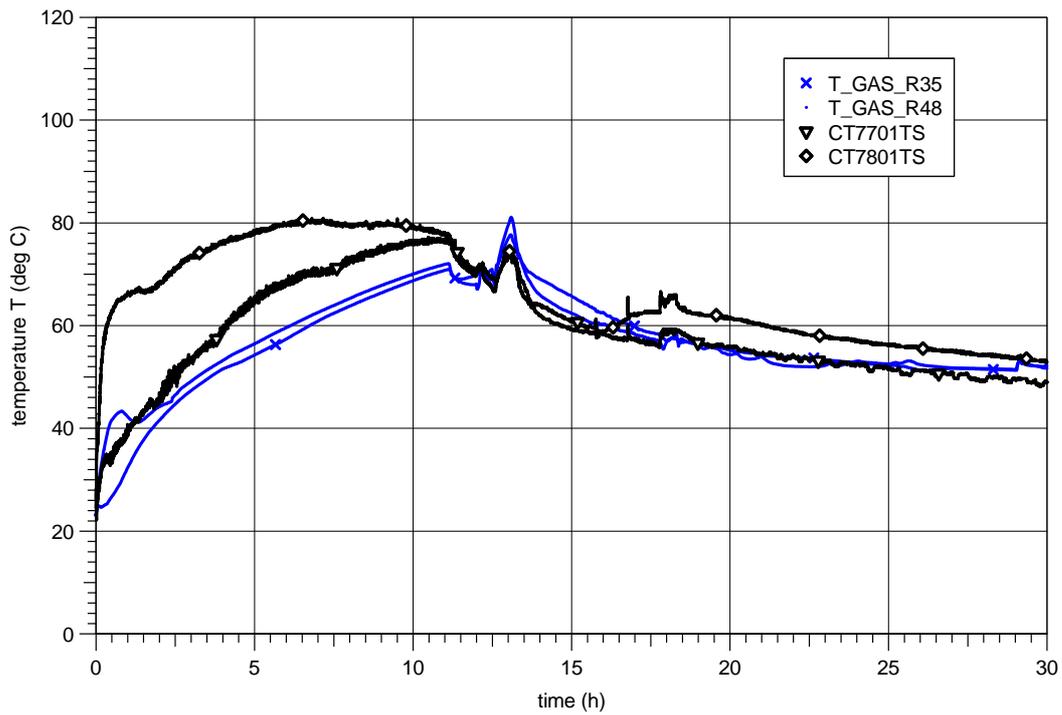


Abb. 1-37 HDR E11.1 - Temperaturverlauf in 1700 Ebene

(V2.3v3) HDR E11.1 Experiment

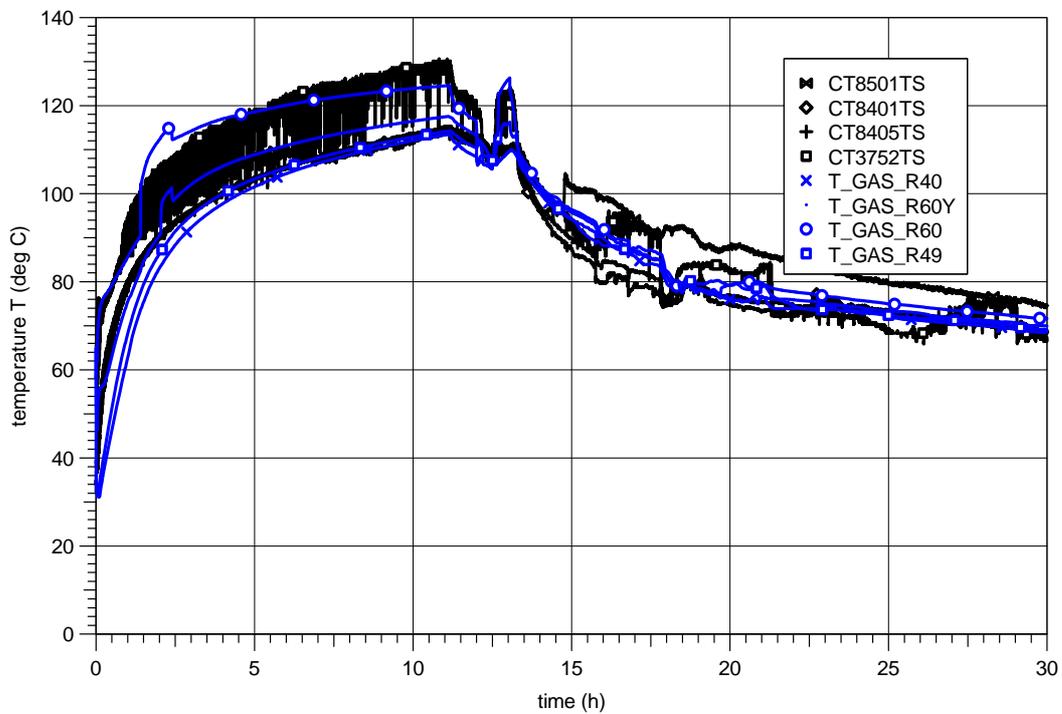


Abb. 1-38 HDR E11.1 - Temperaturverlauf in 1800 Bruchebene

(V2.3v3) HDR E11.1 Experiment

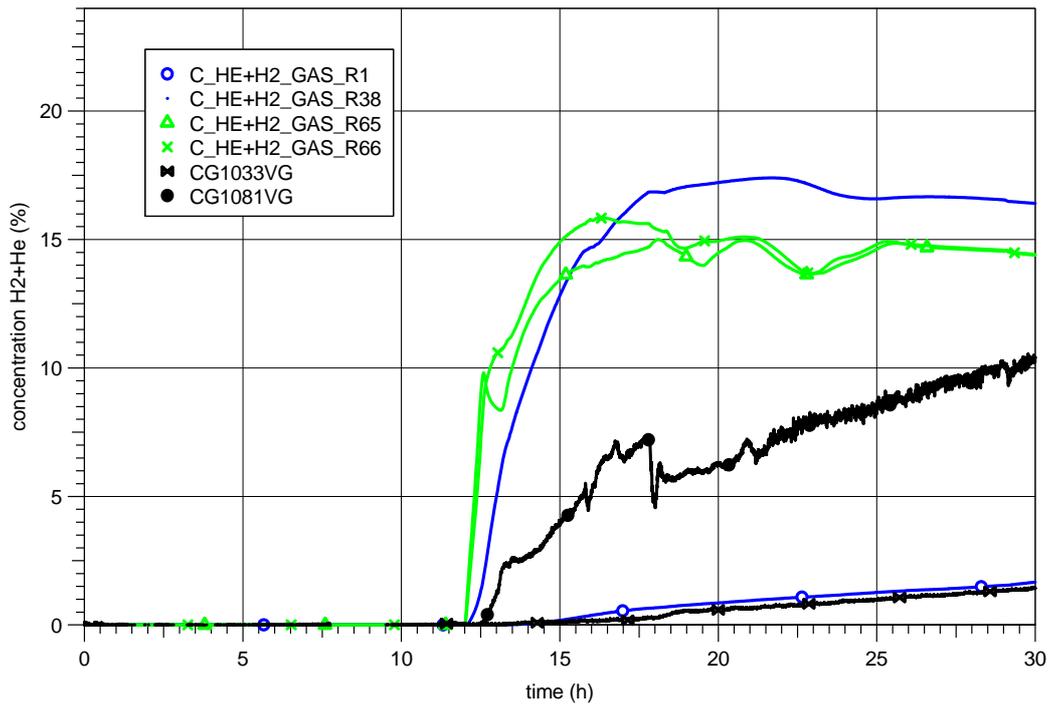


Abb. 1-39 HDR E11.1 – H₂+He-Konzentration in Zone R1 und R38

(V2.3v3) HDR E11.1 Experiment

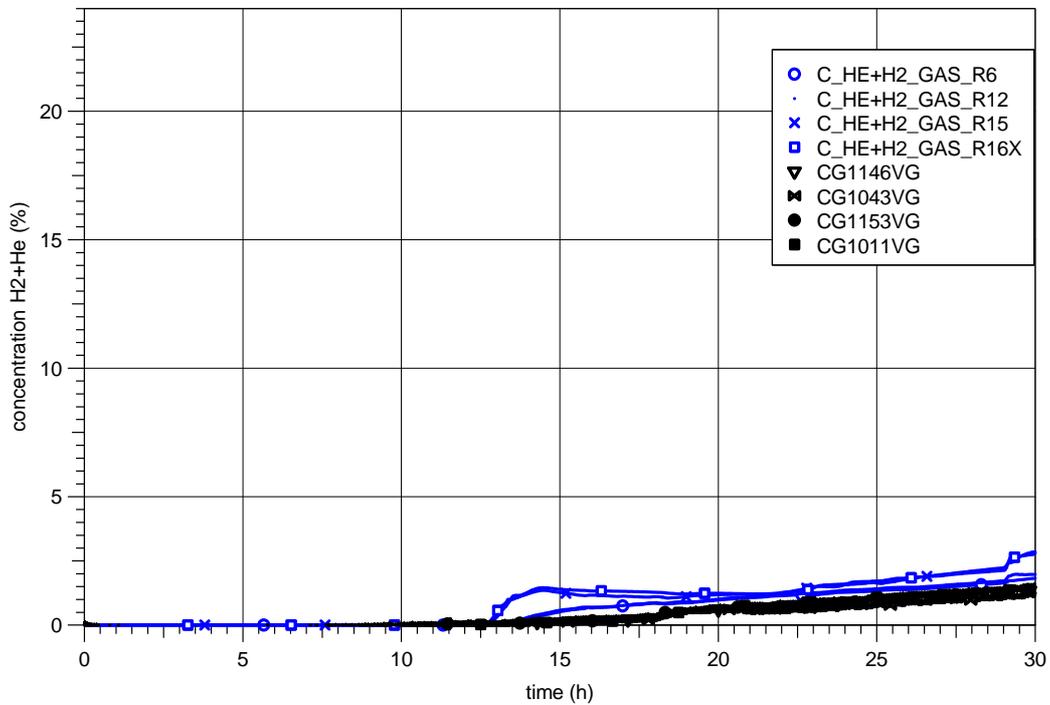


Abb. 1-40 HDR E11.1 – H₂+He-Konzentration in 1400&1500 Ebene

(V2.3v3) HDR E11.1 Experiment

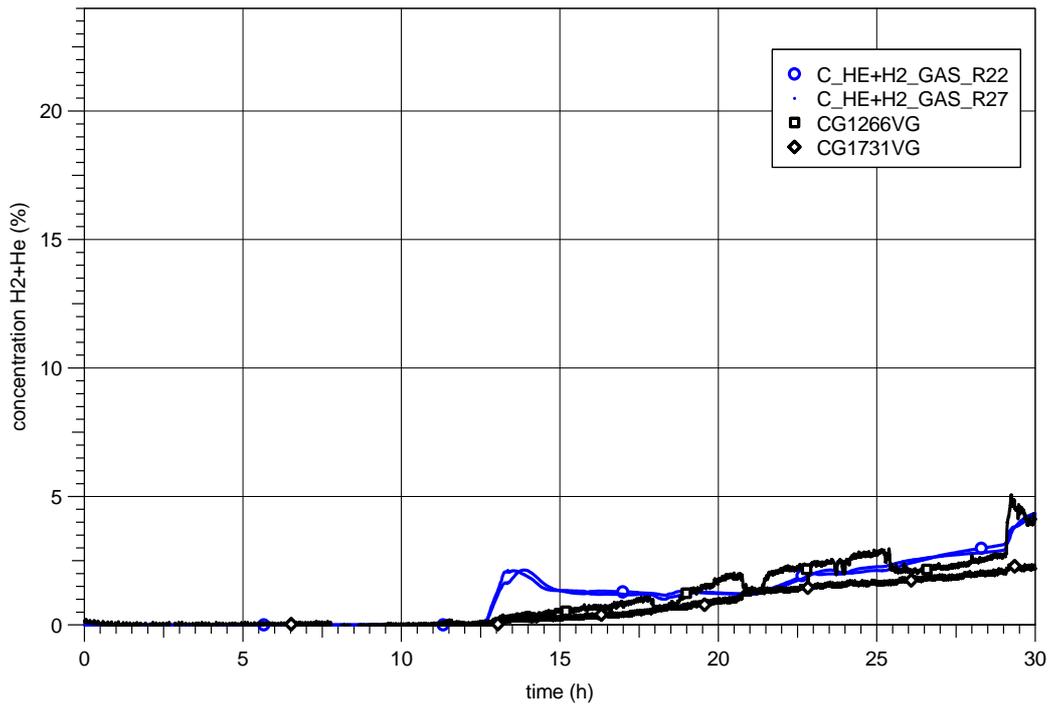


Abb. 1-41 HDR E11.1 – H₂+He-Konzentration in 1600 Ebene

(V2.3v3) HDR E11.1 Experiment

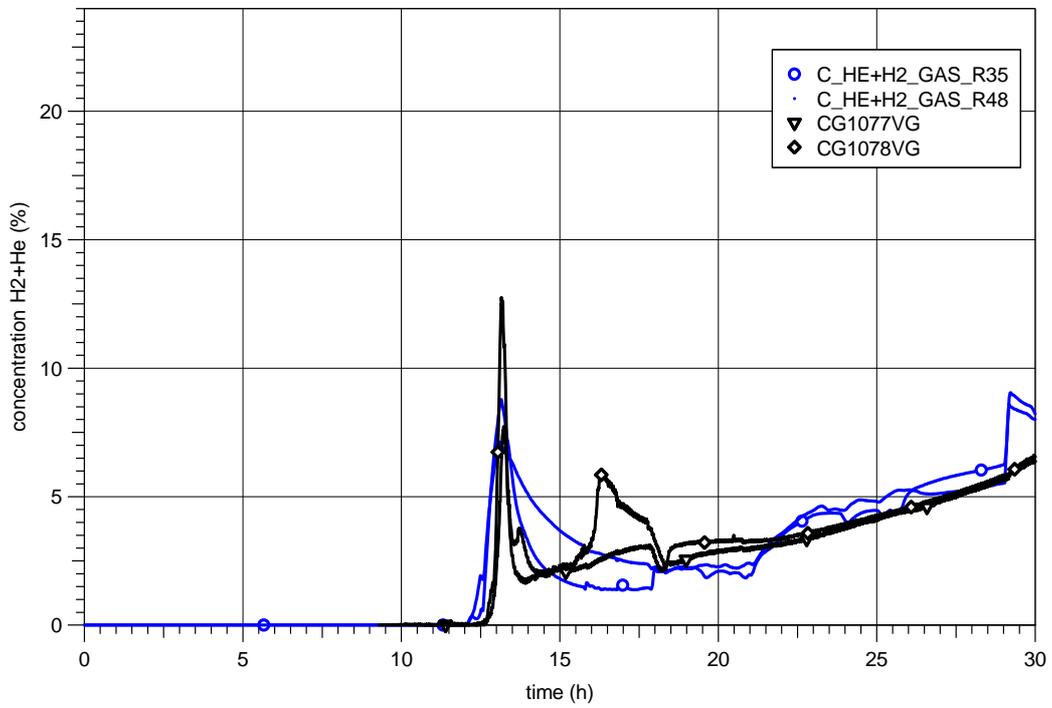


Abb. 1-42 HDR E11.1 – H₂+He-Konzentration in 1700 Ebene

(V2.3v3) HDR E11.1 Experiment

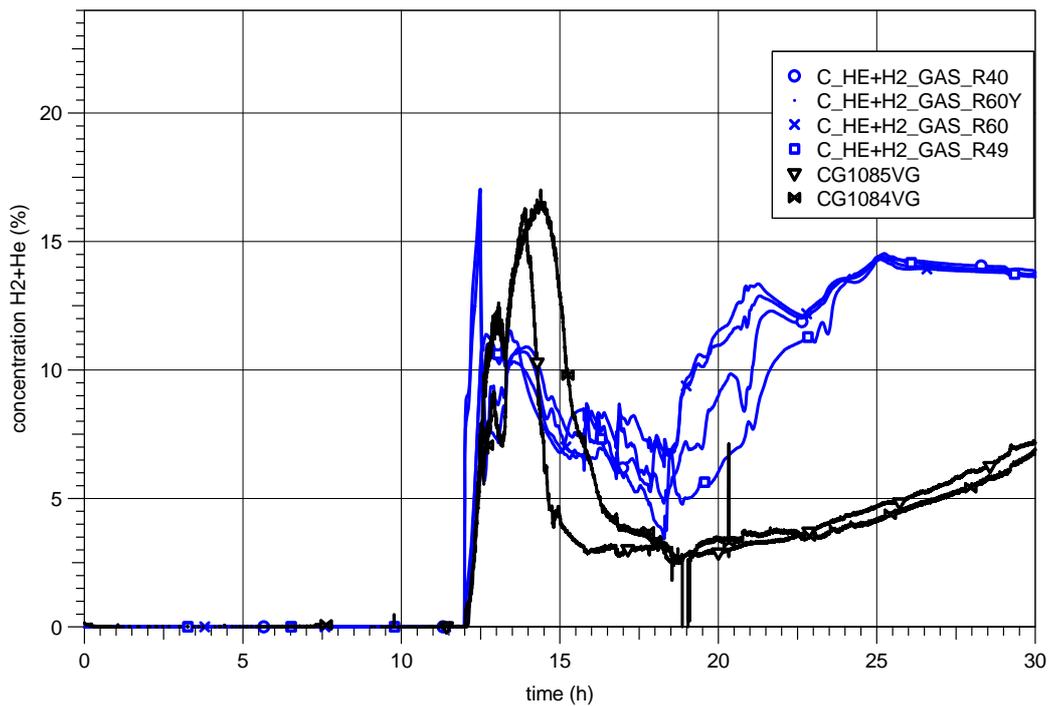


Abb. 1-43 HDR E11.1 - H2+He-Konzentration in 1800 Bruchebene

1.3.2.4 Massen- und Energiebilanz der HDR E11.1 Rechnung

Tab. 1-1 zeigt die Energiebilanz zum Zeitpunkt bei etwa 33 h. Daraus ergibt sich, dass ca. 21 % der zugeführten Energie über die Instrumentenkühlung wieder abgeführt wird und damit einen erheblichen Beitrag darstellt. Nur ca. 5 % der Energie ist in den Zonen enthalten. 73 % der Energie wird in den Strukturen gespeichert.

Die Verteilung der H2+He-Masse zeigt, dass ca. 2/3 im Dombereich verbleiben und nur 1/3 in den unteren SB-Zonen.

Tab. 1-4 Energiebilanz der HDR E11.1 Rechnung bei 33 h

	GJ	~ %
Innenbeton	100	32
Cooling	66	21
Außenbeton	49	16
Umwelt	38	12
Liningbeton	17	6

	GJ	~ %
Zonen	15	5
Spaltbeton	7	2
Spalt + SB	8	3
Innenstahl	6	2
Reste	3	1
	309	100

1.3.2.5 Zusammenfassung

Mit der hier dargestellten COCOSYS-Rechnung wurde der HDR E11.1-Versuch gut validiert. Voraussetzungen dazu waren die vielfältigen Möglichkeiten des COCOSYS-Codes, alle hauptsächlichen physikalischen Effekte sowie alle verwendeten technischen Systeme zu simulieren. Bei diesem Versuch lag das Hauptaugenmerk auf der Simulation des Innensprühsystems mit dem sog. implementierten IVO-Modell. Die Instrumentenkühlung wurde so eingestellt, dass der Druckverlauf richtig berechnet wurde, als Voraussetzung dafür, dass beim Einsatz des Sprühsystems die richtigen Startbedingungen getroffen wurden.

Das IVO-Sprühmodell zeigte sich als sehr flexibel und anwenderfreundlich, so dass mit wenigen Rechenläufen die zur Validierung bereitstehenden Messwerte gut nachgerechnet werden konnten. Auch bei diesem Sprühversuch haben wir die Indikation, dass man Innensprühen nur rechnen kann, wenn man zusätzlich für Turbulenzen in den Sprühzonen sorgt. Dies wurde hier mit einer zusätzlichen Parameterrechnung ohne Verwendung eines Gebläsesystems gezeigt. Die Rechnungen mit 3 Gebläsen im Dombereich führten dort sofort zu besseren Ergebnissen bei den H₂-He-Konzentrationen.

Das hauptsächliche physikalische Verhalten bei diesem Versuch, dies sind im Wesentlichen die extremen Temperatur- und Konzentrationsschichtungen im SB, wurde gut beschrieben. Die Annulus- und SB-Stahlschalen-Temperaturen konnten (bis auf eine Ausnahme, Raum 1801) auch erfolgreich validiert werden. Das für die E11-Versuche HDR bisher größte Zonenmodell rechnet mit 12*Realtime Rechengeschwindigkeit.

Ein Teil der H₂-He-Konzentrationen in und oberhalb der Bruchebene wurde nicht gut berechnet, weil die für alle E11-Versuche wichtige sog. Ausdampfung des Primärkrei-

ses hier nicht simuliert wurde. Dies kann aber durch weitere Analysen iterativ verbessert werden.

Diese Rechnung hat von den vorlaufenden E11.2-Analysen durch die ähnliche Vorgehensweise profitiert. Dabei sind hervorzuheben:

- Anpassung der Kühlenergie zur Druckberechnung
- Verwendung des Trägheitsterms von etwa $A/L \sim 0.1$ für alle Strömungsverbindungen
- Verwendung einer ausreichenden Diskretisierung und plume-Zonen zur Konvektionssimulation bruchnaher und darüber liegender Zonen
- Globale Verwendung von DRAIN_WALL-Wasserverbindungen.

Im Vergleich mit E11.2, bei dem das Außensprühsystem verwendet wurde, entstanden hier bei E11.1 nicht so hohe Leichtgasaukonzentrationen im Dom, weil beim Außensprühen im Gegensatz zum Innensprühen zunächst Stagnationsbedingungen im Dom gefördert werden.

Über die zukünftige Erfassung der durch die Sprühtropfen erzeugten Turbulenz sollte nachgedacht werden, wenn sich bei Nachrechnung weiterer Versuche die Notwendigkeit erhärten sollte.

1.3.3 Validierung der 'plume'-Modellierung

Experiment

Die SETH-Tests werden in der PANDA- Versuchsanlage des Paul-Scherrer-Instituts in der Schweiz durchgeführt /AND 04/. Die Testkonfiguration besteht aus zwei Behältern, mit denen die sog. SWR-'drywells' nachgebildet sind (DW1 und DW2), mit jeweils einer Höhe von 8 m und einem Innendurchmesser von 4 m. In 3 m Höhe sind sie mit einem 5.2 m langen Rohr, das einen Innendurchmesser von 0.93 m hat, verbunden (Abb. 1-44).

Für eine blinde COCOSYS-Rechnung wurde der Test T9bis ausgewählt /ZBO 05/. Die Versuchsbehälter waren zu Beginn des Versuchs mit Luft von 1.3 bar gefüllt. Ihre Temperaturen betragen in den oberen Bereichen 78.5 °C. In DW1 nahmen sie unter-

halb von 1.8 m bis auf 75.5 °C ab, in DW2 unterhalb der Unterkante des Verbindungsrohres (2.8 m) bis auf 74 °C.

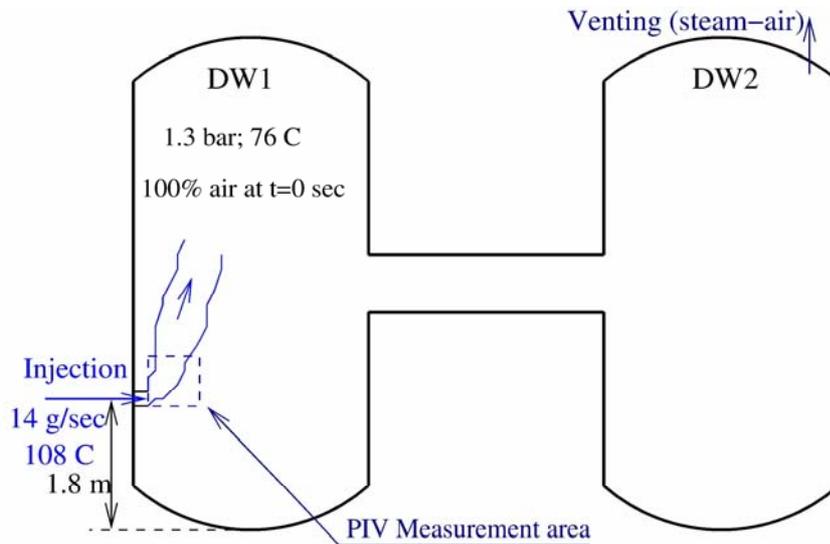


Abb. 1-44 Panda SETH T9bis, Anfangs- und Randbedingungen

Durch ein Rohr mit 0.15 m Innendurchmesser wurde 14 g/s Dampf mit einer Temperatur von 109 °C in DW1 eingespeist. Der Dampf stieg plumeförmig nach oben. Atmosphäre strömte über das Verbindungsrohr nach DW2. Der Druck wurde mittels eines Regulierventils am Deckel von DW2 konstant auf 1.3 bar gehalten.

COCOSYS-Simulation

Die Drywells und das Verbindungsrohr werden mit 51 Zonen simuliert, die 10 Ebenen bilden. Die Zonen sind mit Strömungspfaden verbunden, deren Flächen sich aus der Geometrie berechnen.

In DW1 steigt aufgrund der Dampfeinspeisung ein Plume auf. Die aus dem Verbindungsrohr in DW2 eintretende Atmosphäre steigt ebenfalls plumeförmig nach oben. Diese Plumes werden wie im ThAI ISP47-Experiment entsprechend /SCH 04b/ mit COCOSYS-Zonen simuliert. Sie bilden einen Kegel mit einem Winkel von 20° und sind untereinander mit vertikalen Strömungspfaden verbunden. Mit den Zonen, die die Behälteratmosphäre repräsentieren sind sie durch horizontale Pfade verbunden. Die Strömungsflächen der Pfade errechnen sich aus der Kegelgeometrie, wobei für die Flächen der horizontalen Pfade unter der Annahme, dass der Plume wandnah verläuft, die halbe Kegelmantelfläche angesetzt ist.

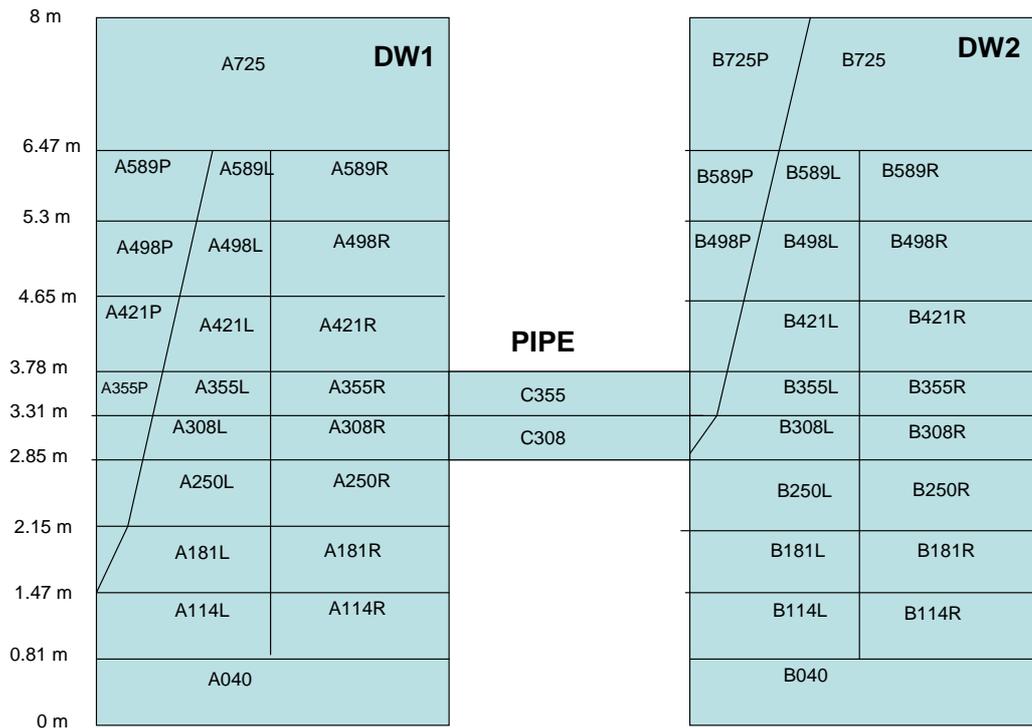


Abb. 1-45 Panda SETH T9bis COCOSYS-Nodalisierung Längsschnitt

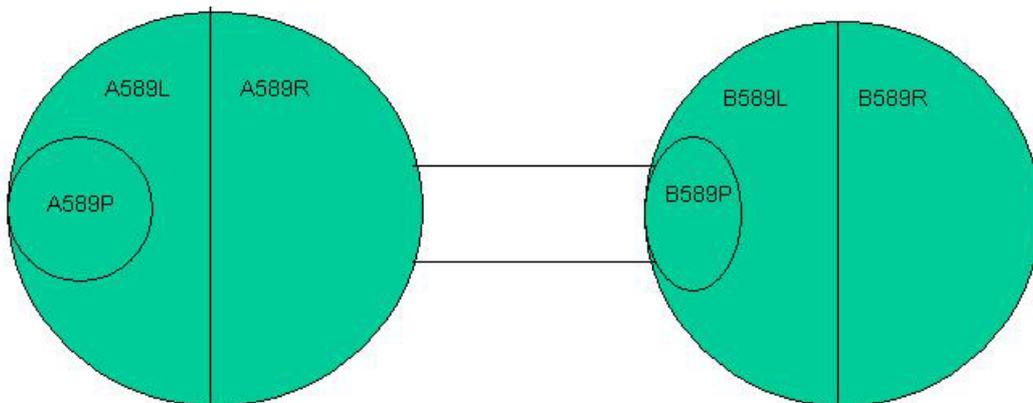


Abb. 1-46 Panda SETH T9bis COCOSYS-Nodalisierung Querschnitt bei 6.47 m

Die Namen der Zonen, die DW1 bilden fangen mit "A" an. "B" steht für DW2 und "C" für das Verbindungsrohr. Zum Beispiel befindet sich die Zone A498R in der "rechten" Hälfte von DW1 und ihr Mittelpunkt liegt auf 4.98 m. B589P ist eine Plumezone in DW2 mit dem Mittelpunkt bei 5.89 m.

Die Stahlwände und die Isolierung werden durch "Heatslabs" simuliert, die Energie mit der Behälteratmosphäre und der Umgebung austauschen können.

Kondensat, das sich an den Strukturen bildet, kann die Wände herunter rinnen (DRAIN_WALL-Modell) und Energie mit den Wänden, sowie Masse und Energie mit der Behälteratmosphäre austauschen.

Rechenergebnisse im Vergleich zum Experiment

Im Experiment steigen die Dampfkonzentrationen zunächst hauptsächlich in den Bereichen oberhalb der Dampfeinspeiseposition (1.8 m) in DW1 an. Darunter bleiben die Konzentrationen niedrig. Ab etwa 4000 s ist ein verstärkter Anstieg der Konzentrationen in den unteren Bereichen festzustellen (Abb. 1-47). COCOSYS sagt die Dampfkonzentrationen in den oberen Behälterbereichen gut voraus, unterschätzt sie aber insbesondere ab 4000 s in den unteren Bereichen.

In DW2 sind die Ergebnisse des Experiments und der Rechnung ähnlich wie in DW1, wobei hier die hohen Dampfkonzentrationen ab der Höhe der Verbindungsleitung zwischen DW1 und DW2 auftreten (Abb. 1-48).

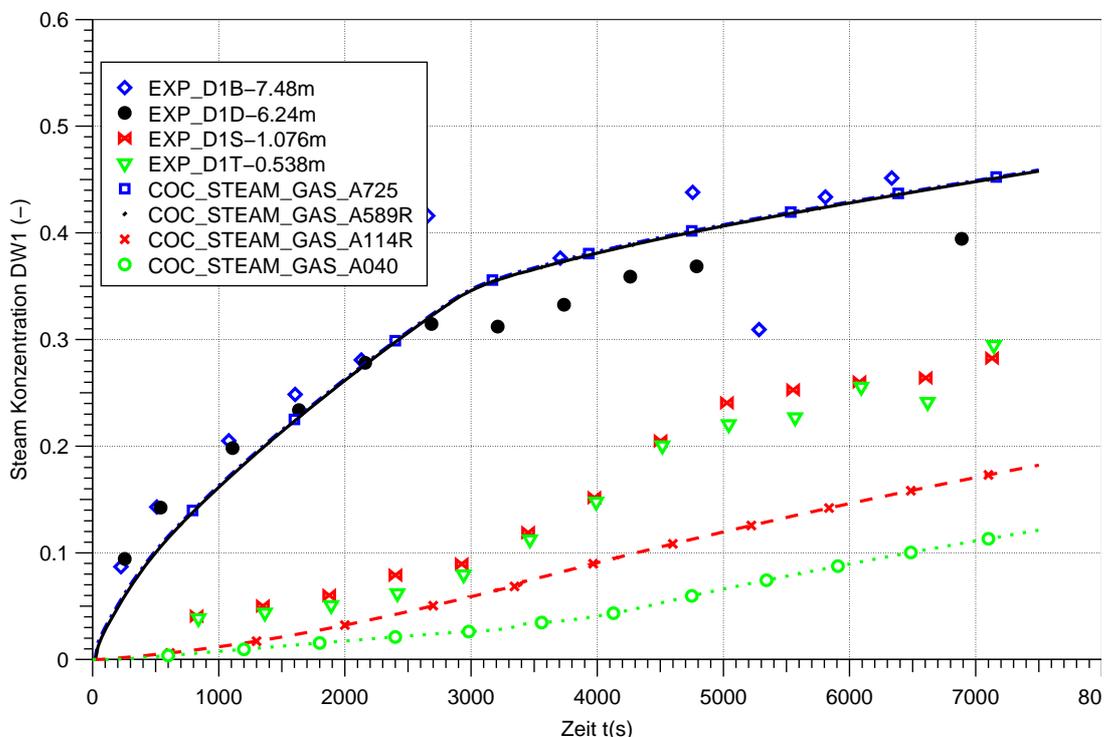


Abb. 1-47 Panda SETH T9bis, Dampfkonzentrationen in DW1, zeitliche Verläufe Experiment und COCOSYS-Rechnung

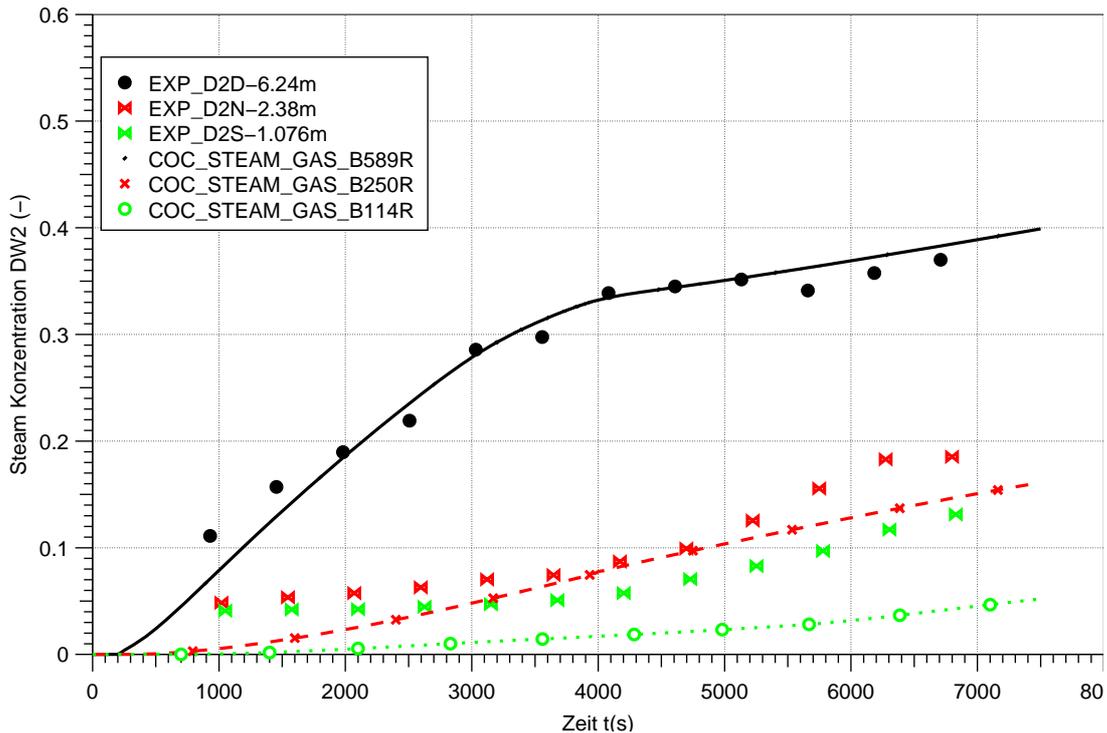


Abb. 1-48 Panda SETH T9bis, Dampfkonzentrationen in DW2, zeitliche Verläufe Experiment und COCOSYS-Rechnung

Die experimentellen Atmosphärentemperaturen bleiben in oberen Bereich von DW1 bis 3000 s in etwa konstant und steigen danach an. Dies wird von COCOSYS gut vorhergesagt (Abb. 1-49). Unterhalb der Dampfeinspeisestelle bleiben die experimentellen Temperaturen bis 4000 s auch etwa konstant, sinken dann schnell um 5 °C um danach langsam wieder anzusteigen. Die COCOSYS-Rechnung stimmt bis 4000 s gut mit dem Experiment überein, sagt aber das darauffolgende Absinken der Temperatur nicht voraus. Ein ähnliches Verhalten zeigen das Experiment und die Rechnung jeweils auch für DW2 (Abb. 1-50).

Das vertikale Profil der Dampfkonzentration in DW2 am Ende zeigt die hohen Dampfkonzentrationen im oberen Behälterbereich und einen steilen Abfall an der Unterkante des Verbindungsrohrs zwischen DW1 und DW2. Dies wird von COCOSYS gut vorhergesagt.

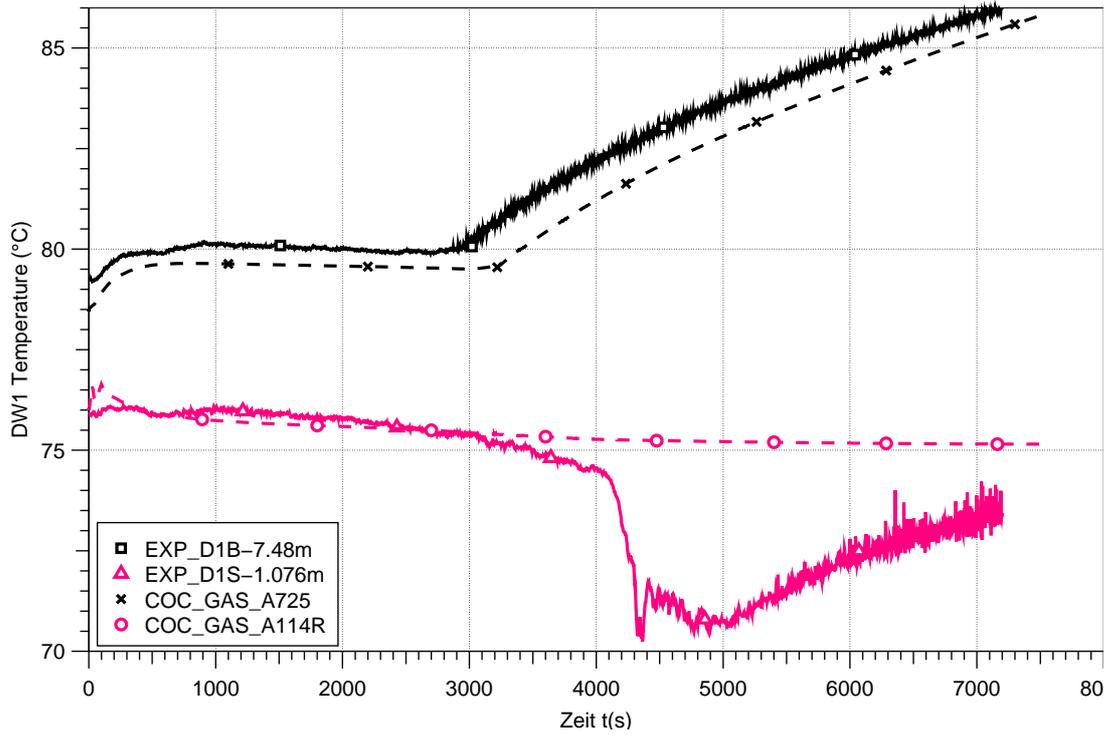


Abb. 1-49 Panda SETH T9bis, Atmosphärentemperaturen in DW1, zeitliche Verläufe Experiment und COCOSYS-Rechnung

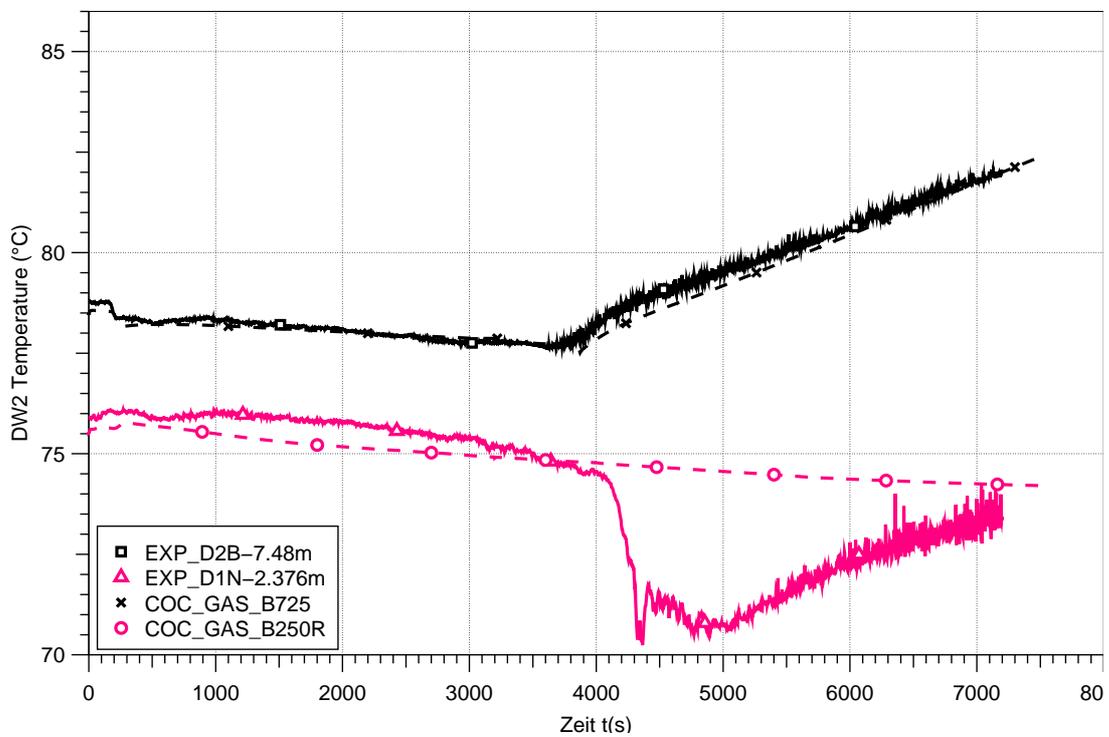


Abb. 1-50 Panda SETH T9bis, Atmosphärentemperaturen in DW2, zeitliche Verläufe Experiment und COCOSYS-Rechnung

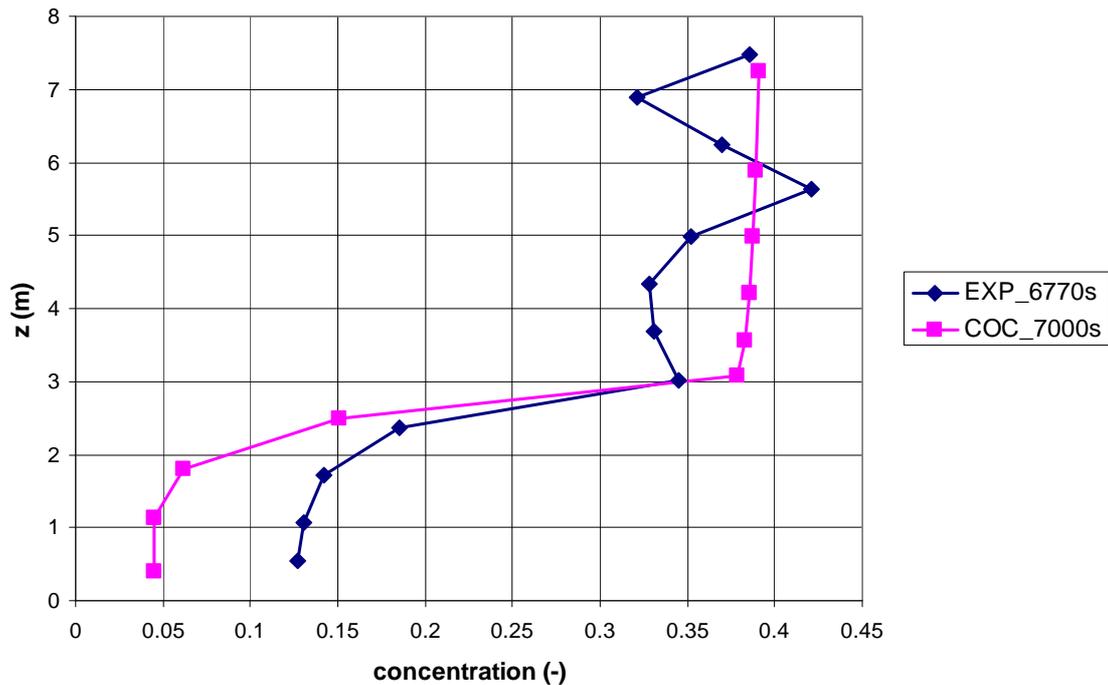


Abb. 1-51 Panda SETH T9bis, Dampfkonzentrationen in DW2 , vertikales Profil bei etwa 7000 s, Experiment und COCOSYS-Rechnung

Interpretation der Ergebnisse

Der eingespeiste Dampf steigt in DW1 plumeförmig nach oben folglich steigen die Dampfkonzentrationen oberhalb der Einspeisestelle an. Ferner bildet sich eine Naturkonvektion aus, die den Bereich oberhalb der Einspeisestelle gut vermischt. In den darunterliegenden Bereich hingegen gelangt wenig Dampf.

Die dampfreiche Atmosphäre gelangt über das Verbindungsrohr in DW2. Dort steigt sie ebenfalls plumeförmig nach oben und eine Naturkonvektion durchmischt den Bereich oberhalb der Unterkante des Einspeiserohrs. Auch in DW2 gelangt wenig Dampf in die unteren Bereiche. Die COCOSYS Plume-Modellierung sagt diese Vorgänge sowohl für DW1 wie auch für DW2 gut voraus.

Abb. 1-53 verdeutlicht die Wirkungsweise des Modells. Der Massenstrom im Plume nimmt aufgrund des Atmosphärenmittresses mit zunehmender Höhe zu. Des Weiteren ist zu Beginn des Experiments ist Plumemassenstrom höher als gegen Ende, da zu Beginn der Dichteunterschied zwischen der Atmosphäre im Plume und im restlichen Versuchsbehälter und somit der Auftrieb größer als gegen Ende ist.

Die Abweichungen der gerechneten zu den experimentellen Ergebnissen nach etwa 4000 s in den unteren Behälterbereichen stehen nach den bisherigen Erkenntnissen nicht im Zusammenhang mit der Plumemodellierung. Dies wird hier kurz für DW1 erläutert, wobei zuerst der obere Behälterbereich betrachtet wird. Der eingespeiste Dampf kondensiert zunächst noch nicht an den Wänden, da sein Partialdruck noch zu niedrig ist und somit seine Sättigungstemperatur unterhalb der Wandtemperatur liegt (Abb. 1-52). Bei etwa 3000 s übersteigt die Sättigungstemperatur die Wandtemperatur. Dampfkondensation setzt ein und folglich steigt die Wandtemperatur wegen des starken Wärmeintrags. Die Atmosphärentemperatur ist jetzt gleich der Sättigungstemperatur und steigt, gekoppelt durch den Wärmeübergang parallel zur Wandtemperatur. Nun tropft Kondensat in die unteren Behälterbereiche. Dessen Verdunstung entzieht dort einerseits der Atmosphäre Wärme und kühlt sie ab (Abb. 1-40 und 1-50) /PAL 2005/, andererseits erhöht sie die Dampfkonzentration. Dieser Vorgang wird nicht in der COCOSYS-Rechnung simuliert.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die experimentelle Atmosphärenschiebung gut von COCOSYS vorausgesagt wird und somit die Plumemodellierung an einem weiteren Experiment validiert wurde. Abweichungen zum Experiment sind nach den bisherigen Erkenntnissen auf die Modellierung der Verdunstung zurückzuführen.

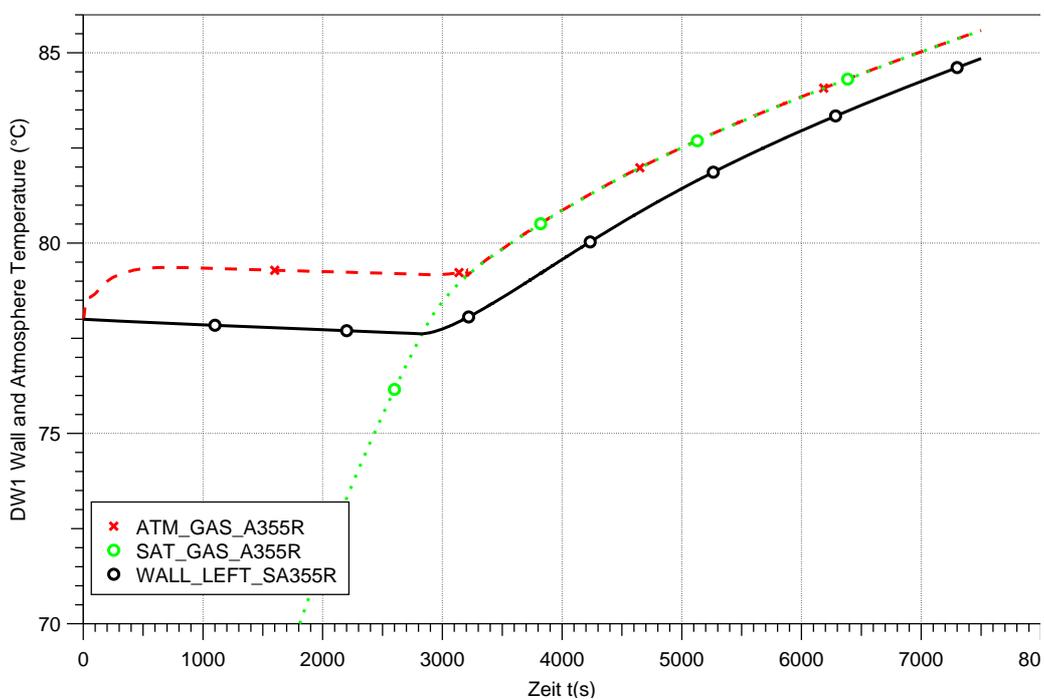


Abb. 1-52 Panda SETH T9bis, Atmosphären-, Wand- und Sättigungstemperatur, COCOSYS-Rechnung

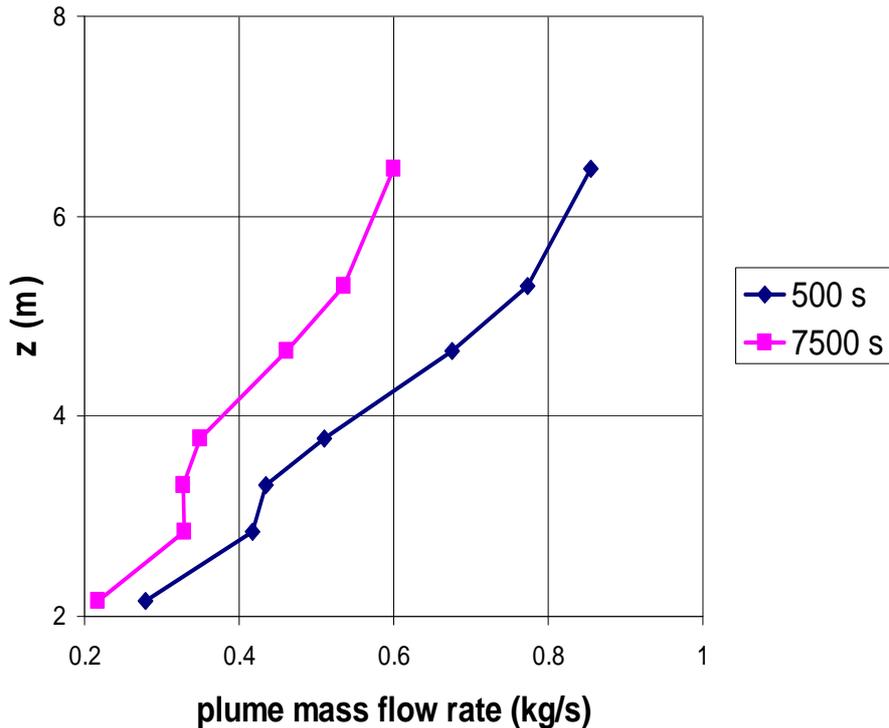


Abb. 1-53 Panda SETH T9bis, vertikales Profil der Massenstromrate im Plume bei 500 und 7500 s, COCOSYS-Rechnung

1.4 Validierung der Öl- und Kabelbrandmodellierung

In den bereits abgeschlossenen Vorhaben RS 1099 und RS 1139 wurde das Pyrolysemodell aus CRDLOC übernommen und weiterentwickelt. In diesem Modell soll auch die Möglichkeit geschaffen werden, die Pyrolyserate aufgrund der vorhandenen thermodynamischen Randbedingungen zu berechnen. Da die Wechselwirkungen gerade bei Bränden sehr stark sind (positive Rückkopplung) ist die Modellierung solcher Brände relativ schwierig. Da zu diesem Zeitpunkt das detaillierte Pyrolysemodell zum Kabelbrand noch nicht vollständig ist, wurde hier zunächst das so genannte "einfache Kabelbrandmodell" verwendet.

Zur Validierung/Testen des "einfachen Kabelbrandmodells" wurden die HDR Versuche E42.1 und E42.2 ausgewählt. Diese Versuche werden im Rahmen des Regressions-testens wiederholt und wurden daher entsprechend separat dokumentiert /COC 06, COC 06a/.

Für die Nachrechnung wurde ein 120 Zonen Datensatz erstellt. Da für die Kabelbrände aufgrund der Dioxinproblematik nur der Brandraum 1502 und der daran anschließende Flur verwendet worden ist, wird auch nur dieser Raumbereich bei der vergleichenden Analyse zwischen Experiment und Rechnung betrachtet. Die Nodalierung ist in Abb. 1-54 dargestellt. 3D-Informationen werden in diesem Datensatz noch nicht verwendet, so dass die Berechnung von Viewfaktoren noch nicht möglich war. In dieser Nodalisierung werden durchgehend 5 Ebenen für die Zonen verwendet, um eine mögliche Gegenströmung durch die Tür und eine Temperaturschichtung berechnen zu können. Für beide Nachrechnungen wurden die gleichen Eingabe-Parameter verwendet.

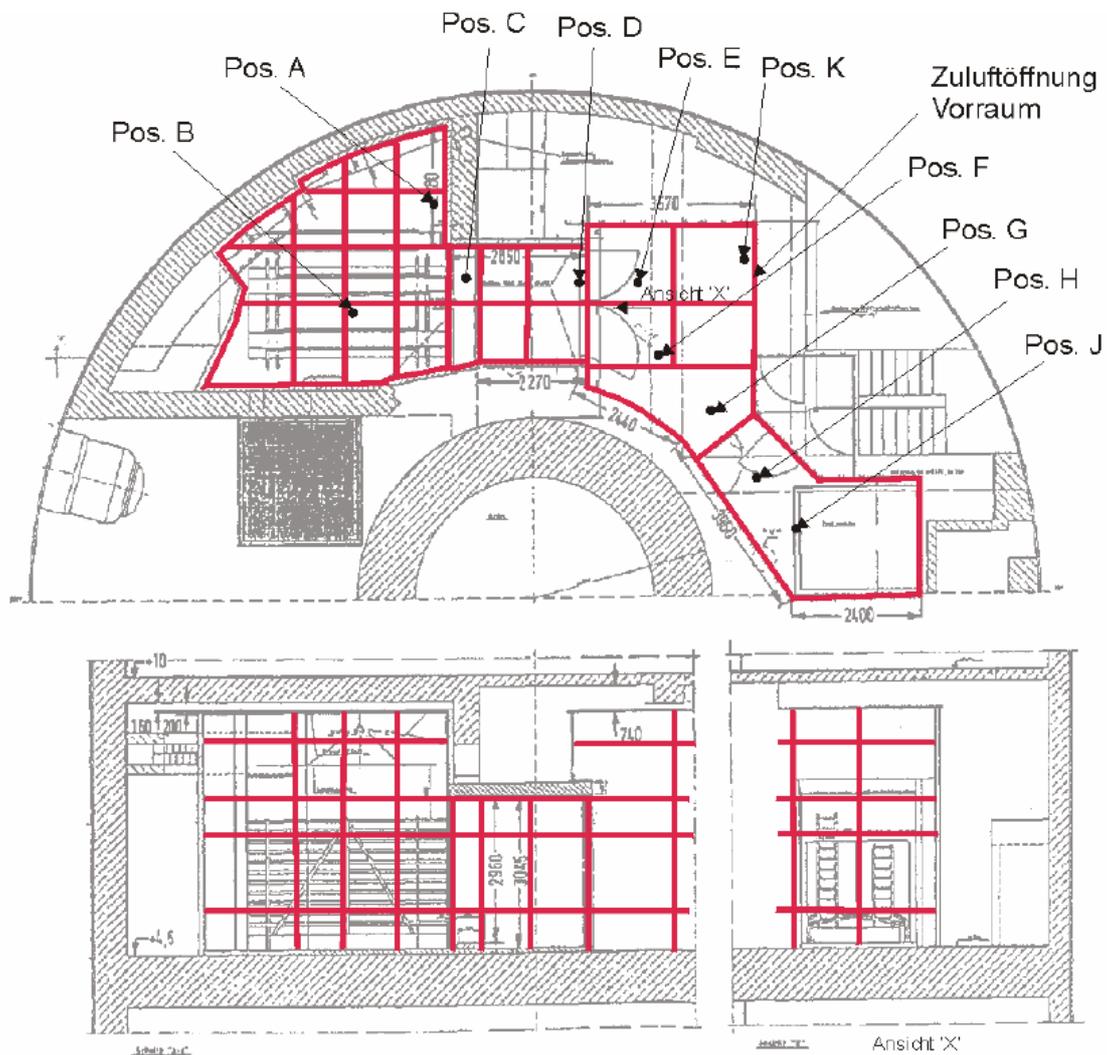


Abb. 1-54 Nodalisierung für HDR E42 Versuche

Für die E42.1 Rechnung mussten die Kabelmassen reduziert werden, da aufgrund der relativ niedrigen Temperaturen im Brandraum der Abbrand nicht vollständig war. Ansonsten werden gute Ergebnisse erzielt. Als Beispiel wird ein Vergleich der Brandraumtemperaturen gezeigt (Abb. 1-55).

Die Nachrechnung des Versuchs E42.2 ist erheblich schwieriger. Da in diesem Versuch 5 Kabeltrassen angezündet wurde und durch die Ablenkung der Flammen aufgrund der Zuluft der Brand umgelenkt wurde, steigen die Temperaturen im Brandraum erheblich schneller an. Weiterhin sprang die linke Brandraumtüre auf, so dass die Zuluftbedingungen nicht genau bekannt sind. Unsicherheiten entstanden auch durch den Abbrand von mit Isoliermaterial abgedeckten Kabeltrassen.

Insgesamt sind daher die Abweichungen zwischen Rechnung und Experiment erheblich höher. Die stagnierende Phase zwischen ca. 300 und 480 s konnte mit dem einfachen Kabelbrandmodell nicht berechnet werden. Mit der Version COCOSYS V2.3v4 konnte das Verhalten während der Sprühphase noch nicht erfolgreich gerechnet werden. Dies wurde in der aktuellen Entwicklerversion aber bereits verbessert.

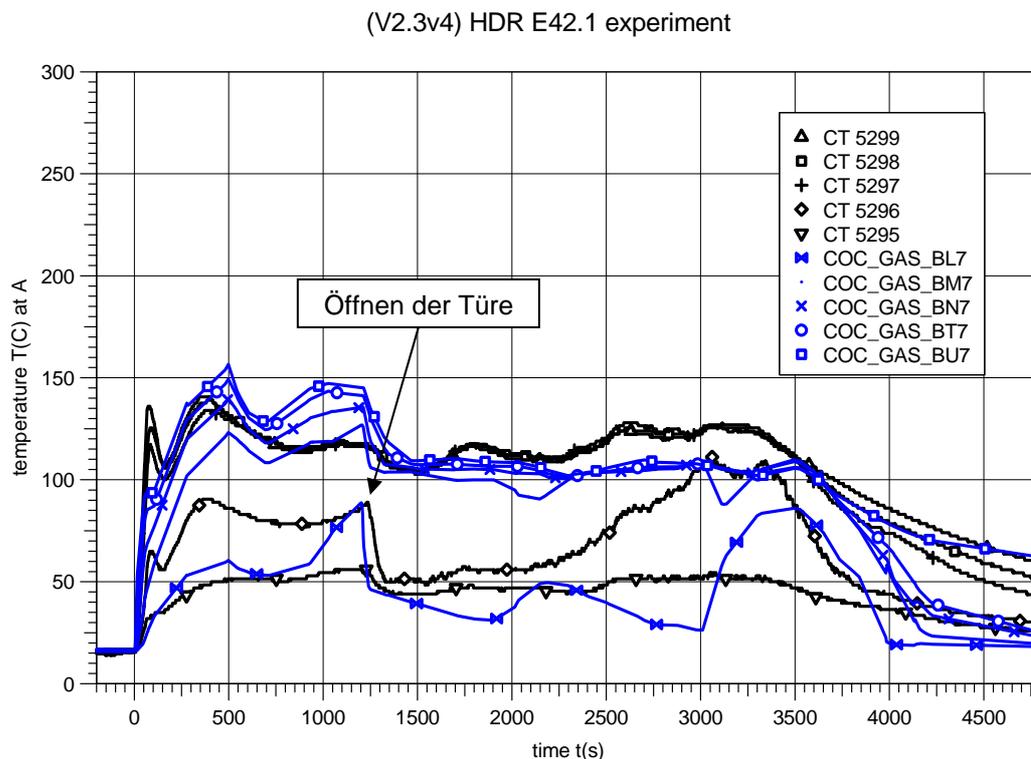


Abb. 1-55 Vergleich der Brandraumtemperaturen (Pos. A) für E42.1

(V2.3v4) HDR E42.2 experiment

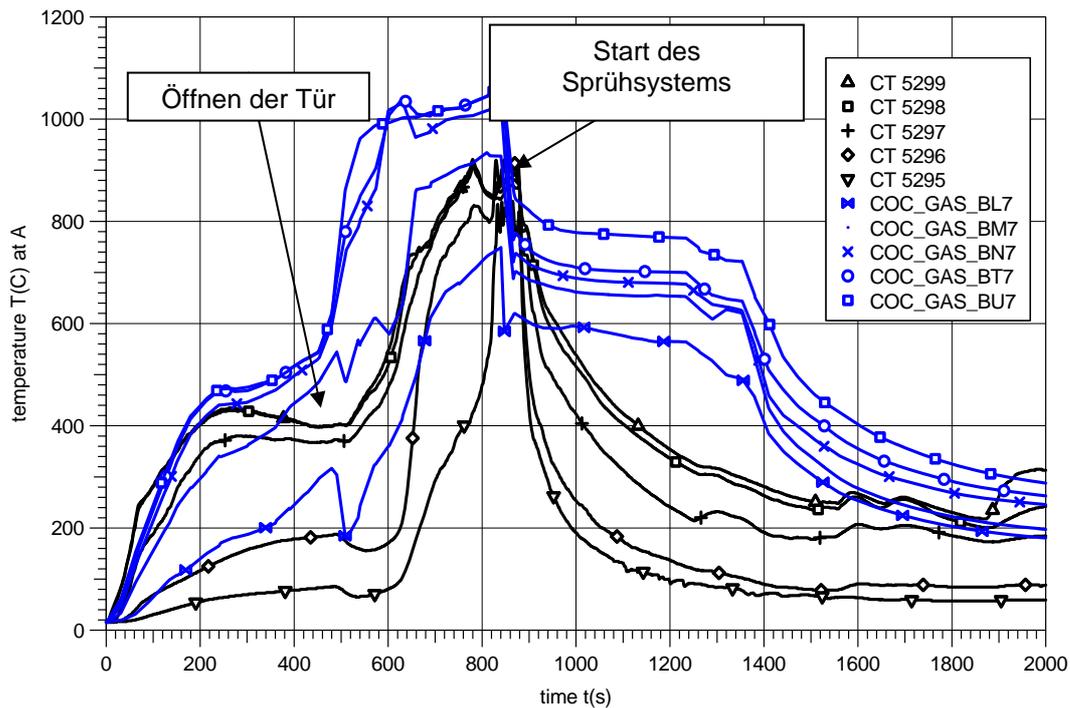


Abb. 1-56 Vergleich der Brandraumtemperaturen (Pos. A) für E42.2

1.5 Teilnahme an internationalen Standardproblemen (ISP)

Vor allem im Rahmen der OECD werden eine Reihe interessanter Aktivitäten zu verschiedenen Fragen der gesamten Reaktorsicherheit durchgeführt. Im Bereich 'Schwere Störfälle' sind dies mit direktem Bezug zur Code-Validierung vor allem die Internationalen Standard-Probleme (ISP), aber auch die analytischen Aktivitäten im Zusammenhang mit experimentellen Projekten.

Im Zuge dieses Vorhabens nahm die GRS teil an der letzten Phase des ISP-41 (je 2 Versuche zum Jodverhalten, die in der kanadischen RTF- bzw. in der französischen CAIMAN-Versuchsanlage durchgeführt wurden), dem ISP-46 (PHEBUS-FPT1) und dem ISP-47 (je ein Thermohydraulikversuch der französischen TOSQAN- und MISTRA-Versuchsanlagen und ein Versuch der deutschen ThAI-Versuchsanlage). An analytischen Aktivitäten im Zusammenhang mit experimentellen Projekten beteiligte sich die GRS an der Voraus- und Nachrechnung des Schmelze-Beton-Wechselwirkungsversuches CCI-2 des OECD-MCCI-Projektes und an der 'blinden' Rechnung zum PANDA-Versuch 9bis des OECD-SETH-Projektes zur 'plume'-Problematik. An allen diesen Aktivitäten nahm die GRS mit COCOSYS (bzw. Teilmodellen) teil, darüber

hinaus an den ISP-46 und -47 sowie dem CCI-2 Versuch auch mit ASTEC (bzw. Teilmodellen).

Alle diese Aktivitäten sind in diesem Bericht in den jeweiligen Fachkapiteln dokumentiert. Ausnahmen davon bilden das ISP-41 über das im Fachbericht /WEG 05/ berichtet wird, und das ISP-47, das hier wegen seiner herausragenden Bedeutung separat dokumentiert ist. Auf die ASTEC-CPA spezifischen Ergebnisse wird in Kap. 4.2.4 eingegangen.

1.5.1 Internationales Standard Problem ISP-47

Im Internationalen Standard Problem ISP-47 sollten die Fähigkeiten von Lumped Parameter (LP) Codes und Computational Fluid Dynamic (CFD) Codes bezüglich der Containment Thermohydraulik überprüft werden. Eine besondere Rolle spielt dabei die Wasserstoffverteilung im Containment bei schweren Störfällen.

Entsprechend den Empfehlungen des state-of-the-art report (SOAR) /SOA 99/ on 'Containment Thermalhydraulics and Hydrogen Distribution' liegen den ISP-47 Experimenten in verschiedenen sich ergänzenden Anlagen zugrunde. Das ISP-47 ist in zwei Schritte (Steps) unterteilt.

Zu Step 1 wurden Versuche in den französischen Anlagen TOSQAN mit einem Volumen von 7 m³ und MISTRA (100 m³) durchgeführt. Hierbei handelt es sich um "separate effect tests" mit einfacher Geometrie und kontrollierten Wandtemperaturen. Eingespeist wurden Dampf und Helium, die als Freistrahler oder Plume in den Versuchsbehältern aufstiegen. Messtechnisch erfasst sind vor allem Geschwindigkeits- und Temperaturprofile. Diese Daten eignen sich insbesondere zur Validierung von CFD – Modellen. Die Computerrechnungen zu TOSQAN waren offen, zu MISTRA blind.

Step 2 liegt ein Versuch in der deutschen ThAI Anlage zugrunde. In eine Mehrraumgeometrie wurden an wechselnden Position Helium und Dampf eingespeist und somit Atmosphärensichtungen aufgebaut und teilweise wieder aufgelöst. Die Wandtemperaturen änderten sich im Gegensatz zu Step 1 aufgrund des Wärmeaustausches mit der Atmosphäre. Gemessen unter anderem wurden Temperatur und Heliumkonzentrationsverteilungen, Atmosphärgeschwindigkeiten und Nebelkonzentrationen. Die Teilnehmer des ISP47 hatten die Möglichkeit drei Rechnungen einzusenden (1) komplett blind, (2) teilweise blind und (3) offen.

Die meisten Institutionen der OECD Mitgliedsstaaten, sowie Computerprogramme, die sich mit Containment - Thermohydraulik befassen nahmen am ISP47 teil.

1.5.1.1 Step 1 TOSQAN and MISTRA

TOSQAN

TOSQAN-Experiment

TOSQAN besteht aus einem Stahlzylinder mit einem speziellen Sumpfvolumen (Abb. 1-57). Das gesamte Volumen beträgt 7 m^3 . Stahlzylinder hat eine Höhe von 3.9 m und einen Innendurchmesser von 1.5 m. Die Höhe des Sumpfes beträgt 0.9 m und sein Innendurchmesser 0.7 m. Die Wände werden thermisch kontrolliert. Dabei bilden der obere und untere Teil des Behälters, inklusive Sumpf, die so genannte "heiße Zone", während der Mittelteil die Kondensationszone ist.

TOSQAN vessel

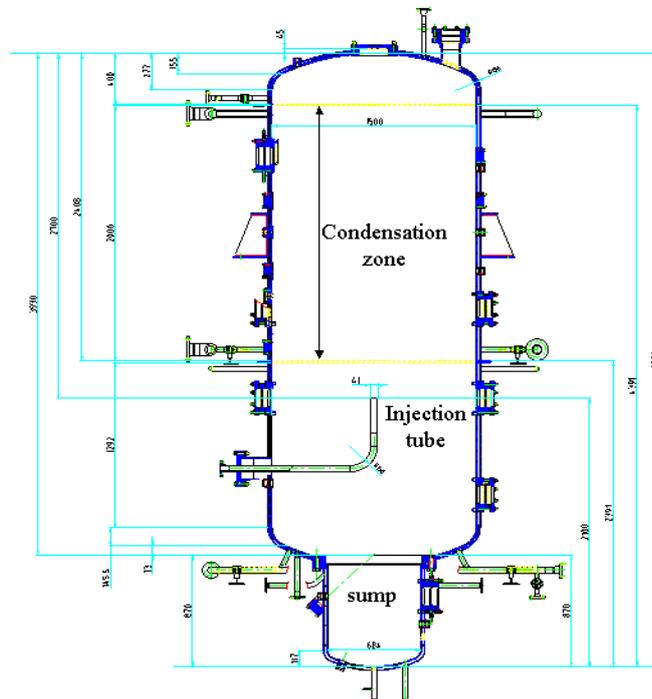


Abb. 1-57 TOSQAN Versuchsbehälter

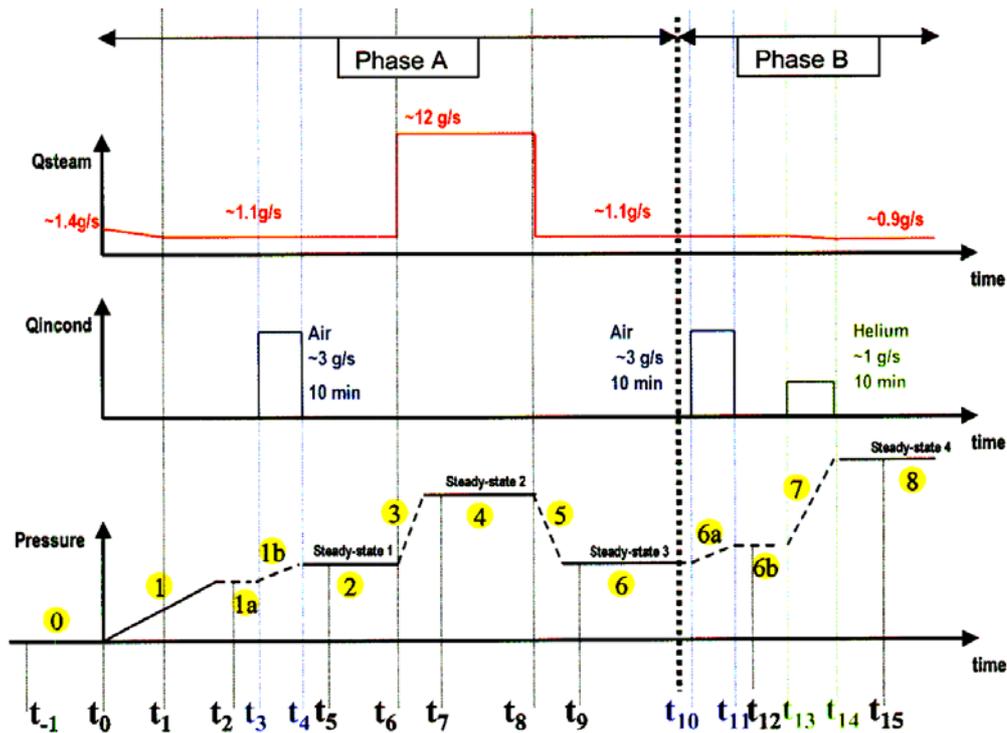


Abb. 1-58 Fahrweise des TOSQAN-Versuches

Der TOSQAN-Versuch bestand aus einer Folge von transienten und stationären Zuständen (Abb. 1-58). In der Höhe von 2.1 m wurde in einem vertikalen nach oben gerichteten Freistrahldampf und in kurzen Perioden Luft und Helium eingespeist. Tab. 1-5 gibt einen Überblick über die Dampfeinspeiseraten und -temperaturen sowie die Wandtemperaturen in den verschiedenen experimentellen Phasen.

Tab. 1-5 Randbedingungen TOSQAN-Versuchs

Dampfeinspeiserate (g/s)	1.1	12	0.9
Dampfeinspeisetemperatur (°C) *	126	132	138
Mittlere Wandtemperatur "heiße Zone" oben (°C)	122	122	122
Mittlere Wandtemperatur "heiße Zone" unten (°C)	123.5	123.5	123.5
Mittlere Wandtemperatur Kondensationszone" (°C)	102	108	102

*Die Dampfeinspeisetemperatur ist in etwa die Sättigungstemperatur zum Behälterdruck.

COCOSYS-Nodalisierung zu TOSQAN

In der COCOSYS Nodalisierung zu TOSQAN ist die Behälteratmosphäre in 24 Zonen unterteilt, die 11 vertikale Ebenen bilden (Abb. 1-59). Die Ebenen enthalten maximal 3 radiale Abschnitte, den 'plume'-Bereich, einen "mittleren" sowie einen wandnahen Bereich, mit den Radien 0,1, 0,61 und 0,75 m. Der Sumpf ist in zwei vertikale Ebenen unterteilt, wobei die obere zwei radiale Abschnitte besitzt. Auf diese Weise können auch für die Sumpfatmosphäre sowohl geschichtete, wie durchmischte Atmosphärenzustände berechnet werden.

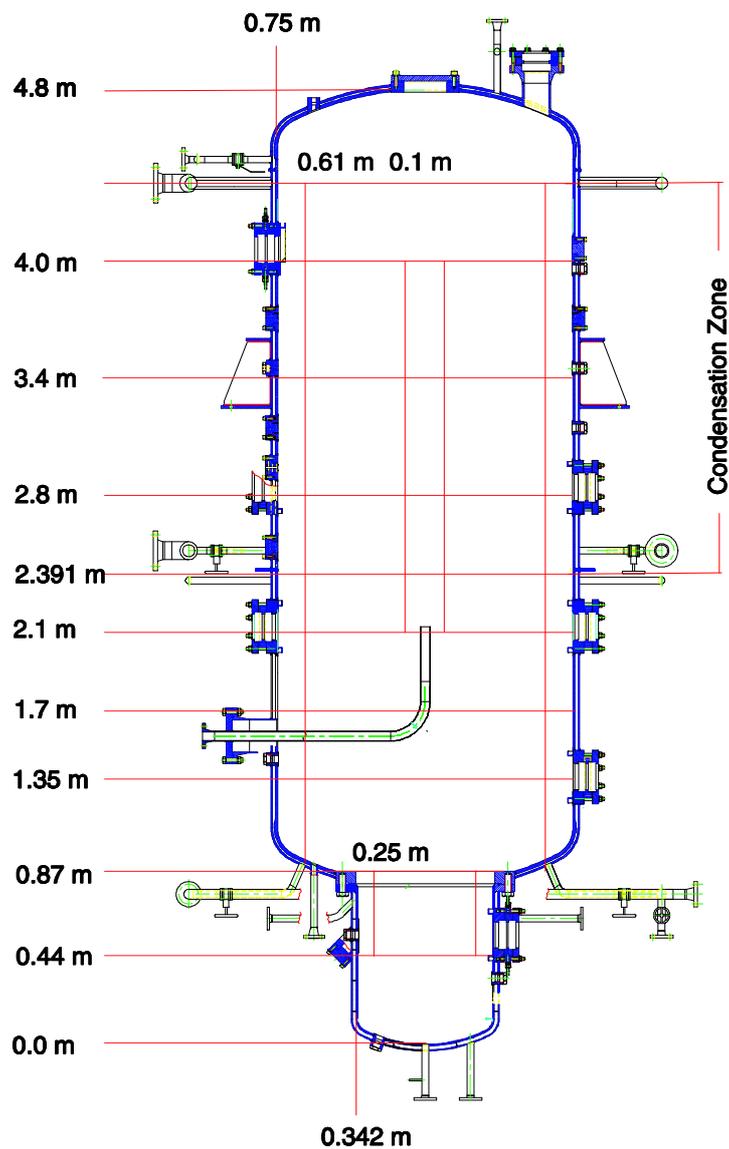


Abb. 1-59 ISP47 COCOSYS Nodalisierung zu TOSQAN

Die Zonen sind entsprechend der Behältergeometrie mit Strömungspfaden verbunden, woraus sich auch die Strömungsflächen berechnen. Die Strömungsverlustbeiwerte wurden mit $K_{\text{form}} = 0.3$ eingegeben.

Die Modellierung von Plumes in einer COCOSYS-Nodalisierung wurde erst während des ISP47 entwickelt. So ist für TOSQAN Rechnung noch nicht die für die ThAI-Rechnung (s. u.) verwendete Modellierung angewandt. Die TOSQAN-Plumezonen bilden einen Zylinder mit einem Radius von 0.1 m. Die Einspeisezone ist durch je einen vertikalen Strömungspfad mit der darüber und der darunter liegenden Zone sowie durch einen horizontalen Pfad mit der sie umhüllenden Zone verbunden.

COCOSYS Ergebnisse zum offenen TOSQAN-Experiment im internationalen Vergleich

Der Atmosphärendruck wurde von fast allen Teilnehmer des ISP47 inklusive COCOSYS gut nachgerechnet. Abb. 1-60 zeigt die Ergebnisse der LP-Codes. Die Abweichungen der CFD-Resultate vom Experiment waren etwas größer als die der LP-Codes (Abb. 1-61).

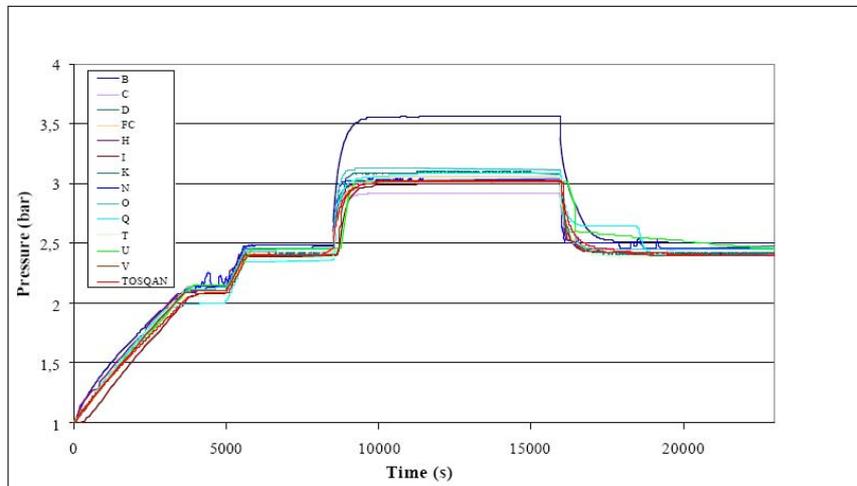


Abb. 1-60 ISP47 Druckverlauf TOSQAN Phase A, Experiment und Lumped Parameter Codes; die COCOSYS-Ergebnisse (Kurve H) sind in diesem Plot nicht zu erkennen, weil sie im Band der überwiegenden Mehrheit der Beiträge liegen

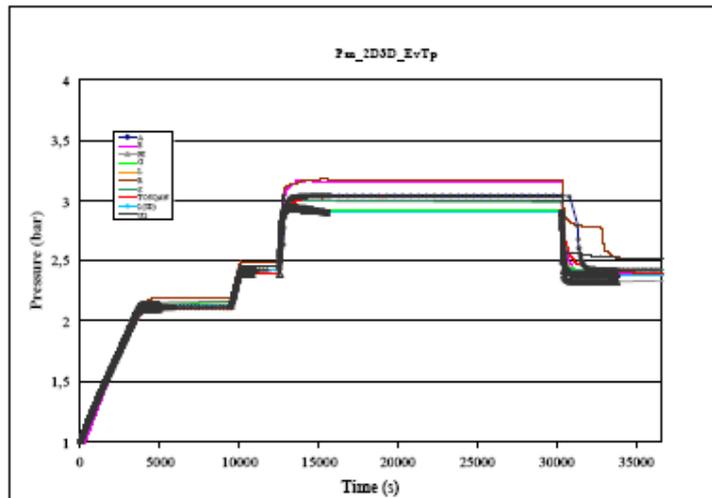


Abb. 1-61 Druckverlauf TOSQAN Phase A, Experiment und CFD-Codes

Im "steady state 1" mit der niedrigen Dampfeinspeiserate von 1.1 g/s zeigt TOSQAN in der "kalten" Zone deutlich niedrigere Atmosphärentemperaturen als in der "heißen" Zone. Dies wird von den meisten Rechnungen nachvollzogen, COCOSYS (s. Kurve H) gibt dies andeutungsweise wieder (Abb. 1-62 und Abb. 1-63). Es wurden allerdings auch keine Anstrengungen unternommen, um die offenen TOSQAN Ergebnisse besser anzunähern.

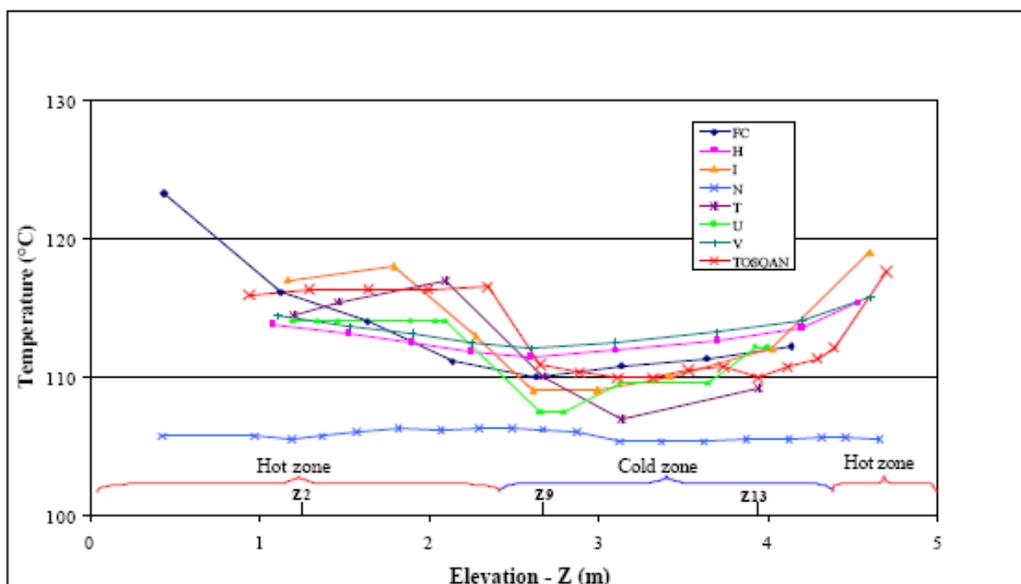


Abb. 1-62 ISP47 TOSQAN steady state 1, vertikales Temperaturprofil in Wandnähe (R1), Experiment und LP – Codes, COCOSYS s. Kurve H

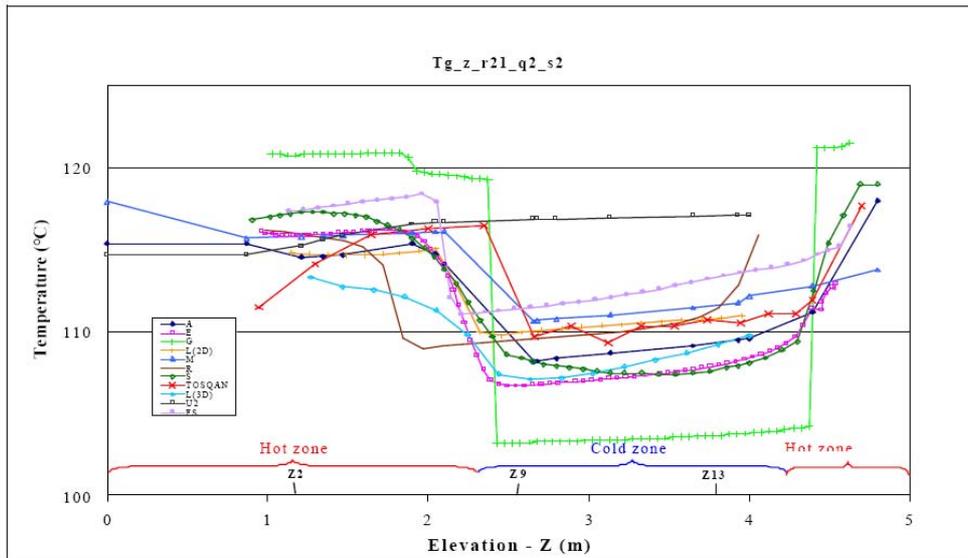


Abb. 1-63 ISP47 TOSQAN steady state 1, vertikales Temperaturprofil in Wandnähe (R21), Experiment und CFD-Codes

Im 2 "steady state 2" mit der höhere Dampfeinspeiserate von 12 g/s ist die Behälteratmosphäre durchmischt, sodass die Temperaturunterschiede zwischen der "kalten" und der "heißen" Zone nicht mehr auftreten. Dies wird von den meisten LP-Codes inklusive COCOSYS gut beschrieben (Abb. 1-64), während die CFD-Codes eher größere Abweichungen zeigen (Abb. 1-65).

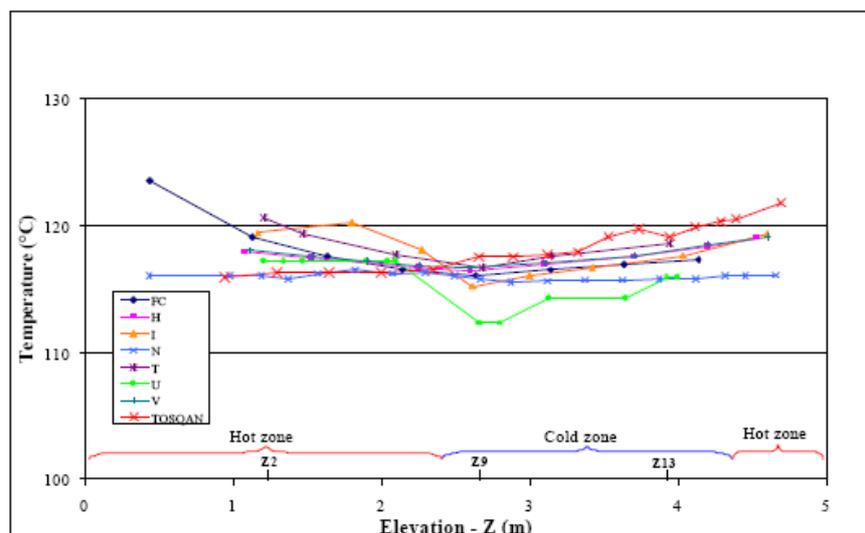


Abb. 1-64 TOSQAN steady state 2, vertikales Temperaturprofil in Wandnähe (R1), Experiment und LP-Codes, COCOSYS s. Kurve H

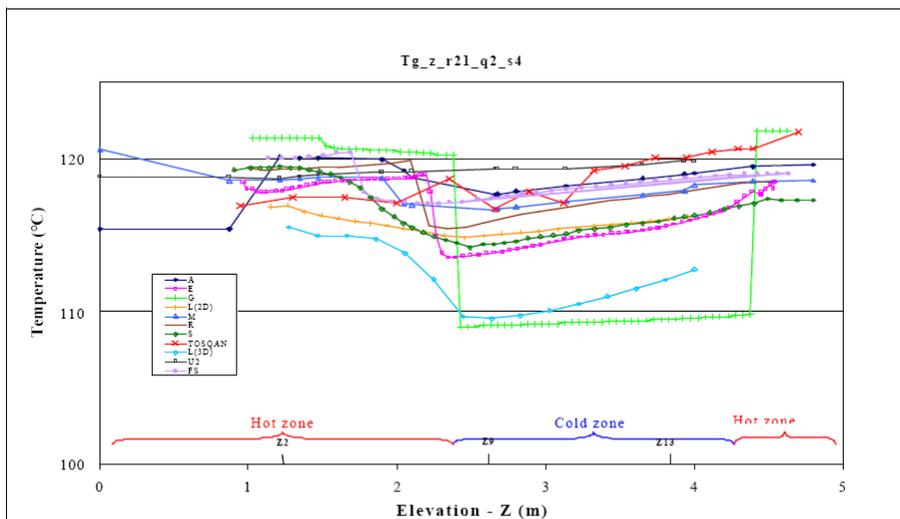


Abb. 1-65 TOSQAN steady state 2, vertikales Temperaturprofil in Wandnähe (R21), Experiment und CFD-Codes

Von dem bei 2.1 m Höhe eingespeistem Helium gelangt im Experiment zunächst nur wenig in den unteren Behälterteil. Erst 2000 s nach Beginn der Heliumeinspeisung steigt die bei 0.87 m, also an die der Oberkante des Sumpfes, gemessene Konzentration schnell auf 20 Vol.-% an, was dem Wert im übrigen Behälter entspricht (Abb. 1-66). In fast allen LP-Rechnungen werden 20 Vol.-% erreicht, jedoch stimmt der zeitliche Verlauf des Anstieges nicht mit dem Experiment überein. Dies trifft auch für COCOSYS (s. Kurve H) zu. Von den CFD-Ergebnissen erreicht nur die Hälfte (drei) 20 Vol.-%, wobei zwei Rechnungen den zeitlichen Verlauf gut nachvollziehen (Abb. 1-67).

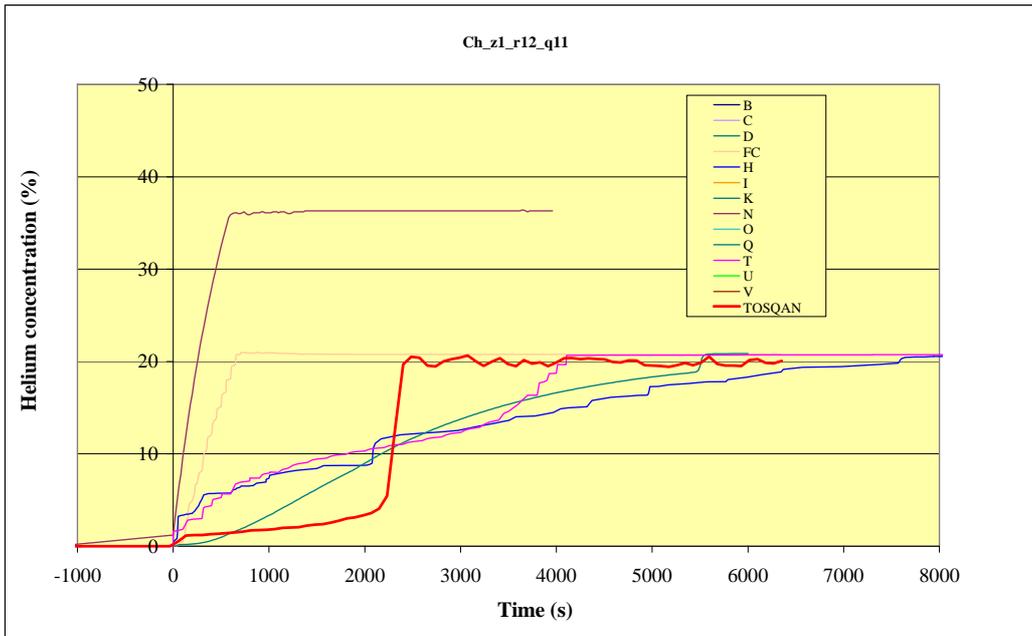


Abb. 1-66 ISP47 TOSQAN Phase B, Helium-Konzentration bei 0.87 m, t = 0 ist Beginn der He-Einspeisung, Experiment und LP-Codes, COCOSYS-Ergebnisse (H)

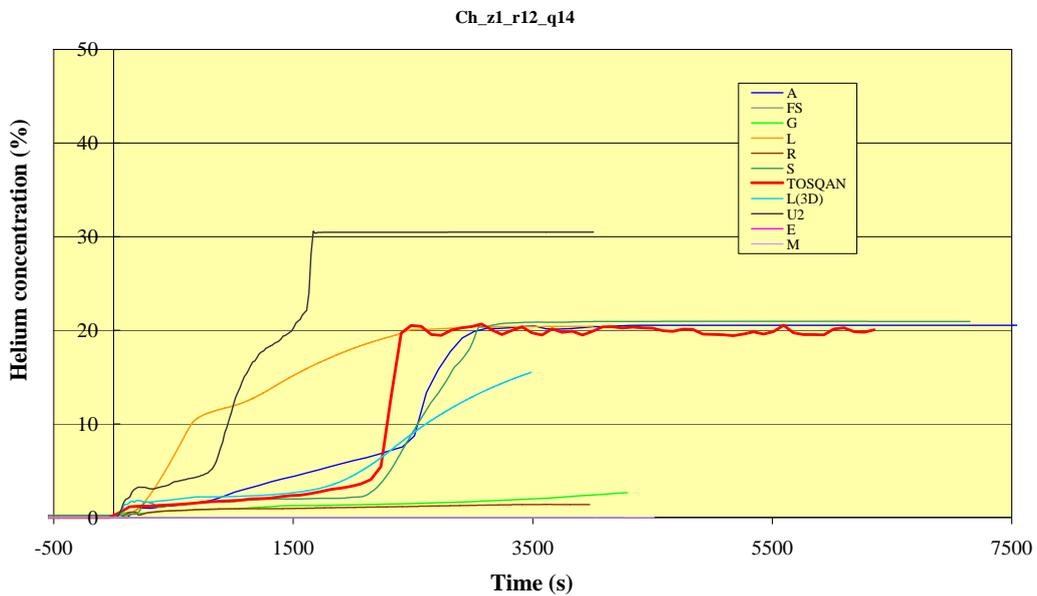


Abb. 1-67 ISP47 TOSQAN Phase B, Helium-Konzentration bei 0.87 m, t = 0 ist Beginn der He-Einspeisung, Experiment und CFD-Codes

MISTRA

MISTRA-Experiment

MISTRA ist ein Stahlbehälter mit 100 m^3 Volumen, 7.3 m Höhe und einem Innendurchmesser von 4.25 m. An der an der Außenseite befinden sich fünf Flansche (Abb. 1-68) die die Isolation von 0.2 m Steinwolle beeinträchtigen (s. unten Wärmeverluste). Innerhalb des Versuchsbehälters befinden sich der obere, der mittlere und der untere Kondensator. Zwischen den Kondensatoren und der Behälterwand befindet sich ein Spalt von 0.2 m Dicke, der sich am oberen und unteren Teil jedes Kondensators auf etwa 0.06 m verengt. Das freie Volumen dieses Spalts beträgt etwa 13 % des Behältervolumens. Atmosphäre kann zwischen Innenraum und Spalt ausgetauscht werden. Da die dem Spalt zugewandte Seite der Kondensatoren mit einer 2 cm dicken Isolierschicht belegt ist, findet Kondensation hauptsächlich an der Behälterinnenseite statt. Die Austrittsöffnung der Einspeisedüse mit einem Durchmesser von 0.2 m befindet sich in der Höhe von 1.285 m.

In der Phase A wird 0.13 kg/s Dampf mit 200 °C eingespeist. Er vermischt sich mit der umgebenden Atmosphäre, steigt plumeförmig auf und sinkt an den Kondensatoren wieder ab. Zu Beginn der Phase B wird dem Dampf für eine halbe Stunde Helium beigemischt. Die Heliumkonzentration steigt auf 29 % (Volumen) an. Nach einigen Stunden bildet sich wieder ein stationärer Zustand aus. An den Kondensatoren, deren Wandtemperaturen während des gesamten Experiments auf 115 °C gehalten werden, kondensiert 87 % des Dampfes. Der Rest kondensiert an den Behälterwänden, Boden und Deckel. Für Wände und Boden ist je ein Wert bekannt, was einer Summe von 38 KW entspricht. Diese hohen Wärmeverluste weisen auf größere Wärmebrücken in der Isolierung hin.

COCOSYS-Nodalisierung von MISTRA

Die COCOSYS Nodalisierung von MISTRA (Abb. 1-69) unterteilt den Versuchsbehälter in 45 Zonen, die 12 Ebenen bilden. Die Ebenen enthalten maximal 4 radiale Abschnitte gemäß Tab. 1-6.

Tab. 1-6 Radiale Aufteilung von MISTRA in der COCOSYS-Nodalisierung

Radius (m)	Bezeichnung
0 – 0.24	plume
0.24 – 1.73	Freier Raum
1.73 – 1.9	Kontakt mit Kondensatoren
1.95 – 2.125	Spalt zwischen Kondensatoren und Außenwand

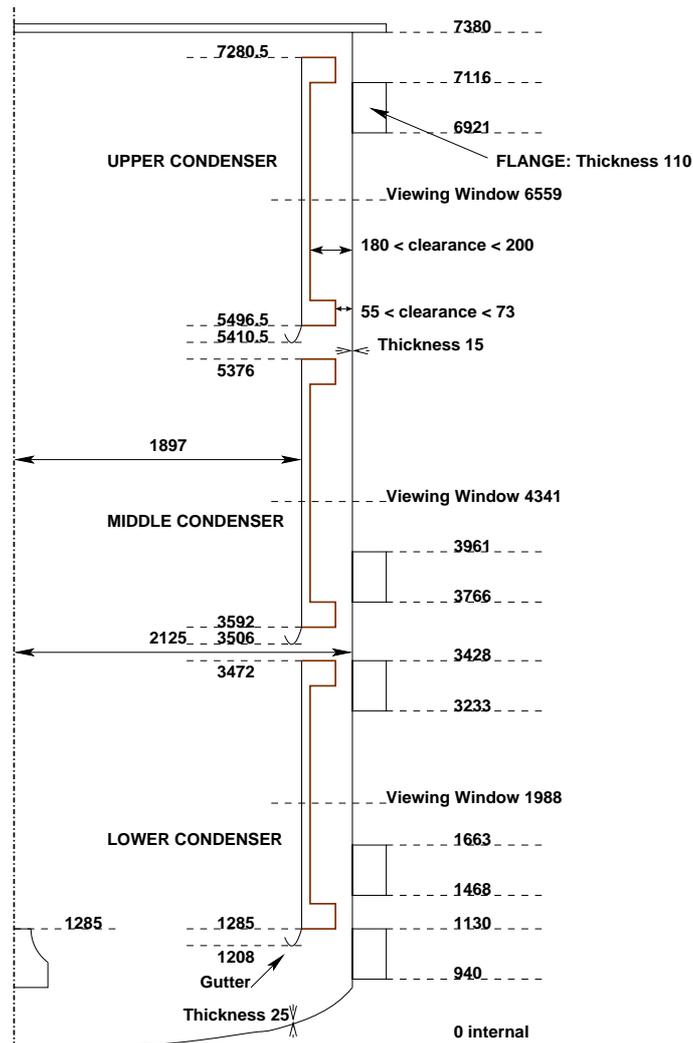


Abb. 1-68 ISP47 MISTRA Versuchsbehälter

Die Zonen sind entsprechend der Behältergeometrie mit Strömungspfaden verbunden, woraus sich auch die Strömungsflächen berechnen. Die Strömungsverlustbeiwerte wurden mit $K_{form} = 0.3$ eingegeben. Für die horizontalen Strömungspfade vom Innenraum zum Spalt bei 7.3, 5.4 und 3.5 m beträgt $K_{form} = 1.0$. Gleiches gilt für die vertika-

len Pfade im Spalt an den Verengungen an den Ober- und Unterseiten der Kondensatoren.

Die Plumezonen sind im prinzipiell wie für TOSQAN modelliert. Sie bilden einen Zylinder mit einem Radius von 0.24 m. Die Einspeisezone ist abweichend vom TOSQAN-Modell mit zwei Zonen abgebildet. Die innere hat nur oben eine Öffnung nach oben, die äußere hat jeweils oben, unten und an der Seite eine Öffnung. Der eingespeiste Dampf wird zu je 50 % auf beide Zonen verteilt. Ab der Höhe von 5.875 m müsste die Geschwindigkeit des aufsteigenden Plume nur noch sehr klein sein, auch sollten die radialen Temperaturdifferenzen ebenfalls gering sein. Deshalb werden hier nur noch zwei radiale Abschnitte, der Innenraum und der Spalt simuliert.

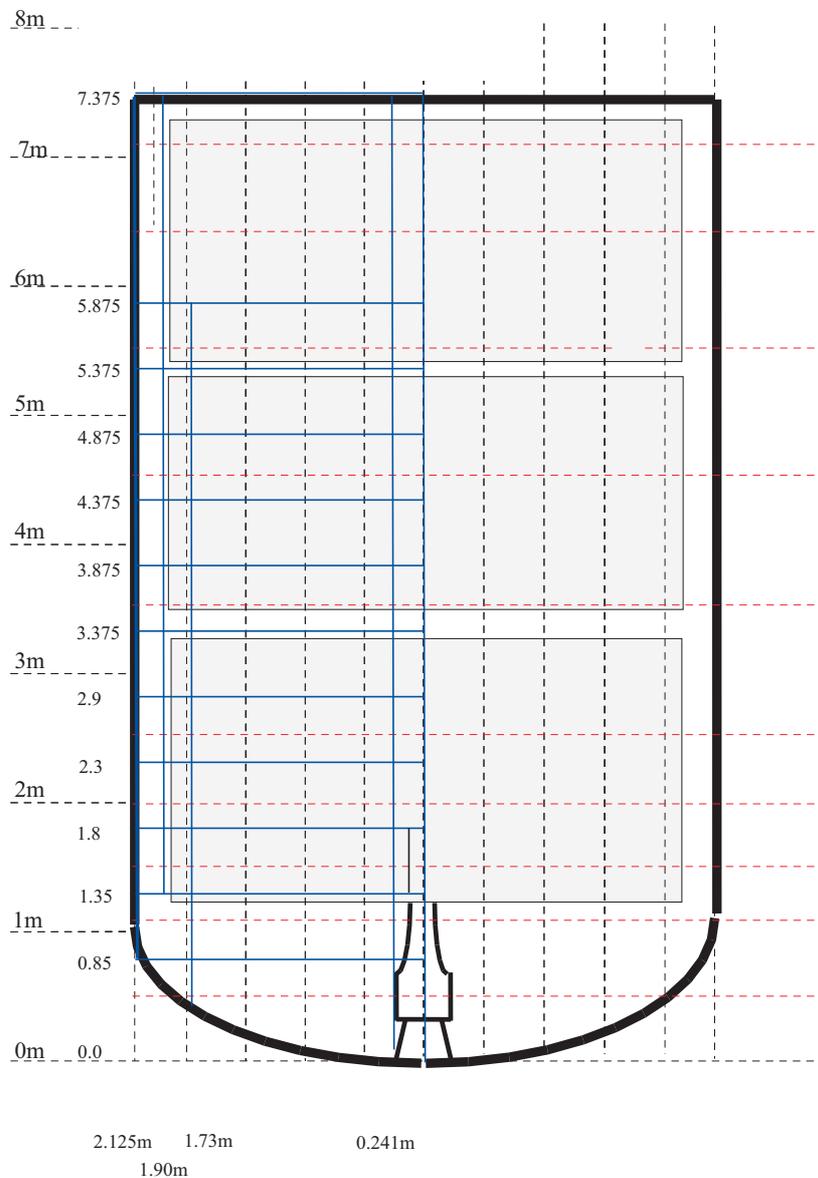


Abb. 1-69 ISP47 COCOSYS-Nodalisierung von MISTRA

Die blinden COCOSYS Ergebnisse zum MISTRA-Experiment im internationalen Vergleich

Es wird nur auf die stationären Zustände des Versuches eingegangen, da sich die Anlage weniger für instationäre Untersuchungen eignet.

COCOSYS (s. participant H) sagt die stationären Atmosphärendrücke der Phasen A und B mit einer Abweichung von nur 0.1 bar voraus und liegt damit gut im Vergleich zu den anderen Rechnungen (Tab. 1-7).

Tab. 1-7 MISTRA stationäre Atmosphärendrücke

	Phase A	Phase B
Participant letter	Total Pressure (bars)	Total Pressure (bars) – Phase A
<i>Experiment</i>	<i>5.388 (29 mbars)</i>	<i>3.309 (29 mbars)</i>
A	5.135	3.435
B	6.934	4.179
C	5.352	3.41
D	5.32	3.52
G	5.06	3.37
H	5.25	3.52
I	5.18	3.325
K	5.10	3.39
L2D	5.194	3.600
L3D	5.224	3.162
M	5.70	3.61
O	5.937	3.753
Q	6.368	3.731
S	5.77	3.47
T	5.0	3.33
U	5.204	3.38
U2	4.899	3.47
V	5.297	3.51
W0D	5.46	3.47
W2D	5.417	3.303
W3D	5.391	3.290

Die stationären Temperaturprofile in der Phase A werden von COCOSYS (s. Kurve H) zusammen mit der GRS-ASTEC-Rechnung (s. V.) von allen LP-Beiträgen am besten vorhergesagt (Abb. 1-70). In der Phase B zeigen auch weitere LP Rechnungen aufgrund von Nodalisierungsverbesserungen vergleichbar gute Ergebnisse (Abb. 1-69 bis Abb. 1-72). Die Prognosefähigkeit von COCOSYS entspricht der der besseren CFD-Codes (Abb. 1-71). Eine Ausnahme bildet der Plumbereich, hier sind CFD-Simulationen überlegen.

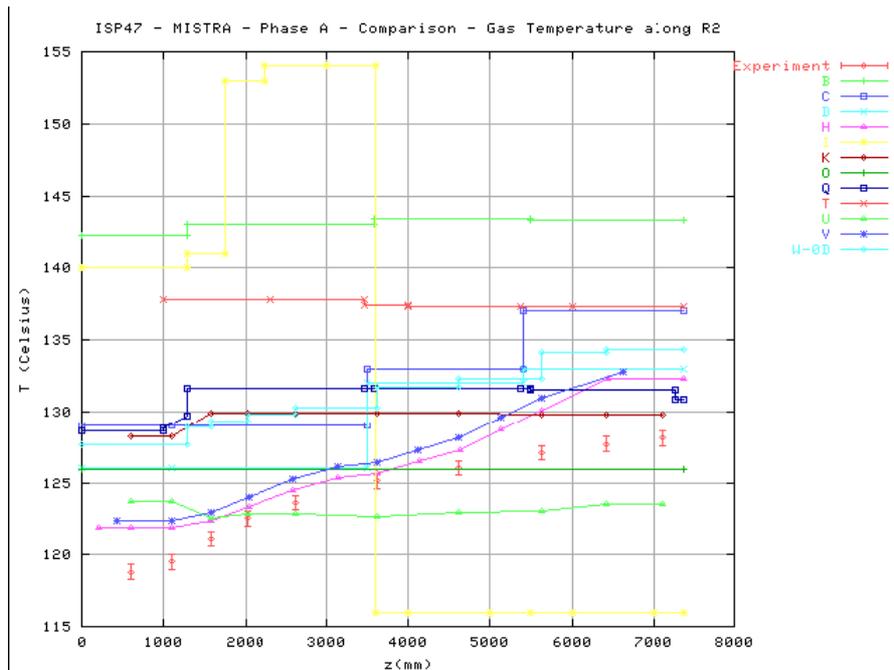


Abb. 1-70 ISP47 MISTRA Phase A, vertikales stationäres Temperaturprofil im Radius 0.95 m, Experiment und LP-Codes, COCOSYS s. Kurve H

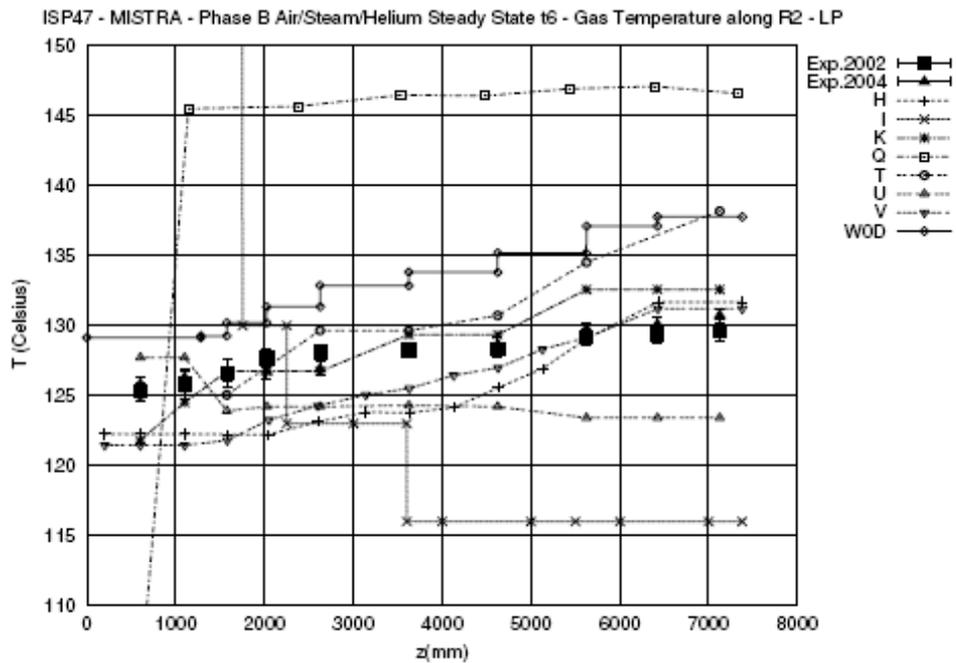


Abb. 1-71 ISP47 MISTRA Phase A, vertikales stationäres Temperaturprofil im Radius 0.95 m, Experiment und CFD-Codes, COCOSYS s. Kurve H

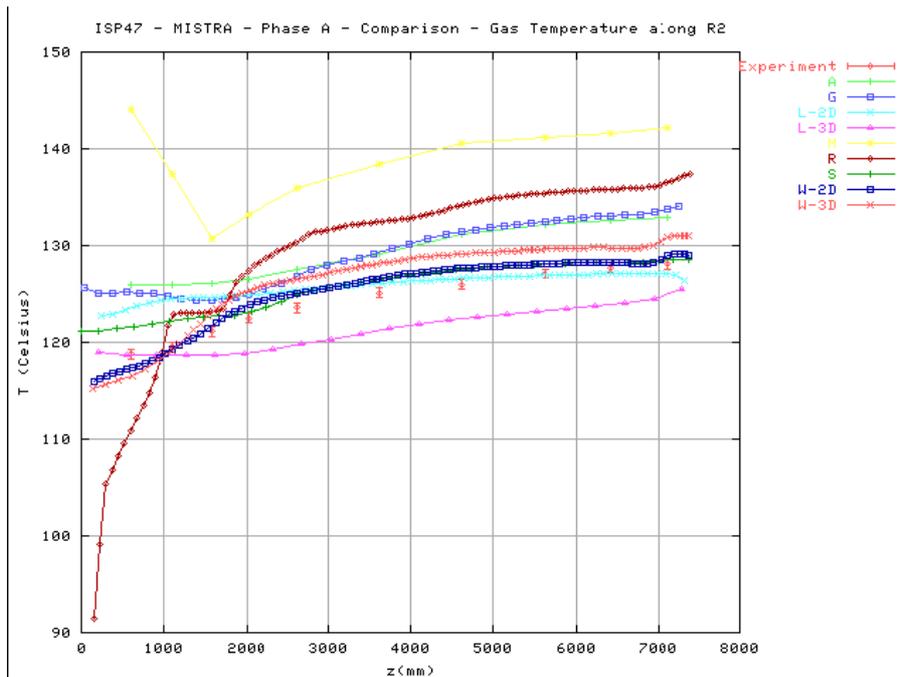


Abb. 1-72 ISP47 MISTRA Phase B, vertikales stationäres Temperaturprofil im Radius 0.95 m, Experiment und LP-Codes, COCOSYS s. Kurve H

Abweichungen bei der Berechnung der Atmosphärentemperaturen haben bei dem MISTRA-Versuch hauptsächlich ihre Ursache in der Berechnung der Überhitzung. Hierin ist COCOSYS mit ASTEC-GRS führend (Abb. 1-73 und Abb. 1-74).

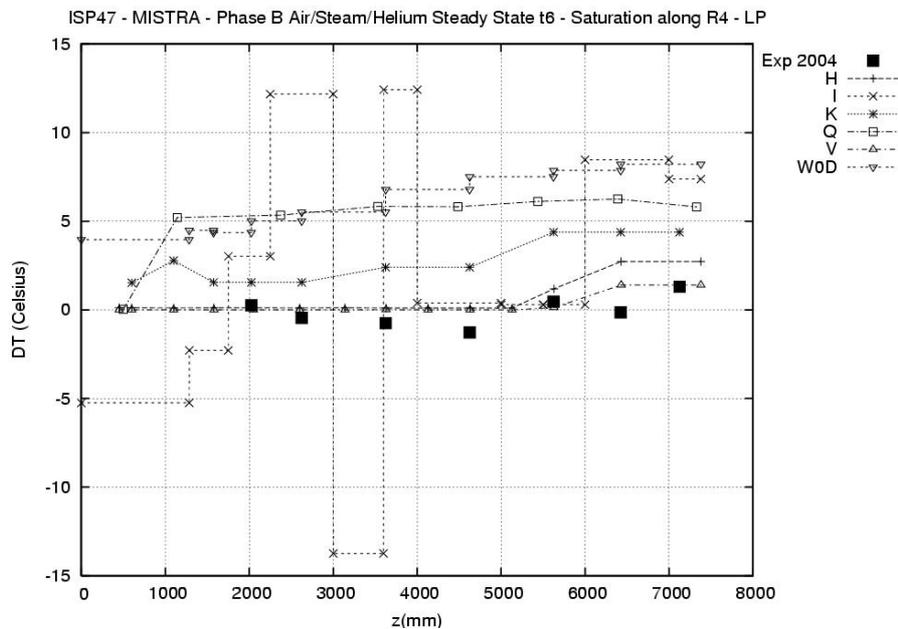


Abb. 1-73 MISTRA Phase B, vertikales stationäres Profil der Atmosphärenüberhitzung im Radius 1.8 m, Experiment und LP-Codes, COCOSYS s. Kurve H

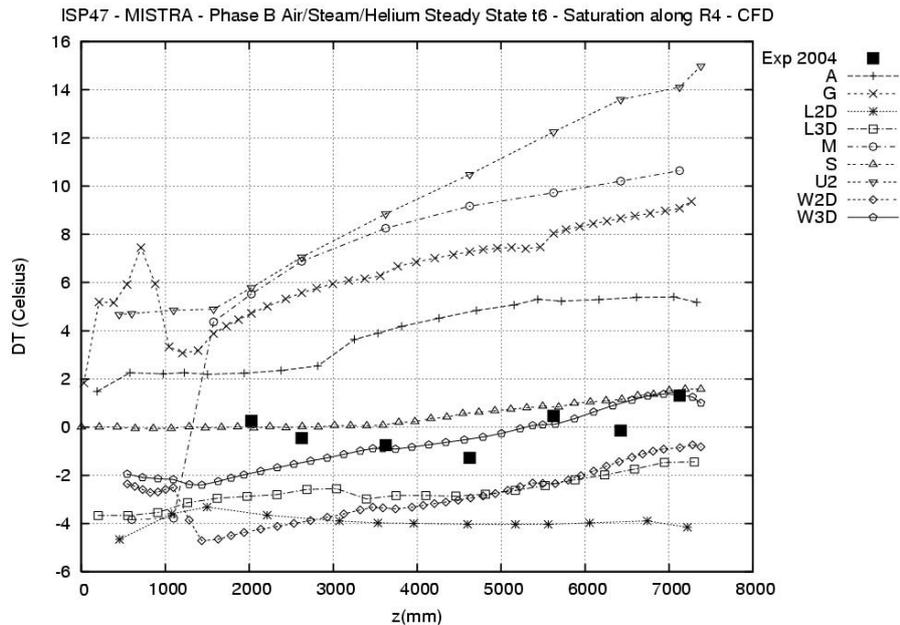


Abb. 1-74 MISTRA Phase B, vertikales stationäres Profil der Atmosphärenüberhitzung im Radius 1.8 m, Experiment und CFD-Codes

Zusammenfassung ISP47 Step 1 – TOSQAN und MISTRA

- Die in TOSQAN und MISTRA durchgeführten Experimente sind insbesondere für die Validierung von CFD-Codes gedacht.
- Für die offenen TOSQAN-Rechnungen wurden seitens GRS keine Anstrengungen unternommen, um die COCOSYS-Rechenergebnisse besser an die Messwerte anzupassen. Sie ragen deshalb nicht aus den Ergebnissen der anderen Teilnehmer heraus
- Die stationären Temperaturverteilungen der blinden GRS-Rechnung mit COCOSYS zu MISTRA entsprechen denen der besseren CFD-Codes.

1.5.1.2 Step 2 ThAI

ThAI-Versuchsanlage

Die in der ThAI Versuchsanlage (Thermohydraulik – Aerosol – Iod) durchgeführten Experimente, sind ein wesentlicher Bestandteil der Validierung von COCOSYS. ThAI wird seit dem Jahr 2001 von Becker Technologies in Eschborn betrieben.

Der Versuchsbehälter (Abb. 1-75 und Abb. 1-76) ist ein Zylinder aus Chromnickelstahl mit einem Innenvolumen von 59.3 m^3 und einer Höhe von 9.2 m. Er enthält standardmäßig als Einbauten einen oben und unten offenen Innenzylinder, sowie einen Zwischenboden, der aus vier Kondensatwannen besteht, die im Ringraum zwischen Innenzylinder und Außenwand angebracht sind und $2/3$ der vertikalen Ringraumströmungsfläche versperren. Mit Hilfe von Blechen können Strömungsflächen verkleinert werden oder es können auch zusätzliche Zwischenböden eingebaut werden. Es besteht auch die Möglichkeit, die Einbauten gänzlich zu entfernen.

Der Versuchsbehälter besitzt drei voneinander unabhängige Kühl- bzw. Heizmäntel, die mit Thermoöl gefüllt sind. Im Bereich der Kühlmäntel hat die Behälterwand eine Stärke von 22 mm. Der Spalt, in dem sich das Thermoöl befindet hat eine Sollstärke von 16.5 mm. Die Stärke der äußeren Begrenzung des Kühlmantels beträgt 6 mm.

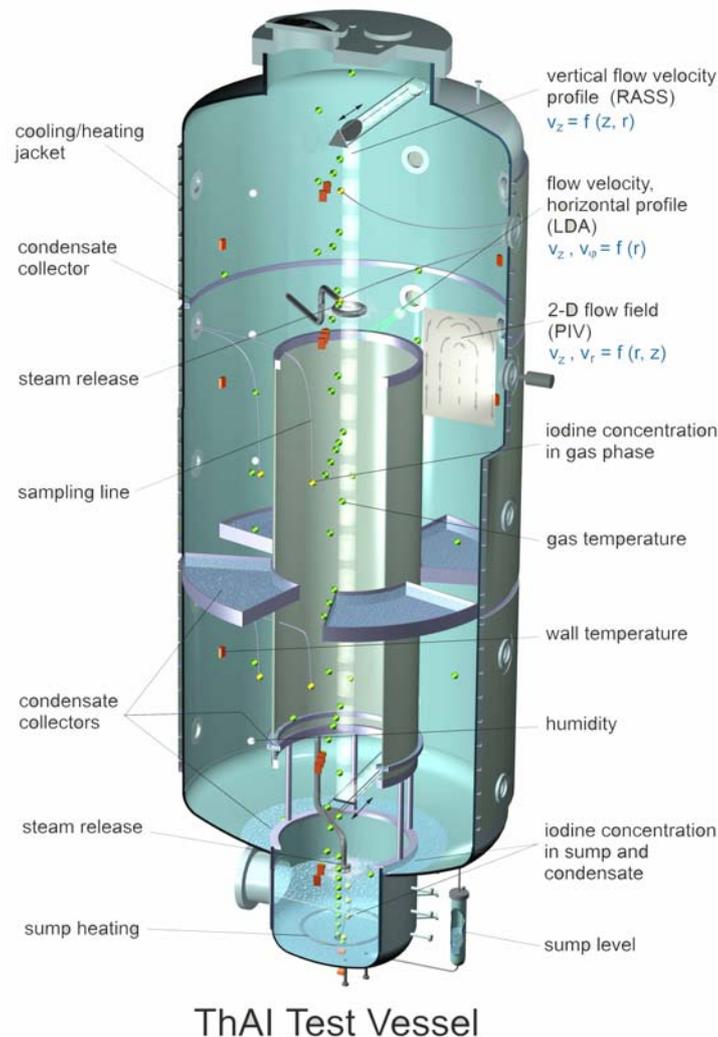


Abb. 1-75 ThAI-Versuchsbehälter, 3D-Ansicht

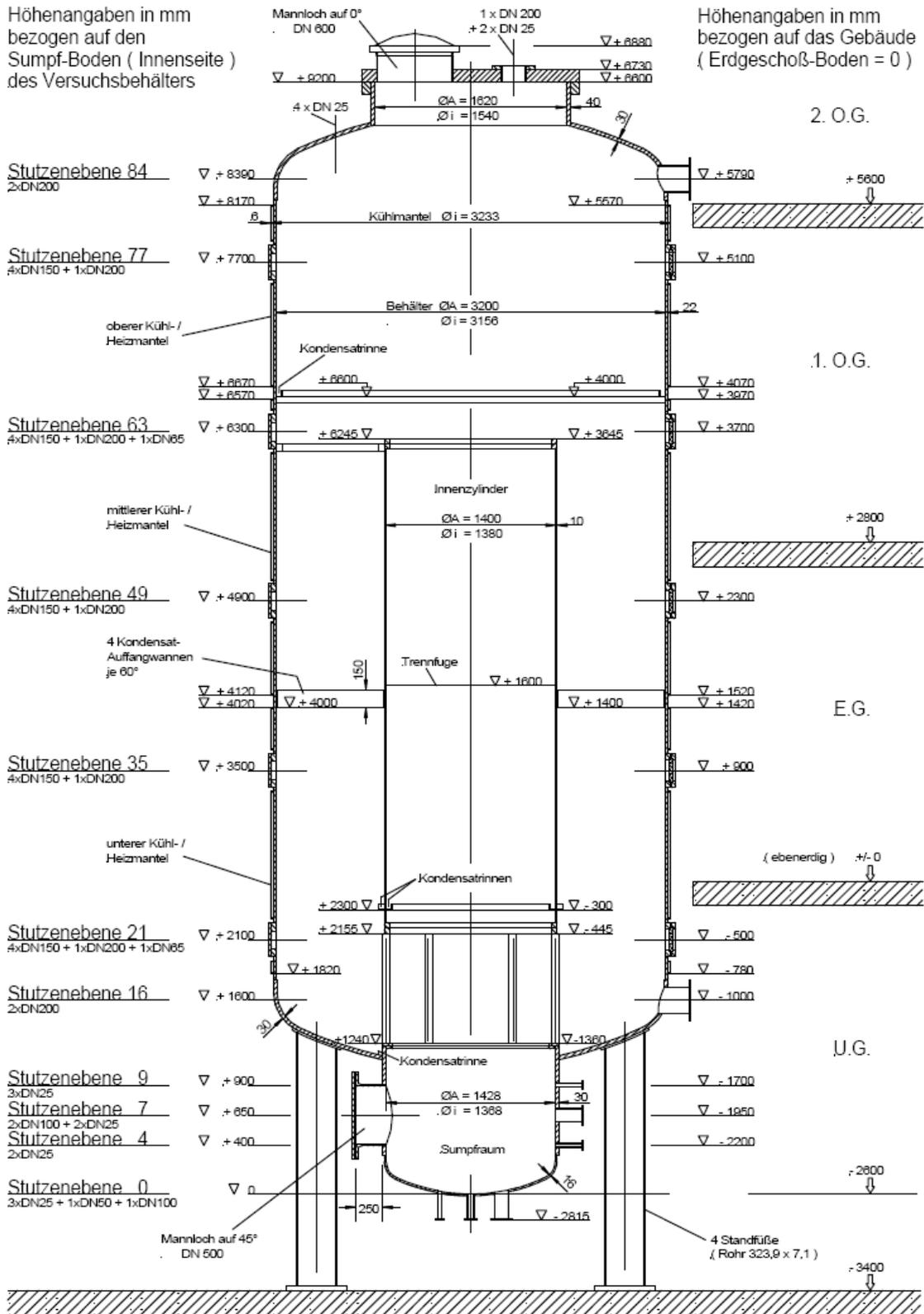


Abb. 1-76 ThAI-Versuchsbehälter - Querschnitt

An anderen Stellen des Behälters treten unterschiedliche Wandstärken auf, an den Klöpperböden 30 mm, am oberen Deckel 120 mm. Die Stärke der Isolation aus Mineralwolle ist auch etwas unterschiedlich, liegt aber etwa um 120 mm.

An fünf Ebenen befinden sich jeweils drei Schaugläser und zwei Blindflansche in der Behälterwand. Die Isolation ist an diesen Stellen unterbrochen und wird von isolierten Klappen ersetzt.

An der Wand anfallendes Kondensat kann mit Kondensatauffangrinnen erfasst werden. Eine befindet sich an der Unterkante des oberen Kühlmantels und zwei unten am Innenzylinder. Des Weiteren kann Kondensat von einer 100 mm hohen Wandung auf dem unteren Klöpperboden zurückgehalten werden, so dass es nicht in den Sumpf fließt. Das aufgefangene Kondensat kann zu Messzwecken aus der Anlage entnommen werden. Auch in den Wannern des Zwischenbodens kann Kondensat aufgefangen bzw. abgeleitet werden.

In Tab. 1-8 sind die wichtigsten Geometriedaten von ThAI zusammengefasst.

Tab. 1-8 ThAI Geometriedaten

Gesamtvolumen (m ³)	59.3
Volumen Sumpfraum (m ³)	1.7
Gesamthöhe (m)	9.2
Höhe Sumpfraum (m)	1.2
Innendurchmesser (m)	3.156
Innendurchmesser Sumpfraum (m)	1.368
Innenflächen der Außenwände (m ²)	95
Flächen der Inneneinbauten (m ²)	45
Stahlvolumen der Außenwände (m ³)	2.98
Stahlvolumen der Inneneinbauten (m ³)	0.25

Die Versuchsanlage ist mit einem umfangreichen Messsystem ausgestattet. Im Behälter befinden sich etwa 100 Thermoelemente zur Erfassung der Atmosphären-, Sumpf-, Kondensat- und Wandtemperaturen. Die relative Feuchte der Atmosphäre wird mit Taupunktfeuchtemessern an 5 Stellen, der Druck an 2 Stellen gemessen. Die Raumtemperatur außerhalb des Behälters wird an vier Stellen gemessen. Des Weiteren

werden Druck, Temperatur und Massenstrom der Dampfeinspeisung und der Thermo-
ölanlage erfasst, sowie der Eintrag von Elektroenergie in den Dampferzeuger und den
Sumpf. Zur Ermittlung der Jodkonzentrationen in der Atmosphäre und im Wasser sind
16 Probenahmestellen vorgesehen.

Die Atmosphäregeschwindigkeiten werden mit 3 Sondermessverfahren bestimmt:

- Mit dem RASS (Radio Acoustic Sounding System) wird das vertikale Geschwindig-
keitsprofil auf einer Linie von unten nach oben im Behälter gemessen.
- Das PIV (Particle Image Velocimetry) ermittelt die Geschwindigkeiten in einer r – z
Ebene

Das LDA (LASER Doppler Anmometry misst ein radiales Profil der Vertikalgeschwin-
digkeit.

Experiment

Der ThAI-Versuchsbehälter in der Konfiguration des ISP47 ist in Abb. 1-77 und Abb.
1-78 dargestellt. Im Gegensatz zum Versuch TH10 hatten die Öffnungen des Innen-
zylinders und die Öffnungen zwischen den Kondensatwannen ihre volle Strömungsflä-
che. Durch Wechsel der Einspeisepositionen wurden atmosphärische Schichtungen
aufgebaut, verändert und teilweise aufgelöst.

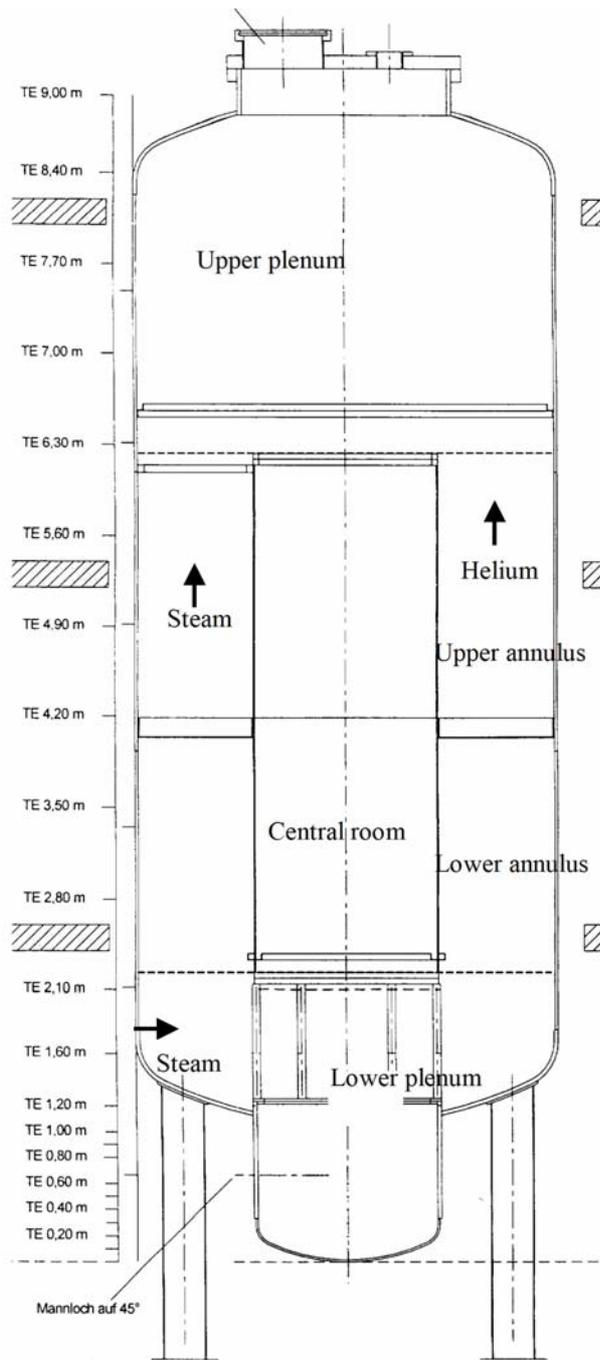


Abb. 1-77 ThAI-Versuchsbehälter in der Konfiguration des ISP47, Längsschnitt

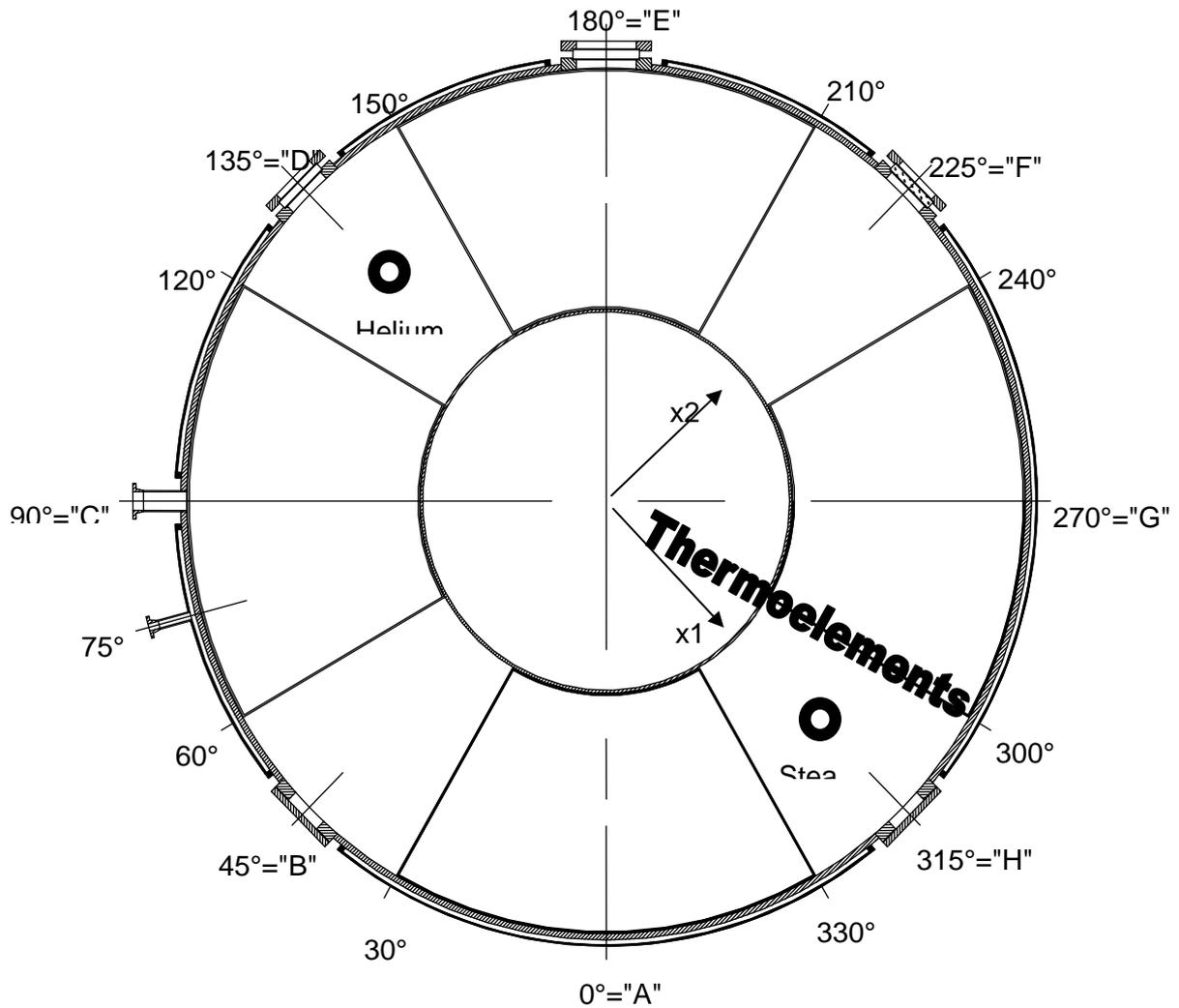


Abb. 1-78 ThAl-Versuchsbehälter in der Konfiguration des ISP47, Querschnitt

Zu Beginn des Versuchs war der Behälter mit Luft gefüllt, der Druck betrug 1 bar (absolut) und die Temperaturen etwa 21 °C. Die experimentellen Zustände wichen nur geringfügig von den spezifizierten ab.

Tab. 1-9 ThAl – ISP47 Versuch, Anfangszustände

	Experiment	Spezifikation
Behälterdruck (bar)	1.011	1.013
Atmosphärentemperatur im Behälter (°C)	20.6 ± 0.5	22
Relative Feuchte im Behälter (%)	70.6 ± 3.4	60
Wandtemperaturen (°C)	20.6 ± 0.5	22
Umgebungstemperaturen (°C)	22.7 ± 1.3	22

Der Versuchsablauf ist in Tab. 1-10 beschrieben. Der zeitliche Verlauf der experimentellen Einspeiseraten ist Abb. 1-79 zu entnehmen.

Tab. 1-10 ThAI – ISP47 Versuchsablauf

Phase I. 0 - 2700 s	Obere Heliumeinspeisung $Z = 5.8 \text{ m}$, 0.59 g/s nach oben gerichteter Freistrahler am Austritt 5 m/s	Hohe Heliumkonzentrationen oberhalb der Einspeisung. Fast kein Helium unterhalb von 5.4 m gemessen.
Phase II. 2700 - 4700 s	Obere Dampfeinspeisung $Z = 5 \text{ m}$, 35 g/s , nach oben gerichteter Freistrahler am Austritt 30 m/s	Hohe Helium- und Dampfkonzentrationen oberhalb der Einspeisung. Langsamer Anstieg der Heliumkonzentration bei 4.6 m . In darunter liegende Bereiche gelangt nur wenig Helium.
Phase III. 4700 - 5700 s	Untere Dampfeinspeisung $Z = 1.28 \text{ m}$, 35 g/s Horizontaler Freistrahler am Austritt 2.8 m/s	Die am Ende der Phase II bestehende Atmosphärensichtung wird teilweise aufgelöst und die Behälteratmosphäre bis zu einer Höhe von etwa 7 m homogenisiert. Darüber bleibt hohe Heliumkonzentration bestehen.
Phase IV. 5700 - 7700 s	keine Einspeisung	Der Dampf kondensiert größtenteils an den Wänden. Somit nähern sich die Atmosphärentemperaturen den Wandtemperaturen an. Die Heliumschichtung bleibt bestehen.

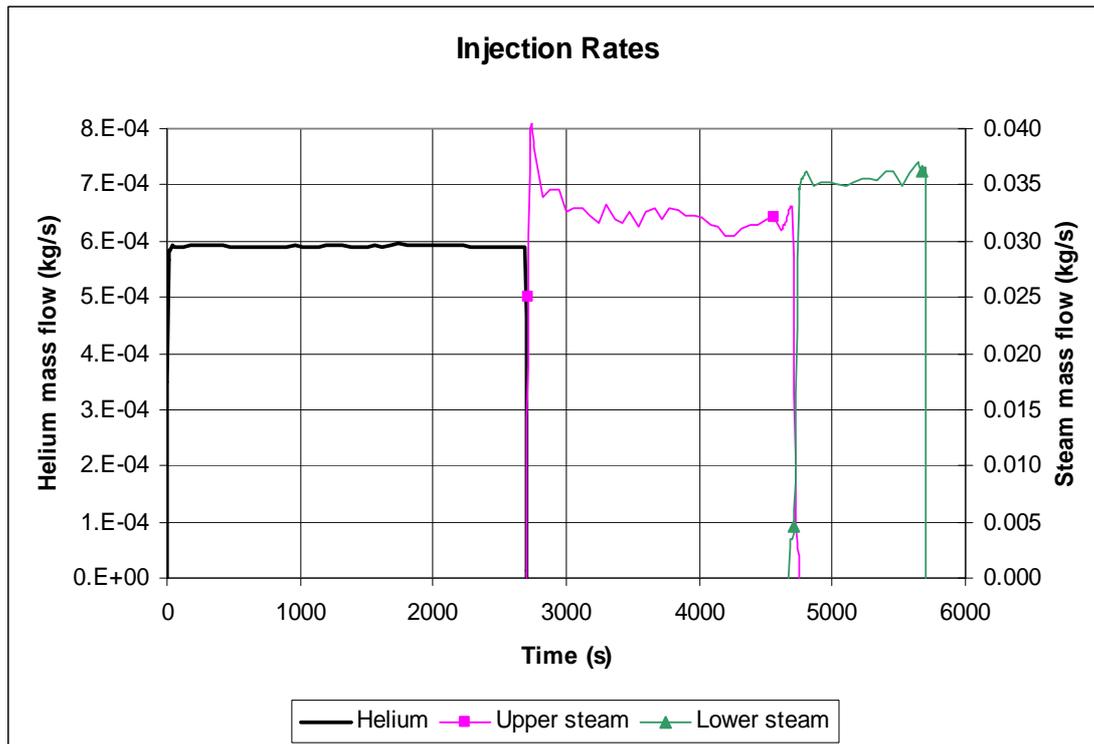


Abb. 1-79 ThAI ISP47 Versuch, Einspeiseraten

COCOSYS-Simulation

Die Nodalisierung der Behälteratmosphäre umfasst 52 Zonen, die 15 Ebenen bilden (s. Abb. 1-80). Sie ist eine Erweiterung der für den Versuch TH10 verwendeten Nodalisierung. Hinzugefügt wurden "Helium-Plumezonen" R4O.JI bis R5O.J sowie die Zonen R5MU.3 und R5U.3 am Austritt des Innenzylinders. Alle Zonen werden mit dem Nichtgleichgewichtsmodell gerechnet, in dem unterschiedliche Temperaturen für Atmosphäre und Wasser möglich sind.

Der bei 5.75 m in den Versuchsbehälter eingespeiste Helium-Freistrahler geht nach einer Weglänge von etwa 0.5 m in einen auftriebsbehafteten Plume über, der mit den "Helium-Plumezonen" simuliert wird. Diese bilden gemäß /SCH 04b/ einen Kegel mit einem Winkel von 20° mit horizontalen und vertikalen Strömungsflächen entsprechend dieser Geometrie. Die Einspeisestelle ist mit zwei Zonen simuliert. Die innere Zone R4O.JI hat nur oben an ihrem Austritt eine Strömungsfläche, die äußere Zone R4O.JA hat Strömungsflächen in vertikaler und horizontaler Richtung. Die Heliumeinspeisung wird je zur Hälfte auf beide Zonen aufgeteilt.

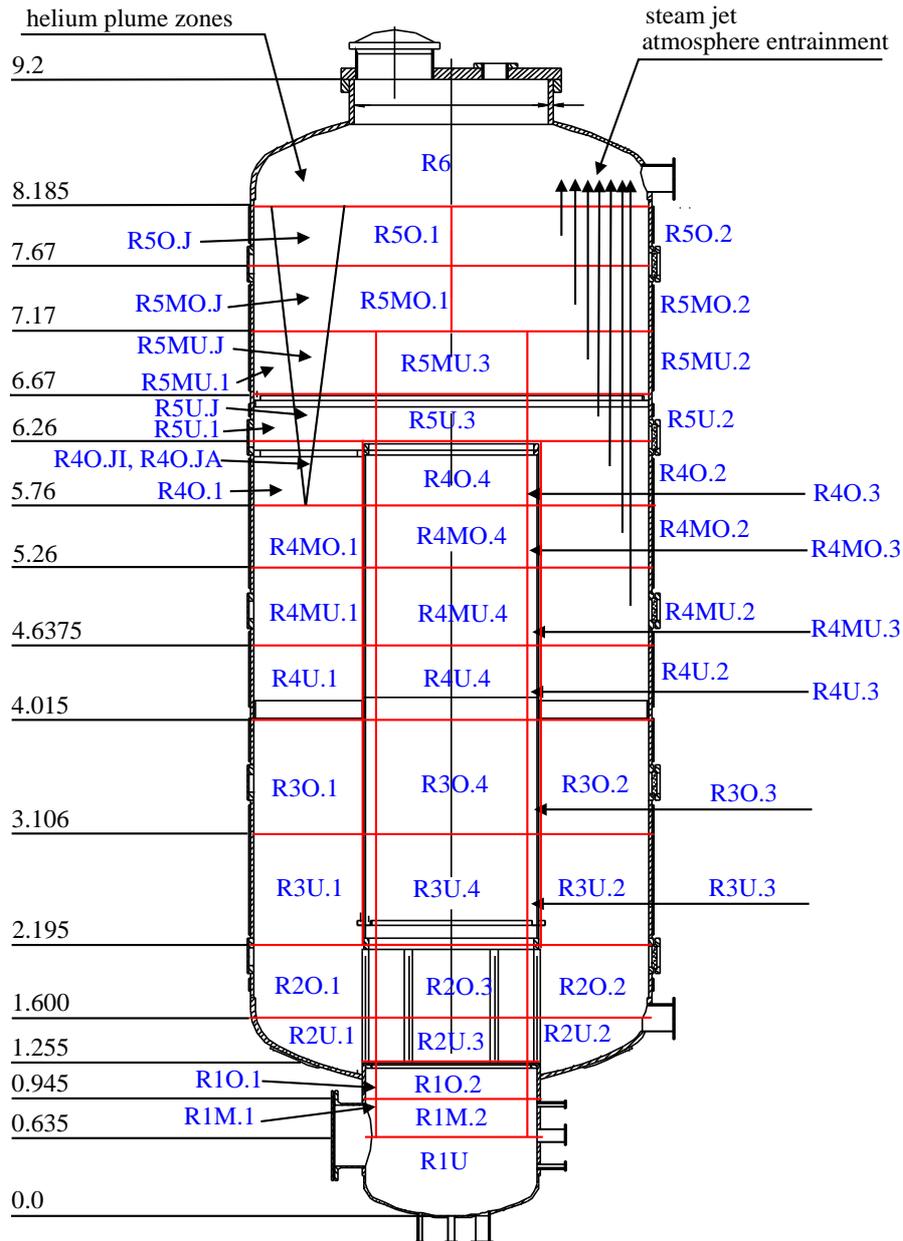


Abb. 1-80 ThAI ISP47, COCOSYS Nodalisierung

Der sich durch die obere Dampfeinspeisestelle bei 5 m ausbildenden Freistrahls wird gemäß /SCH 04b/ analytisch erfasst. Er erreicht den Dom (Zone R6) mit einer Geschwindigkeit von 2 m/s ohne vorher Kontakt mit der Wand zu haben. Zu seiner Simulation werden deshalb keine speziellen Jet-Zonen benötigt. In der Rechnung wird der Dampf direkt in R6 eingespeist. Der Mitriss von Atmosphäre wird mit Fan-Systemen beschrieben, die aus den Zonen durch die der Freistrahls geht, Atmosphäre abziehen und nach R6 transportieren. Oberhalb von 5.76 m beträgt der Mitriss pro Meter Weglänge das 7.08-fache des eingespeisten Dampfstroms (V_0). Im darunter lie-

genden Anlaufbereich des Strahls ist der Mitriss geringer. Beim Eintritt in den Dom ist der Volumenstrom des Freistrahls (V) auf das 21-fache von V_0 angewachsen (s. Abb. 1-81).

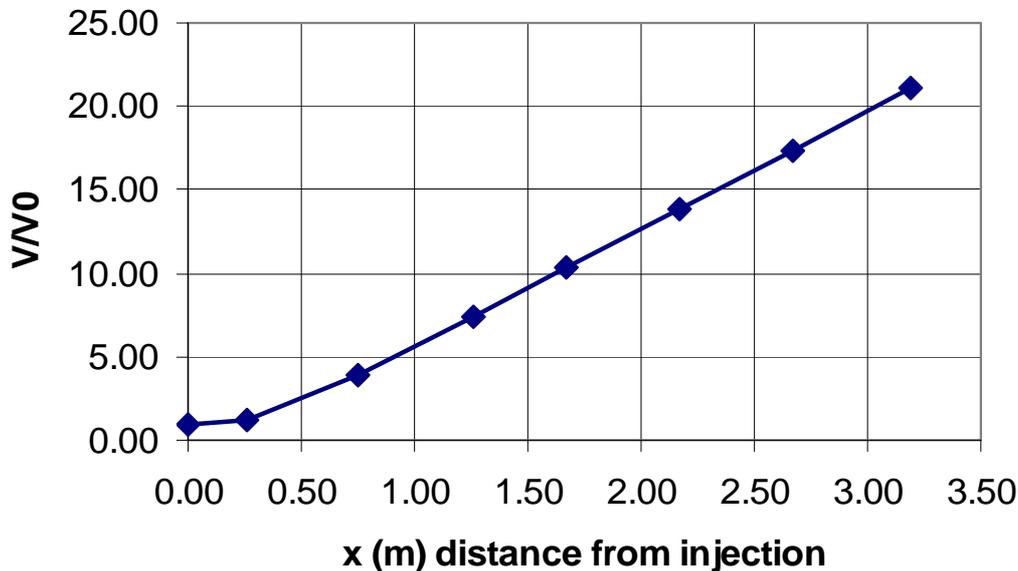


Abb. 1-81 ThAI ISP47, COCOSYS-Simulation des oberen Dampfstrahls, Zunahme des Volumenstroms (V) mit dem Abstand vom Einspeiseort, (V_0 eingespeister Volumenstrom)

Der horizontale Freistrahls der unteren Dampfeinspeisung tritt mit der niedrigen Geschwindigkeit von 2.8 m/s in den Versuchsbehälter ein. Nachdem der Strahl eine Weglänge von 2 m zurückgelegt hat, ist entsprechend der analytischen Formel in /SCH04b/ seine Zentralgeschwindigkeit auf 0.77 m/s abgesunken. Dies entspricht der radialen Position der der Einspeiseposition gegenüberliegenden Wand des Innenzylinders. Der Strahl hat sich somit bis dahin in einen Plume umgewandelt, der also hauptsächlich im Innenzylinder aufsteigt. In der Rechnung wird dies durch eine Aufteilung der Dampfeinspeisung zu 25 % in die Zone R2O.1 und zu 75 % in R2O.3 berücksichtigt. Es ist zu erwarten, dass der Plume aus der oberen Öffnung des Innenzylinders austritt. Dies wird durch die Zonen R5MU.3 und R5U.3 simuliert.

Die Atmosphärenzonen des Versuchsbehälters sind mit Strömungspfaden verbunden, deren Strömungsquerschnitte und deren Längen der Behältergeometrie entsprechen. Die Formverlustfaktoren wurden mit $K = 1.0$ angesetzt.

Zusätzlich zu den die Behälteratmosphäre beschreibenden Zonen enthält die Nodalisierung:

- Die Umgebung mit einem Volumen von 10^8 m^3 und einer Temperatur von $22 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Spezielle Zonen in denen das Kondensat bilanziert wird, das von den Kondensatsammelrinnen aufgefangen und aus dem Behälter geleitet wurde.
- Die maximale Kondensatmasse, die sich in einer Zone ansammeln kann errechnet sich aus dem Kondensatfilm an den Wänden mit einer Stärke von 0.1 mm und dem zusätzlich in den Kondensatsammelrinnen befindlichem Wasser. Die vier Kondensatwannen können insgesamt 606 kg Wasser auffangen. Wenn die maximale Kondensatmasse einer Zone überschritten ist, setzt ein Kondensatstrom in die nächste Sammelrinne ein. Von Zonen, die Kondensatsammelrinnen beinhalten wird das Kondensat in die oben beschriebenen Bilanzierungszonen außerhalb des Behälters abgeleitet. Annahmen mussten für die Kondensatströme aus dem Dom (R6) getroffen werden: Ein Teil des Kondensats fließt entlang der Behälterwand in die Sammelrinne bei 6.6 m . Ein weiterer Teil tropft in die Kondensatwannen und ein geringer Teil in den Sumpf.
- Die Stahlwände des Versuchsbehälters werden durch 91 Strukturen gemäß /SCH 00/ beschrieben. Tab. 1-11 enthält die Gesamtvolumina der Materialien.

Tab. 1-11 Gesamtvolumen der Strukturmaterialien

Material	Volumen (m^3)
Stahl	3.29
Öl in Kühl- Heizmänteln	0.98
Isolation	4.2

- Die Nebelmasse und die Tröpfchendurchmesser werden mit dem im AFP-Modul enthaltenen Aerosolmodell AERIKA berechnet. Es wird angenommen, dass sich im Behälter Kondensationskeime mit einer Anfangskonzentration von 10^{-7} kg/m^3 befinden. Zusätzlich werden mit der Dampfeinspeisung geringe Mengen von Keimen eingespeist. Auf den Keimen, sowie auf vorhandenen Tröpfchen kondensiert Dampf entsprechend der im Thermohydraulik-Modul berechneten Volumenkon-densationsrate. Parameterrechnungen zeigen, dass die Berechnung des Nebels wenig sensitiv zur Konzentration oder Anzahl der Keime ist. Die Ablagerung der Töpfchen auf horizontalen und vertikalen Behälteroberflächen wird berechnet.

Zum ISP47 wurde eine erste komplett blinde COCOSYS-Rechnung sowie eine zweite, bei der die Phasen I und II des Experiments bekannt waren, eingesandt. Beide verwendeten die gleiche Nodalisierung. Die Unterschiede sind in Tab. 1-12 aufgelistet. In der ersten Rechnung ist die Sedimentation der Nebeltröpfchen von einer Zone über ein horizontale Strömungsfläche in die darunter liegende Zone (Schlupf) aufgrund einer ungünstigen Modellierung im Rechenprogramm nicht erfasst. In der zweiten Rechnung wurde dies verbessert. Die Wärmeübertragungskoeffizienten zwischen Behälteratmosphäre und Wand wurden in der ersten Rechnung unterschätzt, da charakteristische Längen im Meterbereich eingegeben waren. Entsprechend den Untersuchungen in wurden in der zweiten Rechnung Längen von 5 cm eingegeben, wodurch realistischere Koeffizienten berechnet wurden. Ferner wurden anstelle der spezifizierten Anfangs- und Randbedingungen die tatsächlich gemessenen verwendet. Da diese nur wenig von der Spezifikation abwichen, hatte dies geringe Auswirkungen auf die Rechenergebnisse.

Tab. 1-12 Unterschiede zwischen den eingesandten COCOSYS-Rechnungen

COCOSYS-Rechnungen	1. Komplett blind	2. Phasen I und II bekannt
COCOSYS Version	V2.1v2	V2.1v4
Schlupf der Nebeltröpfchen	nicht berechnet	richtig berechnet
Charakteristische Länge Wärmeübergang	Im Meterbereich	5 cm
Anfangs- und Randbedingungen	laut Spezifikation	wie gemessen

Ergebnisse Experiment und Rechnung

Experiment und komplett blinde Rechnung

- Atmosphärendruck

Der experimentelle Atmosphärendruck im Versuchsbehälter steigt aufgrund der Helium – und Dampfeinspeisungen an. Bei 2700 s zu Beginn der oberen und bei 4700 s zu Beginn der unteren Dampfeinspeisung steigt der Druck zunächst sehr schnell an, weil sich der Dampfpartialdruck erhöht bis sich ein quasistationären Gleichgewicht zwischen Dampfeinspeisung und Kondensation an den Wänden ausgebildet hat und weil der Luftpartialdruck mit der Temperaturerhöhung steigt. Danach steigt der Druck je-

weils stetig mit einer langsameren Rate an. In der Phase IV ohne Einspeisung ab 5700 s nehmen wegen der Kondensation des Dampfes der Dampfpartialdruck und folglich auch der Behälterdruck wieder ab (Abb. 1-82).

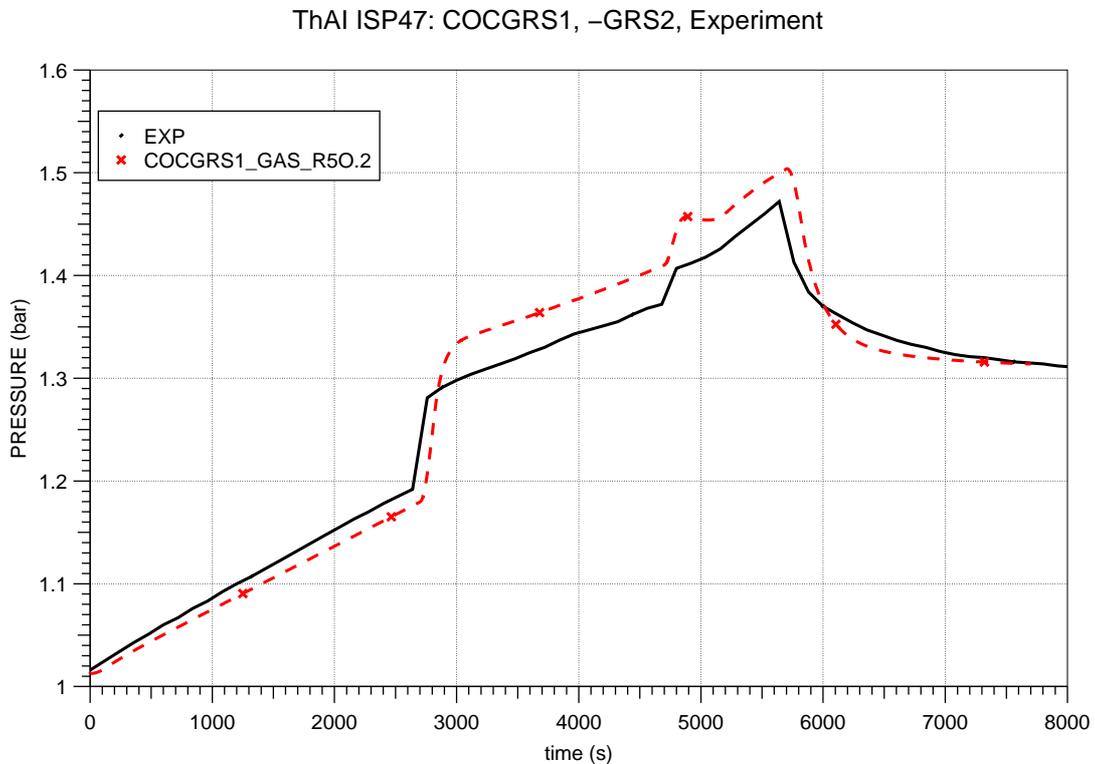


Abb. 1-82 ThAI ISP47, Druckverlauf Experiment und komplett blinde COCOSYS-Rechnung

Die blinde COCOSYS-Rechnung sagt den gemessenen Druck bis auf einige Abweichungen gut voraus. Von 0 bis 2700 s wird der Druckanstieg geringfügig unterschätzt, weil die Beimischung von 0.16 g/s Dampf zur Heliumeinspeisung nicht spezifiziert und somit in der Rechnung nicht berücksichtigt war. Der Druckanstieg zu Beginn der oberen Dampfeinspeisung bei 2700 s wird von COCOSYS überschätzt, was hauptsächlich auf eine Unterschätzung des Wärmeübergangskoeffizienten durch COCOSYS zurückzuführen ist, aber auch auf eine zu hoch eingegebene Dampfeinspeiserate. Die experimentelle Dampfeinspeiserate war 8 % kleiner als die spezifizierte.

- Atmosphärentemperaturen

Experiment

Im Experiment (Abb. 1-83) steigen die Atmosphärentemperaturen während der Heli-umeinspeisung, also bis 2700 s, kaum an, da die von der Kompression freigesetzte Wärme fast vollständig von den Behälterwänden aufgenommen wird.

Der ab 2700 s freigesetzte Dampf gelangt fast ausschließlich in Behälterbereiche oberhalb der Einspeiseposition von 5 m Höhe. Dies ist am Temperaturanstieg der Sensoren T2 bei 7.7 m und T1 bei 6.3 m zu erkennen. Dabei liegt T1 im Einzugsbereich des Strahls und ist deshalb höher als T2. Knapp unterhalb, bei 4.9 m, bleiben die Temperaturen deutlich niedriger (Sensoren T3 und T6). In die unteren Behälterbereiche gelangt kaum Dampf (Sensoren T4, T5, T7 und T8).

Die bei 4600 s einsetzende untere Dampfeinspeisung induziert ab 5000 s eine Naturzirkulation, bei der die Atmosphäre hauptsächlich im Innenzylinder aufsteigt (Abb. 1-83). Die Zirkulationsschleife liegt etwa zwischen den Behälterhöhen 1.5 bis 7 m und ist von dem aufsteigenden Plume überlagert. Dies vermischt die Behälteratmosphäre nur allmählich und unvollständig, so dass auch innerhalb der Schleife noch größere Temperaturunterschiede auftreten. Die oberhalb der Zirkulationsschleife befindliche Atmosphäre nähert sich der Wandtemperatur an und sinkt unter die im Zirkulationsbereich gemessenen Atmosphärentemperaturen (s. Sensor T2 bei 7.7 m). Ab 5600 s nach Beendigung der Dampfeinspeisung nähern sich alle Atmosphärentemperaturen den Wandtemperaturen an und es bildet sich ein Gradient von oben nach unten aus.

Rechnung

COCOSYS sagt die experimentellen Temperaturen gut voraus, vergleiche Abb. 1-83 und Abb. 1-84 sowie die experimentellen und gerechneten Werte für die Sensoren T1, T5 und T8 in Abb. 1-85. Dies zeigt, dass COCOSYS die experimentellen Atmosphärenschichtungen sowie die Naturzirkulation in Phase III prognostiziert, wobei die Ausdehnung der Zirkulationsschleife nach oben und unten etwas überschätzt ist.

Die Temperatur des oberen Behälterbereichs wird in der Phase III wegen zu niedriger Wärmeübergangskoeffizienten überschätzt. Sie ist in der Rechnung so hoch wie die experimentelle Temperatur im Freistrah (siehe Sensoren T1 und T2).

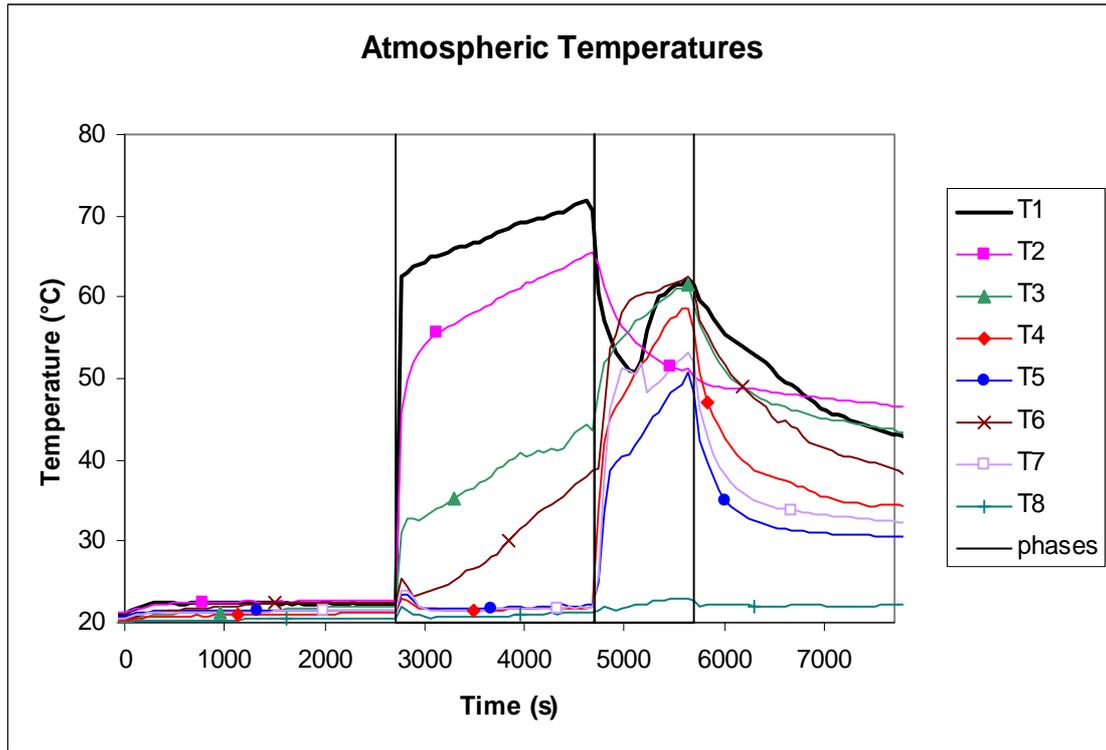


Abb. 1-83 ThAI ISP47, Atmosphärentemperaturen Experiment, T1 Dom 6.3 m, T2 Dom 7.7 m, T3 Ringraum 4.9 m, T4 Ringraum 2.8 m, T5 Unteres Plenum 1.6m, T6 Innenzylinder 4.9 m, T7 Eintritt Innenzylinder 2.1 m, T8 Sumpf 0.7 m

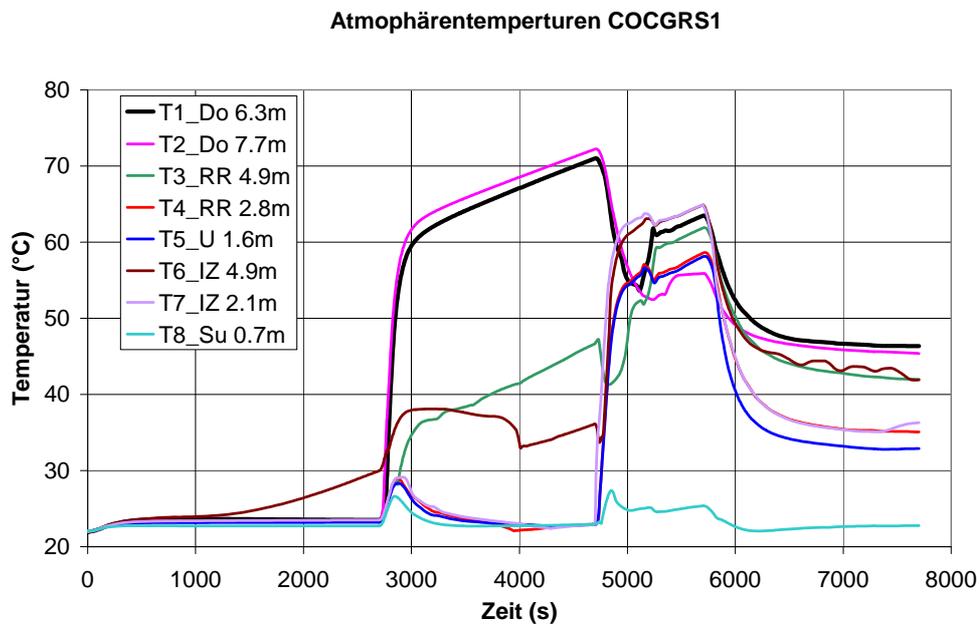


Abb. 1-84 ThAI ISP47, Atmosphärentemperaturen komplett blinde COGRS1 Rechnung

Atmosphärentemperaturen EXP COC

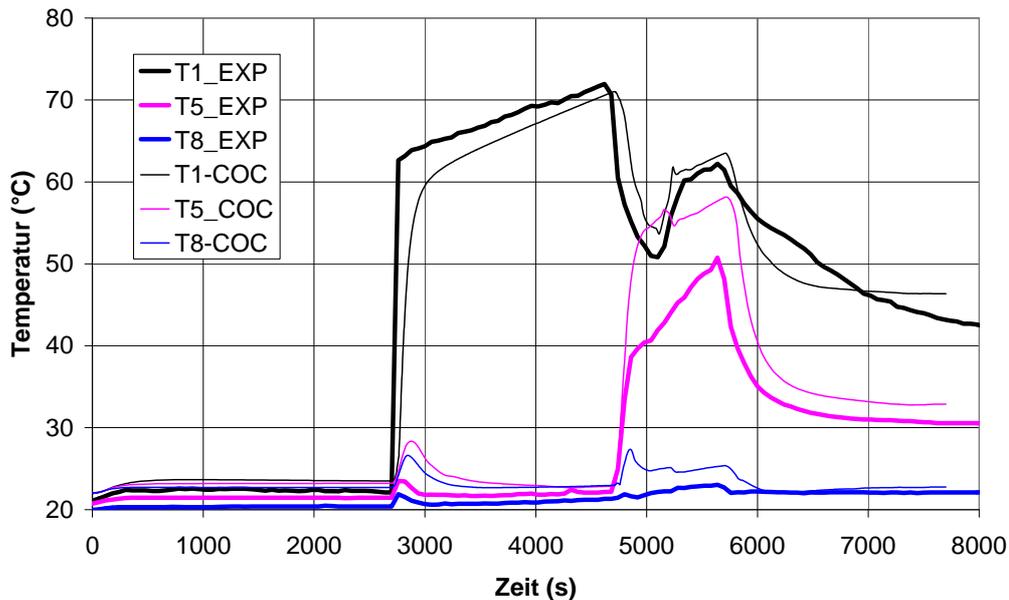


Abb. 1-85 ThAI ISP47, Atmosphärentemperaturen Experiment und COCOSYS-Rechnung, T1 Dom 6.3 m, T5 Unteres Plenum 1.6m, T6 Innenzylinder 4.9 m, T8 Sumpf 0.7 m

- Atmosphärendeschwindigkeit, Naturzirkulation

Bei 5000 s wird am Austritt des Innenzylinders eine Atmosphärendeschwindigkeit gemessen. Dies ist neben dem Verhalten der Atmosphärentemperaturen ein Beleg für eine Naturzirkulation, bei der die Atmosphäre hauptsächlich im Innenzylinder aufsteigt (Abb. 1-86). COCOSYS sagt die Zirkulation fast exakt voraus.

- Heliumkonzentrationen

Experiment

Der Verlauf der Heliumkonzentrationen verdeutlicht die im Experiment aufgetretenen Atmosphärenschichtungen. In Phase I verbleibt das eingespeiste Helium hauptsächlich in Bereichen oberhalb der Einspeiseposition von 5.8 m (Abb. 1-87). Ein kleinerer Anstieg der Konzentrationen ist noch in 5.4 m Höhe zu verzeichnen. Darunter wird fast kein Helium mehr detektiert.

Geschwindigkeit Austritt Innenzylinder

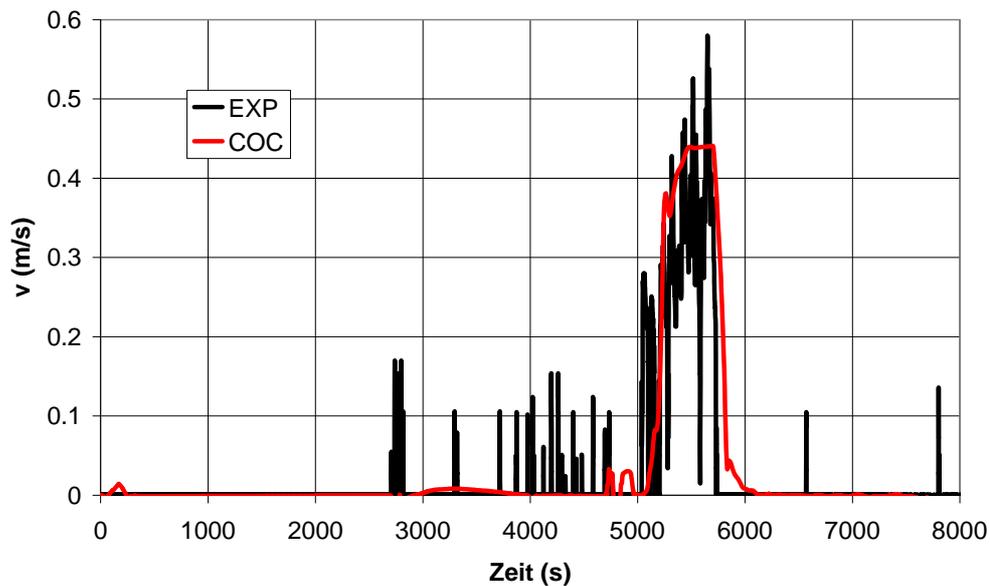


Abb. 1-86 ThAI ISP47, Atmosphärgeschwindigkeit am Austritt des Innenzylinders, Experiment und komplett blinde COCOSYS-Rechnung

Die obere Dampfeinspeisung in Phase II vermischt die Atmosphäre oberhalb ihrer Einspeiseposition von 5 m. In darunter liegende Bereiche gelangt wenig Helium. Allerdings breitete sich das Helium-Dampf-Luftgemisch langsam nach unten aus, wie es am Anstieg der Heliumkonzentration bei 4.6 m zu erkennen ist.

Sofort mit Beginn der unteren Dampfeinspeisung in Phase III sinkt die Heliumkonzentration bei 4.6 m ab, während die Konzentrationen bei 3.1 und 1.7 m ansteigen. Dies wird von einer schnellen Atmosphärendurchmischung dieser Bereiche bewirkt. Im folgenden Verlauf sinken die Konzentrationen der oberen Sensoren nacheinander ab; die untere von der Dampfeinspeisung durchmischte Atmosphärenschicht breitet sich also allmählich nach oben aus. Die obere heliumreiche Atmosphärenschicht wird jedoch nicht vollständig aufgelöst. Am Ende der Phase III verbleiben die Heliumkonzentration bei 7.7 und 8.7 m auf 23 Volumenprozent, während die Konzentrationen innerhalb der von der Naturzirkulation vermischten Atmosphäre bei 10 % liegen. Auch für den Rest des Experiments bleibt diese Atmosphärenschichtung erhalten.

Rechnung

COCOSYS sagt die experimentellen Heliumkonzentrationsverläufe und –Schichtungen gut voraus (vergleiche Abb. 1-87 und Abb. 1-88).

Geringe Abweichungen treten nodalisierungsbefingd in der Phase IIII bei der Vorher-
 sage der geodätischen Höhe des Übergangs zwischen heliumreicher und heliumarmer
 Atmosphäre auf. Im Experiment bleibt die Heliumkonzentration am Messaufnehmer bei
 7.7 m auf der hohen Konzentration. Bei dieser Höhe befindet in der COCOSYS-Noda-
 lisierung die Grenzen zwischen den Zonen R5MO.1 und R5O.1 deren Mittelpunkte bei
 7.4 bzw. 7.9 m liegen. Die Heliumkonzentration der oberen Zone bleibt in der Rech-
 nung auf dem hohen Wert, während die Konzentration der unteren Zone auf den nied-
 rigen Wert absinkt (Abb. 1-89). Für das ISP47 wurde der Mittelwert dieser Konzentration
 eingesandt (Abb. 1-90).

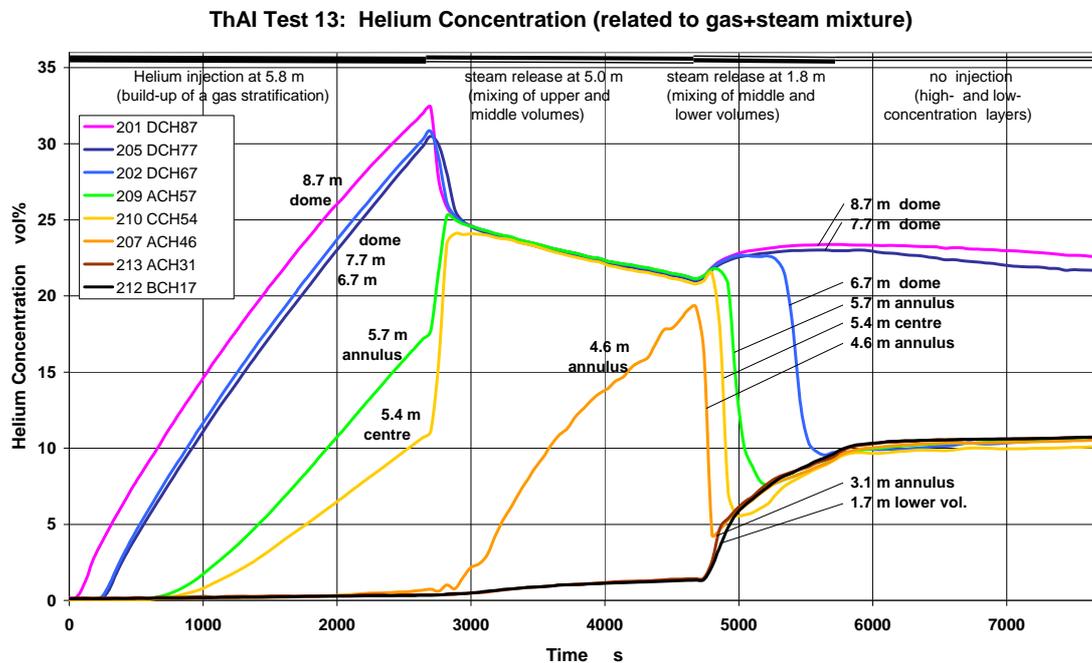


Abb. 1-87 ThAI ISP47, Heliumkonzentrationen Experiment

ThAI ISP47 COCOGRS1

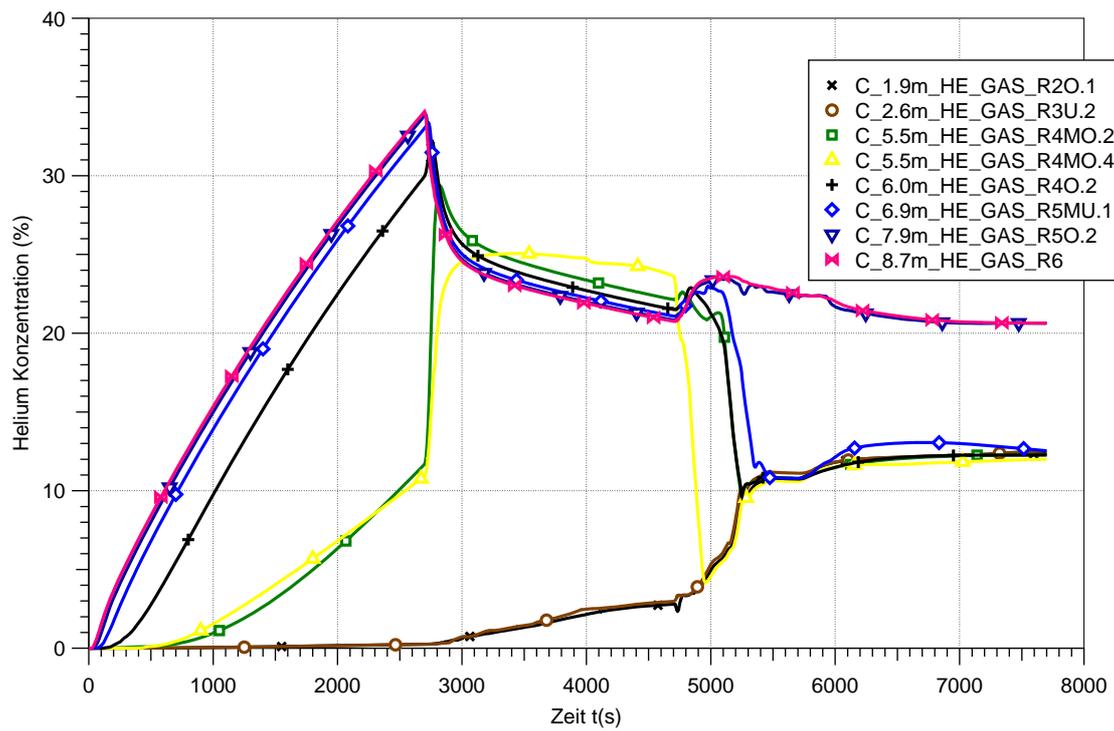


Abb. 1-88 ThAI ISP47, Heliumkonzentrationen komplett blinde COCOSYS-Rechnung

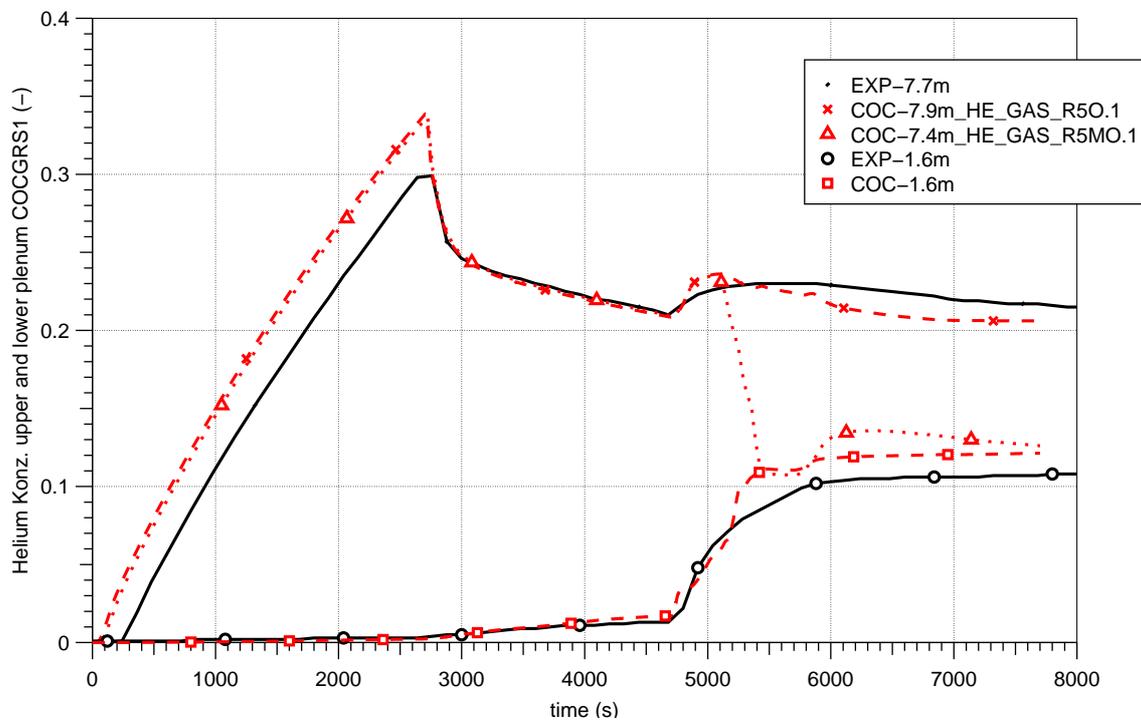


Abb. 1-89 ThAI ISP47, Heliumkonzentrationen Experiment und komplett blinde COCOSYS-Rechnung

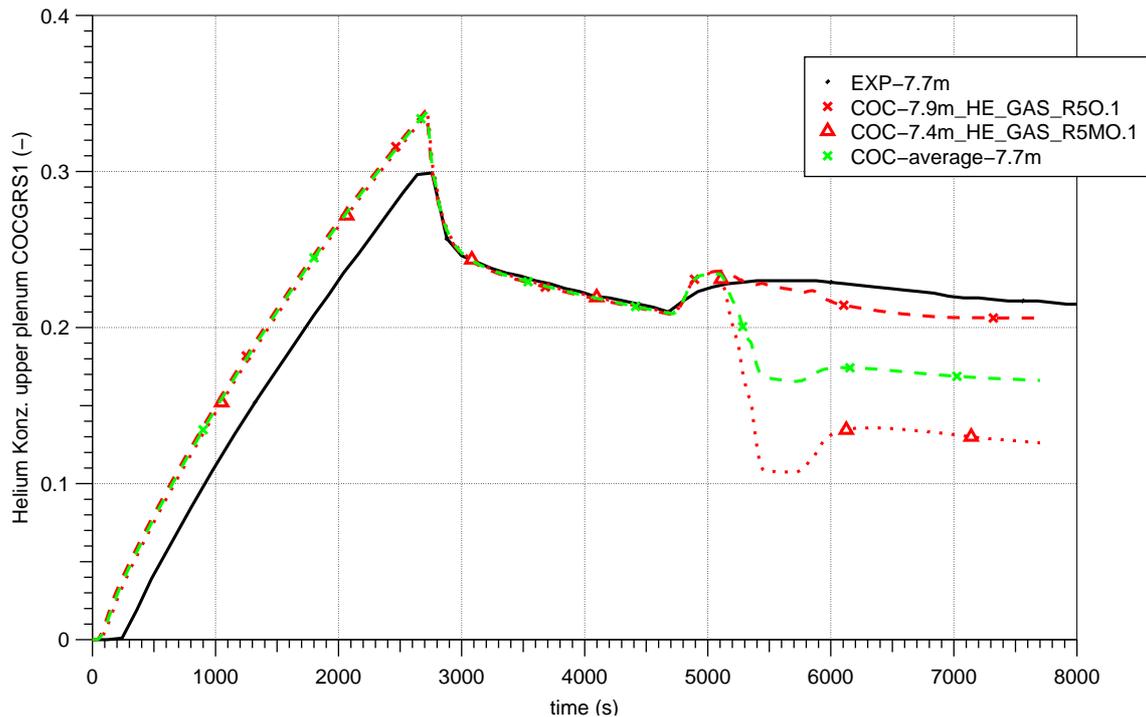


Abb. 1-90 ThAI ISP47, Heliumkonzentrationen Experiment (7.7m) und komplett blinde COCOSYS-Rechnung 7.4 und 7.9 m, sowie Mittelwert bei 7.7 (für ISP47)

- Heliumkonzentrationsprofile, Atmosphärensichtungen

Die Atmosphärensichtungen lassen sich anschaulich an den vertikalen Heliumkonzentrationsprofilen darstellen. Abb. 1-91 bis Abb. 1-93 verdeutlichen die gute Prognosefähigkeit von COCOSYS. Anmerkung: Da im Experiment nur sieben Messaufnehmer vorhanden waren, enthalten die folgende Abbildungen, abweichend von den Darstellungen in den ISP47 Berichten, sowohl Daten aus dem Ringraum, wie aus dem Innenzylinder. Dies ist berechtigt, da im Allgemeinen auf der gleichen Höhe die Konzentrationen zwischen Ringraum und Innenzylinder wenig voneinander abweichen.

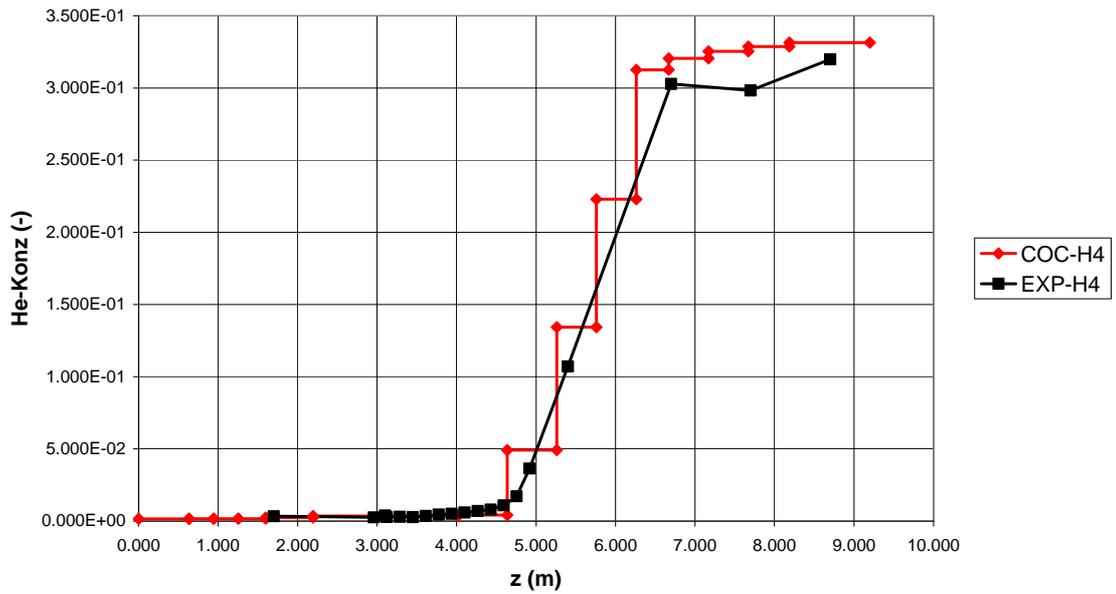


Abb. 1-91 ThAI ISP47, vertikales Heliumkonzentrationsprofil am Ende der Phase I bei 2600 s Experiment und komplett blinde COCOSYS-Rechnung

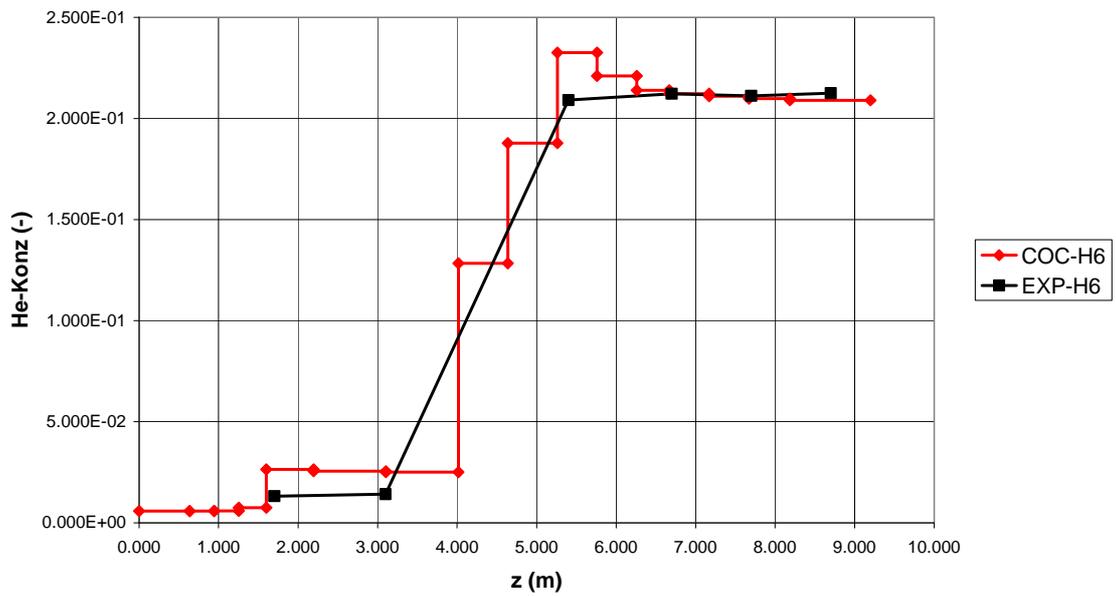


Abb. 1-92 ThAI ISP47, vertikales Heliumkonzentrationsprofil am Ende der Phase II bei 4600 s Experiment und komplett blinde COCOSYS-Rechnung

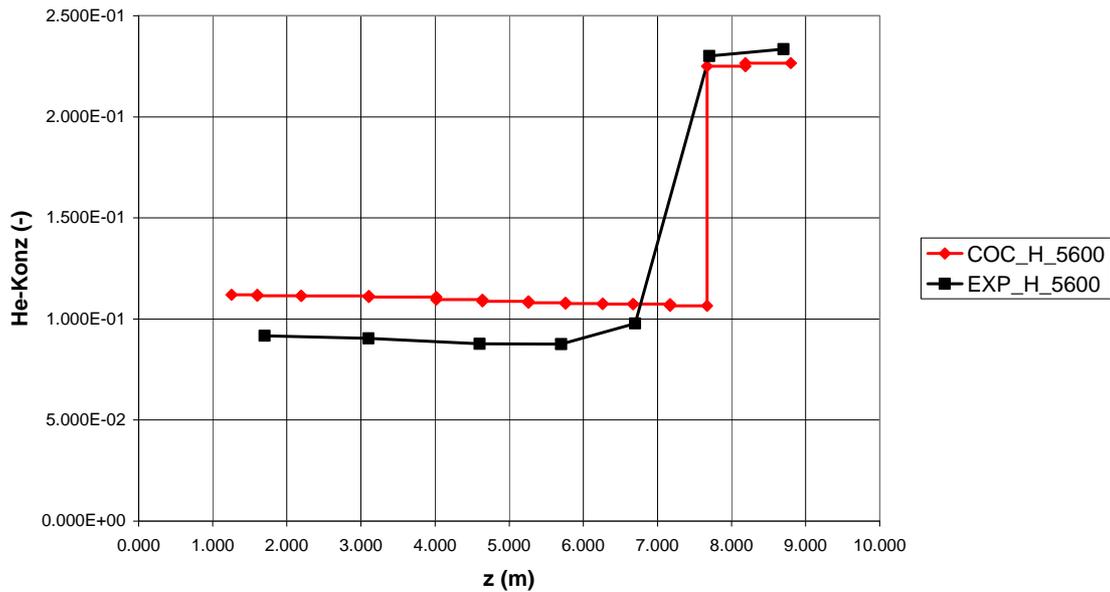


Abb. 1-93 ThAI ISP47, vertikales Heliumkonzentrationsprofil am Ende der Phase III bei 5600 s Experiment und komplett blinde COCOSYS-Rechnung

Teilweise "blinde" COCOSYS Rechnung

Nach Bekanntgabe der experimentellen Ergebnisse der Phasen I und II erhielten die Teilnehmer des ISP47 die Möglichkeit, eine zweite Rechnung anzufertigen.

Die zweite COCOSYS-Rechnung unterscheidet sich bezüglich der Vorhersage der Atmosphärensichtungen, der Temperatur- und Konzentrationsverläufe nur wenig von der ersten. Dies wird beispielhaft an den Heliumkonzentrationsverläufen (Abb. 1-94) gezeigt.

Die Berechnung des Atmosphärendrucks (Abb. 1-95) ist in der zweiten Rechnung verbessert durch

- die Berücksichtigung der Beimischung von 0.16 g/s Dampf zur Heliumeinspeisung von 0 bis 2700 s,
- die Eingabe der experimentellen Dampfeinspeiserate, die 8 % kleiner als die spezifizierte ist
- und verbesserte Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten, die in der ersten Rechnung unterschätzt waren.

ThAI ISP47: COCGRS1, -GRS2, Experiment

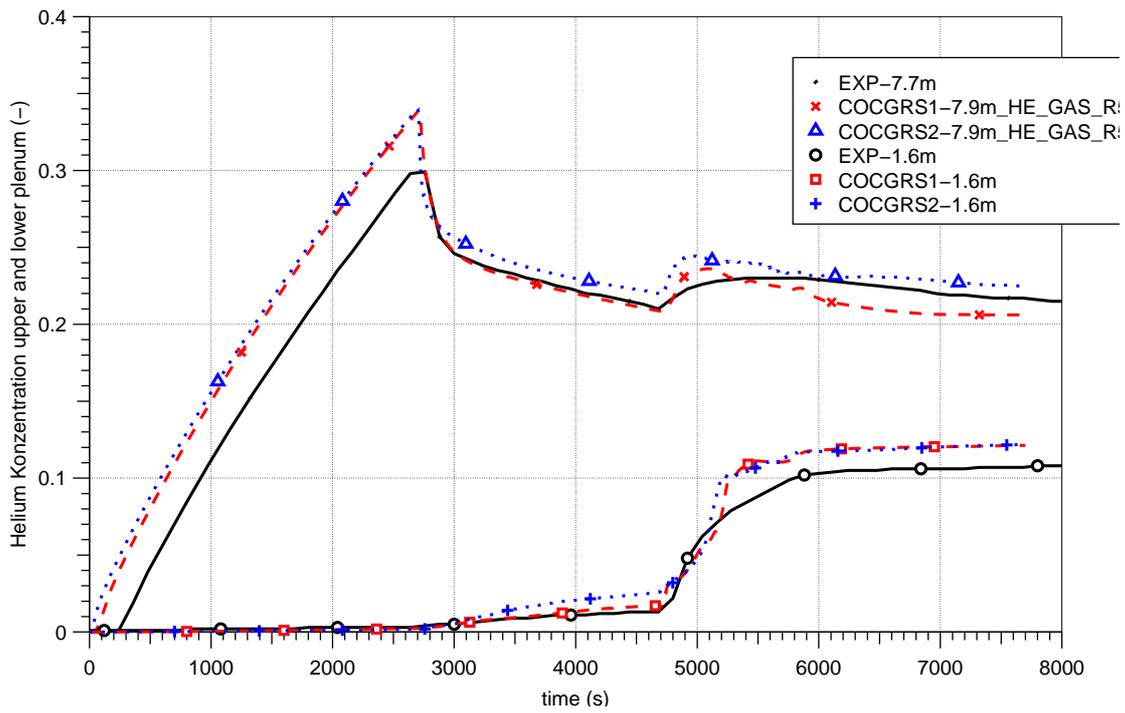


Abb. 1-94 ThAI ISP47, Heliumkonzentrationen Experiment (7.7m) und COCOSYS-Rechnungen, COCGRS1 komplett blind, COCGRS2 teilweise blind

ThAI ISP47: COCGRS1, -GRS2, Experiment

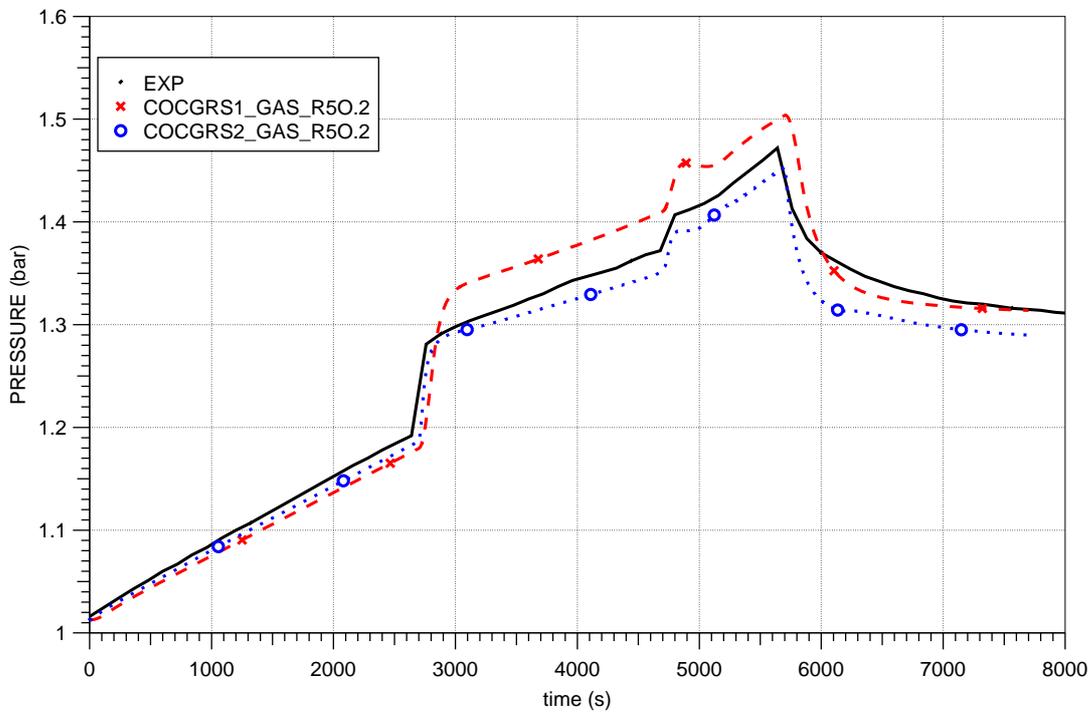


Abb. 1-95 ThAI ISP47, Druckverlauf Experiment und COCOSYS-Rechnungen, COCGRS1 komplett blind, COCGRS2 teilweise blind

Mit der verbesserten Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten und der Eingabe der experimentellen Dampfeinspeiserate in Phase II wird die Atmosphärentemperatur im oberen Behälterbereich von COCGRS2 besser simuliert (Abb. 1-96). Dies ist auch der Grund für bessere Simulation des Druckanstieges zu Beginn der Phase 2.

Wegen Schwierigkeiten im Rechenprogramm war in COCGRS1 die Sedimentation der Nebeltröpfchen von höheren in tiefer gelegene Zonen nicht simuliert, was zu einer Überschätzung der Nebelkonzentration führte. Mit der Berücksichtigung der Sedimentation wird der Nebel in COCGRS2 gut beschrieben Abb. 1-97.

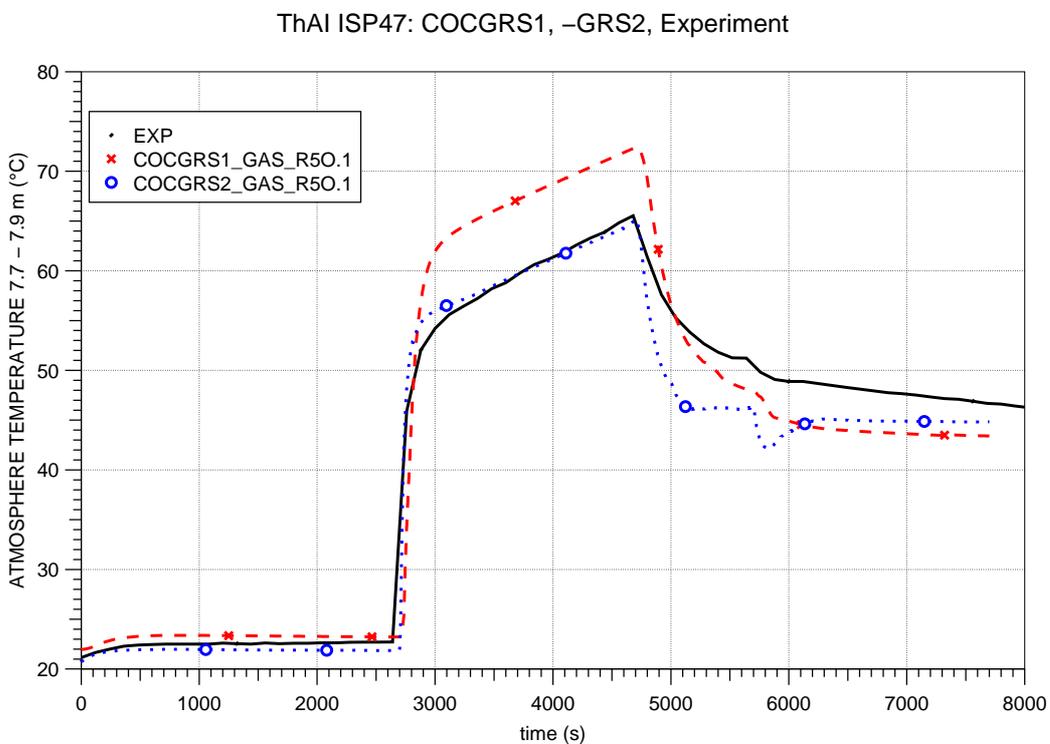


Abb. 1-96 ThAI ISP47, Atmosphärentemperatur oberes Plenum Experiment und COCOSYS-Rechnungen, COCGRS1 komplett blind, COCGRS2 teilweise blind

ThAI ISP47: COGRS1, -GRS2, Experiment

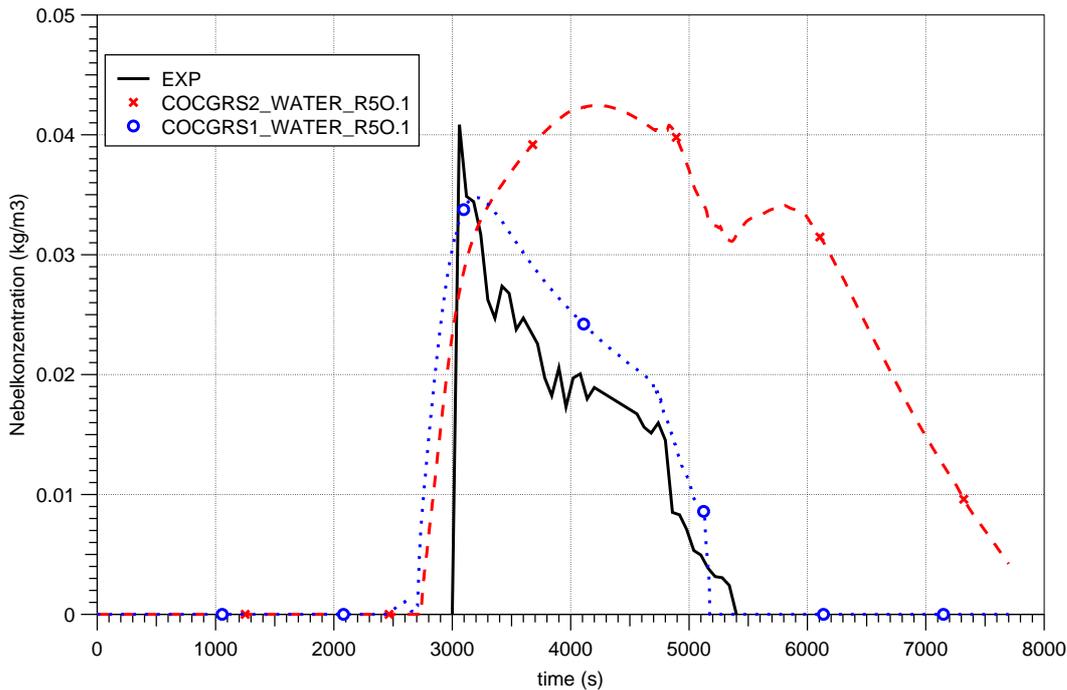


Abb. 1-97 ThAI ISP47, Nebelkonzentration Experiment und COCOSYS-Rechnungen, COGRS1 komplett blind, COGRS2 teilweise blind

Die COCOSYS-Ergebnisse im internationalen Vergleich

Die Vorhersage der Heliumverteilungen und Atmosphärensichtungen waren die wichtigsten Themen des ISP47. Hierbei liefern insbesondere blinde Rechnungen eine Aussage über die Prognosefähigkeit der Rechenprogramme.

Abb. 1-98 bis Abb. 1-105 zeigen einen Vergleich der gemessenen Heliumkonzentrationen mit den komplett blinden Rechenergebnissen der Lumped Parameter (LP) Codes und der Computational Fluid Dynamic (CFD) Codes.

Die in den Phasen I und II, also von 0 bis 4600 s, im Experiment aufgetretenen Atmosphärensichtungen sind an den hohen Heliumkonzentrationen im oberen Plenum und den niedrigen Konzentrationen im unteren Plenum zu erkennen. Dies wird von vier COCOSYS- und ASTEC-Rechnungen mit unterschiedlicher Genauigkeit vorausgesagt, COGRS1 und ASTGRS1 von der GRS, COCLEE1 von der Ruhr-Universität Bochum, sowie ASTIRS1 von IRSN. Dabei ist allerdings der von ASTIRS1 berechnete Gradient von der hohen zur niedrigen Heliumkonzentration zu flach. Die anderen LP-Rechnungen zeigen nur geringe bis keine Konzentrationsunterschiede zwischen dem oberen und unteren Plenum. Darunter ist auch die COCOSYS Rechnung von Litauen

(COCLEI1). In Phase III wird der Versuchsbehälter teilweise durchmischt, was am Anstieg der Heliumkonzentration im unteren Plenum zu erkennen ist. Die Atmosphäre des oberen Plenums vermischt sich nur bis zu einer Höhe von etwas mehr als 7 m mit der darunter liegenden Atmosphäre. Somit bleibt die in den Abbildungen gezeigte experimentelle Heliumkonzentration auf hohen Werten. Die verbleibende Atmosphärenschichtung wird nur von COCGRS1 und ASTGRS1 vorausgesagt, wobei der Übergang zwischen heliumreicher und heliumarmer Atmosphäre in den Rechnungen etwa einen halben Meter zu hoch liegt. Der Unterschied zwischen den Ergebnissen der LP-Rechnungen ist vor allem in den verwendeten Nodalisierungen begründet.

Die sechs eingesandten CFD-Rechnungen sagen die experimentelle Schichtung in Phase I, also 0 bis 2600 s, voraus. Dabei überschätzt aber die GASFLOW-Rechnung von FZK (GASFZK1) die Konzentration im oberen Plenum stark. Zur TONUS-3d Rechnung von IRSN ist anzumerken, dass sie erst nach Veröffentlichung der experimentellen Daten eingesandt wurde, aber als blinde Rechnung gewertet wird. Das gesamte Experiment wurde nur von drei CFD-Teilnehmern blind gerechnet. Von diesen sagt nur noch GASFZK1 die Schichtung in Phase II richtig voraus in Phase III vermischt es das Helium abweichend vom Experiment im Versuchsbehälter.

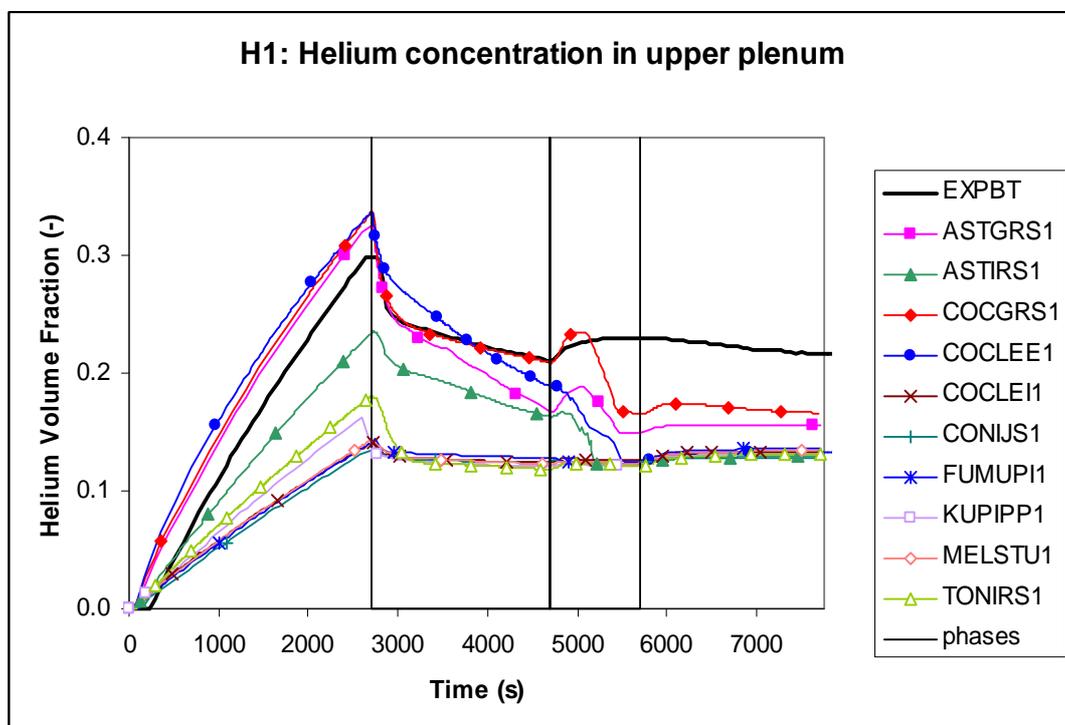


Abb. 1-98 ThAI ISP47, Helium-Konzentration im oberen Plenum bei 7.7 m, Experiment und komplett blinde Rechnungen, LP-Codes

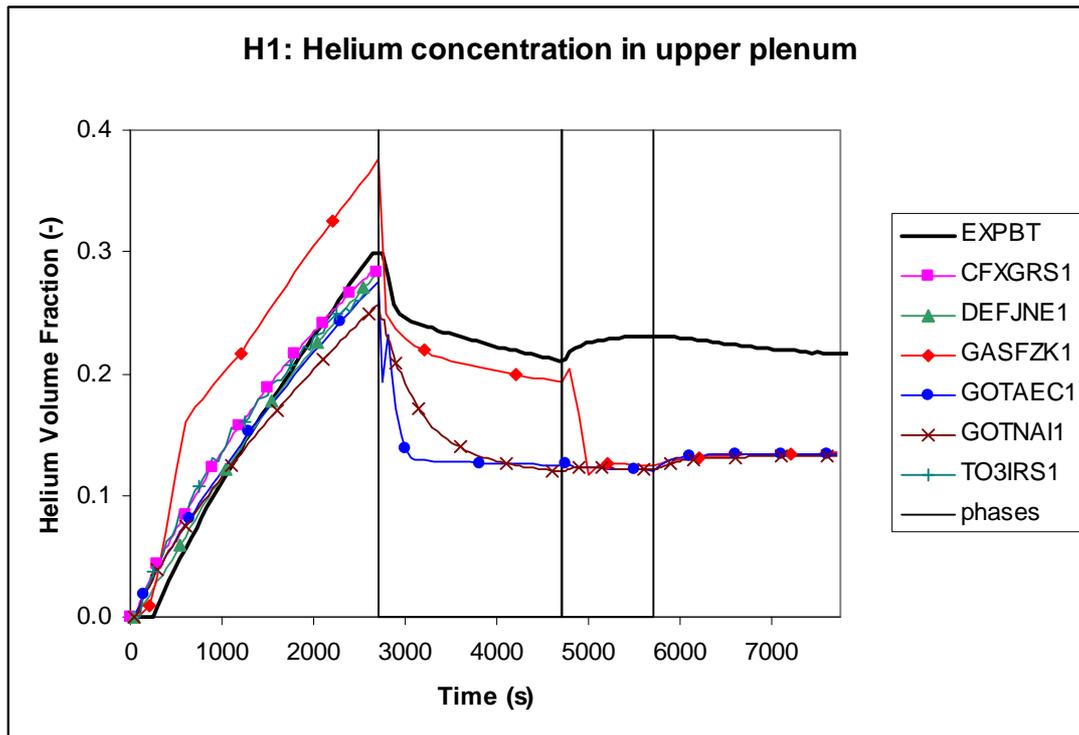


Abb. 1-99 ThAI ISP47, Helium-Konzentration im oberen Plenum bei 7.7 m, Experiment und komplett blinde Rechnungen, CFD-Codes

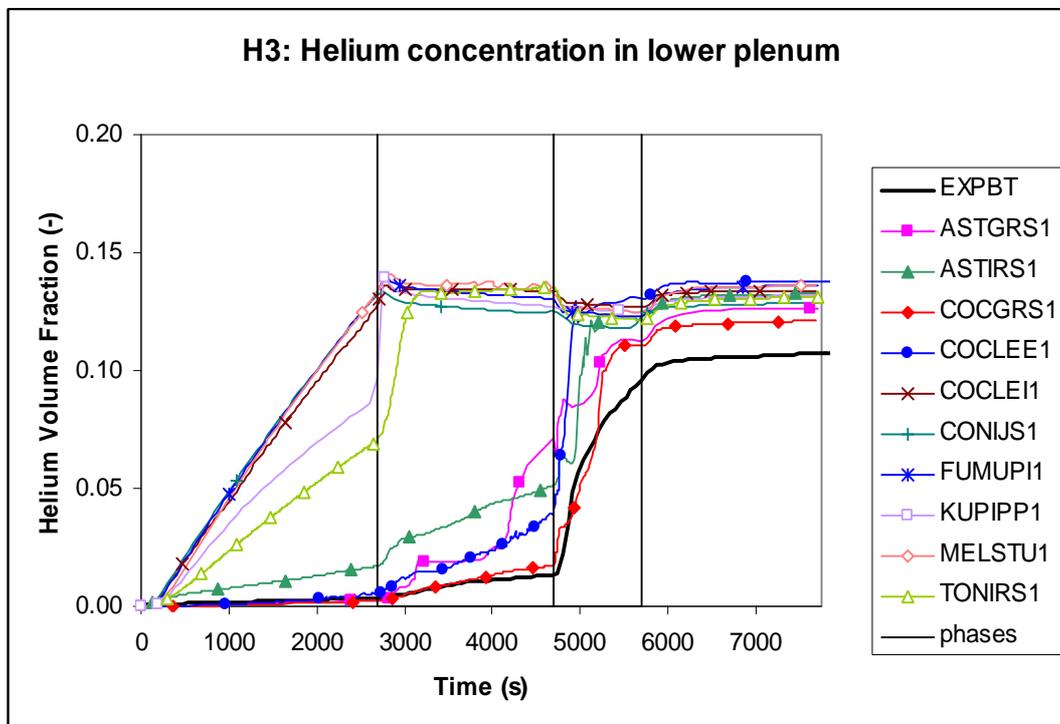


Abb. 1-100 ThAI ISP47, Helium-Konzentration im unteren Plenum, Experiment und komplett blinde Rechnungen, LP-Codes

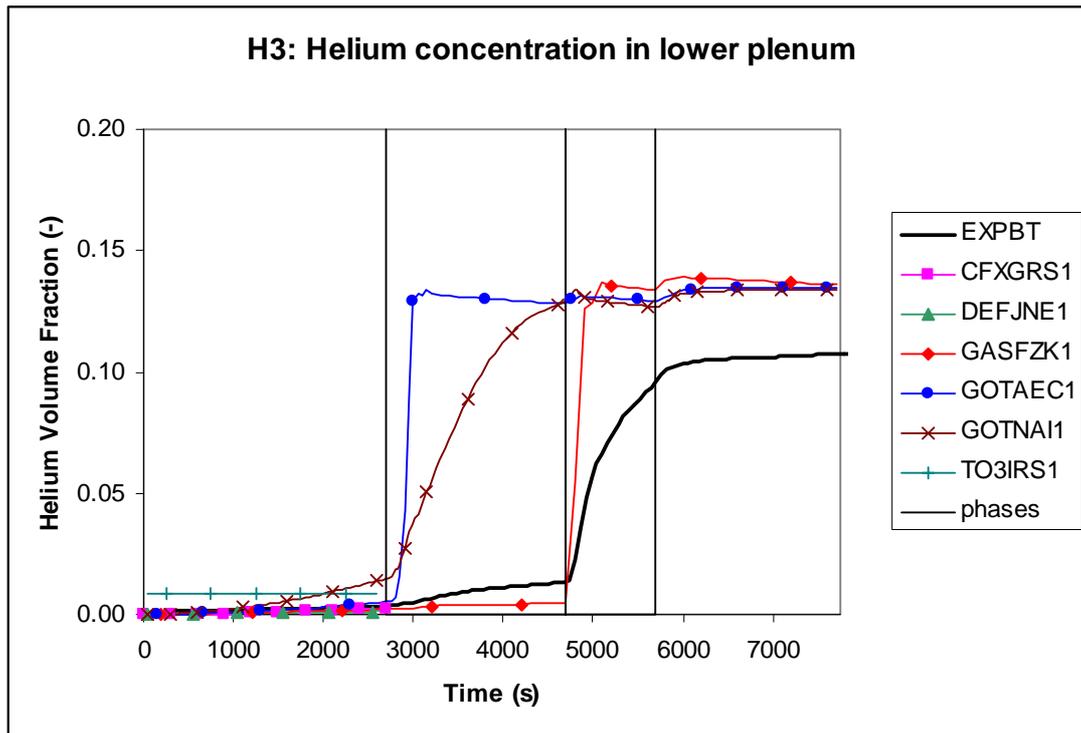


Abb. 1-101 ThAI ISP47, Helium-Konzentration im unteren Plenum, Experiment und komplett blinde Rechnungen, CFD-Codes

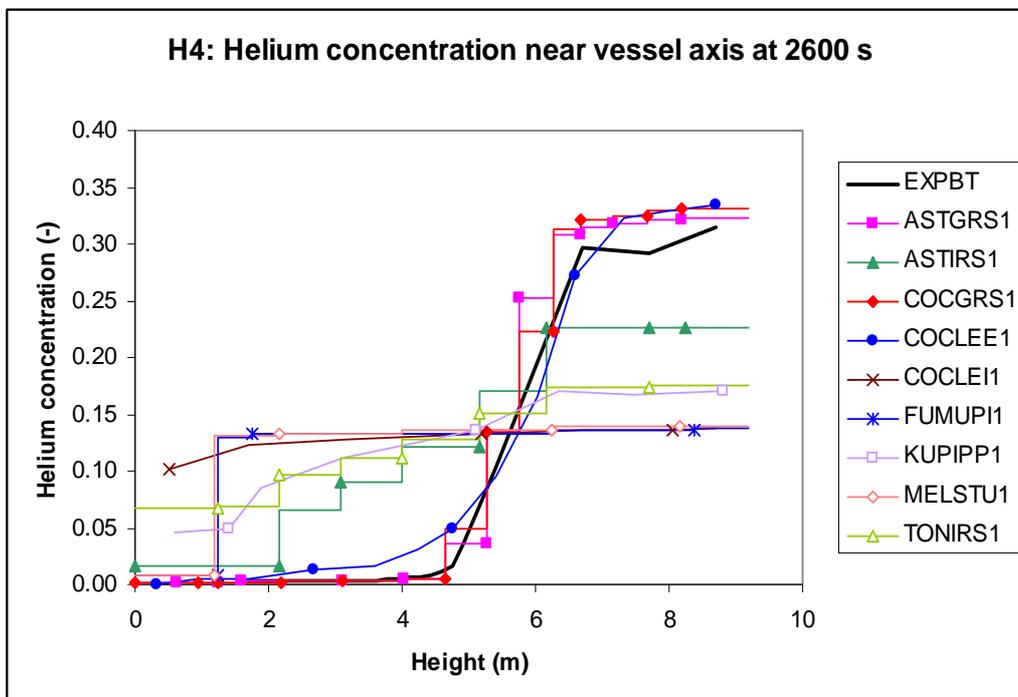


Abb. 1-102 ThAI ISP47, vertikaler Verlauf der Helium-Konzentrationen, bei 2600 s (Ende Phase I) Experiment und komplett blinde Rechnungen, LP-Codes

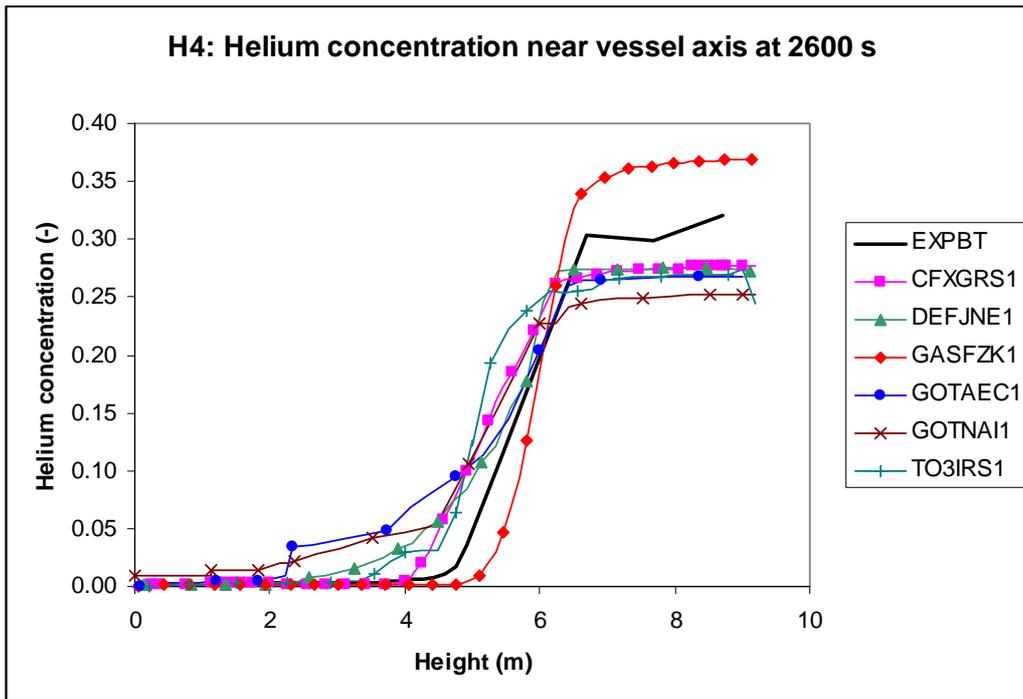


Abb. 1-103 ThAI ISP47, vertikaler Verlauf der Helium-Konzentrationen, bei 2600 s (Ende Phase I) Experiment und komplett blinde Rechnungen, CFD-Codes

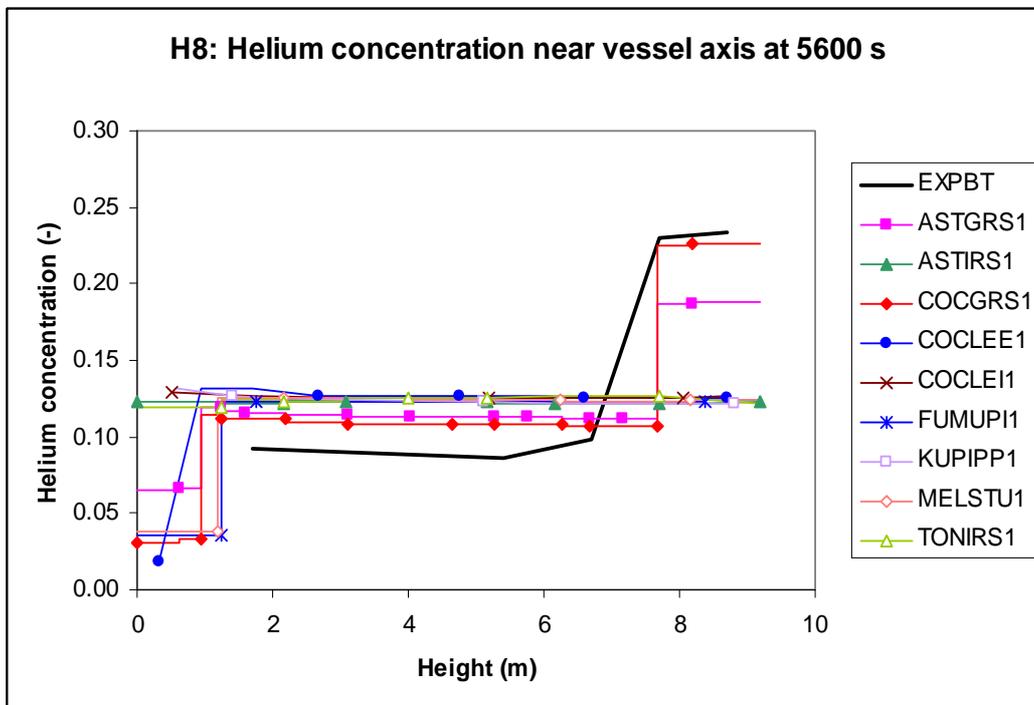


Abb. 1-104 ThAI ISP47, vertikaler Verlauf der Helium-Konzentrationen, bei 5600 s (Ende Phase III) Experiment und komplett blinde Rechnungen, LP-Codes

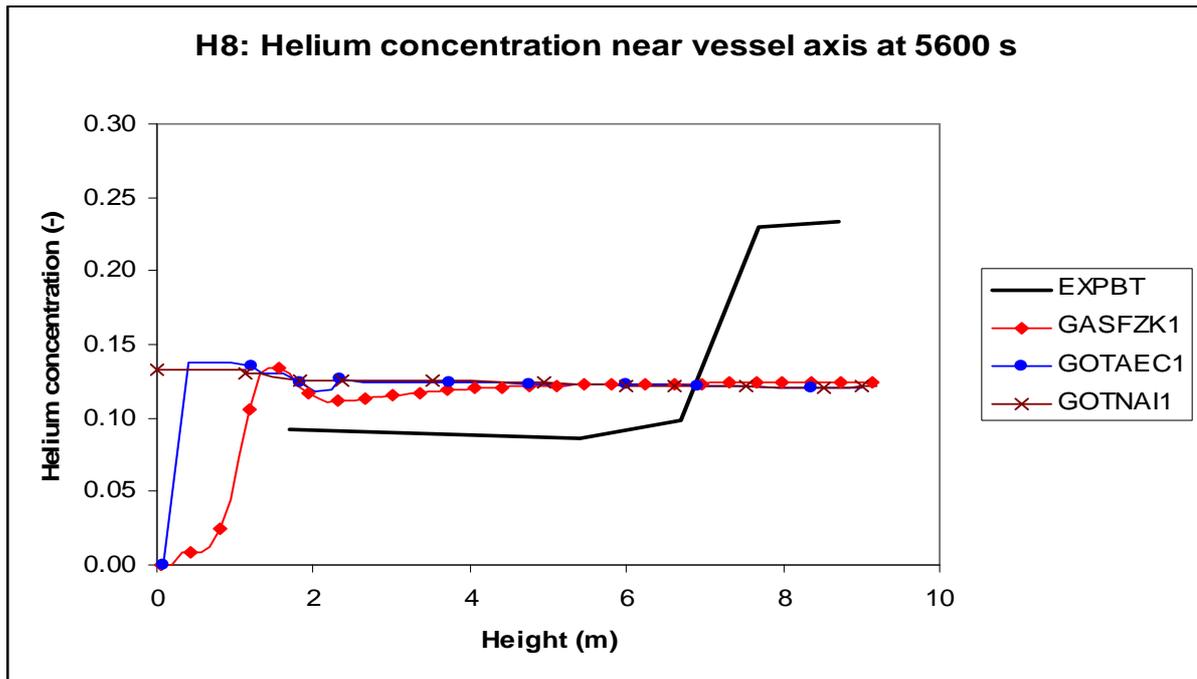


Abb. 1-105 ThAI ISP47, vertikaler Verlauf der Helium-Konzentrationen, bei 5600 s (Ende Phase III) Experiment und komplett blinde Rechnungen, CFD-Codes

Parameterstudien zur Heliumschichtung in Phase III

Das Nichtauflösen der Heliumschichtung in Phase III wurde nur von der GRS COCOSYS- und der GRS-ASTEC-Rechnung vorausgesagt. Einflüsse auf diesen Vorgang werden in Parameterrechnungen untersucht.

Heliumkonzentration zu Beginn der Phase III

In der Parameterrechnung COCdirect wird während der Phase I das Helium nicht in die Plumezonen sondern direkt in die Zone R4O.1 eingespeist. Somit ergibt sich eine weniger ausgeprägte Heliumschichtung als in den zum ISP47 eingereichten Rechnungen COCGRS1 und COCGRS2. Bei 4600 s, also zu Beginn der Phase III, ist die Heliumkonzentration 2 % niedriger als im Experiment und der Rechnung COCGRS1 und die Schichtung löst sich bis 5600 s, also kurz vor Beendigung der Phase III, auf (Abb. 1-106).

Parametric study: COGRS1, COCdirect, Experiment

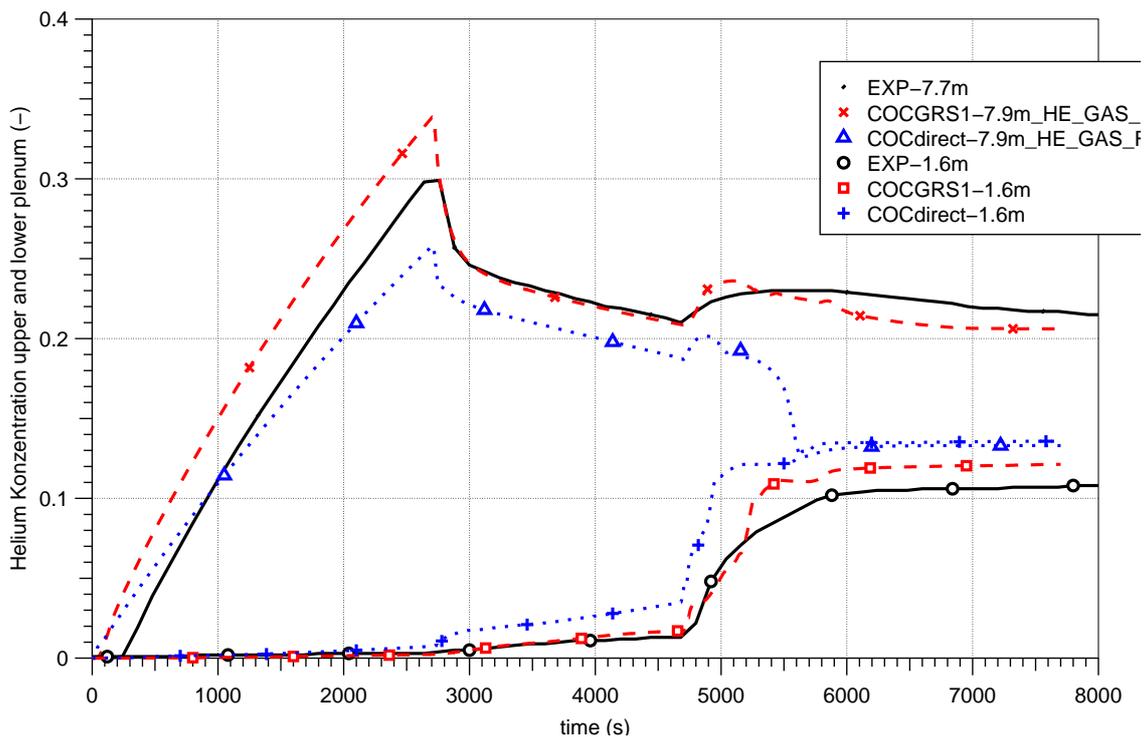


Abb. 1-106 ThAI ISP47, zeitlicher Verlauf der Helium-Konzentrationen im oberen und unteren Plenum, Experiment, Parameterstudie Heliumkonzentrationen zu Beginn der Phase III: COGRS1 experimenteller Wert, COCdirect 2 Vol.-% niedriger

Nodalisierungseinfluss

Keine Plumezonen über dem Innenzylinder

In der Parameterrechnung COC_noPlume-IZ sind im Gegensatz zu COGRS1 und COGRS2 die Plumezonen oberhalb des Innenzylinders R5U.3 und R5MU.3 nicht simuliert. Dadurch verbleibt die bei 7.4 m berechnete Heliumkonzentration über 20 %, während sie mit COGRS1 auf nahe 10 % absinkt (Abb. 1-107). Die bessere Übereinstimmung der Konzentrationen bei 1.6 m lässt darauf schließen, dass die Vorgänge mit COC_noPlume-IZ besser als mit COGRS1 simuliert werden. Dies wird auch durch die für 7.9 m berechneten Heliumkonzentrationen bestätigt (Abb. 1-108).

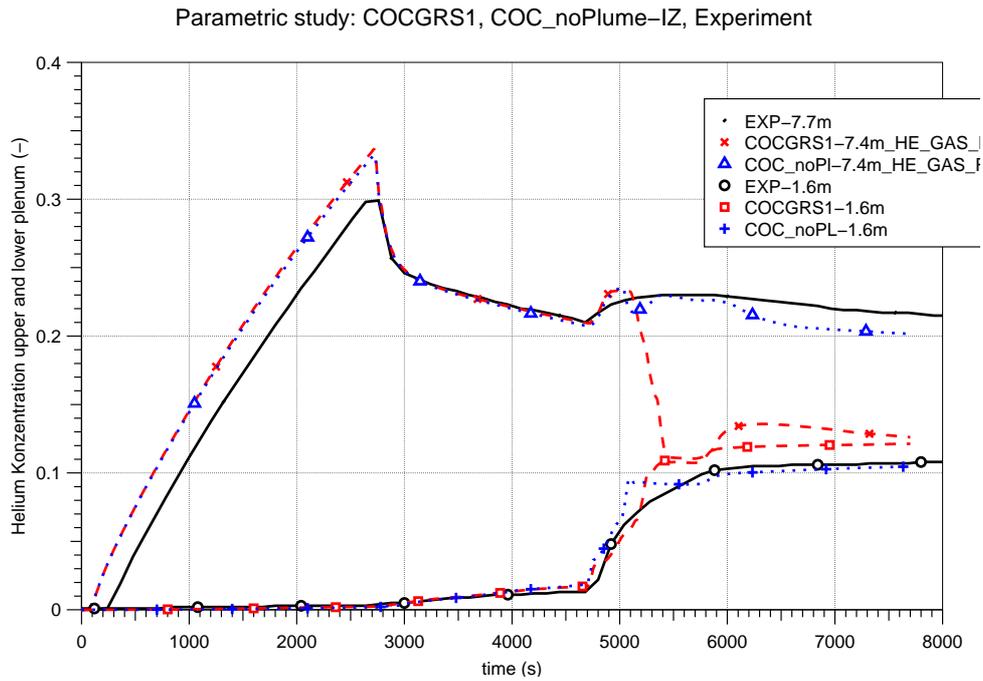


Abb. 1-107 ThAI ISP47, zeitlicher Verlauf der Helium-Konzentrationen im oberen und unteren Plenum, Experiment bei 1.6 und 7.7 m, COCOSYS-Parameterstudie bei 1.6 und 7.4 m: COGRS1 mit Plumezonen über dem Innenzylinder, COC_noPlume-IZ ohne Plumezonen

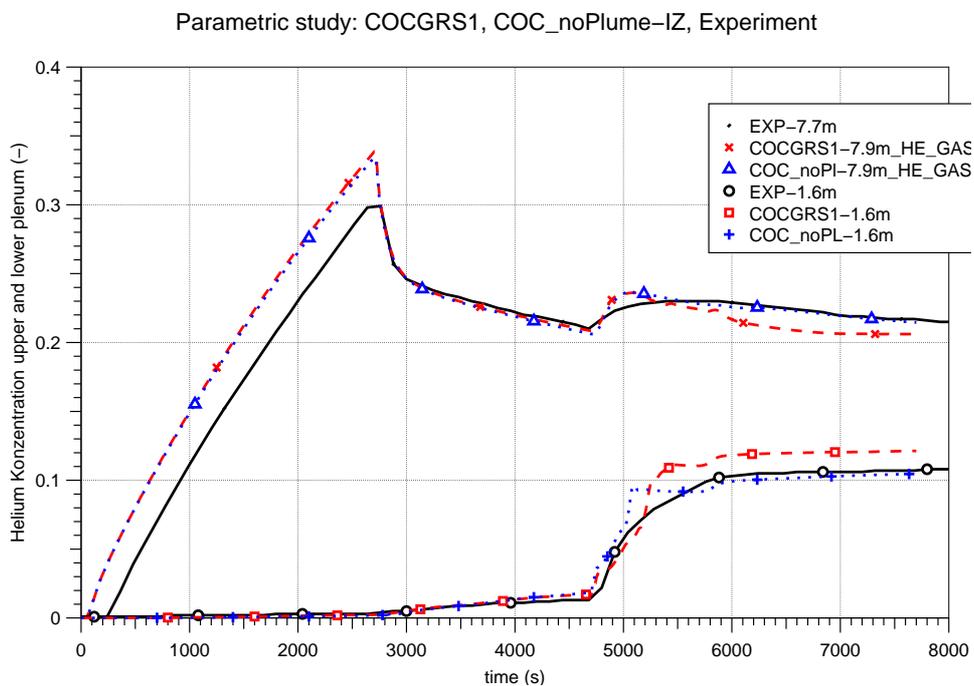


Abb. 1-108 ThAI ISP47, zeitlicher Verlauf der Helium-Konzentrationen im oberen und unteren Plenum, Experiment bei 1.6 und 7.7 m, COCOSYS-Parameterstudie bei 1.6 und 7.4 m: COGRS1 mit Plumezonen über dem Innenzylinder, COC_noPlume-IZ ohne Plumezonen

Vertikale Ausdehnung der Plumezonen über Innenzylinder

In den COCOSYS-Rechnungen zum ISP47 COCGRS1 und COCGRS2 gehen die Plumezonen über dem Innenzylinder bis auf die Behälterhöhe 7.2 m, also bis einschließlich zwei Ebenen bzw. oder bis ein 1 m oberhalb des Innenzylinders. In der Parameterrechnung COC_Plume -IZ gehen sie zwei Ebenen bzw. 2 m weiter nach oben also bis zu der Behälterhöhe 8.2 m. Dies bewirkt, dass sich die Schichtung zum Ende der Phase III vollständig auflöst (Abb. 1-109).

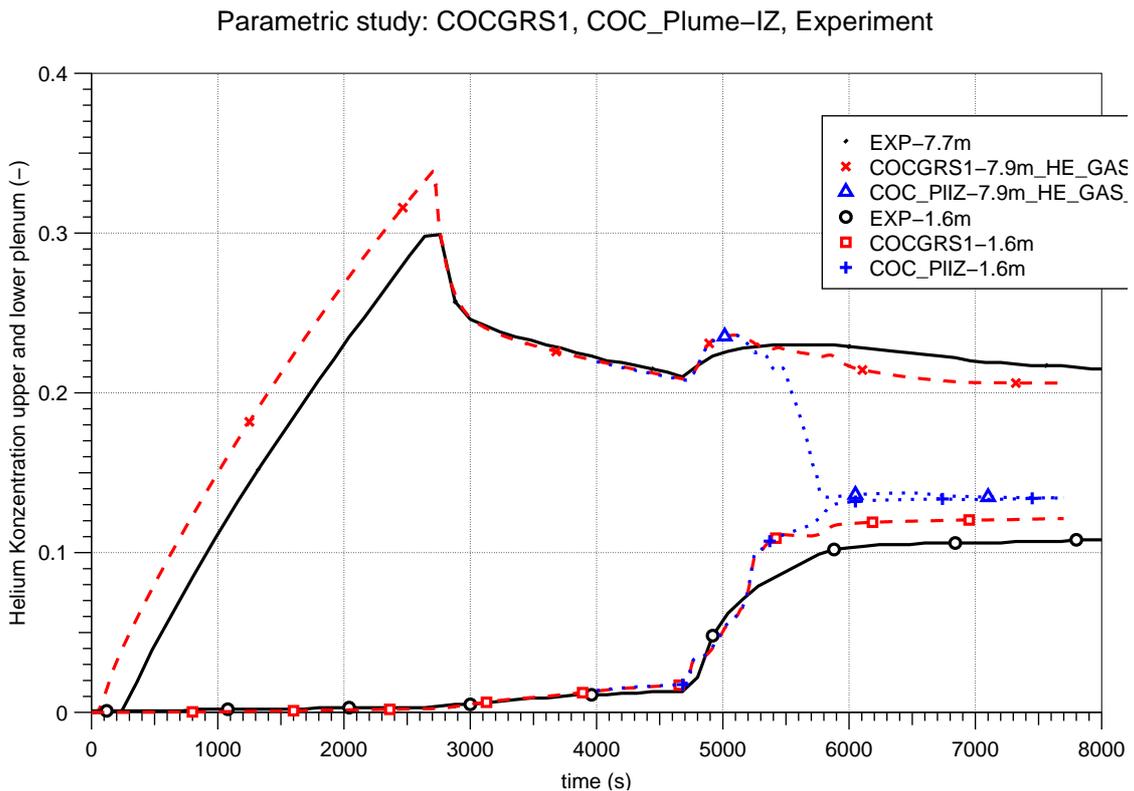


Abb. 1-109 ThAI ISP47, zeitlicher Verlauf der Helium-Konzentrationen im oberen und unteren Plenum, Experiment, Parameterstudie über vertikale Ausdehnung der Plumezonen über dem Innenzylinder: COCGRS1 – 1 m, COC_Plume-IZ – 2 m

Zusammenfassung zu ISP47 Step 2 – ThAI

- Die blinden GRS-Rechnungen mit COCOSYS und ASTEC waren die einzigen, die die Atmosphärensichtungen für das gesamte Experiment gut voraussagten.
- Die in den ersten zwei der vier experimentellen Phase aufgetretenen Schichtungen wurden mit unterschiedlicher Qualität auch von weiteren ISP-Teilnehmern mit COCOSYS und ASTEC vorausgesagt.

- Die gewählten Nodalierungen sind der Grund für die Abweichungen zwischen den Rechenergebnissen.
- Deshalb ist eine Verbesserung der Nodalierungs- und Modellierungsempfehlungen, sowie ein Training der Programmbenutzer notwendig.

2 Begleitung der ThAI-Versuche und deren Nutzung zur Validierung

2.1 Begleitung des ThAI-Versuchsprogramms und Mitwirkung bei dessen Planung

Den derzeit zentralen Baustein der COCOSYS-Validierung stellt die ThAI-Versuchsanlage dar. Nach zunächst grundlegenden und dann immer komplexer werdenden Thermohydraulik-Versuchen wurden in der ThAI-Versuchsanlage Daten zum Phasen- und Massentransfer von Jod im technischen Maßstab gewonnen. Dies war notwendig, weil die bis da verfügbaren Daten aus Versuchen im Labormaßstab gewonnen wurden, deren Übertragbarkeit auf Störfallbedingungen nicht sicher ist. Die in ThAI durchgeführten Versuche zum Phasen- und Massentransfer wurden für die weitere Verbesserung und Validierung des COCOSYS-Jodmoduls AIM genutzt.

Bei der Planung der in ThAI durchzuführenden Versuche ist eine intensive Mitwirkung erforderlich, um einen möglichst hohen Nutzen für COCOSYS zu erzielen. Die Vergangenheit hat gezeigt, dass eine enge analytische Begleitung für Versuchsprogramme, wie sie in ThAI durchgeführt werden, unabdingbar ist. Anlässlich in meist regelmäßigen Abständen stattfindender Expertentreffen werden die im vorangegangenen Zeitraum durchgeführten Versuche vorgestellt und deren Ergebnisse diskutiert, sofern sie nicht für 'blinde' Analysen herangezogen werden. Neben Interpretation und vorläufigen Schlussfolgerungen auf Basis durchgeführter Versuche werden die anstehenden neuen Versuche im Detail besprochen. Als Grundlage dazu dienen dazu Auslegungsrechnungen zur Thermohydraulik und zum Jodverhalten, die in weit überwiegendem Maße von der GRS mit COCOSYS durchgeführt werden. Die Anforderungen an Fahrweise, Instrumentierung und Probenahme werden dann festgelegt. Dies hat zur Folge, dass dann im Zeitraum zwischen Expertentreffen und Versuchsdurchführung in engem Kontakt mit der versuchsdurchführenden Stelle anhand weiterer Rechnungen ausgelotet wird, wie die o. g. vereinbarten Anforderungen am besten erfüllt werden können. Die im Rahmen dieses Vorhabens erfolgte analytische Begleitung ist ein unverzichtbarer Baustein, ohne den der herausragende Erfolg der bisherigen ThAI-Versuche nicht denkbar wäre.

Eine detaillierte Darstellung der zeitintensiven und oft unter erheblichem Zeitdruck durchgeführten Arbeiten ist nicht lohnend, da die wichtigen Ergebnisse der analyti-

schen Begleitung im Zuge der Darstellung der Versuchsergebnisse diskutiert werden und/oder durch die nachfolgenden Validierungsarbeiten im Detail erweitert werden.

Einen beispielhaften Einblick in die analytische Begleitung der ThAI-Versuche kann man sich in Kap. 5.4.2 von /WEG 05/ verschaffen, in dem die Ergebnisse der analytischen Begleitung der drei Jod-Mehrraumversuche aufbereitet sind.

2.2 Versuch ThAI TH10

2.2.1 Experiment

Versuchziele

Da die im internationalen Rahmen durchgeführten Computerrechnungen zum HDR-Versuch E11.2 unbefriedigende Ergebnisse geliefert hatten, wurde der ThAI-Versuch TH10 /KAN 03/ durchgeführt, mit dem Ziel unter gut bekannten Randbedingungen die bei E11.2 aufgetretenen Vorgänge besser verstehen zu können. Die Fahrweise war ähnlich wie in E11.2 und es wurden ähnliche Atmosphärenzustände hergestellt und untersucht:

- Atmosphärische Schichtung aufgrund von Dampfeinspeisung und anschließender Heliumeinspeisung in die obere Behälterhälfte

- Verhalten der geschichteten Atmosphäre bei:
 - Schwacher Dampfeinspeisung unten

 - Kondensieren des Dampfes in der oberen Behälterhälfte mittels des oberen Kühlmantels (Simulation des Außensprühens im E11.2)

Konfiguration des Versuchsbehälters

Die Konfiguration des Versuchsbehälters für TH10 ist in Abb. 2-1 dargestellt. Die Einbauten bestanden aus dem Innenzylinder, sowie den vier Kondensatwannen. Zusätzliche Abdeckbleche schränkten in Anlehnung an E11.2 die vertikalen Strömungsflächen ein (s. auch Abb. 2-1):

- auf der Oberkante des Innenzylinders zu zwei quadratischen Öffnungen von je 0.163 m^2 ,
- im Ringraum auf der Höhe der Kondensatwannen zu einer Öffnungen von 0.524 m^2 bei 135° und einer weiteren von 0.318 m^2 auf der gegenüberliegenden Seite.

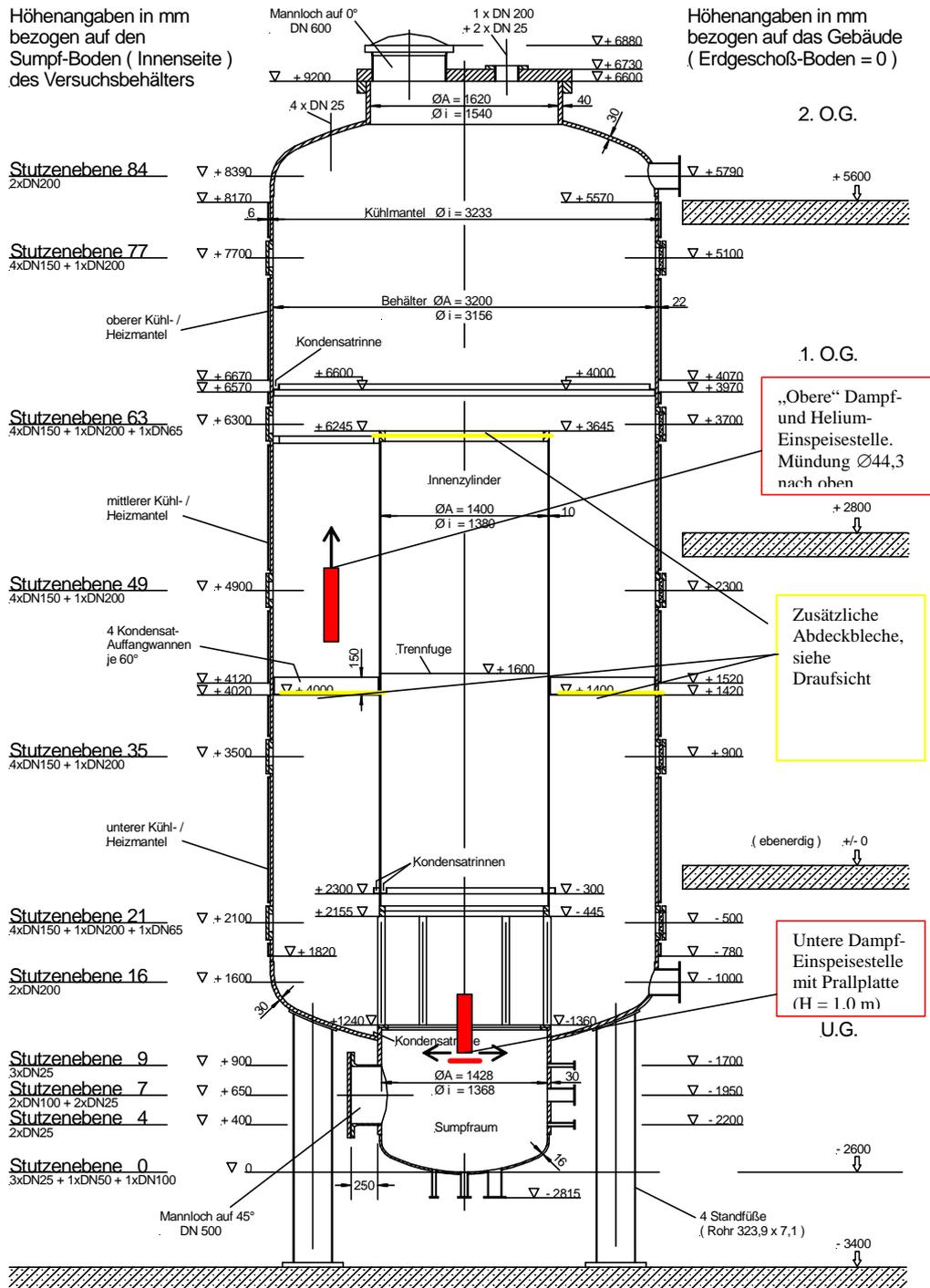


Abb. 2-1 Behälterkonfiguration bei Versuch ThAI TH10

- Anfangs- und Randbedingungen

Zu Beginn des Versuches betragen die Atmosphären- und Wandtemperaturen von unten nach oben zunehmend 20 bis 21.5 °C. Der Versuch bestand aus vier Phasen, die in Tab. 2-1 beschrieben sind. Die Einspeisepositionen sind Abb. 2-1 zu entnehmen, die Einspeiseverläufe für Dampf und Helium der Abb. 2-2 und der zeitliche Verlauf der Kühlleistung der Abb. 2-3.

Tab. 2-1: Fahrweise

Phase	Zeitbereich	Einspeisung
1	0 - 3.58 h	35 g/s Dampf, nach oben gerichteter Freistrahler bei 5 m Höhe im Ringraum, bei 2.28 h Druckreglung der Einspeisung auf 1.8 bar
2	3.58 – 4.32 h	4 g/s Dampf und insgesamt 1.03 kg Helium, nach oben gerichteter Freistrahler bei 5 m Höhe im Ringraum
3	4.32 - 6.42 h	5.1 g/s Dampf, bei 1 m Höhe in Behältermite gegen eine horizontale Prallplatte
4	6.5 - 14 h	Kühlen des oberen Kühlmantels (6.67 bis 8.17 m Höhe). Die Kühlleistung startet mit 12 KW und nimmt mit sinkenden Behältertemperaturen ab. Bei 12.3 h wird sie auf das zu diesem Zeitpunkt mögliche Maximum von 7.6 KW erhöht.

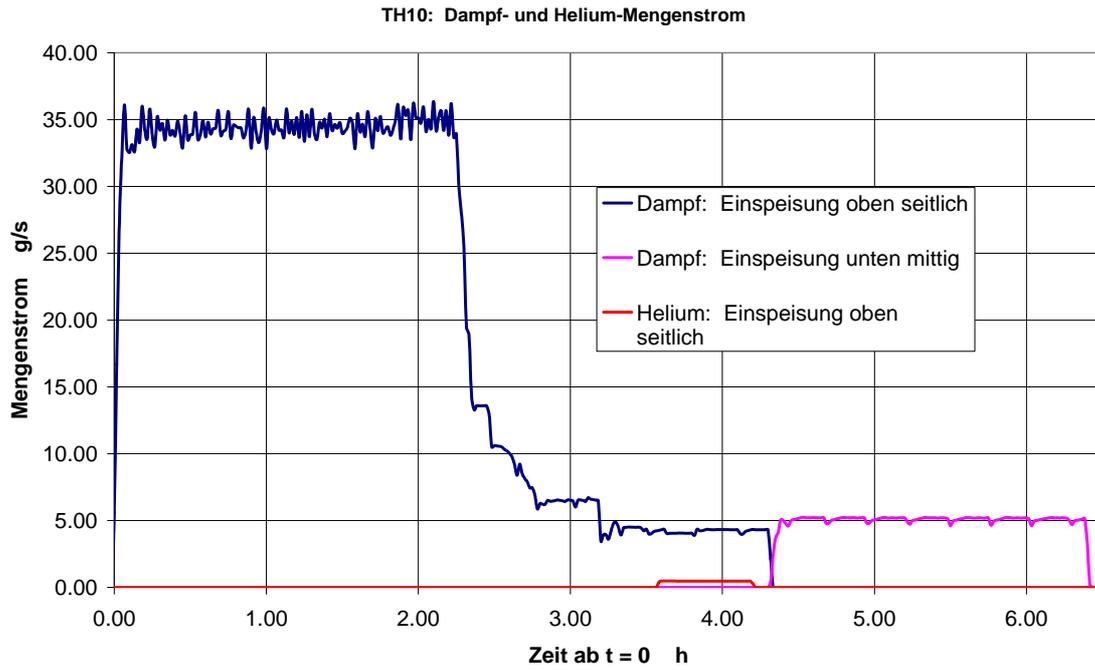


Abb. 2-2 ThAI TH10 Dampf- und Heliumeinspeisung

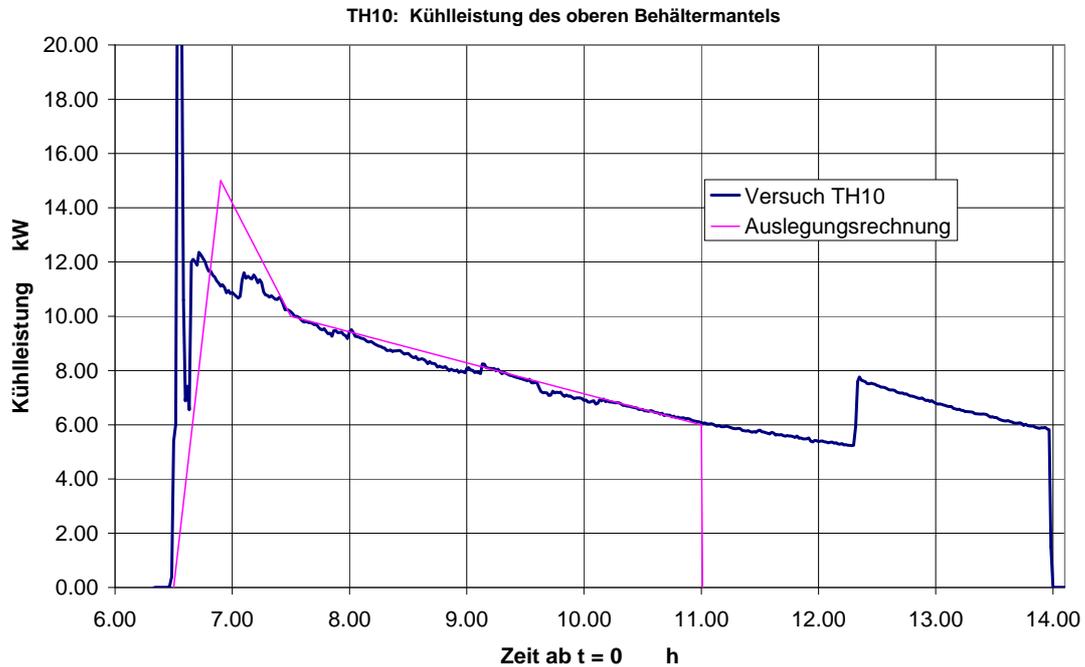


Abb. 2-3 ThAI TH10 Kühlleistung

2.2.2 COCOSYS-Simulationen

Zum Versuch TH10 wurden zwei blinde COCOSYS-Nachrechnungen eingereicht /SCH 04a/. In der ersten Rechnung wurde Filmverdampfung nicht berücksichtigt, in der folgenden wohl. Gezeigt werden hier die Ergebnisse der Rechnung mit Simulation der Filmverdampfung. Da aus der Analyse dieser Ergebnisse hervorging, dass das Rechenprogramm die Gasdiffusion stark überschätzt, wurde diese in einer offenen Nachrechnung modifiziert, was tatsächlich zu besseren Resultaten führte.

Gerechnet wurde mit COCOSYS Version 2.0ABI.

Die Nodalisierung der Behälteratmosphäre umfasst 41 Zonen, die 15 Ebenen bilden (s. Abb. 2-4). Sie ist eine Erweiterung der zu den Versuchen TH2 /ALL 03/ und TH7 /FIS 03/ benutzten Nodalisierungen. Für TH10 wurde das obere Plenum (R5) zusätzlich vertikal vierfach unterteilt.

Die Zonen mit der Endung ".1" simulieren den Winkelabschnitt von 15° bis 255° , die mit der Endung ".2" den Abschnitt von 255° über 0° bis 15° . Der Raum im Innenzylinder wird durch einen äußeren Ring (".3") und einen Innenbereich (".4") abgebildet (Abb. 2-5).

Die Wärmeabfuhr aus dem oberen Kühlmantel wird dynamisch berechnet. Das heißt, der Ölpalt wird mit 3 hintereinander geschalteten Zonen beschrieben, die jeweils mit den Zonen R5MU.1,2, R5MO.1,2 sowie R5O.1,2 über Heatslabs, die die Behälterwand simulieren, Wärme austauschen können. Das Thermoöl wird mit dem gemessenen Massenstrom und der gemessenen Eintrittstemperatur eingespeist.

Der sich an der Einspeisestelle bei 5 m ausbildenden Freistrahler wird gemäß /SCH 04b/ analytisch erfasst. Dabei geht während der starken Dampfeinspeisung von 35 g/s die Wurfweite bis in die Zone R6, während der schwachen Dampfeinspeisung und He-Einspeisung aber nur bis in die Zone R4O.2.

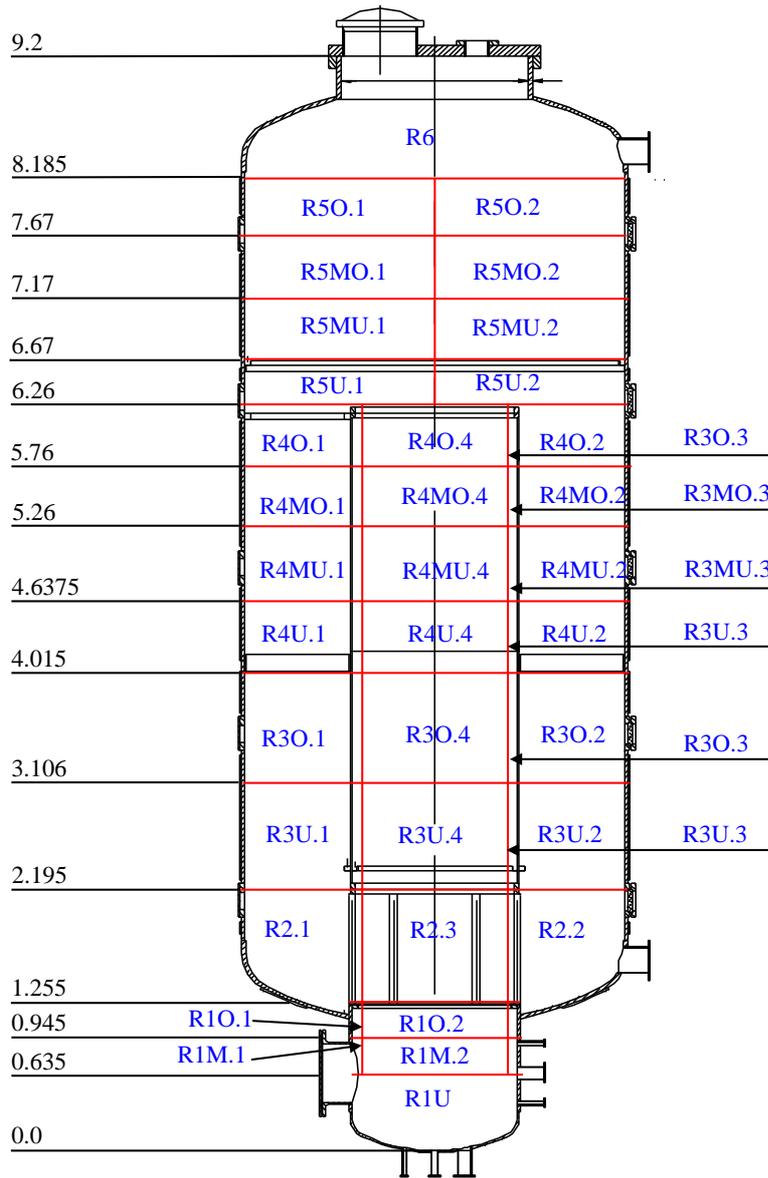


Abb. 2-4 COCOSYS-Nodalisierung zu ThAI TH10, blinde und offene Rechnung

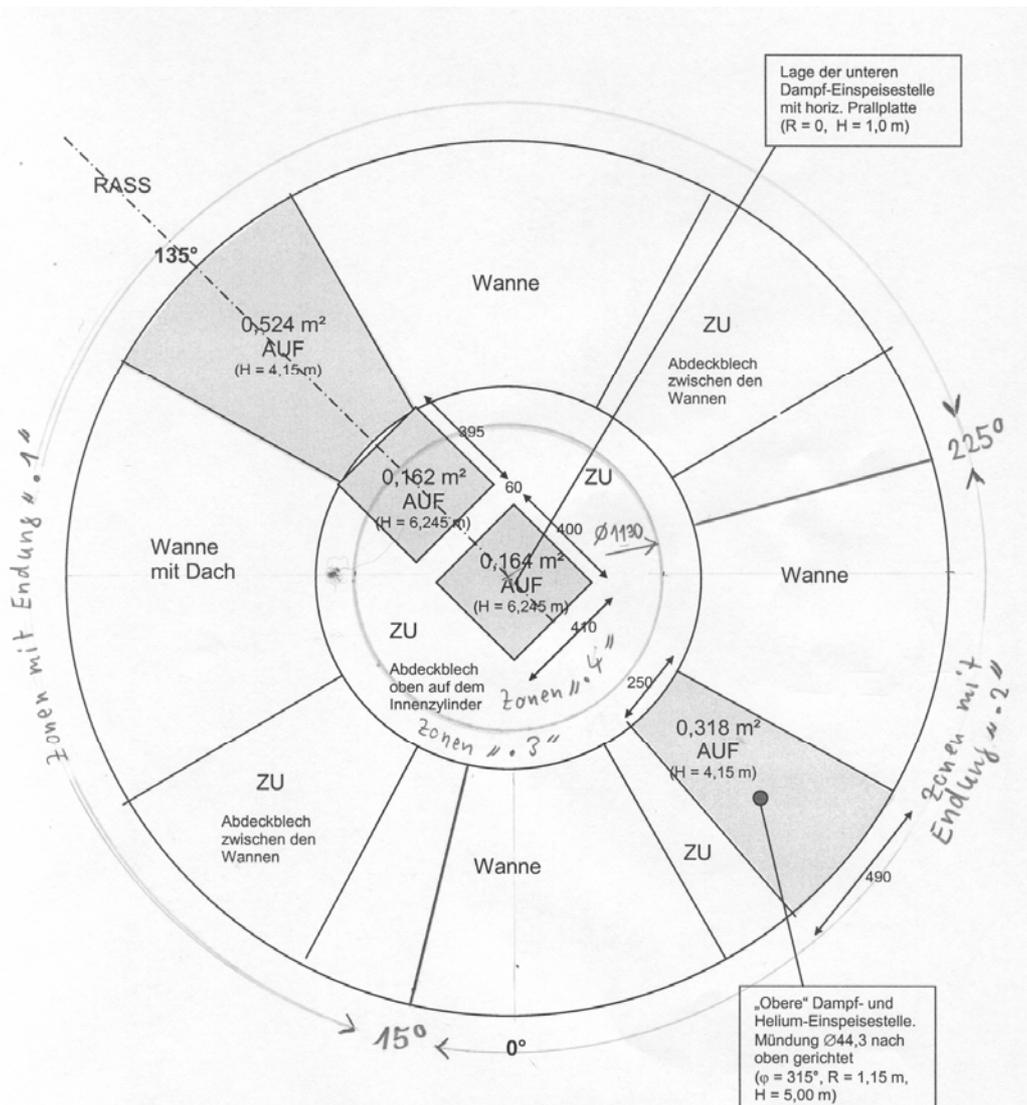


Abb. 2-5 COCOSYS-Nodalisierung zu ThAI TH10, Querschnitt

Während der Kühlphase 4 des Experimentes nimmt der Dampfpartialdruck stark ab und die Sättigungstemperatur sowie die Temperatur der Atmosphäre sinken in fast allen Behälterbereichen unter die Wandtemperatur. Der sich wegen der vorhergegangenen Kondensation an den Wänden gebildete Wasserfilm verdampft, dabei trägt die in den Wänden gespeicherte Wärme wesentlich zur Verdampfung bei. Da, als die Rechnungen durchgeführt wurden, noch kein diesen Vorgang beschreibendes Modell in COCOSYS vorhanden war, wurde dieser mittels Eingabeänderungen in einem Restart bei 6.4 h beschrieben. Dabei wurde mit Ausnahme des oberen Kühlmantels die Wärmeübergangsoptionen der Strukturen von INNER auf BOTTOM geändert, sowie die Bodenfläche der Zonen auf die Größe der Wandfläche gesetzt. Auf diese Weise gibt die Wand ihre Wärme an das in der Zone befindliche Wasser ab, bis dieses vollständig verdampft ist, was die Atmosphärenfeuchte auf hohen Werten hält. Ohne diese Re-

startänderung gibt die Wand ihre Wärme an die Atmosphäre ab, was zu niedrigen Feuchten führt. Es verdampft nur das Kondensat, das nicht von den Wänden abfließt, dies wurde mit einer durchschnittlichen Filmdicke von 0.1 mm abgeschätzt.

2.2.3 Rechenergebnisse

Der Atmosphärendruckverlauf (Abb. 2-6) wird von der blinden als auch von der offenen Rechnung bis auf geringe Abweichungen gut beschrieben. Dies gilt sowohl für die Druckanstiege und die Plateaus der Einspeisephase 1 bis 3 (0 bis 6.4 h), wie auch für die Druckabsenkung aufgrund der Dampfkondensation in der folgenden Kühlphase 4.

Auch die örtlichen Temperaturverläufe der Behälteratmosphäre (Abb. 2-7) werden gut von beiden COCOSYS-Rechnungen vorausgesagt. So steigt wegen der starken Dampfeinspeisung bei 5 m die Temperatur im oberen Behälterbereich zunächst schnell an, bleibt dann während der verringerten Einspeisung annähernd konstant und nimmt mit Einsetzen der Kühlung ab. Der untere Behälterbereich hingegen bleibt zunächst kalt. Die Dampfeinspeisung bei 1 m führt zu einer kleinen Temperaturerhöhung, was aber nicht ausreicht, die Temperaturschichtung aufzulösen.

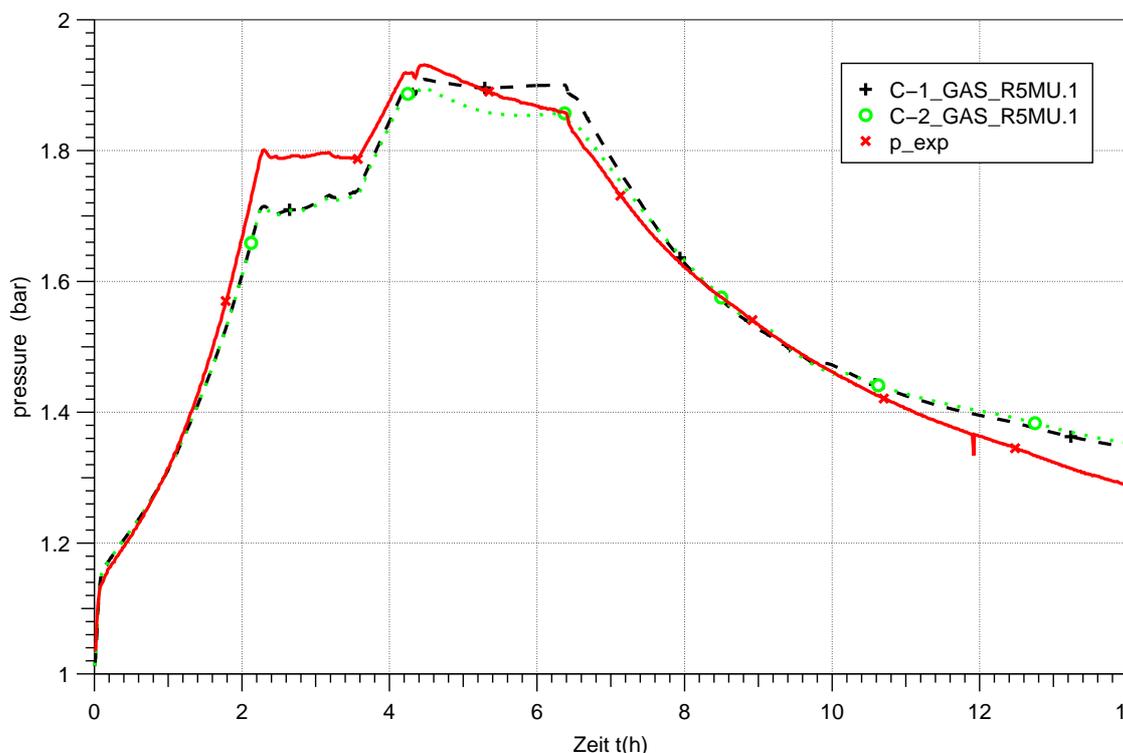


Abb. 2-6 ThAI TH10, Atmosphärendruck, Experiment, blinde (C-2) und offene (C-1) COCOSYS-Rechnung

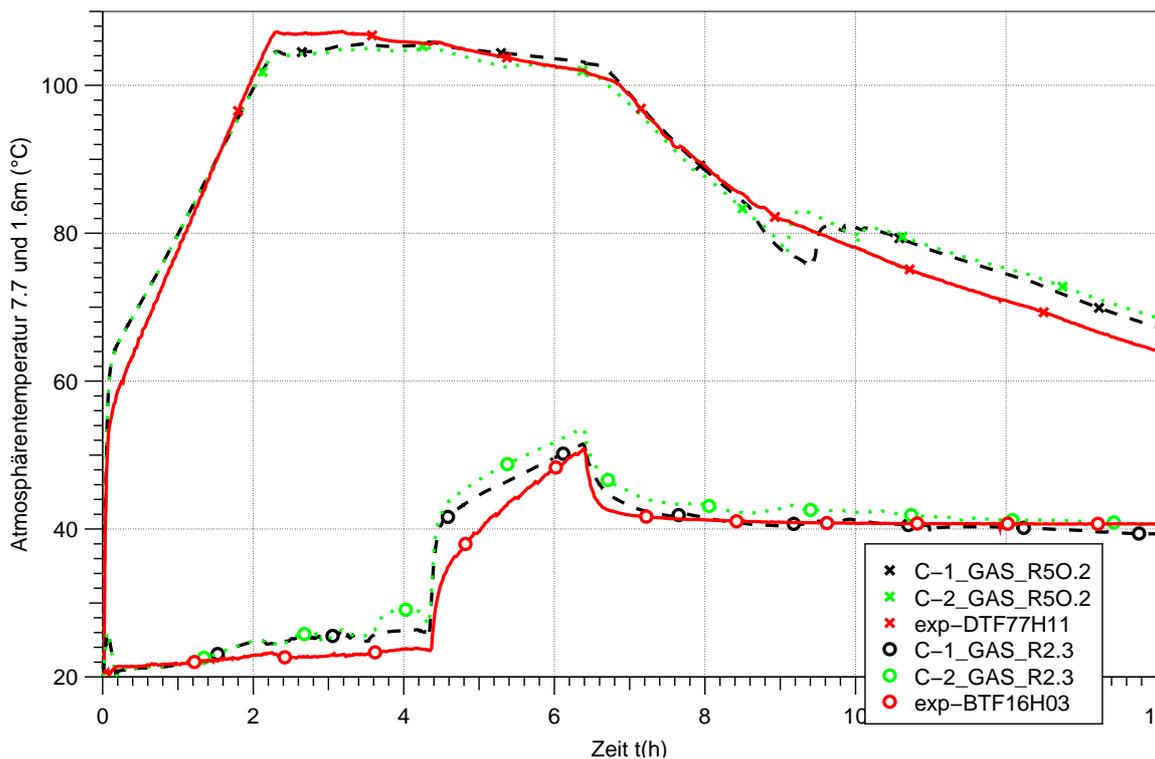


Abb. 2-7 ThAI TH10, Atmosphärentemperaturen bei 1.8 und 7.7 m, Experiment, blinde (C-2) und offene (C-1) COCOSYS-Rechnung

Im Experiment vermischt sich das bei 5 m Höhe eingespeiste Helium zunächst hauptsächlich mit dem Dampf in den darüber liegenden Behälterbereichen. Dies ist aus den hohen Heliumkonzentrationen ab 5.7 m Höhe in Abb. 2-8 ersichtlich. Mit Beendigung der oberen Dampfeinspeisung bei 4.3 h nimmt aufgrund von Dampfkondensation das Volumen dieser Helium-Luft-Dampfwolke ab und sie zieht sich in höhere Behälterregionen zurück. Dies ist daran zu erkennen, dass die Heliumkonzentrationen ab 6.7 m Höhe ansteigen und die darunter liegenden absinken. Die ab 6.5 Stunden einsetzende Kühlung verstärkt diesen Effekt zunächst. Später setzt eine Atmosphärenvermischung ein, die sich aber nur auf den Bereich oberhalb der Kondensatwannen (4 m Höhe) beschränkt. In die darunter liegende Bereiche gelangt nur wenig Helium.

Die offene COCOSYS-Rechnung gibt das experimentelle Verhalten gut wieder. Die blinde Rechnung sagt zwar die Gasverteilung am Ende der Helium-Einspeisung gut voraus, überschätzt jedoch während der folgenden 10 h den Transport von Helium von den oberen in die unteren Behälterbereiche (Abb. 2-9 bis Abb. 2-11), was auf das Gasdiffusionsmodell von COCOSYS zurückzuführen ist.

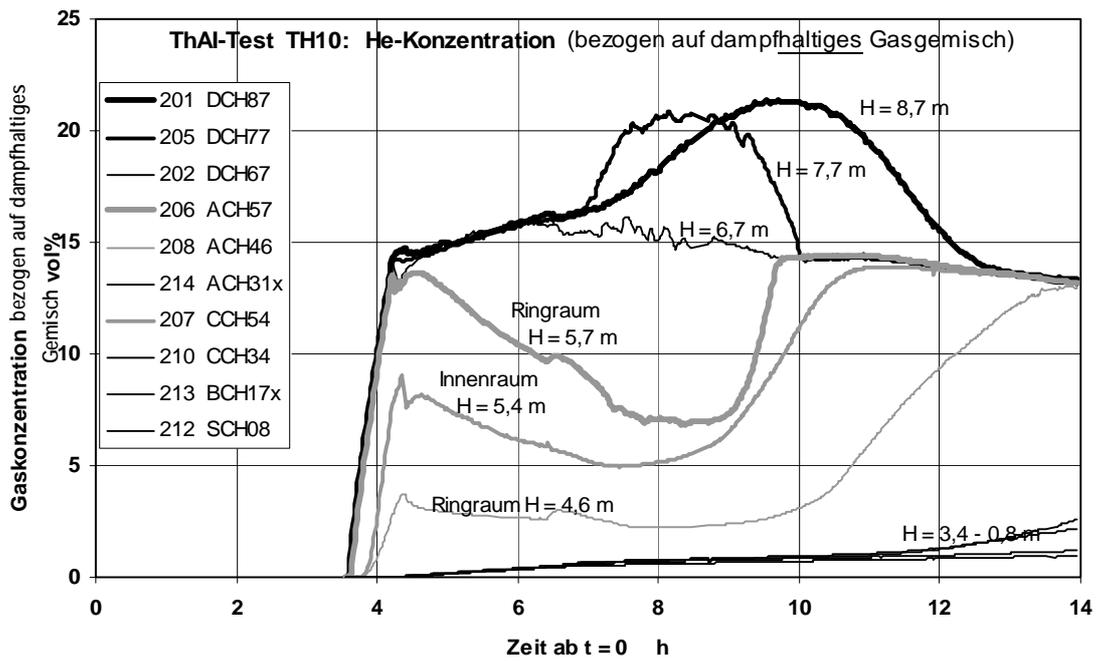


Abb. 2-8 ThAI TH10 Helium-Konzentrationen Experiment

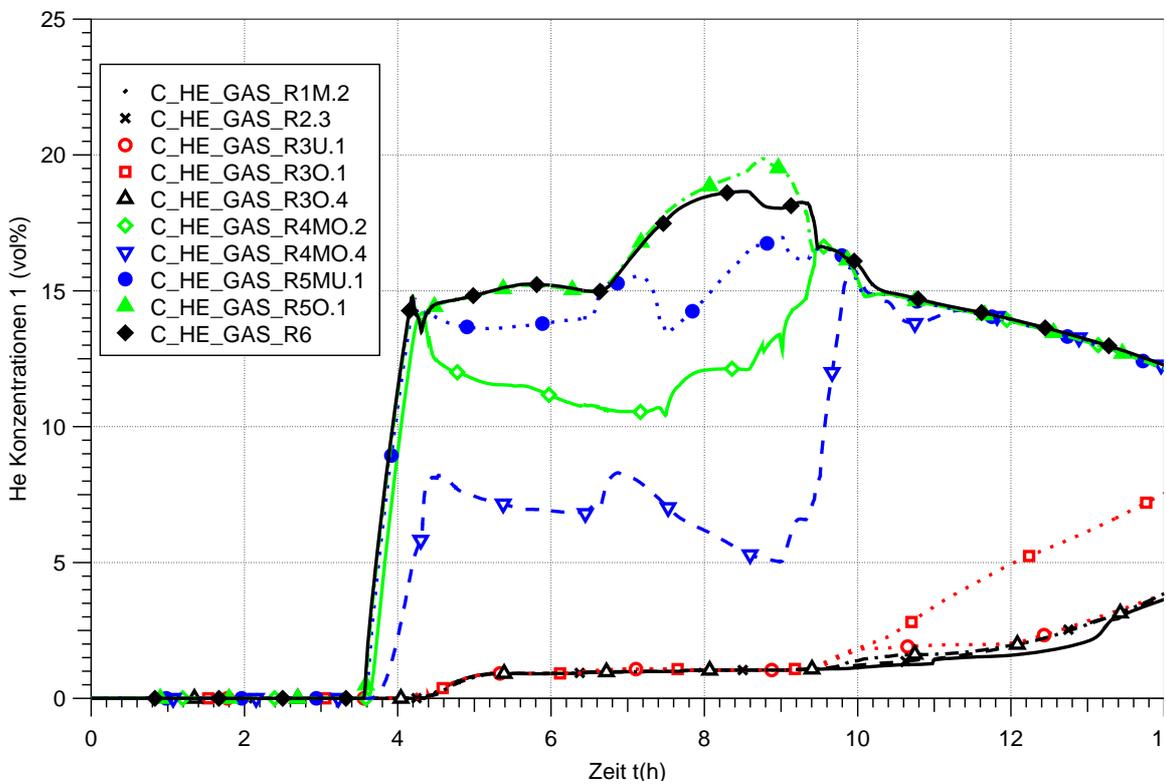


Abb. 2-9 ThAI TH10 Helium-Konzentrationen offene COCOSYS-Rechnung

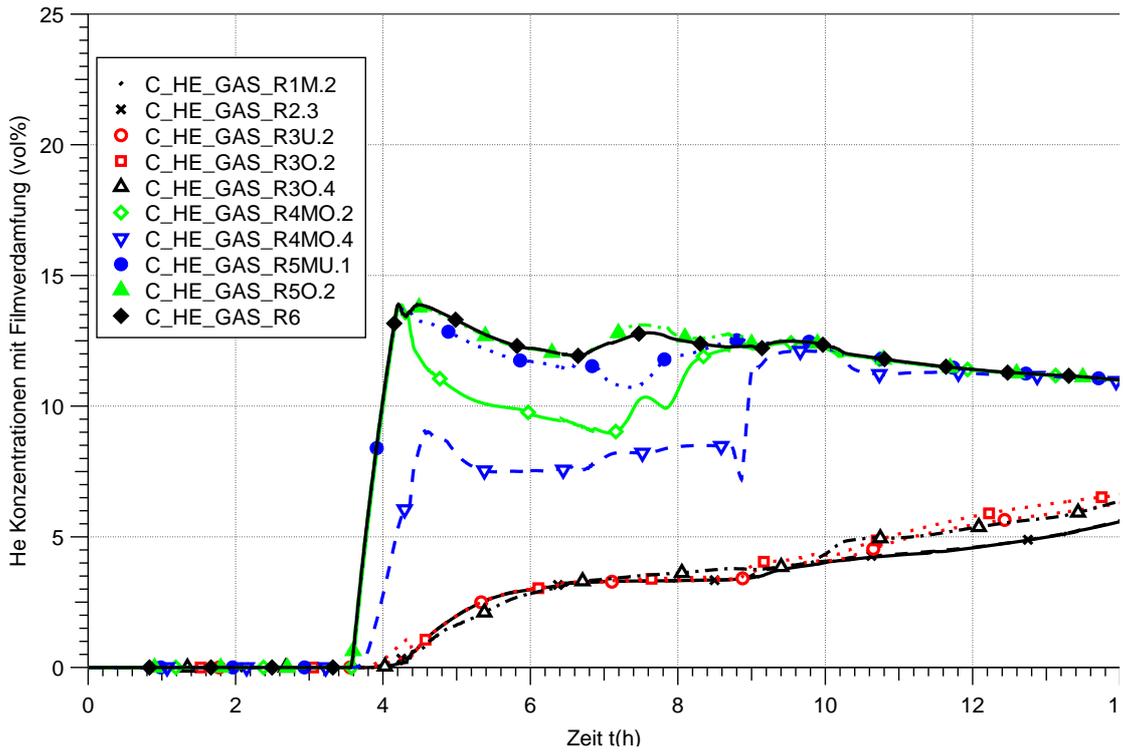


Abb. 2-10 ThAI TH10 Helium-Konzentrationen blinde COCOSYS-Rechnung

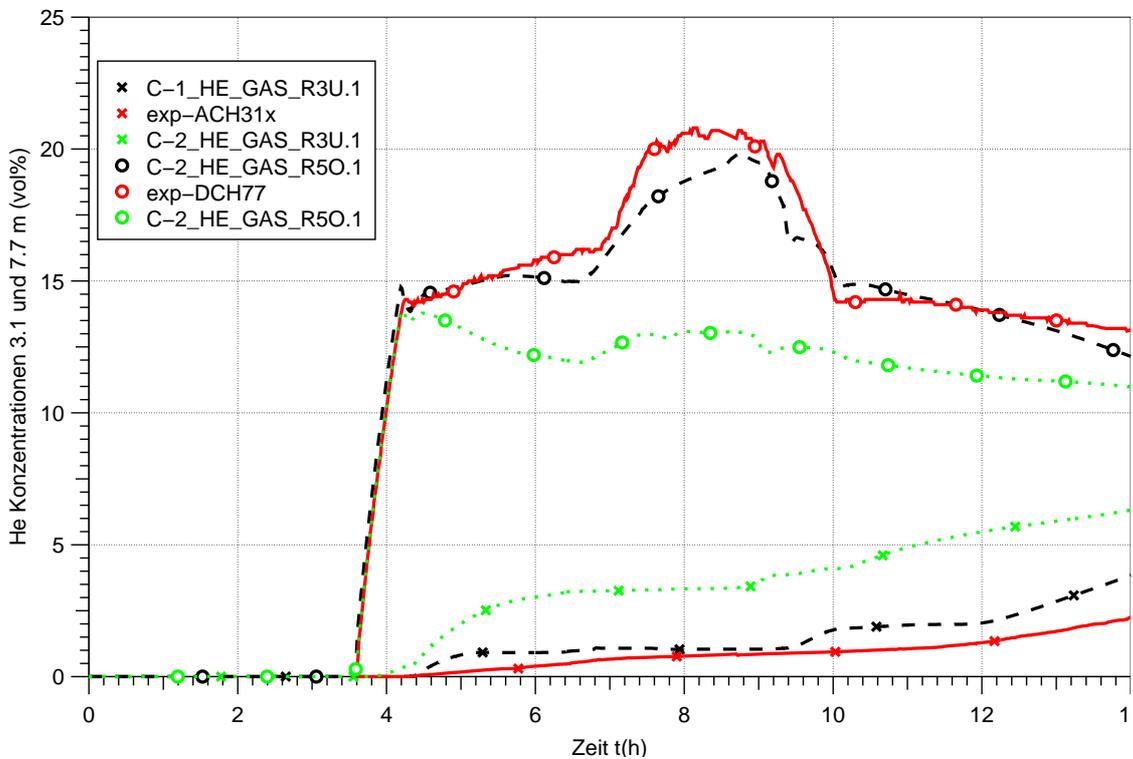


Abb. 2-11 ThAI TH10 Helium-Konzentrationen bei 3.3 und 7.7 m, Experiment, blinde (C-2) und offene (C-1) COCOSYS-Rechnung

- Parameterstudie zur Filmverdampfung

In der blinden und der offenen COCOSYS Rechnung ist mittels eines Restarts ab 6.4 h berücksichtigt, dass in der Kühlphase 4 die in den Wänden gespeicherte Wärme nicht direkt in die Behälteratmosphäre, sondern in den zuvor gebildeten Kondensatfilm fließt und diesen verdampft (siehe Unterkapitel COCOSYS-Simulation). Wird diese Filmverdampfung nicht simuliert, geht die Atmosphäre zu früh vom gesättigten in den überhitzten Zustand (Abb. 2-12). Mit Filmverdampfung wird der Verlauf der Atmosphärenfeuchte besser beschrieben. Die Atmosphäre geht in Überhitzung, wenn in der Rechnung das an der Wand befindliche Kondensat verdampft ist. Das ist wie im Experiment bei 9.4 h der Fall.

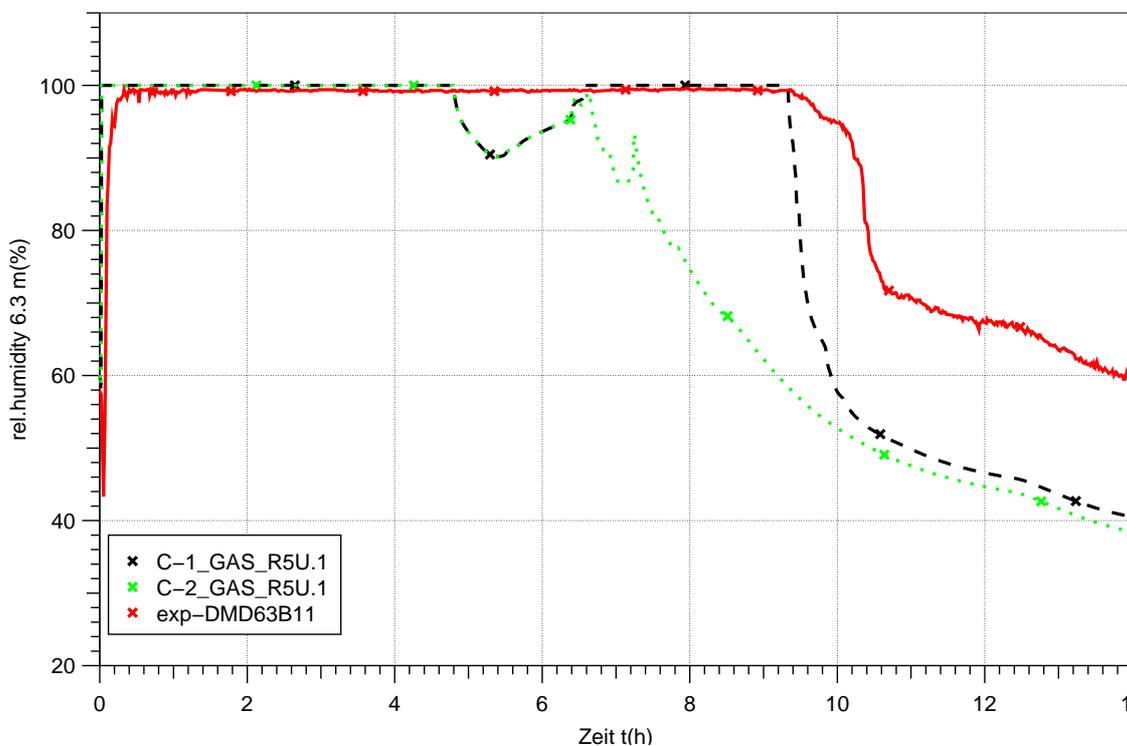


Abb. 2-12 ThAI TH10 Atmosphärenfeuchte bei 6.3 m, Experiment, (C-1) offene Nachrechnung mit Filmverdampfung, (C-2) Parameterstudie ohne Filmverdampfung

Die Simulation der Filmverdampfung verbessert auch die Berechnung der Heliumverteilung (Abb. 2-13).

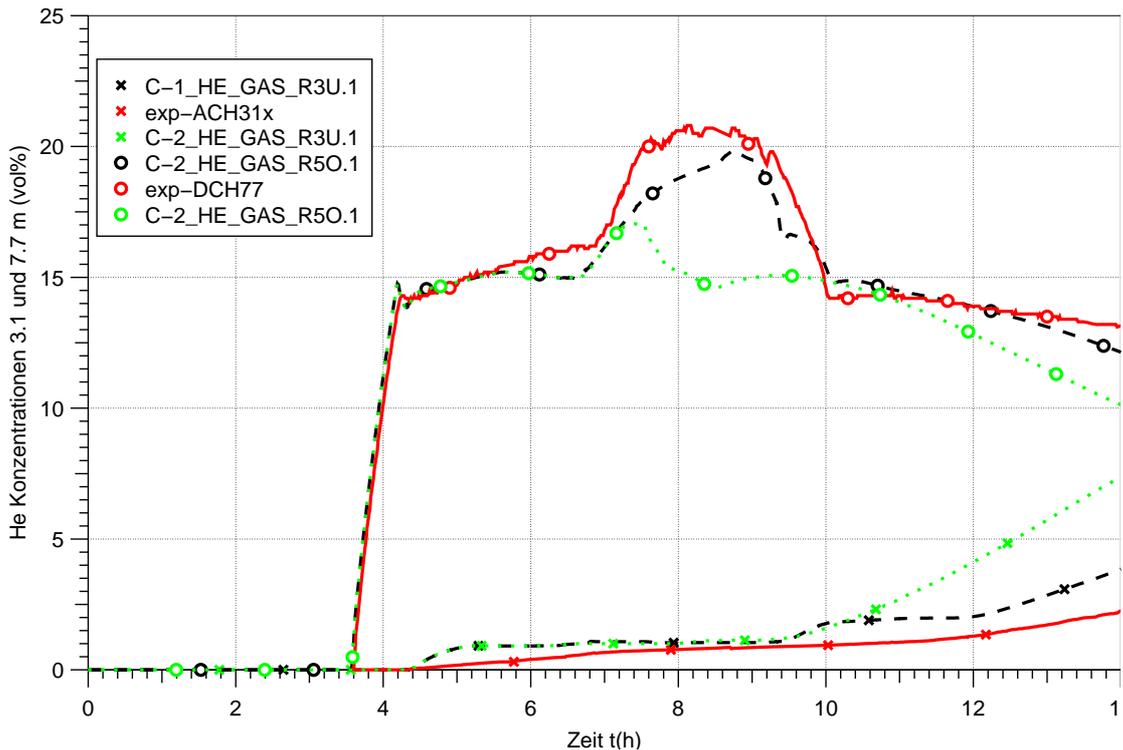


Abb. 2-13 ThAI TH10 Heliumkonzentrationen bei 3.1 und 7.7 m, Experiment, (C-1) offene Nachrechnung mit Filmverdampfung, (C-2) Parameterstudie ohne Filmverdampfung

2.2.4 Vergleich zum HDR-Versuch E11.2

Das Atmosphärenverhalten des ThAI Versuchs TH10 ist - wie beabsichtigt - sehr ähnlich zu dem des HDR-Versuchs E11.2. In beiden bildete sich in den oberen Behälterbereichen eine Helium-Luft-Dampf Wolke aus, deren Volumen sich aufgrund von Dampfkondensation verkleinerte. In die darunter liegende Bereiche gelangte nur wenig Helium. Auch eine Dampfeinspeisung unten änderte diesen Zustand nicht. Erst am Ende der Kühlphase wichen die Experimente voneinander ab. Während bei TH10 die Helium-Schichtung erhalten blieb, kam es bei E11.2 zu einer Durchmischung.

Die Computerrechnungen zu E11.2 überschätzten den Transport von Helium von den oberen zu den unteren Behälterbereichen, ähnlich wie die offene COCOSYS-Rechnung zu TH10.

Eine vor den Analysen zu TH10 durchgeführte COCOSYS-Rechnung zu E11.2 konnte die Atmosphärenschichtung des Versuches beschreiben. In dieser Rechnung waren die Längen der Strömungspfade um etwa einen Faktor 100 vergrößert worden, was

faktisch ein Ausschalten der Gasdiffusion bedeutet, da diese indirekt proportional zur Strömungspfadlänge ist. Es wurde deshalb eine COCOSYS-Parameterrechnung zu TH10 mit in gleicher Weise vergrößerten Pfadlängen durchgeführt. Diese lieferte ähnliche Ergebnisse wie die offene Rechnung zu TH10, in der die Gasdiffusion ausgeschaltet ist.

Es ist deshalb anzunehmen, dass die Überschätzung der Gasdiffusion der Hauptgrund für die unzulängliche Simulation des Versuchs E11.2 durch COCOSYS ist.

2.2.5 Zusammenfassung

Der ThAI-Versuch TH10 lieferte ähnliche Atmosphärenzustände wie der HDR-Versuch E11.2. Somit ist TH10 hilfreich zum Verstehen der bei E11.2 aufgetretenen Phänomene.

Die blinde COCOSYS-Rechnung zu TH10 sagt zwar die Gasverteilung am Ende der Helium-Einspeisung gut voraus, überschätzt jedoch während der folgenden 10 h den Transport von Helium von den oberen in die unteren Behälterbereiche, was auf das Gasdiffusionsmodell von COCOSYS zurückzuführen ist.

Die offene COCOSYS-Rechnung zu TH10, in der die Diffusion faktisch ausgeschaltet ist, gibt das experimentelle Verhalten gut wieder.

Aus Parameterrechnungen zu TH10 und E11.2 wird geschlossen, dass eine Überschätzung der Gasdiffusion durch das Rechenprogramm ein wichtiger für die bisher unzulängliche Simulation des HDR-Versuchs E11.2 durch COCOSYS ist.

2.2.6 Vorschlag für weitere Arbeiten

Das Diffusionsmodell sollte überprüft und verbessert werden. Mit dem verbesserten Modell sollten TH10 und E11.2 nochmals gerechnet werden.

Ein Modell zur Verdampfung des Kondensatfilms an den Wänden sollte in COCOSYS eingebaut werden.

3 Anwendungsrechnungen

3.1 Erstellung / Erweiterung der Datensätze für KONVOI und SWR 72 sowie Durchführung beispielhafter Rechnungen

3.1.1 Rechnung zu PHEBUS-FPT1 mit den gekoppelten Systemcodes ATHLET-CD und COCOSYS

Für eine vollständige Simulation von Unfallabläufen in Kernkraftwerken ist eine gekoppelte Simulation vom Reaktorkühlkreislauf und Containment erforderlich, um auch die Rückwirkungen zwischen beiden Systemen berücksichtigen zu können. Daher wurden die beiden GRS Programme ATHLET-CD für den Reaktorkühlkreislauf und COCOSYS für das Containment gekoppelt.

Die Prognosefähigkeit solcher Systemcodes wie ATHLET-CD und COCOSYS wird anhand von Voraus- und Nachrechnungen unterschiedlicher Experimente realisiert, die sowohl zur Analyse einzelner Phänomene (sog. Einzeleffekt-Experimente) als auch zur Beschreibung wesentlicher Teile *ganzer* Störfallsequenzen (sog. Integral-Experimente) zur Verfügung stehen. Eine wichtige Versuchsreihe stellt die PHEBUS FP-Versuchsreihe in der gleichnamigen Versuchsanlage am Forschungszentrum Cadarache, Südfrankreich, dar. Von der OECD ist aus dieser Versuchsreihe das Experiment PHEBUS FPT-1, das im Juli 1996 durchgeführt wurde, zur Basis eines Internationalen Standardproblems (ISP-46) ausgewählt worden. Als Integralexperiment dient es Untersuchungen zur Kernzerstörung und Spaltproduktfreisetzung in ein "Quasi"-Containment, indem es einen Kühlmittelverlust im kalten Strang des Primärkreislaufs eines Leichtwasserreaktors simuliert.

In Abb. 3-1 sind die Hauptkomponenten der Versuchsanlage schematisch dargestellt. Diese besteht vor allem aus einem Brennstab Bündel innerhalb einer abgeschlossenen und separat gekühlten Teststrecke, die in der so genannten "In-pile"-Zelle im Zentrum des PHEBUS-Versuchsreaktors, der mit einer Maximalleistung von 40 MW die nukleare Beheizung des Bündels gewährleistet, angeordnet ist. Am unteren Ende der Teststrecke erfolgt die Einspeisung von Dampf zur Simulation des in einem Reaktorkern verdampfenden Kühlmittels. Zur Untersuchung des Aerosol- und Spaltproduktverhaltens im Kühlkreislauf sowie im Sicherheitsbehälter sind die Hauptkomponenten eines Leistungsreaktors im Volumenmaßstab von ca. 1:5000 nachgebaut. Dazu gehören

das zwischen dem Bündelaustritt und einem Behälter liegende "obere Plenum", der horizontale "heiße (700 °C)" bzw. "kalte (150 °C) Strang" mit einer Gesamtlänge von 26,6 m sowie ein dazwischen liegender Dampferzeugersimulator. Im Sicherheitsbehälter mit einem Volumen von 10 m³ befinden sich drei teilweise beschichtete Kondensationsstäbe und ein Sumpf mit 100 l Wasser.

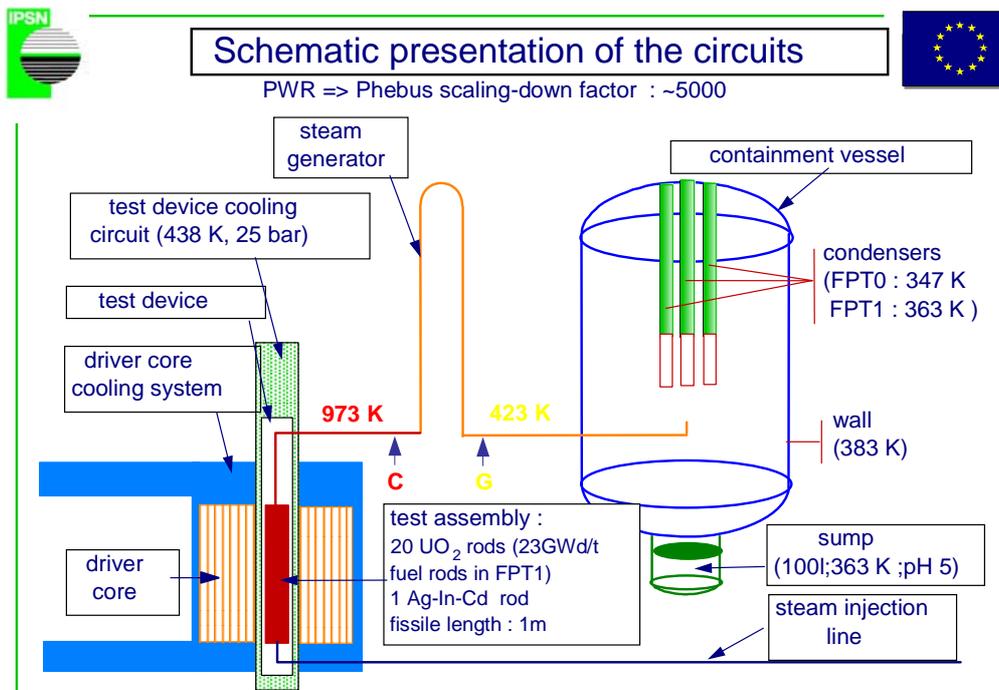


Abb. 3-1 PHEBUS-Versuchsanlage (schematisch)

Bei diesem Versuch lassen sich grundsätzlich vier Phasen anhand charakteristischer Vorgänge bzw. Phänomene unterscheiden. Die sog. Bündel-Phase im Zeitraum von 0 bis 18 660 s ist maßgeblich durch Vorgänge im Bündel, wie z. B. die Zerstörung von Brennstab- und Strukturmaterial, die Wasserstoff-Freisetzung sowie die Freisetzung von Spaltprodukten gekennzeichnet. Ebenfalls in diesem Zeitraum liegt die sog. Kühlkreislauf-Phase, in der der Spaltprodukt- und Aerosoltransport im angeschlossenen Kreislauf stattfindet. Die dritte Phase ist der Zeitraum von 0 bis 300 000 s für die Analyse der Thermohydraulik sowie des Aerosol- und Spaltprodukt-Verhaltens im Sicherheitsbehälter. Und schließlich ist die Untersuchung der Jodchemie im Sicherheitsbehälter (0 bis 341 400 s) aufgrund der Komplexität der zu berücksichtigenden Phänomene als eigene, vierte Phase anzusehen.

Die hier dargestellte Nachrechnung wurde mit den GRS Systemcodes ATHLET-CD (Version 1.1i) und COCOSYS (Version V2.0AA) durchgeführt. Die Nachrechnung des

Versuchs FPT1 war der erste Test für eine gekoppelte ATHLET-CD/COCOSYS-Rechnung, so dass zur Lösung kopplungsspezifischer Probleme Änderungen in den beiden Quellcodes vorgenommen werden mussten. Alle vier oben erwähnten Phasen des Versuchs sind innerhalb eines Rechenlaufs simuliert worden. Die Analysen im Rahmen einer Beteiligung am ISP 46 /CLE 03/ durchgeführt und in einer technischen Notiz dokumentiert /KLH 02, siehe Anhang 9.11/.

Die Kopplung beider Programme berücksichtigt die Freisetzung von Dampf, Wasserstoff sowie von Spaltprodukten in das PHEBUS-Containment. Dabei werden die Raten über mehrere Zeitschritte von ATHLET integriert und dann im THY- und AFP-Hauptmodul von COCOSYS ausgewertet. Aus der Spaltproduktfreisetzung werden dann im COCOSYS-Treiber die Aerosol-Freisetzungsraten sowie die Freisetzung von Jodspezies ermittelt. Dabei kann berücksichtigt werden, dass ein Teil der Spaltprodukte oxidiert und sich damit die Masse erhöht. In der zu diesem Zeitpunkt zur Verfügung stehenden SOPHAEROS-Version in ATHLET-CD wurde die gasförmige Freisetzung von Jod noch nicht simuliert. Dies führt dann zwangsläufig zu Unterschieden in den Jod-Ergebnissen.

Die Rechenzeit auf einem PC Pentium 4 1.7 GHz mit 512 RAM betrug insgesamt 28500 s.

Während des Tests konnte das Abschmelzen des inneren Brennstabringes sowie des Zentralstabes im mittleren Bündelteil detektiert werden. Auf Höhe des unteren Abstandhalters bildete sich dann ein Pool aus flüssigen keramischen Materialien.

Bei der Nachrechnung konnte die Bündelaufheizung, das Einsetzen der Temperatureskalation aufgrund der exothermen Wasserdampf-Zirkon-Reaktion und die damit einhergehende Wasserstofffreisetzung in guter Übereinstimmung mit den experimentellen Daten berechnet werden. So lag beispielsweise die errechnete Wasserstofffreisetzung mit 101 g innerhalb der Bandbreite des experimentell ermittelten Wertes von 96 ± 13 g (Abb. 3-2). Der Prozess der Verlagerung verflüssigten Materials, gleichbedeutend mit einer Verlagerung der Wärmequellen in die tiefer liegenden Regionen des Bündels, konnte ebenfalls mit guter Übereinstimmung modelliert werden. Die Bildung des Schmelzepools am unteren Ende des Bündels konnte mit der zu diesem Zeitpunkt zur Verfügung stehenden Programmversion von ATHLET-CD jedoch noch nicht korrekt erfasst werden.

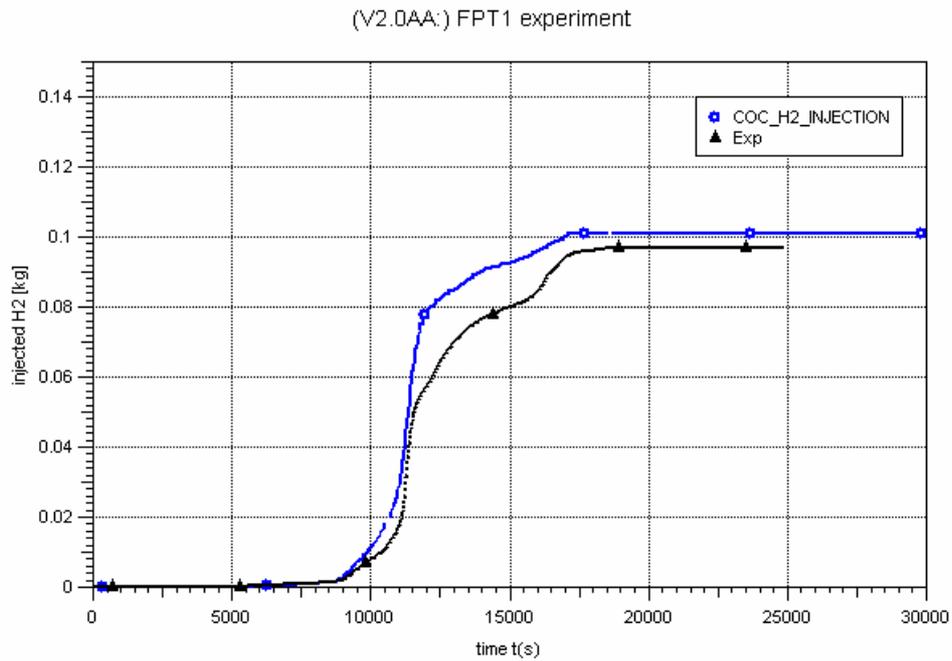


Abb. 3-2 PHEBUS-FPT1: Wasserstoffeinspeisung in den Sicherheitsbehälter

Die Freisetzung aus dem Bündel und durch die Punkte ‚C‘ und ‚G‘ (siehe Abb. 3-1) werden in Abb. 3-3 dargestellt. Soweit vorhanden werden die experimentellen Daten in gestrichelten Kurven gleicher Farbe dargestellt. Die Freisetzung der Spaltprodukte wird mit einem temperaturabhängigen Ratenansatz im Modul FIPREM berechnet. Die Freisetzung der Steuerstabmaterialien basiert auf einem alten CORSOR Ansatz. Die Freisetzung von Spaltprodukten beginnt mit dem Versagen der Hüllrohre im inneren Ring bei ca. 6500 s mit der Freisetzung der leicht flüchtigen Materialien (Xe, Kr, I, Cs). Die Menge der freigesetzten Spaltprodukte steigt stark während der ersten Oxidationsphase bei ca. 11060 s. Der Vergleich der Berechnungsergebnisse zur Freisetzung von Spaltprodukten mit entsprechenden Daten des Experimentes zeigt den zu diesem Zeitpunkt notwendigen Entwicklungsbedarf der in ATHLET-CD implementierten Modellansätze auf. So wird die Freisetzung von I und Ba unterschätzt. Weiterhin ist die Berechnung der Freisetzung von Steuerstabmaterialien unzureichend.

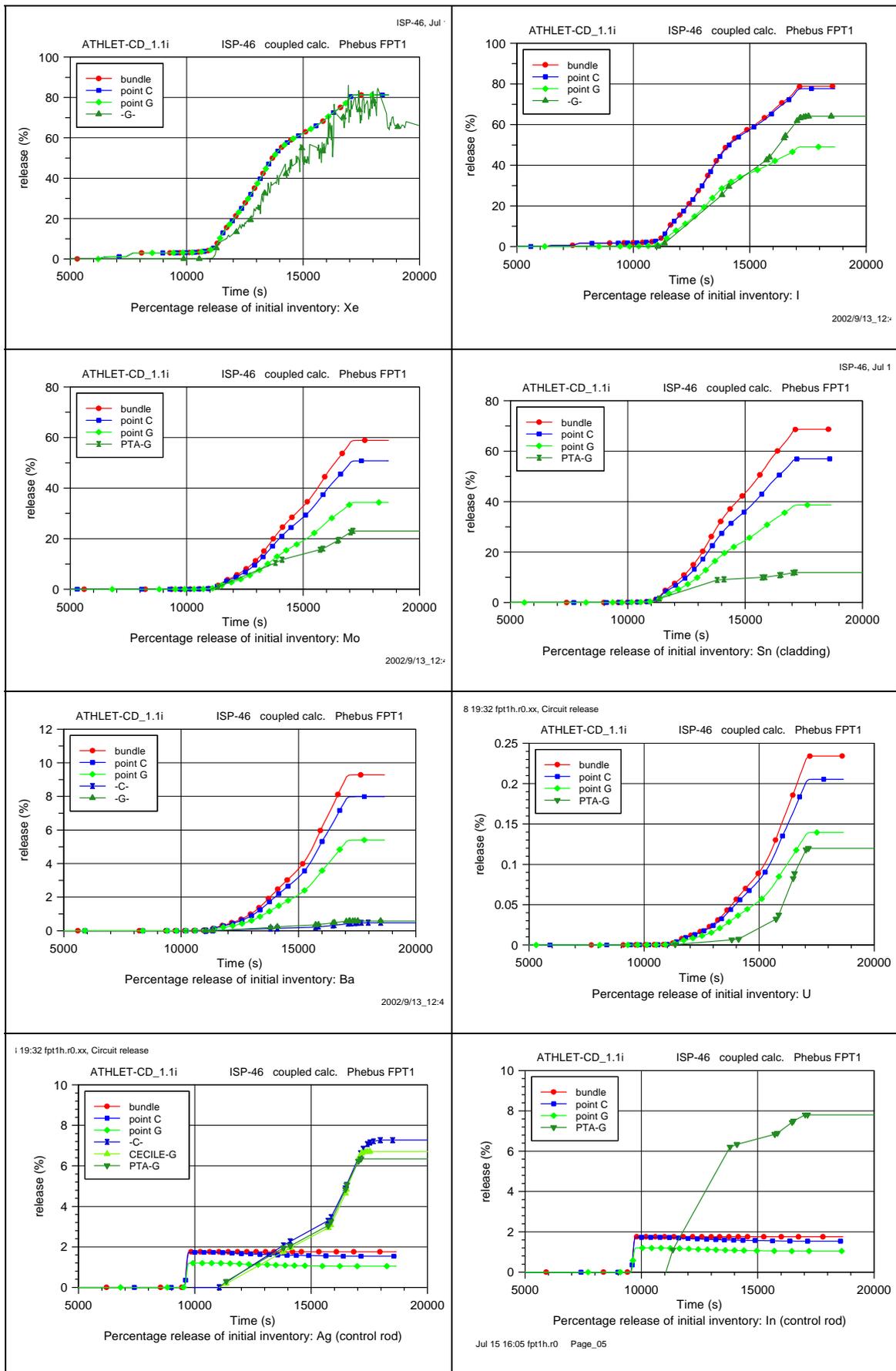


Abb. 3-3 Freisetzung von Spaltprodukten und Strukturmaterialien

Die Rechnungsergebnisse für das thermohydraulische Verhalten innerhalb des Sicherheitsbehälters stimmen in guter Näherung mit den experimentellen Daten überein. Dabei zeigt sich, dass beispielsweise der korrekten Simulation der Vorgänge an den Kondensationsstäben erhöhte Bedeutung zukommt, um die experimentell ermittelten Verläufe für Druck und Temperatur korrekt wiedergeben zu können (Abb. 3-4). Nach der Separierung des Sicherheitsbehälters nach ca. 18 660 s wird die relative Feuchte der Atmosphäre zwar ca. 10 % zu gering errechnet, aber die Spaltproduktablagerungen auf den Wänden und im Sumpf (zusammen genommen) stimmen exzellent mit den Messungen überein. Allerdings werden nicht-lösliche Spaltprodukte nicht vom Kondensator abgewaschen, sondern lagern sich auf dem Boden der Zonen C1I und C2I ab. Hier bestand zu diesem Zeitpunkt noch Verbesserungsbedarf. Der Vergleich der errechneten Spaltproduktablagerung mit den Messergebnissen zeigt nur eine um etwa 10 bis 20 % verminderte Ablagerung auf dem elliptischen Teil des Behälterbodens. Abb. 3-5 zeigt den Verlauf der in den Sicherheitsbehälter eingespeisten Aerosol- und Spaltproduktmassen.

Doch die Nachrechnung des Experimentes PHEBUS FPT1 hat auch gezeigt, dass die Abwaschmodelle für Aerosole, Jodverbindungen und Spaltprodukte einer Harmonisierung bedurften. So sind die Abwaschmodelle für Aerosole, Spaltprodukte und Jodspezies konzeptionell etwas unterschiedlich. Hier zeigt sich, dass die Modelle aus ursprünglich eigenständigen Programmen stammen. So können nicht-lösliche Aerosole im Gegensatz zu Spaltprodukten vom Boden wieder abgewaschen werden. Weiterhin zeigten sich für gasförmiges Jod in der Atmosphäre größere Abweichungen im Vergleich zu den experimentellen Daten, die weitere Untersuchungen und eine eingehende Analysen der zugrunde liegenden Modelle notwendig machen.

Die Auswertung der Berechnungsergebnisse zeigt, dass Integraleexperimente wie PHEBUS FPT1 eine einzigartige Gelegenheit bieten, einen komplexen Störfallablauf, bei dem verschiedene untereinander wechselwirkende Phänomene auftreten, zu berechnen, dabei in den Modellen vorhandene Schwachstellen zu erkennen und ATHLET-CD wie COCOSYS integral und nicht nur partiell an Einzeleffekt-Experimenten zu validieren.

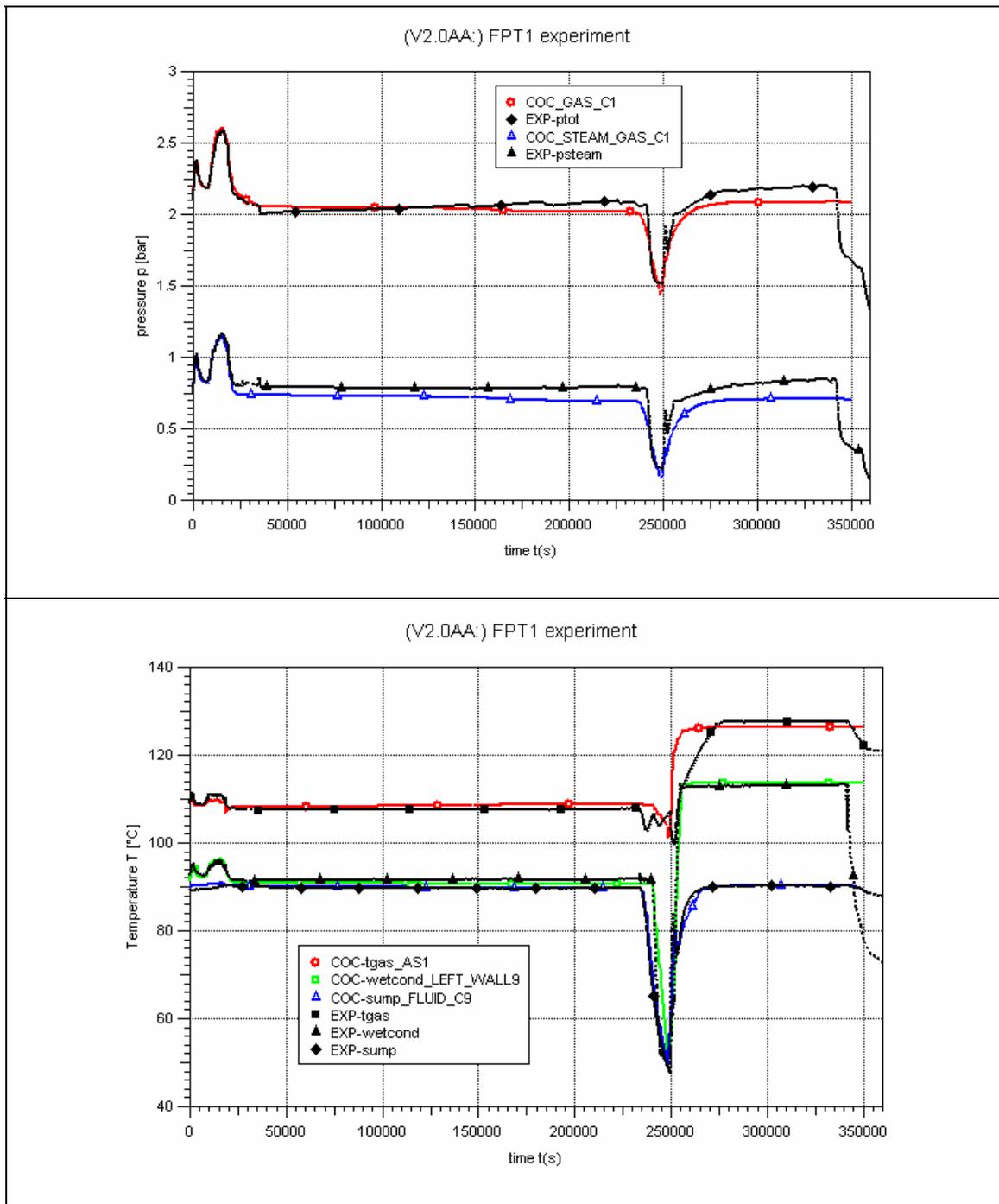


Abb. 3-4 Druck und Temperatur im PHEBUS-Containment

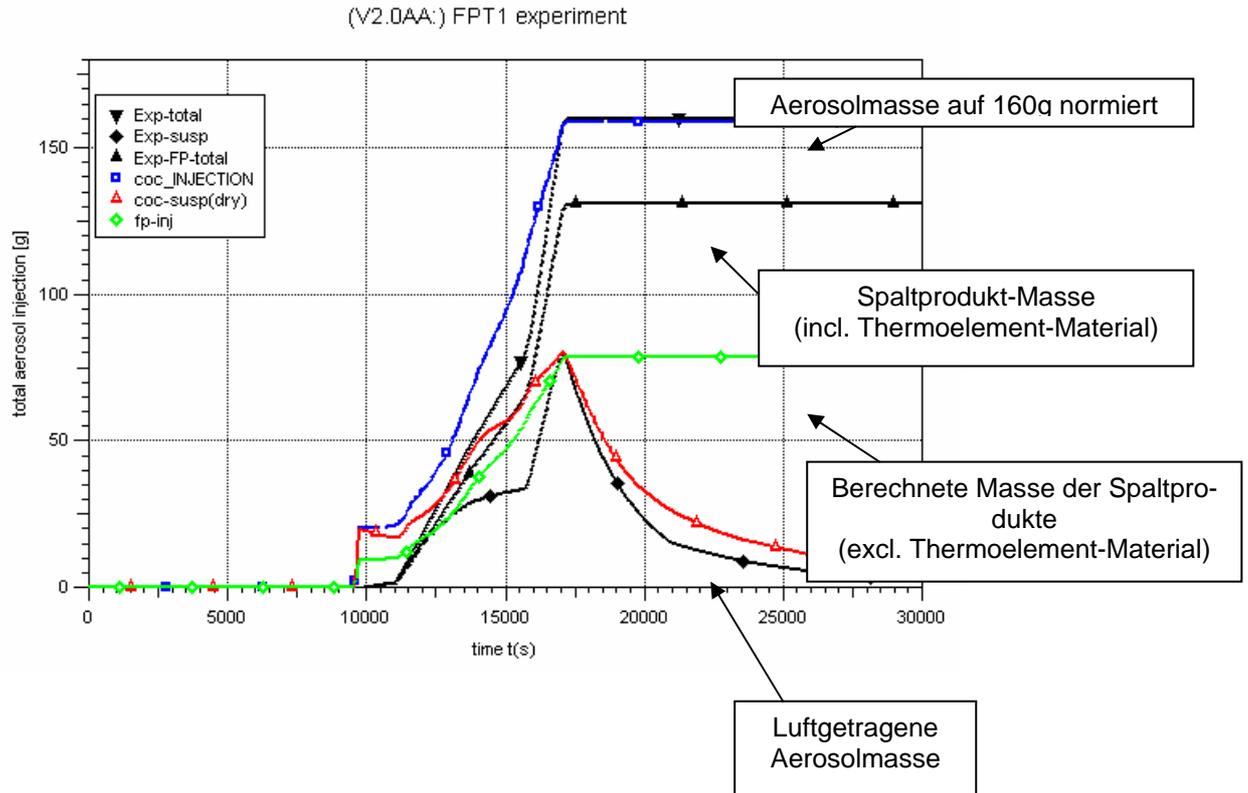


Abb. 3-5 Bilanzierung der Aerosole und Spaltprodukte

3.1.2 Rechnung zu KONVOI mit den gekoppelten Systemcodes ATHLET-CD und COCOSYS

Für eine Druckwasserreaktor-Anlage der Konvoi Baureihe wurden die erforderlichen Eingabedatensätze für eine gekoppelte ATHLET-CD/COCOSYS Version erstellt und erste Testrechnungen durchgeführt. Ein für den GRS-Simulator ATLAS aufbereiteter Datensatz stand dabei zunächst nur für eine gekoppelte ATHLET/COCOSYS Rechnung zur Verfügung, so dass der ATHLET Datensatz mittels eines verfügbaren ATHLET-CD Datensatzes aufbereitet und angepasst werden musste.

Die verwendeten Basisdatensätze für ATHLET, ATHLET-CD und COCOSYS wurden im Rahmen anderer Vorhaben erstellt.

In einem ersten Schritt wurde mangels einer detaillierten Beschreibung der Datensätze zunächst ein zeichenweiser bzw. zeilenweiser Vergleich der Datensätze durchgeführt, was aufgrund der mehr als 3000 Unterschiede sehr zeitaufwendig war. Speziell die GCSM-Blöcke (GCSM: General Control Simulation Module) zur Abbildung z. B. der Leittechnik und verschiedener Systeme und konnten nicht abgeglichen werden, zu ih-

rer Erstellung und Analyse wird eine eigene Software eingesetzt (GCSM-Generator unter G2). Mit dem GCSM-Generator ist es möglich, graphisch unterstützt Leittechnikstrukturen zu entwickeln, auszutesten und gleichzeitig übersichtlich zu dokumentieren. Mit Hilfe des GCSM-Generators werden die Leittechnikstrukturen nicht nur erstellt sondern auch auf ihre Funktion getestet. Nach Abschluss der Funktionstests werden die GCSM-Blöcke miteinander vernetzt und ohne Thermohydraulik, d.h. mit vorgegebenen Randbedingungen mit ATHLET ausgetestet. Eine Analyse allein auf Basis der Eingabedatensätze ist nur schwer durchführbar.

Wesentliche Änderungen, die durchgeführt worden sind:

- Die für eine ATHLET-CD Rechnung benötigte Kernnodalisierung machte es erforderlich, zunächst den vorhandenen ATHLET Datensatz bezüglich des Kernmodells zu erweitern. In einem ersten Schritt wurden dazu die Daten für den CD-Modul ECORE (CW ECOREMOD) aus dem ATHLET-CD Datensatz übernommen. Mit diesem Modul werden die Kernaufheizung, die Hüllrohroxidation, die Kernzerstörungsprozesse und die Umlagerung der Schmelze modelliert. Die Oxidation der Brennstabhüllen und der dabei erzeugte Wasserstoff werden ebenfalls erfasst. Die in dem vorhandenen ATHLET-Teil als Wärmeleitobjekte (HECU) modellierten Brennelemente werden dabei durch ein detailliertes Modell der Brennelemente (HEAT) ersetzt. Zusätzlich werden in dem neuen Modell auch die Steuerstäbe gesondert berücksichtigt.
- Die Materialdaten (Wärmeleitfähigkeit, Dichte, Wärmekapazität) für die Brenn-, Absorberstab- und Hüllrohrmaterialien sowie für die Viskositäten der auftretenden Schmelzarten wurden entsprechend ATHLET-CD definiert,
- das Spaltproduktinventar, die Leistungsverteilung und die Wärmeleistung für den Nachzerfall wurden berücksichtigt,
- Die Modellierung des Reaktorkerns im verwendeten ATHLET-Datensatz sah nur einen thermohydraulischen Strömungskanal (vgl. Abb. 3-6, rechts) mit drei repräsentativen Brennstäben vor. Entsprechend dem vorliegenden ATHLET-CD Datensatz wurde die Thermohydraulik auf vier Strömungskanäle (vgl. Abb. 3-6, links) und das Kernmodell auf vier repräsentative Brenn- und Steuerstäbe (radiale Ringe) erweitert, um auch die radiale Leistungsverteilung besser darstellen zu können. Jeder dieser Ringe ist in insgesamt 12 axiale Schichten unterteilt, wovon 10 auf den aktiven Teil des Kerns entfallen (vgl. Abb. 3-7).

- Die Freisetzung von Spaltprodukten aus den Brennstäben werden mit dem Modul EFIPRE (CW FIPREM) beschrieben. Das SOPHAEROS Modell (CW TRAP) für Spaltproduktedämpfe und Aerosoltransport im Reaktorkühlkreislauf wurde aktiviert.
- Unterschiede bei abweichenden Geometriedaten von Thermohydraulikobjekten und Wärmeleitstrukturen wurde überprüft und teilweise angepasst.

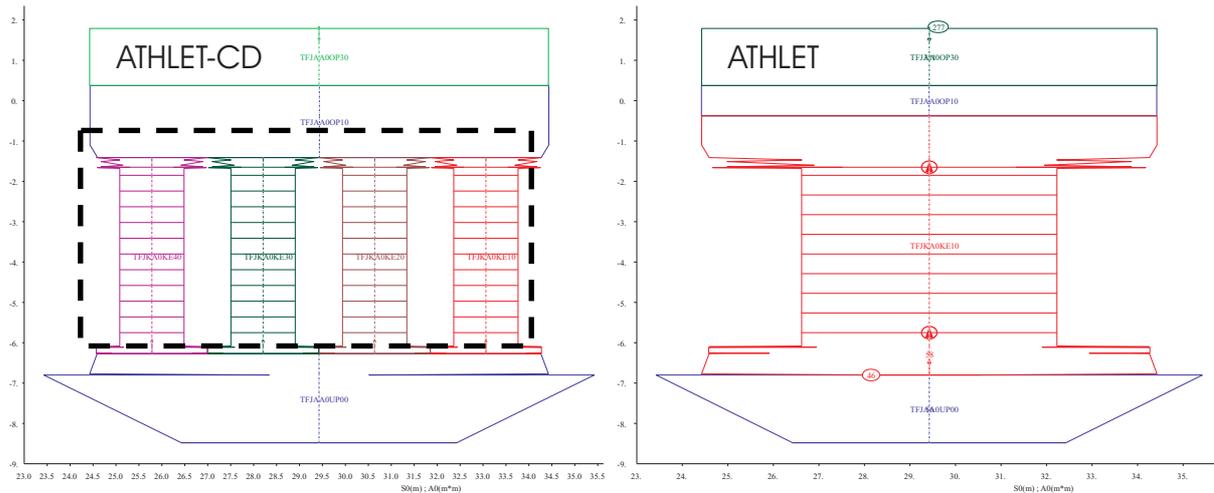


Abb. 3-6 Nodalisierung der Thermofluid-Objekte des Kerns für ATHLET-CD (links) und ATHLET (rechts), der gestrichelt markierte Bereich stellt den Ausschnitt der Abbildung 2 dar

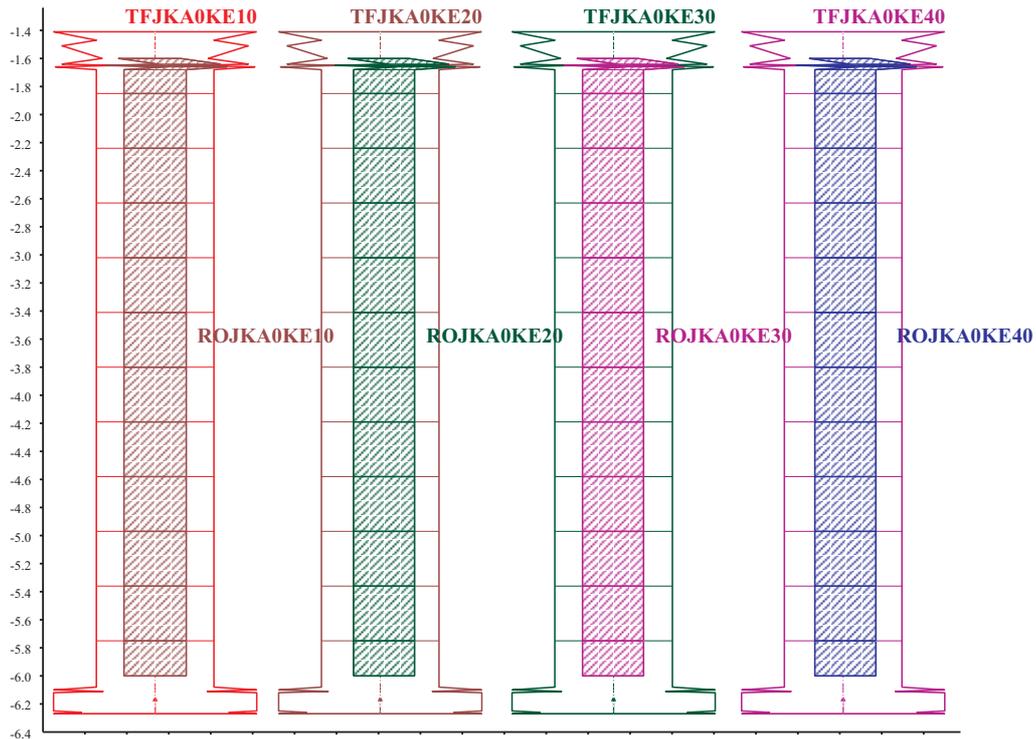


Abb. 3-7 Nodalisierung der Kernsektion mit ATHLET-CD mit 4 thermohydraulischen Strömungskanälen TFJKA0KE10-40 und den zugeordneten repräsentativen Brennstäben ROJKA0K10-40

Erste Testrechnungen wurden dann "on-line" mit dem GRS-Simulator ATLAS durchgeführt, der einen Eingriff während der Rechnung in verschiedene Sicherheitssysteme zur korrekten Anpassung des unterstellten Störfallszenarios ermöglicht.

Zunächst wurde dazu mit ATHLET-CD/COCOSYS eine quasistationäre Rechnung für den Vollastbetrieb des Reaktors durchgeführt. Mit dieser Vorlaufrechnung wird sichergestellt werden, dass vor Beginn des einzuleitenden Störfallszenarios stabile Zustände in der modellierten Anlage herrschen und den Parametern der Realanlage entsprechen. Die quasistationäre Rechnung wurde über einen Zeitraum von 1000 s durchgeführt, wobei sich nach ca. 600 s stabile Zustände einstellten.

Für das dann einzuleitende Störfallszenario waren folgende Annahmen getroffen worden:

- 80 cm² Leck im kalten Strang des Druckhalterloops (Loop 10),
- Abfahren der Anlage mit 100 K/h über die Dampferzeuger,

- 2v4 HD- und 2v4 ND-Einspeisesysteme stehen zur Verfügung (Loop 20 und 30),
- der Sumpfumwälzbetrieb bei Anforderung nicht verfügbar,
- 4 Druckspeicher sind verfügbar (heißseitig), die kaltseitige Einspeisung wird durch den Reaktorschutz ca. 500 s nach Lecköffnung abgeschiebert.
- Flutbecken mit je 450.000 kg Wasser.

Charakteristische Rechnungsdaten sind in Tab. 3-1 aufgelistet. Zum Vergleich sind die Werte einer Vergleichsrechnung mit MELCOR 1.8.5 gegenübergestellt.

Tab. 3-1 Charakteristische Ereignisse der Unfallabläufe mit kaltseitigem Leck der Größe 80 cm² im DH-Loop 10, Einspeisung von 2 Notkühlsystemen, Vergleich der Daten von einer Rechnung mit MELCOR 1.8.5 mit ATHLET-CD 2.0a/COCOSYS V2.2 Daten

Ereignis	MELCOR	ATH-CD/COC
Auftreten des Lecks	0 s	0 s
RESA / TUSA	4.0 s	1.0 s
Notkühlsignal, SB-Lüftung AUS	10.5 s	18.8 s
Beginn HKP-Auslauf	10.6 s	18.8 s
Beginn 100 K/h Abfahren DE	34.1 s	5.2 s
Beginn HD-Einspeisung	40.5 s	18 s
Beginn DRSP-Einspeisung, heißseitig	1092.5 s	1410 s
Beginn ND-Einspeisung		2005 s
H _{DH} > 11 m, JDH - AUS	2871.3 s	nicht berechnet
Flutbecken Loop 20 + 30 leer	4075.1 s	4138 s
Ende DRSP-Einspeisung, heißseitig	~5880 s	4748 s
Beginn Spaltgasfreisetzung	23453.0 s	n. b.
Beginn des Kernschmelzens	~24500.0 s	n. b.
RDB-Versagen	31602.8 s	n. b.

Mit Öffnen des Lecks und dem Austrag von Kühlmedium ins Containment sind charakteristische Daten verglichen worden und zeigen zunächst eine gute Übereinstimmung. Der Füllstand im RDB fällt zunächst rasch bis knapp über Kernoberkante ab, steigt aber mit einsetzenden Sicherheitseinspeisesystemen wieder rasch an, so dass RDB wieder aufgefüllt wird. Dies wird in guter qualitativer wie quantitativer Übereinstimmung auch vom MELCOR gerechnet (vgl. Abb. 3-8). Mit Beendigung der Druckspeicher-Einspeisung (vgl. Abb. 3-9) nach ca. 1.3 h dampft der RDB aber dann wieder rasch aus. Ab diesem Zeitpunkt bleibt der Füllstand für einen langen Zeitraum nahezu konstant, auch dies wird von beiden Programmen errechnet.

Speziell in dieser Phase des betrachteten Störfallszenarios zeigen sich dann aber zunehmend Schwierigkeiten bei der ATHLET-CD/COCOSYS Kopplung. Da der Reaktor entsprechend dem unterstellten Störfall über die Sekundärseite mit 100 K/h abgefahren wird, dampft der RDB nur sehr langsam aus. ATHLET rechnet zu diesem Zeitpunkt mit sehr kleinen Zeitschritten und führt zudem nahezu in jedem Zeitschritt ein Update der Jacobi-Lösungsmatrix aus, was insgesamt enorme Rechenzeit in Anspruch nimmt. Außerdem bleibt der RDB-Füllstand nahezu konstant, auch nach knapp 10 h Problemzeit (vgl. Abb. 3-8). Dies steht im Widerspruch zur MELOR-Rechnung, die nach knapp 4 h zunächst den Beginn der Kernfreilegung und nach ca. 6.8 h erstes Kernschmelzen errechnet. Die Rechnung wurde zu diesem Zeitpunkt beendet, da die Ergebnisse nicht plausibel erschienen

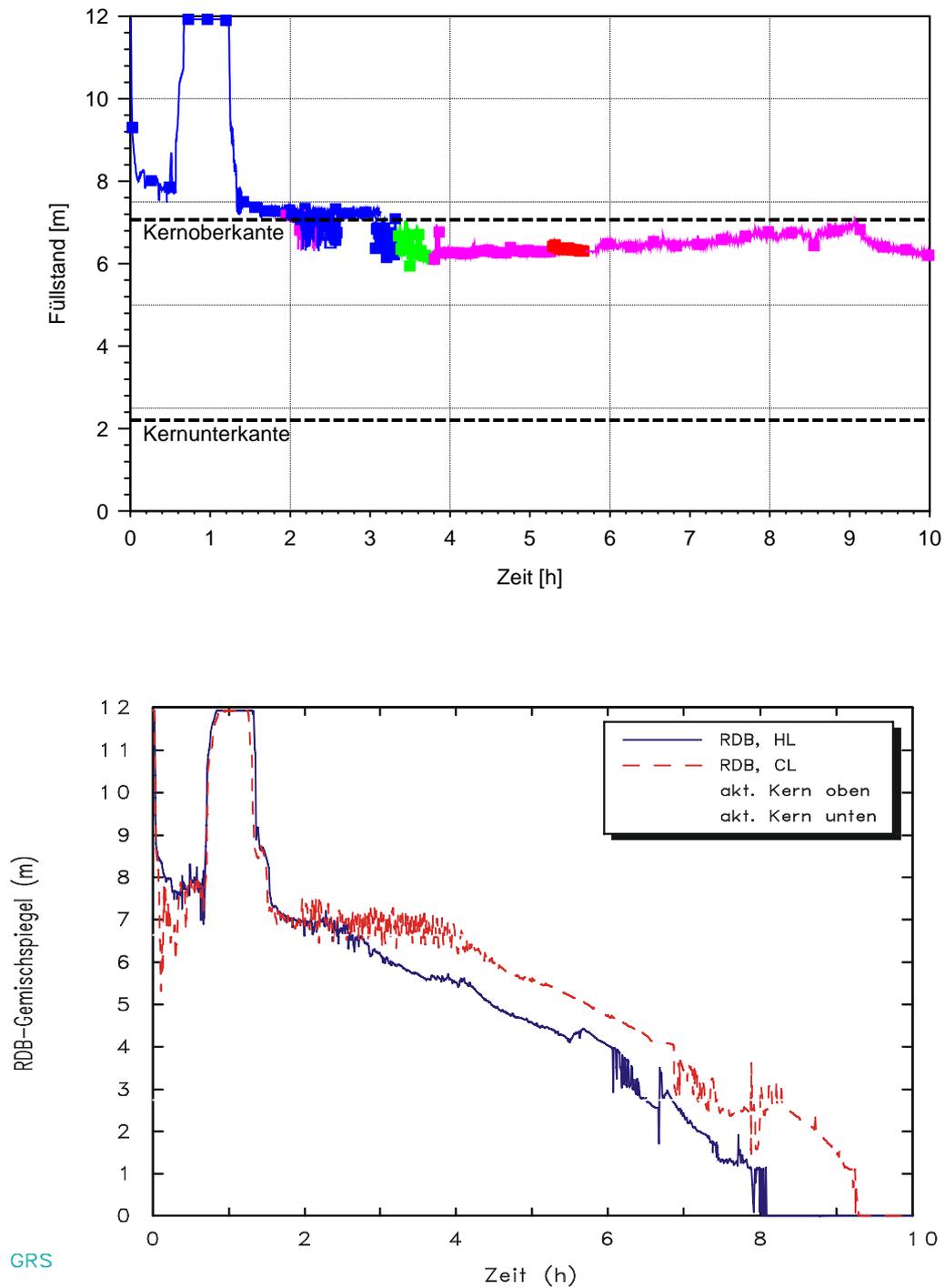
Als problematisch stellte sich gerade auch zu Beginn der Arbeiten die Stabilität der Läufe im ATLAS-Simulator heraus. Die Ansprüche an Prozessorleistung und Arbeitsspeicher, aber auch mögliche Inkompatibilitäten bei der Verwendung einzelner APG-Grafiken sowie Hardware-Probleme führten zu häufigen Programmabstürzen.

Insgesamt konnte die Rechnung trotz der zahlreich durchzuführenden "Restarts" zwar über 50000 s Problemzeit durchgeführt werden. Vor dem Hintergrund, dass die Rechenzeit dabei mehrere Wochen in Anspruch nahm und die Ressourcen des dafür verwendeten Arbeitsplatzrechners nahezu komplett ausgeschöpft wurden (CPU-Auslastung / Arbeitsspeicher) ist die Anwendung derzeit nicht praktikabel. Weitere Testrechnungen und ein insbesondere eine intensive Analyse mit einer Optimierung des Datensatzes könnten hier vielleicht einen Fortschritt bringen.

Weitere offene Punkte für eine Weiterentwicklung:

- Der Analyse-Simulator ATLAS ist hinsichtlich der Stabilität (insbesondere bei der Anzeige von Prozessparametern und dem Aufruf von APG-Bildern) zu optimieren. Bei ersten Rechnungen wurden nicht nur die Bilder teilweise falsch oder gar nicht dargestellt, darüber hinaus kam es bei der Darstellung einiger Parameter als Trendkurve zu Programmabstürzen, deren Gründe nicht zu detektieren waren. Eine Erhöhung des Arbeitsspeichers auf 1 Gb brachte auch keinen Erfolg. Erst mit der Anschaffung eines neuen Rechners konnte eine deutliche Verbesserung des Stabilitätsverhaltens festgestellt werden. Auch wurden dann die APG-Graphiken korrekt dargestellt. Gleichwohl sind die Simulator-Rechnungen immer noch von Stabilitätseinschränkungen beeinflusst.
- Hinsichtlich der Restart-Prozedur sollte angestrebt werden, dass der Restart-Zeitpunkt im COCOSYS-Programm automatisch auch in ATHLET bzw. ATHLET-CD übernommen wird und nicht, wie derzeit praktiziert, separat für beide Programme im jeweiligen Datensatz definiert werden muss. Auch die Detektierung der Restart-Zeitpunkte, zu denen die Daten abgespeichert werden, sollte vereinfacht, sprich benutzerfreundlicher werden. Derzeit muss die zu einem betreffenden Restart-Zeitpunkt gehörige Nummer aus einer Ausgabe-Datei mittels einer Zeichenkette-Suchfunktion herausgelesen werden. Dabei kommt erschwerend hinzu, dass die Nummer der jeweiligen Restart-Zeitpunkte bei der COCOSYS-Rechnung im Allgemeinen nicht der der ATHLET-/CD Rechnung entspricht, da die Programme vollständig unabhängig voneinander Restart-Optionen verwenden.
- Bei der gekoppelten ATHLET-CD – COCOSYS Rechnung konnte das angestrebte Ziel der Simulation bis in die Phase beginnender Kernzerstörung nicht erreicht werden. Dennoch könnte selbst nach Lösung der angesprochenen Probleme der Störfall nicht in die späte Phase oder gar bis zu einem möglichen Versagen des RDB gerechnet werden, da ATHLET-CD derzeit nur Modelle für eine axiale Verlagerung geschmolzenen Materials bis maximal zur Kernunterkante besitzt. Modell zur radialen Ausbreitung von Kernzerstörungsprozessen auch unter Bildung eines Schmelzesees sind zwar entwickelt worden (MESOCO), derzeit aber noch nicht als an angekoppeltes Modul von ATHLET-CD stabil lauffähig und auch nicht ausreichend validiert. Für die Phase der Verlagerung von geschmolzenen oder zerstörten Kernmaterials sind ebenfalls Modelle entwickelt, aber zu der Zeit, in der die Rechnungen durchgeführt wurden, noch nicht in ATHLET-CD implementiert gewesen. Somit kann eine geschlossene, integrale Betrachtung eines Störfallszenarios beginnend bei dessen Initiierung, über die frühe und späte Phase der Kernzerstö-

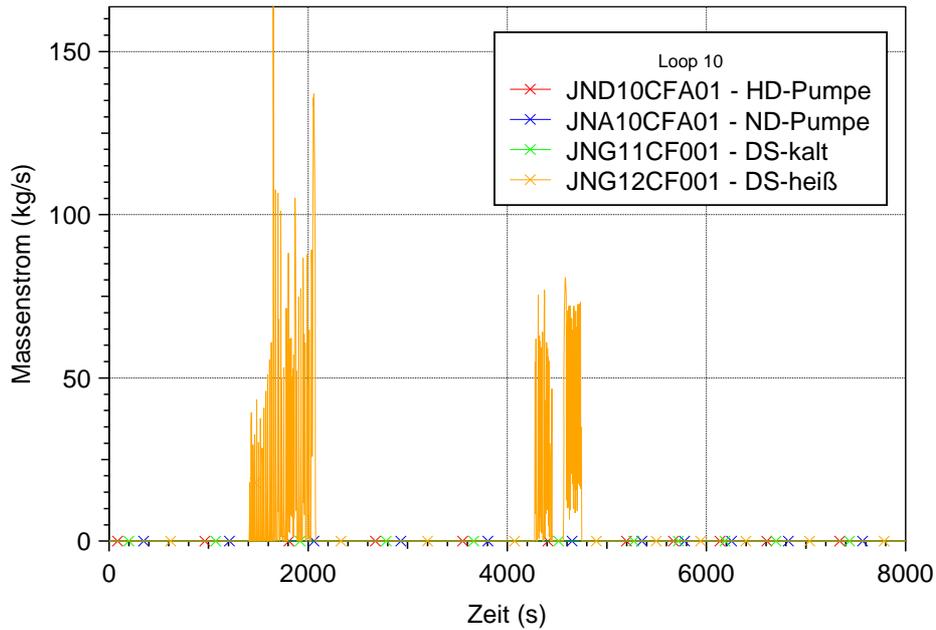
zung, bin hin zum Versagen des RDB und einer Verlagerung Kern- und Strukturmaterialien ins Containment nicht modelliert werden.



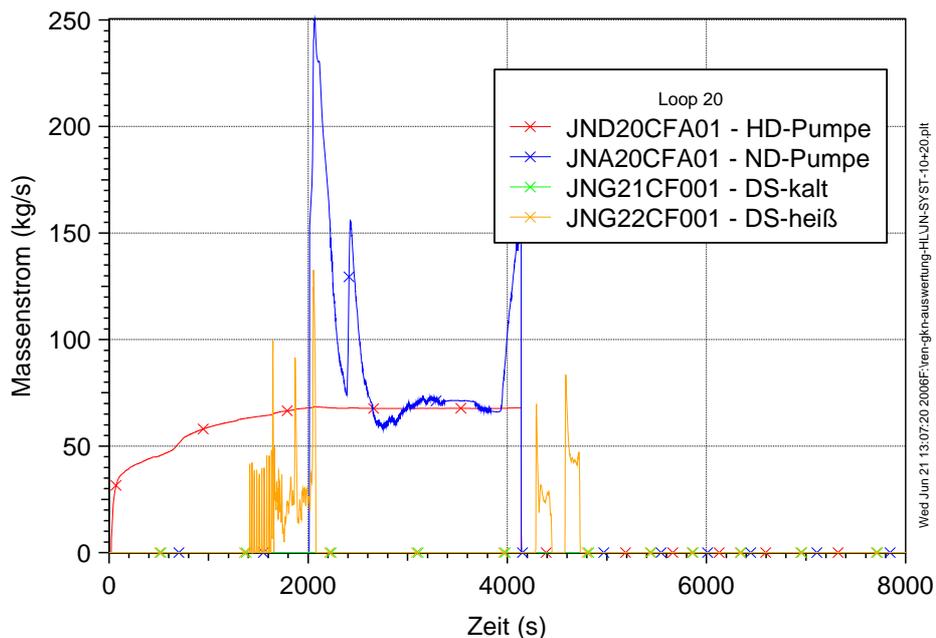
GRS

DWR-1300 80 cm2 HL10 4-Loop komplett
 HL80QZ 7/11/05 08:30:02 MELCOR IBM-RISC

Abb. 3-8 Füllstand im Reaktordruckbehälter. Vergleich der ATHLET-CD / COCOSYS Rechnung (oben, kaltseitiges Leck) mit MELCOR Daten (unten, Rechnungsdaten für heiß- (HL) und kaltseitiges (CL) Leck)



DWR-1300 (GKN-2) 80cm2 CL10 4-Loop - A-CD-COCOSYS - WinXP



DWR-1300 (GKN-2) 80cm2 CL10 4-Loop - A-CD-COCOSYS - WinXP

Abb. 3-9 Einspeisemassenströme der Not- und Nachkühlsysteme (JN) beispielhaft für Loop 10 (oben) und Loop 20 (unten) mit der Hochdruck-Sicherheitseinspeisung (JND), der Niederdruck-Sicherheitseinspeisung (JNA) sowie den Druckspeichern (JNG). Entsprechend dem Störfallszenario wird eine Nichtverfügbarkeit der HD- und ND Sicherheitseinspeisung in Loop 10 (und Loop 40, hier nicht dargestellt) unterstellt. Die Druckspeichereinspeisung (DS) in allen 4 kalten Strängen des Kühlkreislaufts wird definitionsgemäß 500 s nach Anliegen des Notkühlsignals abgeriegelt

3.1.3 Erweiterung des Datensatzes für SWR72

Für die SWR Anlage KRB (SWR72) wurde in vorangegangenen Vorhaben für den Störfallsimulator ein Basisdatensatz für ATHLET erstellt. Dieser Datensatz wurde mit einem COCOSYS Datensatz aus früheren Vorhaben, der als RALOC-Datensatz für die Sicherheitsanalytischen Untersuchungen zu schweren Störfällen in SWR72 herangezogen worden war, gekoppelt. GCSM-Signale für Prozessgrößen, die Anpassung der Wärmestrukturen, Angaben zu Leckagen, Entnahme und Einspeisung der Systeme von und nach der Kondkammer einschließlich des Kondkammersprühens wurden angepasst. Das Umluftsystem mit Kühler wurde in COCOSYS eingebaut. Die Steuerung der Einschaltung der Umluft in COCOSYS mittels eines in ATHLET erzeugten Signals (GCSM) wurde für die Ansteuerung der Umluftsysteme eingebaut. Nach erfolgter Kopplung wurden Testrechnungen für den stationären Betrieb durchgeführt. Dabei konnten stationäre Bedingungen über einen längeren Zeitraum erreicht werden. Für die SWR Anlage KRB-B der Baulinie 72 läuft die mit COCOSYS gekoppelte Version stationär.

Diese Arbeiten wurden im Vorhaben SR2459 (Erfassung und Aufbereitung von Basisdaten deutscher Kernkraftwerke zur kurzfristigen Unterstützung der Bundesaufsicht bei der Bewertung von Störfallereignissen anhand von Störfallanalysen) durchgeführt.

Folgende vorbereitende Arbeiten, für die Kopplung des COCOSYS-Sicherheitsbehälter Datensatzes mit ATHLET wurden durchgeführt:

Die Datensätze für ATHLET und COCOSYS wurden vor Beginn der Kopplung daraufhin getestet, ob sie separat ablauffähig sind. Nach Abarbeitung der Fehlermeldungen und Beseitigung der Ursachen liefen beide Datensätze mit der jeweils neuesten Codeversion. Die neue ATHLET-Codeversion machte eine Überarbeitung der Geometrien im Bereich der Dampferzeuger-Separatoren notwendig.

Die Simulatorbilder für Atlas wurden bereitgestellt und geprüft. Unstimmigkeiten in den Simulatorbildern zugrunde liegenden apc-Dateien, die von der ursprünglichen Anbindung an CONDRU stammten wurden beseitigt. Die Wasserspiegel auf der Primärseite und der Sekundärseite wurden überarbeitet und auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Verknüpfung der apc-Dateien mit den .key-Dateien wurde überprüft anhand der Fehlerdatei. Fehlende Verknüpfungen wurden eingefügt bzw. korrigiert. Im COCOSYS-Datensatz wurden alle Schlüsselwörter für die stand alone-Simulation des RDB entfernt und die entsprechenden Ventile und das RDB-Leck entfernt.

Im ATHLET-Datensatz wurden alle Bezüge auf die Kopplung mit CONDRO beseitigt oder außer Funktion gestellt. Schnittstellen zu COCOSYS wurden eingeführt.

Das Kontrollwort OBJECTCON zur Ausgabensteuerung der Print- und Plot-Größen wurde neu eingefügt. MULTICOMP wurde zur Erfassung von Luft im ATHLET-Datensatz neu eingefügt mit dem Gas 'AIR'. Zur Übergabe der Druck- und Enthalpie-Randbedingungen für die Einspeisung der Ventile in die Kondkammerwasservorlagen wurden sogTIMEDEPVOL eingefügt.

Im COCOSYS-Datensatz wurden die Lüftungssysteme (Umluftsysteme und Kühler) eingeführt. Die Inbetriebnahme dieser Systeme erfolgt vom GCSM aus über entsprechende Kontrollfunktionen in COCOSYS. Die prinzipielle Funktionsfähigkeit dieser Systeme wurde getestet.

3.2 Nodalisierungsstudie bezüglich des Aerosol- und Spaltproduktverhaltens und Untersuchung unterschiedlicher Kopplungsmethoden

Da für viele Untersuchungen Datensätze mit ca. 200 Zonen genutzt werden, bestand die Befürchtung, dass Rechnungen zum Spaltproduktverhalten relativ viel Rechenzeit benötigen, vor allem bei einer 'vollständigen' Aerosolrechnung mit Berücksichtigung der Hygroskopie. Daher scheint es zunächst notwendig, zu untersuchen, ob für Aerosolrechnungen die gleichen Anforderungen an die Nodalisierung wie für die Thermohydraulik zur Berechnung der Gasverteilung gelten müssen. Die im Zuge dieses Vorhabens gemachten Erfahrungen zeigen überraschenderweise, dass nahezu immer die Berechnung für die Thermohydraulik (im Hauptmodul THY) zeitbestimmend ist. Dies ließ es nicht erforderlich erscheinen, eine systematische Untersuchung durchzuführen, in welchem Maße eine Zusammenfassung von Thermohydraulikzonen für die Aerosolrechnung vertretbar ist.

Die bisher für Stahloberflächen vorliegenden Erkenntnisse für die Nodalisierung des Jodverhaltens lassen es zumindest fraglich erscheinen, ob die ursprünglich vorgesehene Logik

$$N_{Thy} > N_{Aer} > N_{Jod}$$

überhaupt vertretbar ist. Aufbauend auf den mit den in diesem Vorhaben durchgeführten Rechnungen wird folgendes Vorgehen derzeit als sinnvoll erachtet:

- Beibehaltung einer einheitlichen Nodalisierung und der derzeit in COCOSYS realisierten Kopplung der Hauptmodule
- Sammeln weiterer Erfahrungen mit Spaltproduktrechnungen
- Abschätzen der adäquaten Jodnodalisierung, wozu auch Erkenntnisse über Mehrraum-Einflüsse bei mit Anstrichen versehenen Wandoberflächen notwendig sind.

Zu gegebener Zeit wird der Punkt "Nodalisierungsvorschriften" und "Kopplungsmethodik" wieder aufgegriffen, wobei dann auch die Neuformulierung des Hauptmoduls AFP und die erste Erfahrung unter Einbeziehung des Hauptmoduls CCI in die Diskussion einfließen müssen.

4 ASTEC-Validierung

4.1 CPA Basisvalidierung

Im Rahmen der Qualitätssicherung für ASTEC werden mit jeder neuen Version, hier die Version ASTEC V1.0, bestimmte in der Basisvalidierungsmatrix festgelegte Versuche vor der Freigabe der Version erneut nachgerechnet, sog. Regressionstesten. Die Validierung für die Regressionsüberprüfung des Moduls CPA (Containment Part of ASTEC) mit seinem Thermohydraulik- und Aerosoltransportteil wird von GRS durchgeführt, da die Koordination für die containmentbezogenen Arbeiten bei der GRS liegt. Beim Regressionstesten von ASTEC wird geprüft, ob die vorangegangenen Änderungen in Modellen oder das Hinzufügen neuer Detailmodelle die Robustheit und die benötigte Zeit für die Rechnung signifikant beeinträchtigen. Darüber hinaus werden bei jedem Versuch die zentralen Parameter dahingehend überprüft, wie sich die vorgenommenen Veränderungen auswirken. Die Nodalisierung wird bei jedem Versuch beibehalten. Für das Regressionstesten von Thermohydraulik und Aerosolverhalten wird der Versuch VANAM-M3, für die Thermohydraulik mit Druck, Temperatur und Gasverteilung einschließlich Sprühsystem der Versuch NUPEC M7-1 und für Thermohydraulik mit Wasserstoffverbrennung der Versuch HDR 12.3.2 genutzt. Der Jodmodul, der von IRSN entwickelt und implementiert wurde, wird bei IRSN validiert.

Thermohydraulik- und Aerosolvalidierung an VANAM-M3 im Battelle Modell Containment

Das Experiment VANAM M3, seinerzeit Gegenstand des Internationalen Standard-Problems 37 (ISP37), wurde im rotationssymmetrischen Battelle-Beton-Containment mit einem freien Volumen von 626 m^3 durchgeführt. Die experimentelle Fahrweise orientierte sich an einem Kernschmelzszenario 'Abblasen am Druckhalter mit anschließender Primärkreisdruckentlastung (ND*)'. Nach einer längeren Aufheizphase von ca. 17 h schloss sich eine Versuchsphase mit abwechselnden Einspeisungen und Ablagerungen von Aerosolen an. Das Standardsimulationsmodell (Nodalisierung) für die CPA Berechnung umfasst eine einfache 11-Zonennodalisierung mit 13 Atmosphärenverbindungen und 49 wärmeleitenden Wandstrukturen.

Bei der Überprüfung anhand des Versuches VANAM M3 wurden beispielhaft die in Abb. 4-2 bis Abb. 4-6 dargestellten Ergebnisse erzielt. Die Rechenergebnisse mit

ASTEC CPA stimmen mit den Messergebnissen ähnlich gut überein wie COCOSYS-Ergebnisse.

Der Vergleich der Verläufe der Aerosolkonzentrationen wird beispielhaft in Abb. 4-1 für den Dombereich R9 und Abb. 4-2 für den zweiten, unteren Ringraum R8 gezeigt. Die Kondensation des Dampfes auf den hygroskopischen NaOH-Aerosolpartikeln führt zu einer schnellen Konzentrationsabnahme nach dem Ende der Einspeisephase nach 18.2 h und nach 24.1 h. Insbesondere nach 18.2 h erfolgt die Ablagerung in Raum R8 langsamer als gemessen, was auf den deutlich überhitzt berechneten Zonenzustand zurückzuführen ist. Hierbei lagert sich bei geringer berechneter Feuchte weniger Kondensat an den Partikeln an, die folglich langsamer schwerer werden und langsamer abregnen.

Die berechnete relative Feuchte (Kurve B in Abb. 4-4) im Dombereich R9 ist geringfügig niedriger als die gemessenen Werte. Das verwendete Nichtgleichgewichts-Zonenmodell hat die Tendenz, den Zonenzustand stärker überhitzt zu berechnen.

Der berechnete Druckverlauf (Abb. 4-5) stimmt gut mit den gemessenen Werten überein.

Die berechnete Temperatur (Abb. 4-6) im oberen Bereich R9 (Dom) stimmt in allen experimentellen Phasen gut mit der gemessenen Temperatur überein. Die für den unteren, inneren Ringraum R6 (Abb. 4-6) berechnete Temperatur ist jedoch in den meisten Phasen des Versuchs höher als die gemessene, was auf die stratifizierte Atmosphäre in diesem Raum zurückzuführen ist. Lediglich während Phase 5 (zwischen 23 h und 25 h) führte die Dampfinspeisung im unteren Zentralraum R3 zu einer Vermischung der gesamten Containmentatmosphäre, außer dem äußeren Ringraum natürlich. Die in den unteren Ringräumen (Raum R6) aufgetretene Stratifikation wurde wegen der vorgegebenen relativ groben Nodalisierung nicht nachvollzogen. Für den unteren Ringraum R6 war nur ein Kontrollvolumen abgebildet, das entsprechend dem verwendeten physikalischen Zonenmodell nur eine einheitliche Temperatur in der Atmosphäre berechnet. Bei entsprechend verfeinerter Nodalisierung kann auch die Temperaturschichtung gut nachgerechnet werden.

Im Vergleich zur vorangegangenen Rechnung im Zuge des Regressionstestens sind die Ergebnisse kaum verändert, also insbesondere keine negativen Einflüsse aus Modelländerungen oder neuen Modellen festzustellen.

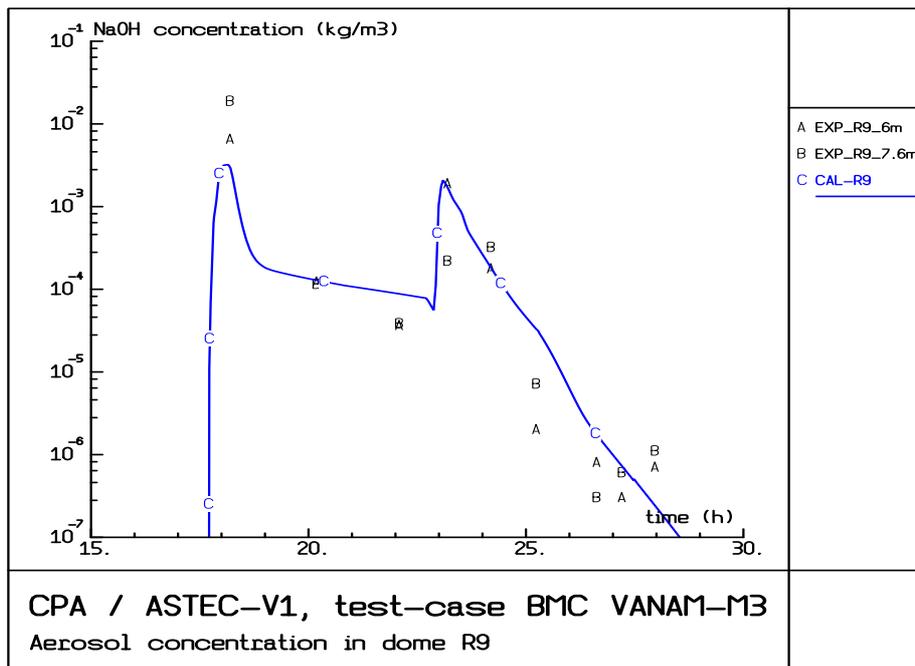


Abb. 4-1 Vergleich Messung Rechnung Aerosol Konzentration im Kuppelraum 9

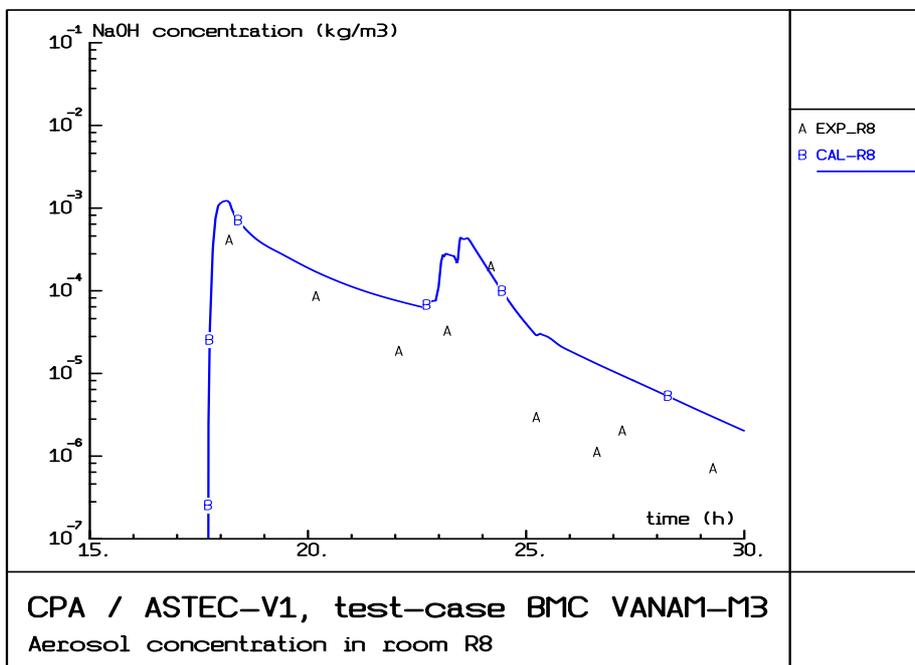


Abb. 4-2 Vergleich Messung Rechnung Aerosol Konzentration im Raum 8

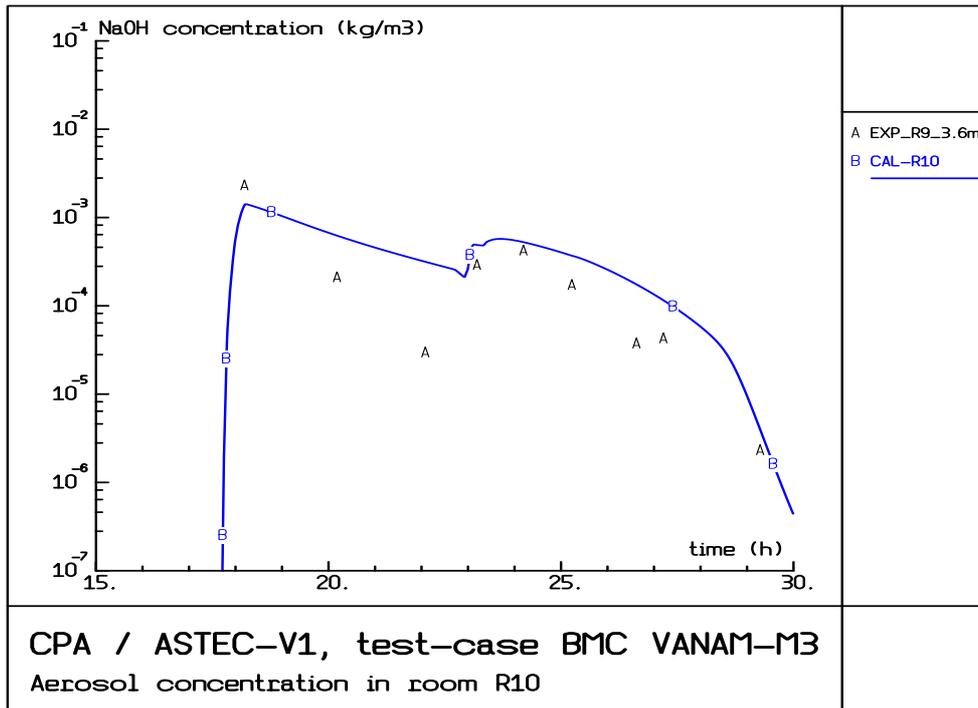


Abb. 4-3 Vergleich Messung Rechnung Aerosol Konzentration im Raum 10

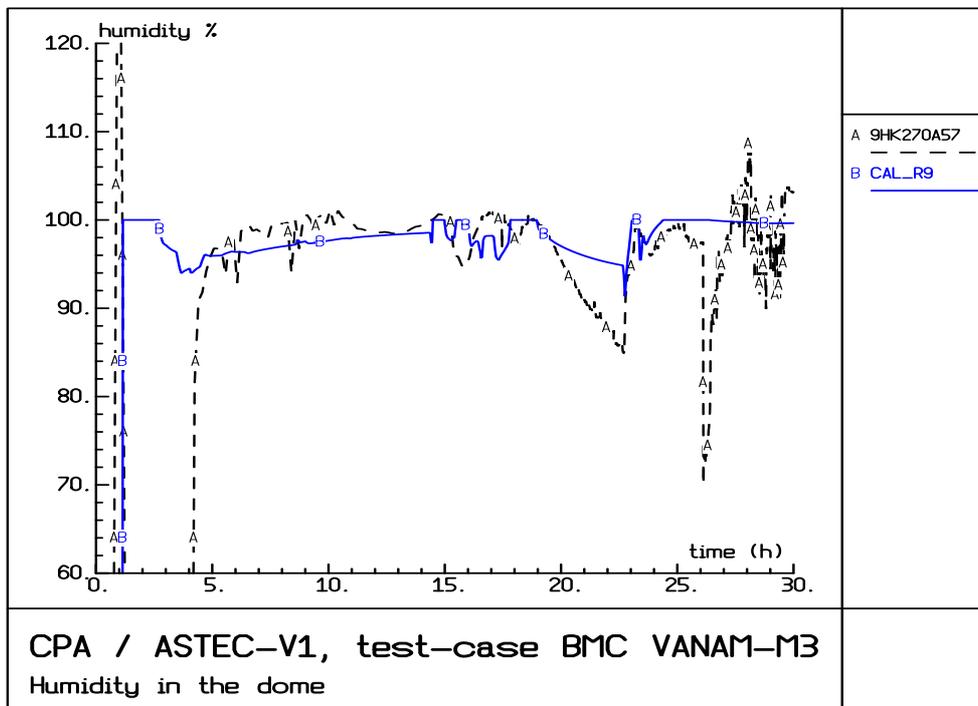


Abb. 4-4 Relative Feuchte im Kuppelraum R9

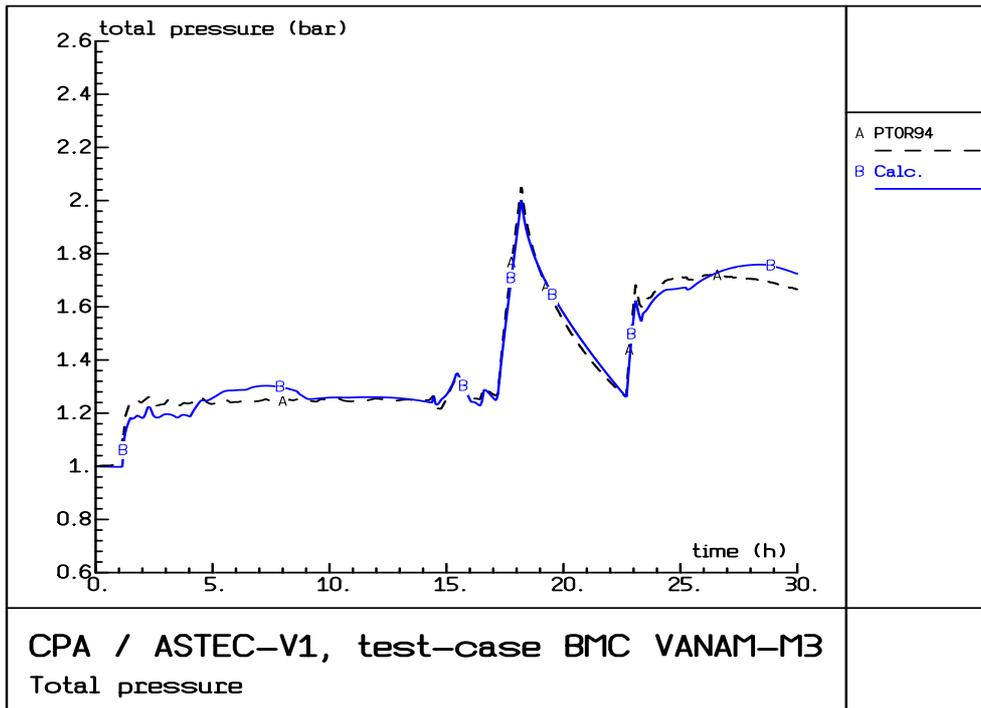


Abb. 4-5 Vergleich Messung Rechnung Absolutdruck

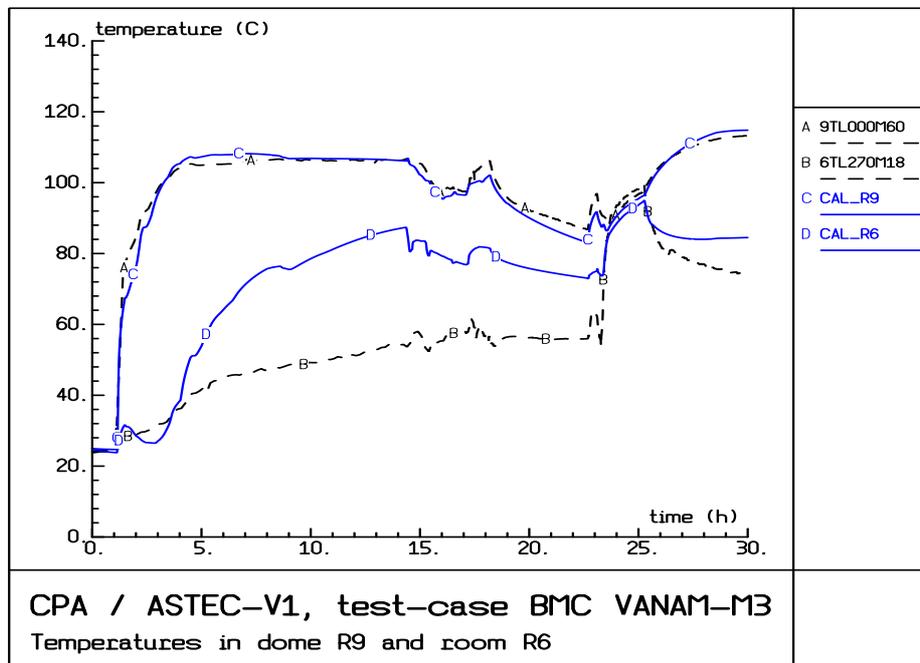


Abb. 4-6 Vergleich Messung Rechnung Temperaturen im Raum R6 und R9

Wasserstoffverbrennungsversuch HDR 12.3.2

Im HDR-Versuchsgebäude wurden in der Versuchsserie E12 in einem Teilvolumen des Sicherheitsbehälters eine Reihe von Wasserstoffverbrennungsversuchen mit realistisch großen Raumvolumina in einer Anordnung der 3 Gebäude-Räume R1801 und Doppelraum R1904/05 mit insgesamt 535 m^3 durchgeführt. Von diesen Versuchen wurde der Versuch E12.3.2 zur Standardvalidierung ausgewählt.

Bei diesem Versuch wurde ein Wasserstoff-Wasserdampf-Luftgemisch mit 10 Vol.-% H_2 und 25 Vol.-% Dampf am Ende des Doppelraums R1904/05 gegenüber der Überströmöffnung gezündet. Der große Zentral-Raum 1801 war vom übrigen Containment mit einer Berstfolie getrennt, um ein Abströmen des Wasserstoffs aus den 3 Versuchsräumen zu verhindern. Bei dem Druckaufbau während der Verbrennung zerriss die Folie und entlastete den Druck in das übrige HDR-Volumen.

In der Simulation wurde die Abbildung des HDR-Containments beschränkt auf die Verbrennungsräume und ein Entlastungsvolumen. Hierzu wurden 3 Verbrennungszonen und ein Entlastungsvolumen modelliert: ein Doppelraum mit 205 m^3 (R1904/05), in dem gezündet wurde, ein anschließender Raum mit 332 m^3 (R1801), unterteilt in eine obere (184 m^3) und eine untere Zone (148 m^3) (wegen unterschiedlicher Flammenausbreitungsgeschwindigkeiten) sowie eine Zone mit 4800 m^3 (R11004) zur Erfassung eines Teiles der restlichen HDR-Räume. 3 Verbindungen verknüpfen die 3 Verbrennungszonen. Weiterhin wurde eine Berstfolie mit einem Öffnungsdruck von 1800 Pa simuliert zwischen den Experimental-Räumen und dem restlichen Containment-Volumen. 3 Wandstrukturen - eine für jeden Verbrennungsraum - modellieren die Wände. Die Außenseite der Strukturen wurde wegen der kurzen Problemzeit als adiabatisch betrachtet. Die Anfangswasserstoffkonzentration wurde mit 9.6 - 10 Vol.-% in den drei Räumen vorgegeben.

Beispielhaft ist der Gesamtdruckverlauf mit der Verbrennungsdruckspitze in Abb. 4-7 wiedergegeben. Die Verbrennung wurde zum Zeitpunkt 0 gezündet. Die Flammenfront schlug nach 3.6 s über in den anschließenden Raum R1801. Die Verbrennung endete nach 3.8 s in den beiden Ausgangsräumen (R1904/05) und nach 6.1 s in dem angeschlossenen Raum (R1801). Der Spitzendruck wurde gut wiedergegeben. Der Ausgleichsdruck nach Verbrennungsende war jedoch zu hoch. Dies ist auf das nicht bekannte Expansionsvolumen zurückzuführen, das im restlichen HDR-Containment mit der Druckentlastung der Verbrennung beaufschlagt wurde. Als erste Näherung wurde nur das Volumen des HDR-Kuppelraums (R11004) mit 4800 m^3 zur Druckentlastung

berücksichtigt. Dies ist aber offensichtlich zu klein. Eine andere Validierungsrechnung zeigte, dass nahezu das ganze HDR-Containment mit ca. 10 000 m³ zur Druckentlastung beitrug.

Die berechneten Temperaturen (Abb. 4-8) im verbrannten Teil der Zone steigen schnell auf ca. 650 °C. Nach 3.8 s war der Wasserstoff in den Ausgangsräumen vollständig verbrannt. Die berechneten Maximaltemperaturen waren geringfügig niedriger als die Messwerte. Der Temperaturabfall nach dem Ende der Verbrennung war langsamer als dies gemessen wurde.

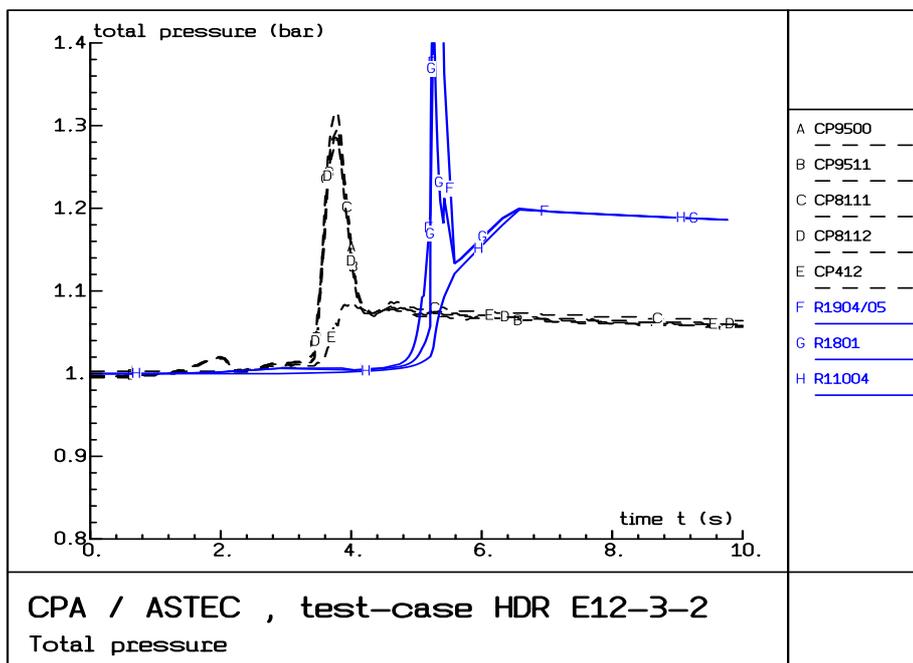


Abb. 4-7 Vergleich Messung Rechnung Druckverläufe in den verschiedenen Räumen

Auch für diesen Versuch zeigt das Regressionstesten keine negativen Auswirkungen durch veränderte Modellierung im Code.

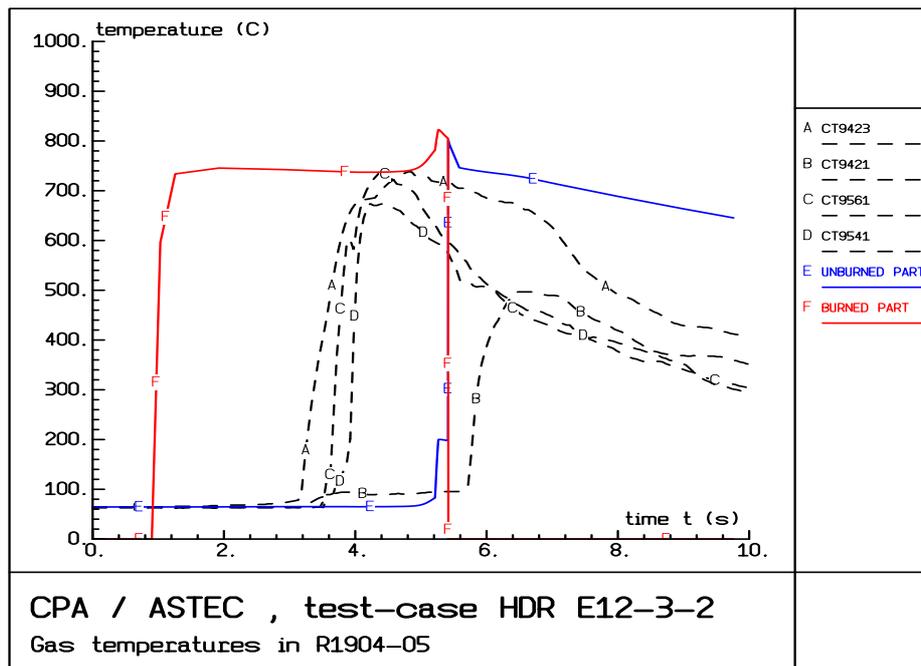


Abb. 4-8 Vergleich Messung Rechnung Gastemperaturen im Raum 1904-05

NUPEC Sprüh- und Heliumverteilungsversuch M 7-1

Dieser Versuch wurde als 'coupled effect test' ausgewählt, um Wasserstoffverteilung unter Einwirkung eines Innensprühsystems zu validieren, d. h. sowohl die Modellierung der Wasserstoffverteilung als auch die Simulation des Sprühsystems und dessen Auswirkungen auf die Gasverteilung zu überprüfen. Der stählerne Versuchsbehälter mit einer Innenunterteilung und einem feinen Volumen von 1312 m³ bildet einen in den Längenmaßen 1/4 verkleinerten japanischen Druckwassersicherheitsbehälter ab. Die Isolierung nach außen war 15 cm dick.

In einer Aufheizphase von 3.4 h wurde 60 °C bis 70 °C heißer Dampf in einem unteren Raum eingespeist, um den Versuchsstand auf die gewünschten Startbedingungen (ca. 70 °C bei 1.4 bar) aufzuheizen. Nach 17 min Ruhephase ohne Einspeisung wurden gleichzeitig Helium als Ersatzgas für Wasserstoff und Dampf an der gleichen Position in den Versuchsbehälter eingespeist und gleichzeitig auch das Sprühsystem in der Kuppel mit einem Durchsatz von 70 m³/h aktiviert. Nach 30 min wurden Sprühsystem und Dampfeinspeisung abgeschaltet und für weitere 30 min die Durchmischung der Atmosphäre durch die Naturkonvektion gemessen.

Der Versuchsbehälter wurde mit 32 Zonen abgebildet: 27 Gleichgewichtszonen und 5 Nichtgleichgewichtszonen für die Kuppel, in die das Sprühsystem einspeist. Eine Gleichgewichtszone bildet die Umgebung ab. Das in ASTEC V1 benötigt eine Nichtgleichgewichtszone am Ende des Sprühpfad (Fallweg der Sprühtropfen). Daher wurden die 5 Zonen in der Kuppel, die vom Sprühsystem betroffen waren, als Nichtgleichgewichtszonen abgebildet. Insgesamt verbinden 123 Verbindungen die Zonen, von denen 64 atmosphärische Verbindungen, 25 Drainageverbindungen, 8 Sumpfausgleichsverbindungen, 11 Pumpensystemverbindungen und 15 Wasserablaufverbindungen an den Wänden sind. Die Wandwasserablaufverbindungen sind wesentlich für die richtige Beschreibung des gekoppelten thermohydraulischen Verhaltens von Atmosphäre und Stahlwänden, da ein Teil der Wände in der Kuppel direkt vom Sprühwasser bedeckt wurde. Die Wände wurden mit 66 Strukturen abgebildet.

Die Rechnung begann mit Dampfeinspeisung und dem Einsatz des Sprühsystems. Durch die Abschaltung des Sprühsystems nach 1800 s nahm die Turbulenz in der Atmosphäre deutlich ab, die bis dahin zu einer guten Durchmischung geführt hatte. Dies bedeutet, dass sich die Strömungsbedingungen für die Konvektionsströmung in der Kuppel änderten, was aber nicht automatisch vom Strömungsmodell berücksichtigt werden kann. Zur Simulation des Effekts der veränderten Turbulenz durch Abschalten des Sprühsystems (deutlich weniger Durchmischung) müssen derzeit noch Strömungsverlustbeiwerte und einige andere Eingabegrößen per Eingabe geändert werden. Um die Änderungen zu aktivieren, ist ein RESTART der Rechnung erforderlich.

Für den Wasserstoffverteilungsversuch NUPEC M7-1 sind die Rechenergebnisse in den Abb. 4-8 bis Abb. 4-13 im Vergleich zum Experiment beispielhaft dargestellt. Während der Sprühphase wurden die Heliumkonzentrationen (Abb. 4-9) geringfügig höher berechnet als gemessen und in der Phase nach Abschalten des Sprühsystems (nach 1800 s) 1 Vol.-% niedriger berechnet.

Der Druckverlauf (Abb. 4-10) fällt in der Rechnung schneller ab als im Experiment. Das Druckminimum ist etwas tiefer und etwas früher als im Experiment. Der anschließende Druckanstieg wird stärker berechnet als gemessen. Dieses berechnete Verhalten des Druckes kann auf die Verteilung des Sprühwassers zwischen Wänden und Atmosphäre zurückgeführt werden, die durch den Benutzer vorgegeben wurde. Diese Verteilung berücksichtigte den Teil des Sprühwassers, der direkt auf die Wände auftraf und als Wasserfilm an den Wänden herunter lief und den Teil, der als Tropfen durch die Atmosphäre fiel und diese abkühlte. In der Rechnung wurde der Atmosphäre zuviel Energie entzogen (Druck fällt zu schnell ab) und zuviel Wärme in die Strukturen gespeichert.

Dies führte zu höheren Strukturtemperaturen und mehr Wärme in den Strukturen, die sich dann nach Abschalten des Sprühsystems verstärkt entspeicherte und zum überhöhten Druckanstieg führte. Dieser Zusammenhang wurde bei alten Validierungsrechnungen zu diesem Versuch festgestellt.

Die berechneten und gemessenen Temperaturen (Abb. 4-11 bis Abb. 4-13) in unteren Räumen, in zentralen Räumen und in der Kuppel weichen um 6 bis 8 °C ab. R15 weicht sogar um 8 °C ab und gibt damit die homogenen Temperaturen im Versuchstand in den betreffenden Räumen nicht richtig wieder. In Abb. 4-11 zeigt sich gar eine Umkehrung des Temperaturgradienten zwischen den Räumen, was in früheren ASTEC Versionen (V0.1, V0.3) nicht beobachtet wurde. Den Ursachen hierfür ist noch nachzugehen.

- die Übereinstimmung des berechneten Gesamtdruckes hat sich gegenüber ASTEC V0.1 und V0.3 verschlechtert
- die berechneten Temperaturen stimmen auch vom Trend her deutlich schlechter als noch bei ASTEC V0.3 oder gar V0.1 überein
- die Übereinstimmung der berechneten Heliumkonzentrationen hat sich gegenüber den älteren Versionen noch mehr verschlechtert. Dies korrespondiert mit den Abweichungen des Gesamtdruckes, da bei Druckabweichungen der Dampfpartialdruck sich unterscheidet und dies sich wiederum auf die relativen Konzentrationen der Gaskomponenten auswirkt.

Im Unterschied zu ASTEC V0.1 wurde das vereinfachte Sprühmodell aus V0.1 durch ein wesentlich differenzierteres Modell in der Version V0.3 ersetzt, das auch Sprühen in Nichtgleichgewichtszonen zulässt. Die guten Ergebnisse der Version V0.1 wurden durch die Anpassung der Massenverteilung des Sprühwassers an die Wände und in die Atmosphäre erreicht. Diese Massenverteilung wurde für das neue Modell noch nicht angepasst. Es ist zu überprüfen, ob mit einer neuen Anpassung der Massenverteilung die Übereinstimmung zur Messung verbessert werden kann. Die Verbesserungen des neuen Sprühmodells konnten bei diesem Versuch mit der extrem hohen Sprühwassermenge noch nicht zum Tragen kommen. Eine Validierung an einem Versuch mit realistischeren Sprühmengen ist nach Aufarbeitung eines entsprechenden Versuchs vorgesehen.

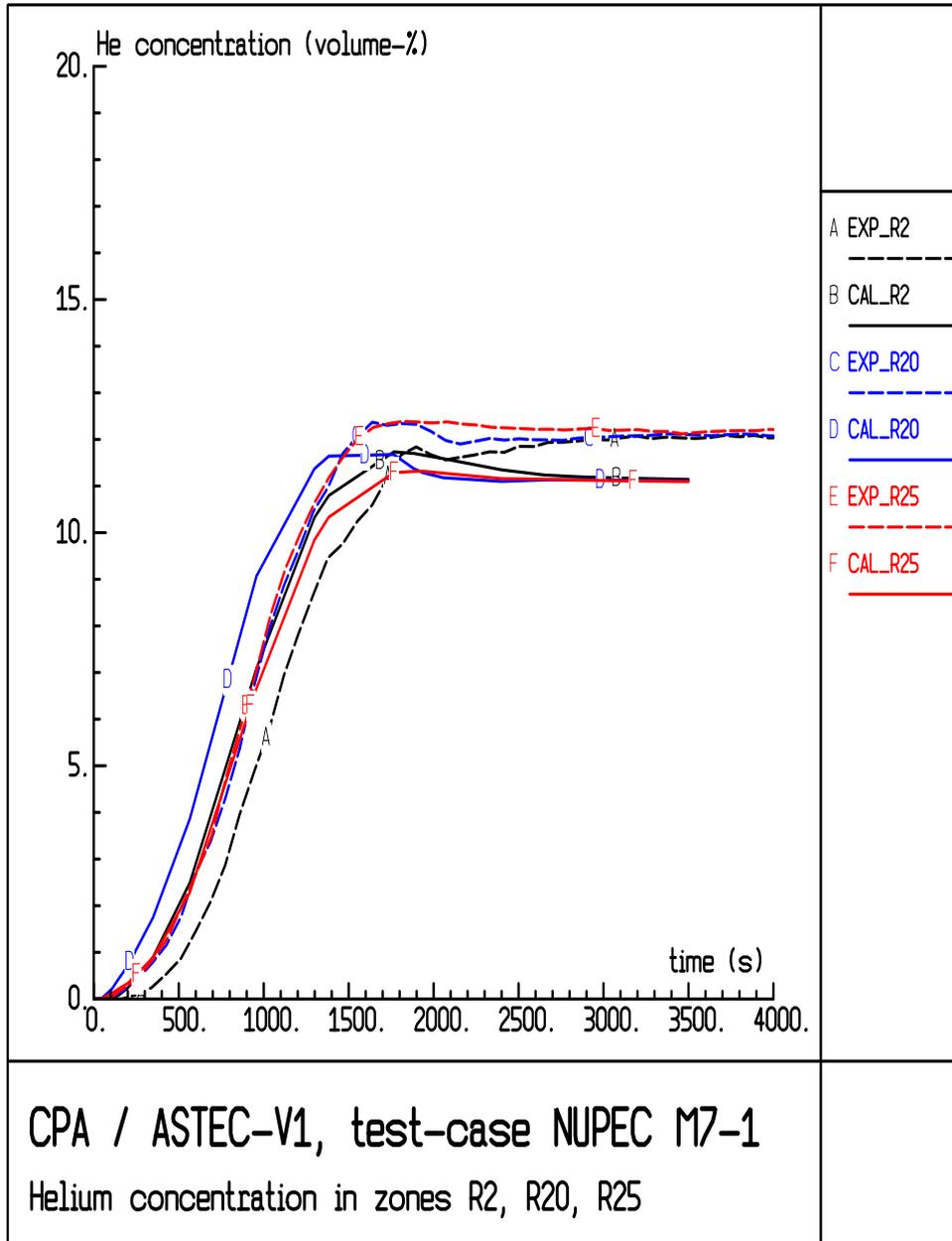


Abb. 4-9 Vergleich Messung Rechnung Helium Konzentrationen in R8, R20, R25

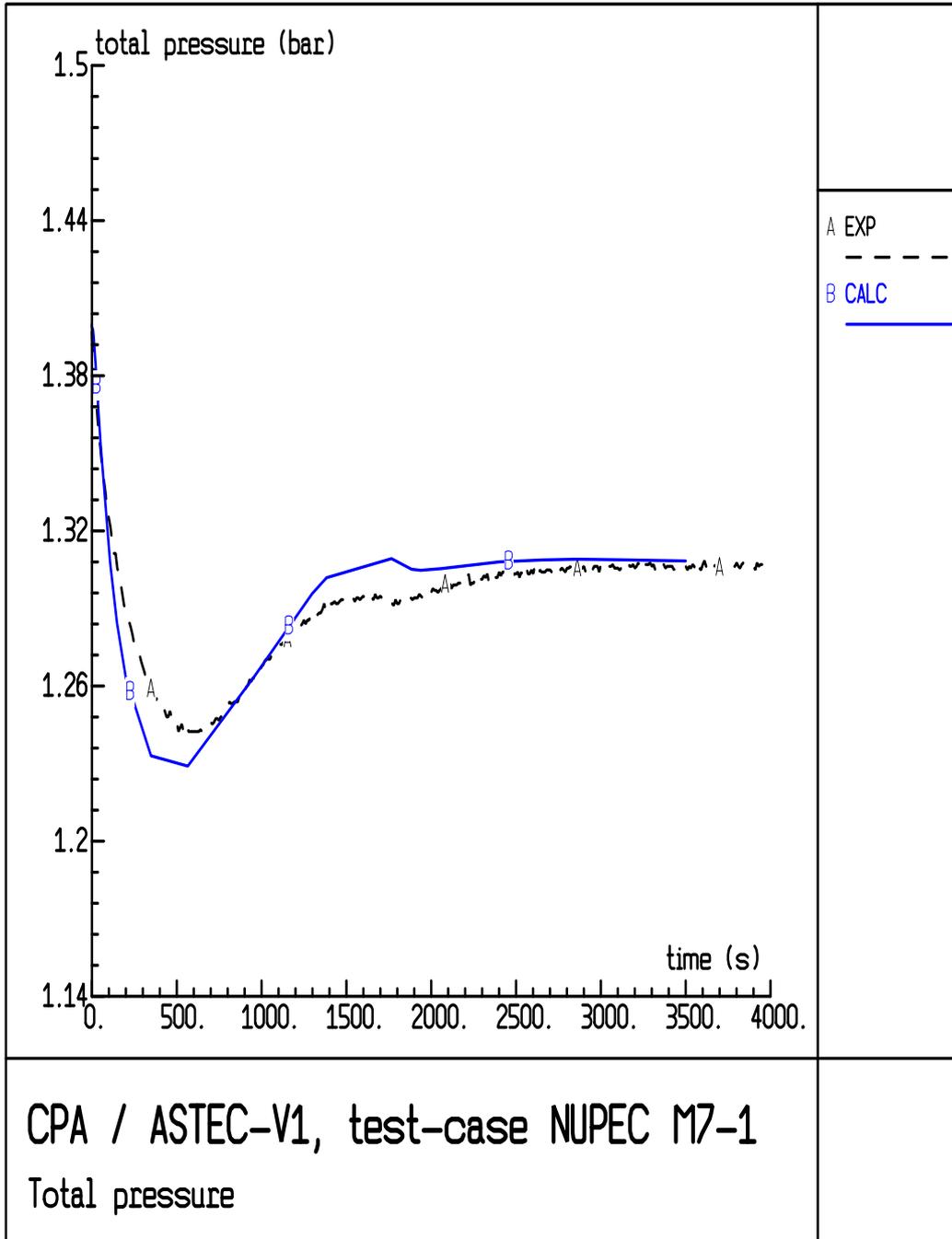


Abb. 4-10 Vergleich Messung Rechnung Druckverlauf

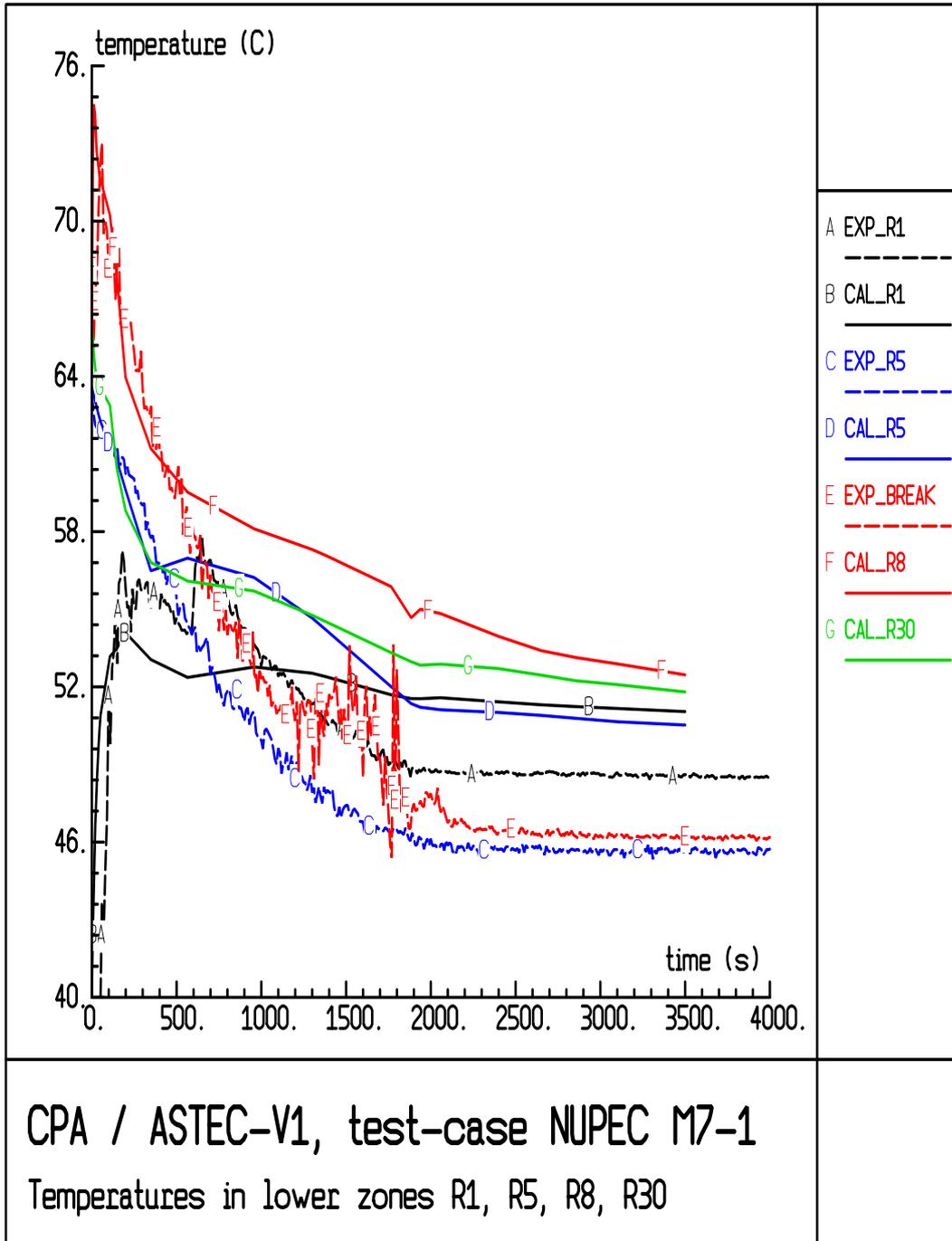


Abb. 4-11 Vergleich Messung Rechnung Temperaturverläufe in den Räumen R1, R5, R8, R30

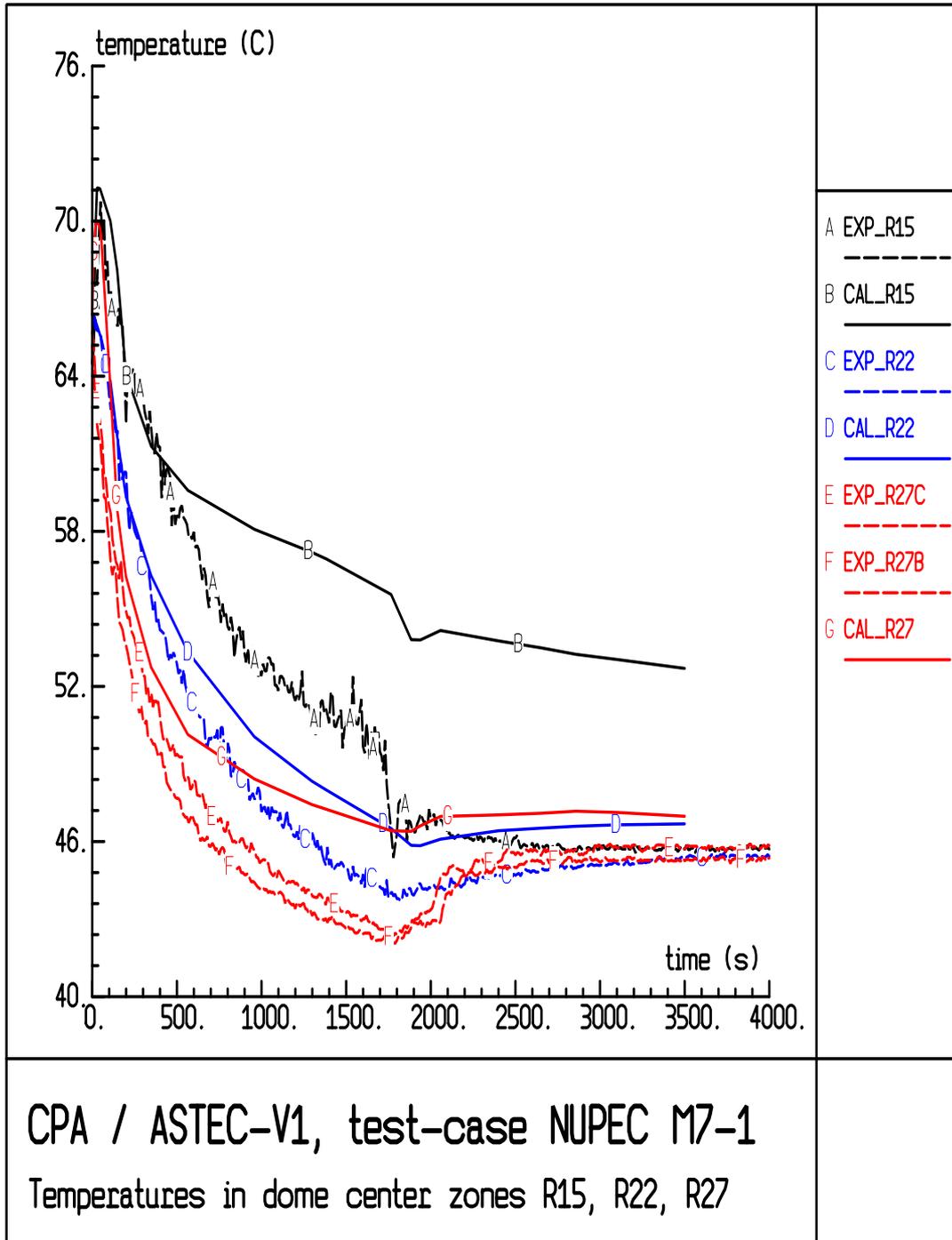


Abb. 4-12 Vergleich Messung Rechnung Temperaturverläufe in den Räumen R15, R22, R27

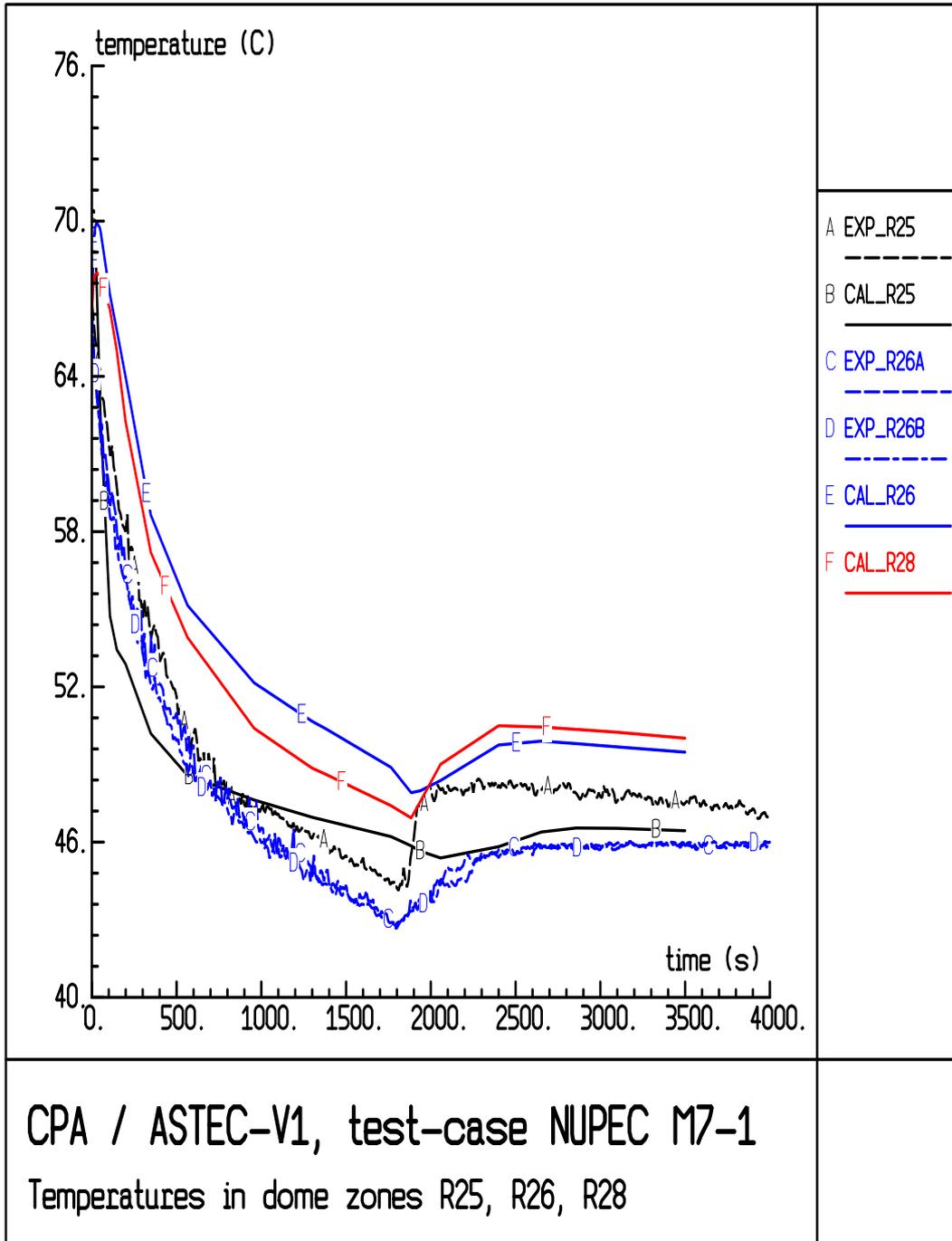


Abb. 4-13 Vergleich Messung Rechnung Temperaturverläufe in den Räumen R25, R26, R28

Weitere Rechnungen

Das Regressionstesten des Jodmoduls wird von IRSN als für den IODE Modul zuständiger Partner (PHEBUS RTF3, RTF5) durchgeführt.

Für das Regressionstesten zur Überprüfung der Schmelze Beton Wechselwirkungsmoduln WEX und MEDICIS wurden mit WEX die Versuche ACE L2 und L5 und BETA 5.2 nachgerechnet. Die Regressionsfälle konnten ohne nennenswerte Abweichungen von früheren Nachrechnungsergebnissen mit der neuen Codeversion wiederholt werden. In den MEDICIS Rechnungen wurde festgestellt, dass sich bisher keine CO₂-Freisetzung aus dem Beton ergab. Hier ist der MEDICIS Modul zu verbessern.

4.2 Intensivierte Validierung

4.2.1 Mehrraum-Fähigkeit der Jodmodellierung in ASTEC

Wie in 1.1.2 bereits ausgeführt, ist die Mehrraum-Fähigkeit der Jodmodellierung eine wesentliche Voraussetzung für eine sog. 'best estimate'-Berechnung des radiologischen Quellterms vom Sicherheitseinschluss zur Umgebung. Die in COCOSYS realisierte Kopplung von Jodverhalten (Chemie und Transport), Aerosolverhalten und Thermohydraulik ist in analoger Weise anschließend auch in ASTEC (Module CPA und IODE) realisiert worden. Die zwischen COCOSYS und ASTEC unterschiedliche Informatikstruktur allgemein und im Besonderen - die in beiden Rechenprogrammen unterschiedliche Jodmodellierung - AIM in COCOSYS bzw. IODE in ASTEC - machen es schwierig, die jeweilige Programmierung im Hinblick auf eventuelle Fehler direkt zu vergleichen. Aufbauend auf der Verifikation / Validierung der Jod-Mehrraum-Fähigkeit von COCOSYS wurden folgende Schritte für ASTEC durchgeführt.

- Plausibilitätsüberprüfung der IODE/CPA Mehrraumfähigkeit anhand des auf VANAM M3 aufbauenden Gedankenexperiments und Vergleich mit den mit COCOSYS erzielten Ergebnissen
- Nachrechnung der ThAI-Jodversuche Iod 10--12 und Vergleich der Ergebnisse mit denjenigen von COCOSYS

Beide Schritte haben eindrucksvoll die Mehrraumfähigkeit von IODE/CPA aufgezeigt. Zu der Überprüfung anhand des adaptierten VANAM M3-Versuchs ist nur festzustellen, dass die Ergebnisse insgesamt plausibel erschienen, einzelnen Abweichungen von COCOSYS aber nicht vertieft nachgegangen wurde, da in der Zwischenzeit die ThAl-Jodmehrraumversuche durchgeführt worden waren. Zu den Ergebnissen der Nachrechnungen dieser Versuche (Details siehe Anhang 9-9) bleibt festzuhalten:

- In Iod-10 beschreibt IODE/CPA die I_2 -Verteilung und das Gesamtverhalten korrekt, jedoch wird ebenso wie von COCOSYS die Homogenisierung in der Vermischungsphase unterschätzt.
- In dem Versuch Iod-11 mit feuchter Atmosphäre (r.F. > 75 % in der Schichtungsphase) wird das Heliumverhalten von CPA nahezu gleich wie von COCOSYS berechnet. Die gute Übereinstimmung der Rechnungen mit den experimentellen Ergebnissen zeigt, dass in beiden Fällen die Strömungsverhältnisse im Versuchsbehälter richtig erfasst werden und die Unterschiede bei den I_2 -Konzentrationen den Unsicherheiten bei den Modellen für Ad- und Desorption zugeordnet werden können.

In der Schichtungsphase wird die I_2 -Konzentration von IODE/CPA noch weitgehend korrekt beschrieben, aber in der Mischungsphase werden die Konzentrationen im Dombereich überschätzt und die Konzentrationsunterschiede zwischen oberem und unterem Behälterbereich sind deutlich ausgeprägter als im Experiment (Abb. 4-14 und 4-15), was auf einen zu hohen Desorptionskoeffizienten schließen lässt. Diese Vermutung wird durch die im Vergleich zu Couponmessungen höhere adsorbierte I_2 -Menge im oberen Behältervolumen gestützt. In diesem Versuch erreichen die mit IODE/CPA berechneten I_2 -Konzentrationen nicht die Güte der mit COCOSYS erzielten Resultate.

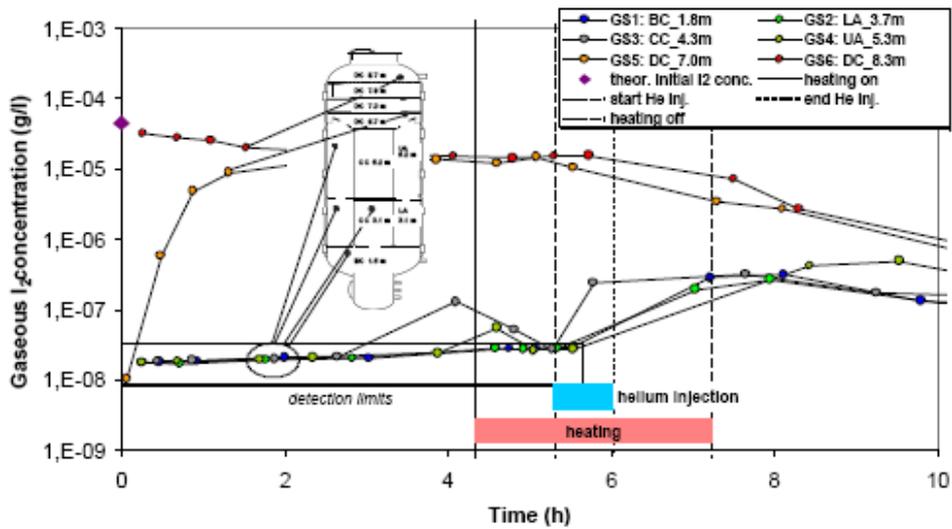


Abb. 4-14 Iod-11: Gemessene gasförmige I₂-Konzentrationen

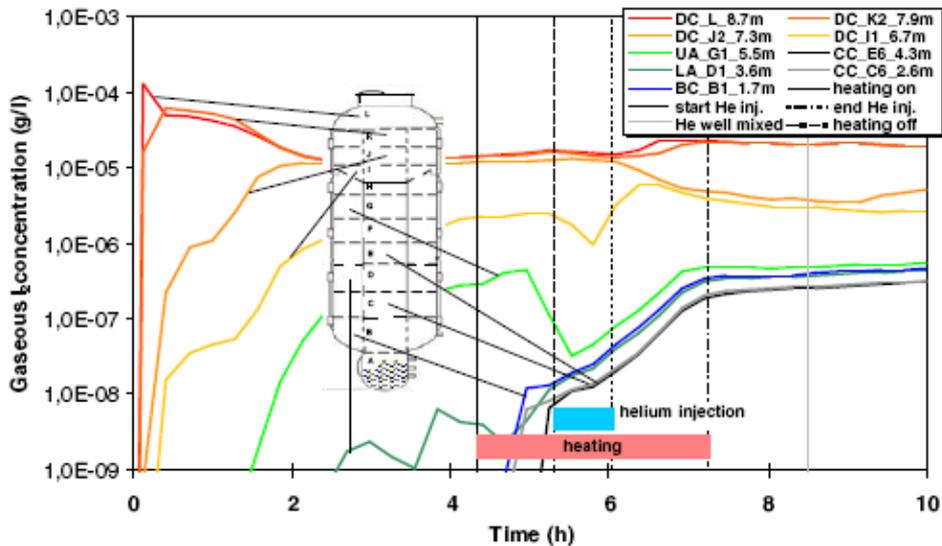


Abb. 4-15 Iod-11: Gasförmige I₂-Konzentration, gerechnet mit ASTEC-IODE

- In Iod-12 mit Wandkondensation im Bereich der Kühlmäntel trifft die Rechnung von IODE/CPA das Experiment weder in der Schichtungs- noch Mischungsphase und zum Versuchsende sind die I₂-Konzentrationen um 1 ½ Größenordnungen zu hoch, was erneut auf eine zu hohe Desorptionsrate schließen lässt. Zusätzlich wird die I₂-Adsorption bei Wandkondensation unterschätzt. Auch in IODE wird wie in AIM die Reaktion von abgelagertem I₂ mit dem Eisen der Ablagerungsfläche zu nicht flüchtigem FeI₂ derzeit nicht modelliert.

In diesem Versuch zeigt die IODE/CPA-Rechnung am Ende fast eine homogene I₂-Verteilung, was weder im Experiment noch bei der COCOSYS-Rechnung zu sehen war.

4.2.2 ASTEC Validierung am PHEBUS FPT1 Versuch (ISP-46)

4.2.2.1 Allgemeines

Für die Rechnung des ISP-46 mit ASTEC V0.4 wurden die Module VULCAIN, ELSA, SOPHAEROS, CPA, IODE und MDB in der gekoppelten Version verwendet. Durch das Modul VULCAIN ist die Anwendbarkeit des Codes normalerweise auf die Abbildung typischer Druckwasserreaktoren beschränkt. Für das Brennelementbündelexperiment des ISP-46 mussten deshalb von IRSN einige Unterprogramme von VULCAIN modifiziert werden. Diese Änderungen sind implementiert als Masken in der älteren Version 7.1 und in der neuen Version 7.1/2 von VULCAIN als Teil von ASTEC V0.4.

Auf die Version V0.4 musste zurückgegriffen werden, da sich die Freigabe der ursprünglich vorgesehenen Version V1 erheblich verzögert hatte, vor allem wegen der beiden neuen von IRSN beigestellten Module CESAR und DIVA für die Simulation der Thermohydraulik im Reaktorkühlkreislauf bzw. das 'in vessel'-Kernschmelzen.

4.2.2.2 Eingabebeschreibung für ASTEC V0.4

Allgemeines

Abb. 4-16 zeigt ein Schema der PHEBUS-FPT1-Anlage vom Bündel innerhalb des Treiber-Kerns über den Kreislauf mit einem U-Rohr das den Dampferzeuger repräsentiert bis zum Containment-Behälter mit dem Sumpf und den Kondensatoren.

Die Nodalisation der PHEBUS-Anlage umfasst das Bündel, den Kreislauf und den Containment-Tank.

Entsprechend den Anforderungen des ISP46 wurden zwei Rechnungen durchgeführt mit unterschiedlicher Nodalisation für das Containment. Eine für den so genannten Referenzfall und die andere für die best-estimate-Rechnung. Zunächst wurden die Analysen für den Referenzfall mit 1 Zone und 2 Knoten durchgeführt. Für die best-

estimate-Rechnung wurde die Nodalisation des Containments entsprechend den Anforderungen der Aerosol-Rechnung auf fünf Zonen erweitert. Abb. 4-20 zeigt das Einzonen-Schema und das Fünfzonen-Schema für das Containment. Der Bündelabschnitt und der Kreislaufteil wurden dabei nicht geändert.

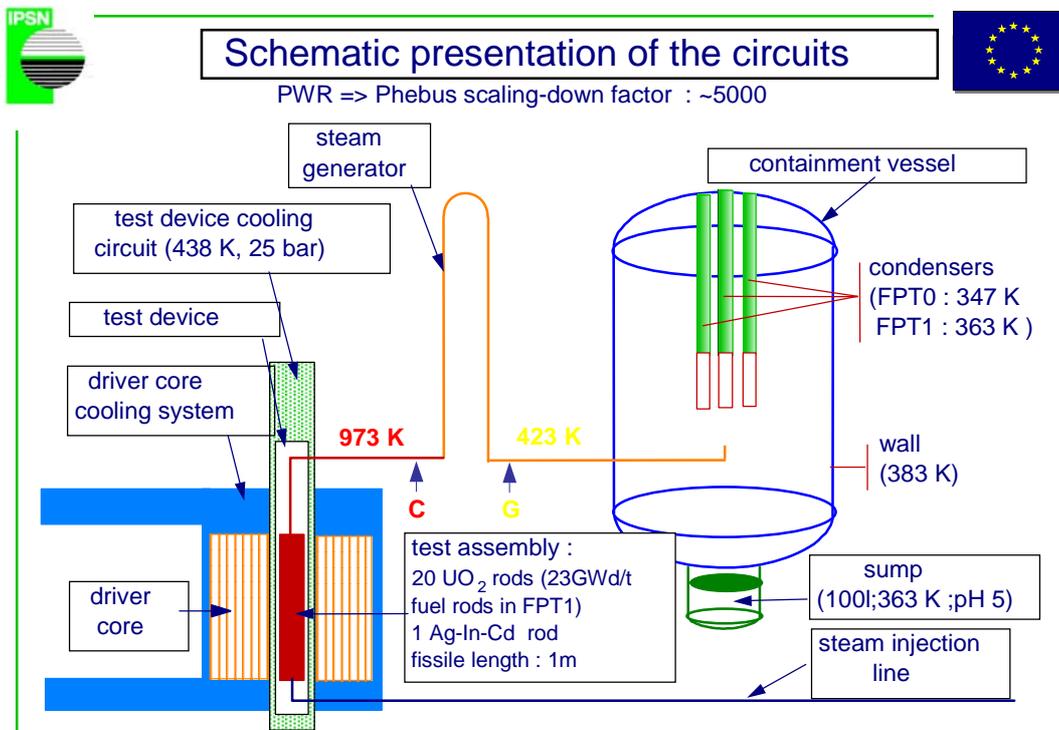


Abb. 4-16 Schematische Darstellung der Anlage für das PHEBUS FPT1 Experiment

Bündel

Abb. 4-17 zeigt einen schematischen Querschnitt durch das Bündel. Die Nodalisation des Bündels wurde entsprechend den Anforderungen von VULCAIN modelliert (Abb. 4-18).

Das Bündel wurde axial unterteilt in 22 Zonen mit einer Höhe von je 5 cm. Die radiale Unterteilung erfolgte in zwei Ringe, einen für die 8 inneren Brennstäbe und einen für die 12 äußeren Brennstäbe. Der zentrale Absorberstab des Bündels wurde aufgeteilt auf die zwei radialen Ringe entsprechend ihrem Anteil an dem Bündelquerschnitt.

Die Umfassung des Bündels wurde ebenfalls in 22 Zonen unterteilt und mit Hilfe der Modelle "barrel", "baffle" und "vessel wall" von VULCAIN dargestellt. Das Modell berücksichtigt Wärmeleitung und Wärmestrahlung in den Spalten.

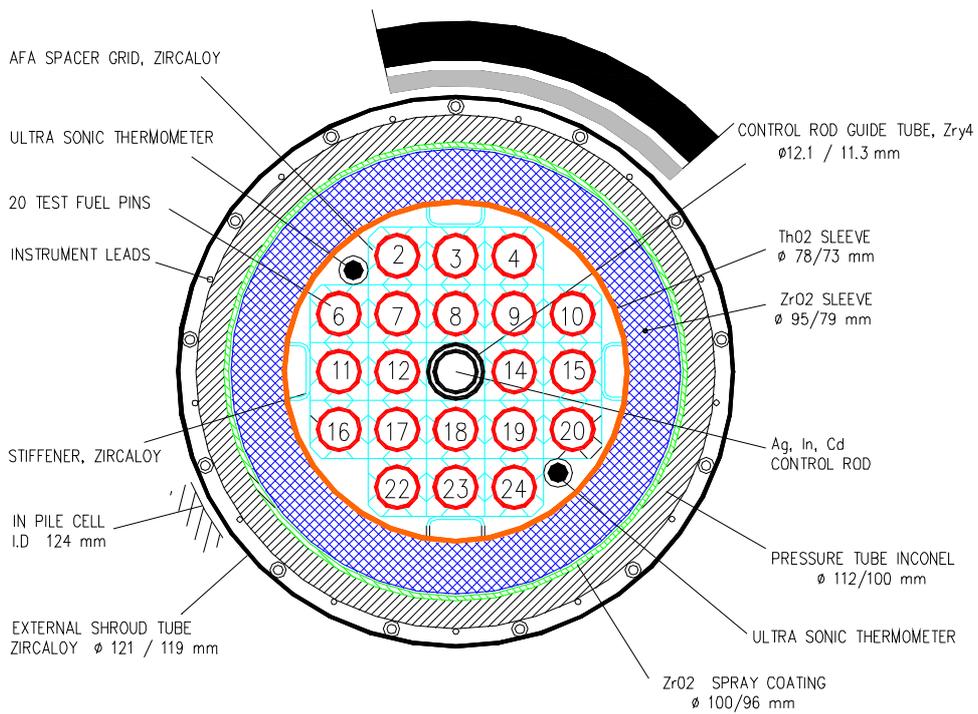


Abb. 4-17 FPT1 in Pile Test Querschnitt

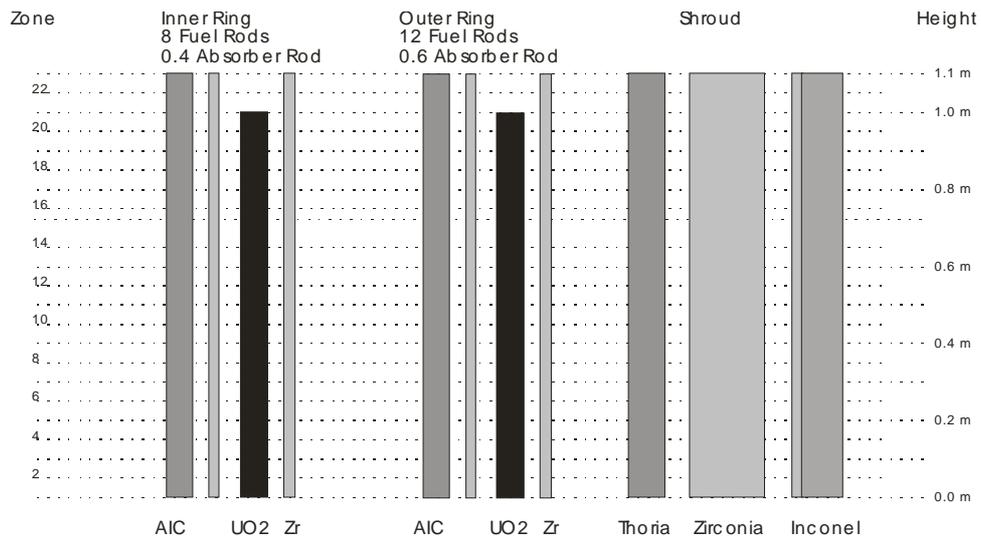


Abb. 4-18 Nodalisierung des Bündels im ASTEC Modul VULCAIN

Kreislauf

Das VULCAIN Modul erfordert eine Reaktor-Geometrie-ähnliche Nodalisation mit einem oberen Plenum, mehreren Kreisläufen einem downcomer und einem unteren Plenum.

Das einen Primärkreis repräsentierende Rohrleitungssystem, beginnend am Testelementaustritt über die Zone mit gezielt erzeugtem Temperaturabfall über einen vorgeählten Rohrleitungsabschnitt (thermal gradient tube) und das den Dampferzeuger repräsentierende U-Rohr bis zur Einspeisestelle in den Containmentkessel wurde in verschiedene miteinander verbundene Zonen eingeteilt, in denen die Transport- und Ablagerungs- und Resuspensionsprozesse berechnet wurden.

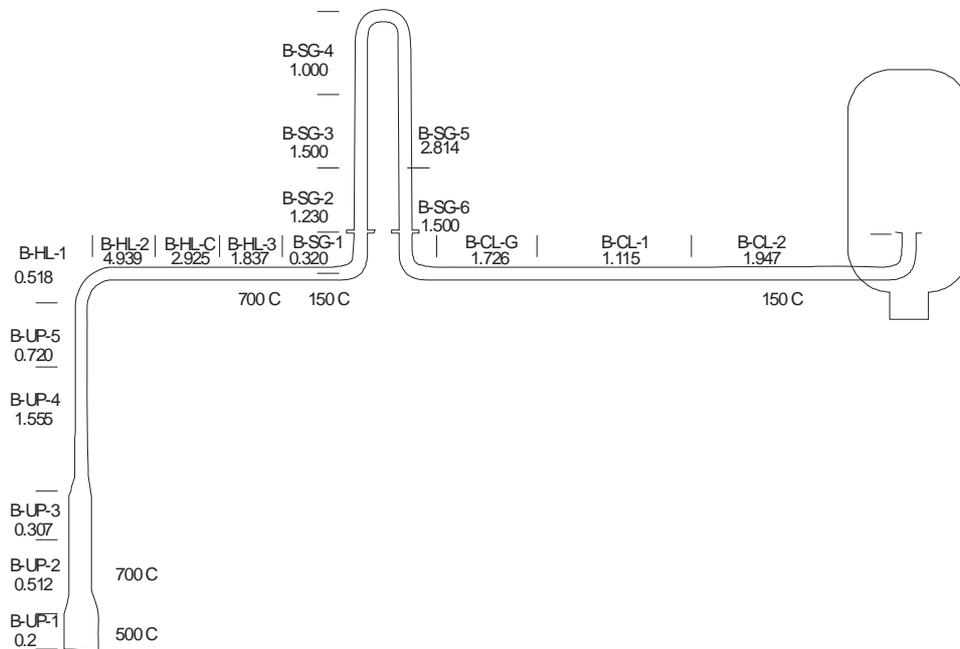


Abb. 4-19 Kreislaufnodalisation für die ASTEC Module VULCAIN und SOPHAEROS

Diese Spaltprodukttransportleitung wurde in 18 Teilstücke unterteilt wie in Abb. 4-19 dargestellt. Die Anzahl der Leitungsteile ist aufgrund von Anforderungen von VULCAIN begrenzt. Die Abmessungen sind vorgegeben durch die Stellen für die laut ISP-46 Kreislauf-Temperaturen ermittelt werden müssen. Denn nur am Anfang und am Ende der Leitungen können Temperaturen ausgewiesen werden.

Containment

Für das Containment wurden zwei Varianten der Zoneneinteilung gewählt. In der ersten repräsentiert eine atmosphärische Zone allein die gesamte Containmentatmosphäre. Dies war von den Initiatoren des Internationalen Standard Problem ISP-46 so empfohlen worden. In Ergänzung dazu - zumindest zur globalen Erfassung der auftretenden Strömungen und der Unterteilung der Aerosolablagerungen auf den Boden, in den Sumpf und auf vertikale Flächen - wurde ein Containmentmodell mit fünf miteinander verbundenen atmosphärischen Zonen entwickelt und bei einer Rechnung separat berücksichtigt. Beide Containmentmodelle sind in Abb. 4-20 gegenübergestellt.

Zwei unterschiedliche Umgebungs-Zonen wurden eingefügt: eine als Randbedingung sowohl für den nassen Kondensator als auch für den Sumpf mit einer Wandtemperatur von 90 °C, und eine verbunden mit der Atmosphäre im Tank und dem trockenen Kondensator.

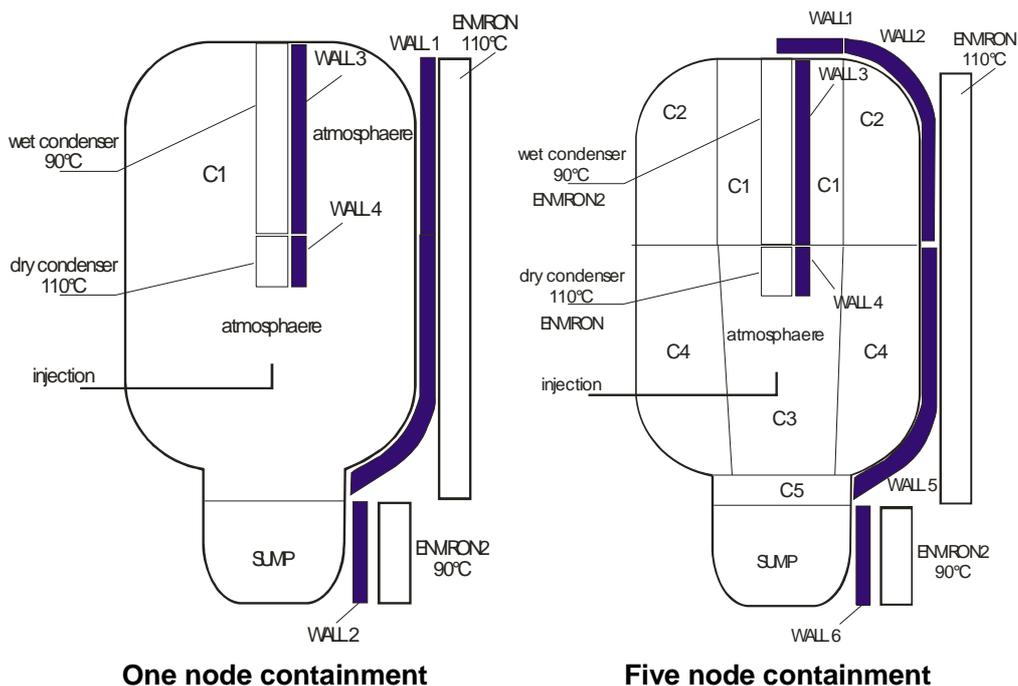


Abb. 4-20 Die beiden Nodalisationen des Containment Behälters

Ergebnisse

Die gemessenen Temperaturen im Testbündel und in den Komponenten wurden durch die Rechnung gut wiedergegeben. Dies zeigt beispielhaft Abb. 4-21. Auch die berechnete Rate freigesetzten Wasserstoffs von etwa 103 g aufgrund der Oxidationsprozesse liegt innerhalb des Unsicherheitsbandes der Messungen, welches 96 ± 13 g beträgt. Dies wird auch anhand Abb. 4-22 deutlich.

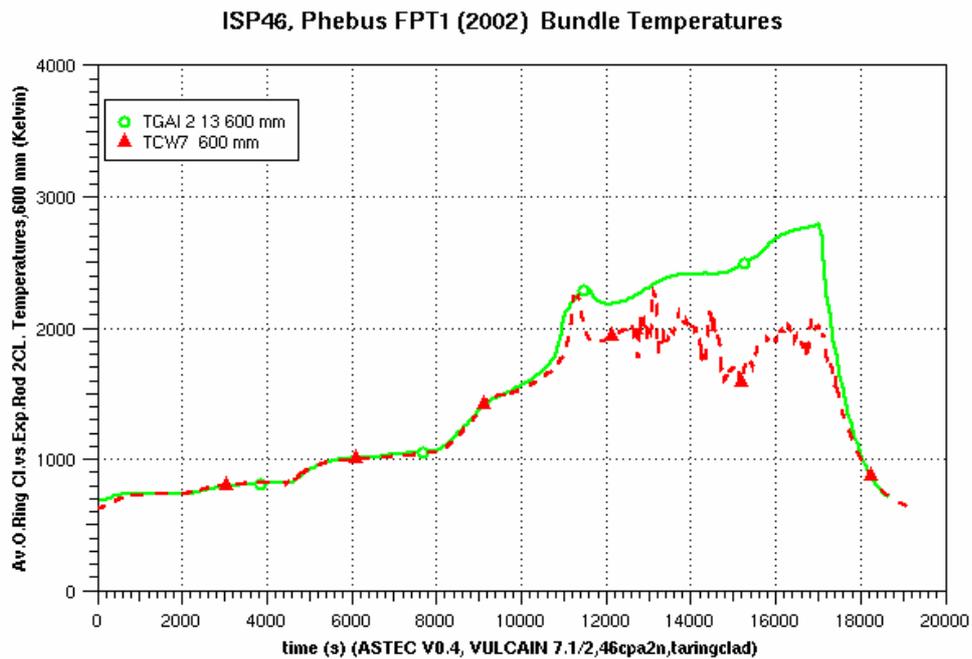


Abb. 4-21 Hüllrohrtemperaturen im äußeren Ring bei 600 mm im Vergleich zum Experiment (rote Linie)

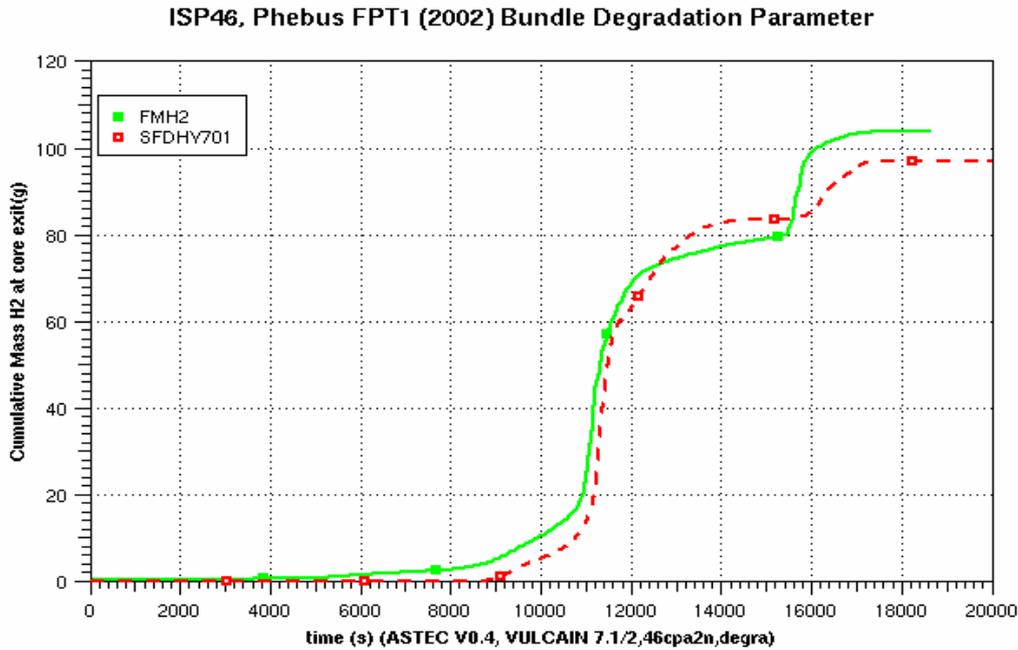


Abb. 4-22 Integrale Wasserstoffmasse am Kern Austritt verglichen mit dem Experiment (rote Linie)

Das Herunterschmelzen von Bündelmaterial in tiefer liegende Regionen wurde in plausibler Form berechnet. Jedoch konnte die Bildung eines Schmelze-Pools im unteren Teil des Bündels nicht reproduziert werden. Grund sind die zu hohen Schmelztemperaturen in VULCAIN, die im Programm fest eingebaut sind. Die totale Freisetzung der flüchtigen Spaltprodukte aus dem Brennelement wurde gut getroffen.

Das Modell für die Freisetzung des Strukturmaterials, das zu einer großen Überschätzung führte, muss verbessert werden.

Die Ablagerung von Spaltprodukten und Aerosolen in den verschiedenen Zonen des Kreislaufs wurden mit SOPHAEROS berechnet. Die Ergebnisse stimmten in den meisten Fällen mit den gemessenen Daten überein. Lediglich die Ablagerungen von Cs im oberen Plenum, von Ag im Dampferzeugerbereich und im kalten Strang der Rohrleitung sowie von U im Dampferzeuger wurden stark unterschätzt. Tab. 4-1 zeigt eine Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Freisetzungen und Ablagerungen von signifikanten Spaltprodukten in verschiedenen Bereichen des Kreislaufs. Größere Abweichungen sind mit roten Zahlen markiert.

Tab. 4-1 Bündelfreisetzung, Freisetzung im Punkt C and Punkt G und Ablagerungen im Kreislauf
Vergleich mit dem Experiment

Element	Initial Mass (g)	Bundle release VUL %	Bundle re-releaseExp %	U. plenum + vert. line deposit. %		Hot leg deposition %		PointC release %		SG deposition %		Cold leg deposition %		PointG release %	
				cal	exp	cal	exp	cal	exp	cal	exp	cal	exp	cal	exp
Xe	29.6	88.3	77.4					86	77.4					86	77.4
Kr	2.55	88.3	84					86	84					86	84
I	1.12	88.3	87	10.9	5.3	1.66	0.2	73.9	84	19.1	19.2	2.13	0.7	53.6	64.1
Cs	15.9	88.3	84	2.33	25.7	0.614	3.1	83.4	55.	38.8	10.7	1.61	0.6	43.9	44
Rb	2.53	88.3						85.9	61.1					35.4	48.7
Te	2.54	88.3	83	20.	26	2.28	1.7	64.3	63.2	14.1	9.1	1.9	0.7	48.95	52.5
Sb	0.05	71.5						18.1	30.8					13.4	31.2
Ag	0.16														
Sn	0.22														
Sr	5.56	10						9.4						6.38	0.3
Ba	10.1	37.5	<5					17.8	0.77					13.2	0.65
In	0.0														
Cd	0.16														

Element	Initial Mass (g)	Bundle release VUL %	Bundle re-releaseExp %	U. plenum + vert. line deposit. %		Hot leg deposition %		PointC release %		SG deposition %		Cold leg deposition %		PointG release %	
				cal	exp	cal	exp	cal	exp	cal	exp	cal	exp	cal	exp
Ru	11.2	1.8	<5	.396	0.59	0.046	0.6	1.3	0.63	0.3	0.09	.053	<<	1.0	0.5
Mo	20.2	19.7	56	4.23	22	0.47		14.7	30.3	3.36	6.8	.498	0.5	11.1	23
Tc	4.8	10						7.5	24.5					5.6	21
Zr	24.3	0.039	<1												
Np	1.56	0.27						0.2	0.98					0.15	0.83
Pu	37.7	0.1						0.07	0.03					.056	0.023
U	9163	0.1		.002	?	.0003	?	0.008	0.14	0.002	0.02	.0004	<<	.006	0.119
SMZr	3475							12.7	0.017					9.5	.0145
SMSn	49.48	69.9		16.2		1.62		50.9	38.4	11.4	5.4	1.91	0.5	38.4	>11.9
SMAg	478.3	0.26	15	0.1	7.5	0.008	-	0.25	7.3	0.06	0.9	0.01	0.1	0.18	6.7
SMIn	89.68	0.56						0.43	9.0				9.0	0.33	7.8
SMCd	29.89	5.9	-	<<	-	<<	-	7.54	67.	3.28	15.2	0.08	0.8	2.95	10.4

Für den Containmentbehälter wurden die gemessenen thermodynamischen Prozessgrößen durch die Rechnungen mit beiden Containmentmodellen gut reproduziert. Dies zeigt beispielhaft Abb. 4-23, für die gemessene und berechnete relative Feuchte in der Atmosphäre.

Die in Abb. 4-24 und 4-25 dargestellten Aerosolparameter "Ablagerung auf dem nassen Kondensator und auf dem Behälterboden" machen deutlich, dass die ermittelten Werte erheblich zu gering sind. Dies liegt nicht an der Containment Modellierung, vielmehr erreichten infolge von Modellschwächen bei der Freisetzung aus dem Bündel als auch der Ablagerung im kalten Strang nur 25 % der tatsächlichen Aerosolmasse den Containmentbehälter.

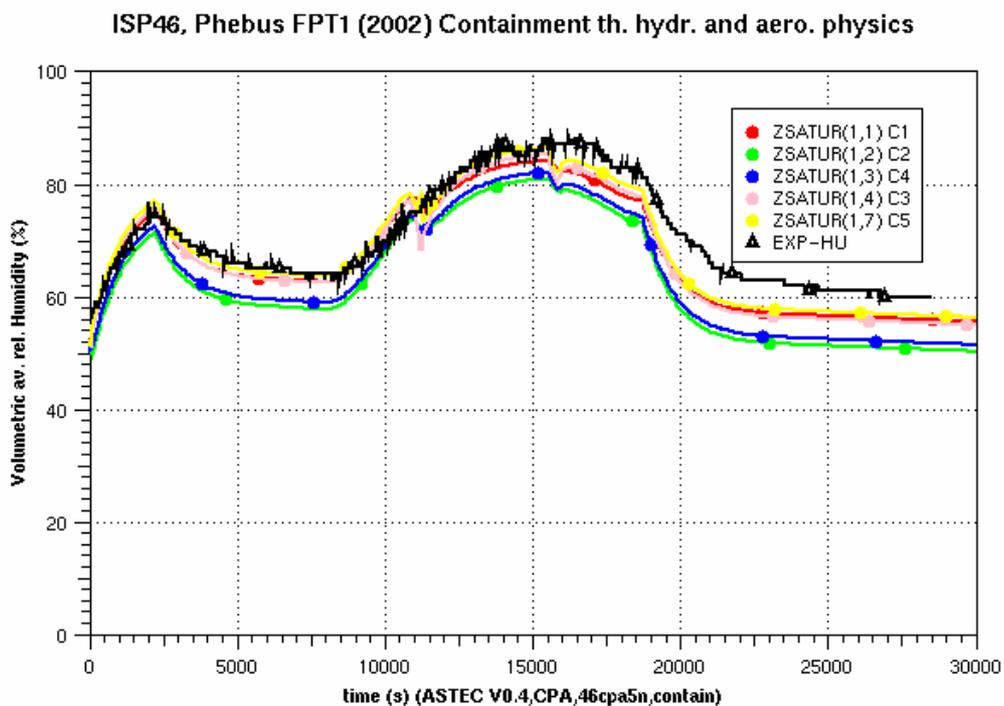


Abb. 4-23 Feuchte, Fünf-Zonen Containment Modell

ISP46, Phebus FPT1 (2002) Containment th. hydr. and aero. physics

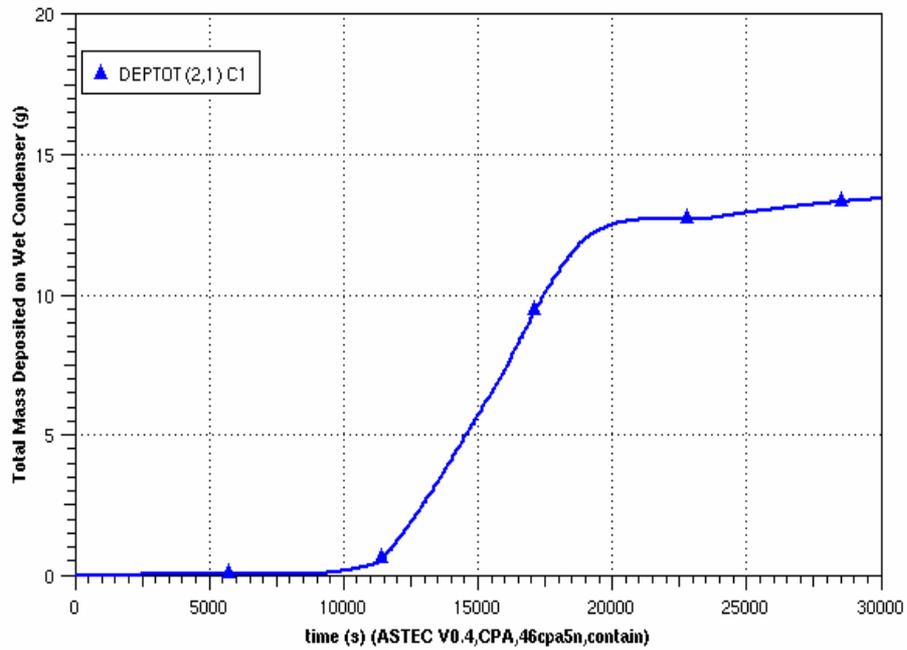


Abb. 4-24 Aerosol Ablagerung im Behälter auf dem nassen Kondensator

ISP46, Phebus FPT1 (2002) Containment th. hydr. and aero. physics

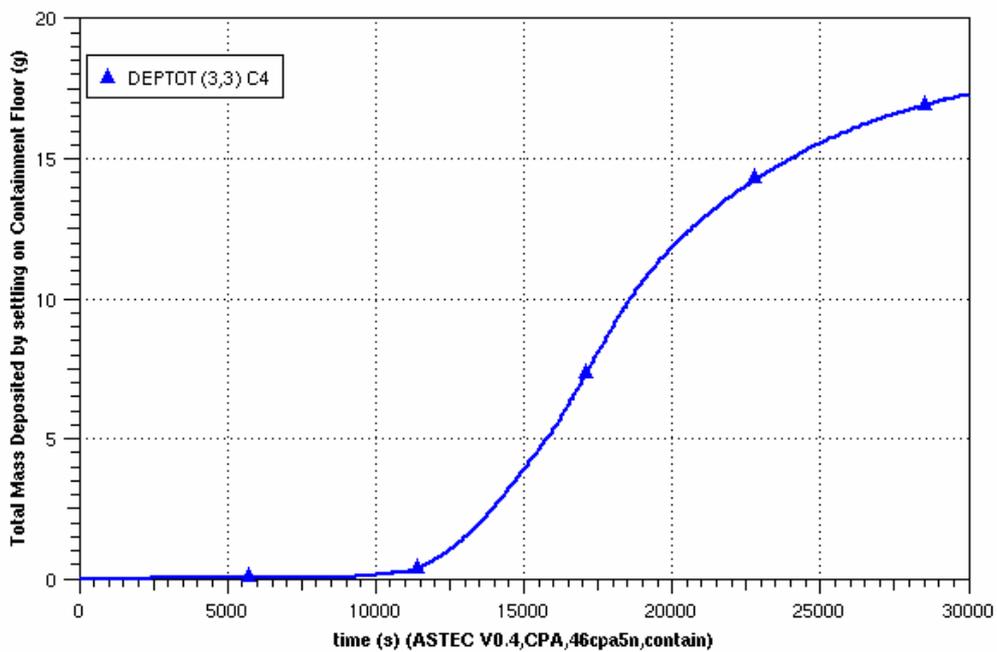


Abb. 4-25 Aerosol Ablagerung auf dem Containment Boden

Wegen des im CPA-Modul fehlenden Modells zum Abwaschen der Spaltprodukte von den Strukturen konnte das Jodverhalten nicht berechnet werden, daraus ergaben sich für die Ablagerung auf den trockenen und den nassen Oberflächen stark unterschätzte Werte.

Die beiden aus GRS-Sicht wichtigen Ziele dieser Arbeiten wurden erreicht: zum einen zeigte ASTEC seine grundsätzliche Eignung als Integralcode durch das "funktionierende Zusammenspiel" der 'in' und 'ex vessel'-Module, zum anderen lieferte der von GRS beigegebte ASTEC-Modul CPA gerade auch im internationalen Vergleich dieses Internationalen Standard-Problems durchweg gute Ergebnisse, wenngleich auch einige Schwächen wie das nicht funktionierende Modell zur Beschreibung des Abwaschens von Aerosolen mit dem Wandkondensat (siehe auch nächstes Kapitel 4.2.3) deutlich wurden.

4.2.3 Validierung von Modellkorrekturen zum Aerosolabwaschen

Die ersten Ergebnisse aus dem Vergleich zu den Aerosolablagerungen im Containmentbehälter des PHEBUS Versuchs ergaben, dass das Abwaschmodell nicht funktionierte. Die notwendigen Modellverbesserungen waren auf Grund der Verknüpfung des Aerosolabwaschmodells mit diversen Modellteilen wie Zonenmodell, Pumpen- und Sprühmodell, Steuerungsmodelle für die Pumpen usw. aufwendig. Nach den durchgeführten Modellverbesserungen, die sich an der entsprechenden Modellierung in CO-COSYS orientieren, wurden die Änderungen einer Überprüfung mit Test- und Validierungsrechnungen unterzogen, die hier beschrieben werden.

Zur Verdeutlichung der Wirkung des Abwaschmodells auf die am Boden und an der Wand abgelagerten Aerosole werden alle betrachteten Variantenrechnungen mit und ohne Abwaschmodell verglichen.

Das einfache Testmodell besteht aus den in Abb. 4-26 dargestellten zwei Volumina. Diese sind über eine atmosphärische- und eine Drainagejunction verbunden. Im Volumen C4 befindet sich eine Wand WALL5. Das Testbeispiel wurde in Anlehnung an den Containmentteil des PHEBUS Versuchs gestaltet. In das obere Volumen C4 werden die folgenden Einspeisungen vorgenommen:

t = 100 s bis t = 200 s 1.D-4 kg/s Aerosol

t = 100 s bis t = 200 s 1.D-4 kg/s Spaltprodukt Cs

t = 100 s bis t = 200 s Dampfmassenstrom von 2.D-2 Kg/s

Es wurden 4 verschiedene Fälle untersucht:

- Abwaschen durch den bei Wandtemperaturabsenkung einsetzenden Kondensatfilm zwischen t = 500 s und 900 s. Wand zu Beginn 120 °C bis 500 s, ab 500 s Temperatur abgesenkt auf 20 °C.
- Wassereinspeisung durch Pumpe in das Volumen C4, kein Auswaschen von Aerosolen aus dem Volumen und Abfließen (Wasser + Aerosole) vom Boden C4 nach C5 über die Drainjunction von t = 500 s bis 600 s (Wasser- und Aerosoltransport erfolgt aus dem Sumpf C5 über die Pumpe nach C4)
- Auswaschen aus dem Volumen C4 durch Sprühen in das Volumen C4 von t = 500 s bis 600s
- Abwaschen von auf der Wand WALL5 abgelagerten Aerosolen durch Sprühen auf die Wand WALL5 (an Zone C4) von t = 500 s bis 600 s

Die in den Abb. 4-27 bis 4-30 dargestellten Ergebnisse zeigen in anschaulicher Weise die Wirksamkeit des Abwaschmodells.

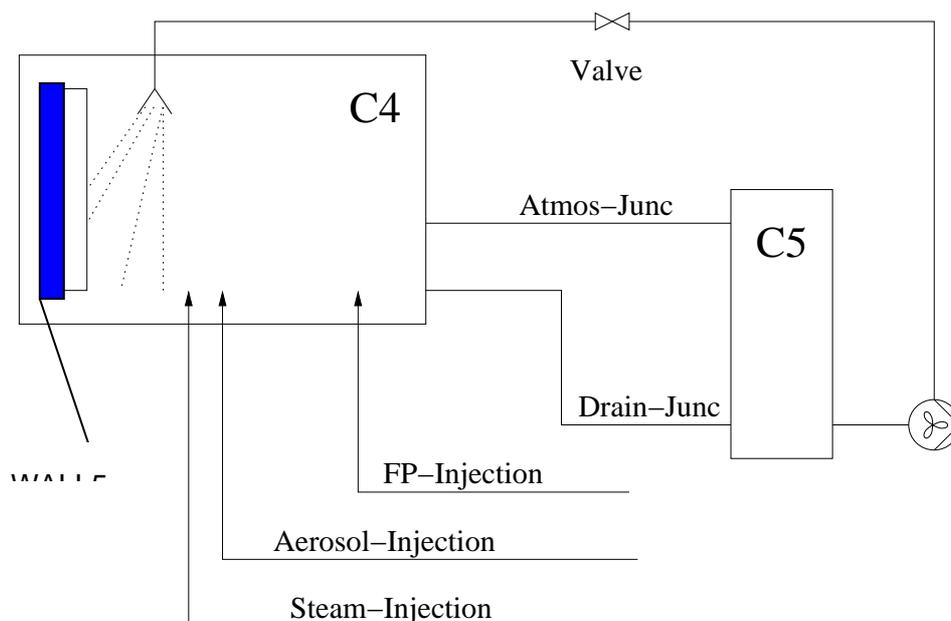


Abb. 4-26 Nodalisierung für die Testbeispiele zum Aerosolabwaschen

Abb. 4-27 zeigt die Wirkung des Abwaschens durch einen Kondensatfilm auf die an der Wand abgelagerten Aerosole. Während der Einspeisephase steigt die auf der Wand WALL 5 abgelagerte Aerosolmasse kontinuierlich an. Hier zeigt sich ohne und mit Abwaschen bis ca. 500 s kein Unterschied zwischen beiden Fällen, da in dieser Zeit keine Kondensation an der heißen Wand (120 °C), sondern nur Volumen Kondensation statt findet und somit auch nicht abgewaschen werden kann. Erst ab 500 s (bis 900 s) setzt durch Absenkung der Wandtemperatur auf 20 °C Kondensation und nachfolgend Filmablaufen mit Abwaschen von Aerosolen ein. Daraus ergibt sich bis zum Ende eine geringere abgelagerte Aerosolmasse auf der Wand als ohne Abwaschen.

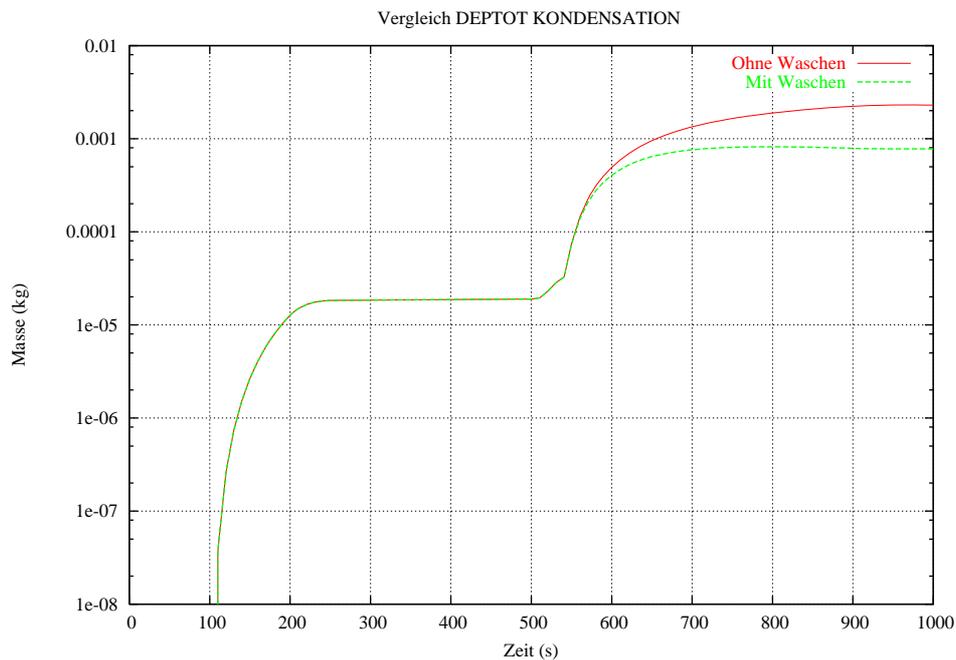


Abb. 4-27 Abgelagertes Aerosol auf der Wand WALL 5 - Abwaschen durch Kondensatfilm

Im nächsten Fall (Abb. 4-28) ist die auf dem Boden von Raum C4 abgelagerte Aerosolmasse mit und ohne Abwaschen bei Betrieb einer Pumpe mit Wassereinspeisung in das Zonenvolumen dargestellt. Dampf- und Aerosoleinspeisung erfolgt wieder zwischen 100 s und 200 s, die Pumpe wird von 500 s bis 600 s betrieben. Bis ca. 500 s ist die auf dem Boden abgelagerte Aerosolmasse mit Abwaschenvorgang geringfügig kleiner verursacht durch das über die Drainageverbindung aus C4 zum Sumpf C5 abfließende Kondensat, das Aerosole mittransportiert. Nach Einschalten der Pumpe nimmt die Wassermasse am Boden von C4 deutlich zu. Das Wasser aus der Pumpe gelang zwar in das Zonenvolumen und beeinflusst dort den Zonenzustand, wäscht jedoch keine Aerosole aus der Atmosphäre aus. Durch die ab 500 s bis 600 s anwach-

sende Wassermasse nimmt der Drainagestrom zu, die Masse der abgelagerten Aerosole sinkt bei eingeschaltetem Abwaschmodell vorübergehend stärker ab. Durch den über die Pumpe geschalteten Kreislauf werden die in den Sumpf C5 gespülten Aerosole wieder nach C4 zurückgefördert, wo sie wieder auf dem Boden von Volumen C4 landen. Dies geschieht etwas zeitversetzt zur Einschaltphase der Pumpe. Der Anstieg der am Boden abgelagerten Aerosolmasse im weiteren Zeitverlauf ist auf die weitere Ablagerung aus der Atmosphäre auf den Boden zurückzuführen.

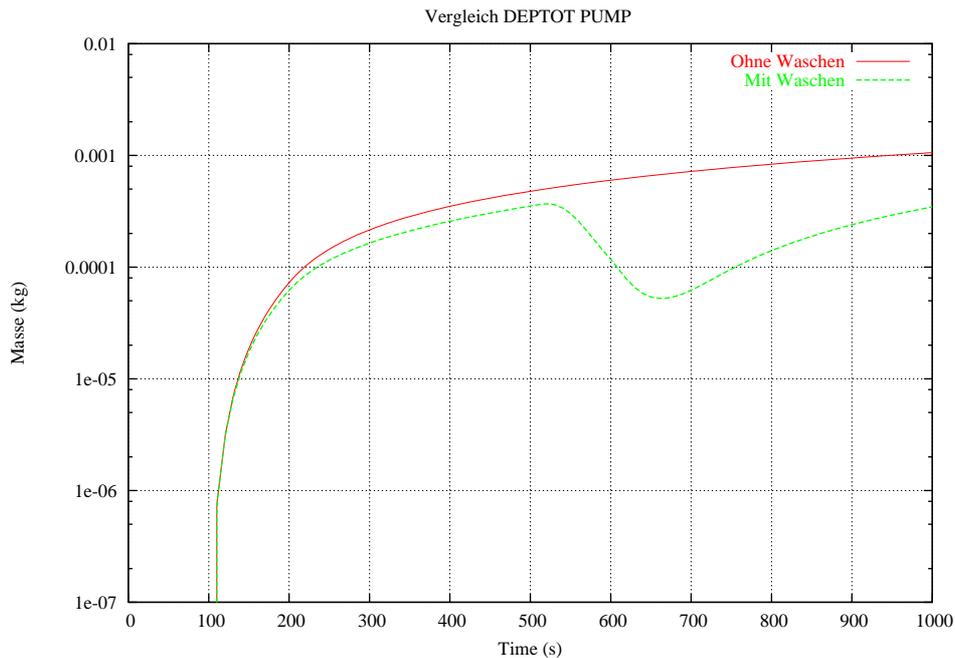


Abb. 4-28 Abgelagertes Aerosol auf dem Boden - Einspeisen durch Pumpe

Abb. 4-29 zeigt das Sprühen in das Zonenvolumen im Zusammenhang mit Aerosolabwaschen. Dargestellt wird die abgelagerte Aerosolmasse auf dem Boden der Zone C4. Mit der Einspeisephase von 100 s bis 200 s lagert sich Aerosol auf dem Boden ab. Ab ca. 200 s fließt Kondensat (aus Volumenkondensation, nicht aus Wandkondensation) ab in den Sumpf C4 und nimmt Aerosole mit, die ohne Aktivierung des Abwaschmodells am Boden C4 verbleiben. Ab 500 s bis 600 s wirkt das Sprühsystem. Die Aerosole werden bis 600 s verstärkt aus dem Volumen ausgewaschen und landen auf dem Boden der Zone C4, wo sie ohne Simulation des Abwaschens verbleiben. Mit Abwaschen werden die Aerosole verstärkt aus dem Volumen ausgewaschen, sammeln sich anfangs auch zunehmend auf dem Boden an, werden dann aber mit Einsetzen der starken Wasserdrainage abgeführt. Nach Ausschalten des Sprühsystems ab 600 s zeigt sich wieder der typische Zeitverlauf der Aerosolmasse bei Drainage: erst das Ab-

sinken durch die anfangs höheren Drainageströme, später die Zunahme durch weiteres Ausfallen der Aerosole aus der Atmosphäre.

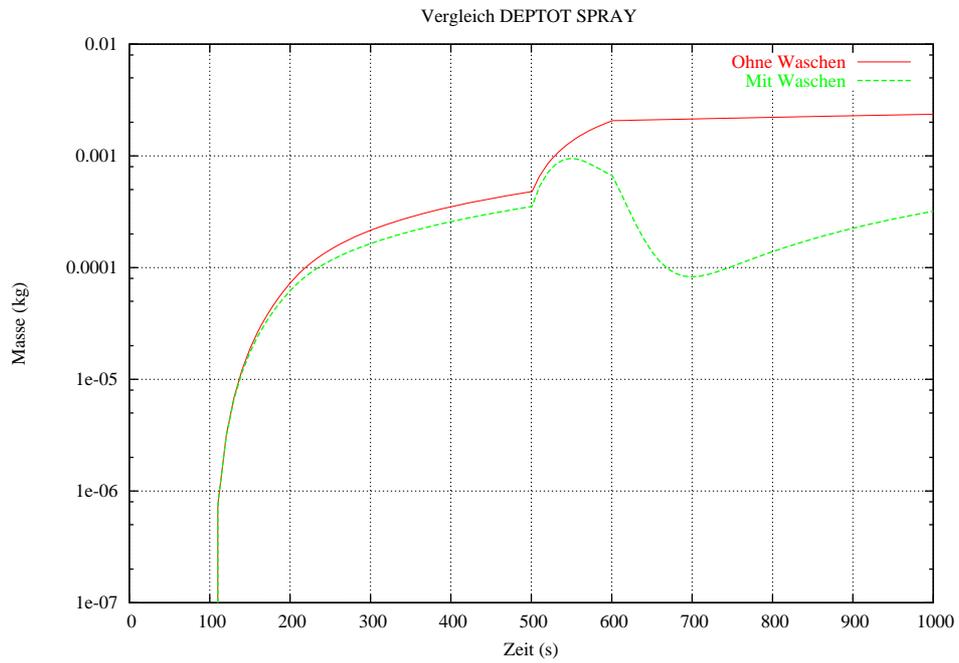


Abb. 4-29 Abgelagertes Aerosol auf dem Boden - Sprühen in das Zonenvolumen

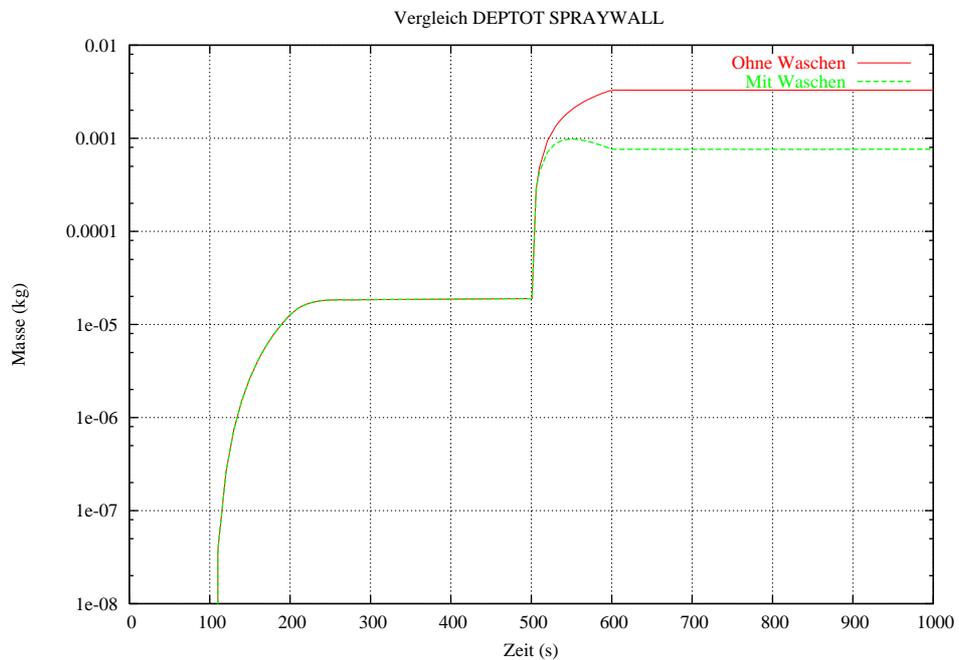


Abb. 4-30 Abgelagertes Aerosol auf der Wand - Sprühen auf Wand

In Abb. 4-30 wird das Verhalten der Aerosole bei Wandablagerung und Sprühen auf die Wand gezeigt. Bis 500 s zeigt sich kein Unterschied bei der Aerosolablagerung auf die Wand WALL5, da keine Kondensation an der Wand stattfindet und somit auch kein Abwaschprozess stattfinden kann. Ab 500 s wird für 100 s die Wand angesprüht. Die Aerosolmasse auf der nimmt deutlich zu, aber nicht so stark wie ohne aktiviertes Abwaschen, da der Abwaschvorgang mit dem ablaufenden Wasserfilm einsetzt, aber nur so lange wie das Sprühsystem läuft (bis 600 s). Ab da bleibt die Aerosolmasse konstant, da nichts mehr abläuft (keine Wandkondensation).

Nach Überprüfung der Modellverbesserungen mit dem Testbeispiel wurden die Messergebnisse zu den Vorgängen im Containmentbehälter beim Versuch PHEBUS FPT1 (ISP-46) zur Validierung des fertig gestellten Aerosol- und Jodabwaschmodells mit Simulation der Aerosolablagerung auf dem 'wet condenser', dem Abwaschen durch Kondensatablauf an der Wand, dem Waschen durch Sprühwasser und dem Abfließen in den Sumpf herangezogen. Diese Arbeitsergebnisse lagen vollständig erst nach Abschluss des ISP-46 vor. Zur Validierung wurden zwei verschiedene Nodalisierungen eingesetzt, eine einfachere 3 Zonennodalisierung und eine 5 Zonenunterteilung (Abb. 4-31).

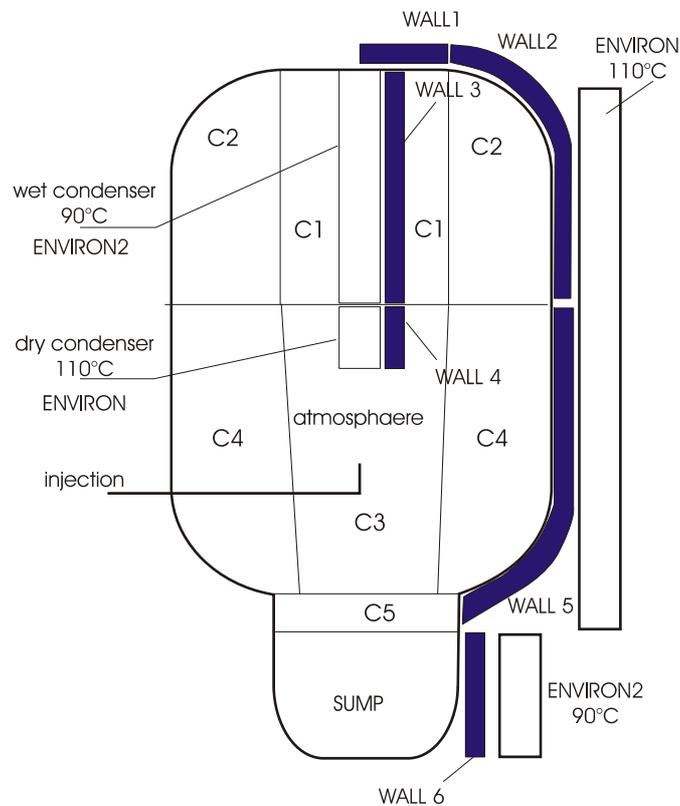


Abb. 4-31 5 Zonenschema für den PHEBUS Containmentbehälter

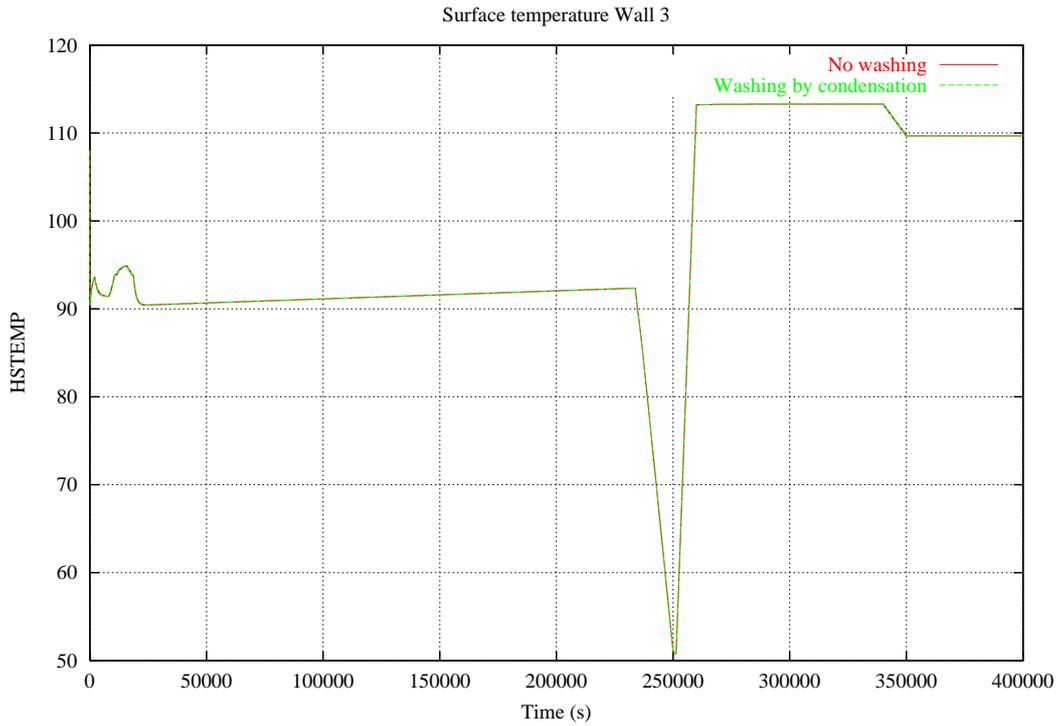


Abb. 4-32 Aufgeprägte Wandtemperatur am 'wet condenser' (WALL3)

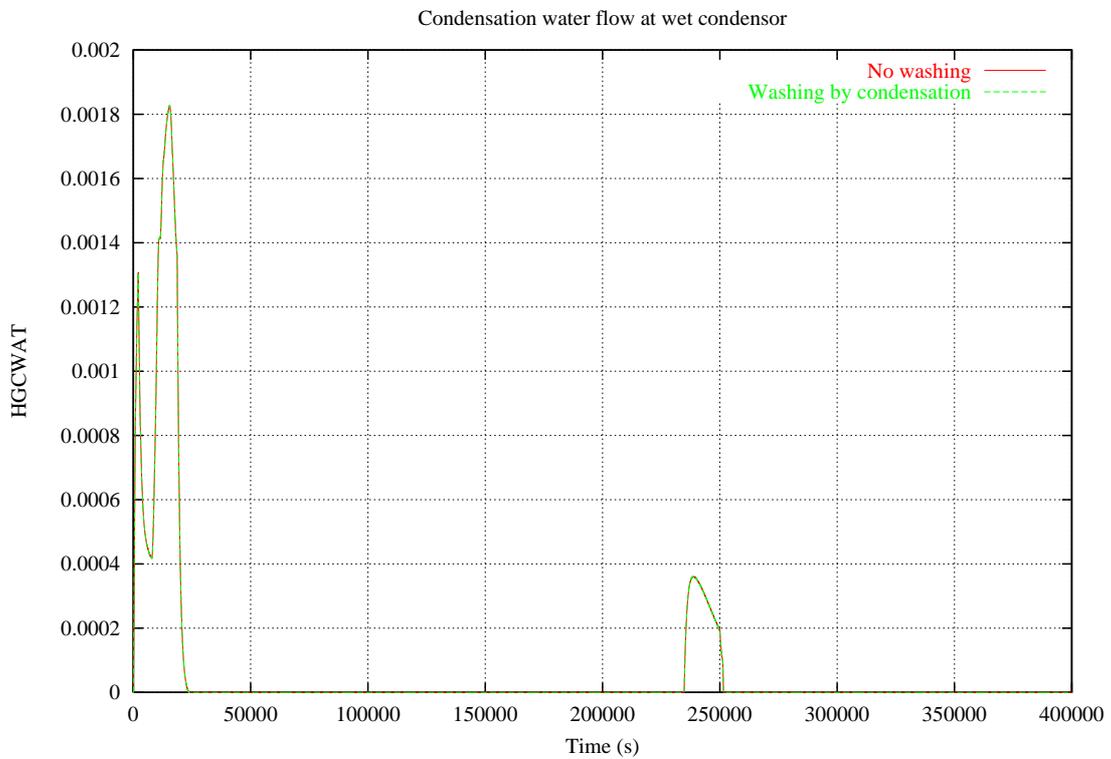


Abb. 4-33 Kondensationsmassenstrom (kg/s) am wet condenser

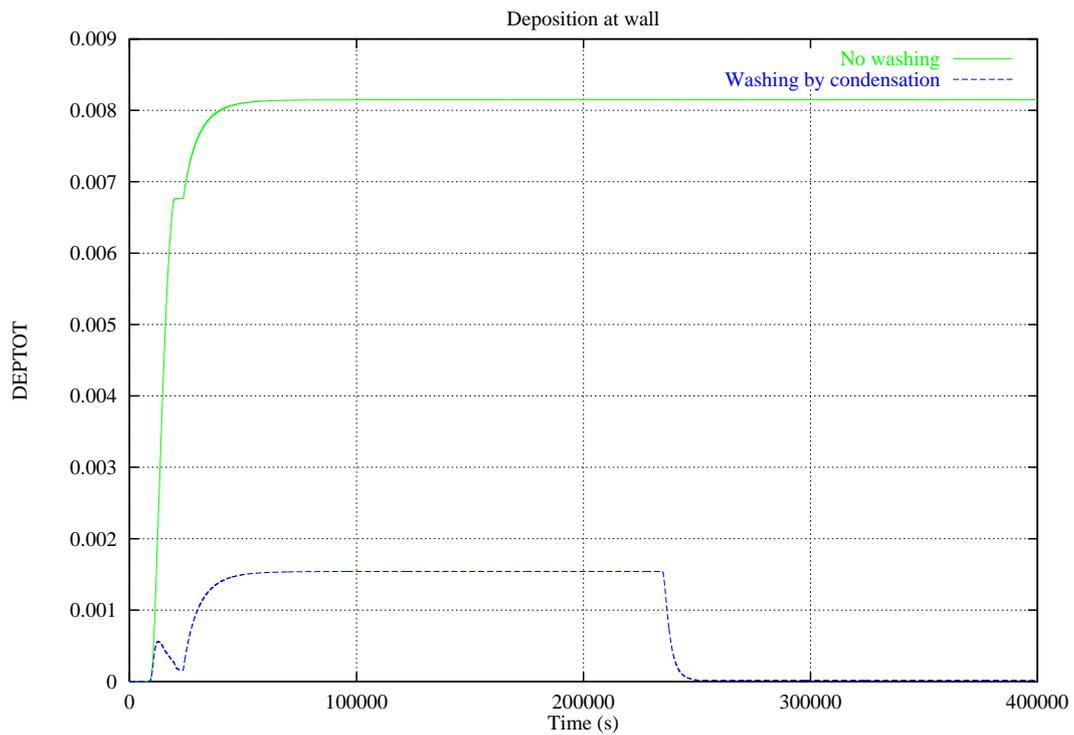


Abb. 4-34 Aerosolablagerung in (kg) am wet condenser mit und ohne Abwaschen durch Kondensation

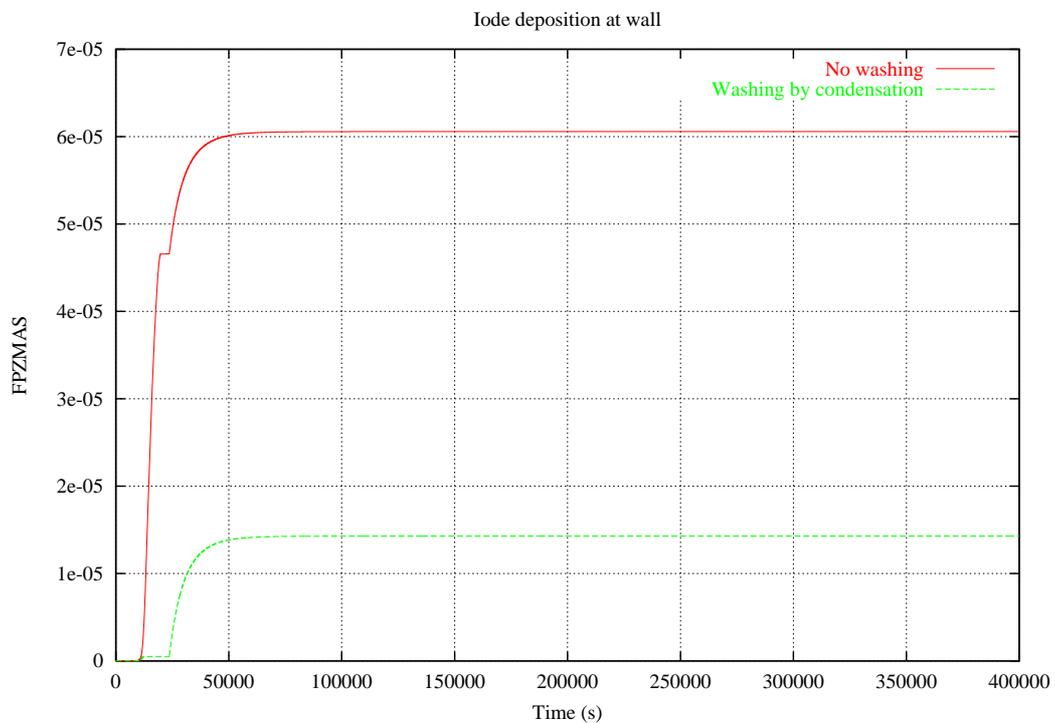


Abb. 4-35 Jodablagerung (kg) an der Wand mit und ohne Abwaschen durch Kondensation

Entsprechend dem Verlauf der geführten Wandtemperatur des 'wet condenser' zeigt sich das erwartete Aerosol-, Jodablagerungs- und Abwaschverhalten: zu Beginn sinkt die Temperatur am 'wet condenser' auf ca. 90 °C (Abb. 4-32), eine deutliche Kondensation setzt ein (Abb. 4-33). Ohne Abwaschmodell lagern sich kontinuierlich Aerosole an, mit Abwaschmodell werden Aerosole und Jod durch den Kondensatfilm in einer kurzen Phase abgewaschen, bis die Kondensation abgeklungen ist. Durch Absenkung der Wandtemperatur bei 25 000 s wird ein erneuter Abwaschvorgang durch Kondensatbildung und das Abwaschen von Aerosolen und Jod ausgelöst. (Abb. 4-32 und 4-33). Das Aerosol wird fast völlig abgewaschen (Abb. 4-34).

Eine umfassende Validierung der Abwaschmodellierung für Aerosole wie für Jod ist zwingend notwendig, doch sind keine dazu geeigneten Versuche bekannt. Aus diesem Grunde sind entsprechende Versuche für die dritte Phase des ThAI-Programms vorgeschlagen worden.

4.2.4 Validierung von ASTEC-CPA im Rahmen des ISP 47

Die GRS nahm nicht nur mit COCOSYS an beiden Stufen des ISP-47 (siehe Kap. 1.5.2) teil, sondern auch mit dem zentralen Containmentmodul CPA von ASTEC. Somit bot sich die gute Gelegenheit, die Prognosefähigkeit von CPA für die thermohydraulischen Vorgänge im Sicherheitsbehälter nicht nur im Vergleich zu den experimentellen Daten, sondern auch zu den mit COCOSYS erzielten Ergebnissen zu überprüfen. Auch der Entwicklungspartner IRSN beteiligte sich mit ASTEC-CPA an diesem ISP, so dass sich eine weitere Vergleichsmöglichkeit eröffnete.

Um Wiederholungen (zu Kap. 1.5.2) und unnötige Längen zu vermeiden, wird an dieser Stelle nur auf wichtige Abweichungen zwischen den rechnerischen und experimentellen Ergebnissen und kurz auf die Unterschiede zwischen der GRS- bzw. IRSN-Rechnung zum ThAI-Versuch dieses ISP eingegangen.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die mit ASTEC-CPA erzielten Ergebnisse der GRS gut bis sehr gut mit den Versuchsergebnissen der drei Anlagen TOSQAN, MISTRA und ThAI übereinstimmen. Im internationalen Vergleich mit anderen ISP-Teilnehmern liegen die CPA-Ergebnisse immer im oberen Drittel der eingereichten Rechnungen. Besonders hervorzuheben ist, dass die GRS-Rechnungen mit CPA und COCOSYS die einzigen waren, die für den ThAI-Versuch die Strömungsverhältnisse über alle Versuchsphasen im gesamten Behälter richtig vorausgesagt haben. Dies gelang auch kei-

nem Teilnehmer, der einen CFD-Code anwendete. Eine wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche 'blinde' Vorausrechnung mit COCOSYS und CPA war die offensichtlich nahezu optimal gewählte Nodalisierung für das zu rechnende Problem. Mit der CPA-Rechnung des IRSN mit einer groberen Nodalisierung gelang es dagegen z. B. nicht, die He-Konvektion im oberen Bereich des Versuchsbehälters während der Versuchsphase III vorausszusagen.

Beispielhaft werden im Folgenden kurz die CPA-Rechnungen zu den in TOSQAN und ThAI durchgeführten Versuchen mit den entsprechenden COCOSYS-Ergebnissen verglichen. Die Details über den Vergleich COCOSYS-Experiment finden sich in Kap. 1.5.2.

Aus Abb. 4-36 ist zu ersehen, dass die berechneten Drücke für den TOSQAN-Versuch nahezu identisch sind; dies trifft auch auf die He-Konzentrationen im oberen und unteren Behälterbereich zu (Abb. 4-35 und 4-36) Bezüglich der Temperaturen (Abb. 4-37 und Abb. 4-38, bitte die starke Spreizung der Ordinate beachten) ist festzustellen, dass ASTEC-CPA grundsätzlich um etwa 1° höher liegt, bei ca. 8000 s kurzfristig um bis zu 2.5°. Diese geringfügigen Unterschiede wurden nicht näher untersucht, könnten ihre Ursache jedoch in leichten Modifikationen der Wärmeübergangsmodellierung durch IRSN haben. Der Temperaturverlauf ist in beiden Rechnungen gleich.

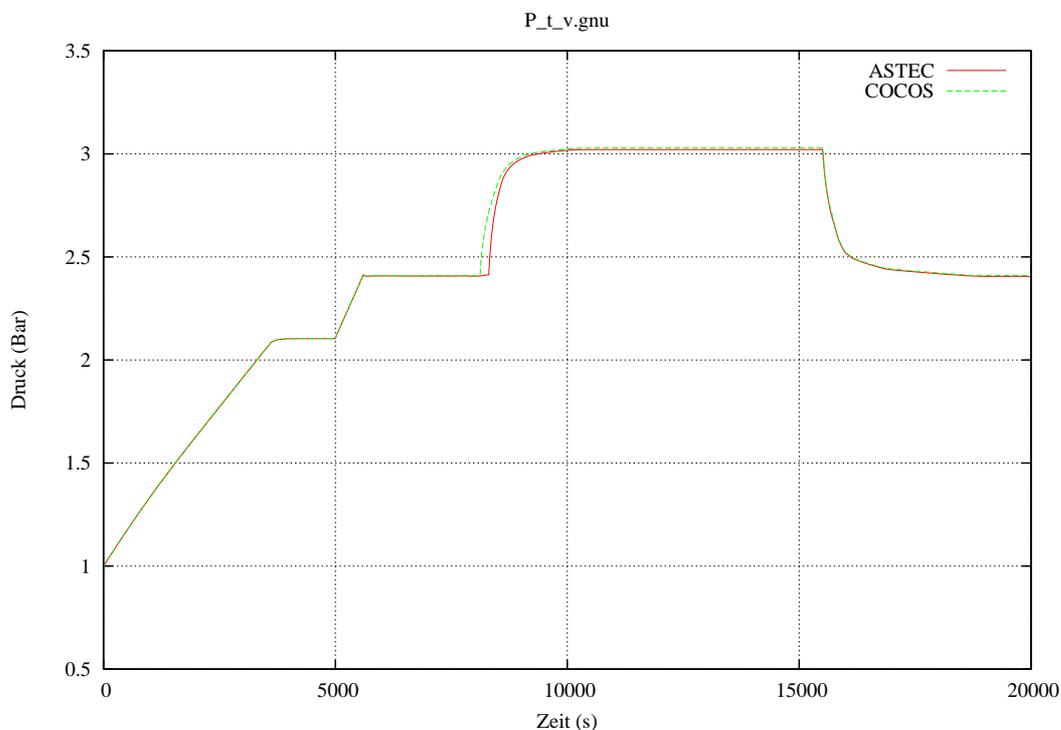


Abb. 4-36 TOSQAN: Zeitlicher Druckverlauf

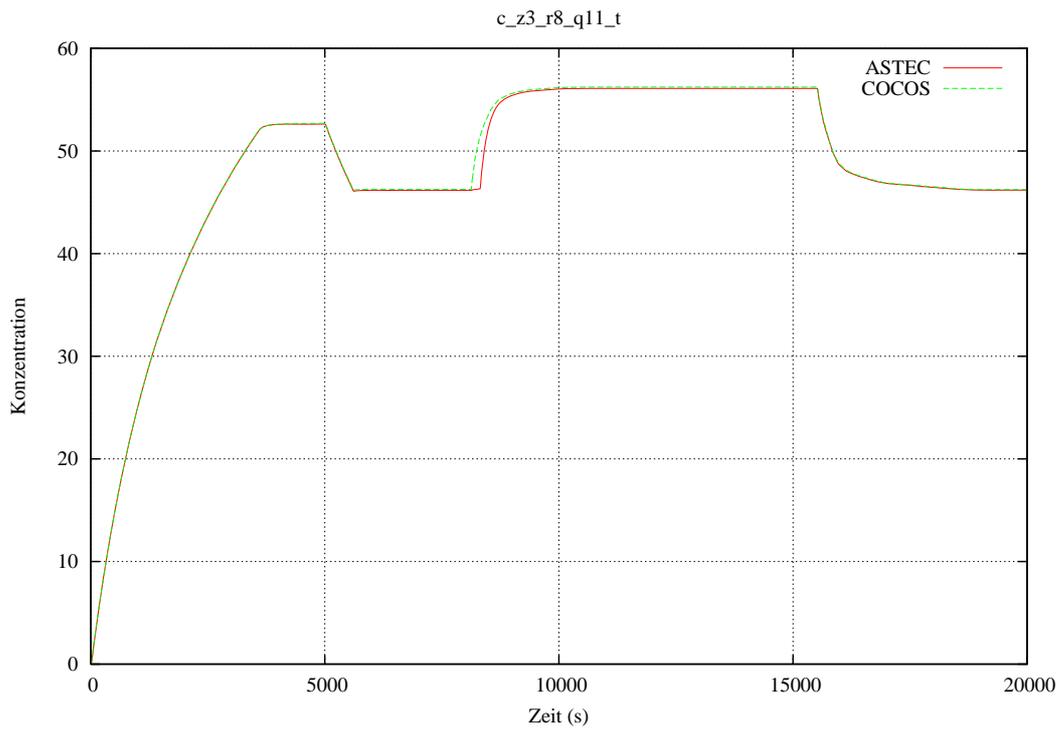


Abb. 4-37 Zeitlicher Verlauf der Heliumkonzentration im unteren Behälterbereich

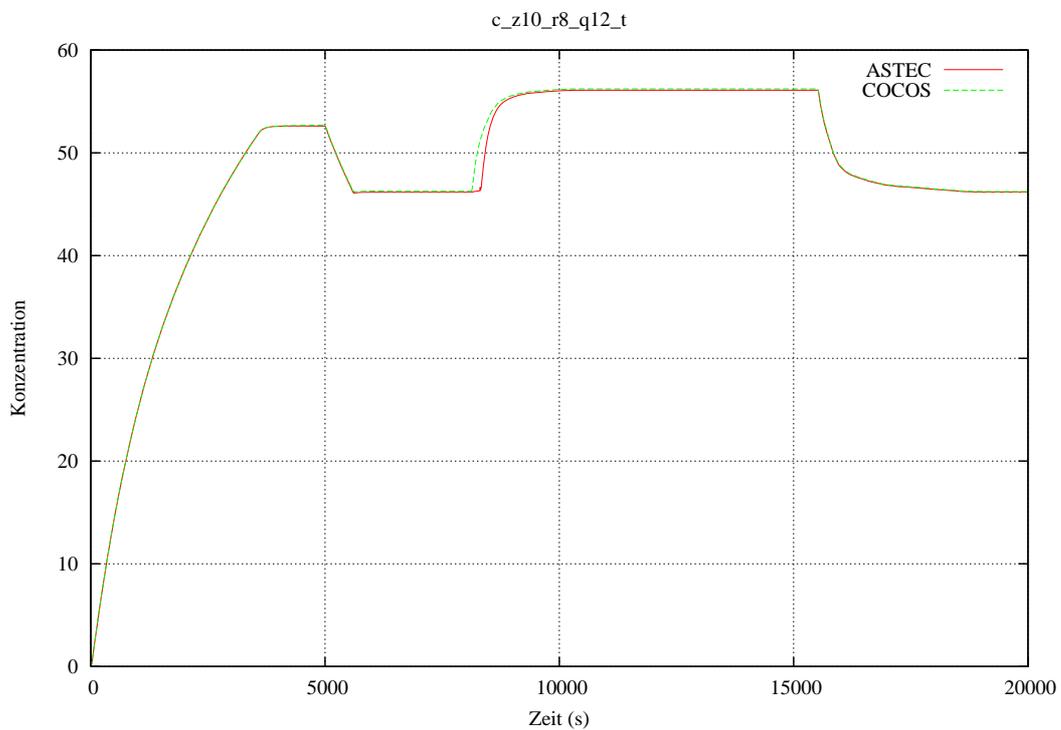


Abb. 4-38 Zeitlicher Verlauf der Heliumkonzentration im oberen Behälterbereich

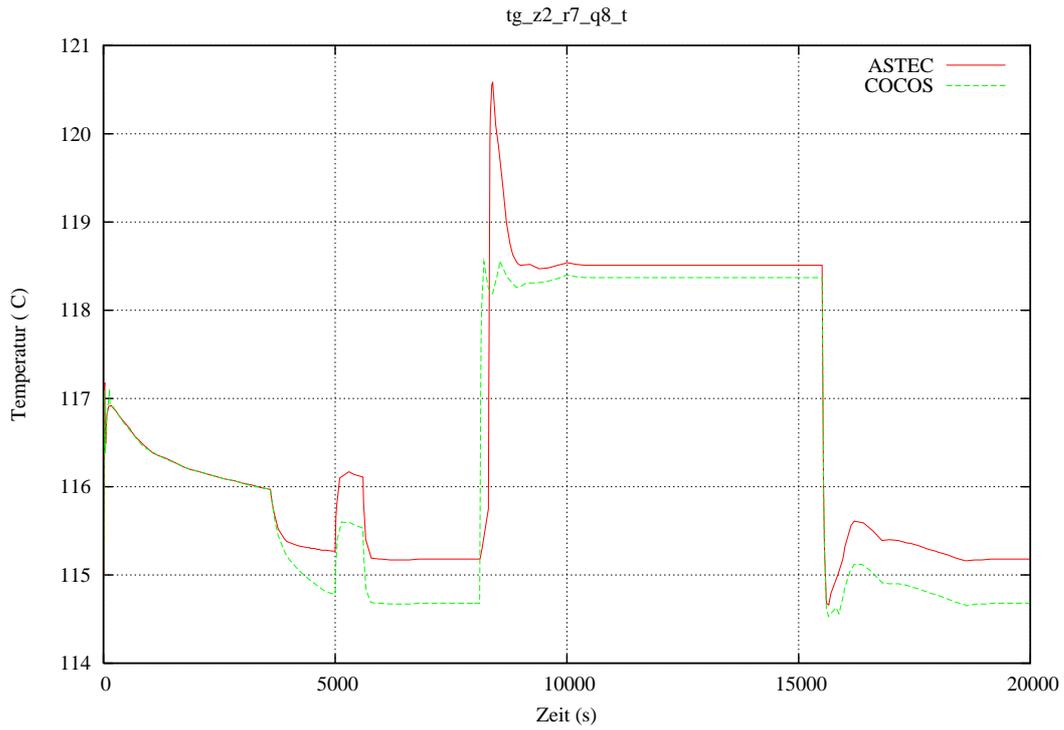


Abb. 4-39 Zeitlicher Temperaturverlauf im unteren Behälterbereich

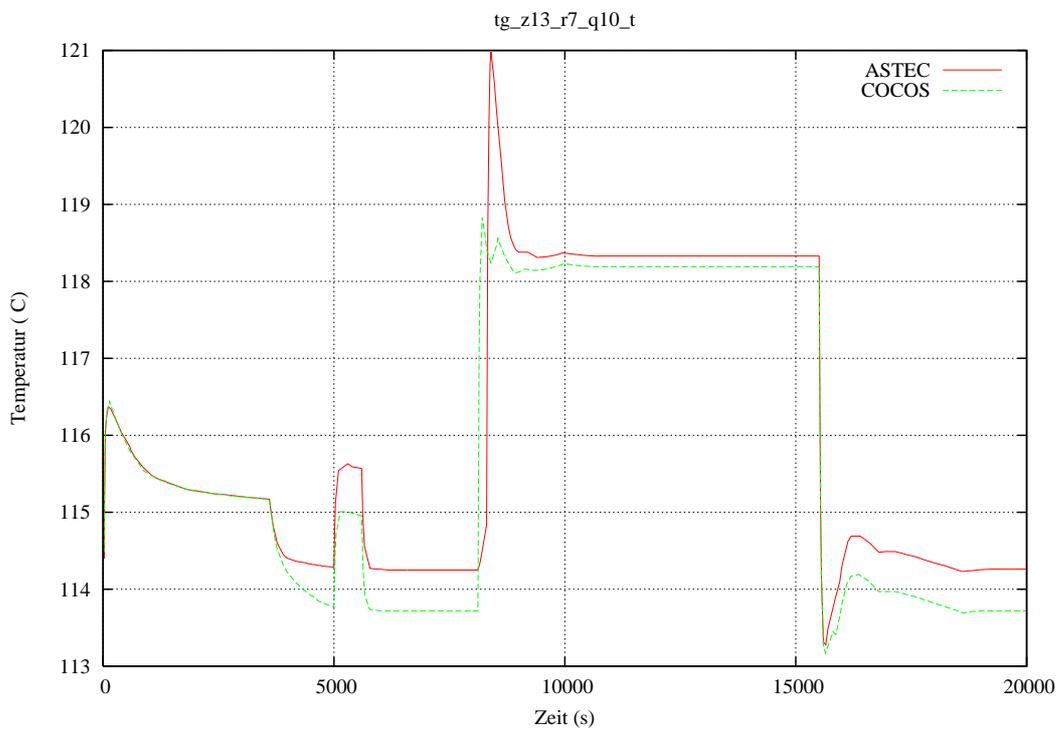


Abb. 4-40 Zeitlicher Temperaturverlauf im oberen Behälterbereich

Für den ThAI-Versuch wurde seitens der GRS für CPA dieselbe Nodalisierung wie für COCOSYS genutzt. Bis zur Dampfeinspeisung bei 2700 s sind beide Rechenergebnisse nahezu identisch, z. B. die Höhenverteilung des Heliums (Abb. 4-41). Diese Dampfeinspeisung wurde dann für CPA sowohl mit den FAN- als auch dem 'plume'-Modell simuliert (Abb. 4-62). Dabei stellte sich heraus, dass die Verwendung des FAN-Modells zu einer falschen, lokal niedrigen Heliumkonzentration im Innenzylinder führte, wogegen die 'plume'-Nodalisierung (Abb. 4-43) zur Simulation der Dampfeinspeisung zu guten Ergebnissen führte. Die Schichtung des Heliums und des Dampfes im oberen Teil ist jedoch nicht mehr so stark ausgeprägt. Dies führt in der dritten Phase des Experiments zu einer Durchmischung im Behälter.

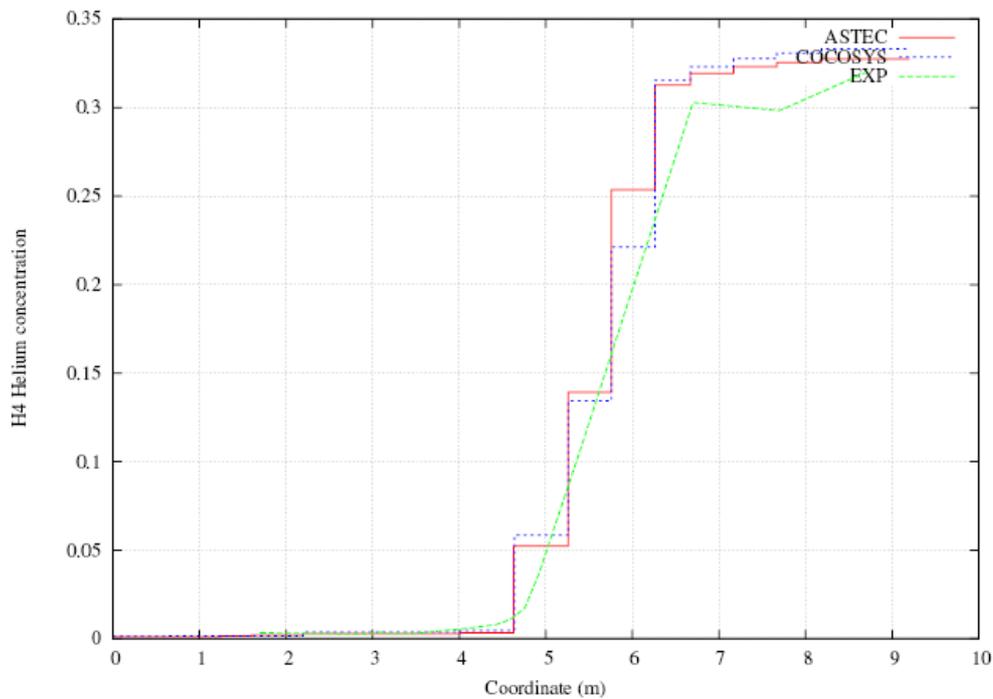


Abb. 4-41 Vergleich der Helium-Konzentrationen (H4) bei T = 2600 s nahe der Behälterachse COCOSYS- ASTEC

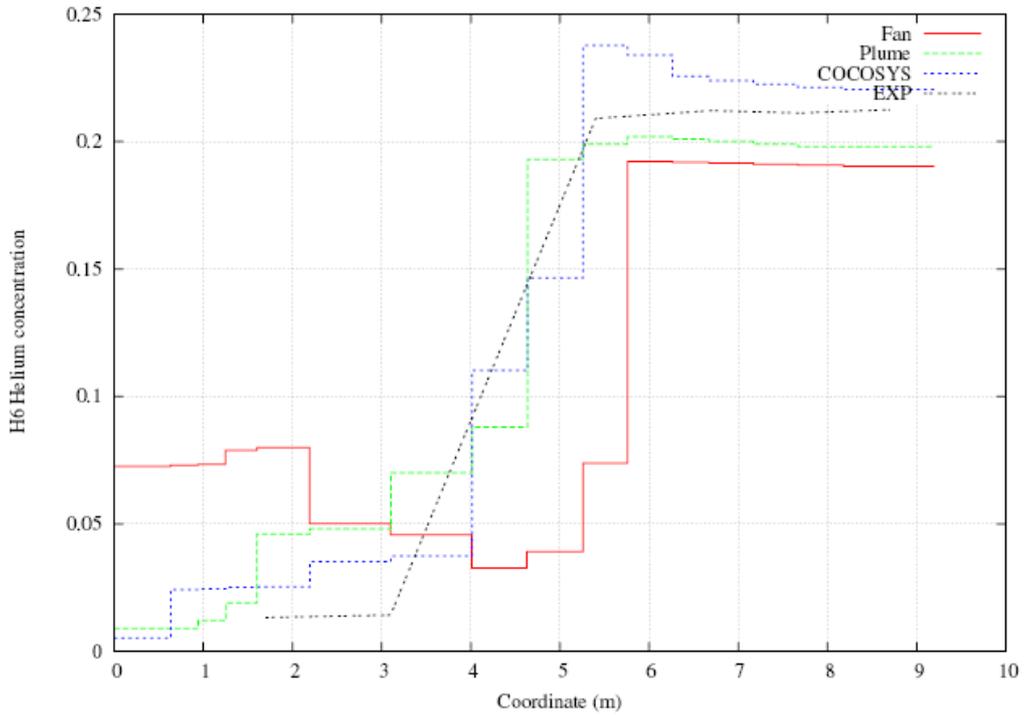


Abb. 4-42 Helium-Konzentration nahe der Behälterachse bei $T = 4600$ s (H6) für verschiedene 'plume'-Modelle in ASTEC

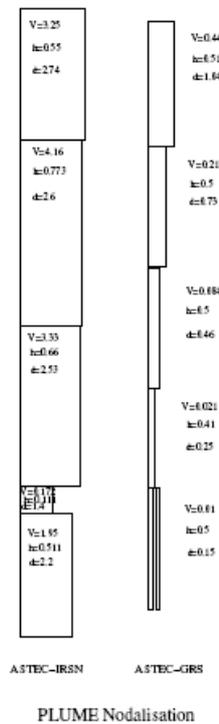


Abb. 4-43 'Plume' Modellierung in der IRSN (links) und GRS (rechts) Nodalisierung der ThAI-Versuchsanlage

Zum Schluss dieser Betrachtung werden die beiden CPA-Rechnungen von GRS und IRSN noch kurz verglichen. Auf die unterschiedliche 'plume'-Nodalisierung (Abb. 4-43) sind die im oberen Behälterbereich doch schon deutlichen Abweichungen zwischen von IRSN gerechneten Heliumkonzentration und den experimentellen Werten (Abb. 4-44 und Abb. 4-45) zurückzuführen. Der größere Durchmesser der plume Zonen in der IRSN Nodalisierung führt zu einer stärkeren Durchmischung.

Der Druckverlauf (Abb. 4-47) wird von beiden Rechnungen korrekt wiedergegeben, wobei die GRS-Rechnung ihn zum Ende des Versuchs aber erkennbar unterschätzt. Bei der für das obere Plenum berechneten Temperatur (Abb. 4-47) zeigen beide Rechnungen für den Zeitbereich 5 - 6000 s einen qualitativ anderen Verlauf und überschätzen sie bis zu 10°, danach sind sie bis zum Versuchsende ca. 5° zu niedrig berechnet. Bisher konnte für dieses Verhalten keine Begründung gefunden werden.

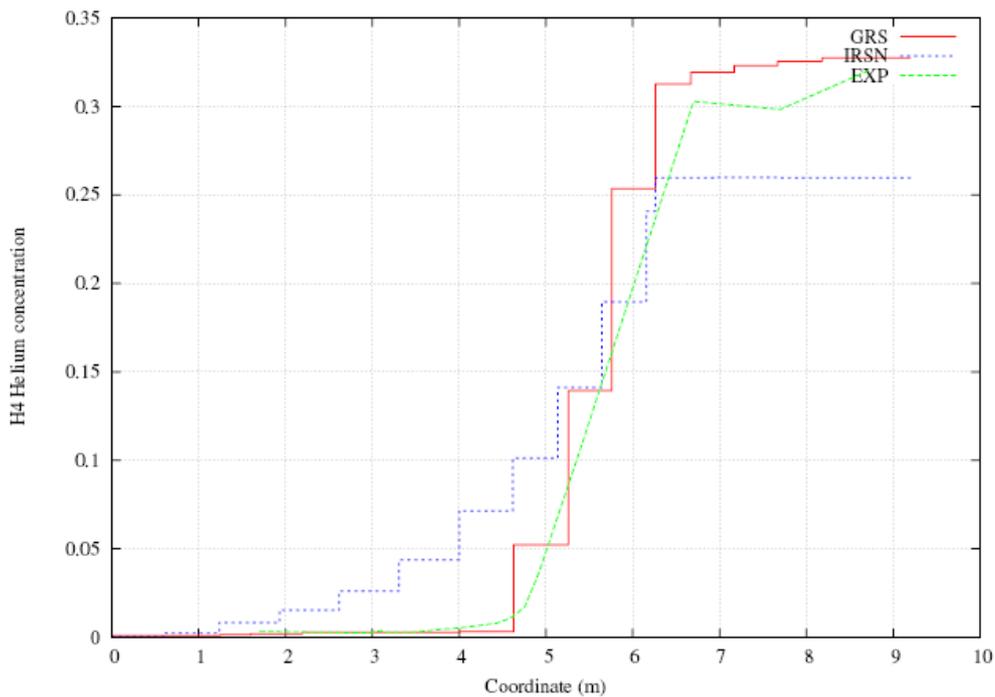


Abb. 4-44 ThAI: Vergleich der Heliumkonzentrationen (H4) bei T = 2600 s nahe der Behälterachse GRS-ASTEC IRSN-ASTEC

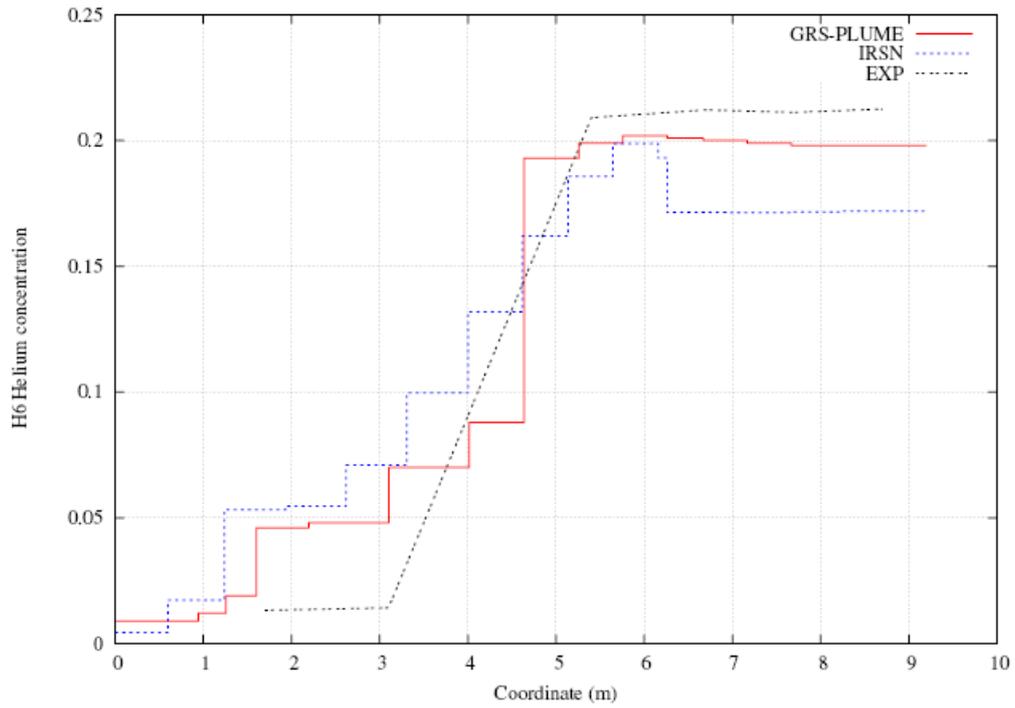


Abb. 4-45 ThAI: Vergleich der Heliumkonzentrationen (H6) nahe der Behälterachse bei T = 4600 s GRS-ASTEC IRSN-ASTEC

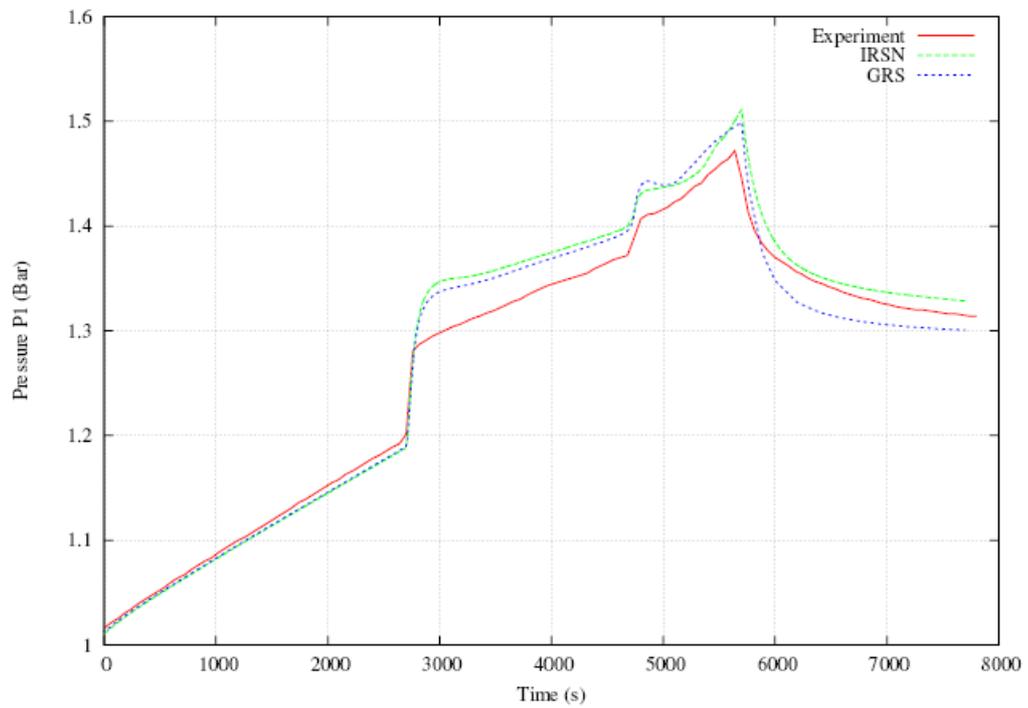


Abb. 4-46 ThAI: Vergleich der Druckverläufe GRS-ASTEC IRSN-ASTEC

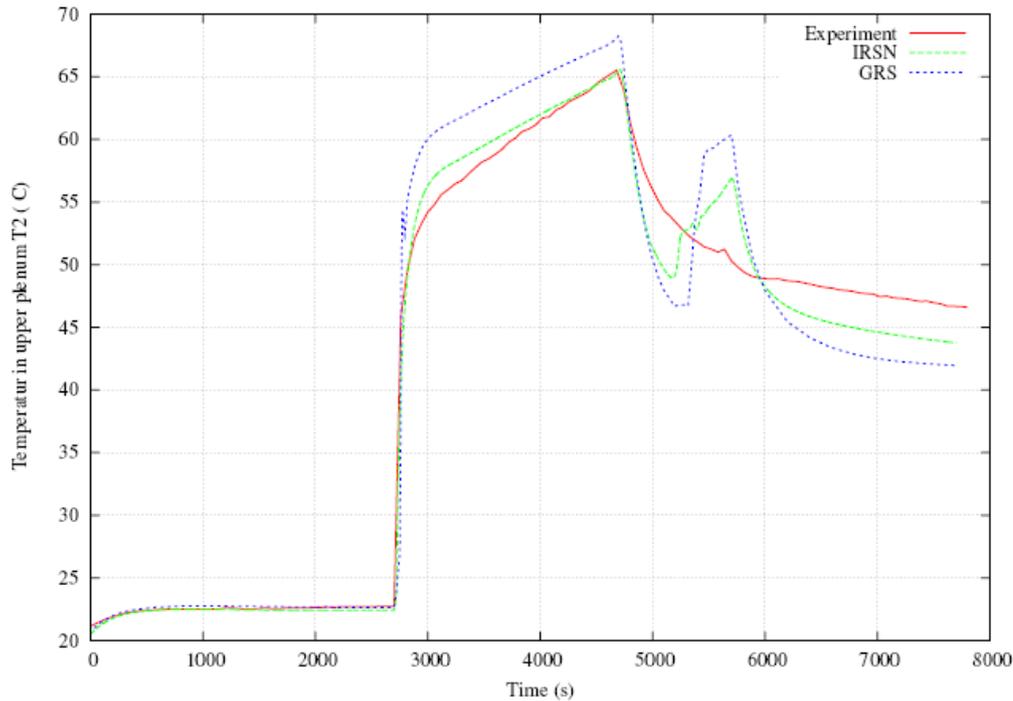


Abb. 4-47 ThAI: Vergleich der Temperaturen im oberen Plenum GRS-ASTEC IRSN-ASTEC

In den Abb. 4-48 bis 4-53 sind die Helium- und Dampfkonzentrationen bzw. die Temperaturen und Dampfkonzentrationen in 2-dimensionalen Schnittbildern visualisiert. Dabei bezieht sich die linke Seite auf die IRSN-Rechnung, bei der nur der halbe Versuchsbehälter gerechnet wurde, die rechte Seite auf die GRS-Rechnung. Bei den Abb. 4-48, 4-51 und 4-53 sind die Heliumkonzentrationen blau dargestellt, die Dampfkonzentrationen rot; in den Abb. 4-48 und 4-49 sind die Temperaturen blau und der Dampfgehalt rot. Die Abbildungen sollen nur einen qualitativen Einblick auf die Unterschiede der Ergebnisse liefern, hell/weiß bedeuten niedrige Werte, intensive Farben hohe Konzentrationen bzw. Temperaturen.

Abb. 4-48 zeigt bei Ende der Heliumeinspeisung für die GRS-Rechnung eine über den gesamten Behälterquerschnitt aufgebaute Schichtung des Heliums, wogegen die IRSN-Rechnung für den Innenzylinder eine etwas niedrigere Heliumkonzentration ausweist.

Aus Abb. 4-49 erkennt man, dass die GRS-Rechnung ca. 1 min nach Ende der Heliumeinspeisung auch im oberen Bereich des Behälters noch Unterschiede bezüglich Dampfkonzentration und Temperaturen zeigt, wogegen sich in der IRSN-Rechnung bereits nahezu homogene Verhältnisse (jeweils für den oberen bzw. den unteren Behäl-

terbereich) eingestellt haben. Weitere 100 s später (Abb. 4-50) stimmen beide Rechnungen gut überein.

Bei 4600 s (Abb. 4-51), dem Ende der oberen Dampfeinspeisung, sind Dampf und Helium streng geschichtet. Ein Unterschied besteht bei den für den oberen Innenzylinderbereich berechneten Dampfgehalt: die IRSN-Rechnung liefert einen nahezu konstant niedrigen Wert, die GRS-Rechnung weist einen Konzentrationsgradienten aus.

Zum Ende der unteren Dampfeinspeisung bei 5600 s (Abb. 4-52) ist das Helium in beiden Rechnungen vollständig über das gesamte Behältervolumen homogenisiert; dies ist beim Dampf ähnlich, lediglich für den Bereich des Innenzylinders ist der Dampfgehalt in der GRS-Rechnung etwas höher.

Zum Ende des Versuchs (Abb. 4-53) finden nur noch Kondensationsvorgänge statt, das Helium ist weiterhin gleich verteilt, was für den Dampf nicht ganz so konsequent der Fall ist. Durch Vergleich der Dampfgehalte in Abb. 4-52 und 4-53 zeigt sich, dass der Dampf langsam auskondensiert.

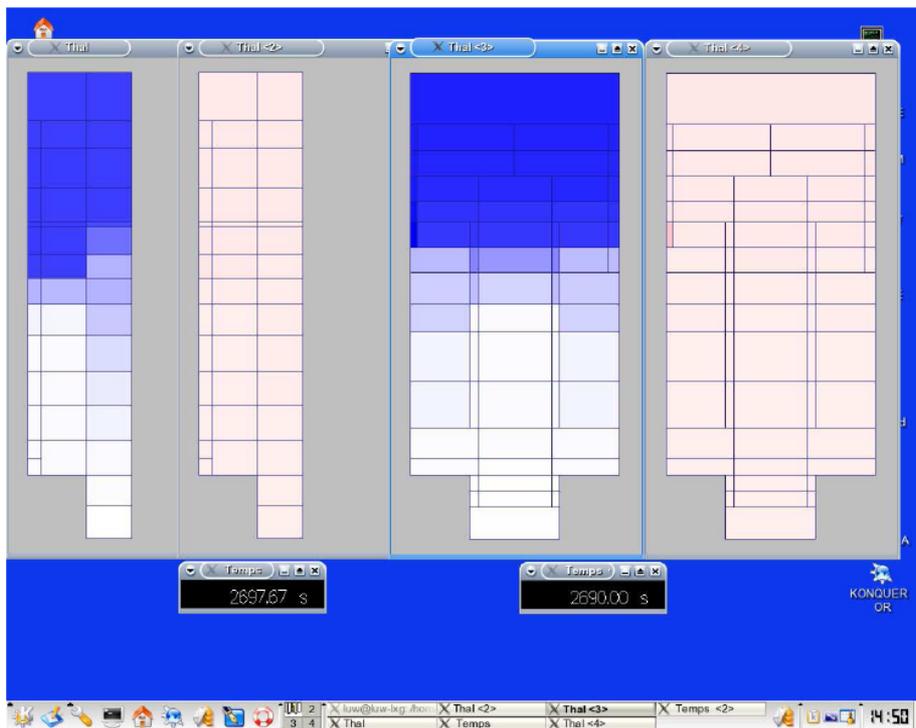


Abb. 4-48 ThAI: Vergleich der Helium und Dampfkonzentrationen bei $T = 2700$ s für GRS-ASTEC IRSN ASTEC

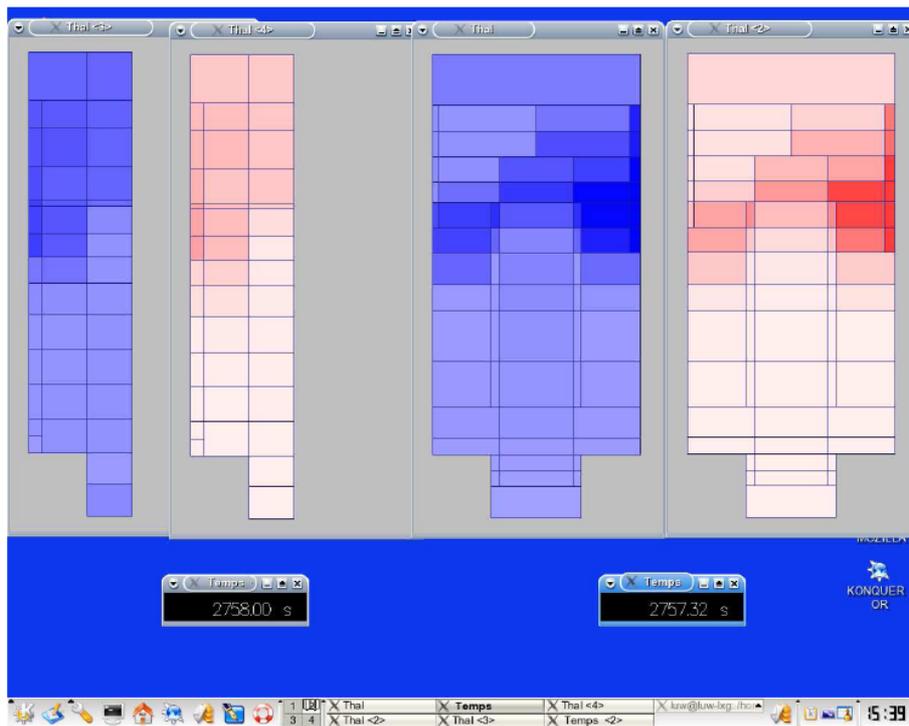


Abb. 4-49 Thal: Vergleich der Temperatur und der Dampfkonzentration bei $T = 2758$ s für GRS-ASTEC IRSN ASTEC

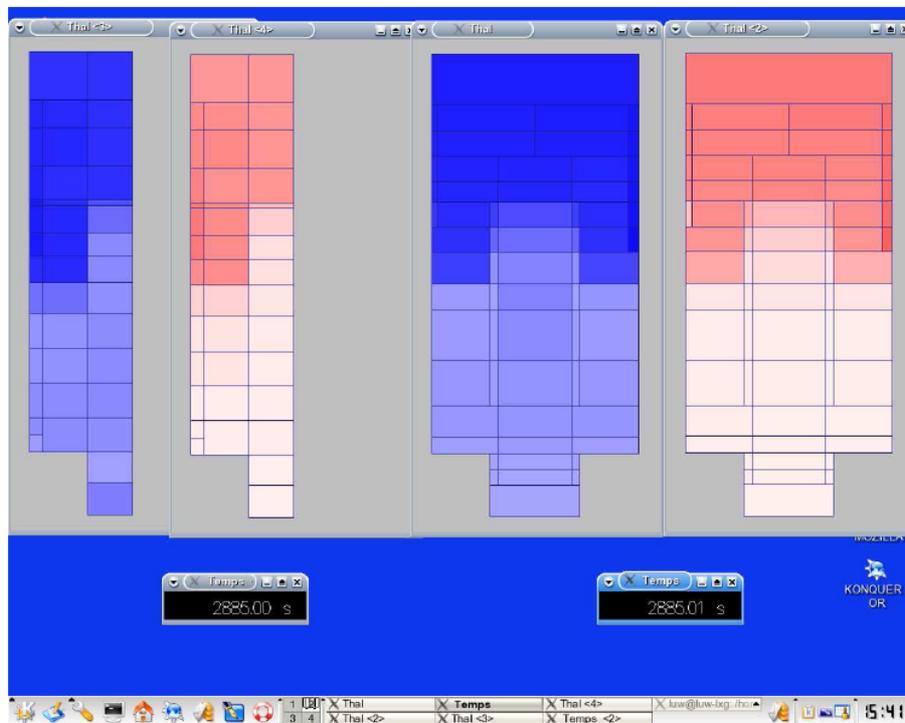


Abb. 4-50 Thal: Vergleich der Temperatur und der Dampfkonzentration bei $T = 2885$ s für GRS-ASTEC IRSN ASTEC

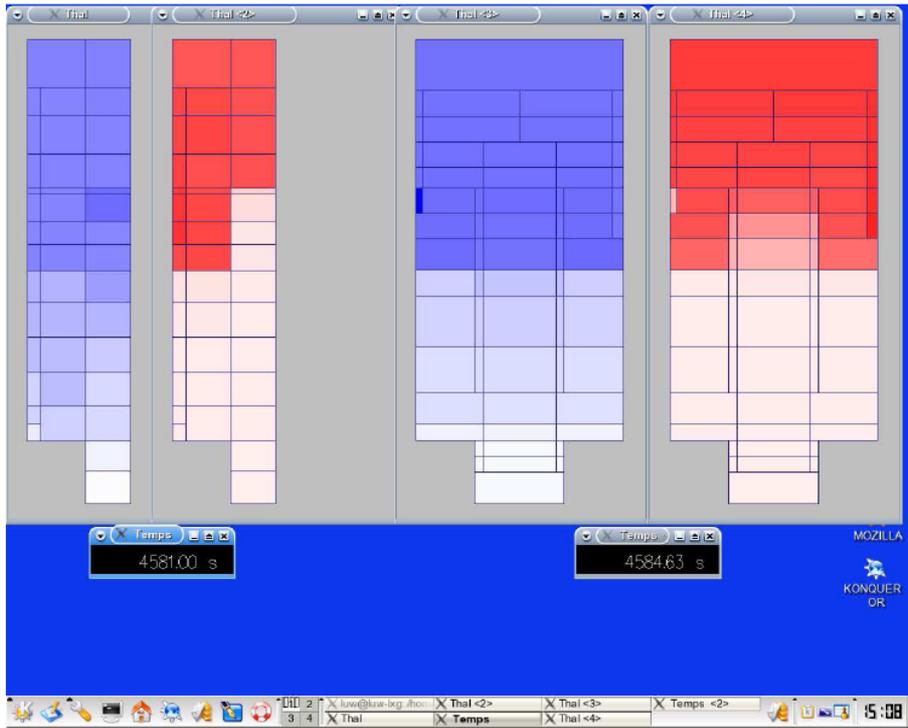


Abb. 4-51 ThAI: Vergleich der Helium und Dampfkonzentrationen bei $T = 4600$ s für GRS-ASTEC IRSN ASTEC

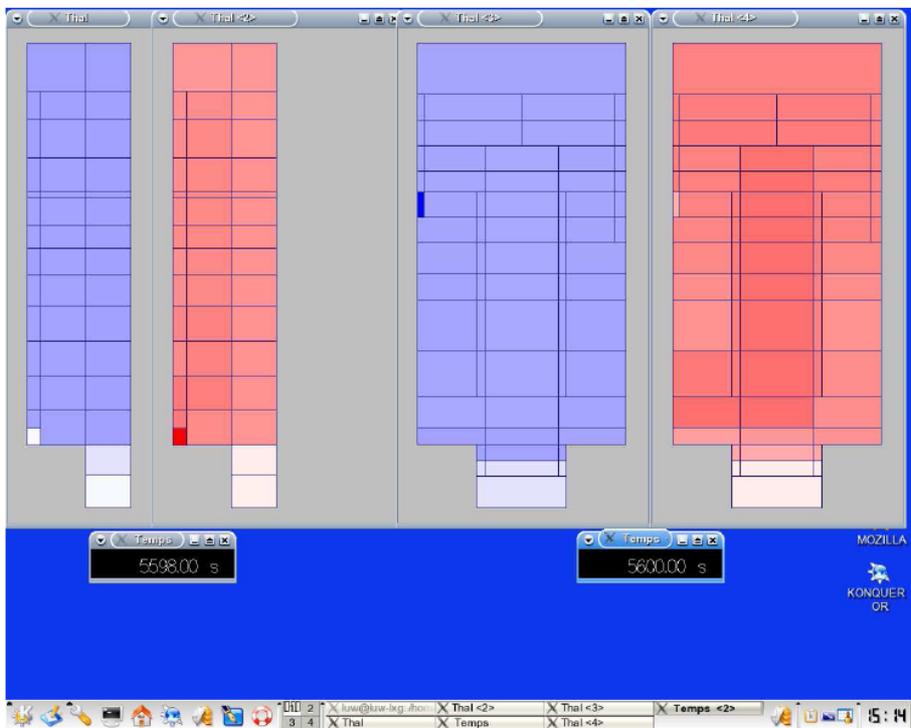


Abb. 4-52 ThAI: Vergleich der Helium und Dampfkonzentrationen bei $T = 5600$ s für GRS-ASTEC IRSN ASTEC

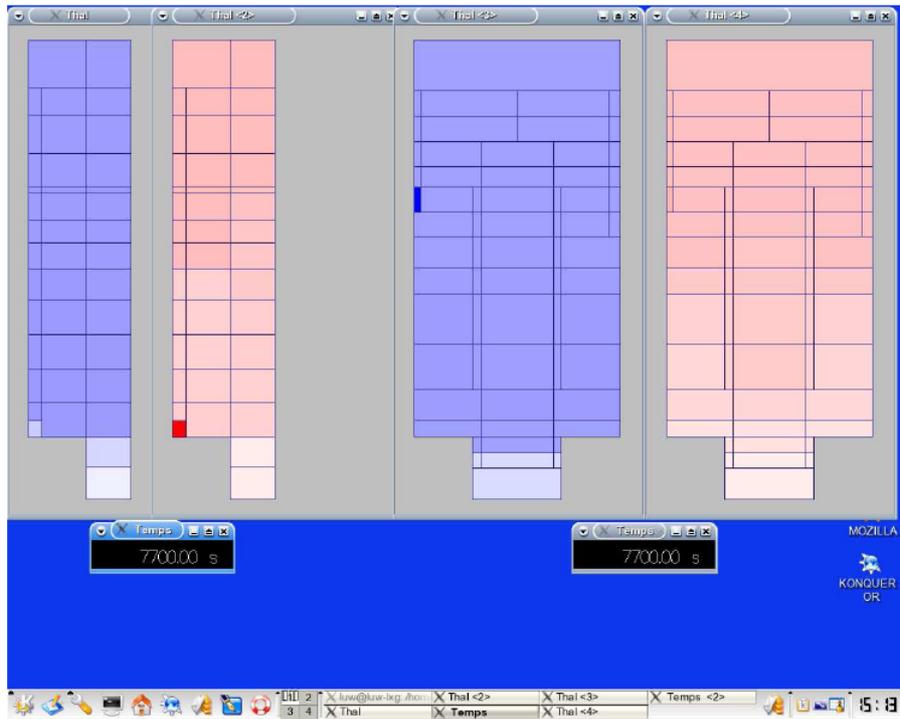


Abb. 4-53 ThAI: Vergleich der Helium und Dampfkonzentrationen bei $T = 7700$ s für GRS-ASTEC IRSN ASTEC

Zusammenfassend zeigt dieser kurze Vergleich, dass

- mit der 'lumped parameter'-Nodalisierung von CPA auch ein komplexes 3-dimensionales Experiment, wie es der ThAI-Versuch des ISP-47 zweifelsfrei ist, erfolgreich simuliert werden kann,
- dabei jedoch der Einfluss der Nodalisierung und im speziellen Fall der 'plume'-Abbildung - also 'user'-Effekte - gravierend sind.

Abschließend sei noch bemerkt, dass der Rechenzeitbedarf für das verwendete 60 Zonen-Modell mit weniger als 30 Minuten auf einem PC fast vernachlässigbar ist.

4.2.5 Validierung der implementierten Rekombinatormodelle

Zur Berechnung der Wasserstoffrekombination in den autokatalytischen Rekombinatoren (Typ Siemens) wurden zur vereinfachten Simulation Korrelationen, die wenig Rechenaufwand benötigen, wie sie in COCOSYS implementiert sind, in ASTEC übernommen. Ebenfalls wurden die von Siemens gelieferten Korrelationen eingebaut. Auf

Wunsch des französischen Partners IRSN wurden die Korrelationen auch in die ältere ASTEC Version V0.4 eingebaut. Zur Überprüfung der Korrelationen wurden Validierungsrechnungen zum Battelle Modellcontainment Versuch Gx4 durchgeführt. Die GRS Korrelationen waren bisher nur indirekt validiert, da sie aus dem detaillierten COCOSYS Modell abgeleitet wurden, das detailliert an verschiedenen Rekombinatorversuchen validiert wurde. Hier erfolgte nun die erste direkte Validierung der vereinfachten Korrelationen zur Simulation von Rekombinatoren in der ASTEC Umgebung durch direkten Vergleich mit den Messergebnissen.

Validiert wurden sowohl die implementierten GRS Korrelationen als auch die implementierten, von Siemens selbst erstellten Korrelationen zur Simulation der Siemens Rekombinatoren. Ziel hierbei war, nur das Modell für den Rekombinator zu validieren und nicht die Simulation des Gesamtversuchs mit seinen thermohydraulischen Vorgängen, wobei natürlich die Wiedergabe der Wasserstoffkonzentrationsverläufe in den verschiedenen Räumen ein Maß für die Güte der Modellierung darstellt.

Bei dem BMC Versuch Gx4 /SCW 96/ wurden die Innenräumen R5, R6, R7, R8, R1/3 mit einem Gesamtvolumen von 209 m³ von den übrigen Räumen abgetrennt und der Versuch auf diesen Raumbereich beschränkt. Im Raum R5 war ein Siemens Rekombinator vom Typ FR90-100 installiert.

Wasserstoff wurde in Raum R5 und später in R8 eingespeist. Dampfeinspeisung erfolgte in die Räume R5, R6 und R8. Zwischen den Räumen entwickelte sich eine Naturkonvektion, die bei der Simulation mit einem einfachen Raumschema (5 Zonen, Abb. 4-54) abgebildet wurde.

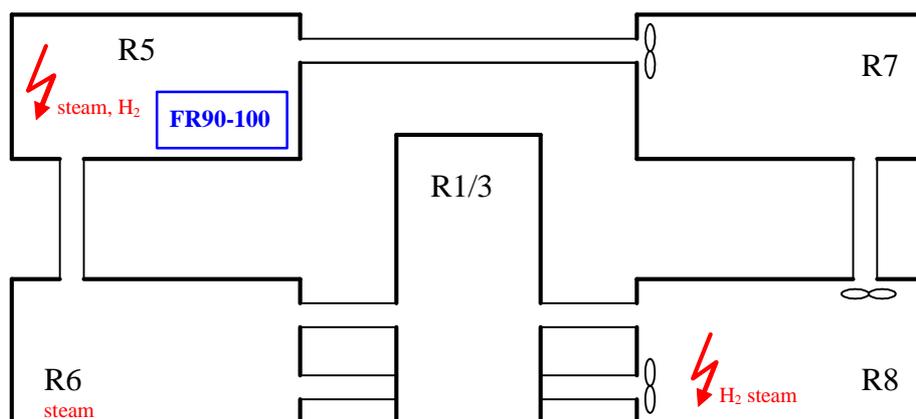


Abb. 4-54 Nodalisationsschema für BMC Gx4

Diese Nodalisierung war etwas zu einfach, um die realen Konvektionen richtig abzubilden. Um die Randbedingungen für den Rekombinator aber trotzdem möglichst entsprechend den in R5 gemessenen Bedingungen zu fahren, wurde die Umwälzung mit Gebläsen eingestellt.

In den Abb. 4-55 und 4-56 sind beispielhaft die Ergebnisse für ASTEC V1 und V0.4 mit gemessenen Werten verglichen. Abb. 4-55 zeigt die gute Übereinstimmung von gemessenem (gestrichelte Linie) und den berechneten Konzentrationsverläufen in Raum R5, in dem der Rekombinator angebracht war.

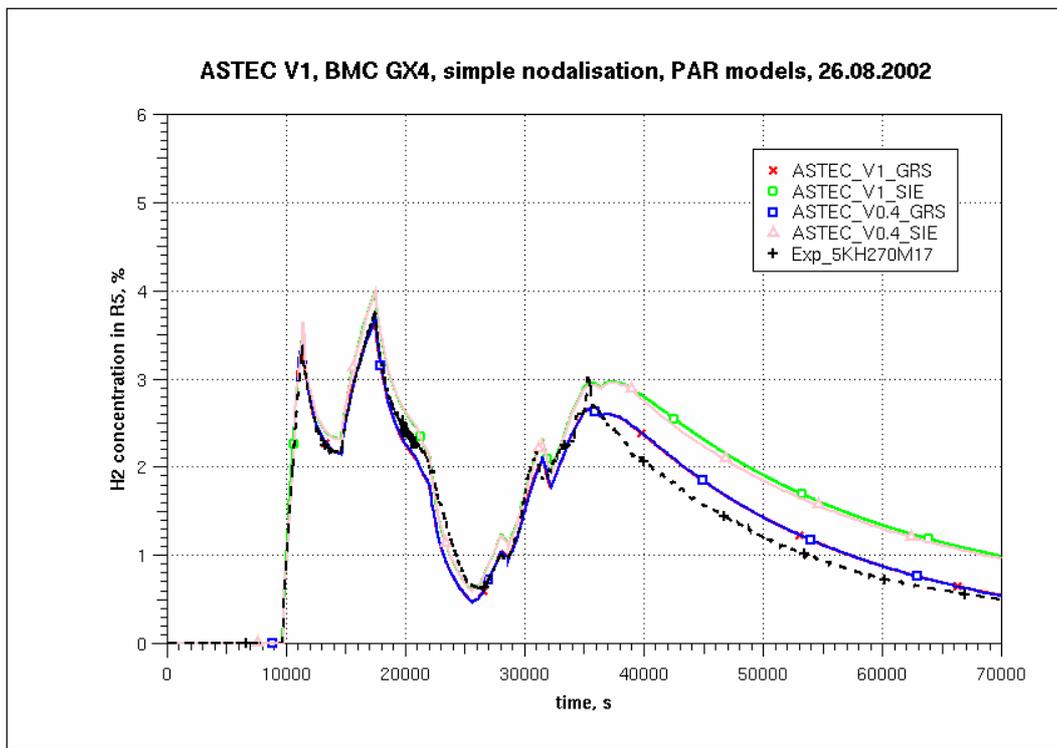


Abb. 4-55 ASTEC V1, H₂ Konzentration in Raum R5

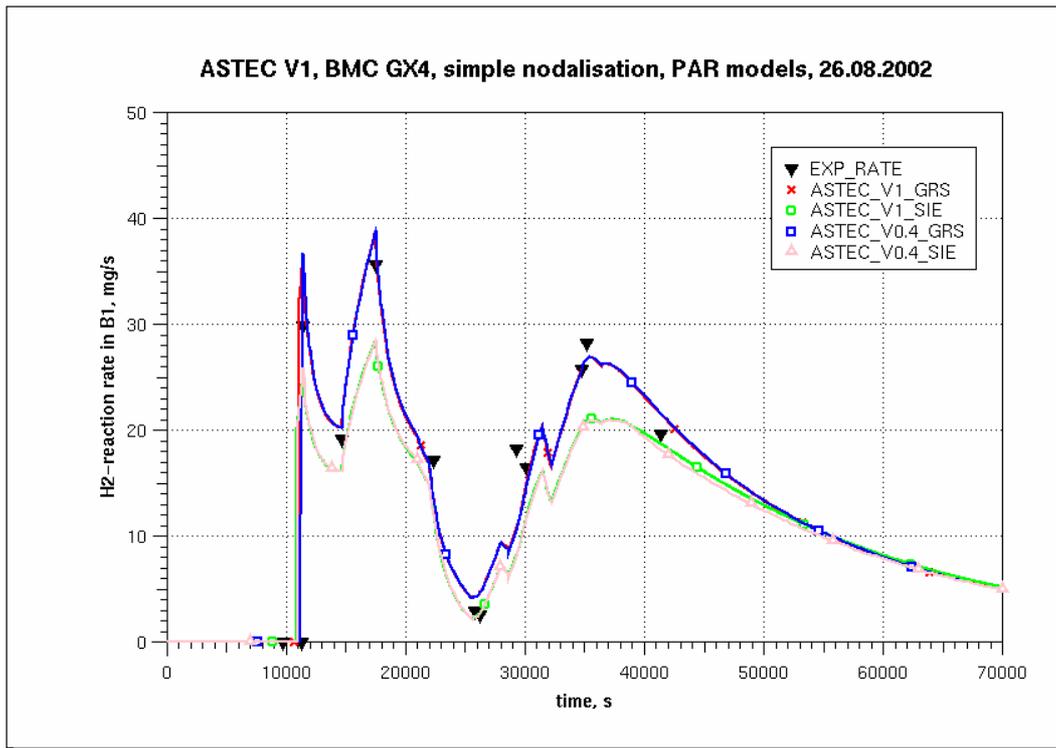


Abb. 4-56 ASTEC V1, H₂ Rekombinationsrate am Reko B1

Die GRS Korrelationen zeigen im Zeitbereich 40 000 s bis 70 000 s eine bessere Übereinstimmung zur Messung als die Siemens Korrelationen. Der Grund hierfür wird in Abb. 4-56 ersichtlich: der Vergleich der GRS Abbauraten zeigt gute Übereinstimmung mit den Messpunkten (Dreiecke), während die Siemens Korrelationen systematisch geringere Abbauraten berechnen (Konzentrationsbereich bis 4 Vol.-%). Das führt dazu, dass im späten Zeitbereich zuviel Wasserstoff in Raum R5 vorhanden ist. Die ASTEC Versionen V0.4 und V1 liefern - wie es sein muss - fast identische Ergebnisse für beide Korrelationsformen.

Eine direktere Bewertung der Rekombinatorsimulation, d. h. eine Beurteilung des Wasserstoffabbaus, erlaubt ein Vergleich der berechneten und gemessenen Ein- und Austrittskonzentrationen am Rekombinator). Die Raumkonzentration in Raum R5 entspricht der Eintrittskonzentration am Rekombinator. Die Austrittskonzentration und damit der Wasserstoffabbau wurde mit dem Detailmodell gut berechnet, wie der Vergleich zur Messung zeigt. Die Berechnung der Austrittskonzentration am Rekombinator ist nur mit dem Detailmodell möglich. Da das Korrelationsmodell identische Ergebnisse zum Detailmodell liefert (Kurven ASTEC-GRS zu ASTEC-PAR), kann die Qualifizierung des Detailmodells auch für das Korrelationsmodell gelten.

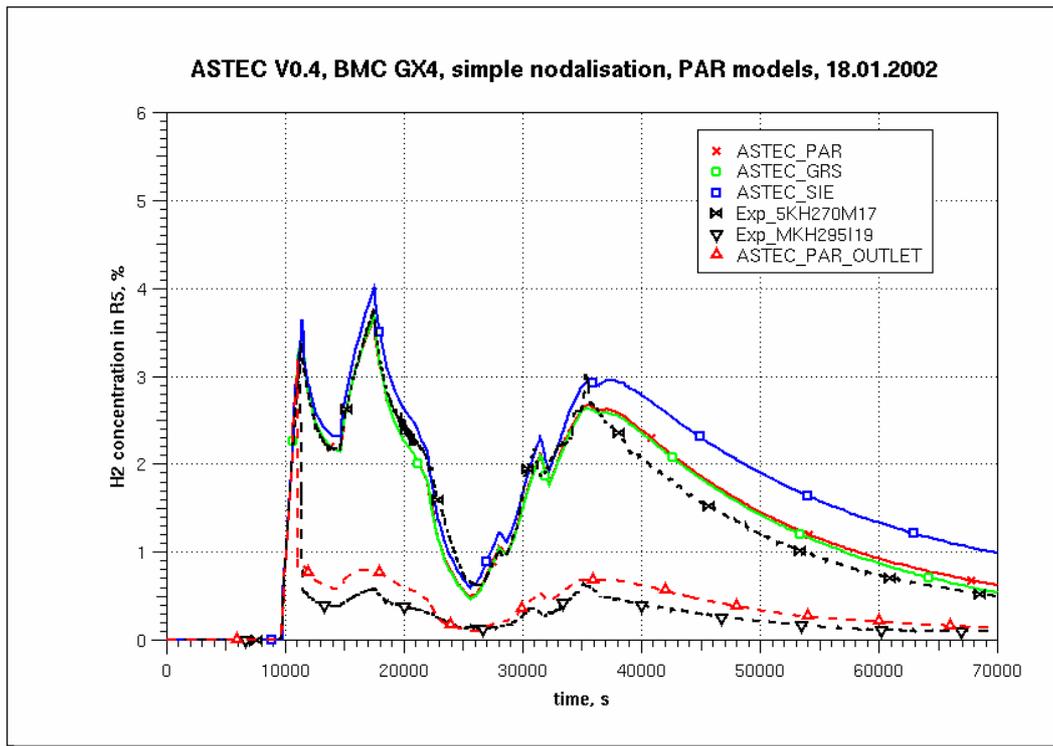


Abb. 4-57 H₂-Konzentration in R5 (Inlettemperatur) und Austrittstemperatur für das detaillierte Modell

Weitere Details können dem als Anhang 9.10 beigefügtem Dokument entnommen werden.

4.2.6 Validierung der MCCI-Module in ASTEC

4.2.6.1 Einleitung

Während des Projektzeitraumes (April 2002 bis Oktober 2005) ist ein Umbruch des MCCI-Moduls in ASTEC erfolgt.

Beide Projektpartner IRSN und GRS hatten in den Jahren vor 2000 intensive Anwendungserfahrung mit dem am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelten Code WECHSL und seinen Nachfolgeentwicklungen (in der GRS unter dem Namen WEX) gesammelt. Die Version ASTEC V0.3, erschienen in Oktober 2000, beinhaltete daher zunächst eine bei beiden Partnern bekannte, ältere WECHSL-Version 3.5 (in der Versionsführung des FZK). Zu Beginn des Jahres 2002 wurde in ASTEC V1 eine bei der GRS verbesserte Version von WECHSL unter dem Namen WEX 3.1 eingeführt. Zeit-

gleich wurden von beiden Projektpartnern gemeinsame Überlegungen zu einer wegen einiger gravierender und nicht zu bereinigender Defizite von WECHSL/WEX als notwendig erachteten Neuentwicklung eines MCCI-Moduls angestellt. Diese Überlegungen wurden in 2001 bis 2003 in Form eines für die Neuentwicklung unter dem Namen MEDICIS verbindlichen Satzes generalisierter und detaillierter Spezifikationen festgehalten /CRA 01, CRA 03/. In 2002 wurde eine erste separat (d. h. ohne Anbindung an ASTEC) lauffähige, rudimentäre Version des neu entwickelten Moduls (MEDICIS-"Mock-Up") vorgestellt. Das neue Modul unter Namen MEDICIS wurde dann in den Folgejahren sukzessiv für die Übernahme in ASTEC V1 vervollständigt und laufend verbessert.

Unter dieser Randbedingung erfolgten die Validierungsarbeiten zu dem MCCI-Modul in ASTEC zweigleisig:

- Validierung des in der Entwicklung abgeschlossenen Moduls WEX in ASTEC anhand ausgewählter Experimente aus abgeschlossenen und laufenden Experimentalprogrammen
- Validierung der jeweils aktuell in ASTEC verfügbaren MEDICIS-Version in enger Rückkopplung zur Entwicklung (d. h. in enger Verzahnung zum parallel laufenden Entwicklungsvorhaben)

Die zu MEDICIS erzielten Ergebnisse stellen daher immer die historisch zu einer Entwicklungsstufe von MEDICIS zugehörigen Ergebnisse dar und sind daher mit Ausnahme der zuletzt durchgeführten Arbeiten nicht repräsentativ für die Leistungsfähigkeit von MEDICIS im aktuellen Entwicklungsstand.

4.2.6.2 Durchgeführte Validierungsarbeiten

Die Validierung orientierte sich an den bereits abgeschlossenen und in der Rückschau bewertbaren Versuchsreihen BETA, ACE und MACE sowie den aktuell geplanten bzw. laufenden Versuchsreihen LACOMERA COMET (beim Forschungszentrum Karlsruhe) sowie OECD-MCCI (beim Argonne National Laboratory).

Kurze Diskussion der Experimentreihen

BETA

Die Schmelzen für die Versuchsreihen beim Forschungszentrum Karlsruhe (BETA, LACOMERA-COMET) wurden mit einer aluminiumbasierten Thermitreaktion erzeugt, die oxidische Coriumkomponente wird hierbei durch Aluminiumoxid (Al_2O_3) simuliert. Abb. 4-58 zeigt die BETA-Versuchsanlage /ALS 95/. Nach Erzeugung der Schmelze durch eine Thermitreaktion wird zunächst die spezifisch schwerere Eisenschmelze und danach das Oxidgemisch (Al_2O_3 mit kleinen Anteilen SiO_2 und MgO) in die Kaverne eingelassen. In den Versuchen wurden ca. 300 kg Stahl und 50-150 kg Oxid eingesetzt. Darüber hinaus wurde in einigen Versuchen (5.1-5.3) der Einfluss von ca. 80 kg metallischem Zirkaloy untersucht. Beide Schmelzphasen lagern sich in der Reihenfolge entsprechend der Dichte in der Kaverne ab (Metall unten, Oxid oben). Die Induktionsspulen umgeben den unteren Bereich des zylindersymmetrischen Tiegels (mit 38 cm Durchmesser), dieser öffnet sich konisch nach oben. Zu Beginn wurden in allen Experimenten heftige Badbewegungen mit Auswurf von Schmelze beobachtet. Das ausgeworfene Material traf auf die geneigten Seitenwände im oberen Tiegelbereich auf und konnte durch Abrutschen u. U. wieder in den Tiegel gelangen. Die Schmelzbadtemperatur wurde bei den BETA-Experimenten durch Eintauchen von mit Thermoelementen bestückten Lanzen in das Schmelzbad untersucht. Diese fiel rasch innerhalb von ca. 100 s bis auf Werte nahe der Erstarrungstemperatur der Stahlschmelze ab. Alle Experimente mit höherer Leistung (1.8, 5.1, 5.2, 3.3) zeigen eine stark dominierende Erosion in axialer Richtung gegenüber der radialen Richtung. Die Experimente mit niedrigerer Leistung (z. B. die der 2er-Serie) sind nicht einfach zu interpretieren, da die Verkrustung der Schmelze (des Metalls) die homogene Verteilung der zugeführten Wärmeleistung stark behindert.

Probleme:

- Induktive Erzeugung der Wärme nur in einer schmalen Flüssigkeitsschicht
- Induktive Erzeugung der Wärme nur im Metall (unten liegend)
- Starke Einflussnahme der Erstarrung des Eisens

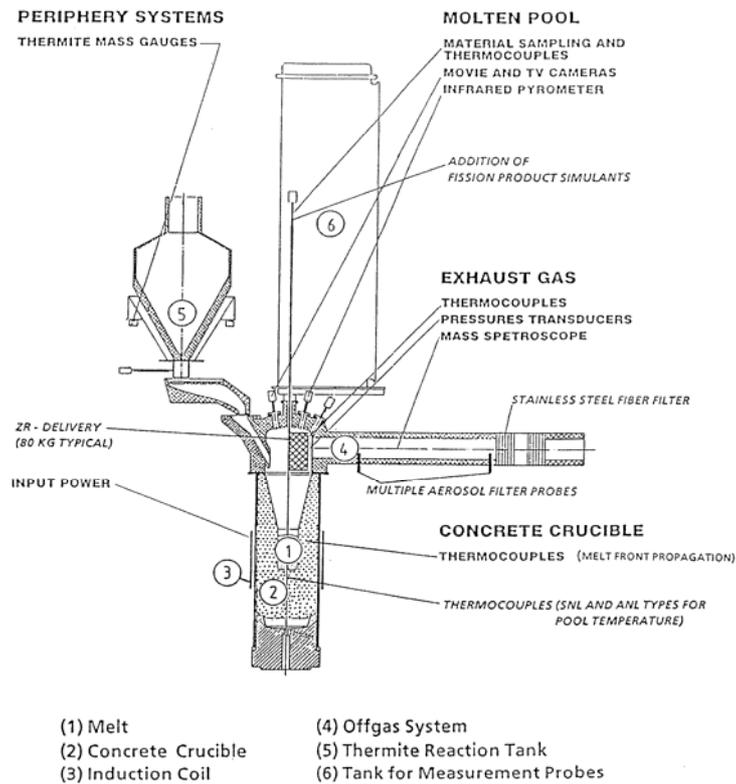


Abb. 4-58 Schematischer Aufbau und Instrumentierung der BETA-Versuchsanlage

ACE

In den ACE-Experimenten /THO 97/ kamen im Unterschied zu den BETA-Experimenten prototypische oxidische Coriumschmelzen inklusive der Stoffe UO_2 und ZrO_2 zum Einsatz. In einer rechteckförmigen Geometrie mit quadratischer Grundfläche wurde die nach unten gerichtete Erosion in Betonfundamenten aus reaktortypischen Materialien (Kalkstein/Sand-Beton, silikatischer Beton sowie kalkreicher Beton) mit der direkt durch elektrischen Strom beheizten Schmelze untersucht (Abb. 4-59).

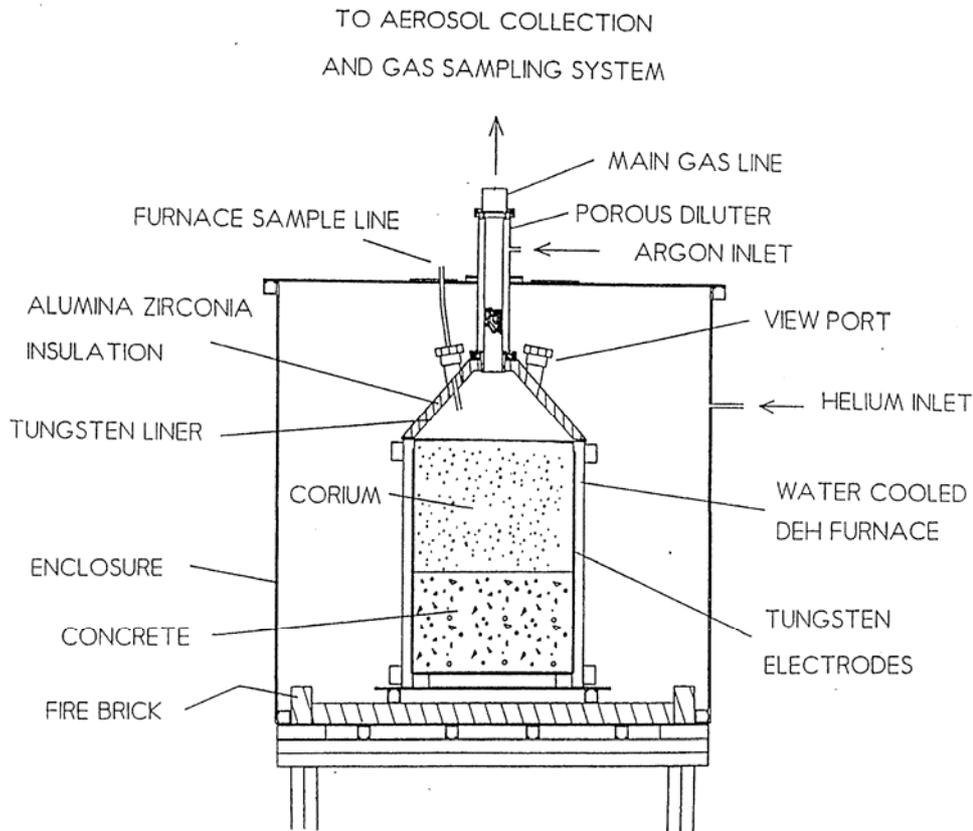


Abb. 4-59 Test-Aufbau der ACE-Testserie (ACE-L5)

In allen ACE-Experimenten hatte das Betonfundament eine Dimension von 50 cm × 50 cm (entspricht der Größe der zu Beginn der Schmelze zugewandten Betonfläche) und eine Dicke von ca. 30 cm. Die Seitenwände der rechteckigen Kaverne wurden paarweise entweder für die Simulation der Nachzerfallswärme (unter Verwendung von gegenüber stehenden Wolfram-Elektroden, die den elektrischen Strom direkt durch die Schmelze leiten) oder als weitgehend inerte Seitenwände (ZrO_2 -beschichtet und gekühlt) eingerichtet. Die anfänglich in fester Form vorliegende Coriummischung von ca. 300 kg, die die Brennstoffmaterialien UO_2 und ZrO_2 sowie diverse Betonzersetzungsprodukte enthielt, wurde zunächst von der Oberseite der Schmelze beheizt, bis eine ausreichende Leitfähigkeit im Material erreicht wurde. Spezielle Zuschläge zur Schmelze (z. B. Zirkonium und einige für die entsprechenden Anlagentypen charakteristische Steuerstabmaterialien) wurden als Einsätze flach unter der Betonoberfläche angebracht, um eine verfrühte Oxidation dieser Metalle zu vermeiden.

Probleme:

- Quantifizierung der Netto-Leistung in der Schmelze (= elektr. Leistung - Wärmeverluste in die Seitenwände)
- Aufheizphase bis zum Schmelzen des Materials beeinflusst Versuchsablauf

MACE

Die bei ANL durchgeführten MACE-Experimente zur Untersuchung der Kühlbarkeit einer Coriumschmelze unter MCCI-Bedingungen nach Flutung mit Wasser sind durch folgende wesentliche Auslegungsrandbedingungen gekennzeichnet:

- Möglichst große Skalierung der vertikalen Abmessung des Schmelzepools im Vergleich zum Reaktorfall,
- realistische Coriumschmelzen für DWR- und SWR-Anlagen,
- realistische Anfangsbedingungen für die Schmelze-Beton-Wechselwirkungen und
- realistische Wärmeeinkoppelung zur Simulation der Nachzerfallswärmeleistung.

Im Unterschied zu den ACE-Experimenten wurde die Schmelze bei MACE mit einer Thermit-Reaktion generiert. Die Probleme bei der Definition von klaren Anfangs- bzw. Randbedingungen, die sich bei den ACE-Experimenten aufgrund des langen induktiven Aufheizprozesses ergaben, werden dadurch weitgehend vermieden.

Im Versuch M4 wurde eine Mischung aus voll oxidiertem Corium und 6 Gew.-% Chrom (Gesamtmasse: 480 kg) auf silikatischem Beton eingesetzt. Die anfängliche Höhe des Coriumpools betrug ca. 30 cm auf einer Grundfläche von 50 cm × 50 cm (Abb. 4-60). In dem Versuch wurde die axiale Erosion des Betons untersucht. Alle Seitenwände waren mit einer Schicht aus UO₂-Pellets ausgekleidet. Der Schmelzepool wurde elektrisch über Wolfram-Elektroden an den Seitenwänden West und Ost mit einer Soll-Leistung von 130 kW beheizt. Etwa 23 min nach Einsetzen der Schmelze-Beton-Wechselwirkung wurde die Schmelzeoberfläche mit Wasser geflutet. Nachfolgend wurde eine heftige Wechselwirkung zwischen Schmelze und Wasser, verbunden mit einem starken Anstieg des lokalen Wärmeüberganges an der Schmelze-Wasser-Kontaktfläche, beobachtet.

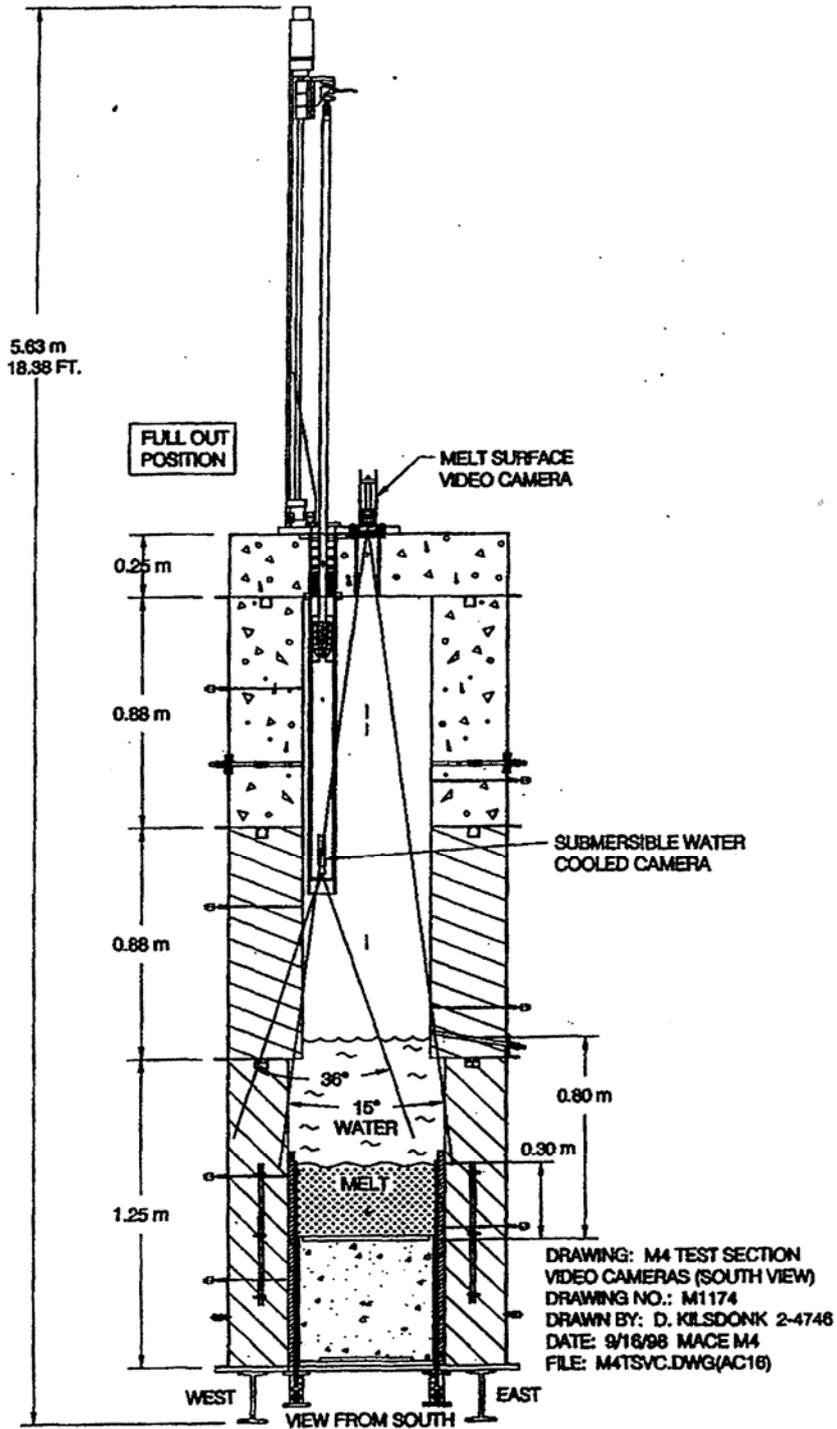


Abb. 4-60 Schematischer Aufbau und Instrumentierung der MACE M4-Versuchsanlage

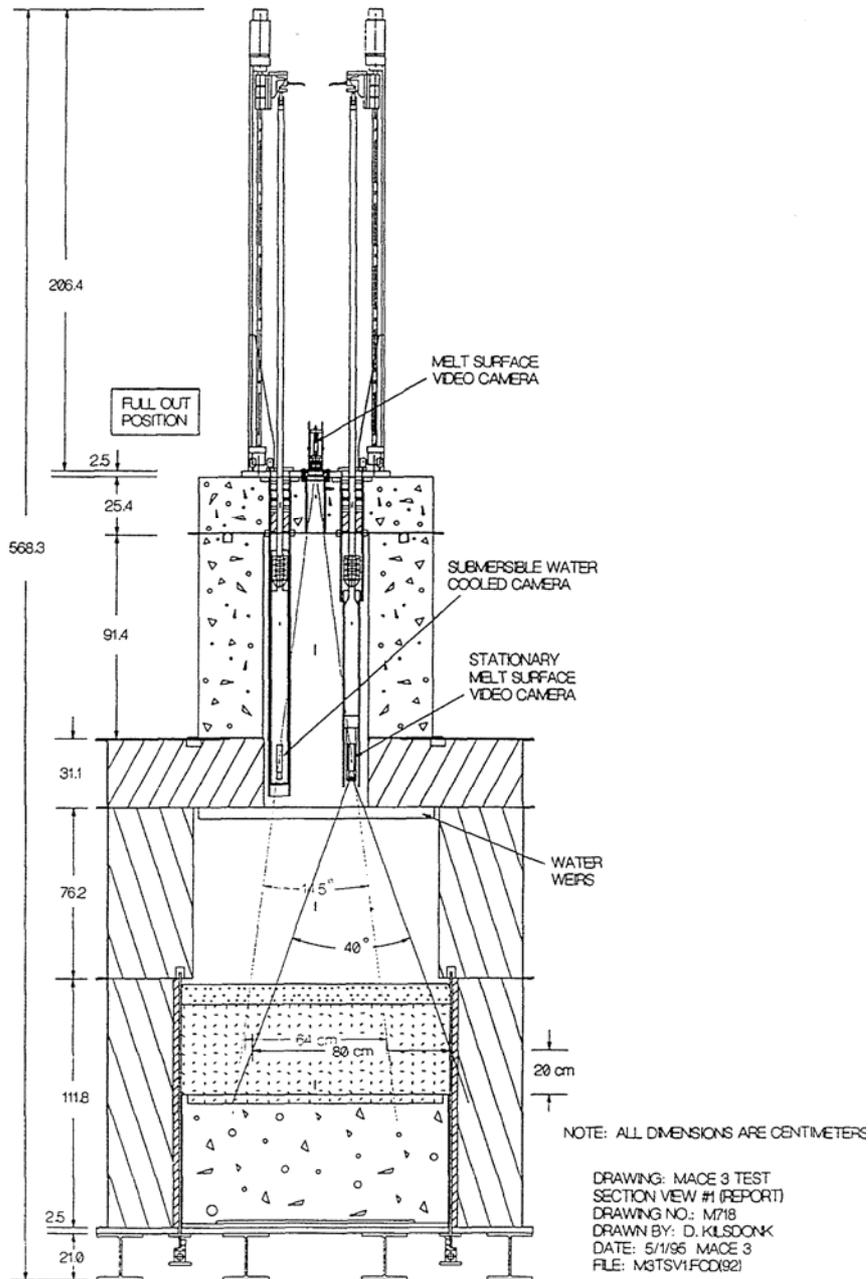


Abb. 4-61 Schematischer Aufbau und Instrumentierung der MACE M3b-Versuchsanlage

Das eindimensionale Experiment MACE M3b unterscheidet sich von M4 hauptsächlich durch die Skalierung (120 cm × 120 cm Grundfläche des rechteckigen Schmelzepools) und durch den verwendeten Beton (Kalkstein/Sand). Aufgrund der größeren Skalierung des Experiments wurde eine größere Masse an Corium eingesetzt (ca. 1800 kg voll-oxidiertes Corium mit 6 % Chrom). Der Versuch dauerte ca. 27 000 s (= 7.5 h), wobei

der Pool nach 3135 s (52.25 min) ab Beginn der Schmelze-Beton-Wechselwirkung mit Wasser geflutet wurde.

Probleme:

- Vorgänge unter Flutungsbedingungen unklar für die trockene Erosion interpretierbar

LACOMERA-COMET

Die COMET-Anlage beim Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) dient zur Untersuchung verschiedener Szenarien von Schmelze-Beton-Wechselwirkungen und der Kühlbarkeit der Schmelze nach Flutung mit Wasser.

Das Hauptmerkmal der Anlage ist wie bei BETA die Simulation der Nachzerfallswärmeleistung durch elektro-magnetische Induktion. Wie bei BETA wird in den LACOMERA-COMET-Versuchen das Corium durch Fe und Al_2O_3 als Produkte einer Thermitreaktion mit Anfangstemperaturen um 1800 °C simuliert. Durch Zuschlag von weiteren Oxiden zum Aluminiumoxid wird die Erstarrungstemperatur der Oxidmischphase abgesenkt und die Spreizung zwischen Solidus und Liquidus vergrößert, so dass das Material im Erstarrungsverhalten Ähnlichkeit zum Verhalten reaktortypischen Coriums aufweist.

Die Schmelze wird durch eine Klappe in einen zylindrischen Tiegel (mit 60 cm Durchmesser) eingelassen. Die volumetrische Wärmeleistung wird der Schmelze durch eine unter dem Tiegel sitzende Induktionsspule zugeführt (Abb. 4-62).

Die Hauptzielsetzung von COMET-L1 /DOU 05/ war die Beobachtung der langzeitigen 2D-Schmelze-Beton-Wechselwirkung während einer späten Phase eines Kernschmelzunfalls bei mittlerem Wärmeleistungsniveau. Sobald die axiale Erosion in dem zylindrischen Tiegel eine bestimmte Tiefe erreicht hat, wird die Flutung der Schmelze von oben eingeleitet, um in dieser Phase des Experimentes den Einfluss des Wassers auf die MCCI-Prozesse zu beobachten.

Probleme:

- siehe BETA

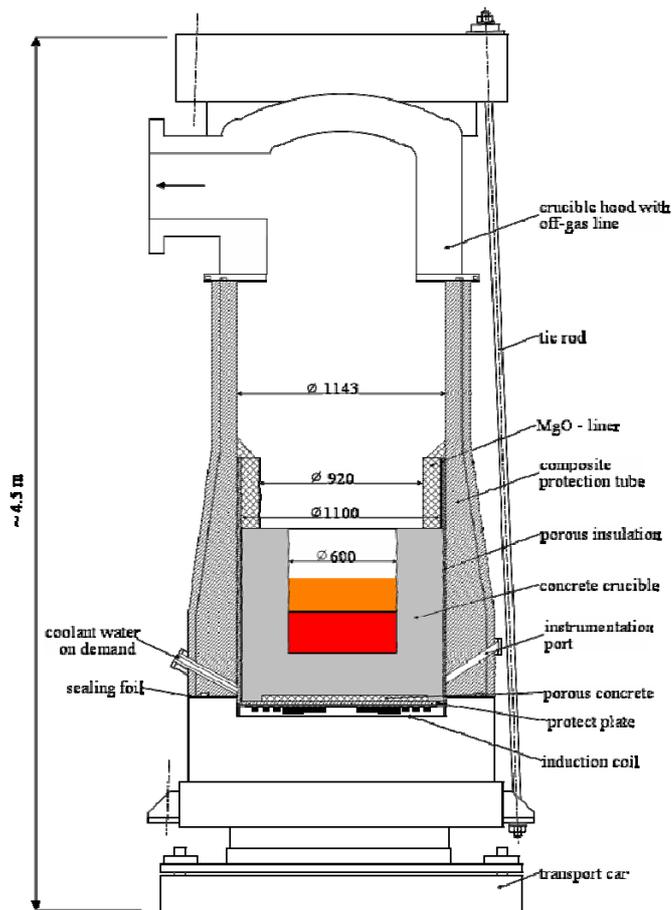


Abb. 4-62 Schematischer Aufbau und Instrumentierung der LACOMERA COMET-L1-Versuchsanlage

OECD-MCCI

Das im OECD-Rahmen seit 2002 laufende MCCI-Projekt verfolgt zwei Haupt-Zielsetzungen:

1. Weitergehende Auflösung von Fragestellungen zur ex-vessel-Kühlbarkeit einer Kernschmelze, basierend auf den bereits in früheren Programmen (ACE, MACE) gewonnenen Erkenntnissen zu Phänomenen und Mechanismen, die zur Kühlung der Schmelze nach Flutung mit Wasser beitragen.
2. Reduktion der bestehenden Unsicherheiten bei der zweidimensionalen Schmelze-Beton-Wechselwirkung unter trockenen und gefluteten Bedingungen (axiale/radiale Wärmestromverteilung).

Zur Untersuchung der zweiten Fragestellung sind speziell die CCI-Tests als Integralexperimente zur Schmelze-Beton-Wechselwirkung in zweidimensionalen Rechteckgeometrien unter trockenen und gefluteten Bedingungen ausgelegt worden. In diesen Tests wird die oxidische Coriumschmelze (ca. 400 kg) durch eine Thermitreaktion erzeugt und die Erosion an zwei gegenüberliegenden Seitenwänden sowie an der Bodenplatte beobachtet. An den übrigen zwei vertikalen Seitenwänden wurden die Elektrodenstäbe zur direkten, elektrischen Beheizung der Schmelze angebracht (Abb. 4-63).

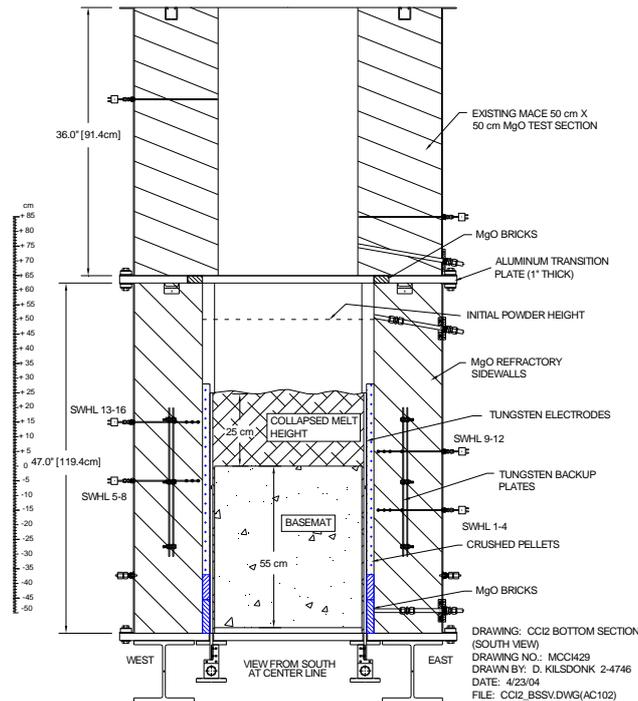


Abb. 4-63 CCI-2 - Schematischer Aufbau und Instrumentierung der Versuchsanlage

Probleme:

- Ausdehnung und zeitliches Verhalten der Erosion in Seitenwand und Boden in den Versuchen CCI-1, -2 und -3 bislang nicht einheitlich interpretierbar; unterschiedlicher Einfluss von Krusten zwischen Schmelze und Beton vermutet.

Validierungsergebnisse mit ASTEC-WEX

Mit WEX in ASTEC V110 (sog. 'patch'-Version Nr. 10 von ASTEC V1) wurden Rechnungen zu ACE L2, ACE L5 und BETA V5.2 durchgeführt und im Rahmen von ASTEC dokumentiert (siehe Anhang 9.1). Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

Bezüglich der berechneten Erosionstiefen und Temperaturverläufe wurden einigermaßen gute Übereinstimmungen zu allen drei Experimenten erzielt. Die noch vorhandenen Unterschiede in Erosionsrate und Temperaturverlauf in ACE L2 und ACE L5 können mit den in WEX modellierten Phänomenen nicht erklärt werden. Beispielsweise ist der mit WEX berechnete Anstieg der Schmelztemperatur gegen Ende des Experimentes ACE-L5 auf den Anstieg der vorgegebenen Netto-Wärmeleistung zurückzuführen. Prinzipiell unterliegen die ACE-Experimente aber einer großen Unsicherheit hinsichtlich der Quantifizierung der tatsächlichen Netto-Wärmeleistung. Falls jedoch die experimentelle Netto-Leistung als abgesichert betrachtet werden muss, würde das beobachtete Verhalten (Konstanz der Temperatur bei anwachsender Leistung) auf den derzeit intensiv diskutierten Einfluss von Thermochemie hindeuten. Die Unterschiede im zeitlichen Verhalten der Erosionsrate bei den BETA-Versuchen ist hingegen auf eine unzureichende Modellierung der Wärmeübergänge bei geschichteten Schmelzen in WEX zurückzuführen: Im so genannten "Mixed"-Mode (Interpolationsmodus zwischen Blasen- und Filmsiedemodus) wird der anfängliche axiale Wärmeübergang stark überschätzt.

Ferner sind zwischen der stand alone-Version und der in ASTEC eingebauten WEX-Version Unterschiede bei den berechneten Gasfreisetzungsraten aufgefallen. Es scheint sich hierbei um einen Fehler bei der Adaption von WEX für ASTEC zu handeln, der korrigiert werden muss.

Die Abweichung der berechneten Gasfreisetzungsraten im Vergleich zum Experiment beträgt wenigstens einen Faktor 2. Leider finden sich kaum Angaben zu den experimentellen Unsicherheiten bei der Ermittlung der Gasfreisetzungsraten. Solange diese jedoch nicht in Betracht gezogen werden, können die Rechenergebnisse zu den Gasfreisetzungsraten nicht abschließend bewertet werden.

Validierungsergebnisse mit ASTEC-MEDICIS

Mit MEDICIS in ASTEC V110 wurden Rechnungen zu BETA V5.2 und BETA V3.3 durchgeführt und im Rahmen von ASTEC dokumentiert (siehe Anhang 9.2). Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

Die MEDICIS-Rechnungen für die geschichteten Experimente der BETA-Testserie sind bislang noch nicht in zufrieden stellender Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen. Die bei BETA V5.2 und BETA V3.3 beobachteten, vergleichsweise hohen axialen Erosionsraten können nicht durch unterschiedliche Parameteranpassungen bei

den Wärmeübergangsmodellen zwischen Schmelze und Beton für die einzelnen Schichten (Metall/Oxid) erzwungen werden. Mit höheren Wärmeübergangskoeffizienten in der unten liegenden Metallschicht wird ein früheres Einsetzen der Krustenbildung im Metall erzielt, was später einen gegenläufigen Effekt, nämlich eine Isolierende Wirkung an der Schnittstelle Metall/Beton zur Folge hat. Zusätzliche Rechnungen haben gezeigt, dass das Ausschalten der Modelle für Krustenbildung in der Metallschicht zu höheren Erosionsraten führt. Hierbei wurden jedoch die anfänglichen Erosionsraten im Experiment aufgrund der großen anfänglichen Temperaturdifferenz zwischen Metallschmelze und Beton überschätzt. Die bei den BETA-Experimenten beobachtete rasche Temperaturabsenkung kann mit den vorhandenen Modellen in MEDICIS nicht nachvollzogen werden. Es werden weitergehende Studien empfohlen, die sich genauer mit der Abstrahlung an der Oberfläche des Schmelzepools in den LACOMERA COMET-Versuchen beschäftigen.

Vergleichende Überprüfung der Modelle in WEX und MEDICIS anhand ausgewählter Experimente

Die bislang durchgeführte Validierungsarbeit mit beiden Codes hat gezeigt, dass eine konsistente Simulation aller verfügbaren Experimente nicht möglich ist. Die Abweichungen der Nachrechnungen von einzelnen Experimenten können durchaus bis zu einem Faktor 2 (im Falle der am Ende des Experimentes erzielten Erosionstiefe) bzw. ± 150 K (im Falle der Pooltemperatur) betragen. Die Gründe dafür lauten wie folgt:

- Empirische Parameter in den Modellen (z. B. Wärmeübergang an der Schnittstelle Schmelze/Beton oder die Erstarrungstemperatur) sind immer noch mit einer großen Unsicherheit behaftet.
- Das Wissen über thermo-chemische Materialeigenschaften, die die Erstarrungstemperatur beeinflussen, sowie über Stoffeigenschaften die den Massen- und Energietransport dominieren, ist immer noch für viele Oxid-Metall-Mischungen begrenzt.
- Die Auswertung der 2D Wärmestromverteilung in vermischten oder geschichteten Schmelzepoolkonfigurationen ist schwierig, da gravierende Wissenslücken über die Phänomene der mehrdimensionalen Konvektion und des Wärmeübergangs an der Metall/Oxid-Grenzfläche bestehen.

Um die bestehenden Unsicherheiten zu reduzieren sind derzeit viele Forschungsprojekte angelaufen: Integraleexperimente mit prototypischen Schmelzen (OECD-MCCI bei ANL, VULCANO bei CEA), Experimente mit Hochtemperatur-Simulatschmelzen (LACOMERA-COMET bei FZK) und analytische Experimente (ARTEMIS bei CEA)

Zur Bewertung der in ASTEC verfügbaren Modellansätze wurden die MCCI-Codes WEX and MEDICIS in paralleler Weise mit möglichst übereinstimmenden Randbedingungen/Parametern auf aussagekräftige Experimente angewandt.

Blinde Vorausrechnungen für LACOMERA COMET L1

Für das beim Forschungszentrum Karlsruhe geplante Experiment COMET-L1 (im Rahmen des EU-Projektes LACOMERA) sind mit beiden Rechencodes (WEX 3.1 und MEDICIS V110) Auslegungs- und blinde Vorausrechnungen durchgeführt worden Tab. 4-2.

Tab. 4-2 Ergebnisse der blinden Vorausrechnungen für die Zeit bis zur axialen Erosionsausdehnung in einer Tiefe von 15 cm

Code	Leistung (kW)	Konfiguration	Zeit bis zur axialen Erosionstiefe von 15 cm (s)
WEX	100	LAYERED	340
WEX	100	MIXED	9200
MEDICIS	100	LAYERED	9595
MEDICIS	100	MIXED	15140
WEX	200	LAYERED	308
WEX	200	MIXED	6150
MEDICIS	200	LAYERED	9560
MEDICIS	200	MIXED	7900

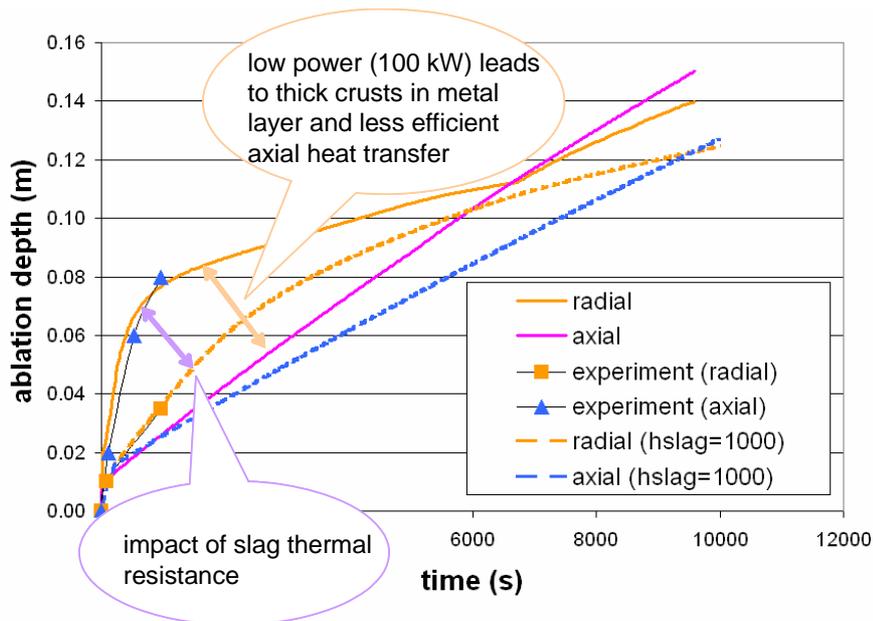


Abb. 4-64: MEDICIS-Ergebnisse für die Erosionstiefe (axial/radial) bei geschichteter Konfiguration der Schmelze und 100 kW Leistungszufuhr unter Variation des Wärmeübergangskoeffizienten des Slag-Layers zwischen 1 kW/(m²K) (gestrichelte Linie) und 1 MW/(m²K) (durchgezogene Linie)

In den Rechnungen zu Experimenten mit geschichteter Schmelze aus Oxid und Metall (wie BETA und COMET) wurden im Falle von WEX jedoch große Unsicherheiten in dem Modell für den Wärmeübergang zwischen Metall und Beton identifiziert. Der berechnete Umschlag zwischen zwei phänomenologischen Regimes (Blasensieden / Filmsieden) aufgrund eines Reynolds-Kriteriums führt hier zu einer massiven Änderung der lokalen Erosionsgeschwindigkeit. Dies wurde bereits auch als Hauptursache für die Unsicherheit bei der Prognose des Verhältnisses von axialer zu radialer Erosion in WEX identifiziert.

Mit MEDICIS konnte (wie unter Abschnitt 0 ausgeführt) die in den BETA-Experimenten beobachtete, starke axiale Erosion nicht reproduziert werden. In der Vorausrechnung für COMET L1 wurde im Vergleich zu WEX daher eine sehr viel längere Dauer des Experimentes bis zum Durchschmelzen des Fundamentes berechnet. Abb. 4-64 zeigen die MEDICIS-Ergebnisse für den geschichteten Fall mit 100 kW Leistung und einem Wärmeübergangskoeffizienten des Slag-Layers von 1 MW/(m²K). Mit diesem geringen Wärmewiderstand werden rasch Krusten entstehen, die die axiale Erosion nach kurzer Zeit rasch abbremst.

Aufgrund ungeplanter Randbedingungen und des frühen, ungeplanten Abbruchs des Experimentes COMET L1 konnten zu der Qualität der Vorausrechnungen leider keine

belastbaren Erkenntnisse gewonnen werden. Der Versuch COMET L1 wurde inzwischen als L3 wiederholt. Die analytische Behandlung von L3 wird jedoch einem „blinden“ Benchmark im Rahmen von SARNET vorbehalten. Die Arbeiten dazu werden im zweiten Halbjahr in 2006 stattfinden.

- Anpassung der Modellparameter in WEX auf die frühe Phase in geschichteten Schmelzen

Für WEX sind auf der Basis parametrischer Nachrechnungen von LACOMERA COMET-L1 neue Parameter für den Wärmeübergang zur verbesserten Beschreibung der frühen Phase in einem geschichteten MCCI-Pool bestimmt worden und anhand der vorhandenen, älteren Experimente COMET H5 und BETA V5.2 (beide FZK) überprüft worden. Während bei den rein oxidischen Versuchen der ACE-Serie die Übereinstimmung der berechneten Pooltemperatur und der Erosion mit den experimentellen Daten für beide Codes gleichermaßen zufrieden stellend ausfällt, gibt es beträchtliche Unsicherheiten bei der Berechnung eines geschichteten Pools wie bei BETA bzw. LACOMERA-COMET. WEX neigt hier dazu, die axiale Erosion, die in diesen Experimenten deutlich gegenüber der radialen Erosion dominiert, für die Anfangsphase in beträchtlichem Maße zu überschätzen, wohingegen die insgesamt erlangte Erosionstiefe am Ende des Experimentes in guter Übereinstimmung mit dem Experiment getroffen wird. Mit identischen Modellparametern wie in WEX gelingt es mit MEDICIS jedoch nicht, die in diesen Experimenten beobachtete, vergleichsweise schnelle Erosionsgeschwindigkeit zu reproduzieren. Der Grund liegt hierbei in einer selbstadaptierenden Modellierung des Wärmeübergangs zwischen Metallschicht und Beton, der mit einer stationär berechneten Kruste zu wenig effizient ist.

Mit den verbesserten Parametern für die Wärmetransportmodellierung in WEX während der frühen Phase werden die Experimente LACOMERA COMET-L1 und COMET-H5 in zufrieden stellender Übereinstimmung zu den experimentellen Ergebnissen wiedergegeben. Für BETA V5.2 ergibt sich statt der bisher berechneten, deutlichen Überschätzung der anfänglichen Erosion nun eine mäßige Unterschätzung. Es gelingt bislang also nicht, die Experimentreihen COMET und BETA in Übereinstimmung mit den Codes WEX und MEDICIS darzustellen.

Die im Code modifizierten Parameter sind:

- REFACT: Einflussnahme auf das Umschaltkriterium zwischen dem Filmmodus und dem "Mixed"-Modus beim Wärmeübergang zwischen Schmelze und Beton.

- f: Neu eingeführter Parameter, um den Beitrag des Blasenmodus während des "Mixed"-Modus zu reduzieren.

Abb. 4-65 zeigt Nachrechnungen mit WEX für COMET L1 unter Verwendung der neuen Empfehlungen für die Parameter REFACT and f, die den Übergang zum "Mixed"-Modus sowie dessen Stärke beeinflussen:

- REFACT = 3...4
- f = 0.2; das bedeutet 20 % der Nusselt-Zahl, die in WECHSL für das Blasenregime berechnet werden, gehen in den "Mixed"-Modus ein.

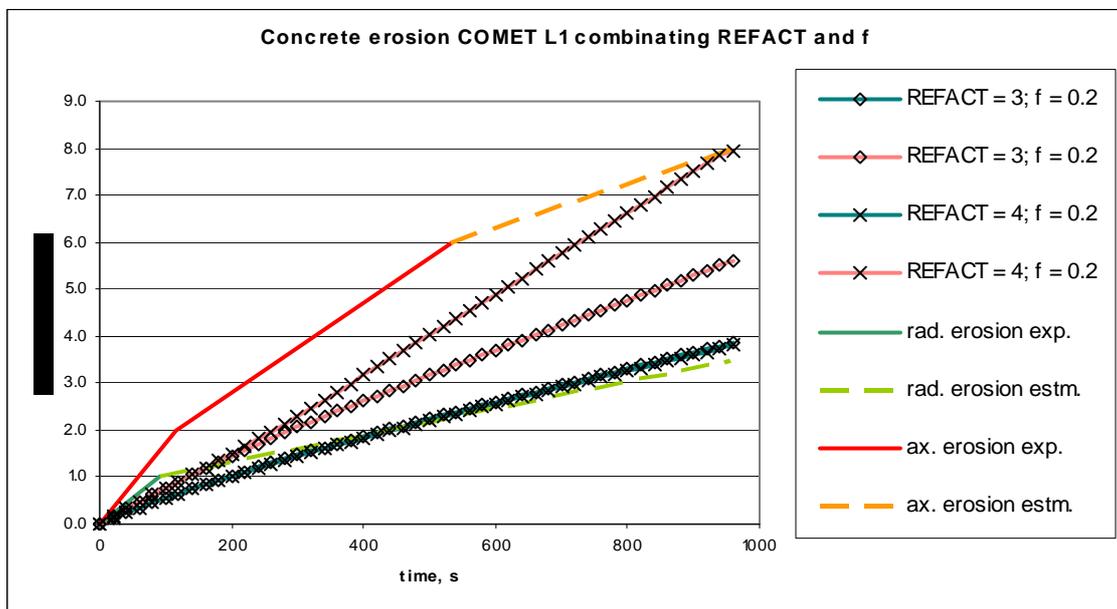
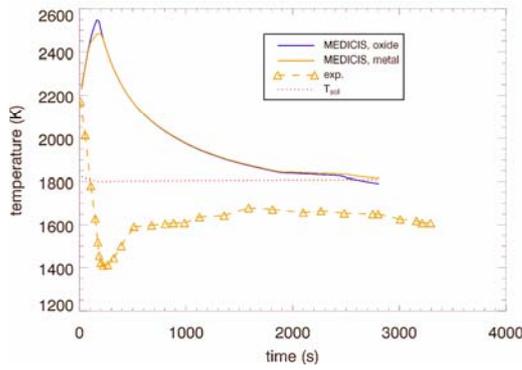


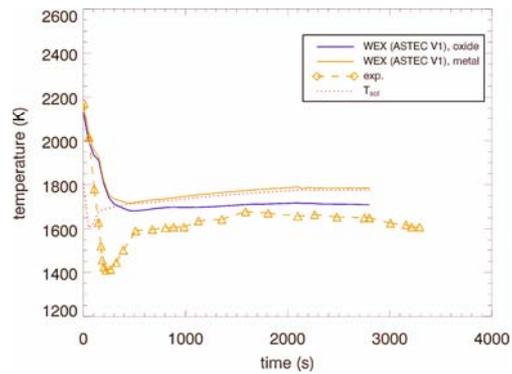
Abb. 4-65 Nachrechnung von COMET-L1 unter Modifikation der Parameter REFACT and f

Nachrechnungen von BETA V5.2

Die Versuche mit auf Aluminiumoxid basierenden Thermitmelzen (BETA, COMET) zeigen stets einen raschen Abfall der Schmelztemperatur. Dieses Verhalten wird von MEDICIS nicht realistisch simuliert. Stattdessen wird tendenziell die gemessene Pooltemperatur überschätzt (Abb. 4-66).

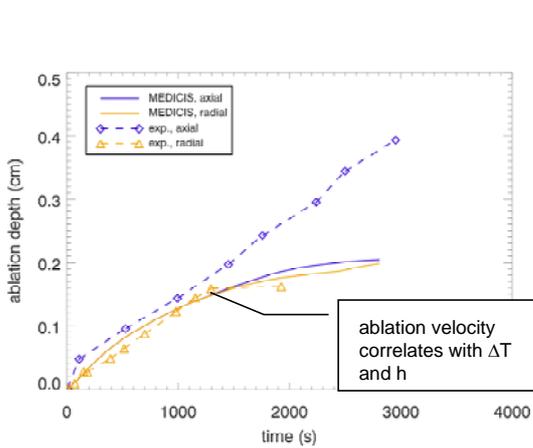


MEDICIS

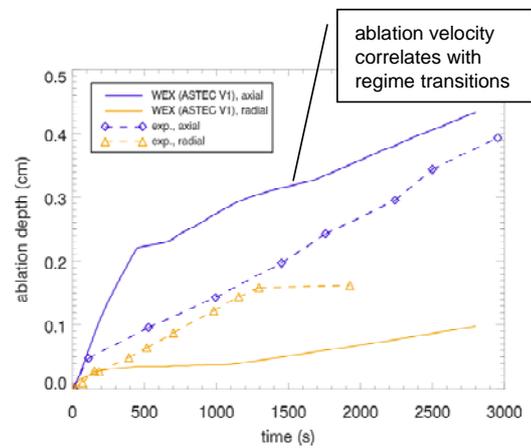


WEX

Abb. 4-66 Rechenergebnisse mit WEX und MEDICIS für die Pooltemperatur in BETA V5.2



MEDICIS



WEX

Abb. 4-67 Rechenergebnisse mit WEX und MEDICIS für die Erosionstiefe in BETA V5.2

Dieses Verhalten von MEDICIS ist vermutlich zum Teil auf die Überschätzung der Erstarrungstemperatur der Stahlschmelze in der Datenbasis von MEDICIS (MDB) zurückzuführen. Da mit isotrop verteiltem Standardwärmeübergangskoeffizienten für den "Slag Layer" ($1 \text{ kW}/(\text{m}^2\text{K})$) die anfängliche Erosion in BETA V5.2 von MEDICIS gut getroffen wird, sind die anfängliche Wärmestromaufteilung zwischen Strahlung und Erosion und die anfänglichen Wärmeströme $q = h \Delta T$ in guter Übereinstimmung mit der Erosionsgeschwindigkeit im Experiment. Da allerdings die anfängliche Temperaturdifferenz ΔT überschätzt wird, muss das vorstehend genannte Verhalten mit einer Unterschätzung des gesamten Wärmeübergangskoeffizienten h zwischen Schmelze und Beton einhergehen. Später wird mit abgesenkter Temperatur in der Rechnung und wei-

terhin unterschätztem Gesamtwärmeübergangskoeffizient h auch die axiale Erosionsgeschwindigkeit von MEDICIS unterschätzt. Im Gegensatz dazu weist die berechnete radiale Erosion eine gute Übereinstimmung zum Experiment auf (Abb. 4-67).

Eine anisotrope Erosion, wie im Experiment BETA V5.2 beobachtet, kann mit MEDICIS berechnet werden, sofern im Eingabedatensatz eine anisotrope Verteilung des "Slag Layer"-Wärmeübergangskoeffizienten vorgegeben wird (z. B. $3 \text{ kW}/(\text{m}^2\text{K})$ in axialer und $1 \text{ kW}/\text{m}^2\text{K}$ in radialer Richtung). Aber dann wird die axiale Erosion überschätzt (Abb. 4-68). Später, mit Einsetzen von Krustenbildung, werden die berechneten Wärmeströme und daher auch die Erosionsgeschwindigkeit reduziert, so dass am Ende des Experimentes die berechnete Tiefe im Einklang mit dem Experiment ist. Dieses Verhalten ist ähnlich wie bei WEX, das die anfängliche Erosionsgeschwindigkeit im Experiment überschätzt aber nach einem Regimewechsel beim Wärmeübergang zu dem so genannten Filmmodus als Folge der Krustenbildung im Metall am Ende eine ausgezeichnete Übereinstimmung zu der absolut erzielten Erosionstiefe erzielt (Abb. 4-67).

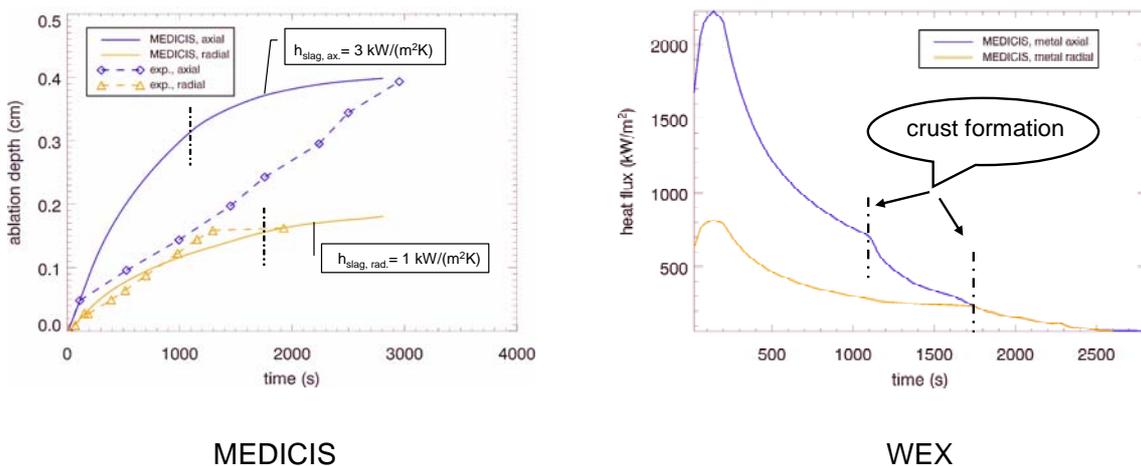


Abb. 4-68 Rechenergebnisse mit MEDICIS für Erosionstiefen und Wärmeströme als Funktion der Zeit für BETA V5.2 unter Vorgabe einer anisotropen Verteilung des "Slag Layer"-Wärmeübergangskoeffizienten in der Eingabe

MACE M3b

Von den bisher nachgerechneten Versuchen unterscheiden sich die MACE Experimente vor allem durch die früh einsetzende Flutung der Schmelze mit Wasser von oben (MACE M4: $t_{\text{Flutung}} = 23 \text{ min}$ bei insgesamt 3,5 h Versuchsdauer; MACE M3b: $t_{\text{Flutung}} = 52 \text{ min}$ bei insgesamt 7.5 h Versuchsdauer). In beiden Experimenten wurde kurz nach

dem Fluten eine starke Wechselwirkung zwischen Schmelze und Wasser mit einem ausgeprägten Peak in der Wärmeverlustleistung an der Schmelzepooloberfläche registriert.

Die Rechenergebnisse für die beiden MACE Versuche unter Zugrundelegung des vorhandenen Modells für den Wärmeübergang zwischen Schmelze und Wasser zeigen im Vergleich zu den experimentellen Messwerten eine viel zu kleine Wärmeverlustleistung an der Schmelzeoberseite sowie eine um ca. 200 K - 300 K überschätzte Schmelztemperatur und eine zu hohe Erosionsrate. Dies deutet darauf hin, dass die derzeitigen Modelle in WEX für eine realistische Anwendung auf MCCI-Situationen mit Flutung der Schmelze nicht ausreichen.

Alternativ zu dem in WEX implementierten Modell für den Wärmeübergang bei Abdeckung der Schmelze mit Wasser ist für die Nachrechnung die experimentell ermittelte Wärmeverlustleistung als Randbedingung an der Schnittstelle zwischen Schmelze (bzw. Schmelzekruste) und Wasser vorgegeben worden (Abb. 4-69).

Mit den experimentellen Vorgaben für den Wärmeverlust an der gefluteten Oberseite der Schmelze sind die Schmelztemperaturen und die Erosionsrate für MACE M3b wie in Abb. 4-70 und 4-71 gezeigt berechnet worden.

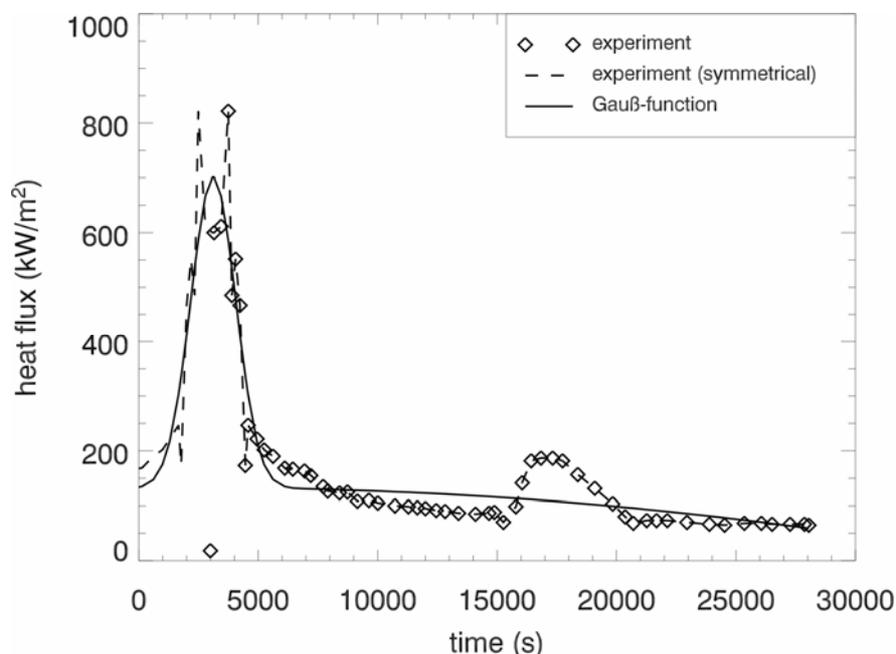


Abb. 4-69 Wärmeverlustleistung an der Pooloberfläche bei MACE-M3b und Approximation für die Nachrechnung mit WEX

Die Pooltemperatur wurde von WEX unterschätzt (Abb. 4-70). Eine mögliche Ursache besteht in dem aufgeprägten Wärmeverlustterm an der Pooloberfläche. Obwohl ein ähnliches Verfahren für MACE M4 zu guten Ergebnissen geführt hat, kann hier nicht ausgeschlossen werden, dass es noch Inkonsistenzen zwischen berechnetem und tatsächlichem Wärmestrom an der Pooloberfläche gibt.

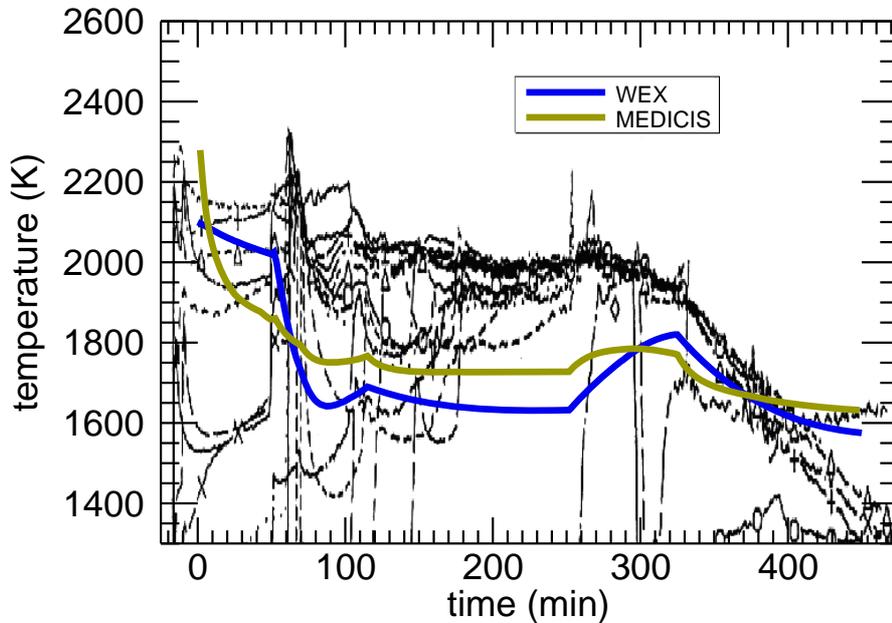


Abb. 4-70 Berechnete Pooltemperaturen mit WEX und MEDICIS für MACE M3b

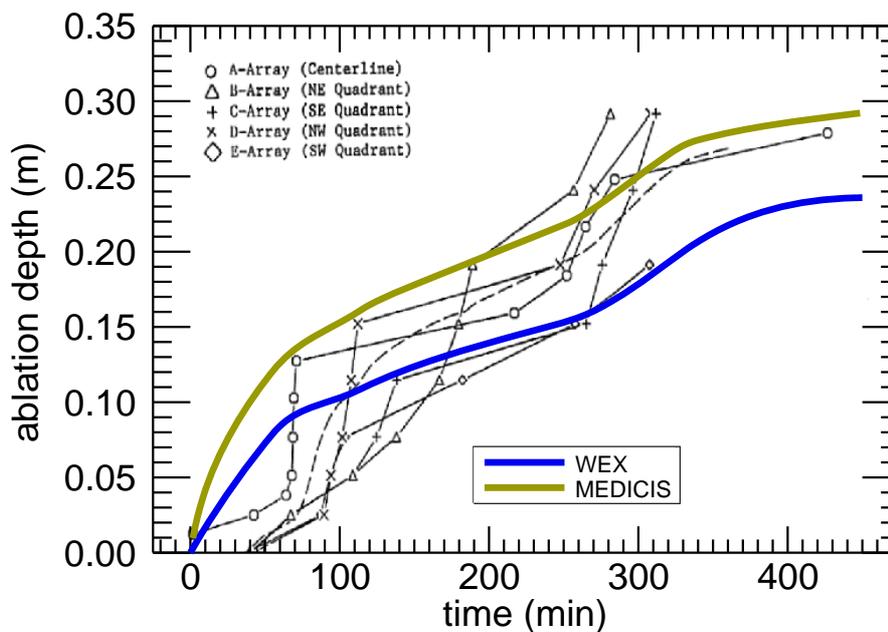


Abb. 4-71 Berechnete Erosionstiefen mit WEX und MEDICIS für MACE M3b

Im Falle von MEDICIS wird im Gegensatz zur Überschätzung der Schmelztemperatur für die Experimente mit Thermitschmelzen die Temperatur für die Versuche mit oxidischen Schmelzen (MACE M3b/CCI-2) (Abb. 4-70) langfristig unterschätzt, obwohl der berechnete Erosionsfortschritt in guter Übereinstimmung mit den Experimenten sind (Abb. 4-71). Wiederum wird hier die Aufteilung der Wärmeströme (Strahlung/Erosion) realistisch berechnet, aber die Temperaturdifferenz ΔT , die aus der quasi-stationären Wärmestrombilanz in MEDICIS resultiert, ist unter Verwendung der veranschlagten Daten für die Zerstörungstemperatur des Betons und für die Erstarrungstemperatur der Schmelze nicht konsistent mit den experimentellen Daten. Dies lässt Rückschlüsse darauf zu, dass der effektive Wärmeübergang zwischen Schmelze und Beton von MEDICIS nicht realistisch beschrieben wird. Für die Erstarrungstemperatur wurde hier bislang von der Solidustemperatur ausgegangen, wie bei den in der Metallurgie bekannten Modellen.

OECD CCI-2 und CCI-3

Mit den Codes WEX und MEDICIS wurde an einem internationalen Codevergleich im OECD-MCCI-Rahmen teilgenommen. Ein erster Schritt dieses Codevergleiches beinhaltete blinde Vorausrechnungen zum zweiten großmaßstäblichen MCCI-Experiment CCI-2, das mit prototypischer, oxidischer Coriumschmelze und LCS-Beton bei ANL in der zweiten Jahreshälfte durchgeführt werden soll. Die Ergebnisse dieses ersten Schrittes wurden im Rahmen eines speziellen Workshops anlässlich des 5. Projekt-Meetings, das in der Nähe von Cadarache, Frankreich, statt fand, diskutiert. An diesem Codevergleich haben neben WEX und MEDICIS auch die anderen internationalen Codes CORCON, COSACO, TOLBIAC und COCO teilgenommen.

Im Codevergleich stellte sich zunächst als ein Hauptproblem heraus, die in CCI-2 vorhandene Rechteckgeometrie äquivalent für diejenigen MCCI-Codes umzuformen, die eine axiale Symmetrie voraussetzen (z. B. WEX, CORCON). Die Streuung der mit den verschiedenen Codes erzielten Ergebnisse war jedoch trotz der vorhandenen Unterschiede relativ klein. Es wurde beschlossen, den Codevergleich mit einheitlicher, axial-symmetrischer Geometrie in der Nachrechnung zu CCI-2 mit den tatsächlichen Randbedingungen des Experimentes fortzuführen.

Bei der Überarbeitung der Randbedingungen wurde in Abstimmung zwischen CEA, GRS und JNES der Vorschlag von GRS (Anhang 9.3) für eine einheitliche Skalierung der Geometrie von CCI-2 auf axialsymmetrische Bedingungen aufgenommen, sodass

in diesem zweiten Benchmark-Schritt alle Codes mit einheitlicher, axialsymmetrischer Geometrie als Näherung für die bei ANL tatsächlich verwendete Rechteckgeometrie rechnen konnten und die Ergebnisse vergleichbar waren.

Die Ergebnisse dieses zweiten Schrittes wurden im Rahmen eines weiteren Workshops anlässlich des 6. Projekt-Meetings, das bei ANL, USA, statt fand, diskutiert.

Hinsichtlich der Rechenergebnisse gab es in diesem zweiten Benchmark-Schritt bei der Temperatur der Oxidschmelze sehr große Unterschiede in den Codes (~ 500 bis 600 K). Die besten Übereinstimmungen bei der Temperatur wurden mit den Codes CORCON, WEX und COSACO erzielt. Bei der Erosion variierten die von den Codes berechneten Endtiefen (axial und radial) zwischen 0.2 m und 0.4 m, hier ergaben sich i. A. akzeptable Übereinstimmungen mit dem Experiment, das eine maximale Erosion von ca. 25 bis 30 cm zeigte, wobei während der ersten von fünf Stunden Versuchsdauer allerdings aufgrund der speziellen Phänomenologie beim Start des Versuchs keine nennenswerte Erosion erfolgte. Die Rechencodes berücksichtigen diese eher kurzzeitigen Startphänomene nicht korrekt, eine Konsequenz für Langzeitanalysen ist bislang aber nicht angezeigt.

Auf der Basis der nunmehr vorliegenden Abschlussberichte (Entwurfsversionen) zu den im OECD-MCCI-Projekt durchgeführten CCI-Versuchen sind abschließende Nachrechnungen mit den gültigen Randbedingungen zu den Versuchen CCI-2 (mit LCS-Beton, Abb. 4-72) und CCI-3 (mit silikatischem Beton, Abb. 4-73) mit den Codes WEX und MEDICIS V1.2 (rev. 1) durchgeführt worden.

Die Änderungen für die abschließenden Nachrechnungen umfassen Vorgaben wie Masse und Zusammensetzung des Coriums, Zusammensetzung des Betons, Anfangstemperatur der Schmelze, seitliche Wärmeverluste, Gegentemperatur der Strukturen in Strahlungswechselwirkung mit dem Pool, Zerstörungstemperatur- und -enthalpie des Betons. Ein großer Einfluss im Vergleich zu den blinden Vorausrechnungen wurde in der in der Nachrechnung höheren Zerstörungstemperatur des Betons identifiziert. Für die Nachrechnung wurde hier auf experimentelle Werte von Peehs aus dem Jahre 1983 zurückgegangen, da die Belastbarkeit der im OECD-Benchmark angesetzten Betondaten nicht gegeben scheint. In beiden Nachrechnungen ergeben sich aufgrund der nun höheren Zerstörungstemperatur für karbonatischen Beton etwas höhere Pooltemperaturen der Schmelze als bei der Vorausrechnung. In MEDICIS kann eine gute Übereinstimmung des zeitlichen Verhaltens der Pooltemperatur (wie in WEX) nur - unter Umgehung der internen Berechnung - durch Vorgabe eines Wärmeübergangskoeffi-

zienten für Konvektion ($\sim 400 \text{ W/m}^2/\text{K}$) erzielt werden. Dieser ergibt mit zusätzlichen Wärmewiderständen von Kruste und Slag einen ungefähr konstanten Wert für den effektiven Wärmeübergang von $300 \text{ W/m}^2/\text{K}$ (Abb. 4-72 und Abb. 4-73, jeweils links unten). Für die GRS-seitige Spezifikation eines Wärmeübergangsmodells in MEDICIS zur Erzielung gleichwertiger Validierungsergebnisse mit MEDICIS und WEX müssen in diesem Punkt noch weitere Untersuchungen erfolgen.

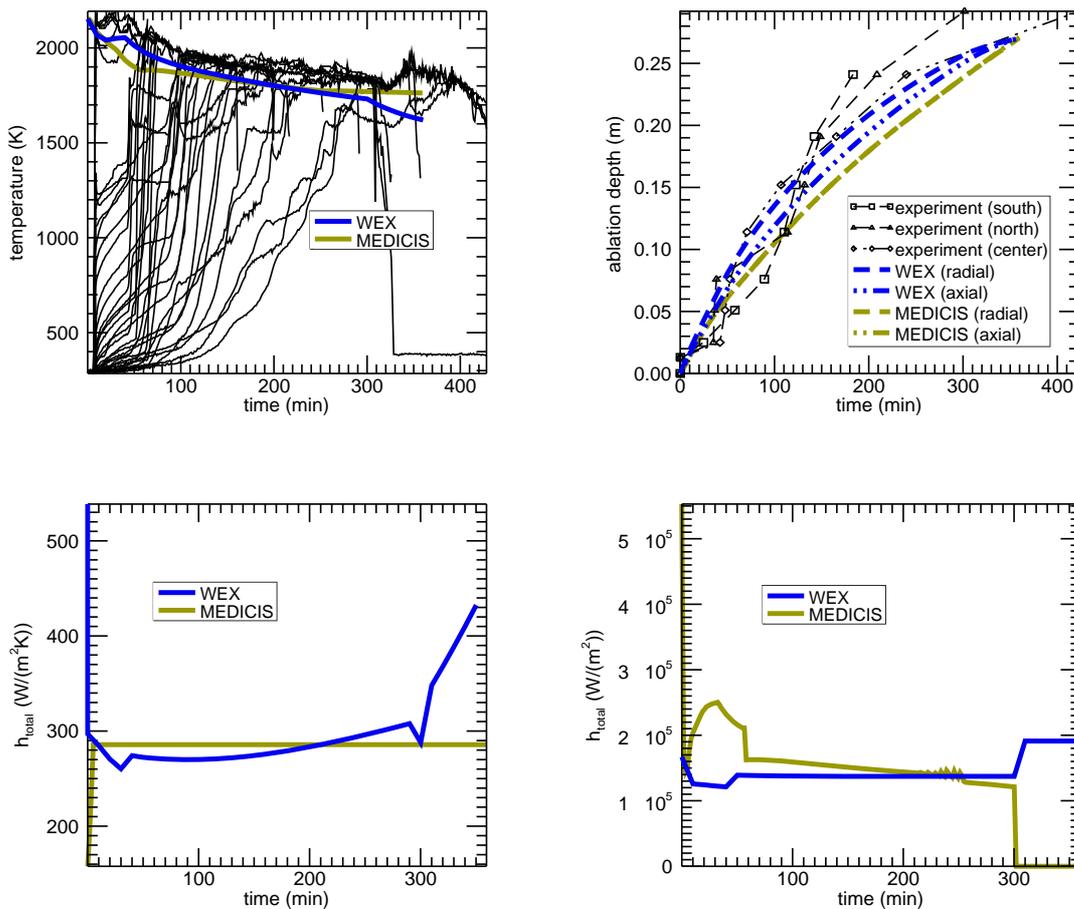


Abb. 4-72: Ergebnisse der Nachrechnungen mit WEX und MEDICIS für CCI-2 für Pooltemperatur (oben links), Erosionstiefe (oben rechts), effektiver Wärmeübergangskoeffizient zwischen Schmelze und Beton (unten links) und Abstrahlung an der Oberseite der Schmelze (unten rechts)

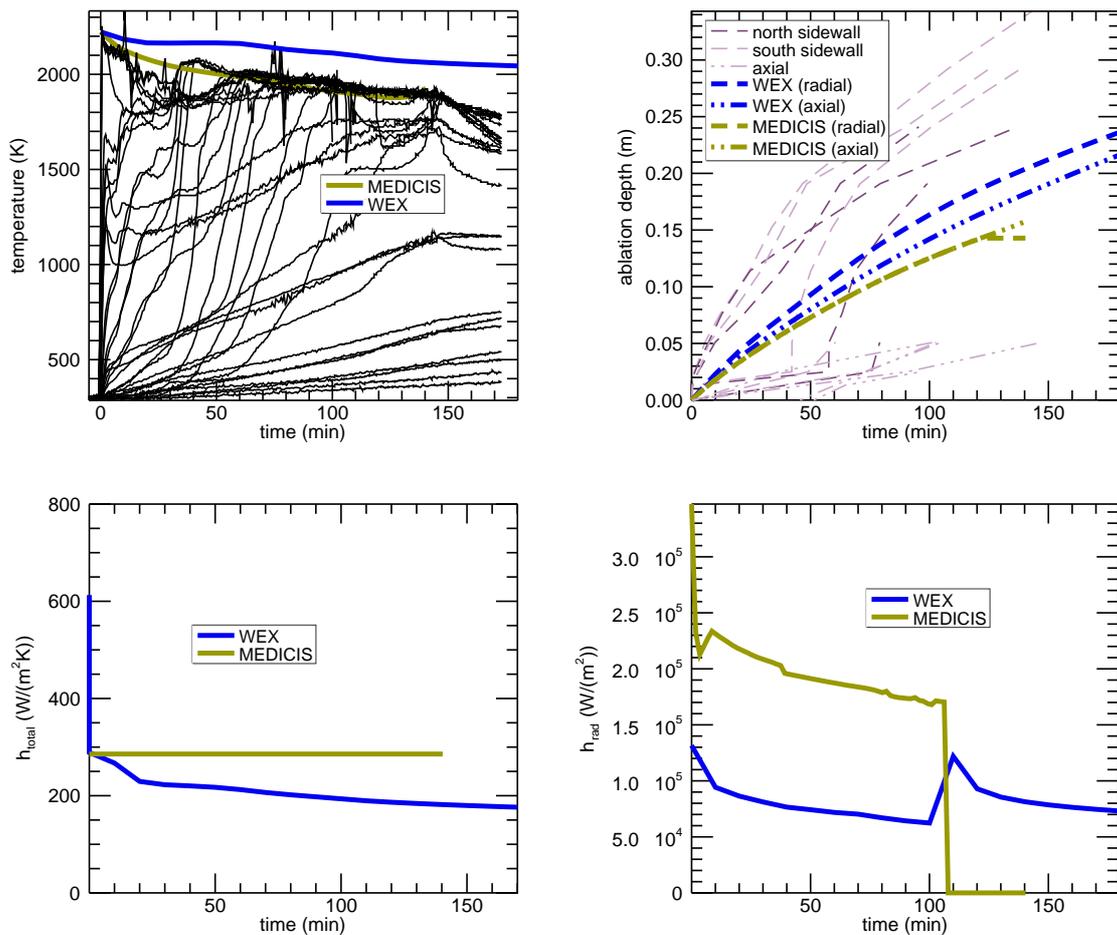


Abb. 4-73: Ergebnisse der Nachrechnungen mit WEX und MEDICIS für CCI-3 für Pooltemperatur (oben links), Erosionstiefe (oben rechts), effektiver Wärmeübergangskoeffizient zwischen Schmelze und Beton (unten links) und Abstrahlung an der Oberseite der Schmelze (unten rechts)

LACOMERA COMET L2

Die verfügbaren MCCI-Module in ASTEC sind ebenfalls in Nachrechnungen auf das beim Forschungszentrum Karlsruhe im EU-LACOMERA-Projekt durchgeführte MCCI-Experiment LACOMERA COMET-L2 angewandt worden. COMET L2 unterscheidet sich von L1 vor allem durch ein höheres Leistungsniveau und eine anfänglich rein metallische Schmelze. Die Schichtung ergibt sich hier erst infolge der Betonerosion.

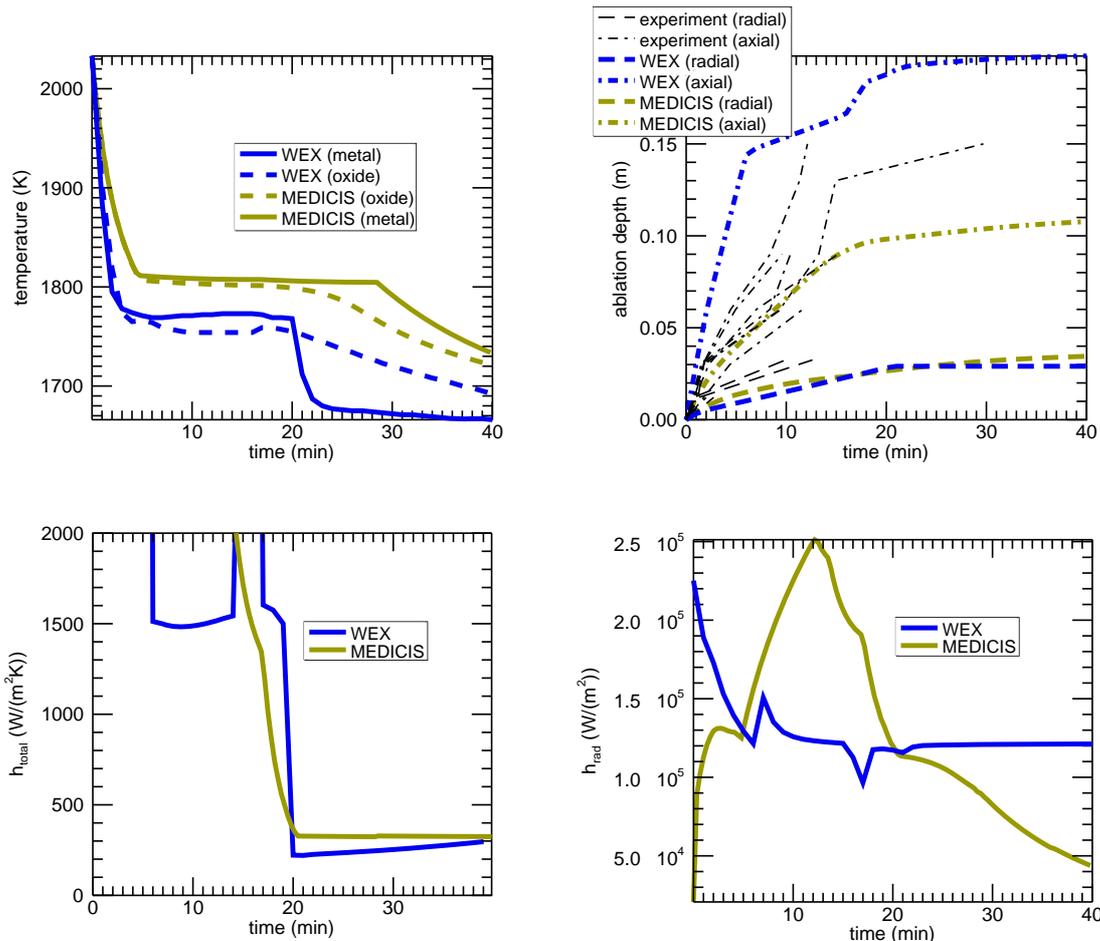


Abb. 4-74: Ergebnisse der Nachrechnungen mit WEX und MEDICIS für LACOMERA COMET L2 für Pooltemperatur (oben links), Erosionstiefe (oben rechts), effektiver Wärmeübergangskoeffizient zwischen Schmelze und Beton (unten links) und Abstrahlung an der Oberseite der Schmelze (unten rechts)

Da dieses Experiment noch zukünftig im Rahmen von SARNET in einem vertieften Benchmark behandelt wird, basierte die hier vorgestellten ersten Nachrechnungen mit WEX und MEDICIS ohne kritische Hinterfragung auf einem der GRS vom FZK zur Verfügung gestellten Datensatz für WECHSL. Die Nachrechnungen von LACOMERA COMET-L2 (Abb. 4-74) zeigen erneut die Schwächen der Modelle in der Anwendung auf die Karlsruher Experimente mit Thermit: In WEX gibt es eine starke Überschätzung der anfänglichen axialen Erosion, in MEDICIS dagegen eine isotrope Erosion, wohingegen das Experiment eine starke axiale Präferenz (aber nicht so stark wie in WEX berechnet) zeigt. Eine solche kann in MEDICIS nur durch winkelabhängige Vorgabe eines Kontaktwärmewiderstandes an der Schmelze/Beton-Schnittstelle, d. h. durch Benutzervorgabe, wie in der MEDICIS-Rechnung für die Abb. 4-74 erfolgt, simuliert wer-

den. Bei der Temperaturprognose zeigen alle Rechnungen nur geringe Abweichungen vom Experiment, wohl aufgrund der gut bekannten Erstarrungstemperatur für Eisen, die den Temperaturverlauf im Experiment dominiert.

Schlussfolgerungen

Die zum Teil in paralleler Anwendung von WEX und MEDICIS erhaltenen Validierungsergebnisse zeigen, dass es noch Unsicherheiten bei der Modellierung des makroskopischen Wärmetransportes gibt. Während für die oxidischen Versuche (ACE/MACE/OECD-MCCI) die Aufteilung zwischen Abstrahlung und Erosion nahezu übereinstimmend zwischen MEDICIS und WEX berechnet wird, und der resultierende Erosionswärmestrom gut mit den Experimenten übereinstimmt, gelingt die Prognose der Pooltemperatur nur unsicher. Entscheidend sind hier zwei unzureichend genau bekannte Parameter:

Der effektive (d. h. alle Phänomene beinhaltende) Wärmeübergangswiderstand zwischen Schmelze und Beton

Die Erstarrungstemperatur als Randbedingung zwischen dem flüssigen Inneren des Pools und der äußeren Kruste

Diese beiden Parameter beeinflussen die sich quasi-stationär ausbildende Pooltemperatur. Weil jedoch beide bislang nicht überprüfbar sind, kann mit verschiedener Hypothese zu Parameter 2. (z. B. Liquidus, oder Solidus, oder ein Wert dazwischen) und verschiedener Modellbildung zu 1 (wie in WEX und MEDICIS inhärent vorhanden) ein quantitativ gleiches Rechenergebnis erzielt werden.

Bei Experimenten mit geschichteten Schmelzen (BETA/COMET) zeigen sich zusätzliche Unsicherheiten bei der Berechnung der Aufteilung zwischen Abstrahlung und Erosion und damit desjenigen Anteils der Leistung, der in die Betonerosion umgesetzt wird. Hier kann als drittem unsicherem Parameter auch dem Wärmeübergang zwischen den Schichten eine bedeutende Rolle zukommen. Die in den Karlsruher Experimenten beobachteten Verhältnisse von axialer zu radialer Erosion können bislang nur dadurch nachgebildet werden, dass die anfängliche axiale Erosion überschätzt wird und dann ein Umschlag zu einer sehr schwachen Erosion erfolgt (bedingt durch Einsetzen von Krustenbildung), sodass am Ende des Experimentes die erzielte Erosionstiefe in guter Übereinstimmung getroffen wird. Dies ist allerdings ein Effekt des Anpassens von Parametern und Regimes. Das Zeitverhalten der Erosionsraten bei geschicht-

teten Schmelzen wird insgesamt nicht gut wiedergegeben, sodass die Prognosefähigkeit der Codes für längere Zeiten nicht gegeben scheint.

Für die Zukunft ist geplant, in MEDICIS eine alternative Methode zur Berechnung des Gesamt-Wärmewiderstandes zwischen Schmelze und Beton auszutesten, die auf einer integralen Auswertung der verfügbaren Experimente beruht. Hiermit sollen dann für alle Experimente sowohl Erosionsrate als auch Temperatur in ungefährender Übereinstimmung mit dem Experiment berechnet werden. Bewertet werden muss dieser neue Ansatz im Vergleich zu den vorhandenen speziell auch hinsichtlich des berechneten Zeitverhaltens der maßgeblichen Größen. Nur durch eine genauere Wiedergabe des Zeitverhaltens wird eine gewisse Prognosefähigkeit erreicht, die dann auch in blinden Vorausrechnungen zu kommenden Versuchen (Nachfolgevorhaben zu OECD-MCCI und blinde Rechnung zu LACOMERA COMET L3) überprüft werden muss.

4.3 Validierung des für ASTEC V1 modifizierten H₂-Verbrennungsmoduls

Nach dem Validierungsvergleich der Wasserstoffverbrennungsmodelle DECOR (GRS) und PROCO (IRSN) und der Feststellung, dass beide Modelle komplementär zueinander sind, wurde entschieden auch das französische PROCO Modell in ASTEC einzubauen. Die Implementierung erfolgte in 2 Stufen: zunächst als stand alone PROCO Version, die lediglich eine virtuelle Verbrennung des Wasserstoffs zu gegebenen Zeitpunkten simuliert; im weiteren dann die Kopplung mit der Thermohydraulikberechnung der Zonen in CPA und die Berücksichtigung des Energieeintrags und der Massenänderung durch die Verbrennung in den CPA Zonen.

Die Validierung des implementierten Modells erfolgte zunächst am Versuch Hx23 des Battelle Modellcontainments (BMC) und an den Versuchen HYCOM01 und 02 der RUT Versuchsanlage.

Der Versuch Hx23 war ein 4 Raumverbrennungsversuch (Abb. 4-75), bei dem in einer Vierraumkette des Modellcontainments Wasserstoffverbrennung ausgelöst wurde. Die Räume wurden über eine Öffnung zu dem Restvolumen druckentlastet. Die Anfangswasserstoffkonzentration lag bei ca. 9 Vol.-%. Diese Versuchsanordnung wurde mit der in Abb. 4-76 dargestellten Nodalisierung simuliert. Blau dargestellt sind die in CPA abgebildeten Thermohydraulikzonen, die in die rot umrandeten PROCO Zonen unterteilt sind.

Sechs-Zonen Modell für den Versuch Hx23

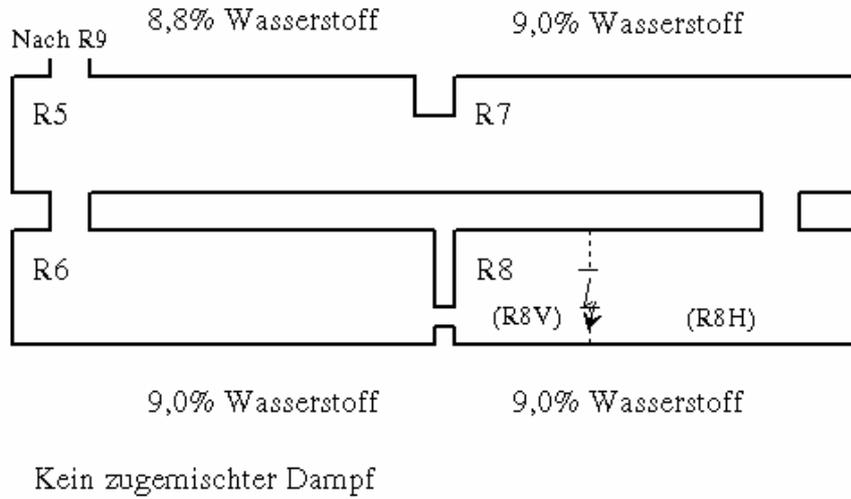


Abb. 4-75 Zonenschema und Randbedingungen für Versuch Hx23

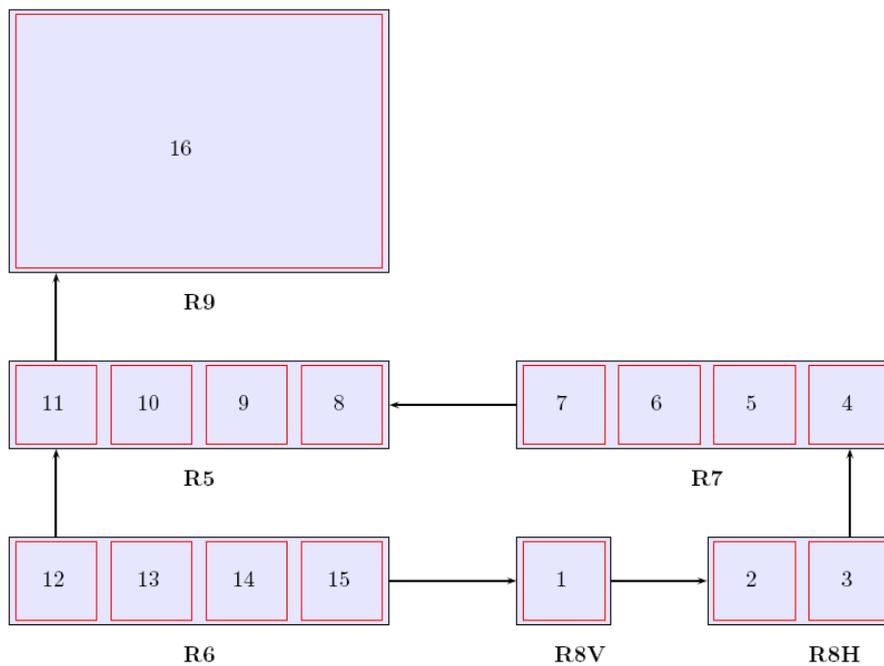


Abb. 4-76 Nodalisierungsschema für BMC Versuch Hx23; blau: CPA Zonen, rot-umrandet: PROCO Zonen

Der mit dem in ASTEC implementierten PROCO (ohne Rückkopplung zu CPA) berechnete Druckverlauf bei der Verbrennung ist in Abb. 4-77 dargestellt.

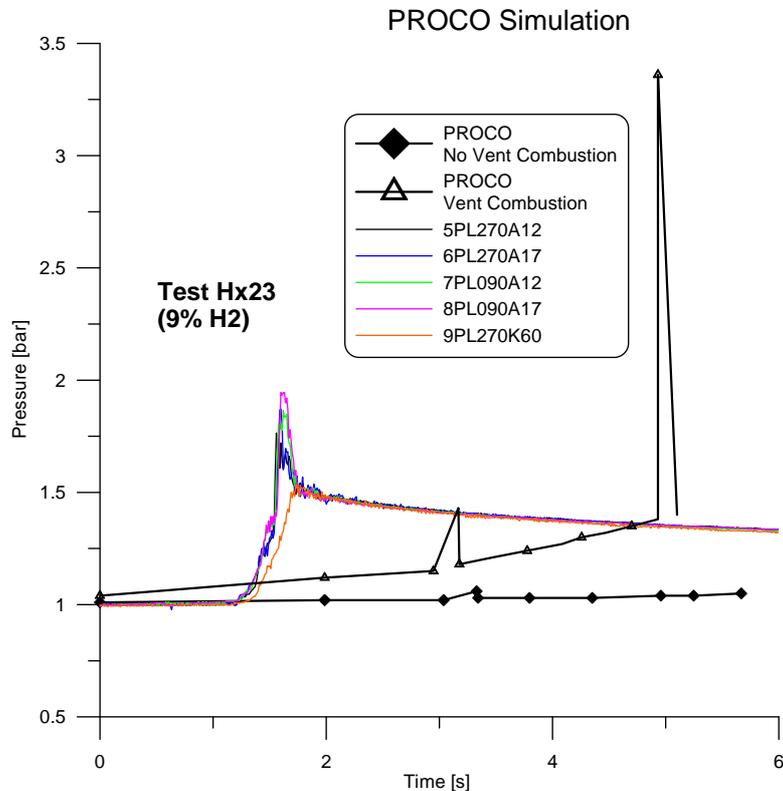


Abb. 4-77 Versuch Hx23 Gemessene Druckverläufe verglichen mit PROCO Rechnung

Stand alone- und implementierte PROCO-Version-Ergebnisse sind hinsichtlich des jeweils berechneten Druckverlaufs nahezu identisch, so dass man von einer korrekten Implementierung ausgehen kann. Die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messergebnissen ist aber mangelhaft. Dies ist auf die Modellierung in PROCO zurückzuführen, deren Verbesserung für diesen Anwendungsfall zunächst nicht Gegenstand der Arbeiten war. Weitere Verbesserungen an der Simulation dieses Versuches oder der Modellierung sind hier erforderlich.

Für eine weitere Validierung wurden die Versuche HYCOM01 und 02 aus dem EU-HYCOM Projekt herangezogen. Die Versuche wurden an der RUT Versuchsanlage des Kurchatov Instituts (Russland) durchgeführt. Ziel dieser Versuche war, die Flammenbeschleunigung in Gegenwart von Hindernissen, die optimal für eine Beschleunigung angeordnet waren, zu untersuchen. Für die Versuche wurde die in Abb. 4-78 ge-

zeigte Versuchs- und Hindernisanordnung gewählt und mit der in Abb. 4-79 dargestellten Nodalisierung abgebildet.

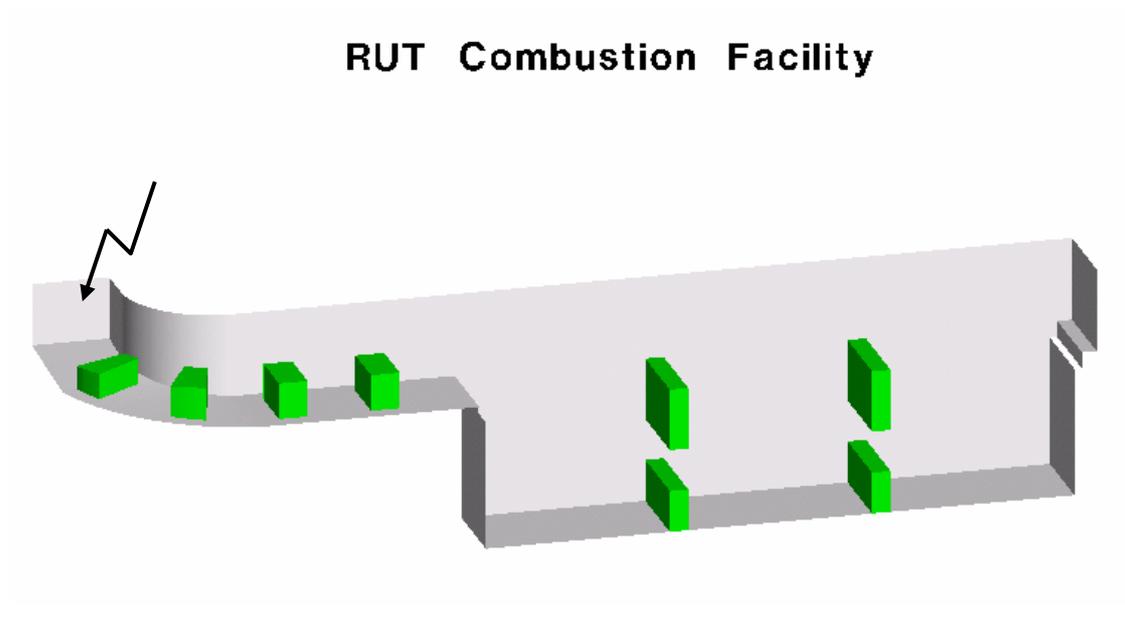


Abb. 4-78 Ansicht der RUT Versuchsanlage

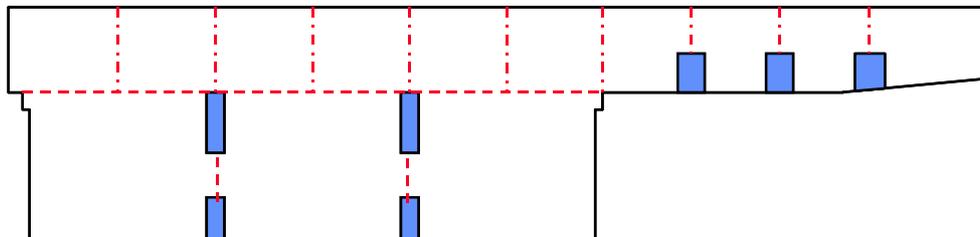


Abb. 4-79 PROCO Nodalisierung für HYCOM Versuche an der RUT Anlage

Die Versuchsanordnung hatte ein freies Gesamtvolumen von ca. 315 m³, das im Versuch HYCOM01 mit 10 Vol.-% Wasserstoff und im Versuch HYCOM02 mit 11.5 Vol.-% gefüllt wurde. Gezündet wurde das Gemisch am Ende des gekrümmten schmalen Kanals, sodass die Flamme in den Canyon Bereich wanderte.

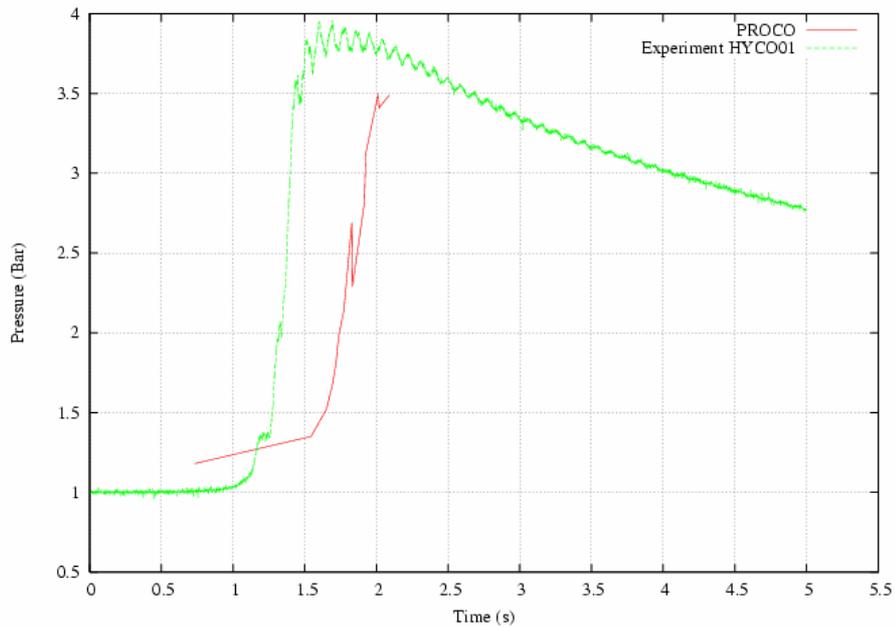


Abb. 4-80 PROCO Druckverlauf für die RUT Versuchsanlage bei Versuch HYC001

Für diesen Versuch stimmen berechneter und gemessener Druckverlauf (Abb. 4-80) deutlich besser überein als für Hx23, wenn auch der Spitzendruck von PROCO noch nicht getroffen wird. Die gemessenen und berechneten Gradienten des Druckanstiegs sind sehr ähnlich.

Für den Versuch HYCOM02 mit 11.5 Vol.-% H₂ zeigt sich eine vergleichbare Übereinstimmung (Abb. 4-81). Diesmal ist die Abweichung zum Spitzendruck größer, der Druckgradient steiler, was von der Rechnung wiedergegeben wird. Aufgrund der höheren Wasserstoffkonzentration erfolgte eine schnellere Verbrennung mit einem steileren Druckanstieg.

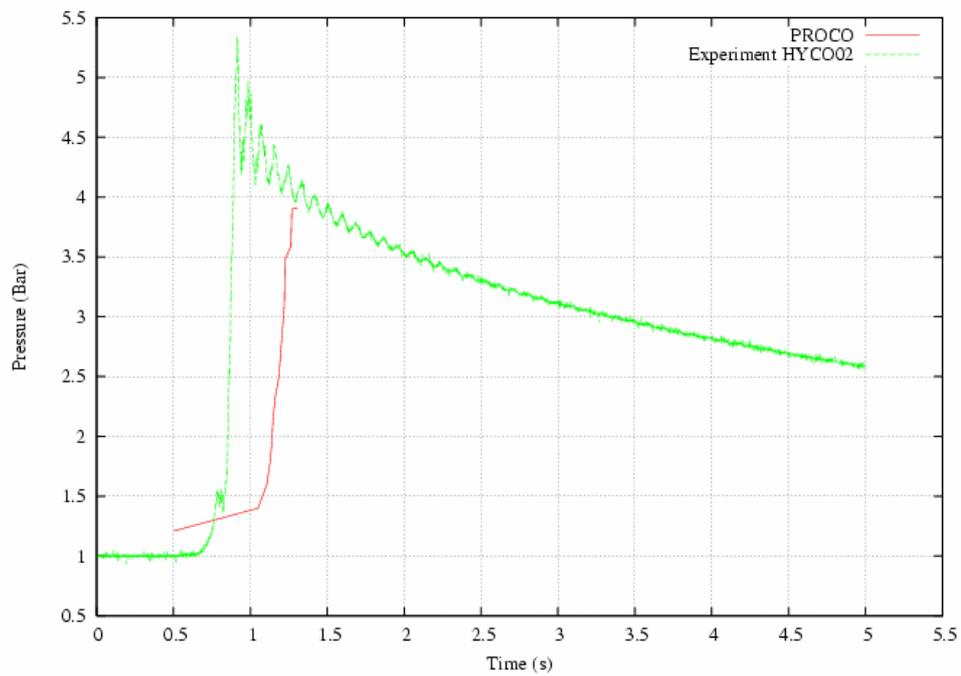


Abb. 4-81 PROC0 Druckverlauf im Vergleich zum Messergebnis HYCOM02

Das PROC0 Modell muss - insbesondere in der gekoppelten Version - weiter an anderen Versuchen validiert und die Validierungsergebnisse verbessert werden.

5 Generische ASTEC-Anwendungsrechnungen

Da diese Rechnungen von erheblichem gemeinsamen Interesse von GRS und IRSN sind, sind die Ergebnisse für die meisten Fälle in Englisch dargestellt (siehe Anhänge 9.5 - 9.8).

5.1 Vergleichsrechnungen zur Primärkreisthermo hydraulik in CESAR und ATHLET

5.1.1 Analyse eines Station Blackout (Notstromfall mit Ausfall aller Notstromdiesel) mit ASTEC V1 (CESAR) für einen WWER-440/213 und Vergleich mit ATHLET

- Einleitung

Im Zuge der ASTEC V1 Code Verifikation wurde eine Rechnung mit dem ASTEC Modul CESAR durchgeführt und mit ATHLET Ergebnissen verglichen. Untersuchter Störfall war ein Station Blackout (Notstromfall mit Ausfall aller Notstromdiesel). Die Anlage war ein WWER 440/213. In der ATHLET-Rechnung wurde die Nodalisation der Dampferzeuger-Rohrbündel variiert, und eine Rechnung mit einem 1 Layer Bündelbereich und eine mit einem 4 Layer Bündelbereich durchgeführt. Die Arbeiten sind im Detail im Anhang 9.5 beschrieben.

- Ereignisablauf

Ein Station Blackout mit totalem Ausfall der Stromversorgung wird zugrunde gelegt. Darunter versteht man, dass jede externe und interne Energiezufuhr und die Notstromdiesel nicht verfügbar sind.

Reaktorschnellabschaltung RESA erfolgt sofort zu Beginn des Störfalls, anschließend folgt:

- Auslaufen der HKP
- Speisewasserausfall
- TUSA

Druckentlastung erfolgt nur durch mechanisch arbeitende Sicherheitsventile, elektrisch gesteuerte Ventile werden als ausgefallen unterstellt.

- Anfangs- und Randbedingungen

Nominale thermische Leistung des WWER 440 ist 1375 MWt, als Nachzerfallsleistungskurve wurde die ANS-79+10 %-Kurve zugrunde gelegt. Weitere Anfangs- und Randbedingungen vor dem Einleiten des Station Blackout sind in Tab. 5-1 Tabelle 1 gezeigt:

Tab. 5-1 Anfangs- und Randbedingungen zu Beginn des Störfalls

	CESAR	ATHLET
Druck im Druckhalter	122.5 bar	124.5 bar
Gesamte Kühlmittelumwälzmenge im Primärkreis	1458 kg/s	1423 kg/s
Druck in der FD-Leitung	46.1 bar	46.2 bar
Anfangswassermasse in den Dampferzeuger	~29,5 t	1 Layer: 25.4 t 4 Layers: 31.1 t
Ansprechdruck des DH-Sicherheitsventils	140 bar	140 bar
Ansprechdruck des DE-Sicherheitsventils	55 bar	55 bar

Im Verlauf der Analyse wurden einige Randbedingungen variiert mit dem Ziel, eine Übereinstimmung von Anfangs- und Randbedingungen in der ATHLET- und ASTEC-Simulation zu erreichen. Insbesondere Wärmeverluste von der Primärseite und der Sekundärseite zum Sicherheitsbehälter, sowie Temperaturänderungen im Sicherheitsbehälter als Randbedingung für die Wärmeverluste wurden angepasst.

- Ergebnisse

Es wurden zwei Serien von Rechnungen durchgeführt, wobei in der zweiten Serie durch Korrekturen in der Länge und in der Führung der Frischdampfleitung in ATHLET eine bessere Anpassung an die ASTEC-Eingabe erreicht wurde. Nach den Korrekturen in ATHLET wiesen die Ergebnisse eine wesentlich bessere Übereinstimmung auf. In Tab. 5-2 ist der Vergleich für charakteristische Zeitpunkte der verschiedenen Analysen gezeigt.

Tab. 5-2 Ergebnisse der zweiten Serie der Analysen

	ASTEC/CESAR	ATHLET	
		1 Layer	4 Layers
Min. Druck im Druckhalter	92 bar	115 bar	114 bar
Zugehörige Zeit	21500 s	~500 s	~26000 s
Erstes Öffnen des Druckhalter-sicherheitsventils	21500 s	14500 s	12200 s
Totales Freilegen der DE-Rohre	~31500 s	15000 s	30000 s
Beginn der Kernaufheizung	28000 s	24000 s	32500 s
Beginn der Aufheizung der Unterkante Kern	36000 s	26000 s	34000 s

In Abb. 5-1 ist der Druck im Druckhalter gezeigt. Es fällt auf, dass der Druck in der ASTEC-Rechnung bis 20000 s stetig fällt. Grund hierfür könnten größere Wärmeverluste im Primärkreis in ASTEC gegenüber den ATHLET-Rechnungen sein.

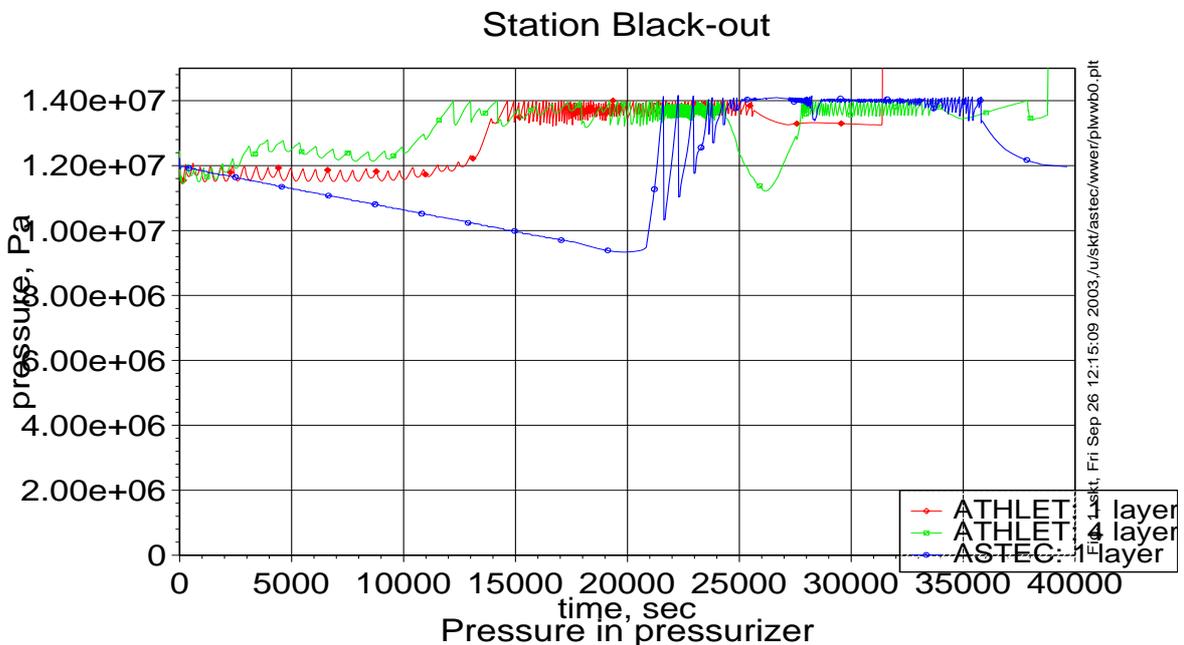


Abb. 5-1 Druck im Druckhalter

Der Wärmetransport in den Dampferzeugern von der Primärseite zur Sekundärseite in ASTEC und ATHLET ist im Falle der Rechnung mit 1 Layer in guter Übereinstimmung (siehe Abb. 5-2).

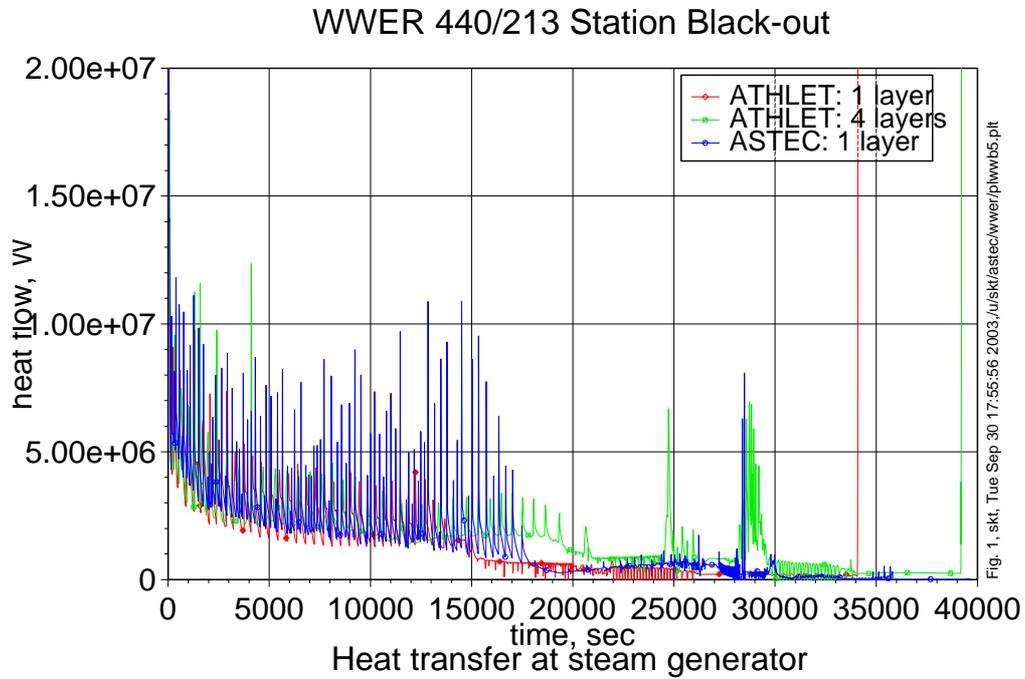


Fig. 1, skt, Tue Sep 30 17:55:56 2003, /u/skt/astec/wwer/plwwb5.plt

Abb. 5-2 Wärmetransport im Dampferzeuger

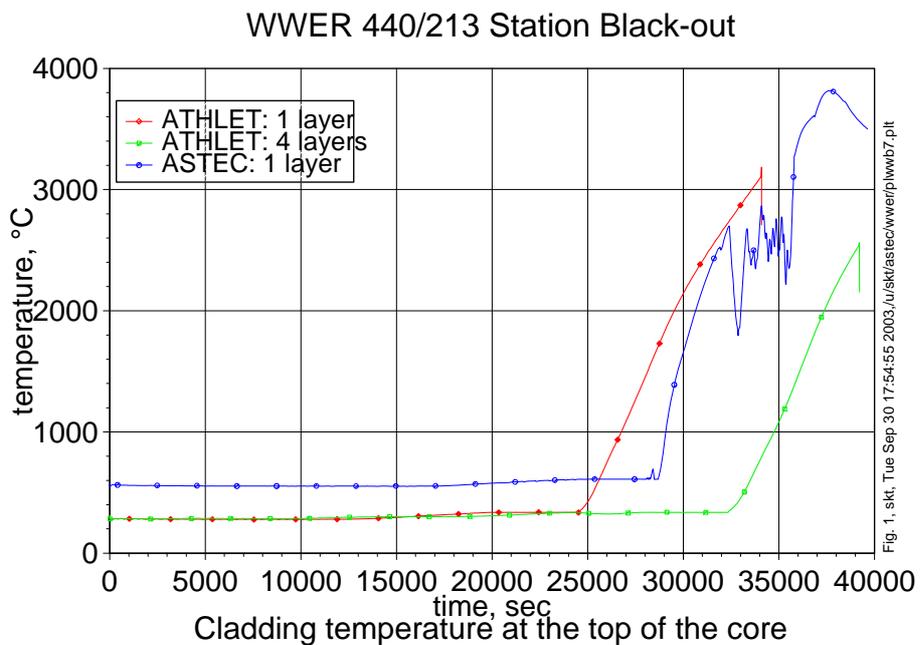


Fig. 1, skt, Tue Sep 30 17:54:55 2003, /u/skt/astec/wwer/plwwb7.plt

Abb. 5-3 Hüllrohrtemperaturen an der Kernoberkante

Die Hüllrohrtemperaturen an der Kernoberkante (siehe Abb. 5-3) steigen mit Trockenlegung des Kerns an. Die Übereinstimmung mit der ATHLET 1 Layer-Rechnung ist gut. Der Anstieg in der ATHLET-Rechnung mit einem Layer erfolgt früher, da hier Filmsieden auftritt.

- Zusammenfassung

Nach der Geometrieänderung der Frischdampfleitung in ATHLET und dem Angleichen der Anfangs- und Randbedingungen zwischen ATHLET und ASTEC konnte eine zufrieden stellende Übereinstimmung der Ergebnisse erzielt werden. Der Primärkreisdruckverlauf zeigt einen Druckabfall, der auf größere Wärmeverluste im Primärkreis in ASTEC gegenüber der ATHLET-Rechnung zurückzuführen ist. Weitere Analysen sind notwendig, um dieses Problem zu klären.

5.1.2 Vergleichsrechnung mit ASTEC V1 zur Thermohydraulik in CESAR und ATHLET eines 5 %-SB LOCA in einem KONVOI Reaktor

- Einleitung

Für einen deutschen Reaktor vom Typ KONVOI wurde ein Eingabedatensatz für das ASTEC-Modul CESAR entwickelt. Mit diesem Datensatz wurde eine Vergleichsrechnung zu ATHLET durchgeführt für einen SBLOCA (5 % Leck im Primärkreis).

Das Modul CESAR in ASTEC und der Code ATHLET sind beide eindimensionale Zwei-Phasen-Strömungscodes.

Der untersuchte KONVOI-Reaktor ist ein DWR mit 1300 MW elektrischer Leistung mit vier Kreisläufen und U-Rohr-Dampferzeugern.

Die Arbeiten sind im Anhang 9.6 ausführlich beschrieben.

- Störfallablauf

Der Störfallablauf der untersuchten Sequenz ist in Tab. 5-3 angegeben.

Tab. 5-3 Ereignisablauf:

Zeit/Druck	Ereignis
0.0 s	Öffnen des Lecks
Druck < 14.5 MPa	Abfahren der Dampferzeuger: 100K/h & Δp (Sicherheitsbehälter-Umgebung) > 3 kPa
Druck < 13.2 MPa	SCRAM (t_{SCRAM})
$t_{SCRAM} + 0.5$ s	Auslaufen der Hauptkühlmittelpumpen Speisewasserpumpen aus Turbinenventile geschlossen
Druck < 11.0 MPa	Notkühlung (t_{ECC}) Hochdrucksicherheitspumpen nicht verfügbar
Druck < 2.6 MPa	Druckspeichereinspeisung
Druck < 1.06 MPa	Aktivieren der Niederdruckeinspeisepumpen

- Datensatzerstellung

Es wurde versucht einen Datensatz mit optimaler Nodalisation zu erstellen, so einfach wie möglich aber detailliert genug, um eine möglichst genaue Simulation von allen wichtigen Phänomenen, die während des untersuchten Störfallverlaufs auftreten können, zu ermöglichen, und die auch mit der Referenz-Standard-Nodalisation von ATHLET erfasst werden können. Zusätzlich zu dieser Nodalisation wurde für ATHLET eine weitere, aber vereinfachte Nodalisation erstellt entsprechend der CESAR nodalisation.

Die Rechnungen wurden auf einer DEC-Workstation mit dem Betriebssystem Unix durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass die CESAR-Rechnung bedeutend weniger CPU-Zeit benötigt als die Rechnung mit der Referenz-Standard-Nodalisation von ATHLET.

- Ergebnisse

Ein Vergleich der Rechenergebnisse zeigt, dass die beiden ATHLET-Rechnungen einmal mit der Standard Nodalisation und zum anderen mit der vereinfachten Nodalisation sehr ähnliche Ergebnisse liefern. Das bedeutet, im verglichenen Störfall gibt es keinen größeren Nodalisationseffekt. D. h. Unterschiede zwischen den ASTEC- und

ATHLET-Ergebnissen werden entweder durch nicht ganz identische Anfangs- und Randbedingungen und/oder durch unterschiedliche physikalische Modelle verursacht. Der Druck im Primärkreis (siehe Abb. 5-4) stimmt ziemlich gut mit den ATHLET Ergebnissen überein. Aber viele andere Parameter sind stark unterschiedlich, die Hüllrohrtemperaturen z. B., die von ASTEC berechnet werden, sind wesentlich höher, als die aus ATHLET stammenden (siehe Abb. 5-5)

Es gibt mehrere Gründe für die beobachteten Unterschiede:

- Ein größerer Massenverlust während der Druckentlastungsphase durch das kritische Austrittsströmungsmodell von ASTEC.
- Unterschiede in der Wasserverteilung im Primärkreis von ASTEC: das Wasser ist konzentriert im unteren und oberen Teil des RDB, während der Bereich des Kerns austrocknet.
- Obwohl die Druckspeichereinspeisung in beiden Rechnungen zur gleichen Zeit beginnt, bleibt in der ASTEC Rechnung fast das ganze Wasser oberhalb der oberen Kernplatte, das Wasser tritt nicht in den Kern ein.
- Ein anderer Grund für das sehr langsame und nur partielle Wiederauffüllen des Kerns in der ASTEC-Analyse ist die wesentlich niedrigere Einspeiserate des Notkühlsystems. Grund hierfür ist der langsamere Druckabfall.

Allgemein kann man sagen, dass in der ASTEC-Rechnung der ganze Primärkreis austrocknet. Z. B. wird der Pumpenbogen bei ASTEC schon nach ungefähr 300 s freigelegt. In ATHLET tritt ein Freilegen des Pumpenbogens nicht auf. Nach dem Start der Notkühleinspeisung in ATHLET, füllt sich der Pumpenbogen völlig mit Wasser, während in ASTEC kein Auffüllen mit Wasser beobachtet wird.

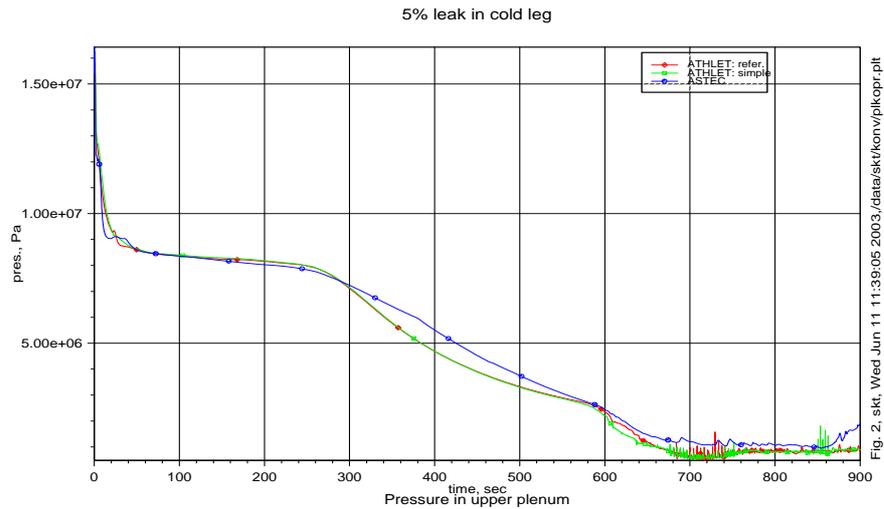


Abb. 5-4 Druck im oberen Plenum

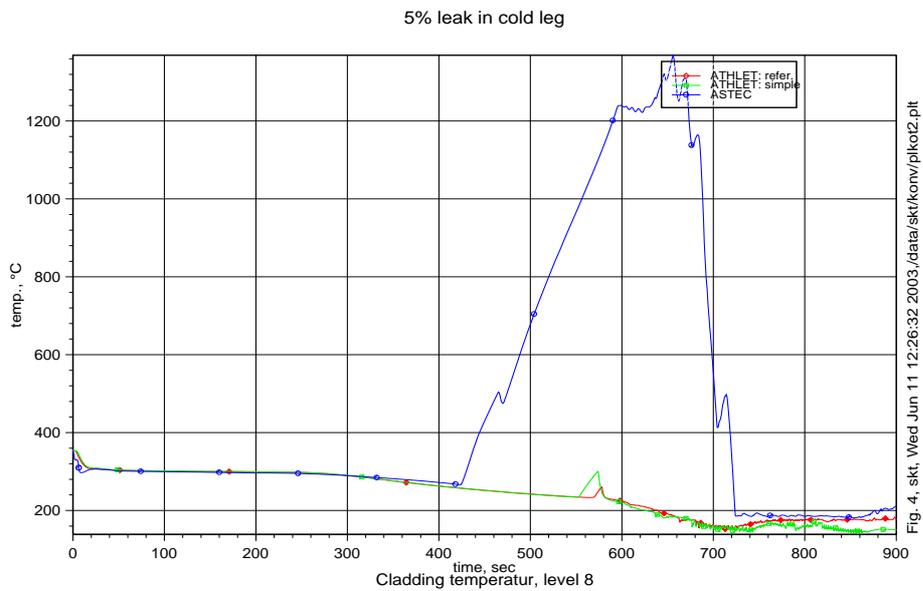


Abb. 5-5 Hüllrohrtemperaturen, Level 8 (Oberkante Kern)

- Zusammenfassung

Die berechneten Drücke zeigen eine relativ gute Übereinstimmung. Die Berechnung des Wasserinventars des Primärkreislaufs weicht in ASTEC jedoch deutlich von ATHLET ab. Der Wasserverlust ist um ca. 20 % größer als in den ATHLET-Rechnungen. Daraus resultieren dann die nahezu reine Dampfatmosfera im Kern und damit

der Anstieg der Kernaufheizung auf Temperaturen von 1700 °C. Die Ursache für diesen überhöhten Massenverlust muss noch geklärt werden. Hinsichtlich der Rechenzeit ist ASTEC bei vergleichbarer Nodalisation doppelt so schnell wie ATHLET.

5.2 Vergleich ASTEC/MELCOR am Beispiel eines 200 cm² Lecks im heißen Strang einer KONVOI-Anlage

- Einleitung

Die Rechnung wurde mit der Version ASTEC V1.2 rev0 durchgeführt. Aktivierte Module waren CESAR und DIVA zusammen mit CPA für den Sicherheitsbehälter. Die Ergebnisse der Analyse wurden verglichen mit einer MELCOR 1.8.4 Rechnung, die in der GRS durchgeführt worden war. Die Ergebnisse wurden auf einer LINUX Plattform erzielt. Die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse sind im Anhang 9.7 ausführlich beschrieben.

- Annahmen

Folgende Annahmen wurden getroffen:

- Verfügbarkeit des Notkühlsystems bis zur Umschaltung auf den Sumpfbetrieb,
- Verfügbarkeit der Druckspeicher,
- Versagen der sekundärseitigen Wärmesenke,
- Keine Bespeisung mit dem Zusatzboriersystem,
- Wasserstoffrekombination im Sicherheitsbehälter,
- Keine Spaltprodukt/Aerosol-Rechnung.

Der Anfangszustand der Anlage vor Beginn des betrachteten Störfalls ist ein 100 % Leistungsbetrieb mit 3765 MW und Normalbetrieb aller relevanten Systeme.

- Vergleich charakteristischer Zeitpunkte

Die Übereinstimmung der Zeiten für Behälterversagen (ASTEC V1.2 12325 s, MELCOR 12420 s) ist sehr gut. Die anderen Ereignispunkte der Kernzerstörung wie

Beginn der Hüllrohroxidation, Verlust der Integrität der Hüllrohre und Beginn des Schmelzeabflusses ins untere Plenum finden 400 s - 1000 s eher statt in ASTEC als in MELCOR. In ASTEC fließt die Schmelze kontinuierlich in das untere Plenum, während sich in MELCOR ein Teil der Schmelze auf der Kerntrageplatte sammelt und erst nach dem Versagen dieser Struktur in das untere Plenum abstürzt. Als Konsequenz kann bei MELCOR ein großer Absturz beobachtet werden bei 9800s, der sich im fig. 1 als hohe Druckspitze zeigt. In ASTEC ist die Kerntragestruktur nicht modelliert, folglich tritt ein kontinuierliches Abfließen der Schmelze ohne größerer Peaks ins untere Plenum auf.

- Primärkreisdruckverlauf

Das Absinken der Drucks zu Anfang des Primärkreisdruckverlaufs von ASTEC ist geringer als bei MELCOR (siehe Abb. 5-6). Der Druckabfall zum Ende der Bespeisung tritt in beiden Codes fast zeitgleich auf. ASTEC V1.2 zeigt jedoch beim nachfolgenden Anstieg eine stärkere Aufheizung des Kerns bis zum Start von DIVA. Die folgende Wasserstofffreisetzung tritt früher auf als bei MELCOR (siehe Abb. 5-8). Das Druckniveau das in der Rechnung mit ASTEC erreicht wird ist mit 9.5 bar 3 bar höher als bei MELCOR. Nach dem Start von DIVA fällt der Primärkreisdruck im weiteren Verlauf auf das MELCOR Niveau. In der Spätphase stimmen beide Drucke gut überein.

- Druck im Sicherheitsbehälter

Die Übereinstimmung der Spitzenwerte des Drucks im Sicherheitsbehälter (siehe Abb. 5-7) ist ausgezeichnet. Im weiteren Verlauf wird der Sicherheitsbehälterdruck von ASTEC V1.2 überschätzt solange bis der Druckanstieg infolge des Energietransports bei der Spaltproduktfreisetzung in der MELCOR-Kurve sichtbar wird. Von da an ist der Druck in ASTEC V1.2 niedriger als bei MELCOR. Grund: in ASTEC wurde keine Spaltproduktrechnung durchgeführt.

PWR1300 ASTEC V1.2 compared with MELCOR 1.8.4 results

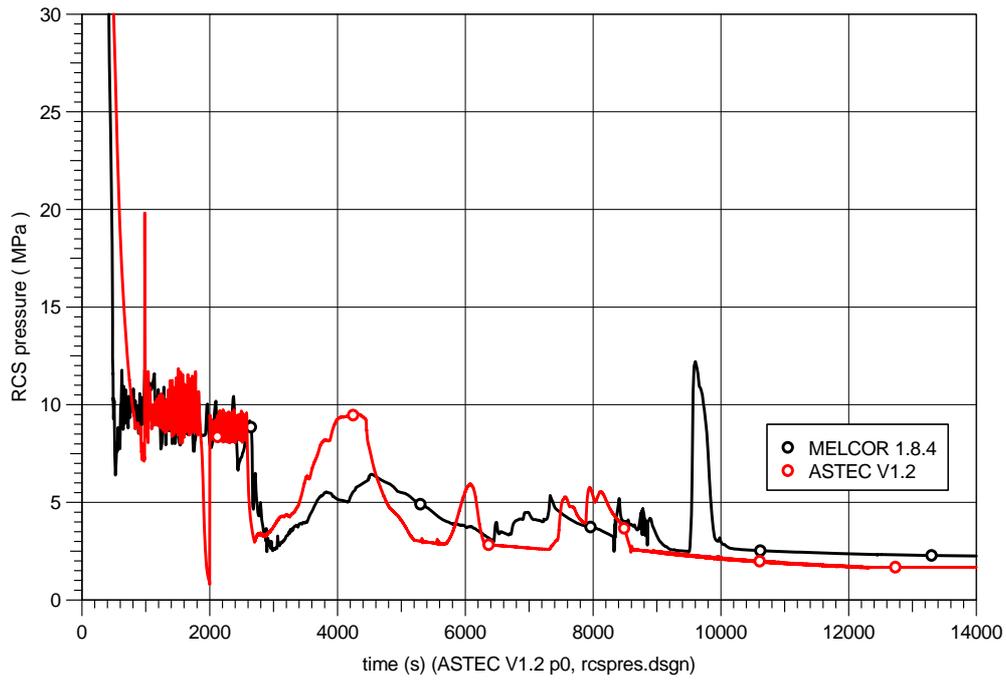


Abb. 5-6 Primärkreisdruckverlauf

PWR1300 ASTEC V1.2 compared with MELCOR 1.8.4

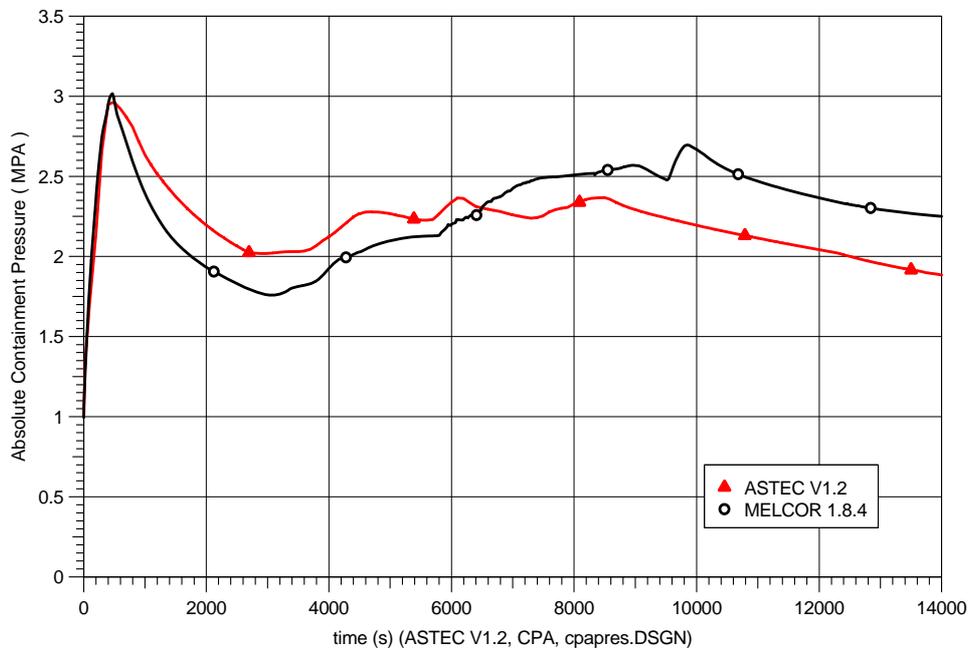


Abb. 5-7 Druckverlauf im Sicherheitsbehälter

PWR1300 ASTEC V1.2 compared with MELCOR 1.8.4 results

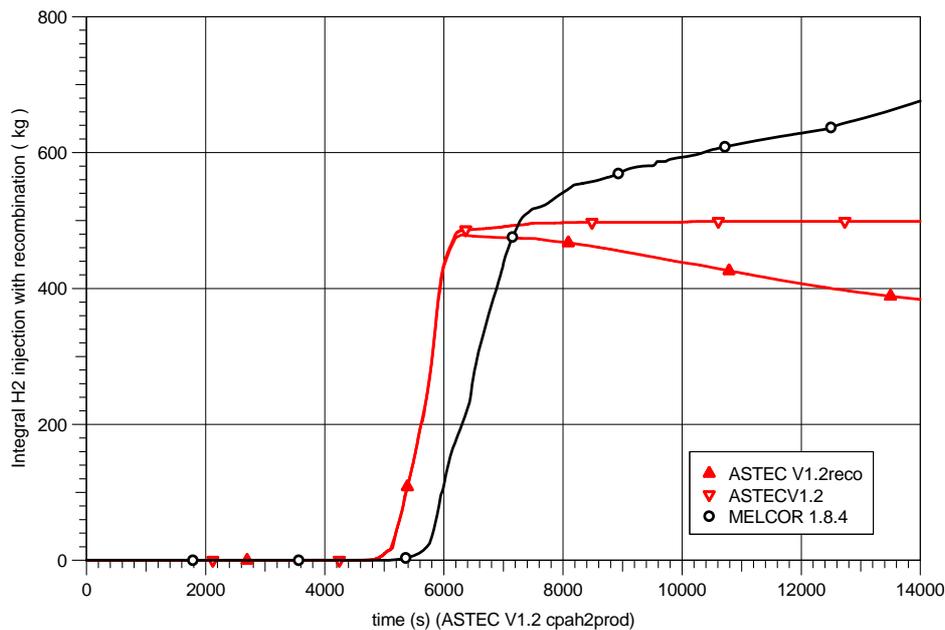


Abb. 5-8 Integrale H₂ Einspeisung in den Sicherheitsbehälter mit Rekos

- In-vessel H₂-Produktion

Die Wasserstoffproduktion in ASTEC V1.2 beginnt ~400 s früher als in MELCOR (siehe Abb. 5-8). Die produzierte Wasserstoffmasse in ASTEC entspricht mit 499 kg fast genau der von MELCOR ausgewiesenen Masse, wenn man nur den Teil berücksichtigt der während des Abschmelzens der Hüllrohre erzeugt wird. Die Wasserstoffproduktion von MELCOR wird nach dem Abschmelzen der Hüllrohre mit einem niedrigeren Gradienten fortgesetzt. 160 kg werden so während der Poolbildung erzeugt. Ab 6200 s wird in ASTEC die Wirkung der Rekombination sichtbar. In der MELCOR-Kurve erscheint die Rekombination nicht.

- Schlussfolgerung

Die Übereinstimmung zwischen dem Primärkreisdruck von ASTEC V1.2 und MELCOR ist gut, ausgenommen der schnellere Druckanstieg von ASTEC während der Kernaufheizphase. Die Übereinstimmung der Druckspitze des Sicherheitsbehälterdrucks ist ausgezeichnet. Der weitere Verlauf des Sicherheitsbehälterdrucks wird in ASTEC V1.2 überschätzt, bis sich der Einfluss der Spaltprodukte bemerkbar macht. Von da an ist er niedriger als der von MELCOR ausgewiesene Druck, weil keine Spaltproduktrechnung in ASTEC V1.2 erfolgte. Die Wasserstofferzeugung startet in ASTEC früher wegen

schnellerer Kernaufheizung. In ASTEC wird keine Wasserstoffbildung aus dem Schmelzpool erkennbar.

5.3 Analyse eines 80 cm²-Lecks im kalten Strang eines DWR 1300 MWe mit ASTEC V1.2

- Einleitung

Ein 80 cm²-Leck im kalten Strang des Druckhalterkreislaufs wurde mit der Version ASTEC V1.2 rev0 analysiert. Aktivierte Module waren CESAR, DIVA, CPA, SOPHAEROS, RUPUICUV, CORIUM, IODE und MEDICIS. Ziel der Analyse war es, zu demonstrieren, dass ASTEC V1.2 in der Lage ist einen schweren Störfall vom 100 % stationären Leistungsbetrieb eines DWR 1300 MWe bis zur Kernzerstörung mit Versagen des RDB und nachfolgender Betonschmelzewechselwirkung zu rechnen. Die Ergebnisse der Analyse wurden mit einer MELCOR 1.8.5 Rechnung verglichen, die in der GRS durchgeführt worden war.

- Annahmen

Folgende Annahmen wurden getroffen:

- Bei Erkennen des Lecks automatisches Abfahren aller Dampferzeuger mit 100k/h.
- Verfügbarkeit von 2 Notkühlsträngen im Dreifachkreislauf bis zur Umschaltung auf den Sumpfbetrieb; Verfügbarer Wasservorrat: 2 Flutbecken.
- Verfügbarkeit der Druckspeicher,
- Bespeisung mit dem Zusatzboriersystem,
- Wasserstoffrekombination im Sicherheitsbehälter,
- Rechnung mit Spaltprodukt/Aerosol-Freisetzung, Rückhaltung im Primärkreis und Einspeisen in den Sicherheitsbehälter.
- Jod-Freisetzung bis in den Sicherheitsbehälter.

Der Anfangszustand der Anlage vor Beginn des betrachteten Störfalls ist 100 % Leistungsbetrieb mit 3765 MW und Normalbetrieb aller relevanten Systeme.

- Vergleich charakteristischer Zeitpunkte

Die charakteristischen Zeitpunkte von den Ereignissen in MELCOR wurden mit zwei ASTEC V1.2-Rechnungen verglichen mit unterschiedlichen DIVA-Start-Zeitpunkten. Die erste Rechnung wurde manuell bei 10000 s gestartet, die zweite automatisch. Der Prozess der Kernzerstörung ist in der ersten Rechnung wesentlich schneller, als in der zweiten. Die einzelnen Phänomene treten 10000 s früher auf als in der MELCOR Rechnung. In der zweiten Rechnung ist die Übereinstimmung mit MELCOR befriedigend. Die Übereinstimmung der Behälterversagenszeiten ist mit 10 %iger Abweichung gut. Die einzelnen Schritte der Kernzerstörung, wie erstes Auftreten der Hüllrohroxidation und Beginn des Kernschmelzens sind 1500 s - 2000 s früher in ASTEC (siehe Tab. 5.4).

Tab. 5-4 Charakteristische Zeitpunkte mit unterschiedlichen Startzeiten von DIVA

Characteristic time points for 80 cm ² leak in cold leg				
Event	1.ASTEC (s)	2.ASTEC (s)	MELCOR (s)	Annotations
Leak initialisation	0	0	0	
RESA/TUSA	18	18	4	Pressure decrease faster in MELCOR
Start of main coolant pumps	19	19	10.6	
Start of 100k/h SG-cool down	10	10	34	
Start/end of HPSI	20/4722	20/4722	40/4075	Flooding tank empty
ACCU cold legs switched off	500	500	510	no feeding with the cold leg ACCUs
ACCU injection hot legs	1781.5	1781.5	1092.5	P<26 bar later reached in ASTEC
Start/end of LPSI	3515 /4722.0	3515 /4722.0	2500/4075.1	P<10 bar later in ASTEC
End of ACCU injection hot leg	5500	21000	5880	
Start of DIVA	10000	21432		
First oxidation of cladding	12987	21433	23190	MELCOR T>1073K
Start of FP-release	13504	21883	23453	
Melting of control rods (AIC)	13713	22106	24070	
Start of core melting	15639	22330	24500	Corium into lower head / core melting
Failure of core support plate	-	-	28339	Not modelled in ASTEC
RPV failure	29628	37587	34270	ASTEC: max temperature reached

- Primärkreisdruckverlauf

Das Absinken des Drucks zu Anfang des Primärkreisdruckverlaufs von ASTEC ist geringer als bei MELCOR (siehe Abb. 5-9). Die Druckspeichereinspeisung erfolgt 700 s später als bei MELCOR. Der Druckabfall infolge der ACCU-Einspeisung ist fast gleich in beiden Codes. Nach Ausfall der Bespeisung steigt der Druck in ASTEC an und erreicht ca. 2-3 bar höhere Werte als bei MELCOR. Mit dem Start von DIVA, der die

Kernzerstörungsphase einleitet, fällt der Druck wieder ab auf das Niveau von MELCOR. Während des Absturzes von Kernschmelze kann man in beiden Kurven Druckspitzen beobachten, die fast zeitgleich auftreten und deren Spitzenwerte gut übereinstimmen. In MELCOR sind die Spitzen allerdings ausgeprägter. Die ersten Spitzen rühren von dem Schmelzeeintrag in das Wasser des unteren Plenums her und die zweite Spitze von dem Versagen und Absturz der Kerntrageplatte. Diese Kerntrageplatte ist in ASTEC nicht modelliert. In der Spätphase stimmen beide Drücke gut überein.

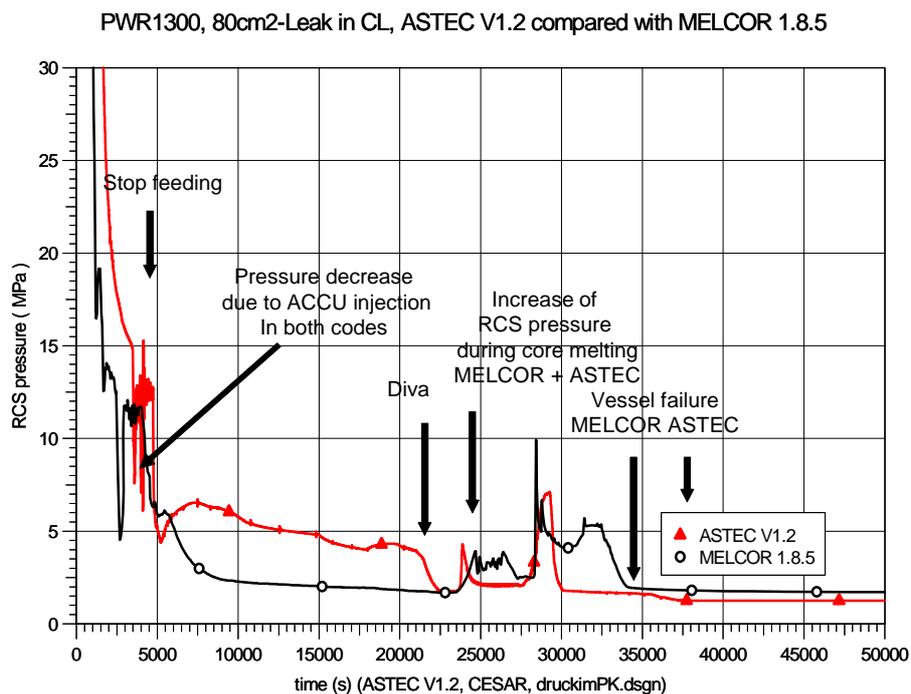


Abb. 5-9 Primärkreisdruckverlauf

- Druck im Sicherheitsbehälter

Der erste Spitzenwerte des Drucks im Sicherheitsbehälter (siehe Abb. 5-10) tritt in Übereinstimmung mit MELCOR auf. ASTEC erreicht das Maximum mit 1000 s Verspätung und einer Abweichung von 0.25 bar. Der weitere Druckabfall bis zum Ende der Bespeisung entspricht dem MELCOR-Verlauf. In der folgenden Aufheizphase bis zum Beginn der Kernzerstörung bei 21400 s tendiert ASTEC zu höheren Werten als MELCOR. Mit dem Beginn der Spaltproduktfreisetzung und dem Kernschmelzen zeigt MELCOR einen Anstieg von 0.5 bar. Dieser Anstieg, der aufgrund des Transports der Nachzerfallsleistung durch die Spaltprodukte in den Sicherheitsbehälter erfolgt, kann in

ASTEC nicht beobachtet werden. Ein Grund hierfür könnte in der unrealistisch starken Spaltproduktrückhaltung im Primärkreis und insbesondere im oberen Plenum liegen. Während der MCCI-Phase steigt der ASTEC-Druck im Sicherheitsbehälter wieder an und erreicht das Druckniveau von MELCOR.

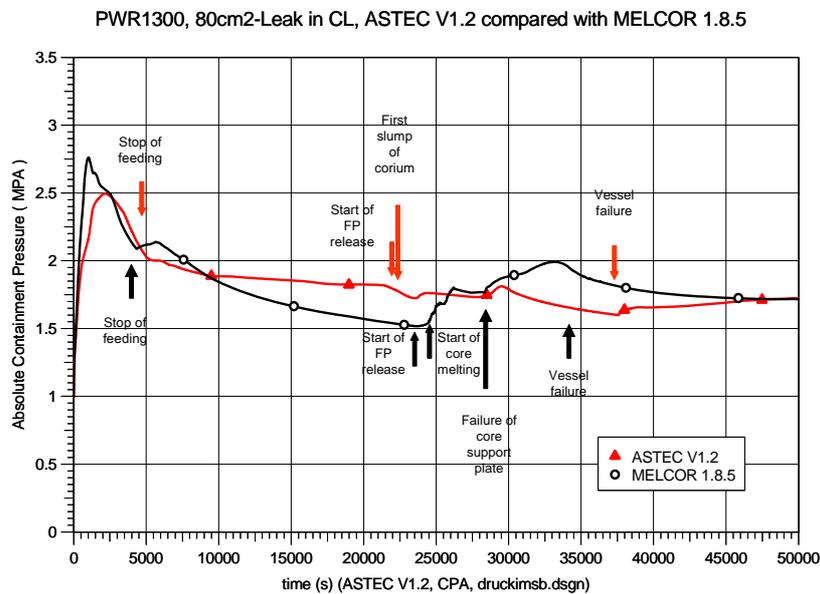


Abb. 5-10 Druckverlauf im Sicherheitsbehälter

- H₂-Produktion

Die in-vessel Wasserstoffproduktion von ASTEC ist mit 290 kg nur halb so groß wie die von MELCOR (siehe Abb. 5-11). Die Freisetzungsraten während des Abschmelzens der Hüllrohre sind in beiden Codes gleich, unterscheiden sich jedoch in der Phase der Freisetzung aus dem Schmelzpool. Hier ist die MELCOR-Freisetzungsrates wesentlich geringer als zu Anfang. In ASTEC kann ein signifikanter Rückgang der Freisetzungsrates nicht beobachtet werden. Die Gründe für die geringere Wasserstoffproduktion in ASTEC müssen untersucht werden. Die ex-vessel Freisetzungsrates ist in ASTEC stärker ausgeprägt. Grund ist, dass bei ASTEC eine dreiphasige Schmelze mit metallischer Schicht angesetzt wurde. Diese führt zu einer verstärkten Wasserstoffproduktion und einer tieferen axialen Erosion als bei Ansatz einer homogenen Schmelze, wie sie in MELCOR angenommen wurde.

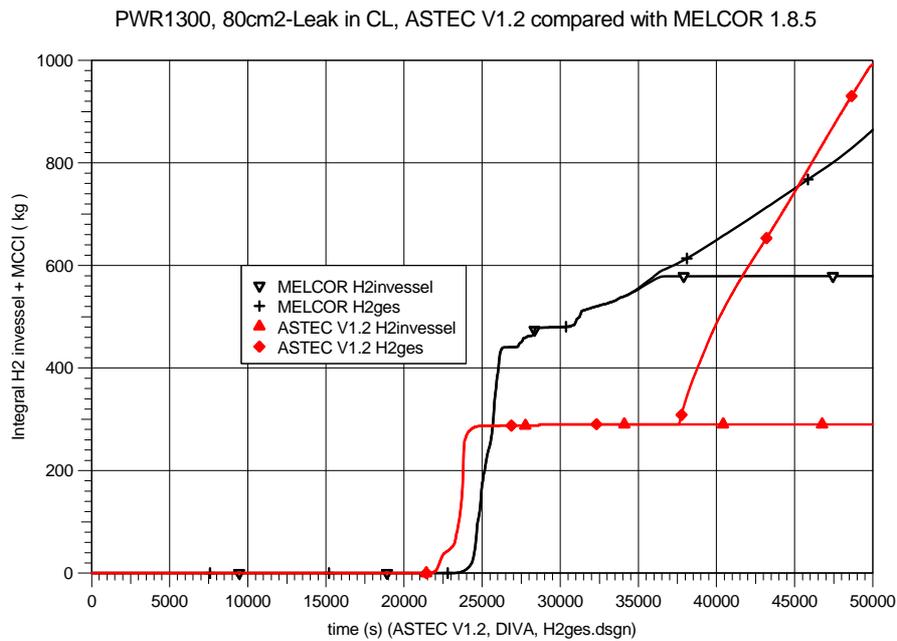


Abb. 5-11 Integrale H₂ In-vessel- und Ex-vessel-Einspeisung in den Sicherheitsbehälter

- Aerosole

Die Aerosole werden im gesamten Kreislauf, über die Dampferzeuger in Richtung auf das Leck im kalten Strang transportiert und in den Sicherheitsbehälter eingespeist. Die Ergebnisse von SOPHAEROS zeigen, dass ein großer Anteil der Spaltprodukte/Aerosole im oberen Plenum zurückgehalten wird (siehe Abb. 5-12). Die Aerosolmasse, die in der in-vessel Phase im Kern erzeugt wird beträgt 3930 kg. Davon bleiben 2765 kg im oberen Plenum, in den Dampferzeuger-U-Rohren werden 265 kg abgelagert. Den Sicherheitsbehälter erreichen nur 2 kg. Dieses Ergebnis dürfte nicht der Realität entsprechen. Die Ablagerungen im oberen Plenum sind weit überschätzt. Experimentelle Ergebnisse (FPT1) deuten nicht auf solch große Ablagerungen im oberen Plenum hin. Die Gründe für die extremen Ablagerungen liegen in der Geometrie des oberen Plenums mit seinem extrem großen Durchmesser und vertikaler Strömung. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig.

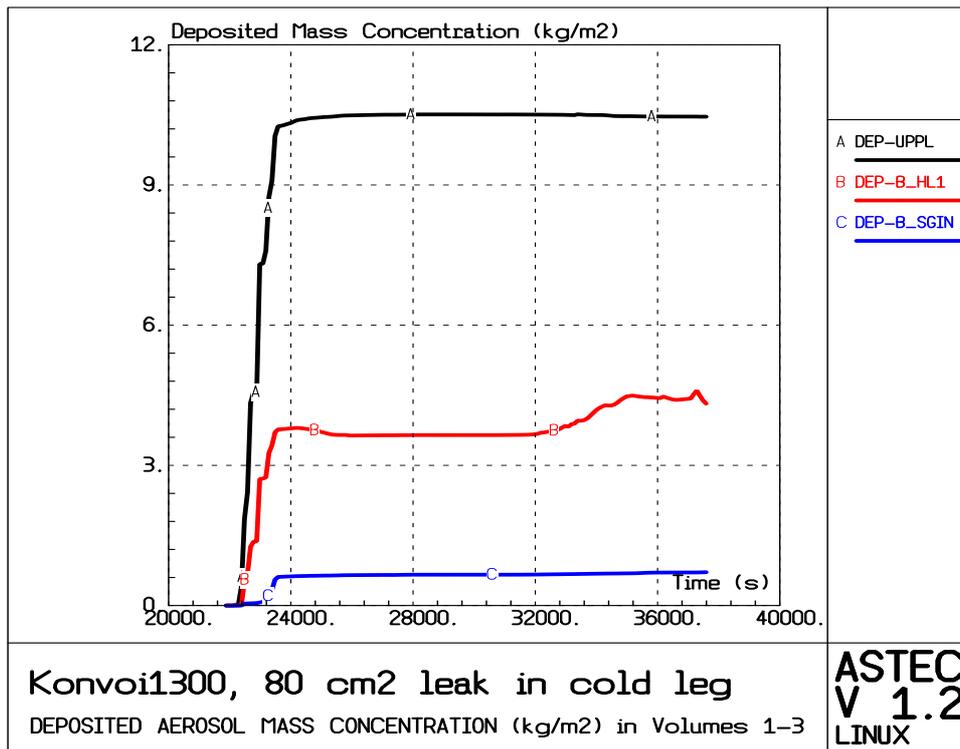


Abb. 5-12 Abgelagerte Aerosol-Massen Konzentration in den ersten drei Volumen

- Jod

Von den 16 kg Jod, die aus dem Kern freigesetzt werden, erreichen nur 44 g den Sicherheitsbehälter. Das meiste Jod bleibt im Kreislauf kondensiert auf Aerosolen, als dampfförmiger Schwebstoff oder abgelagert an den Wänden. Die Jodmasse, die im Sicherheitsbehälter auf den Wänden abgelagert wird, beträgt 19 g. Abb. 5-13 zeigt die Jodmenge, die auf den trockenen und nassen, gestrichenen Wänden im Sicherheitsbehälter abgelagert wird.

Die Masse Jod, die den Sicherheitsbehälter erreicht, ist zu niedrig. Die Ursache hierfür bedarf der näheren Untersuchung.

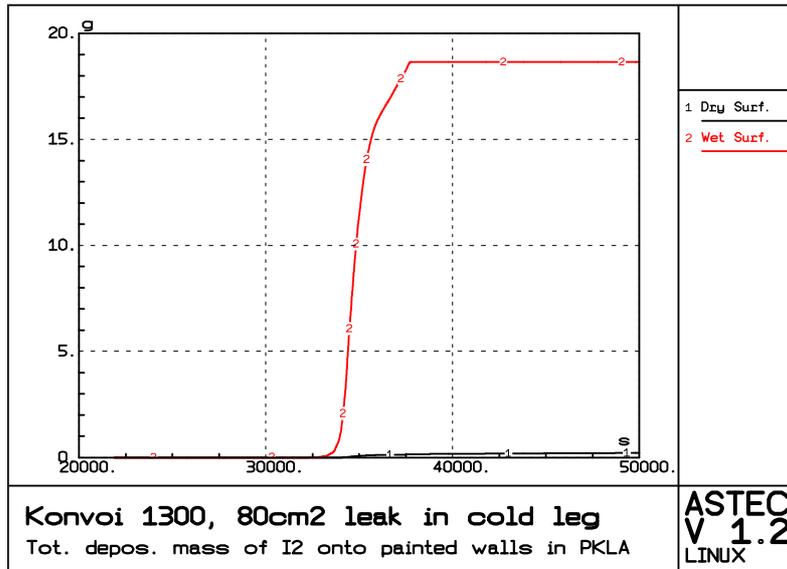


Abb. 5-13 Abgelagerte Jod Masse auf den gestrichenen Wänden im Sicherheitsbehälter

- MCCI

Um den nichthomogenen Programmteil zu testen wurde die Rechnung unter der Annahme einer geschichteten Schmelze mit Kruste, metallischer und oxidischer Phase durchgeführt. Da kein Wassereintrag gerechnet wurde, konnte eine Krustenbildung nicht beobachtet werden. Abb. 5-14 zeigt das Kavernenprofil nach der Beton-Schmelze-Wechselwirkung.

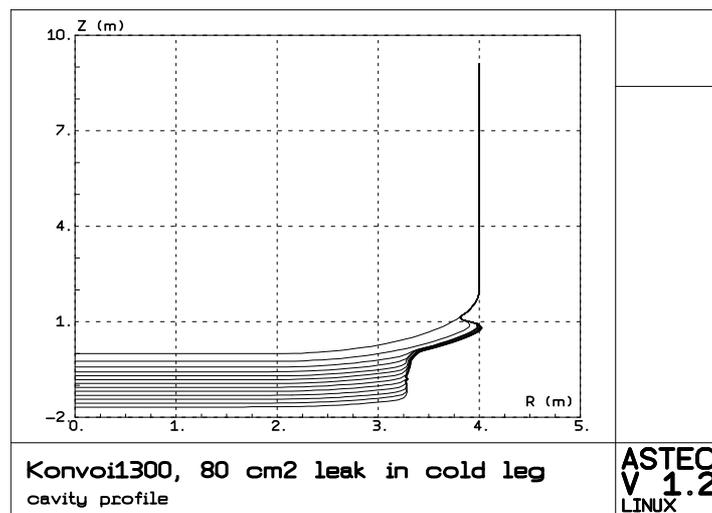


Abb. 5-14 Kavernenprofil nach der Beton-Schmelze-Wechselwirkung

- Schlussfolgerung

Eine erste Analyse mit der neuen ASTEC-Version zeigt, dass die Stabilität des Codes signifikant erhöht worden ist. Eine Rechnung mit allen Modulen ist möglich. Einige Parameter wurden mit MELCOR verglichen und zeigen, dass in den wesentlichen thermohydraulischen Ergebnissen wie Primärkreisdruck, Druck im Sicherheitsbehälter qualitativ und quantitativ ähnliche Resultate erzielt werden konnten. Das Auftreten der Einzelphänomene während der Kernzerstörungsphase ist im Fall der Rechnung mit dem automatischen DIVA-Start in guter Übereinstimmung mit MELCOR. Große Unterschiede wurden beobachtet bei der Wasserstoffproduktion in der in-vessel Phase. Nur 50 % der Masse, die MELCOR ausrechnet, konnten erzielt werden. Außerdem traten Unterschiede in der Freisetzungsrates auf. Die in den Sicherheitsbehälter gelangten Aerosol- und Jodmassen sind zu gering, möglicherweise wegen zu hoher Ablagerungen im oberen Plenum. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig.

5.4 Analyse des Kreislauf- und Containmentverhaltens für eine WWER-1000-Anlage bei Unfällen

In diesem Kapitel werden Ergebnisse aus ASTEC Rechnungen zum Kreislauf- und Containmentverhaltens bei einem Unfall in einem KKW russischer Bauart mit einem WWER-1000/W-320 Reaktor dokumentiert. Als auslösendes Ereignis wurde ein kleines Leck (sog. 38.5 cm² SBLOCA) im kalten Strang des Primärkreislaufs einhergehend mit einem totalen Stromausfall sowie ohne Personaleingriff unterstellt.

5.4.1 ASTEC-Anwendung

Innerhalb der Projektlaufzeit wurden mehrere überarbeitete ASTEC Versionen freigegeben. Daraus ergab sich die Notwendigkeit zahlreicher Wiederholungsrechnungen, für die der Datensatz dann jeweils partiell angepasst werden musste.

Zunächst wurden Rechnungen mit ASTEC V1.0 unter Einbindung der Module CESAR, DIVA und CPA durchgeführt, wobei nach umfangreichen Datensatzanalysen und Modifikationen der Unfall letztendlich bis zum Versagen des Reaktordruckbehälters (RDB) gerechnet werden konnte. Mit der Mitte 2004 verfügbaren ASTEC Version V1.1 wurden ebenfalls Rechnungen durchgeführt, wobei dann auch das Spaltprodukttransportmodul SOPHAEROS aktiviert wurde. Aufgrund von frühzeitigen Programmabstürzen konnte

speziell bei dieser Version aber nur die frühe Phase, d. h. bis zum Einsetzen der Kernfreilegung und -zerstörung, gerechnet werden. Probleme mit der numerischen Stabilität, insbesondere bei der CESAR/DIVA Kopplung und auch bei der Berechnung des Spaltprodukttransports im Leckstrang des Primärkreislaufs (Modul SOPHAEROS), ließen eine Simulation der späten Phase bis zum RDB-Versagen nicht zu.

Schließlich wurde eine modifizierte Version V1.1p2 freigegeben. Damit konnte der unterstellte Störfall (38.5 cm² Leck im kalten Strang) mit einem leicht modifizierten Datensatz bis zum Versagen des RDB durchgeführt und auch das SOPHAEROS Modul für den Spaltprodukttransport durch den Kühlkreislauf eingebunden werden.

Mitte 2005 stand eine nochmals stark überarbeitete Version (V1.2) zur Verfügung, mit der der Störfallverlauf unter Berücksichtigung von Spaltproduktfreisetzung, -transport und -ablagerung durch den bzw. im Kühlkreislauf und -freisetzung ins Containment gerechnet werden konnte. Als wesentlicher Unterschied zu den Rechnungen mit den verschiedenen Vorgängerversionen von ASTEC wurde das Versagen des RDB in der neuen Rechnung erst zu einem deutlich späterem Zeitpunkt berechnet (nach ca. 10 h bei V1.2 gegenüber 4.5 h bei V1.1). Erste Analyse zeigten eine beträchtlich verlängerte Einspeisedauer der Hydroakkumulatoren auf, die eine längere Kühlung der Kernregion zur Folge hatte. Die Ursachen für dieses Verhalten konnten im Rahmen der Projektlaufzeit nicht mehr abschließend geklärt werden, zumal schon kurz nach Freigabe der Version V1.2 eine überarbeitete Version V1.2 p2 angekündigt wurde, die nochmals wesentliche Modifikationen enthalten sollte. Aus diesem Grund wurden die Ergebnisse der Version V1.2 nicht weiter analysiert, so dass sich die folgenden Ausführungen im Wesentlichen auf Rechnungen mit der Version V1.1 p2 konzentrieren.

5.4.2 Rechnungsergebnisse

Die hier vorgestellten Rechnungen mit ASTEC V1.1 p2 wurden unter Einkopplung der Module CESAR, DIVA, SOPHAEROS und CPA durchgeführt. Durch die Auswahl vorgenannter Module können wesentliche Phänomene und Ereignisse des Unfalls berechnet werden. Dies sind im Einzelnen:

- die Thermohydraulik im Primär- und Sekundärkreislauf (CESAR),
- die Kernaufheizung und -zerstörung sowie die Spaltproduktfreisetzung (DIVA + ELSA),

- die Thermohydraulik, der Spaltprodukttransport und die Ablagerung im Containment (CPA) sowie
- der Spaltprodukttransport und die -ablagerung längs des Transportpfades im Primärkreislauf, d.h. heißer Strang, Dampferzeuger und kalter Strang bis zur Bruchstelle (SOPHAEROS).

Die folgende Ergebnisdiskussion bezieht sich auf Rechnungen, die mit ASTEC auf einem Computer mit Linux-Betriebssystem durchgeführt worden sind. Vergleichrechnungen wurden auch mit einer für ein Windows-Betriebssystem übersetzten ASTEC Version durchgeführt. Ein Vergleich zweier Rechnungen (Windows – Linux) auf Basis identischer Datensätze zeigte mit Blick auf das Eintreten charakteristischer Ereignisse (z. B. Beginn Kernfreilegung) prinzipiell einen ähnlichen Störfallverlauf, jedoch konnten einzelne Ergebnisdaten wie z. B. die insgesamt freigesetzte Masse an Wasserstoff durchaus Abweichungen aufweisen. Tendenziell zeigten die Rechnungen auf Linux-Betriebssystemen außerdem eine größere numerische Stabilität als entsprechende Rechnungen auf einem Windows-Betriebssystem.

Vor der eigentlichen transienten Rechnung wurde eine Startrechnung durchgeführt, um die thermohydraulischen Systemparameter für den stationären Betrieb entsprechend den Anlagenparametern einzustellen. Für die dann folgende Störfallrechnung wurde ASTEC neu gestartet. Eine Übersicht über den zeitlichen Verlauf des Störfalls ist in

Tab. 5-5 für die Rechnung auf einem PC mit Linux-Betriebssystem gegeben, wobei die Ergebnisse aus einer Rechnung mit einem 4-Zonen Containment stammten. Zum Vergleich sind ebenfalls entsprechende Daten für die bereits angesprochene Rechnung mit der ASTEC Version 1.2 angegeben. Zwar wird das Versagen des RDB um nahezu 5.5 h später berechnet, die Zeitspanne zwischen erstmaliger Kernfreilegung und RDB-Versagen unterscheiden sich jedoch nur um etwas mehr als 1 h. Maßgeblich für die Verzögerung ist augenscheinlich die lange Einspeisedauer der Hydroakkumulatoren, die bei der Rechnung mit V1.2 knapp dreimal so lange andauert wie bei der Rechnung mit V1.1 und damit die Kernfreilegung deutlich hinauszögert.

Tab. 5-5 Eintrittszeitpunkt charakteristischer Ereignisse für 38.5 cm² SBLOCA Rechnung mit ASTEC V1.1 und Vergleich mit V1.2

		ASTEC V1.1 p2	ASTEC V1.2
Leckinitiierung	[s]	0	0
Start Einspeisung der Hydroakkumulatoren	[s]	1879	2165
Start DIVA	[s]	2400	2400
Beginn der Spaltproduktfreisetzung	[s]	3987	5380
Ende Hydroakkumulatoren -Einspeisung beendet	[s]	5800	16128
Kern erstmalig komplett freigelegt	[s]	3308	19785
Erste Verlagerung von Material ins unter Plenum	[s]	3899	21437
RDB-Versagen	[s]	16207	35652
Zeitdauer zwischen Kernfreilegung und RDB-Versagen	[s]	12899	16867
Wasserstoff-Freisetzung bis RDB-Versagen	[kg]	254	746
Aerosol-Freisetzung bis RDB-Versagen	[kg]	458	2739

Der grundsätzliche Störfallablauf stellt sich dann wie folgt dar und unterscheidet sich bei den Rechnungen mit ASTEC V1.1 und V1.2 insbesondere in der frühen Phase bis zum Start des DIVA Moduls nicht außerordentlich. Die Zeitpunkte sind für die Rechnung mit der Version 1.1 angegeben, für die Version 1.2 sind sie der Vollständigkeit halber ebenfalls in Klammern beigefügt.

Mit der Initiierung des Lecks im kalten Strang tritt eine schnelle Druckentlastung auf der Primärseite auf. Auf der Sekundärseite steigt dagegen der Druck in den isolierten Dampferzeugern an, so dass bei Erreichen von 7.26 MPa nach ca. 350 s die Frischdampf-Abblaseventile BRU-A öffnen und einen Druckabfall einleiten, der durch das Schließen der Ventile bei einem Druck von 6.28 MPa zunächst beendet wird, worauf

sich ein neuer Zyklus aus Druckanstieg bis zum erneuten Öffnen der BRU-A und nachfolgendem Abfall bis zum Schließen der BRU-A einleitet. Im Primärkreis fällt der Druck bei Störfallbeginn bis zum Einstellen der Sättigungsbedingungen am Leck nach ca. 150 s schnell ab folgt dann dem Druckverlauf der Sekundärseite. Nach ca. 1800 s strömt nahezu reiner Dampf am Leck ab.

Durch den Ausfall aller aktiven Sicherheitseinrichtungen, wie z. B. des Hochdruck- und des Niederdruckeinspeisesystems, verbleiben dann - als passive Sicherheitseinrichtungen - lediglich die 4 Kernflutbehälter (sog. Hydroakkumulatoren) mit einer Kapazität von je 50 m³ Borsäurelösung. Zwei Flutbehälter speisen dabei direkt in das obere Plenum des RDB ein, die anderen zwei in den Ringraum. Mit Erreichen eines Primärkreisdrucks von 5.89 MPa nach 1879 s (V1.2: 2165 s) setzt die Einspeisung aus den Kernflutbehältern ein. Bei 2400 s wird das Modul DIVA gestartet, wodurch dann auch Oxidationsprozesse (Zirkon- bzw. Eisen-Oxidation durch Wasserdampf) und die damit einhergehende Wasserstoff-Freisetzung berechnet werden. Da diese Prozesse exotherm ablaufen und mit zunehmender Temperatur selbstverstärkend sind, stellen sie einen nicht zu vernachlässigen Energieeintrag dar, der teilweise den Energieeintrag der anfallenden Nachzerfallswärme, die typischerweise zu diesem Zeitpunkt noch einige 10 MW beträgt, übersteigen kann, wobei die Oxidation des Zirkons der Hüllrohre deutlich höhere Beiträge liefert. Zu späteren Zeitpunkten ist aber auch der Anteil oxidierenden Eisens nicht zu vernachlässigen. Die wesentlich geringere Zeitspanne vom Zeitpunkt des DIVA-Starts (dann können überhaupt erst Oxidationsprozesse gerechnet werden) bis zum Versagen des RDB bei der Rechnung mit der Version V1.1 verglichen mit derjenigen bei V1.2 spiegelt sich direkt auch in der freigesetzten Wasserstoffmasse wider (vgl.

Tab. 5-5).

Nach ca. 3300 s (V1.2: 19785 s) ist der Kern vollständig freigelegt und heizt sich mit fortschreitender Verdampfung des Restwassers im unteren Plenum weiter auf. Nach weiteren 10 Minuten (V1.2: 27 Min) setzen die Freisetzung von Spaltprodukten sowie die erste Schmelzeverlagerung ins untere Plenum ein. Das verlagerte Corium bildet im unteren Plenum einen Pool aus geschmolzenen und festen Materialien. Dieser führt nach 16207 s (V1.2: 35652 s) zum mechanischen Versagen der Behälterwand des unteren Plenums.

Spaltprodukttransport und -ablagerung im Primärkreis wurden mit dem Modul SOPHAEROS berechnet. Bezüglich der Ablagerung im Bruchstrang des Primärkreislaufs bzw. des Spaltprodukttransports ins Containment zeigt sich z.B. für das Edelgas Xenon eine 100 %ige Freisetzung ins Containment, wohingegen nur 40 kg (31 %) des als Folge der Kernzerstörung freigesetzten Cäsiums ins Containment transportiert und 89 kg im Primärkreis abgelagert werden (vgl. Tab. 5-6). Die Ablagerung findet hauptsächlich gravitationsbedingt in den Wärmetauscherrohren (59 kg in Vol 3) des bei WWER-Anlagen horizontal angeordneten Dampferzeugers statt (sog. "settling").

Tab. 5-6 In den einzelnen Volumen des Bruchstrang abgelagerte ("DEP") und ins Containment freigesetzte ("OUT") Spaltproduktmassen am Beispiel einiger Spaltprodukte (Ausschnitt aus der SOPHAEROS Ausgabedatei)

VOL	Kr	Xe	I	Cs	Rb	Te	Sb	Sr
1	0.0E+00	0.0E+00	1.6E+00	1.9E+01	1.4E+00	2.2E+00	9.8E-02	1.5E-03
2	0.0E+00	0.0E+00	1.1E-83	3.1E-01	0.0E+00	6.5E-03	1.2E-78	1.4E-73
3	0.0E+00	0.0E+00	7.4E-69	5.9E+01	2.1E+00	9.9E+00	4.4E-01	7.5E-76
4	0.0E+00	0.0E+00	5.0E-66	9.4E-02	3.1E-03	3.6E-02	1.3E-38	2.2E-66
5	0.0E+00	0.0E+00	2.7E-01	8.7E-01	1.5E-01	1.2E-01	7.9E-04	4.5E-04
6	0.0E+00	0.0E+00	1.5E-01	5.0E-01	9.6E-02	1.2E-01	8.5E-04	3.6E-04
7	0.0E+00	0.0E+00	4.5E+00	9.0E+00	3.0E+00	3.5E-01	6.5E-03	2.9E-03
DEP	0.0E+00	0.0E+00	6.5E+00	8.9E+01	6.8E+00	1.3E+01	5.4E-01	5.2E-03
OUT	1.9E+01	2.5E+02	3.8E+00	4.0E+01	1.1E+01	7.5E+00	2.2E-01	5.5E-03

Im Containment steigen mit Störfallbeginn Druck und Temperatur durch den Eintrag heißen Kühlmediums rasch an, wobei der Temperaturanstieg im Bruchraum besonders

ausgeprägt ist. Kurzzeitige, starke Temperaturanstiege zu späteren Zeitpunkten lassen sich auf abstürzende, heiße Kerntrümmer zurückführen, die zu heftigen Verdampfungsprozessen in der noch verbliebenen Wasservorlage des unteren Plenums führen. Als Folge davon wird kurzzeitig der Eintrag heißen Dampfes in den Bruchraum verstärkt. In anderen Räumen wie z. B. der Containmentkuppel ist der Temperaturanstieg wesentlich gemäßiger. Der Druckverlauf steigt bei Störfalleintritt zunächst stark an, schwächt sich im nachfolgenden Zeitraum aber ab. ASTEC berechnet einen Maximaldruck im Containment von 2.6 bar.

5.4.3 Schlussbemerkungen

Für einen russischen Reaktor vom Typ WWER-1000/W320 wurde am Beispiel eines kleinen Lecks (38.5 cm^2) im kalten Strang mit vollständigem Ausfall der Stromversorgung die Anwendbarkeit des ASTEC-Codes demonstriert.

Wesentliche Phänomene des Störfalls wie Kernaufheizung, Kernzerstörung, Verlagerung von Kern- und Strukturmaterialien ins untere Plenum des Reaktordruckbehälters, Freisetzung und Transport von Spaltprodukten sowie Druck- und Temperaturentwicklung im Containment konnten erfasst werden, wobei die Rechenzeit im Rahmen dessen lag, was für Integralcodes als eines der Bewertungskriterien angesetzt wurde. Die Laufzeiten lagen meist im Bereich von unter 12 Stunden, konnten in Ausnahmefällen aber auch deutlich darüber liegen.

Des Weiteren wurde die Portabilität von ASTEC überprüft, indem sowohl auf einem PC mit Windows- als auch auf einem mit Linux Betriebssystem Vergleichsrechnungen durchgeführt wurden. Die Ergebnisse zeigten zwar Übereinstimmungen im prinzipiellen Störfallablauf aber teilweise auch deutliche Abweichungen (wie z. B. freigesetzte H_2 -Masse), die nicht abschließend geklärt werden konnten, möglicherweise aber auch auf Compiler-Effekte zurückzuführen ist.

Ein wichtiger Punkt für die weitere Codeentwicklung von ASTEC sollte deshalb einerseits der Abbau des beobachteten Portabilitätseffektes sein. Eine Verbesserung der Codestabilität ist zwingend notwendig, um PSA-Analysen zu ermöglichen. Mit Blick auf den hier diskutierten Störfallverlauf sind weitere Analysen notwendig. Insbesondere ist ein vertiefender Vergleich von ASTEC mit anderen Störfallanalysecodes auch in der späten Phase bis zum Versagen des RDB anzuraten.

6 Qualitätssicherung und Nutzerbetreuung

6.1 Regressionstesten von COCOSYS

6.1.1 Qualitätssicherung und Nutzerbetreuung

Um mit Programmen wie COCOSYS und ASTEC belastbare sicherheitstechnische Aussagen machen zu können, ist neben einer ausführlichen Dokumentation der Validierungsrechnungen und der bei Anwendungsrechnungen erzielten Ergebnisse das Aufzeigen von Unsicherheiten und Modelldefiziten unerlässlich. Die inzwischen zahlreichen externen Nutzer beider Programme benötigen eine intensive Betreuung, damit deren spezifische Anwendungen erfolgreich durchgeführt werden können. Durch die externen Nutzer wird zum einen das Anwendungsspektrum der Codes erheblich erweitert, zum anderen werden dadurch mit großer Wahrscheinlichkeit bisher unerkannte Defizite in COCOSYS und ASTEC sowie deren Dokumentation entdeckt und können entsprechend korrigiert werden.

6.1.2 Regressionstesten von COCOSYS unter Nutzung der FFT-Methode

Zum Vergleich von Rechenergebnissen zum Experiment oder anderen Ergebnissen wird das Werkzeug CASEM /LEO 94/ verwendet. Mit Hilfe der Fehlerfunktion $\Delta F(t) = F_c(t) - F_{exp}(t)$ diskreter Fouriertransformationen $\Delta \tilde{F}$ und \tilde{F}_{exp} kann

- eine dimensionslose mittlere Amplitude

$$AA = \frac{\sum_{n=0}^{2^m} |\Delta \tilde{F}(f_n)|}{\sum_{n=0}^{2^m} |\tilde{F}_{exp}(f_n)|}$$

- und eine gewichtete Frequenz

$$WF = \frac{\sum_{n=0}^{2^m} |\Delta \tilde{F}(f_n)| \cdot f_n}{\sum_{n=0}^{2^m} |\tilde{F}_{exp}(f_n)|}$$

definiert werden. Die wesentliche Information hinsichtlich von Abweichungen in dem Wert AA enthalten. Diese repräsentiert die relative Größe der Abweichungen der beiden Kurven. Der Faktor WF charakterisiert die Art des Fehlers, ob diese bei hohen oder niedrigen Frequenzen liegt. Hochfrequente Fehler sind eher akzeptabel (Schwingungen um die Referenzkurve) als niederfrequente Abweichungen. Um vernünftige Resultate zu erhalten ist aber eine generelle Übereinstimmung bei zu vergleichenden Kurven notwendig. Um einen Gesamtüberblick zu erhalten können die AA- und WF-Werte verschiedener Variablen gewichtet zusammengefasst werden:

$$(AA)_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{var}}} (AA)_i \cdot (w_f)_i$$

$$(WF)_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{var}}} (WF)_i \cdot (w_f)_i$$

mit

$$(w_f)_i = \frac{(w_{\text{exp}})_i \cdot (w_{\text{saf}})_i \cdot (w_{\text{norm}})_i}{\sum_{i=1}^{N_{\text{var}}} (w_{\text{exp}})_i \cdot (w_{\text{saf}})_i \cdot (w_{\text{norm}})_i}$$

Wobei w_{exp} , w_{saf} , w_{norm} die Wichtungen aufgrund der experimentellen Genauigkeit, der Sicherheitsrelevanz und der Normierung auf den Druck bedeuten.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde eine Schnittstelle zwischen dem Graphikwerkzeug COCPLOT und dem Programm CASEM erzeugt. Weiterhin wurde die Möglichkeit geschaffen die Ergebnisse von CASEM graphisch darzustellen.

Damit besteht nun die Möglichkeit sich sehr schnell einen Überblick über Änderungen der verschiedenen Versionen anhand von Validierungsrechnungen zu verschaffen.

Diese Möglichkeit wird nun anhand des Experiments BMC-VANAM-M3 (welcher Teil der Basisvalidierung ist) aufgezeigt.

Der Versuch BMC-VANAM-M3 wurde mit den COCOSYS Versionen V2.0v2 und V2.3v4 gerechnet. Hierbei zeigte sich, dass die Ergebnisse etwas unterschiedlich sind. Als Beispiel wird der berechnete Druck beider COCOSYS Versionen im Vergleich zum Experiment in Abb. 6-1 dargestellt. Der mit COCOSYS V2.3v4 (blaue Kurve) berechnete Gesamtdruck ist etwas größer im Vergleich zu dem von COCOSYS V2.0v2 (rote Kurve). Die Ursache liegt vermutlich in der Änderung der charakteristischen Länge an

der Sumpfoberfläche. Diese wurde von 0.01 cm auf 1.0 m erhöht, wobei dann für den Versuch ThAI-TH6 bessere Ergebnisse erzielt wurden. Es ist geplant noch weitere Versuche zu vergleichen, um dann eine endgültige optimale Lösung für die Simulation der Wechselwirkung an der Sumpfoberfläche zu finden.

(V2.3v4) VANAM M3 EXPERIMENT

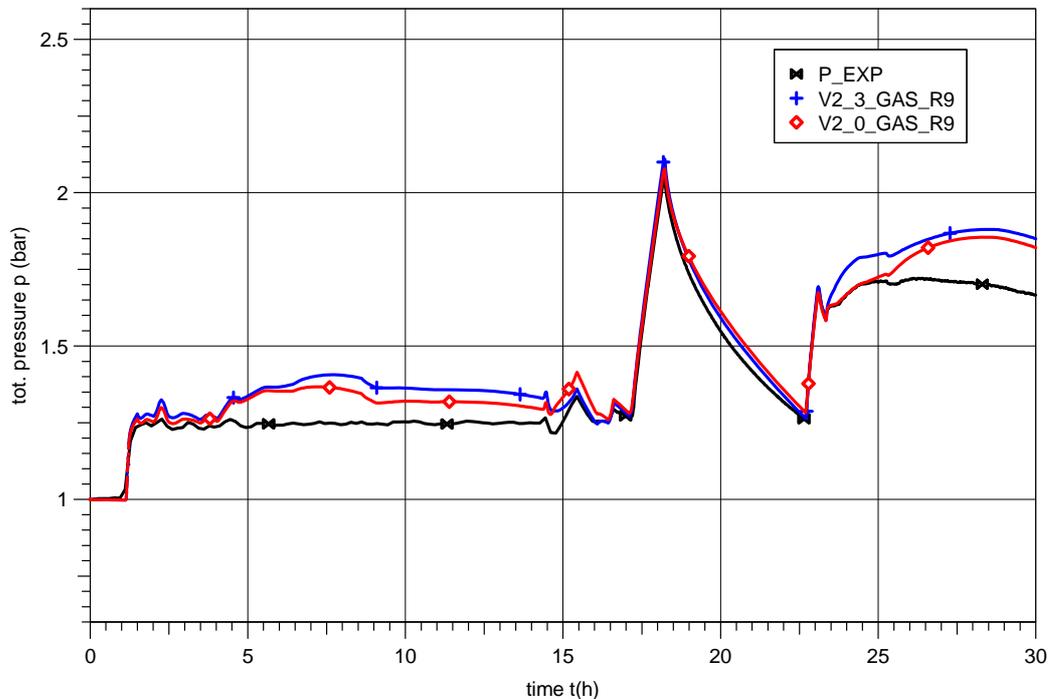


Abb. 6-1 Vergleich des berechneten Gesamtdrucks anhand VANAM-M3

Mit Hilfe der FFT-Methode kann man sehr schnell einen Überblick über die Qualität der Ergebnisse gewinnen. In Abb. 6-2 werden die Resultate (AA und 1/WF) für den Druck, die Temperaturen in R5, R6 und im Dom sowie die Feuchte in R8 dargestellt. Insgesamt liegen die Werte der V2.3v4 Version sowohl für AA (mittlere Abweichung) und 1/WF (Wellenlänge) höher. Damit sind die Abweichungen zum Experiment größer. Dies gilt insbesondere auch für die Feuchte in R8.

(V2.0v2 - V2.3v4) VANAM M3 EXPERIMENT

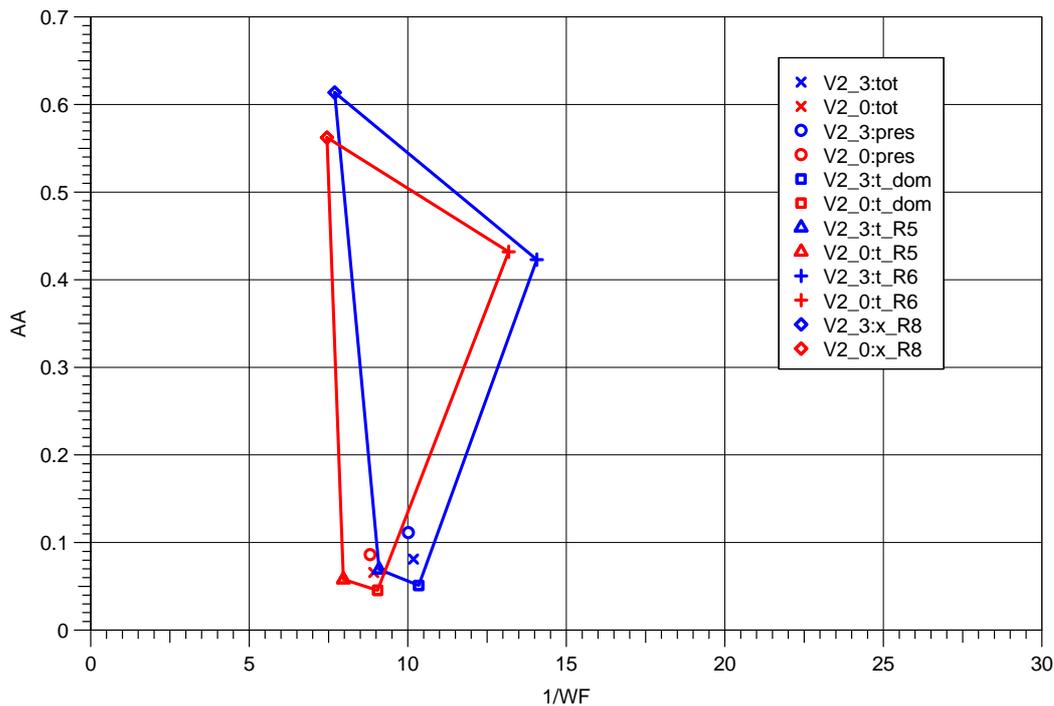


Abb. 6-2 Darstellung der Ergebnisse aus der FFT-Methode

6.2 Archivierung der Daten von COCOSYS zur Validierung und Anwendung

Im Rahmen der Qualitätssicherung werden die erzielten Ergebnisse aus der COCOSYS-Validierung und -Anwendung sowie des Regressionstestens archiviert. Insbesondere aufgrund des anstehenden Generationswechsels ist eine sorgfältige Archivierung von Vorteil. Folgende Schritte wurden diesbezüglich durchgeführt:

- Sammlung der vorhandenen Dokumente
Insbesondere in Bezug auf Experimente wurden die vorhandenen Dokumente gesammelt und sortiert nach den entsprechenden Versuchen. Insgesamt wurden von über 60 Versuchen die Dokumente archiviert und katalogisiert.
- Spezifische Dokumentation der Validierungsrechnungen:
Für einzelne Versuche wurde mit dieser Dokumentation begonnen. Berichte gibt es zurzeit von den Versuchen BMC-Gx4, BMC-VANAM-M3, HDR E42.1 und HDR E42.2. Größtenteils wurden die Rechnungen im Rahmen der entsprechenden Vorhaben dokumentiert. Hier sind daher noch Arbeiten notwendig, die spezifische Dokumentation zu vervollständigen und noch weiter zu ergänzen, um die angestrebte

standardisierte Form der Dokumentation so weit wie mit vertretbarem Aufwand möglich zu erhalten.

– Archivierung der COCOSYS Ergebnisse:

Nach Abschluss von Arbeiten zur COCOSYS Validierung werden die Ergebnisse zentral auf einem Rechner verwaltet. Dabei werden diese sortiert nach Versuch bzw. Anlage / Anwendungsfall, Nodalisierung und COCOSYS Version. Auch hier sind noch Arbeiten notwendig, weitere Versuche und Anwendungsrechnungen zentral zu erfassen.

Im Rahmen des Validierungsvorhabens wurden mit der zentralen Archivierung der Versuchs- und Anwendungsrechnungen begonnen. Diese wird in Zukunft kontinuierlich weiter geführt. Es hat sich gezeigt, dass insbesondere eine genaue Dokumentation der Nodalisierung in elektronischer Form notwendig ist. Wünschenswert wäre dabei die Dokumentation der Herleitung der Eingabegrößen mit Verweis auf die Originaldaten. Damit wäre eine Nachbearbeitung bzw. Ergänzung von Datensätzen wesentlich einfacher.

6.3 ASTEC Qualitätssicherung entsprechend GRS/IRSN Vereinbarung

Von IRSN und GRS wurde gemeinsam ein 'Quality Assurance Manual' erstellt /DOR 07/. Auf der Basis des im September 1994 unterzeichneten 'Memorandum of Understanding' zwischen IRSN und GRS wird von den beiden Organisationen der Integralcode ASTEC (Accident Source Term Evaluation Code) gemeinsam entwickelt. Das QA Manual regelt

- Rahmenbedingungen für die Projektorganisation zwischen und in den beteiligten Organisationen
- Qualitätssichernde Maßnahmen für die Planung des Projekts, die Entwicklung des Codes, die Benutzerbetreuung und die Qualitätssicherung des Codes selbst
- Spezielle Maßnahmen für die Benutzerunterstützung

Für das ASTEC-Projekt (Rahmenbedingungen) sind die handelnden Gremien (Steering Committee (StC), Technical Review Group (TRG)) und Personen bzw. Personengruppen (Projektleiter, Team) und ihre Zusammensetzung benannt. Die Verantwortlichkeiten

ten und Zuständigkeiten sind festgelegt. Die Funktionsträger des ASTEC Projekts wie StC- und TRG Mitglieder, Projektleiter IRSN und GRS, GRS Koordinator und deren Verknüpfung mit der jeweiligen inneren Organisation der Partner ist beschrieben. Hierbei werden die unterschiedlichen Gegebenheiten bei IRSN und GRS berücksichtigt. Bei den Teams sind jeweils Projektleiter und 'Maintenance Centralizer' (zentraler Benutzerbetreuer) als Funktionsträger und ihre Aufgaben genannt.

Bei den Qualitätssicherungsmaßnahmen für die Codeentwicklung, Weitergabe und Betreuung sind Verfahrensregeln für die Aufgabenplanungen für jeweils 2 Jahre, Regeln für die Entwicklung, die Nutzerbetreuung und die Qualitätssicherung des Rechenprogramms und Regelungen für die Auslieferung einer Codeversion festgelegt. Einzelheiten für das Verfahren bei der Codeentwicklung und für die anzuwendenden Programmiersprachen, für die Behandlung von Programmfehlern (anomalies), für die verschiedenen Versionsformen (Release oder Reference Version, Patch, Entwicklerversion) und die Qualitätssicherungsmaßnahmen vor Freigabe einer neuen Release Version (Delivery cases rechnen) sind in jeweils eigenen Anhängen geregelt. Vor Freigabe einer neuen Version sind die sog. 'delivery cases' durchzurechnen, d. h. die in der Basis Validierungsmatrix festgelegten Validierungsfälle und festgelegte Reaktorfälle sind zu überprüfen.

Zu den speziellen Maßnahmen für die Benutzerunterstützung gehören Festlegungen für die Erstellung von Berichten/Dokumentation und die Festlegung zum Konfigurationsmanagement. Für die Dokumentation wurde festgelegt, wie die Deckseiten der ASTEC Berichte auszusehen haben und wer die Berichte jeweils zur Freigabe unterschreiben muss. Grundsätzlich werden Management (Anforderungen, allgemeine Spezifikationen, Besprechungsberichte) und Programm bezogene Berichte unterschieden. Zur Verwaltung der verschiedenen Versionen (Konfigurationsmanagement) wird das CVS System benutzt. Einzelheiten sind wiederum in Anhängen geregelt.

Weitere Einzelheiten können dem ASTEC Dokument zur Qualitätssicherung in der jeweils aktuellen Fassung entnommen werden.

6.4 Dokumentation der Anwendererfahrungen

Für den Kontakt mit externen COCOSYS-Nutzern stehen Möglichkeiten über die COCOSYS Internet-Seite zur Verfügung. Der Zugang zu dieser Seite erfolgt über die

GRS Homepage <http://www.grs.de> (siehe Abb. 6-3) oder direkt über die Adresse <http://domino.grs.de/cocosys/cocosys.nsf> auf den GRS Domino-Server.

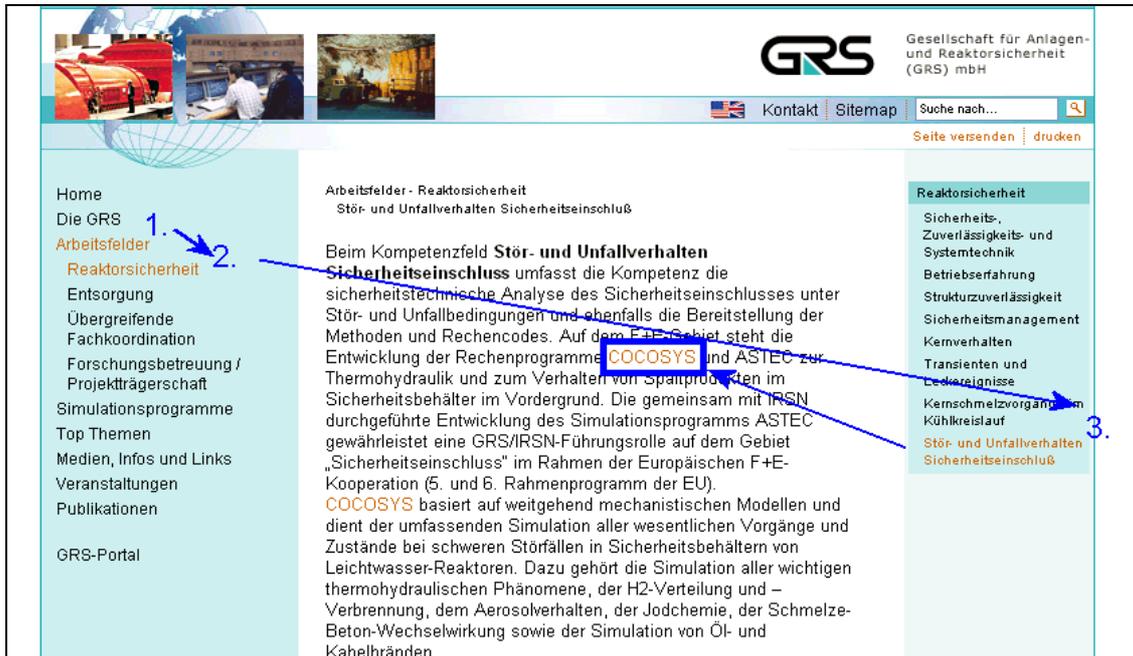


Abb. 6-3 Zugang zur COCOSYS Internet-Seite

Die COCOSYS Seite ist in einen offenen Bereich mit allgemeinen Information und einen Passwort geschützten Bereich, das User Forum, unterteilt (Abb. 6-4). Im Forum werden neben Ergebnissen zur Validierung die in freigegebenen Anwenderversionen gefundenen Fehler dokumentiert und Hinweise zur COCOSYS-Nutzung gegeben. Unter FAQ ist die interaktive Kommunikation zwischen GRS und Nutzern als auch unter den Nutzern möglich (ähnlich einem Chat room).

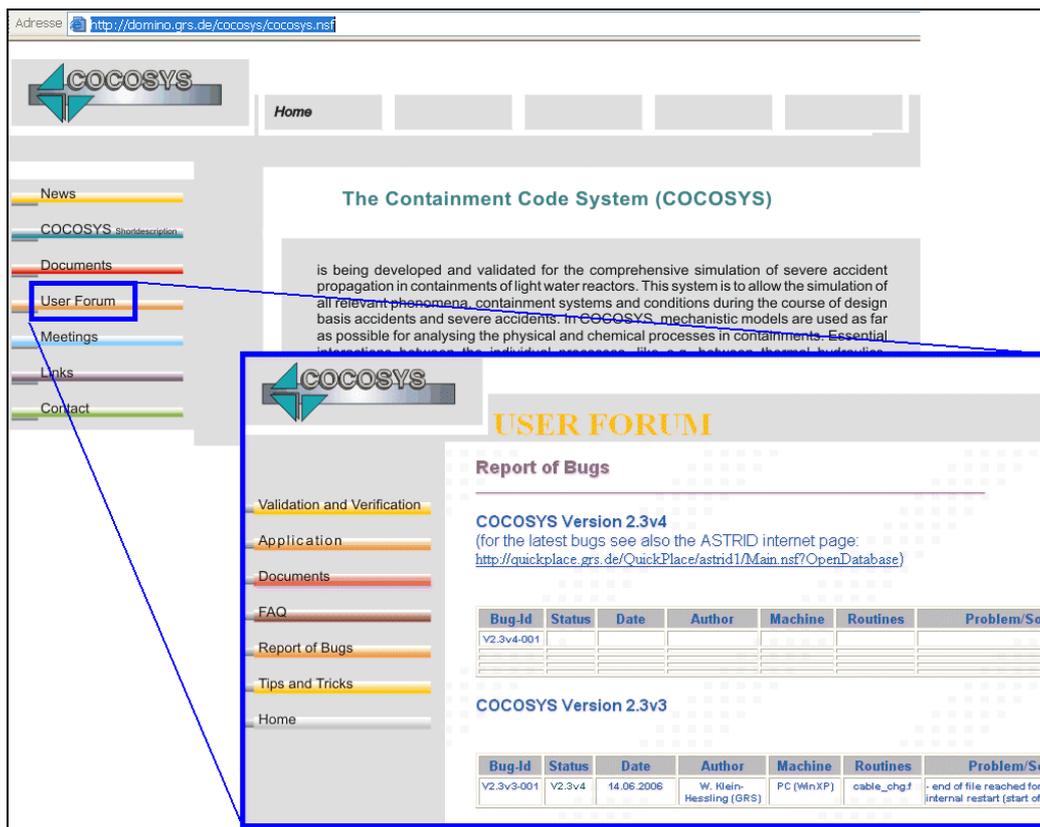


Abb. 6-4 COCOSYS Internet-Seite

Im Vorhaben wurde mit dem Übergang der COCOSYS Seite auf QuickPlace begonnen (gemeinsame Plattform für COCOSYS und das ASTRID Projekt, siehe Abb. 6-5): <http://quickplace.grs.de/QuickPlace/astrid1/Main.nsf?OpenDatabase>.

Unter QuickPlace gibt es bessere Möglichkeiten zur Verwaltung der Nutzerrechte, d.h. die selektive Zulassung von einzelnen Nutzern auf definierte Seiten ist möglich. Über QuickPlace werden inzwischen Updates von neuen Programmversionen an registrierte Nutzer verteilt. Eine automatische E-Mail Benachrichtigung von Nutzergruppen über neue Informationen ist eingerichtet.



Abb. 6-5 Neue COCOSYS Internet-Seite unter QuickPlace

6.5 Durchführung eines COCOSYS Workshops – Einführung eines Userforums

In regelmäßigen Abständen werden COCOSYS Workshops durchgeführt. Diese dienen dem gegenseitigen Erfahrungsaustausch der COCOSYS-Anwender und um die möglichen zukünftigen Anwendungsbereiche von COCOSYS auszuloten. Neben dem Nutzertreffen ist im Internet ein Userforum eingerichtet worden, in dem ständig über die Erfahrungen mit COCOSYS Informationen ausgetauscht werden können.

Um den Erfahrungsaustausch der COCOSYS-Anwender zu unterstützen, wurde im Laufe dieses Vorhabens vom 7. bis 10. März 2005 in der GRS ein COCOSYS-Workshop durchgeführt. Ein Hauptziel des Workshops war unter anderem der Informationsaustausch bezüglich der gewonnenen Erfahrung von externen COCOSYS-Anwendern. Diese Informationen sollen in die zukünftige COCOSYS Entwicklung einfließen, wobei insbesondere die Anforderungen für die Anwendung auf reale Anlagen berücksichtigt werden. Die GRS informierte die Anwender über die neuen Möglichkeiten der COCOSYS Entwicklerversion und über neuere Resultate der COCOSYS-Anwendung und Validierung.

An dem Workshop nahmen 28 externe und 9 interne COCOSYS Anwender/Entwickler aus zwölf Ländern teil.

Die Tagesordnung des Workshops gibt einen guten Überblick über die diskutierten Themen:

Monday, March 7 th , 2005		
1	Welcome and general administrative affairs H.-J. Allelein	13:00
2	Status of development and validation of COCOSYS	
2.1	Actual status and general mid-term planning H.-J. Allelein, GRS	13:15
2.2	General overview and recent extensions of COCOSYS W. Klein-Heßling, GRS	13:45
2.3	Implementation of flame acceleration criteria M. Heitsch, GRS	15:00
2.4	COCOSYS validation on experiment VANAM-M4 K. Fischer, Becker Technologies	15:15
	C o f f e e b r e a k	15:45
2.5	Simulation of containment phenomena with the code COCOSYS M. Bendiab, Ruhr-Universität Bochum	16:15
2.6	Sensitivity analysis of COCOSYS on HDR T31.5 H. Bartalszky, GRS	17:00
	Adjourn	17:30
Tuesday, March 8 th , 2005		
2.7	Validation of CPA (ASTEC) on PHEBUS FPT2 experiment G. Gyenes, JRC Petten	09:00
2.8	Recent application of coupled ATHLET-CD/COCOSYS calculation on PHEBUS FPT1 W. Klein-Heßling, GRS	09:30
2.9	Recent improvements and validation of the iodine model AIM G. Weber, GRS	10:00
	C o f f e e b r e a k	10:45
2.10	Calculation for the validation of the iodine model of COCOSYS M. Bauer, Framatome-ANP	11:15
2.12	Validation of COCOSYS on ThAI – ISP47 Experiment Simulation of Jets and Plumes S. Schwarz, GRS	11:55
	L u n c h	12:30
2.13	ThAI – TH10 Experiment S. Schwarz, GRS	14:00

2.14	COCOSYS application for Kola-3 tests on BC-V213 test facility M. Davydov, EREC	14:30
2.15	COCOSYS post-test analyses of the EREC Bubble Condenser experiment SLB G02 S. Arndt, GRS	15:00
2.16	Results of the COCOSYS Post-Test analysis of the SLB Experiment G02 V. Pustovit, SSTC	15:30
	C o f f e e b r e a k	16:00
2.17	Development of a specific zone model for simulation of a VORTEX condenser - First validation and applications V. Antropov, SEC NRS	16:30
2.18	Discussion	17:00
	Adjourn	17:30
Wednesday, March 9 th , 2005		
3	Plant applications of COCOSYS	
3.1	Modelling of BWR accident transients K. Fischer, Becker Technologies	09:00
3.2	A comparison of the Lumped-Parameter Codes COCOSYS and WAVCO S. Lammertz, Framatome-ANP	09:30
3.3	Containment Analysis during Severe Accident Using the COCOSYS Code K.-G. Petzhold, Framatome-ANP	10:00
	C o f f e e b r e a k	10:30
3.4	Application of COCOSYS-Code in FORTUM Nuclear Services LTD. O. Hongisto, FORTUM	11:00
3.5	COCOSYS Application at Nuclear Regulatory Authority of the Slovak Republic (UJD) J. Husarcek, L. Kubisova, UJD	11:30
3.6	Results of the investigation of the W-213 Containment behaviour under accident scenarios with application of the feed-and-bleed approach , D. Gumenyuk, Energorisk	12:00
	L u n c h	12:30
3.7	COCOSYS application for accident analyses A. Iskra, ET&D	14:00
3.8	Simulation of hydrogen distribution in the containment of an RBMK-	14:30

	1500 reactor E. Urbonavicius, LEI	
3.9	Adaptation of COCOSYS for the RBMK problems D. Pripachkin, NIKIET	15:00
4	Specific applications and extensions of COCOSYS	
4.4	Validation of WEX module for simulation of core-concrete-interaction C. Spengler, GRS	15:30
	C o f f e e b r e a k	16:00
	Discussion	16:30
	Adjourn	17:30
	Dinner (Invitation by GRS)	19:00
Thursday, March 10 th , 2005		
4.2	Using coupled ATHLET-CD/COCOSYS on German power plants W. Klein-Heßling, GRS	9:00
4.3	Application of COCOSYS for fusion type reactors W. Klein-Heßling, GRS	9:45
4.1	Validation of pyrolysis models in COCOSYS within ICFMP project W. Klein-Heßling, GRS	10:15
4.5	Presentation of emergency tool ASTRID W. Klein-Heßling, GRS	11:00
	C o f f e e b r e a k	11:30
5	Final discussion and recommendations from external users	12:00
	End of the meeting	13:00

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse und Erfahrungen nach der jeweiligen Thematik zusammenfassend dargestellt.

6.5.1 Beiträge seitens der GRS

Zu Beginn des Workshops wurde die mittelfristige Planung der COCOSYS Entwicklung und Validierung dargestellt. Es wurde betont, dass beide Vorhaben projektfinanziert sind und diese Vorhaben teilweise nicht parallel laufen, so dass unter Umständen finanzielle Engpässe auftreten können mit entsprechenden Auswirkungen auf die Unter-

stützung der Anwender. Die mittelfristigen Schwerpunkte der COCOSYS Entwicklung ist eine verbesserte Simulation des Quellterms, des Kernschmelzeverhaltens in der Reaktorgrube, Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften von Siedewasserreaktoren, Begleitung der ThAI-Versuche zum Jodverhalten und Brandsimulationen.

In mehreren Beiträgen wurde der aktuelle Stand des COCOSYS Systems, dessen Neuerungen sowie neuere Ergebnisse der COCOSYS Validierung dargestellt.

In Zusammenarbeit mit SEC NRS wird ein detailliertes Modell zur Simulation eines VORTEX-Condensators in den Thermohydraulik-Hauptmodul eingebaut - diese Arbeiten wurden durch SEC NRS auf dem Workshop dargestellt. Ergänzt wurden die Möglichkeiten zur Simulation von Sumpfausgleichsströmungen (SUMP_BAL). Dies wurde insbesondere für eine detaillierte Simulation des Sumpfvhaltens im Zusammenhang mit der sump clogging-Thematik benötigt. Zur Verfügung steht nun auch ein Modell zur Simulation eines Umluftkühlers (Modell aus WAVCO). Insbesondere auf Basis der neueren ThAI-Jod-Versuche wurde das Jodmodell AIM in COCOSYS verbessert. In der nun zur Verfügung stehenden COCOSYS Version ist eine parallele Rechnung mit den verschiedenen Hauptmodulen möglich, sowie wurden ATHLET-CD und COCOSYS gekoppelt. Weiterhin wurde Arbeiten zur Berechnung der beiden Detonationskriterien σ und λ innerhalb COCOSYS durchgeführt.

Für den HDR Versuch T31.5 wurde für die Kurzzeitphase eine Sensitivitätsanalyse mit dem GRS-Programm SUSA durchgeführt. In der im Workshop dargestellten Arbeit wurden insbesondere die Parameter zur Simulation des Wassermittresses und der Wärmeübergänge variiert.

Dargestellt wurden auch die Ergebnisse einer PHEBUS-FPT1 Rechnung mit einer gekoppelten COCOSYS-ATHLET-CD Version, welche die Anwendbarkeit des Programmsystems aufzeigte.

In einem weiteren Vortrag wurden die Verbesserungen des Jodmoduls AIM dargestellt. Diese betreffen insbesondere die I_2 - und CH_3I -Bildung, die I_2 -Absorption/Desorption an Stahlstrukturen (ThAI-Versuche), die automatische Umschaltung zwischen „nasser“ und „trockener“ Chemie (Reaktionskonstanten). Weiterhin wurden die neueren Ergebnisse zur AIM-Validierung dargestellt.

Im Rahmen der Rechnungen zum ISP47 wurde eine Konzeption zur Simulation von Plumes und Jets dargestellt und anhand dieser Rechnungen erläutert. Weiterhin wurden die Ergebnisse der blinden COCOSYS Rechnungen zur TH10 und TH13 dargestellt.

Dargestellt wurden ebenfalls Ergebnisse zur Validierung des DRASYS-Modells anhand des EREC Versuchsstandes. Aufgrund sehr unklarer Randbedingungen insbesondere bei den Wärmeverlusten waren zahlreiche Analysen zur Festlegung der unsicheren Parameter notwendig. Andererseits wurden notwendige Verbesserungen aufgrund der Nachrechnungen umgesetzt, wie z. B. der Durchbruch von feuchter (statt trockener) Luft durch die Wasservorlage.

Zum Abschluss des Workshops wurden aktuelle Ergebnisse des ICFMP (International Collaborative Fire Modelling Project) dargestellt. Insgesamt wurden mittlerweile 5 verschiedene Benchmarks mit verschiedenen Brandsimulationsprogrammen durchgeführt. Weiterhin wurde eine gekoppelte Anwendung (im Bereich sump clogging) von COCOSYS und ATHLET anhand einer deutschen KONVOI Anlage dargestellt. Für den Siedewasserreaktor KKP1 steht nun ebenfalls ein gekoppelter Datensatz zur Verfügung. Es wurde ein Überblick über den Validierungsstand des Programms WEX (basierend auf WECHSL) gegeben. COCOSYS wurde in Teilen ebenfalls anhand eines Versuchs im Bereich Kernfusion validiert. Damit wurde die Anwendbarkeit im Bereich sehr niedrigen Drucks und hoher Temperaturen aufgezeigt. Als letzter Vortrag wurde ein Überblick über das neue Programm ASTRID /SCW 05/ zur schnellen Quelltermabschätzung im Notfall (Decisionmaker) gegeben.

6.5.2 Externe COCOSYS Validierung

Im Rahmen der externen COCOSYS Validierung wurde das Aerosolmodell und das DECOR-Wasserstoffverbrennungsmodell anhand BMC-VANAM-M4 getestet. Das Aerosolmodell lieferte gute Ergebnisse, während sich die Anwendung des DECOR-Modells als problematisch erwies. Mit dem einfachen 1D-Ansatz konnten die komplexeren Vorgänge der Flammenausbreitung nicht nachvollzogen werden. Die Rechnungen sind dadurch insgesamt sehr nutzerabhängig. Angesprochen wurde ebenfalls die Skalierbarkeit der in COCOSYS verwendeten Wärmeübergangsmodelle.

COCOSYS wurde weiterhin anhand der Versuche BMC-PACOS-Px1.2 (Sprühen), BMC-Rx4 (Sumpfheizung) und BMC-Jx2 (He-Jet) validiert. Der Sprühversuch konnte gut nachgerechnet werden. Aufgrund der Annahme einer homogenen Sumpftemperatur im Nichtgleichgewichtszonenmodell, mussten für den Rx4 Versuch der Sumpf aufgeteilt werden um die Ergebnisse zu verbessern. Die Gasverteilung im Jx2 Versuch konnte ebenfalls gut nachgerechnet werden.

Es wurden erste Ergebnisse zur externen Validierung des AIM-Jodmodells anhand ACT/RTF 3b und Caiman 2001/03 dargestellt.

Das DRASYS-Modell wurde extern anhand verschiedener EREC Versuche erfolgreich validiert. Es wurden ähnliche Ergebnisse wie z. B. mit dem Programm VSPLESK erzielt. Abweichungen traten auf bei der langzeitigen Druckberechnung und der Aufheizung des Pools, welche aber auch durch unklare Randbedingungen bedingt sind.

6.5.3 Externe Anwendungsrechnungen

Zur Optimierung der Fahrweise der Notkühlung wurden COCOSYS Rechnung für die Anlage KKB von Becker Technologies durchgeführt. Dabei mussten die Ergebnisse von ATHLET und COCOSYS iterativ angepasst werden, was insbesondere für das TH-System sich als schwierig erwiesen hat, da die Darstellung der Pumpsysteme teilweise unterschiedlich ist. Hier zeigte sich der Bedarf einer gekoppelten COCOSYS-ATHLET Version deutlich. Eine Kopplung beider Programmsysteme erfordert aber auch einen relativ guten Support.

AREVA plant in Zukunft von der Anwendung von WAVCO nach COCOSYS überzugehen. Dazu ist es notwendig, dass die Ergebnisse von WAVCO und COCOSYS für die jeweiligen Problemstellungen vergleichbar sind. Aus diesem Grunde wurden Vergleichsrechnungen der verschiedenen Wärmeübergangsmodelle in WAVCO und COCOSYS anhand einfacher Beispiele durchgeführt. Im Ganzen wurden konsistente Ergebnisse erzielt. Dennoch wird eine Übernahme bestimmter Wärmeübergangsmodelle aus WAVCO gefordert.

Weiterhin wurden von AREVA COCOSYS-Analysen für einen EPR Reaktor präsentiert. Zu diesem Zeitpunkt war der Rechenzeitbedarf für einzelne Analysen mit einer Problemzeit von 30 Tagen noch erheblich. Dies Problem im Bereich Aerosolverhalten wur-

de aber mittlerweile beseitigt. Ansonsten wurde das COCOSYS Programm als zuverlässig und handhabbar im Bereich Simulation von schweren Störfällen betrachtet.

FORTUM präsentierte einzelne Anwendung für die LOVISSA Anlage, welche einen Eiskondensator zum Druckabbau verwendet. COCOSYS wurde für Genehmigungsrechnungen, Parameterstudien verschiedener Sicherheitssysteme, SAM Strategien bzgl. H₂, PSAs, PTS (pressurized thermal shock) Studien und Aerosolrückhaltung durch Sprühsysteme verwendet.

Durch UJD (Genehmigungsbehörde in der Slowakei) wurden verschiedene Analysen für WWER-440/V-230 und WWER-440/V-213 durchgeführt. Ebenso hat UJD sich an den Nachrechnungen von EREC Versuchen beteiligt. Zurzeit sind Vergleichsrechnungen zwischen MELCOR und COCOSYS geplant.

Das Verhalten des Nasskondensators eines WWER440/V-213 Reaktors unter verschiedenen Annahmen wurde mit COCOSYS durch Energorisk Ltd. (Ukraine) untersucht. Die Ergebnisse dieser Rechnungen wurden auf dem Workshop dargestellt.

ET&D erstellt zurzeit einen Datensatz für SU NPP-1 (Ukraine). In der Präsentation wurden erste Rechenergebnisse dargestellt. Hauptzielsetzung ist die Berechnung der Jodfreisetzung sowie Vergleichsrechnungen zu MELCOR.

LEI (Litauen) hat COCOSYS für einen RBMK-Reaktor angewandt. Zur Berechnung der Gasverteilung wurde eine detaillierte Nodalisierung erstellt. Die Steuerung von Sicherheitssystemen ist relativ kompliziert, so dass dadurch die Datensatzerstellung fehleranfällig wird. Stabilitätsprobleme sind insbesondere im SPARC Modul aufgetreten. Verbesserungsvorschläge wurden angeregt.

Seitens NIKIET wurden ebenfalls Rechnungen mit COCOSYS für eine RBMK Anlage durchgeführt. Schwerpunkt sind hier Quelltermanalysen. Fragestellungen sind hier insbesondere bezüglich der Anwendung des Jodmodells AIM entstanden (z. B. Dekontamination in einer Wasservorlage - scrubbing). Weiterhin ist die Anwendung von FIPISO noch relativ unklar. Mittlerweile wurden spezifische Abbrandrechnungen für RBMK-Anlagen erstellt. Spezifische Modelle für wassergefüllte U-Rohre wurden in COCOSYS implementiert.

6.5.4 Zusammenfassung

Insgesamt war der zweite COCOSYS Workshop ein voller Erfolg. Die durchgeführten Diskussionen waren sehr offen. Es wurden die Vor- und Nachteile des Programms offen angesprochen und diskutiert. Am COCOSYS Programm besteht ein großes Interesse und wird in verschiedenen Instituten umfangreich eingesetzt. In Zukunft sollten weitere Veranstaltungen und Trainingskurse stattfinden, um den Informationsaustausch und die Qualität des Programms sowie der Anwendungen zu verbessern. Durch die COCOSYS/ASTRID Website wird dieser Austausch erheblich vereinfacht.

Das COCOSYS User Manual muss schneller und besser aktualisiert werden. Durch den Übergang vom Textverarbeitungssystem Quickplace, welches nur von wenigen Mitarbeitern gehandhabt werden konnte, nach MS-Word werden nun Modifikationen und Verbesserungen schneller übernommen. Seitens der Anwender wird ein vereinfachtes Modell zur Simulation von Wasserstoffverbrennungen gewünscht. Dies wäre auch sinnvoll für die schnelle Variante ASTRID. Ein weiterer offener Punkt ist die Simulation von Temperaturschichtungen im Sumpf und die Simulation einer Wasserkonvektion.

7 Zusammenfassung

7.1 Stand der aktuellen Validierung von COCOSYS

In Tab. 7-2 sind der Stand der aktuellen Validierung von COCOSYS, der in einem nächsten Schritt anzustrebende Fortschritt für die Validierung und die aus heutiger Sicht darüber hinaus noch offenen Fragestellungen gegenübergestellt.

Die weitaus überwiegende Zahl der Versuche wurde mit gutem bis sehr gutem Erfolg voraus- bzw. nachgerechnet. Eindrucksvoll zeigt sich dies im internationalen Vergleich der Ergebnisse der in den letzten Jahren seitens der OECD durchgeführten Internationalen Standard-Probleme.

Versuche, die bisher nicht zufrieden stellend nachgerechnet werden konnten, sind der Thermohydraulik-Versuch HDR E11.2, die beiden Jodversuche ACE-RTF3B und RTFP0T2 sowie die Schmelze-Beton-Wechselwirkungsversuche SURC4 und ACE L6. Der Versuch HDR E11.2 ist erneut Gegenstand der zukünftig geplanten Validierungsaktivitäten (siehe Kap. 4.1). Der Jodversuch ACE-RTF3B ist vor kurzem im Zuge der 'Unabhängigen Validierung' durch Framatome mit deutlich besserem Erfolg nachgerechnet worden, was auf den Fortschritt bei der Modellierung der Jodchemie zurückzuführen ist. Eine weitere Verbesserung ist bei Verwendung der seitens der kanadischen Experimentatoren im Rahmen der ISP-41 Endphase empfohlenen Ad- und Desorptionskoeffizienten für Jod an bzw. von Stahloberflächen für diese Versuchsanlage zu erwarten. Anders sieht die Sache beim Jodversuch RTFP0T2 aus, der der erste Versuch der ISP-41 war. Hier darf auch bei Verwendung der o. g. Ad- und Desorptionskoeffizienten kaum mit einem zufrieden stellenden Ergebnis gerechnet werden, da dieser Versuch bei Umgebungstemperatur durchgeführt wurde, also 35 - 40 °C unterhalb des unteren Gültigkeitsbereiches der üblichen LWR-Stöfallchemie von 60 °C. Bezüglich der beiden Schmelze-Beton-Wechselwirkungsversuche SURC4 und ACE L6 bestehen leider erhebliche Unsicherheiten bezüglich der in die Schmelze zur Simulation der Nachzerfallswärme eingekoppelten Leistung, so dass diese Versuche nur eingeschränkt für eine Validierung geeignet sind. Da sich erfreulicherweise die Zahl der Versuche zu dieser Thematik erhöht hat und bei diesen der Leistungseinkopplung besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird, braucht nicht unbedingt auf die beiden o. g. Versuche zurückgegriffen zu werden.

Die in Tab. 7-2 aufgeführten Versuche beinhalten nur Versuche, die von Mitarbeitern der GRS - also der Entwicklerorganisation - vor- und/oder nachgerechnet worden sind. Auch wenn entsprechend den Richtlinien zur Qualitätssicherung von COCOSYS die Personen, die an der Entwicklung eines bestimmten Modells beteiligt sind, nicht dessen Validierung vornehmen, so ist der Kontakt zwischen Entwickler und Validierer gewolltermaßen so eng, dass z. B. Implementierungsfehler kurzfristig behoben werden können. Somit kommt der sog. 'Unabhängigen Validierung' als ein weiterer Zwischenschritt in der Kette 'Entwicklung - "entwicklernahe" Validierung - "Unabhängige Validierung" - Anwendung' eine wichtige Bedeutung zu. Leider ist mit der 'Unabhängigen Validierung' von COCOSYS erst spät begonnen worden, so dass derzeit die Zahl der entsprechend gerechneten Versuche noch recht klein ist. In Tab. 7-1 sind diese Versuche und die durchführenden Organisationen aufgeführt.

Tab. 7-1 Unabhängige COCOSYS-Validierung

BMC Rx4	Sumpfaufheizern	Ruhr-Universität Bochum
ThAI TH13	Thermohydraulik	Ruhr-Universität Bochum
PACOS Px1	Innensprühen	Ruhr-Universität Bochum
HYJET Jx2	Jet- und 'plume'-Verhalten	Ruhr-Universität Bochum
BMC lx9	H ₂ -Deflagration	Ruhr-Universität Bochum
VANAM M4	Thermohydraulik und Aerosolabbauverhalten sowie 'trockene' Resuspension	Becker Technologies
EPRI Serie 2	'pool scrubbing'	Ruhr-Universität Bochum
ACE RTF3B	Jodchemie	Framatome ANP
CAIMAN	Jodchemie	Framatome ANP

Generell liefert die 'Unabhängige Validierung' nicht nur eine belastbare Aussage über die Güte der in der Validierung angesprochenen Modelle, sondern auch über die Praktikabilität der Modellierung, also ihre zu erwartende zukünftige Anwendbarkeit.

Als Fazit lässt sich ziehen, dass trotz des hohen Validierungsgrades von COCOSYS mittelfristig noch weitere Anstrengungen notwendig sein werden, vor allem, wenn man für alle genannten Phänomengruppen einen in etwa ausgewogenen Grad der Validierung anstrebt.

Tab. 7-2 Kommentare zum Stand der Validierung

	Stand der Validierung	angestrebter Beitrag durch ein Anschluss-Vorhaben	über dieses Vorhaben hinaus noch offene Fragestellungen; sonstige Aspekte
Thermohydraulik	Versuche zu 'Passive Systeme' und 'Jet- und 'plume'-Verhalten' gehören in erheblichem Maße auch hierzu; Validierung an unterschiedlichen Versuchsanlagen weitgehend abgeschlossen	bisher nicht erfolgreiche Nachrechnung des Versuchs HDR E11.2 (erwarteter Fortschritt in AP zu diesem Versuch beschrieben)	geeignete Aktivitäten, um den erreichten Spitzenstatus zukünftig zu erhalten
H ₂ -Verbrennung	Validierung des Modells DECOR (nur langsame Deflagration) hat schwierige Anwendbarkeit gezeigt	Feststellung der aktuellen Leistungsfähigkeit von CFX im Rahmen des geplanten ISP durch Teilnahme des Entwicklers ANSYS und des Nutzers GRS	Erarbeitung und anschließende Umsetzung einer Strategie zur analytischen Behandlung aller Verbrennungsregimes in COCOSYS (u. U. durch Anbindung von CFX)
Rekombinatoren	Validierung vom Umfang zu spärlich (obwohl Daten verfügbar)	teilweise durch analytische Begleitung der einschlägigen Versuche in ThAI III	Validierung an Versuchen aus ThAI III notwendig
Aerosole	Transport- und Ablagerungsverhalten systematisch validiert	Validierung eines neu in COCOSYS eingebauten Modells zur so genannten 'trockenen' Resuspension anhand von Versuchen aus ThAI III	Nachrechnung der beiden Versuche LACE LA4 und CSTF der ACE Phase B nach der mittelfristig notwendigen Neuformulierung des gesamten Hauptmoduls AFP erneute Validierung - allerdings mit bereits aufbereiteten Versuchsdaten - notwendig

	Stand der Validierung	angestrebter Beitrag durch ein Anschluss-Vorhaben	über dieses Vorhaben hinaus noch offene Fragestellungen; sonstige Aspekte
Jod	Jodmodell noch starken Entwicklungsschwankungen unterworfen, deshalb auch zukünftig intensive Validierung notwendig	wesentliche Fortschritte zu erwarten durch Validierung anhand von Versuchen der ThAI Phasen II und III sowie durch 'benchmarking' mit dem ASTEC-Modul IODE	Zusammenführung der Jodmodelle AIM aus COCOSYS und IODE aus ASTEC wünschenswert, zöge aber erneute Validierung nach sich
Hydrodynamik	zahlenmäßig schwach	-	Nutzung einiger EREC-Versuche (der Versuch T5 wurde extern erfolgreich zur Validierung der einschlägigen Modellierung im ASTEC-Modul CPA genutzt)
Schmelze-Beton-Wechselwirkung	Versuche mit geschichteter Oxid-/Metall-Konfiguration, insbesondere in 2D-Geometrie, fehlen	Fortschritt durch OECD-MCCI zu erwarten	hängt von den zukünftigen Ergebnissen ab
'pool scrubbing'	alle belastbaren zur Verfügung stehenden Versuche genutzt	-	derzeit keine nationalen oder internationalen Aktivitäten bekannt Modellierung der RUB zur so genannten 'nassen' Resuspension aus dem siedenden Sumpf bedarf der Validierung in der COCOSYS-Umgebung
Innensprühen	bisherige Validierung vom Umfang her der Wichtigkeit des Phänomens nicht angemessen	durch SARNET-Aktivität (MISTRA-Versuch) neu belebt	hängt vom Ergebnis der Rechnungen zum MISTRA-Versuch ab

	Stand der Validierung	angestrebter Beitrag durch ein Anschluss-Vorhaben	über dieses Vorhaben hinaus noch offene Fragestellungen; sonstige Aspekte
Passive Systeme	erscheint derzeit abgeschlossen	-	-
Pyrolyse	bisher nur Kabelbrand	Validierung der neuen 'plume'- und Rußmodellierung anhand geeigneter Versuche aus OECD-PRISME	hängt von den Ergebnissen ab
Jet- und 'plume'-Verhalten	derzeit kein weiterer Bedarf erkennbar	für 'plumes' siehe auch Pyrolyse	-

7.2 Status der generischen Anwendung von COCOSYS

Wenn die Validierung dazu führt, dass ein Code ein hohes Maß an Verlässlichkeit - zumindest seiner zentralen Modellierung - erreicht hat, ist es notwendig, ihn für zunächst einfache Störfallsequenzen anzuwenden. Das Ergebnis der bisherigen umfangreichen Validierungsarbeiten für COCOSYS hat aufgezeigt, dass die COCOSYS-Hauptmodule THY (Thermohydraulik) und AFP (Aerosole, Jod und Spaltprodukte) dieses Maß an Verlässlichkeit und damit auch Aussagesicherheit haben. In konsequenter Fortführung der Qualifizierung des Codes ist in den letzten Jahren begonnen worden, ihn verstärkt für die Rechnung von Störfallsequenzen in unterschiedlichen Reaktortypen zu nutzen. Tab. 7-3, in der die bisherigen Störfallrechnungen mit COCOSYS zusammengestellt sind, zeigt, dass eine ganze Reihe verschiedenartiger Sequenzen in bisher acht verschiedenen Reaktortypen mit COCOSYS analysiert worden sind.

Zu bemerken ist, dass bereits einige Rechnungen für KONVOI in mit ATHLET gekoppelter Form erfolgreich durchgeführt werden konnten, bei anderen ist die Ursache für den vorzeitigen Abbruch (meist in ATHLET) zu beheben. Die meist überwiegende Zahl dieser Rechnungen ist im Rahmen fremd-(nicht BMWi)-finanzierter Aktivitäten der GRS durchgeführt worden.

Die bisher nur wenigen, mit ATHLET-CD/COCOSYS gerechneten Sequenzen haben ein sehr unterschiedliches Verhalten aufgezeigt: einige gekoppelte ATHLET-CD/COCOSYS-Rechnungen liefen recht stabil und benötigten einige Tage an Rechenzeit, andererseits waren große Anstrengungen erforderlich, um eine KONVOI-Rechnung mit einem 80 cm²-Leck bis zum vorgesehenen Ende der Problemzeit (50.000 sec) zu 'bringen'. Eine anstehende Aufgabe wird sein, die Gründe für diese Unterschiede zu identifizieren und - falls möglich - zu beheben.

Die bei solchen Rechnungen gewonnenen Erfahrungen für das Rechenprogramm ergänzen die 'reinen' Validierungsarbeiten nahezu ideal, da Versuche naturgemäß nur Teile des Modellumfangs des Codes ansprechen können, bei Störfallrechnungen - erst recht bei Zugrundelegung unterschiedlicher Szenarien - nahezu die komplette Modellierung getestet werden kann. Der Rückfluss in den Code im Sinne von direkter Fehlerbehebung oder auch Ertüchtigung von Kopplungsstrukturen hat in erheblichem Maße zum national wie international anerkannten hohen Entwicklungsstand beigetragen.

Tab. 7-3 Mit COCOSYS gerechnete Störfallsequenzen

KONVOI	doppelendiger 'surge line'-Bruch	okay
	50 cm ² -Leck im heißen Strang	bis 17.000 s, dann Absturz in AFP
	Rekombinatoranalysen	okay
	gekoppelt mit ATHLET: (ATHLET: 4 'loop' / COCOSYS: 196 Zonen) Frischdampfleitungsbruch	okay
	0.1F Leck im kalten Strang	okay
	0.1F Leck im heißen Strang	Absturz in ATHLET bei ca. 5.400 s
	80 cm ² Leck im kalten Strang	okay
	80 cm ² Leck im heißen Strang	Absturz in ATHLET bei ca. 10.000 s
	1F Leck kaltseitig	läuft nur bis ca. 4.000 s
3 'loop' DWR	'surge line' Bruch	okay
	Rekombinatoranalysen	okay
SWR 69	'station blackout'	okay
	Leck im Deckel	okay
	mit ATHLET gekoppelter Simulatordatensatz	in Testphase
SWR 72	'station blackout'	okay
	Rekombinatorauslegung	okay

	Leck im Deckel	okay
	mit ATHLET gekoppelter Simulatordatensatz	derzeit in Erstellung
WWER 440-230	kaltseitiger Doppelendbruch der Hauptkühlmittelleitung (Auslegungsstörfall)	okay
	Äquivalentleck in der Hauptkühlmittelleitung vor und nach 'confinement' Nachrüstung	okay
WWER 440-213	Äquivalentleck in der Hauptkühlmittelleitung	okay
	Frischdampfleitungsbruch	okay
	Speisewasserleitungsbruch	okay
	Totalausfall der Speisewasserversorgung	okay (54.000 s)
WWER 1000	Äquivalentleck im heißen Strang	okay
	Doppelendiger Bruch des heißen Strangs	okay
RBMK 1500	Auslegungsstörfall 'pressure header' Bruch (109 Zonen)	okay (73.000 s)
	fiktives schweres Störfallszenario (Input von RELAP5) mit H ₂ - und Aerosolfreisetzung	24 h, Absturz in MAG bei Rechnung mit Hygroskopie

7.3 Stand der Validierung von ASTEC-CPA und der generischen Anwendung von ASTEC

Die Zuständigkeit für den zentralen Containment-Modul CPA in ASTEC liegt bei der GRS. Die Versuche, anhand derer die GRS CPA bisher validiert hat, sind in Tab. 7-4 zusammengestellt. Die dortigen Versuche sind bis auf 1 Ausnahme (EREC T5) auch Bestandteil von Tab. 7-2 (COCOSYS-Validierung), so dass auch die Möglichkeit genutzt werden konnte, die CPA-Ergebnisse nicht nur mit den experimentellen Resultaten zu vergleichen, sondern auch mit den entsprechenden mit COCOSYS erzielten Ergebnissen. Die bisher vorgenommenen Vergleiche haben gezeigt, dass die thermohydraulischen Ergebnisse von COCOSYS und CPA nahezu identisch sind, wogegen z. B. beim NUPEC-Versuch zum Innensprühen deutliche Unterschiede auftreten, was auf die unterschiedliche Modellierung des Sprühvorgangs in beiden Codes zurückzuführen ist.

Tab. 7-4 Validierung von ASTEC-CPA

Thermohydraulik	ISP-Versuche in TOSQAN, MISTRA und ThAI (TH13)
Wasserstoffverbrennung	HDR E12.3.2
Rekombinatoren	BMC Gx4
Aerosole	PHEBUS FPT1 (ISP-46) ISP-44 Versuche in KAEVER BMC VANAM M3 (ISP-37)
Hydrodynamik	EREC T5
Innensprühen	NUPEC M7-1 (ISP-35)

Fast alle in Tab. 7-2 aufgeführten Versuche zur Validierung der Modellierung der Schmelze-Beton-Wechselwirkung sind nicht nur für das Modell WEX, das sowohl Bestandteil von COCOSYS wie ASTEC ist, genutzt worden, sondern auch für das neue, von IRSN entwickelte Modell MEDICIS.

Zentrale nächste Validierungsaufgaben der GRS sind die Überprüfung der Mehrraumfähigkeit des Jodmodells IODE in ASTEC anhand der einschlägigen ThAI-Versuche und die Nachrechnung des HDR-Versuchs E11.1 zum Innensprühen. In beiden Fällen stehen auch Ergebnisse entsprechender COCOSYS-Rechnungen zur Verfügung.

Die mangelnde Robustheit früherer ASTEC-Versionen hat dazu geführt, dass die Rechnungen mit ASTEC für KONVOI (mittleres Leck) und WWER-1000 (kleines Leck) erst vor kurzem bis zum vorgesehenen Ende der Problemzeit gelaufen sind (mit der neuen Version ASTEC V1.2). Der nächste Schritt besteht dann darin, die Ergebnisse beider Rechnungen zunächst auf grundsätzliche Plausibilität und dann auch soweit möglich quantitativ zu überprüfen. Es wird angestrebt, dies für die WWER-1000 Rechnung im Rahmen eines WTZ-Vorhabens zu tun.

Der erhebliche Aufwand (Mann-Jahre) vor allem für die KONVOI-Rechnung hat signifikant zur höheren Robustheit der aktuellen ASTEC-Version beigetragen.

7.4 Fazit

Die in diesem Vorhaben durchgeführten Validierungs- und vor allem Anwendungsrechnungen mit dem deutsch-französischen Integralcode ASTEC haben einen signifikanten Beitrag dazu geliefert, dass er heute quasi das Rückgrat der EU-geförderten Aktivitäten zu schweren Störfällen darstellt. Die EU hat ihre Aktivitäten zu schweren Störfällen derzeit im Rahmen ihres 6. Rahmenprogramms im Netzwerk SARNET gebündelt. Die SARNET-Aktivitäten beziehen sich direkt auf ASTEC oder sollen nach Umsetzung in qualifizierte Modelle in ASTEC ihren Niederschlag finden.

Mit den in diesem Bericht dokumentierten Arbeiten zu Validierung und Anwendung wird gezeigt, dass mit COCOSYS ein international als führend angesehenes Werkzeug für die Simulation schwerer Störfälle im Sicherheitseinschluss zur Verfügung steht. Seine Bedeutung für sicherheitstechnische Untersuchungen in realen Reaktoranlagen nimmt mit jedem Schritt seiner weiteren Entwicklung und Validierung weiter zu.

Die in Folgevorhaben vorgesehenen zukünftigen Arbeiten zur Weiterentwicklung und Validierung werden den Einsatzbereich und die Aussagesicherheit weiter erhöhen, wodurch auch die nationale wie internationale Bedeutung und Akzeptanz des Systemcodes COCOSYS nachhaltig gesteigert wird. Beleg für die bereits jetzt erreichte Akzeptanz ist der Einsatz von COCOSYS seitens der Industrie im derzeit laufenden Genehmigungsverfahren für den ersten z. Z. in Bau befindlichen EPR in Finnland.

8 Literatur

- /ALL 01/ H.-J. Allelein, et. al.
Weiterentwicklung und Fortsetzung der Validierung des Containmentcode-systems COCOSYS und des deutsch-französischen Integralcodes ASTEC, Teil 2, GRS-A-2961, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Oktober 2001
- /ALL 03/ H.-J. Allelein et al.
Weiterentwicklung und Fortsetzung der Validierung des Containment Code Systems COCOSYS und des deutsch-französischen Integralcodes ASTEC, GRS-A-2961, September 2003
- /ALS 95/ H. Alsmeyer
Review of Experiments on Dry Corium Concrete Interaction}.
Nuclear Science and Technology: Molten Corium/Concrete Interaction and Corium Coolability - A State of the Art Report, S. 29--82,
European Commission, Luxemburg, 1995.
- /AND 04/ M. Adreani
Summary of selected tests and criteria applied, EVOL-ECORA-D12,
September 2004
- /ARN 01/ S. Arndt, W. Klein-Heßling
Modellierung von Sprühsystemen in COCOSYS, GRS-A-2914, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Mai 2001
- /AST 02/ ASTEC Quality Assurance
IRSN-GRS common referential
F. Jacq, B. Schwinges, ASTEC/QA/01-26, 2002
- /CLE 03/ B. Clement, T. Haste
Comparison Report on International Standard Problem ISP-46 (PHEBUS FPT1), IRSN, SAM-THENPHEBISP-D005, July 2003
- /COC 06/ COCOSYS Validation
COCOSYS V2.3v4, HDR E42.1 experiment
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)mbH, Juni 2006

- /COC 06a/ COCOSYS Validation
 COCOSYS V2.3v4, HDR E42.2 experiment
 Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)mbH, Juni 2006
- /CRA 01/ M. Cranga
 General Specifications of a New Module for MCCI in ASTEC-V1
 IRSN, ASTEC-V1/SPE/01-25, 2001
- /CRA 03/ M. Cranga
 Detailed Specifications of the MEDICIS MCCI Module of ASTEC-V1
 IRSN, ASTEC-V1/SPE/03-01, 2003
- /DOR 07/ J.P. Van Dorsselaere et al.
 ASTEC Quality Assurance IRSN common frame of reference, Rev. 2
 Project reference ASTEC-V1/QA/07-02,
 IRSN/GRS, March 2007
- /DOU 05/ G. Doubleva, H. Alsmeyer et al.
 Large Scale Experiments on Core Degradation, Melt Retention and Coolability: COMET-L1 TEST DATA REPORT
 EU-CONTRACT N° FIR1-CT2002-40158, SAM – LACOMERA – D04
 Forschungszentrum Karlsruhe, 2005
- /FIS 03/ K. Fischer
 Containment Code Benchmark, BF-R68560-7, August 2003, /E11.2/
- /HUE 01/ B. Hüttermann
 Auswertung der Kühlleistung bei HDR-E11-Versuchen, HUE-TN-3/2001,
 Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Juli 2001
- /HUE 02/ B. Hüttermann
 Neue Auswertung der Kühlleistung bei HDR E11-Versuchen, HUE-TN-5/2002, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Dezember 2002
- /KAN 03/ T. Kanzleiter et al.
 Abschlussbericht, Versuchsanlage und Programm zur Untersuchung offener Fragen zum Spaltproduktverhalten im Sicherheitsbehälter, (ThAI = Thermohydraulik, Aerosole, Jod), Teil 1: Versuchsanlage und Thermohydraulikversuche, Berichts-Nr. 1501218 – S1

- /KLH 02/ W. Klein-Heßling
ISP46: PHEBUS FPT1 Test: Calculation with a coupled COCOSYS-ATHLET-CD version, TN-KLH-2/2002
- /PAL 05/ D. Paladino
OECD SETH Project, PRG and MB Meetings, PANDA Tests 9- 9bis- 10-11, Paul Scherrer Institut, Villigen, Switzerland, May 19-20, 2005
- /PHDR 89/ Versuchsprotokoll E11.1, PHDR-Arbeitsbericht Nr. 10.009/89
- /SCH 04a/ S. Schwarz
Blinde COCOSYS Nachrechnung zum ThAI Experiment TH10, e-mail an Teja Kanzleiter, 1. 4. 2004
- /SCH 04b/ S. Schwarz
Hints and recommendations, Simulation of free jets and buoyant plumes. COCOSYS User Forum, July 2004. Internet address on April 22, 2005: <http://domino.grs.de/cocosys/userforumcocosys.nsf?OpenDatabase>
- /SCW 96/ B. Schwinges, et. al.
Weiterentwicklung und Validierung des Rechenprogramms RALOC, Abschlussbericht, GRS-A-2422, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 1996
- /SCW 05/ B. Schwinges, H. Löffler, W. Klein-Heßling
Unterstützung der Notfallschutzorganisation des BMU bei der Bewertung von Quelltermabschätzungen bei einem Ereignis in einem Kernkraftwerk mit möglicher radiologischer Gefährdung der Umgebung, GRS-A-3286, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, August 2005
- /SOA 99/ OECD State-Of-the-Art Report on Containment Thermal-hydraulics and Hydrogen Distribution, Nuclear Safety, NEA/CSNI/R(99)16, 1999
- /THO 97/ D. H. Thompson, M. T. Farmer, J. K. Fink, D. R. Armstrong und B. W. Spencer
Compilation, Analysis and Interpretation of ACE Phase C and MACE Experimental Data: Volume 1 - MCCI Thermohydraulic Results. ACEX TR-C-14, prepared by Argonne National Laboratory for EPRI, Palo Alto, USA, 1997

- /WEG 97/ G. Weber
Einbau eines Faserfiltermodells in FIPLOC
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
GRS-A-2516, Oktober 1997
- /WEG 99/ G. Weber
Erweiterung von FIPLOC zur Simulation von Lüftungssystemen in Anlagen
des Brennstoffkreislaufes
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
GRS-A-2741, Juli 1999
- /WEG 05/ G. Weber
Weiterentwicklung und Validierung des Jodmodells AIM in COCOSYS
GRS-A-3299, Juli 2005
- /ZBO 05/ R. Zboray et al.
OECD/SETH, Panda Test 9bis-1, Quick-Look-Report, TM-42-05-18, June
2005

9 Anhänge

- 9.1 Validation of WEX (ASTEC - V110)
- 9.2 Validation of MEDICIS (ASTEC - V110)
- 9.3 Proposal for an Equivalent Transformation of the Square Geometry in OECD-CCI Tests for the Use in Axisymmetric MCCI Codes
- 9.4 International Standard Problem No. 46
PHEBUS FPT1 Test - Calculation with ASTEC V0.4
- 9.5 Analyses of WWER-440/213 Station Blackout Sequence with ASTEC V1 (module CESAR) and ATHLET Codes
- 9.6 Comparative Calculation of 5 % SB LOCA in a KONVOI Reactor using ASTEC and ATHLET System Codes
- 9.7 200 cm²-Leak in the Hot Leg of a German PWR 1300 MWe Calculation with ASTEC V1.2
- 9.8 ASTEC - Reactor Application Report
MB LOCA for KONVOI 1300 PWR, First Results
Calculation with ASTEC V1.2
- 9.9 COCOSYS and ASTEC Analyses of Iodine Multi-Compartment Tests in the ThAI Facility
- 9.10 ASTEC - Implementation of Simple Passive Autocatalytic Recombiner Models in ASTEC
- 9.11 ISP 46:
PHEBUS FPT1 Test - Calculation with a coupled COCOSYS – ATHLET-CD version

10 Verteiler

BMWi

Referat III B4 1 x

GRS-FB

Internationale Verteilung 40 x

Projektbegleiter (Seh) 1 x

GRS

Geschäftsführung (Hah, Stj) je 1 x

Bereichsleiter (Zir, Tes, Erv, Lim, Prg, Wav) je 1 x

Abteilungsleiter (All, GlS, Lab, Bea) je 1 x

Projektbetreuung (Kgl) 1 x

Projektleiter (All) 3 x

Informationsverarbeitung (Nit) 1 x

Bibliotheken (Garching, Köln) je 1 x

Autoren (Arn, Klh, Luw, Neu, Ren,
Scw, Scz, Spc, Weg) je 1 x

Gesamtauflage: 70 Exemplare